

การเตรียมฟิล์มกราฟีนออกไซด์และวัสดุผสมเพื่อการประยุกต์ใช้งาน  
สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

PREPARATION OF GRAPHENE OXIDE AND COMPOSITE FILMS  
FOR ELECTRONIC DEVICE APPLICATIONS



นายโพธิญาณ สองแก้ว  
POTIYAN SONGKEAW

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-NT-D-001-004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION OF GRAPHENE OXIDE AND COMPOSITE FILMS  
FOR ELECTRONIC DEVICE APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF PHILOSOPHY IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY  
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2018

KMITL-2018-NT-D-001-004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมฟิล์มกราฟีนออกไซด์และวัสดุผสมเพื่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

นักศึกษา

นายโพธิญาณ สองแก้ว

รหัสประจำตัว

56607014

ปริญญา

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา

นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

พ.ศ.

2561

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร. บุญจพล ต้นอู๋

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผศ.ดร.กรกช อ่อนละอ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพื่อประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์วัดความชื้นและหน่วยความจำ สารตั้งต้นกราฟีนออกไซด์ถูกเตรียมโดยกระบวนการ modified Hummer's method คุณสมบัติของวัสดุทั้งกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ตรวจสอบด้วย เทคนิครามานสำหรับข้อบกพร่อง เทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี (XPS) สำหรับพันธะทางเคมี ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์เล็กราดสำหรับตรวจสอบความหนาพื้นผิว เทคนิคการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR) สำหรับตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน และเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์สำหรับตรวจสอบโครงสร้างฟิล์ม จากนั้นจะนำสารตั้งต้นกราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบเพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นฟิล์มสำหรับอุปกรณ์วัดความชื้นโดยทำการเตรียมฟิล์มด้วยกระบวนการหยดเคลือบที่เงื่อนไขจำนวนครั้งในการหยดแตกต่างกัน จากการตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเชิงซ้อนเพื่อใช้วัดปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ พบว่าอุปกรณ์สามารถตอบสนองกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 11-93% มีค่าการตอบสนอง 99.71% ระยะเวลาตอบสนองและคืนตัว 17 วินาที และ 5 วินาที ตามลำดับ มีค่าฮิสเทอรีซิสที่  $\pm 3.64\%$  จากนั้นได้ทำการเตรียมฟิล์มวัสดุผสมระหว่างวัสดุผสมกราฟีนกับสารโพลีเมอร์เพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำ โดยจะทำการประดิษฐ์อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันสองแบบ โครงสร้างแรกใช้โพลีเมอร์เอททิลีนไวนิลอะซิเตท (EVA) ผสมกับกราฟีนออกไซด์ด้วยความเข้มข้นที่ต่างกัน แล้วขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการหมุนเคลือบบนฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ที่อยู่บนพลาสติกโพลีเอทิลีนเนฟทาเลท จากนั้นประกบด้วยขั้ว ITO อีกฝั่งแล้วรีดร้อน อุปกรณ์ที่ได้จะมีโครงสร้าง ITO/EVA:rGO/ITO ใช้เทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโตรสโคปีตรวจสอบสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้าตรวจสอบด้วยกราฟแรงดันและกระแส พบว่า กราฟีนออกไซด์เปลี่ยนเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และอุปกรณ์มีค่าการทะลุผ่านของแสงมากกว่า 60 % สามารถเก็บข้อมูลได้ 2 สถานะ โดยมีค่าอัตราส่วนของสถานะเปิดต่อสถานะปิดเป็น  $5 \times 10^5$  มีระยะเวลาการอ่านต่อเนื่องมากกว่า  $10^4$  วินาที และเขียนครั้งเดียวอ่านได้หลายครั้ง (WORM) อีกโครงสร้างใช้สารโพลีเมอร์โพลีไวนิลไพโรไรโดยผสมกับกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน แล้วขึ้นรูปด้วยการหมุนเคลือบบนฐานรองรับ ITO ที่อยู่บนกระจก จากนั้นขึ้นรูปขั้วอลูมิเนียม (Al) ด้วยการระเหยด้วยความร้อน การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าพบว่า อุปกรณ์หน่วยความจำเป็นแบบ WORM มีอัตราส่วนสถานะเปิดต่อสถานะปิดเป็น  $10^4$  อ่านและเขียนข้อมูลที่ 1 โวลต์ และ 5 โวลต์

ตามลำดับ มีระยะเวลาการอ่านต่อเนื่องมากกว่า  $10^7$  วินาที และมีการเปลี่ยนกลไกการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปตามปริมาณกราฟีนออกไซด์ เพื่อสามารถเตรียมอุปกรณ์ได้ง่ายขึ้น จึงพัฒนาการเตรียมกราฟีนออกไซด์จากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต โดยมีเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบและอุณหภูมิฐานรองรับที่แตกต่างกัน และใช้ฐานรองรับเคลื่อนที่ทดสอบจำลองการขยายขนาดฟิล์มพบว่า การพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถปรับความหนาได้เป็นเชิงเส้นจากระยะเวลาเคลือบและปรับระดับการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยอุณหภูมิของฐานรองรับ และยังสามารถขยายขนาดฟิล์มได้ จากนั้นนำเทคนิคการเตรียมฟิล์มด้วยการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นและอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/GO/Al ที่มีระยะเวลาเคลือบและอุณหภูมิฐานรองรับที่แตกต่างกัน พบว่า อุปกรณ์วัดความชื้นมีค่าการทะลุผ่านของแสงมากกว่า 60 % สามารถตอบสนองได้ในช่วง 11-93% มีค่าการตอบสนองเป็น 97.75% ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 11-93% มีระยะเวลาการตอบสนองและการคืนตัวเป็น 11 วินาที และ 8 วินาที ตามลำดับ รวมทั้งมีความสามารถโค้งงอได้ ส่วนอุปกรณ์หน่วยความจำ พบว่าเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำแบบ WORM โดยใช้ความต่างศักย์อ่านและเขียนที่ 1 โวลต์และ 5 โวลต์ตามลำดับ มีอัตราส่วนสถานะเปิดต่อสถานะปิดเป็น  $10^4$  และระยะเวลาการอ่านต่อเนื่องมากกว่า  $10^4$  วินาที ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงถึงการเตรียมฟิล์มกราฟีนออกไซด์และวัสดุผสมเพื่อประยุกต์ใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

**คำสำคัญ:** กราฟีนออกไซด์, รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, ระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต, อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น, อุปกรณ์หน่วยความจำ



Thesis Title	Preparation of graphene oxide film and composite films for electronic device applications
Student	Mr. Potiyan Songkeaw
Student ID	56607014
Degree	Doctor of philosophy
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Benchapol Tunhoo
Thesis Coadvisor	Asst. Prof. Dr. Korakot Onlaor

## ABSTRACT

In this thesis, the techniques to prepare graphene oxide and reduced graphene oxide for electronics devices such as humidity sensors and memory devices were studied. Graphene oxide powders were prepared by a modified Hummer's method. The material properties of graphene oxide and composite graphene oxide were characterized with Raman spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), scanning electron microscopy (SEM), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray diffraction (XRD) for the structural properties, chemical bonding, surface morphology and thickness, chemical functional groups of film structures, and crystalline structure, respectively. Then, the graphene oxide nanoparticles were used to fabricate films for humidity sensors by a drop-casting process with various drop cycle conditions. The changes of impedance were observed at various relative humidity levels. The fabricated devices exhibited the response to humidity within a range of 11 - 93 %RH. The optimum device showed a sensitivity of 99.71% and response/recovery times of 17/5 seconds, respectively.

The composite materials with graphene oxide and polymer were used to fabricate the resistive memory devices in two structures. In the first structure, the composite materials were ethylene vinyl acetate (EVA) mixed with graphene oxide at various concentrations. The composite films were spun on indium tin oxide (ITO), which were deposited on polyethylene naphthalate plastic substrate. After that, a thermal roll-to-roll technique was applied to prepare the resistive memory devices based on a structure of ITO/EVA:rGO/ITO. It was found that the graphene oxide had been reduced to reduced graphene oxide by thermal energy during the preparation of the devices. The devices show optical transmittance of more than 60% in the visible range. The electrical properties of the devices were investigated by current-voltage measurement. The electrical characteristics of the memory devices exhibited the write-once read-many (WORM) type with a two-state electrical level of  $5 \times 10^5$  ON/OFF current ratio. The devices have a retention time of more than  $10^4$  s. In the second structure,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the composite of polyvinylpyrrolidone (PVP) and graphene oxide at various concentrations of graphene oxide were used. The composite films were fabricated with spin coating of ITO on glass substrate. Then, an Al electrode was fabricated with thermal evaporation onto the composite films. The electrical properties of the devices indicate that the WORM memory reads and writes the data at 1 V and 5 V, respectively, and the mechanism change corresponded to the ratio of graphene oxide. The ON/OFF current ratio was  $10^4$  and the retention times were more than  $10^7$  s.

For the scalable fabrication of devices, the graphene oxide films were prepared by electrostatic spray deposition (ESD) with various deposition times and substrate temperatures. It can thus be seen that the ESD technique can be used to prepare graphene oxide films with tunable thickness resulting from the deposition time and tunable reducing properties of graphene oxide from the effect of the substrate temperature. Moreover, the scalable size of the graphene oxide films can be achieved by substrate stage movement. The ESD technique was applied to prepare the graphene oxide films for the humidity sensor and resistive memory devices. The fabricated humidity sensor shows an optical transmittance of more than 60% in the visible range and response to humidity in a range of 11 - 93% with sensitivity at 97.75%. For the memory devices, the results show that the read and write voltages with WORM type are 1 V and 5 V, respectively. The ON/OFF current ratio was  $10^4$  and the retention times were more than  $10^4$  s. In the thesis, the preparation of graphene oxide thin films and composite films for application in electronic devices was shown.

**Keywords:** graphene oxide, reduced graphene oxide, electrostatic spray deposition, humidity sensor, memory device

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. เบญจพล ตันธุ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.กรกช อ่อนละออ สำหรับการสอนทั้งความรู้ทั้งทางด้านทฤษฎี ทางด้านปฏิบัติ และทางด้านความคิดจริยธรรม อีกทั้งยังให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในงานวิจัย ให้ทุนสนับสนุนในการศึกษา และให้คำปรึกษาปัญหาชีวิต ทำให้มีกำลังใจ สามารถพัฒนาตัวเองได้ดีขึ้น ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณอาจารย์ในแลป ผศ.ดร.หัตถิยาภรณ์ ทิววงศ์ ที่คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำเพิ่มเติมในแลปและแนะนำเทคนิคการใช้เครื่องมือให้ ชวนคุยผ่อนคลาย ให้ข้อคิด มีเรื่องเล่าสนุก ๆ มาเล่าให้ฟังอยู่เสมอ ขอขอบพระคุณครับ

ขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ ในแลป ECSN laboratory ทั้งพี่โบว์ พี่ปอ หลิม เจมส์ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจคอยสนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้ให้ผ่านไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณที่สนับสนุนร่วมเดินทางมาจนถึงจุดนี้ครับ ขอขอบพระคุณครับ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยด้านความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (ThEP) ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือด้านเครื่องมือวัดวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับงานวิจัยนี้ ทั้งเครื่องมือ FE-SEM และ XPS

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวัดมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ XRD ขอขอบคุณครับ

ขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบทุกท่าน ทั้งผศ.ดร.ปิณฑร ฤนามงาม และ ดร.มติ ห่อประทุม สำหรับคำถามและคำแนะนำที่ช่วยพัฒนางานวิจัย รวมถึงคำแนะนำในการปรับแก้งานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณครับ

ขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ เพื่อน ๆ ในวิทยาลัยนาโนที่คอยให้กำลังใจสนับสนุนกันมาโดยตลอด  
สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และพี่สาวที่ให้กำลังใจมาเสมอ คอยผลักดันให้ข้าพเจ้าได้ก้าวเดินจนผ่านงานวิจัยชิ้นนี้มาได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณมาก ๆ ครับ

โพธิญาณ สองแก้ว

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญรูป.....	IX
สารบัญตาราง.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.5 รายละเอียดของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พื้นฐานของคาร์บอน.....	5
2.2 สารประกอบของอะตอมคาร์บอน.....	7
2.3 กราฟีน.....	8
2.3.1 การสังเคราะห์กราฟีน.....	9
2.4 กราฟีนออกไซด์.....	11
2.4.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์.....	12
2.4.2 การเคลือบฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์.....	14
2.5 การพ่นเคลือบด้วยระบบไฟฟ้าสถิต.....	17
2.5.1 แหล่งกำเนิดหยดของเหลวที่ได้จากการพ่นด้วยไฟฟ้าสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง.....	17
2.5.2 ระบบพ่นเคลือบสำหรับฟิล์มบางนั้นมีสองระบบหลัก.....	19
2.6 การตรวจสอบคุณสมบัติทางวัสดุ.....	22
2.6.1 การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์.....	22
2.6.2 รามานสเปกโทรสโคปี.....	26
2.6.3 เทคนิคฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี.....	34
2.6.4 เอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี.....	35
2.6.5 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยระบบยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี.....	35
2.6.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	36
2.6.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่าน.....	36
2.7 อุปกรณ์วัดความชื้น.....	36
2.7.1 ความชื้น.....	37
2.7.2 อุปกรณ์วัดความชื้นแบบตัวต้านทาน.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.3 การตรวจวัดสมบัติของอุปกรณ์วัดความชื้น .....	38
2.7.4 การตรวจวัดด้วยความต้านทานเชิงซ้อน .....	40
2.7.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์วัดความชื้นโดยใช้สารอนุพันธ์กราฟีน..	44
2.8 อุปกรณ์หน่วยเก็บความจำ .....	45
2.8.1 ตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำ .....	46
2.8.2 กลไกการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ .....	47
2.8.3 การพัฒนาเทคโนโลยีหน่วยความจำ .....	55
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	59
3.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมี .....	60
3.1.1 สารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ .....	60
3.1.2 กระบวนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วย modified Hummer's method..	60
3.1.3 การตรวจสอบคุณสมบัติของสารกราฟีนออกไซด์ .....	62
3.2 อุปกรณ์วัดความชื้นจากกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีหยดเคลือบ .....	63
3.2.1 การเตรียมขั้วอินเดียมทินออกไซด์บนกระจก .....	64
3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางด้วยการหยดเคลือบ .....	64
3.2.3 การตรวจสอบคุณสมบัติฟิล์ม .....	64
3.3 อุปกรณ์หน่วยความจำจากวัสดุผสม .....	66
3.3.1 วัสดุผสม EVA:rGO .....	66
3.3.2 วัสดุผสม PVP:GO .....	68
3.4 ระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต .....	71
3.4.1 ส่วนประกอบของระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต .....	71
3.4.2 การเตรียมฐานรองรับตัวอย่าง .....	74
3.5 การเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต .....	75
3.5.1 การเตรียมสารกราฟีนออกไซด์ .....	75
3.5.2 เงื่อนไขที่ทำการศึกษา .....	75
3.6 การตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านวัสดุ .....	76
3.6.1 การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ .....	76
3.6.2 รามานสเปกโตรสโคปี .....	76
3.6.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	76
3.6.4 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยระบบยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี .....	76
3.6.5 เทคนิคฟลูอริเยร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี .....	77
3.6.6 สเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ .....	77
3.7 การตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านอุปกรณ์วัดความชื้น .....	77
3.7.1 ความไวในการตอบสนอง .....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดุดกลืนและคาย .....	77
3.7.3 ฮิสเตอร์ซิส.....	77
3.7.4 การตอบสนองเชิงความถี่ .....	78
3.7.5 เสถียรภาพ .....	78
3.7.6 การทดสอบความโค้งงอ .....	78
3.7.7 การทดสอบความทนทานต่อการโค้งงอ .....	78
3.8 การตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านอุปกรณ์สองสถานะ .....	78
3.8.1 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ .....	78
3.8.2 ค่าการอ่านซ้ำ .....	79
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย .....	80
4.1 การตรวจสอบผงกราฟีนออกไซด์ .....	80
4.2 อุปกรณ์วัดความชื้นด้วยวิธีหยดเคลือบ .....	82
4.3 หน่วยความจำโปร่งแสงโครงสร้าง ITO/EVA:rGO/ITO .....	89
4.4 หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/PVP:GO/Al .....	98
4.5 การเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต .....	107
4.6 อุปกรณ์วัดความชื้นที่จากกราฟีนออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต .....	121
4.7 อุปกรณ์หน่วยความจำที่เตรียมด้วยวิธีการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต .....	136
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย .....	147
5.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธี modified Hummer's method .....	147
5.2 อุปกรณ์วัดความชื้นด้วยกระบวนการหยดเคลือบ .....	147
5.3 อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/EVA:rGO/ITO .....	147
5.4 อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/PVP:GO/Al .....	147
5.5 การสร้างฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต .....	148
5.6 อุปกรณ์วัดความชื้นจากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต .....	148
5.7 อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/GO/Al .....	149
เอกสารอ้างอิง .....	150
ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ .....	157
ประวัติผู้เขียน .....	158

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจัดเรียงตัวของออร์บิทัลของอะตอมคาร์บอน	5
2.2 การเกิดพันธะ $\sigma$ ของออร์บิทัลแบบต่าง ๆ	6
2.3 การเกิดพันธะ $\pi$ ของออร์บิทัล p	6
2.4 การไฮบริดของอะตอมคาร์บอนแบบต่าง ๆ	7
2.5 การเกิดไฮบริดของอะตอมคาร์บอนแบบ sp	7
2.6 การเกิดไฮบริดของอะตอมคาร์บอนแบบ $sp^2$	8
2.7 การเกิดไฮบริดของอะตอมคาร์บอนแบบ $sp^3$	8
2.8 การโครงสร้างการเรียงตัวของกราฟีน	9
2.9 (ก) อนุพันธ์ของกราฟีน (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์ของกราฟีน	11
2.10 การพัฒนาวิธีของ Hummers	14
2.11 แผนผังของการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์แบบต่าง ๆ	14
2.12 แผนผังการเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ	15
2.13 การควบคุมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยการหมุนเคลือบ	15
2.14 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ	16
2.15 การเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการล้างมีวบล็อกเก็ต	17
2.16 โหมดการพ่นแบบต่าง ๆ ของระบบสเปรย์ (ก) โหมดการหยด (ข) โหมดการหยดขนาดไมโคร (ค) โหมดสปินเดิล (ง) โหมดมัลติสปินเดิล (จ) โหมดการพ่นรูปกรวย (ฉ) โหมดการพ่นแบบหมุนควง (ช) โหมดการพ่นแบบสั้น (ญ) โหมดการพ่นหลายหัว	18
2.17 ระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต (ก) ระบบพื้นฐาน (ข) ระบบเสริมตัวคัดแยก	19
2.18 ระบบที่มีการใส่อุปกรณ์เสริม (ก) แบบแผ่นจานโลหะ (ข) แบบท่อไพเร็กซ์	20
2.19 แผนผังการทำงานของระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต	21
2.20 แผนผังการเกิดฟิล์ม (ก) ชั้นฟิล์มแบบหนาแน่น (ข) ชั้นฟิล์มแบบรูพรุน	22
2.21 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในวัสดุ	23
2.22 รูปแบบการเลี้ยวเบนของสารอนุพันธ์กราฟีน	23
2.23 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของกราฟีนออกไซด์	24
2.24 ลักษณะของยอดกราฟ XRD ที่ได้จากการวัด	25
2.25 แผนภาพการวัดขนาดความเป็นผลึก	26
2.26 กราฟรามานของ (ก) วัสดุคาร์บอนประเภทต่าง ๆ (ข) สารอนุพันธ์ของกราฟีน	27
2.27 หน่วยเซลล์ของกราฟีน (ก) ชั้นเดียว (ข) สองชั้น และโครงสร้างของกราฟีน (ค) กราฟีนชั้นเดียว (ง) กราฟีนสองชั้นที่ซ้อนทับแบบ AB และกราฟีนที่ซ้อนทับกันสามชั้นแบบ (จ) ABA และ (ฉ) ABC	28
2.28 (ก) หน่วยเซลล์ในโดเมนตำแหน่งของกราฟีนชั้นเดียว (ข) โครงสร้างแถบพลังงานของกราฟีนชั้นเดียว และ (ค) โหมดการเคลื่อนที่ของโฟนอนที่จุด $\Gamma$	29
2.29 แผนผังแสดงการเกิดยอดกราฟต่าง ๆ ของกราฟีนในกราฟรามาน	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.30 ตำแหน่งยอดกราฟรามานของกราฟีนที่เปลี่ยนไปตามพลังงานโฟตอน.....	31
2.31 การแยกเป็นองค์ประกอบย่อย ๆ ของรามาน.....	32
2.32 การประมาณจำนวนชั้นของกราฟีน.....	33
2.33 การเปรียบเทียบอนุพันธ์กราฟีนด้วยเทคนิค FTIR.....	34
2.34 การตรวจวัดสารอนุพันธ์กราฟีนด้วยเทคนิค XPS.....	35
2.35 กราฟการดูดกลืนแสงของ (ก) กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (ข) กราฟีนออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นต่างกัน.....	36
2.36 แผนผังของจำนวนเชิงซ้อน.....	41
2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแผนภาพไนควิสต์และแผนภาพ Bode.....	42
2.38 กลไกการนำไฟฟ้าแบบการปล่อยเนื่องจากความร้อน.....	48
2.39 แผนภาพของการปล่อยแบบ Fowler-Nordheim.....	48
2.40 แผนภาพของกลไกการผ่านทะลุโดยตรง.....	49
2.41 แผนภาพกลไกการปลดปล่อยแบบ Poole-Frenkel.....	49
2.42 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดด.....	50
2.43 แผนภาพการนำไฟฟ้าแบบ NNH และ VRH.....	50
2.44 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าแบบโอห์ม.....	51
2.45 แผนผังการกระจายตัวของพาหะในสารไดอิเล็กตริกในสภาวะ (ก) มีการฉีดพาหะเล็กน้อย (ข) การคลายตัวและการกระจายตัวของพาหะ และ (ค) การฉีดพาหะเล็กน้อยในขณะความต่างศักย์เป็น $V_{cr}[60]$ .....	52
2.46 แผนภาพของการกระจายตัวของพาหะและกับดักในสารไดอิเล็กตริกในสภาวะ (ก) การฉีดปริมาณมาก (ข) การเติมกับดัก และ (ค) SCLC.....	53
2.47 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าแบบโอออน.....	53
2.48 เปรียบเทียบเทคโนโลยีอุปกรณ์หน่วยความจำ.....	55
3.1 แผนผังการดำเนินวิจัย.....	59
3.2 สารตั้งต้นที่ผสมกันในขูดรูปชมพู.....	61
3.3 สารที่ทำปฏิกิริยาเคมีเป็นสารแกรไฟต์ออกไซด์.....	62
3.4 รามานสเปกโตรสโคปี รุ่น Thermo Scientific DXR Smart Raman.....	62
3.5 สเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์รุ่น Kratos AXIS Ultra DLD.....	63
3.6 แผนผังการเตรียมอุปกรณ์วัดความชื้น (ก) ITO บนฐานรองรับกระจก (ข) ITO ติดหน้ากาก (ค) หลังกัด ITO (ง) หลังนำชั้นหน้ากากออกไป (จ) ชั้นที่เตรียมเสร็จ (ฉ) อุปกรณ์วัดความชื้น.....	63
3.7 แผนผังการทำลวดลาย.....	64
3.8 ระบบยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีรุ่น T92+ PG instrument.....	65
3.9 ระบบการวัดความไวในการตอบสนอง.....	65
3.10 เครื่องมือวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 การวัดเวลาที่ใช้ในการดูดและคาย .....	66
3.12 (ก) ขี้ว ITO บนกระจก (ข) พิล์มวัสดุผสม EVA:GO บนขี้ว ITO (ค) เครื่องรีดบัตร (ง) อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/EVA:rGO/ITO.....	67
3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL JSM-7001F.....	68
3.14 เครื่องวัดสมบัติทางไฟฟ้า รุ่น Keithley 2410-C .....	68
3.15 เครื่องระเหยสารด้วยความร้อน .....	69
3.16 โครงสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำของวัสดุผสม PVP:GO .....	69
3.17 ฟลูอริเอรทรานส์ฟอรัม อินฟราเรดสเปกโทรสโคปรุ่น perkinelmer uatr two .....	70
3.18 โครงสร้างของระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต .....	70
3.19 (ก) เข็มสแตนเลสเบอร์ 30GA (ข) หลอดฉีดสาร .....	71
3.20 ปืนฉีดสารที่ใช้ในระบบ .....	71
3.21 ฐานปรับความสูง .....	72
3.22 ฐานรองรับและฉีดเตอร์ .....	72
3.23 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ .....	73
3.24 อุปกรณ์แปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง .....	73
3.25 ระบบรวมของการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต .....	74
3.26 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ รุ่น Bruker AXS, D8 Discover.....	76
3.27 การโค้งงอของอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นเป็นรีซีมิ R.....	77
3.28 ระบบโค้งงออุปกรณ์ต่อเนื่อง ณ ช่วงเวลาที่ (ก) อุปกรณ์คินตัว และ (ข) อุปกรณ์โค้งงอ .....	78
4.1 (ก) แกร์ไฟต์ออกไซด์ และ (ข) กราฟีนออกไซด์ .....	80
4.2 การเปรียบเทียบระหว่างแกร์ไฟต์และกราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิครามาน .....	81
4.3 กราฟีนออกไซด์ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS ในโหมด (ก) survey (ข) C 1s และ (ค) O 1s .....	82
4.4 กราฟีนออกไซด์บนฐานรองรับที่เป็นกระจกที่ตรวจสอบด้วยเทคนิครามาน.....	83
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความชื้นของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่มีจำนวนหยด แตกต่างกัน .....	84
4.6 (ก) การทดสอบวงจรการตอบสนองของความชื้นในช่วง 11-93 % และ (ข) ลักษณะฮิสเตอร์ซิส ของเงื่อนไขหยดเคลือบด้วยกราฟีนออกไซด์ 5 ครั้ง.....	85
4.7 (ก) การตอบสนองความถี่ของกราฟีนออกไซด์เงื่อนไข 5 ครั้ง ณ ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน และวงจรสมมูลของอุปกรณ์ในบริเวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ (ข) ต่ำ (ค) สูง .....	86
4.8 แผนภาพอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/EVA:rGO/ITO .....	88
4.9 การทะลุผ่านของโครงสร้าง PEN/ITO/EVA:rGO/ITO/PEN.....	89
4.10 การตรวจสอบจาก XPS ของฟิล์ม EVA:GO ก่อนกระบวนการรีดร้อนโดยมีองค์ประกอบ (ก) C1s และ (ข) O1s และ XPS ของฟิล์ม EVA:rGO หลังกระบวนการรีดร้อนโดย มีองค์ประกอบ (ค) C1s และ (ง) O1s.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ความหนาของฟิล์มหลังทำการรีดร้อน .....	91
4.12 ลักษณะของกราฟกระแส-แรงดันทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ (ก) ไม่มี rGO และ (ข) มี rGO ผสมในชั้น EVA.....	92
4.13 ผลการทดลองและเส้นที่ทำการเลือกให้เหมาะกับผลการทดลองของ (ก) กราฟ $\log(I)$ กับ $\log(V)$ ของสถานะเปิดช่วงบวกและ ข แบบจำลองกลไกการปลดปล่อยแบบเทอร์มไอออนิกของสถานะปิดช่วงบวก .....	93
4.14 แผนภาพของกลไกการนำไฟฟ้าด้วยกลไกเส้นใยโลหะ (ก) สถานะเริ่มต้น (ข) สถานะปิด .....	93
4.15 (ก) ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของทุกความเข้มข้นในการเจือ GO (ข) อัตราส่วนของกระแสช่วงเปิดต่อช่วงปิดของอุปกรณ์หน่วยความจำในฝั่งความต่างศักย์เป็นค่าบวก ที่มีความเข้มข้นในการเจือ GO แตกต่างกัน .....	94
4.16 การทดสอบอ่านซ้ำเป็นเวลานาน (retention time) ของการเปลี่ยนสถานะครั้งหนึ่งแล้วทำการอ่านค่าต่อเนื่องของอุปกรณ์หน่วยความจำ .....	95
4.17 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสถานะเปิดของอุปกรณ์หน่วยความจำโปร่งแสง WORM.....	96
4.18 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในสถานะเปิด.....	96
4.19 แผนภาพโครงสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/PVP:GO/Al.....	98
4.20 (ก) กราฟรามานของผงกราฟีนออกไซด์ (ข) กราฟ FTIR ของ PVP และ PVP:GO ที่เงื่อนไขความเข้มข้นแตกต่างกัน และเทคนิคการตรวจสอบ XPS ด้วย (ค) การสำรวจธาตุในสาร PVP:GO และเทคนิคความละเอียดสูงของ (ง) C1s และ (จ) O 1s.....	100
4.21 ภาพตัดขวางจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค FE-SEM ของ (ก) PVP บนฐานรองรับกระจก และ (ข) PVP:GO ความเข้มข้น 4 % โดยน้ำหนัก บนฐานรองรับที่เป็นกระจก.....	101
4.22 ลักษณะเฉพาะของกราฟ กระแส-แรงดัน ของอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง (ก) PVP และ PVP:GO ที่เงื่อนไขความเข้มข้นแตกต่างกันที่ (ข) 2%, (ค) 4%, (ง) 6% และ (จ) 8% โดยน้ำหนัก.....	102
4.23 การเลือกกลไกของโครงสร้าง ITO/PVP:GO (4 wt%)/Al โดย (ก) เป็นกลไกการปลดปล่อยแบบเทอร์มไอออนิก (TE) ในสถานะปิด และ (ข) เป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบประจุปริภูมิจำกัดกระแส (SCLC) .....	103
4.24 แผนภาพแถบพลังงานของอุปกรณ์หน่วยความจำในขณะ (ก) ไม่มีการให้สนามไฟฟ้า (ข) สนามไฟฟ้าเป็นบวกในสถานะปิด (ค) สนามไฟฟ้าเป็นบวกในสถานะเปิด และ (ง) สนามไฟฟ้าเป็นลบ .....	104
4.25 ระยะเวลาการอ่านซ้ำของอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง PVP:GO ที่ความเข้มข้น 4% โดยมวล ...	105
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเงื่อนไขเวลา.....	107
4.27 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ซึ่งถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า ที่เงื่อนไขระยะเวลาพ่นเคลือบ (ก) 15 นาที (ข) 30 นาที (ค) 45 นาที และ (ง) 60 นาที .....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระยะเวลาในการเคลือบต่างกัน.....	109
4.29 กราฟรามานของกราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขระยะเวลาเคลือบที่ต่างกัน.....	110
4.30 การแยกเป็นองค์ประกอบย่อยของกราฟรามานที่ (ก) แถบ D และแถบ G (ข) แถบ 2D .....	111
4.31 กราฟฟลูอริเยอร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของฟิล์มที่เคลือบด้วยเงื่อนไขเวลาที่แตกต่างกัน.....	112
4.32 ความสามารถในการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์.....	113
4.33 มุมการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ที่อุณหภูมิฐานรองรับที่ต่างกัน.....	114
4.34 ผลของเงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับที่มีต่อความหนา.....	114
4.35 ลักษณะภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ส่องกราดด้วยอิเล็กตรอนที่อุณหภูมิต่างกัน.....	115
4.36 กราฟรามานสเปกโตรสโคปีที่เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับที่ต่างกัน.....	115
4.37 ข้อมูลธาตุของฟิล์มในเงื่อนไขอุณหภูมิของฐานรองรับ.....	116
4.38 การวัดองค์ประกอบธาตุของคาร์บอนของเงื่อนไขอุณหภูมิของฐานรองรับ.....	117
4.39 แนวโน้มของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิของฐานรองรับ.....	117
4.40 ผลของอุณหภูมิของฐานรองรับที่ตรวจสอบฟิล์มด้วยเทคนิคฟลูอริเยอร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี.....	118
4.41 ความสามารถในการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ของเงื่อนไขอุณหภูมิของฐานรองรับ.....	119
4.41 ความสามารถในการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ของเงื่อนไขอุณหภูมิของฐานรองรับ.....	119
4.42 ระบบเคลือบที่เพิ่มฐานรองรับเคลื่อนที่แกน x และแกน y.....	120
4.43 ภาพฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์บนฐานรองรับ (ก) กระจก (ข) พลาสติก PEN .....	120
4.44 ความหนาของฟิล์มขนาดใหญ่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน.....	121
4.45 โครงสร้างของอุปกรณ์วัดความชื้นจากกราฟีนออกไซด์.....	122
4.46 ภาพตัดขวางของกราฟีนออกไซด์บนฐานรองรับกระจกที่ถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM .....	122
4.47 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM ของเงื่อนไขระยะเวลา (ก) 15 นาที (ข) 30 นาที (ค) 45 นาที และ (ง) 60 นาที.....	123
4.48 กราฟีนออกไซด์ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค ก FTIR และ ข XRD ที่ระยะเวลาเคลือบแตกต่างกัน.....	124
4.49 กราฟีนออกไซด์ที่ระยะเวลาเคลือบที่ต่างกันตรวจวัดด้วยเทคนิค (ก) รามาน (ข) UV-Vis.....	125
4.50 การตอบสนองความชื้นของกราฟีนออกไซด์ที่ระยะเวลาเคลือบแตกต่างกัน.....	126
4.51 ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยเทคนิค FE-SEM ที่เงื่อนไขระยะเวลาเคลือบ 45 นาที อุณหภูมิฐานรองรับ (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 60 °C (ค) 80 °C (ง) 100 °C.....	127
4.52 กราฟีนออกไซด์เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับที่ตรวจวัดด้วย (ก) XRD (ข) Raman.....	128
4.53 กราฟีนออกไซด์ที่ตรวจวัดด้วย XPS ความละเอียดสูงตำแหน่ง C1s ที่เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับ (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 60 °C (ค) 80 °C และ (ง) 100 °C.....	129

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.54 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพันธ์และความต้านทานเชิงซ้อนที่อุณหภูมิฐานรองรับแตกต่างกัน.....	130
4.55 อุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดความชื้นกราฟีนออกไซด์ที่ทำการวัด (ก) ฮิสเตอร์ิซิส และ (ข) ระยะเวลาตอบสนอง .....	130
4.56 การทดสอบระยะเวลาความทนทานของอุปกรณ์ .....	131
4.57 การตอบสนองต่อความชื้นของอุปกรณ์วัดความชื้นบนฐานรองรับพลาสติก .....	131
4.58 ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยเทคนิค FE-SEM ของอุปกรณ์บนฐานรองรับพลาสติกที่เงื่อนไข (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 60 °C และ (ค) 100 °C.....	132
4.59 (ก) การทะลุผ่านของอุปกรณ์ในช่วง 400-800 นาโนเมตร และ (ข) กราฟฮิสเตอร์ิซิสของอุปกรณ์.....	132
4.60 อุปกรณ์วัดความชื้นที่ตรวจสอบระยะเวลาการตอบสนอง (ก) เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับและ (ข) เงื่อนไขอุณหภูมิห้องที่มีรีซีทีในการโค้งงอแตกต่างกัน.....	133
4.61 การทดสอบโค้งงอของอุปกรณ์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับ (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 60 °C และ (ค) 80 °C.....	134
4.62 การตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์ที่เงื่อนไข (ก) ก่อนโค้งงอ และ (ข) โค้งงอที่รีซีที 15 มิลลิเมตร .....	134
4.63 (ก) อุปกรณ์วัดความชื้นที่โค้งงอรีซีทีต่างกัน และ (ข) ทดสอบจำนวนครั้งที่สามารถโค้งงอ.....	135
4.64 (ก) แผนผังโครงสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/GO/Al และ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของอุปกรณ์ด้วยกล้อง FE-SEM.....	136
4.65 फिल्मกราฟีนออกไซด์เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับที่ตรวจวัดด้วย (ก) เทคนิครามาน และเทคนิค XPS ความละเอียดสูงของ C1s ที่เงื่อนไข (ข) อุณหภูมิห้อง (ค) 100 °C (ง) 150 °C (จ) 200 °C และ ฉ 250 °C.....	137
4.66 ความสัมพันธ์ของกราฟแรงดันกับกระแสของอุปกรณ์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับ 250 °C.....	139
4.67 แบบจำลองทางไฟฟ้าที่เหมาะสมกับอุปกรณ์โดยสถานะปิดแสดงถึงแบบจำลอง (ก) DT-FN (ข) SCLC (ค) TAT และสถานะเปิดแสดงถึงแบบจำลอง (ง) SCLC.....	140
4.68 แผนภาพแบบจำลองกลไกการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ (ก) สถานะปิดและ (ข) สถานะเปิด.....	141
4.69 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของอุปกรณ์ที่มีอุณหภูมิฐานรองรับขณะเคลือบที่ (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 100 °C (ค) 150 °C (ง) 200 °C และ (จ) 250 °C.....	142
4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส ที่เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับขณะเคลือบ 250 °C โดยมีอุณหภูมิขณะทำการตรวจวัดเป็น (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 60 °C (ค) 80 °C (ง) 100 °C และ (จ) 120 °C.....	144
4.71 การทดสอบอ่านเขียนในอุปกรณ์หน่วยความจำ .....	145

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สารประกอบของอะตอมคาร์บอนแบบต่าง ๆ .....	9
2.2 ค่าในอุดมคติของอุปกรณ์วัดความชื้นแบบความต้านทานเชิงซ้อน .....	39
2.3 สมการความสัมพันธ์ของอุปกรณ์พื้นฐานทางไฟฟ้า .....	40
2.4 อุปกรณ์ในวงจรสมมูลในระบบความต้านทานเชิงซ้อน .....	42
2.5 แผนผังไนควิสต์พื้นฐาน.....	43
2.6 การพัฒนาอุปกรณ์วัดความชื้นจากกราฟีนออกไซด์.....	44
2.7 การเปรียบเทียบอุปกรณ์หน่วยความจำชนิดต่าง ๆ.....	46
2.8 สมการและความสัมพันธ์ของกลไกการนำไฟฟ้า .....	54
2.9 เปรียบเทียบอุปกรณ์หน่วยความจำที่มีกราฟีนออกไซด์เป็นองค์ประกอบ .....	56
3.1 เงื่อนไขที่ควบคุมในระบบ .....	75
3.2 เงื่อนไขที่ทำการศึกษา .....	75
4.1 การเปรียบเทียบผลของอุปกรณ์วัดความชื้น .....	87
4.2 ค่าสัดส่วนโดยประมาณขององค์ประกอบ C1s .....	91
4.3 การสรุปผลของงานวิจัยหน่วยความจำโครงสร้างโพลีเมอร์ผสม GO.....	97
4.4 ข้อมูลการสรุปแบบจำลองของทุกเงื่อนไขในโครงสร้าง PVP และ PVP:GO .....	103
4.5 การเปรียบเทียบอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ผสมโพลีเมอร์ .....	106
4.6 ผลการคำนวณค่าจากเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบ .....	109
4.7 ข้อมูลการคำนวณของกราฟรามานของเงื่อนไขระยะเวลาในการเคลือบ.....	110
4.9 ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณของกราฟรามาน .....	116
4.10 จำนวนชั้นกราฟีนจากการคำนวณของกราฟีนด้วยเทคนิค XRD.....	125
4.11 ผลของการคำนวณจำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์จากเทคนิครามาน .....	126
4.12 ค่าจากการคำนวณจำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับ .....	128
4.13 การเปรียบเทียบผลของอุปกรณ์วัดความชื้น .....	135
4.14 ผลการตรวจวัดกราฟีนออกไซด์เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับด้วยเทคนิครามานและ XPS.....	138
4.15 การเปรียบเทียบอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้างกราฟีนออกไซด์.....	145

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่อย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยจึงริเริ่มการพัฒนาเทคโนโลยีระดับนาโน เพื่อข้ามขีดจำกัดของเทคโนโลยีเดิม ทำให้เกิดการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีอย่างรวดเร็วในสาขาที่เกี่ยวข้องด้านนาโนเทคโนโลยีทั้งสาขา วัสดุศาสตร์นาโน นาโนอิเล็กทรอนิกส์ และนาโนชีวภาพ จึงเป็นสาขาที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยหัวใจหลักสำคัญของเทคโนโลยีนานอนั้นขึ้นอยู่กับการจัดเรียงโมเลกุลของวัสดุเพื่อปรับคุณสมบัติวัสดุให้เป็นไปตามที่ต้องการ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในขั้นตอนต่อไป

วัสดุนาโนสามารถแบ่งประเภทตามมิติความเป็นอิสระของอิเล็กตรอนได้ดังนี้

- 1) วัสดุ 2 มิติ เช่น ฟิล์มบางนาโน จานนาโน
- 2) วัสดุ 1 มิติ เช่น เส้นใยนาโน ท่อนาโน
- 3) วัสดุ 0 มิติ เช่น ควอนตัมดอท

จากวัสดุทั้งสามประเภทดังกล่าวนี้ วัสดุ 2 มิติเป็นวัสดุที่มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความซับซ้อนในการควบคุมโครงสร้างน้อยกว่าประเภทอื่น ๆ การวิจัยพัฒนาอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการนำไปต่อยอดในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย [1]

กราฟีน (Graphene) เป็นวัสดุที่เกิดจากธาตุคาร์บอนจับตัวกันเป็นวงแหวนต่อกันเป็นจำนวนมากในระนาบ 2 มิติ ซึ่งมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง วัสดุนี้ได้ถูกค้นพบโดย Geim et al.[2] ต่อมางานวิจัยนี้ได้รับรางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 2010 วัสดุกราฟีนคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายประการ เช่น มีความโปร่งใสสูง มีความคล่องตัวของพาหะสูง (High mobility) นำความร้อนได้ดี มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง มีความแข็งแรงสูงมาก ๆ เป็นต้น คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้นักวิจัยเลือกสารกราฟีนเข้ามา มีบทบาทสำคัญในการนำมาประยุกต์และพัฒนาอุปกรณ์หลายชนิด เช่น อุปกรณ์เก็บหน่วยความจำ (Memory) [3] อุปกรณ์การตรวจวัด (Sensor) [4] ขั้วไฟฟ้า (Electrode) [5] ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) [6] อุปกรณ์กรองน้ำ (Water filtration) [7] เป็นต้น ถึงแม้กราฟีนได้รับความสนใจในการวิจัยและพัฒนาอย่างแพร่หลาย แต่กราฟีนยังคงมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน อุตสาหกรรมเนื่องจากการผลิตกราฟีนในระดับอุตสาหกรรมยังจัดเป็นปัญหาที่ท้าทาย

การเตรียมฟิล์มบางกราฟีนสามารถเตรียมโดยตรงได้หลายวิธีเช่น การขึ้นรูปด้วยไอระเหยทางเคมี (Chemical Vapor Deposition : CVD) [8] การเตรียมด้วยวิธีทางกล (Mechanical method) [2] เป็นต้น แต่วิธีเหล่านี้มีข้อจำกัดด้านราคาที่สูง หรือไม่สมารถที่จะทำในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้ จึงเหมาะกับการทำวิจัยในห้องปฏิบัติการทำให้การสังเคราะห์กราฟีนด้วยกระบวนการทางเคมีจึงได้เป็นที่สนใจขึ้นมาเนื่องจากสามารถผลิตได้ในปริมาณมาก อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการทางเคมีนั้นจะทำให้สารกราฟีนเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นกราฟีนออกไซด์ (graphene oxide) ซึ่งมีคุณสมบัติบางส่วนแตกต่างจากกราฟีน

กราฟีนออกไซด์จัดเป็นสารอนุพันธ์ของกราฟีน โดยมีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกราฟีน แต่มีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีต่าง ๆ มาจับบนพื้นผิวและขอบของกราฟีนบางส่วน ทำให้กราฟีนออกไซด์สูญเสียความสามารถในการนำไฟฟ้า นอกจากนี้ยังทำให้แถบพลังงาน (bandgap) ของกราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มาจับตัว ทำให้กราฟีนออกไซด์สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของแถบพลังงานได้ นอกจากนี้แล้วกราฟีนออกไซด์ยังคงมีสมบัติคล้ายกราฟีนอยู่หลายประการ เช่น มีความโปร่งใสสูง พื้นที่ผิวสูง มีความบางมาก มีความแข็งแรงสูงมาก เป็นต้น กราฟีนออกไซด์ยังมีคุณสมบัติบางอย่างเพิ่มเติมจากวัสดุกราฟีน เช่น สามารถจับตัวกับสารมีขั้วได้ดีทำให้สามารถแพร่กระจายในสารจำพวกแอลกอฮอล์ได้ดี [9] มีความเป็นแม่เหล็กเนื่องจากความไม่สมดุลในโครงสร้าง [10] สามารถปรับสีที่เปล่งแสงได้ [11] สามารถผลิตในปริมาณมากได้ง่าย เป็นต้น ในส่วนของคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สูญเสียไป กราฟีนออกไซด์สามารถนำไปลดจำนวนหมู่ฟังก์ชันลงเรียกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (reduced graphene oxide) ซึ่งจะสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น [12] และมีคุณสมบัติคล้ายกราฟีน ทำให้ทั้งกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่นเดียวกัน [9, 10] ดังนั้นการพัฒนากราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนเพื่อประยุกต์ในอุปกรณ์จึงมีความสำคัญมากในการพัฒนาเพื่อการผลิตจำนวนมากและต่อยอดในอุตสาหกรรม

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่ากราฟีนออกไซด์สามารถแพร่กระจายได้ในสารตัวกลางหลายชนิด โดยเฉพาะในแอลกอฮอล์ ทำให้การเตรียมฟิล์มกราฟีนออกไซด์สามารถเลือกวิธีขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่น หยดเคลือบ (drop casting) หมุนเหวี่ยง (spin coating) จุ่มแช่ (dip coating) และปาดเคลือบ (doctor blade) ในการเตรียมฟิล์มบางได้ อย่างไรก็ตาม วิธีเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดด้านการควบคุมความหนา ความสม่ำเสมอ หรือ การผลิตในระดับอุตสาหกรรมที่ต้องการขนาดใหญ่ [14]

การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีพ่นเคลือบด้วยวิธีไฟฟ้าสถิต (Electrostatic spray deposition : ESD) เป็นวิธีที่ควบคุมหยดของสารด้วยแรงไฟฟ้าสถิต ซึ่งสามารถปรับหยดของสารให้เล็กได้ในระดับนาโนเมตรทำให้เตรียมฟิล์มบางในระดับนาโนเมตรได้ การควบคุมความหนาของระบบนั้นปรับได้จากอัตราการไหล ศักย์ไฟฟ้า เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการพ่นเคลือบ วิธีนี้จัดเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำ เพราะไม่ต้องใช้ระบบสุญญากาศ สามารถควบคุมความหนาได้แม่นยำ และมีการใช้งานในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังสามารถให้ความร้อนกับฐานรองรับขณะทำการปลูกฟิล์มทำให้สามารถปรับโครงสร้างได้อีกด้วย โดยเฉพาะสารกราฟีนออกไซด์จะสามารถปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันให้ลดลงเป็นสารรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เนื่องด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมานี้ งานวิจัยชิ้นจึงนี้ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้กราฟีนออกไซด์ในการทำอุปกรณ์ต่าง ๆ และวิธีเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตให้มีความหนาและคุณสมบัติที่ต่างกัน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 สังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการของ modified Hummer's method

1.2.2 ศึกษาสมบัติทางแสง สมบัติทางพื้นผิว สมบัติทางเคมี และสมบัติทางโครงสร้างของวัสดุที่เตรียมได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์เช่น การวัดการดูดกลืนของแสง (UV -visible) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope: FE-SEM) สเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray photoelectron spectroscopy: XPS) และวิธีการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) ตามลำดับ

1.2.3 พัฒนาแนวทางการนำฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.2.4 พัฒนาแนวทางการนำฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์หน่วยความจำ
- 1.2.5 พัฒนารูปแบบการเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic spray deposition: ESD)

### 1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

ศึกษาการสังเคราะห์สมบัติของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ เพื่อการเตรียมฟิล์มบางและนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยกราฟีนออกไซด์จะถูกเตรียมด้วยการนำแกรไฟต์มาทำให้เกิดออกซิไดซ์ (Oxidation) ด้วยวิธี Modified Hummer's method แล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็น กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีสั่นด้วยคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic) ทำการศึกษาอุปกรณ์วัดความชื้นจากอนุภาคกราฟีนออกไซด์โดยวิธีหยดเคลือบ จากนั้นศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสมกราฟีนออกไซด์เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์หน่วยความจำ นอกจากนี้ยังทำการเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตบนฐานรองรับที่เป็นกระจก ด้วยเงื่อนไขของเวลา และเงื่อนไขของอุณหภูมิ จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างของฟิล์มบางด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และการวัดด้วยวิธีของรามาน (Raman spectroscopy) ตรวจสอบพันธะทางเคมีด้วยสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (XPS) และเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) ตรวจสอบสมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) สุดท้ายตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยวิธีการวัดการดูดกลืนของแสง จากนั้นเลือกเงื่อนไขดังกล่าวเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นและอุปกรณ์หน่วยความจำต่อไป

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับระบบและวิธีการเตรียมฟิล์มบางด้วยระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต
- 1.4.2 มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์
- 1.4.3 สร้างแนวทางการเตรียมฟิล์มกราฟีนออกไซด์ด้วยระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตได้
- 1.4.4 มีความรู้และความเข้าใจ การตรวจวัดและสมบัติของกราฟีนออกไซด์
- 1.4.5 สามารถนำฟิล์มกราฟีนไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดความชื้นและอุปกรณ์หน่วยความจำ
- 1.4.6 สามารถพัฒนากระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

### 1.5 รายละเอียดของงานวิจัย

**บทที่ 1** กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

**บทที่ 2** กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีของกราฟีน ทฤษฎีการตรวจวัดคุณสมบัติของกราฟีน ทฤษฎีการเตรียมฟิล์มบางโดยระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายกลไกการทำงานของอุปกรณ์วัดความชื้นและอุปกรณ์หน่วยความจำ

**บทที่ 3** กล่าวถึงวิธีการทดลองต่าง ๆ ของงานวิจัย ตั้งแต่กระบวนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ การเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์โดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต รวมถึงการตรวจสอบฟิล์มบางอนุภาคกราฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องมือการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง และกระบวนการประดิษฐ์อุปกรณ์วัดความชื้นและอุปกรณ์หน่วยความจำ

**บทที่ 4** กล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด ตั้งแต่กระบวนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ การเตรียมฟิล์มบางกราฟีนโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ผลของการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางกราฟีน และผลของการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์วัดความชื้นและอุปกรณ์หน่วยความจำ

**บทที่ 5** กล่าวถึงสรุปผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด

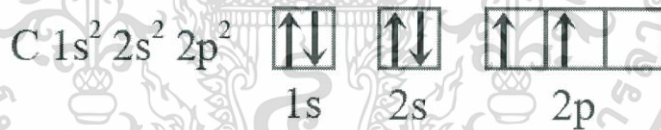


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พื้นฐานของคาร์บอน

คาร์บอน (Carbon) เป็นธาตุพื้นฐานในตารางธาตุ (Periodic table) และยังเป็นธาตุพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตในโลกของเราซึ่งสามารถพบธาตุชนิดนี้ได้ทั่วไป [15] ในตารางธาตุนั้นจัดเรียงคาร์บอนให้ตำแหน่งอยู่ในตารางคาบที่สอง หมู่สี่ ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างธาตุหมู่ที่เป็นโลหะกับธาตุหมู่ที่เป็นอโลหะ โดยพื้นฐานแล้ว อะตอมของคาร์บอนจะประกอบไปด้วยอนุภาคพื้นฐานคือ โปรตอน (Proton) 6 ตัว นิวตรอน (Neutron) 6 ตัว และอิเล็กตรอน (Electron) อีก 6 ตัว ทฤษฎีแบบจำลองอะตอมแบบกลุ่มหมอกได้อธิบายลักษณะการเรียงตัวอนุภาคเหล่านี้ว่า “อนุภาคโปรตอนกับนิวตรอนรวมอยู่ตรงกลางเรียกว่านิวเคลียส (Nucleus) และมีกลุ่มหมอกของอิเล็กตรอนล้อมรอบ โดยกลุ่มหมอกจะแสดงถึงโอกาสเจออิเล็กตรอน ณ จุดนั้น ถ้ากลุ่มหมอกมีความเข้มข้นมากจะมีโอกาสเจออิเล็กตรอนได้มากตามไปด้วย” [16] กลุ่มหมอกของอิเล็กตรอนนั้นก็จะมีรูปร่างที่ต่างออกไปตามระดับชั้นพลังงานที่เรียกว่า ออร์บิทัล (Orbital) ออร์บิทัลของอะตอมคาร์บอนนั้นประกอบไปด้วยออร์บิทัล s (s-orbital) ซึ่งสามารถบรรจุอิเล็กตรอนได้สองตัว และออร์บิทัล p (p-orbital) ซึ่งสามารถบรรจุอิเล็กตรอนได้สูงสุดหกตัว การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนของธาตุคาร์บอนสามารถอธิบายได้ด้วยเลขควอนตัม (quantum number) ที่บอกลักษณะเฉพาะของการเรียงตัวอิเล็กตรอนเป็นไปตามรูปที่ 2.1 คือ มีออร์บิทัล s สำหรับชั้นพลังงานที่ 1 และชั้นพลังงานที่ 2 โดยมีอิเล็กตรอนอยู่ชั้นละ 2 ตัว และมีออร์บิทัล p ในชั้นพลังงานที่ 2 ซึ่งจะมีอิเล็กตรอนในชั้นนี้เพียงแค่ 2 ตัว



รูปที่ 2.1 การจัดเรียงตัวของออร์บิทัลของอะตอมคาร์บอน

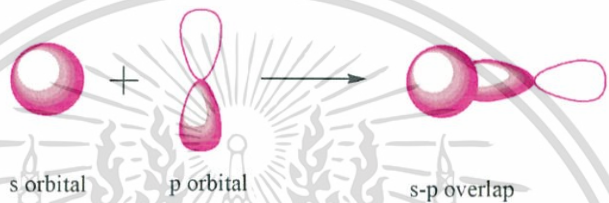
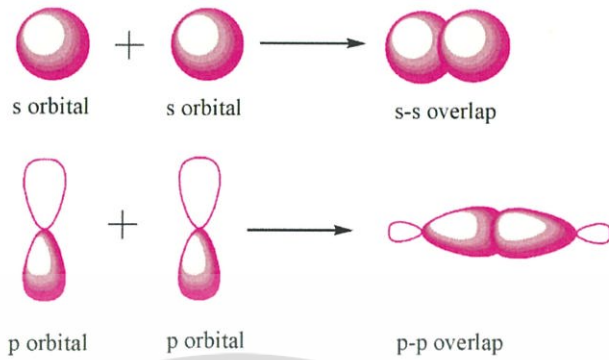
ออร์บิทัล s และออร์บิทัล p สามารถทับซ้อนกันระหว่างอะตอมได้ เรียกว่า การเกิดพันธะ (bonding) โดยการซ้อนทับกันของออร์บิทัลทำให้เกิดพันธะได้ 2 ชนิด คือ พันธะ  $\sigma$  และพันธะ  $\pi$  โดยที่พันธะ  $\sigma$  สามารถเกิดได้ 3 แบบดังรูปที่ 2.2 คือ

- การซ้อนทับกันของออร์บิทัล s จำนวน 2 ออร์บิทัล
- การซ้อนทับกันของออร์บิทัล p จำนวน 2 ออร์บิทัล โดยจะทับกันในส่วนหัวของออร์บิทัล
- การซ้อนทับกันของออร์บิทัล s และออร์บิทัล p

ส่วนพันธะ  $\pi$  จะเกิดจากการซ้อนทับกันด้านข้างของออร์บิทัล p แสดงดังรูปที่ 2.3

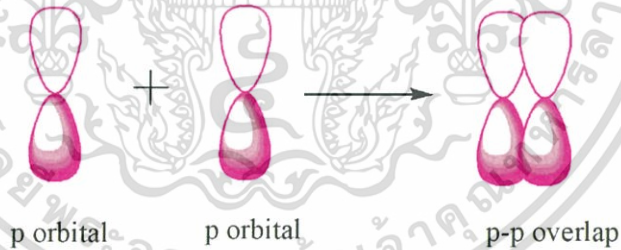
โดยทั่วไปแล้ว สารต่าง ๆ นั้นมักถูกพบในรูปของสารประกอบมากกว่าที่เป็นธาตุเดี่ยว ๆ ดังนั้นคาร์บอนที่พบได้ทั่วไปจะมีลักษณะเป็นสารประกอบของอะตอมคาร์บอน อะตอมหลาย ๆ ตัวที่มารวมตัวกันก็จะเกิดการไฮบริดของออร์บิทัล (Hybridization) ทำให้เกิดเป็นพันธะเคมี (Chemical bonding) ระหว่างอะตอมโดยที่ลักษณะของการไฮบริดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน ในส่วนของการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนที่กล่าวถึงไปแล้วนั้น สามารถทำให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไฮบริดของอะตอมได้ 3 รูปแบบ คือ การไฮบริดแบบ  $sp$  ( $sp$  hybridization state) การไฮบริดแบบ  $sp^2$  ( $sp^2$  hybridization state) และการไฮบริดแบบ  $sp^3$  ( $sp^3$  hybridization state)



รูปที่ 2.2 การเกิดพันธะ  $\sigma$  ของออร์บิทัลแบบต่าง ๆ

รูปที่ 2.4 แสดงลำดับการเกิดไฮบริดแบบต่าง ๆ อิเล็กตรอนในออร์บิทัล 2s หนึ่งตัวจะถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นให้ไปอยู่ในออร์บิทัล 2p จากนั้นจะเกิดการไฮบริดกันของออร์บิทัล โดยที่



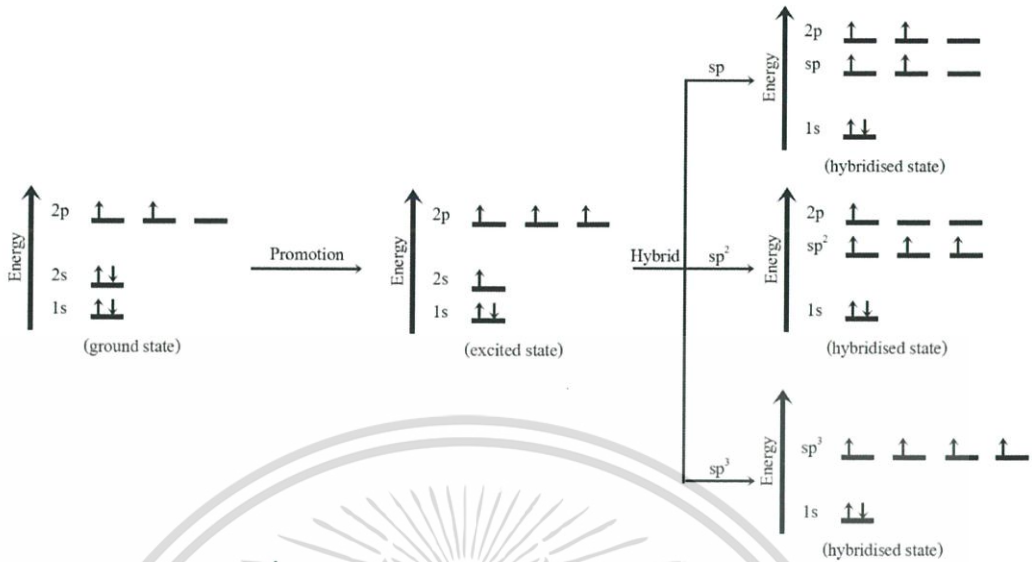
รูปที่ 2.3 การเกิดพันธะ  $\pi$  ของออร์บิทัล p

การไฮบริดแบบ  $sp$  เป็นการไฮบริดของออร์บิทัล s ในชั้นที่สอง (2S) กับออร์บิทัล p หนึ่งตัว ( $2P_x$ ) จะได้พันธะ  $\sigma$  จำนวน 2 พันธะ และพันธะ  $\pi$  จำนวน 2 พันธะ ดังรูปที่ 2.5 ทำให้เกิดพันธะสาม (triple bonding) ที่มีรูปร่างเป็นเส้นตรง

การไฮบริดแบบ  $sp^2$  เป็นการไฮบริดของออร์บิทัล s ในชั้นที่สอง (2S) กับออร์บิทัล p สองตัว ( $2P_x$  และ  $2P_y$ ) จะได้พันธะ  $\sigma$  จำนวน 3 พันธะ และพันธะ  $\pi$  จำนวน 1 พันธะ ดังรูปที่ 2.6 ทำให้เกิดพันธะสอง (double bonding) ที่มีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมแบนราบ

และการไฮบริดแบบ  $sp^3$  เป็นการไฮบริดของออร์บิทัล s ในชั้นที่สอง (2S) กับออร์บิทัล p สามตัว ( $2P_x$ ,  $2P_y$  และ  $2P_z$ ) จะได้พันธะ  $\sigma$  จำนวน 4 พันธะ ดังรูปที่ 2.7 ทำให้เกิดพันธะเดี่ยว (single bonding) ที่มีรูปร่างเป็นทรงสี่หน้า

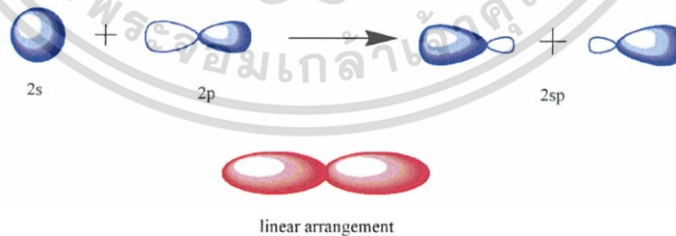
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การไฮบริดของอะตอมคาร์บอนแบบต่าง ๆ

## 2.2 สารประกอบของอะตอมคาร์บอน

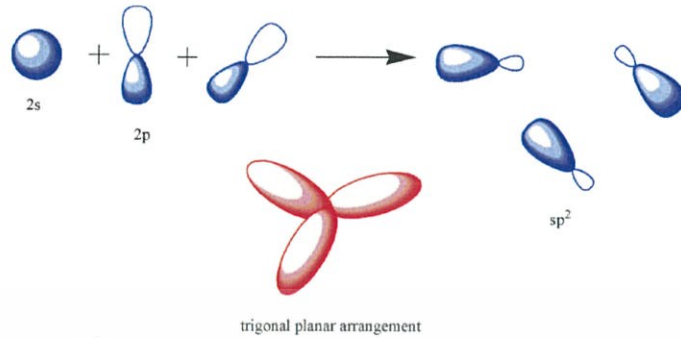
สารประกอบของคาร์บอน (carbon allotropes) นั้นมีหลายชนิดซึ่งมีพื้นฐานมาจากการไฮบริดทั้งสามแบบของอะตอมในจำนวนมิติที่ต่างกัน (dimension) จำนวนมิติเป็นตัวบ่งบอกถึงจำนวนทิศทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อิสระโดยไม่ถูกกักขัง (unconfined electron) ซึ่งสามารถแบ่งวัสดุตามจำนวนมิติได้เป็น วัสดุ 0 มิติ (0-dimension) หรือควอนตัมดอท (quantum dot) เป็นวัสดุที่อิเล็กตรอนไม่มีทิศทางอิสระในการเคลื่อนที่เลย วัสดุ 1 มิติ (1-dimension) เป็นวัสดุที่อิเล็กตรอนมีทิศทางอิสระในการเคลื่อนที่เพียงทิศทางเดียวตามแนวท่อ วัสดุ 2 มิติ (2-dimension) เป็นวัสดุที่อิเล็กตรอนมีทิศทางอิสระในการเคลื่อนที่สองทิศทางตามแนวระนาบ และวัสดุ 3 มิติ (3-dimension) หรือ bulk เป็นวัสดุที่อิเล็กตรอนมีทิศทางอิสระในการเคลื่อนที่ทุกทิศทาง



รูปที่ 2.5 การเกิดไฮบริดของอะตอมคาร์บอนแบบ sp

ตารางที่ 2.1 แสดงสารประกอบคาร์บอนชนิดต่าง ๆ กันอย่างไรก็ตามมีวัสดุบางชนิดเป็นลักษณะผสมกันของไฮบริด sp<sup>2</sup> และไฮบริด sp<sup>3</sup> ที่จัดเป็นวัสดุอสัณฐาน (Amorphous material) เช่น คาร์บอนนาโนโฟม (Carbon nanofoam) คิวคาร์บอน (Q-carbon) เพนตากราฟีน (penta-graphene) เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้น สารประกอบคาร์บอนสามารถเกิดโครงสร้างที่หลากหลายแต่สารประกอบคาร์บอนที่น่าสนใจ คือ กราฟีน (Graphene) เนื่องจากเป็นสารประกอบพื้นฐานที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

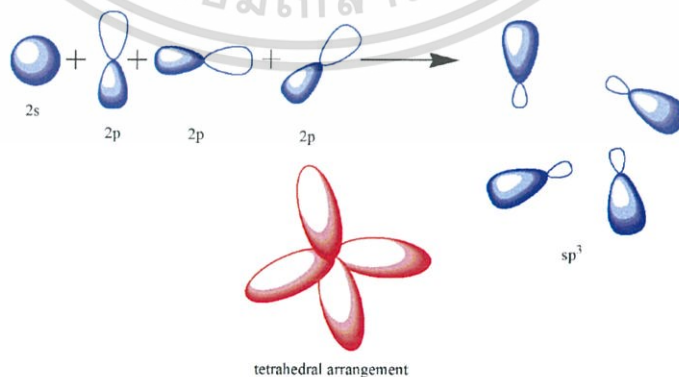
สามารถเปลี่ยนรูปให้เกิดโครงสร้างอื่น ๆ เช่น ฟูลเลอร์รีน (fullerene) คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotube) กราเฟน (Graphane) เพชรนาโน (diamondoid) และแกรไฟต์ได้ (Graphite)



รูปที่ 2.6 การเกิดไฮบริดของอะตอมคาร์บอนแบบ  $sp^2$

### 2.3 กราฟีน

กราฟีนเป็นคาร์บอนที่จับกันด้วยพันธะ  $sp^2$  มาต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้งเรียงกันเป็นแผ่นในระนาบสองมิติดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยการจับตัวของกราฟีนจะมีออร์บิทัล  $P_z$  ที่ยังไม่ได้ทำพันธะจะมาซ้อนทับกันและสร้างเป็นออร์บิทัล  $\pi$  และ  $\pi^*$  ซึ่งช่วยในการนำไฟฟ้าของกราฟีน ย้อนไปในอดีต มีการนำเสนอโครงสร้างชั้นเดียวของแกรไฟต์และตั้งชื่อใหม่ว่ากราฟีน แต่ Landau และ Peierls [2] ได้โต้แย้งว่าโครงสร้างสองมิตินั้นไม่มีความเสถียรภาพตามทฤษฎีของเทอร์โมไดนามิกส์ทำให้ไม่สามารถเกิดโครงสร้างกราฟีนที่เสถียรได้ อย่างไรก็ตาม ในปี ค.ศ. 1947 Semenoff et al. [17] ได้ทำนายว่า กราฟีนจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์ (quantum hall effect) แบบจำนวนเต็มเป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งต่างจากทั่วไปที่มีค่าต่อเนื่องกัน จนกระทั่งในปี ค.ศ. 2004 Geim และ Novoselov ได้ตีพิมพ์งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้สก็อตเทปลอกชั้นของแกรไฟต์ให้บางกว่า 10 นาโนเมตร [2] ทำให้สามารถสร้างทรานซิสเตอร์ที่ช่วยยืนยันปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์ซึ่งเป็นหลักฐานยืนยันของทฤษฎีเพิมอนแบบไม่มีมวล นอกจากนี้ยังยืนยันถึงการมีอยู่ของโครงสร้างนาโนสองมิติได้ [18] ทำให้ได้รับรางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 2010 จากการค้นพบดังกล่าว ทำให้กราฟีนจึงเป็นวัสดุที่นักวิจัยให้ความสนใจในการศึกษากันเป็นอย่างมาก



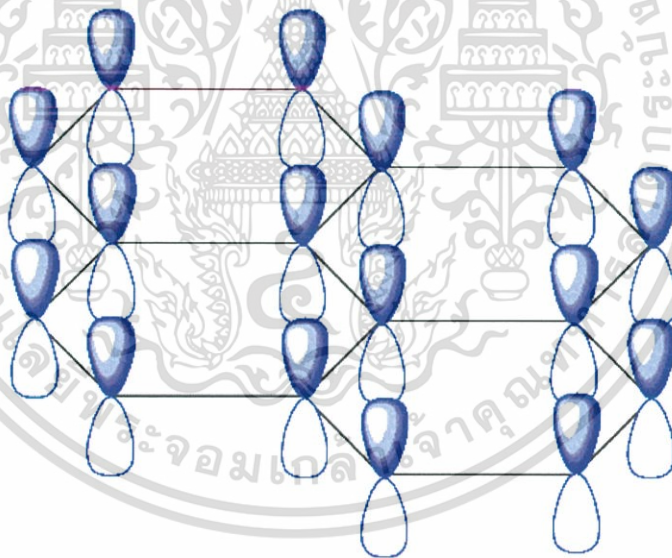
รูปที่ 2.7 การเกิดไฮบริดของอะตอมคาร์บอนแบบ  $sp^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สารประกอบของอะตอมคาร์บอนแบบต่าง ๆ

จำนวนมิติ	sp	sp <sup>2</sup>	sp <sup>3</sup>
0 มิติ	Fulleryne [19]	Fullerene [20]	Diamondoid [21]
1 มิติ	Carbyne [22]	Nanotube [20]	Carbon nanothread [23]
2 มิติ	Graphyne [19]	Graphene [20]	Graphane [24]
3 มิติ	D-carbon [25] (yne-diamond)	Graphite [26]	Diamond [26]

นอกจากปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์ที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น กราฟีนยังมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายประการเช่น มีความโปร่งใสสูงมาก มีความคล่องตัว (mobility) สูง นำความร้อนได้ดี มีความแข็งแรงสูง บางเพียงหนึ่งอะตอมคาร์บอน เป็นต้น คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้มีการนำกราฟีนมาประยุกต์ใช้งานหลายด้าน เช่น อุปกรณ์เก็บหน่วยความจำ (Memory) [3] อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) [4] ขั้วไฟฟ้า (Electrode) [5] ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) [6] อุปกรณ์กรองน้ำ (Water filtration) [7] เป็นต้น อย่างไรก็ตามการประยุกต์ที่กล่าวมายังคงเป็นเพียงต้นแบบ (prototype) เพราะวิธีสกัดเทปนั้นไม่สามารถผลิตกราฟีนในปริมาณที่สูงได้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาหาแนวทางในการผลิตต่อไป



รูปที่ 2.8 การโครงสร้างการเรียงตัวของกราฟีน

### 2.3.1 การสังเคราะห์กราฟีน

ปัจจุบันได้มีการวิจัยค้นคว้าวิธีต่าง ๆ เพื่อใช้สำหรับเตรียมกราฟีนทั้งใช้สำหรับศึกษาคุณสมบัติและเพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ โดยปัจจัยที่มีความสำคัญในการพัฒนากราฟีนเพื่อใช้ทางอุตสาหกรรมนั้นจะขึ้นอยู่กับ คุณภาพของกราฟีน มีขนาดใหญ่ มีราคาถูก และทำซ้ำเป็นจำนวนมากได้ [27] การพัฒนาสังเคราะห์กราฟีนนั้นเป็นไปในสองแนวทางคือ กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน จากเล็กไปใหญ่ (bottom-up) กับ จากใหญ่มาเล็ก (top-down)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.1 การสังเคราะห์จากเล็กไปใหญ่

การเริ่มปลูกฟิล์มที่ละอะตอมจนได้ฟิล์มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยใช้คาร์บอนเป็นแหล่งสังเคราะห์โดยตรงเช่น วิธีการระเหยไอเคมี (CVD) อีพิแทกซี (epitaxial growth) การอบในบรรยากาศแอลกอฮอล์ (solvothermal) และวิธีสังเคราะห์ทางสารอินทรีย์ เป็นต้น ข้อดีของการสังเคราะห์ใหญ่แบบใหญ่ไปเล็กคือ ฟิล์มที่ผลิตออกมาจะเป็นกราฟีนคุณภาพสูงเหมาะสำหรับศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถผลิตในปริมาณมากให้สม่ำเสมอได้

วิธีการเคลือบฟิล์มด้วยไอระเหยทางเคมี การเคลือบด้วยวิธีนี้จะใช้สารตระกูลไฮโดรคาร์บอนเคลือบบนฐานรองรับที่เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีนี้จะให้กราฟีนที่มีคุณภาพสูงและสามารถทำให้ฟิล์มมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ขนาดของกราฟีนจะถูกจำกัดด้วยขนาดของเตาเผา นอกจากนี้การย้ายฐานรองรับไปยังฐานรองรับที่ต้องการต้องใช้กระบวนการที่ยุ่งยาก ทำให้มีการพัฒนาวิธีอื่น ๆ ขึ้นมาเพื่อใช้แทนวิธีนี้

### 2.3.1.2 การสังเคราะห์จากใหญ่ไปเล็ก

การสังเคราะห์จากใหญ่ไปเล็กจะใช้แกรไฟต์เป็นสารตั้งต้น ได้แก่ วิธีทางกล (สก๊อตเทป) การแยกตัวในเฟสของเหลว (liquid-phase exfoliation) การรูดชั้นจากกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมี ความร้อน แสง หรือไฟฟ้าเคมี การคลายตัวของคาร์บอนท่อนาโน เป็นต้น วิธีที่เป็นที่นิยมในการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ปริมาณมากนั้นจะใช้วิธีทางเคมี อย่างไรก็ตาม กราฟีนที่ได้ตามวิธีนี้นั้นทำให้ได้เป็นสารอนุพันธ์ที่มีสมบัติคล้ายกราฟีน

#### 1. การลอกแผ่นกราฟีนด้วยวิธีทางกล

การลอกแผ่นกราฟีนด้วยวิธีทางกล (mechanical exfoliation) เป็นการผลิตกราฟีนจากการใช้แกรไฟต์ลอกออกเป็นแผ่นด้วยสก๊อตเทปแล้ววางลงไปบนฐานรองรับ ชั้นของแกรไฟต์จะถูกทำให้แตกออกหลายครั้งโดยเทป แล้วทำการเลือกแผ่นที่มีขนาดใหญ่ สม่่าเสมอบนเทปด้วยสายตา จากนั้นทำการกดลงไปบนฐานรองรับที่ต้องการแล้วทำการดึงเทปออก การลอกแผ่นกราฟีนด้วยวิธีนี้จะได้แผ่นกราฟีนที่มีขนาดและจำนวนชั้นที่แตกต่างกัน และมีส่วนน้อยที่จะเป็นกราฟีนชั้นเดียว ขนาดของแผ่นกราฟีนที่ได้ก็มีขีดจำกัด ทำให้วิธีนี้เหมาะสำหรับการใช้พิสูจน์หลักการทางทฤษฎีของอุปกรณ์ เนื่องจากได้กราฟีนที่มีคุณภาพสูงที่สุด

#### 2. การสังเคราะห์ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี

การสังเคราะห์ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีจะใช้แท่งแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า และเลือกอีกขั้วไฟฟ้ามาต่อเพิ่มเติมเพื่อให้ครบวงจร แล้วทำการจุ่มลงในสารละลายที่สนใจอาจเป็นกรดหรือเป็นเบส แล้วใช้ไฟฟ้าเพื่อให้ไอออนของสารละลายเข้าไปแทรกระหว่างชั้นของแกรไฟต์เพื่อให้ทำการแตกตัวออกเป็นกราฟีนซึ่งสามารถใช้ผลิตกราฟีนจำนวนมากได้ อย่างไรก็ตามการแยกสารละลายกับกราฟีนที่ต้องการนั้นทำได้ยาก จึงมีการนำสารที่ได้ไปใช้เลยโดยไม่กำจัดสารละลายออกไป ทำให้ได้กราฟีนที่มีสารปนเปื้อน

#### 3. การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมี

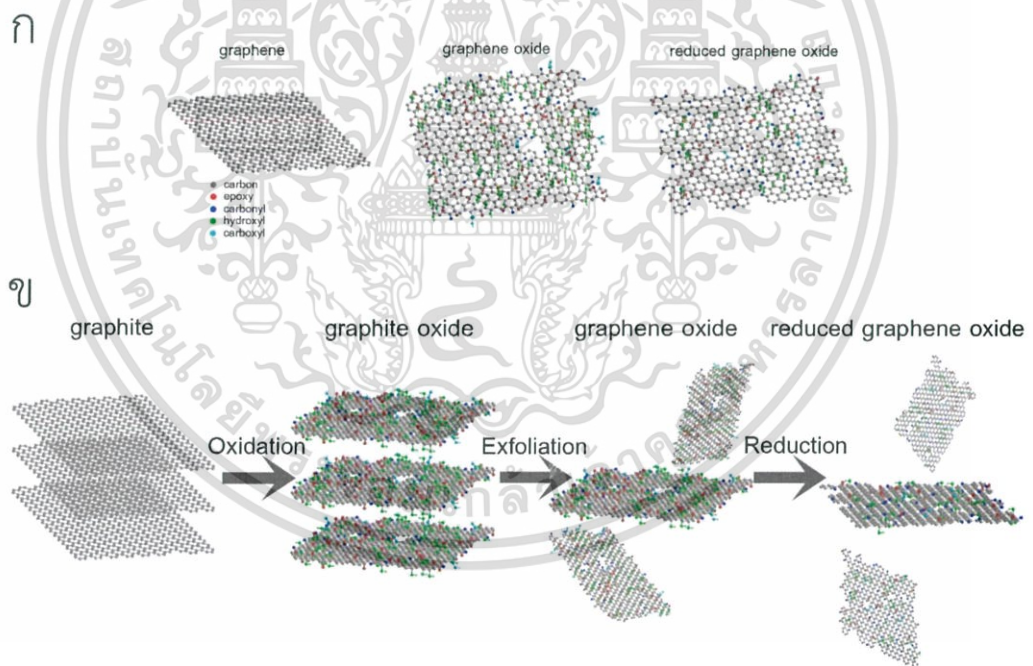
วิธีการสังเคราะห์ทางเคมีเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสูงเนื่องจากการสังเคราะห์ในแต่ละครั้งสามารถผลิตสารผลิตภัณฑ์ได้ในปริมาณสูง สารผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นเป็นสารกราฟีนออกไซด์ เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟีนที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นส่วนประกอบ ทำให้สูญเสียสมบัติบางอย่างไป เช่น การนำไฟฟ้า เป็นต้น แต่คุณสมบัติหลาย ๆ อย่างก็ยังคงเป็นเช่นกราฟีน

## 2.4 กราฟีนออกไซด์

กราฟีนออกไซด์ (graphene oxide) จัดเป็นสารอนุพันธ์ (derivative) ของกราฟีน ในเชิงโครงสร้างนั้นมีลักษณะเป็นรวงผึ้งคล้ายกราฟีน แต่บริเวณที่เป็นแผ่นกราฟีน (basal plane) นั้นมีหมู่ฟังก์ชันจำพวกอีพอกไซด์ (epoxide) และไฮดรอกซิล (hydroxyl) เกาะอยู่ นอกจากนี้ยังมีหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ เช่น คาร์บอนิล (carbonyl) และคาร์บอกซิล (carboxyl) เกาะอยู่บริเวณขอบของกราฟีนออกไซด์แสดงในรูปที่ 2.9ก ในส่วนของคุณสมบัตินั้น กราฟีนออกไซด์จะคล้ายกับกราฟีน ยกเว้นสมบัติด้านไฟฟ้าที่จะกลายเป็นฉนวนไฟฟ้า เนื่องจากพันธะ  $\pi$  ที่เหลือจะไปจับกับหมู่ฟังก์ชันทำให้ช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) นั้นสูงขึ้น

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (reduced graphene oxide) ออกไซด์เป็นสารอนุพันธ์ของกราฟีน เช่นเดียวกับกับกราฟีนออกไซด์ ในส่วนของโครงสร้างนั้นจะคล้ายกราฟีนออกไซด์ที่สูญเสียหมู่ฟังก์ชันบางส่วนไปดังรูปที่ 2.9ก ทำให้ช่องว่างแถบพลังงานแคบลง จึงทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าดีขึ้นเหมือนกราฟีน



รูปที่ 2.9 (ก) อนุพันธ์ของกราฟีน (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์ของกราฟีน

รูปที่ 2.9ข แสดงความสัมพันธ์ของกราฟีนและอนุพันธ์ของกราฟีน ทำให้เห็นความคล้ายคลึงของสารทั้งสามชนิด นอกจากนี้การเปลี่ยนไปมาระหว่างกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้น จะช่วยในการปรับช่องว่างพลังงานได้อีกด้วย ซึ่งช่องว่างพลังงานนี้มีความสำคัญกับคุณสมบัติทางแสงและทางอิเล็กทรอนิกส์ของสารอนุพันธ์กราฟีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์

การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์นิยมใช้แกรไฟต์ (graphite) มาทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ด้วยกรดที่รุนแรงและมีความเป็นออกซิแดนต์ (oxidant) สูง ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโครงสร้างอะโรมาติกทำให้แรงวนเดอวาระหว่างแผ่นกราฟีนในแกรไฟต์อ่อนลง จากนั้นทำให้เกิดแตกตัวแล้วแพร่กระจายในสารตัวกลาง วิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ทางเคมีมีหลายวิธีดังนี้

#### 2.4.1.1 Brodie's Method

ในจากปีค.ศ. 1859 B.C. Brodie เป็นคนแรกที่ทำการศึกษาปฏิกิริยาเคมีของแกรไฟต์ ปฏิกิริยาหนึ่งที่น่าสนใจคือ การใช้ผงแกรไฟต์ผสมกับโพแทสเซียมคลอเรต ( $\text{KClO}_3$ ) แล้วแช่ในไฮดรอนไตรกเข้มข้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาดังสมการ [28]:



และได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสูตรโมเลกุลเป็น  $\text{C}_{11}\text{H}_4\text{O}_5$  ซึ่งสารที่ได้สามารถละลายน้ำได้และมีความเป็นกรดเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้นั้นใช้ระยะเวลานานและเกิดแก๊สพิษในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา

ในสมัยนั้น กรดไนตริกเป็นที่รู้จักในฐานะตัวออกซิไดซ์ (เช่น อควารีเจีย) และเป็นที่รู้กันดีว่ากรดชนิดนี้ทำปฏิกิริยารุนแรงกับพื้นผิวของอะโรมาติกคาร์บอนรวมถึงคาร์บอนนาโนทิวป์ ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดการก่อตัวของหมู่ออกไซด์รวมถึง คาร์บอกซิล (carboxyl) แลคโตน (lactone) และคีโตน (ketone) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไนตริกจะทำให้เกิดแก๊ส  $\text{NO}_2$  และ  $\text{N}_2\text{O}_4$  (ไอสีเหลือง ในปฏิกิริยาของ Brodie) เช่นเดียวกับกับโพแทสเซียมคลอเรตที่เป็นตัวออกซิไดซ์รุนแรงซึ่งใช้ในการทำระเบิด โพแทสเซียมคลอเรตเป็นตัวที่ทำให้เกิดไดออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) สมการที่ (2.1) ซึ่งเป็นตัวทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่รุนแรงที่สุดในยุคสมัยนั้น

#### 2.4.1.2 Staudenmaier's method

ในปี ค.ศ. 1898 Staudenmaier [28] เป็นคนแรกที่ทำการศึกษาปรับปรุงวิธีของ Brodie โดยการเพิ่มกรดซัลฟิวริกเข้มข้นในส่วนผสมของ Brodie เพื่อให้ได้สารคลอรีนไดออกไซด์ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงกว่าสารไดออกซิเจน จึงทำให้สมการแสดงปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็น:



การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้ได้แกรไฟต์ออกไซด์ที่ถูกออกซิไดซ์สูงมาก อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังคงใช้ระยะเวลานานและอันตรายมาก นอกจากสารคลอรีนไดออกไซด์ที่ได้ต้องใช้ก๊าซเฉื่อยในการกำจัดและต้องระมัดระวังการเกิดระเบิดในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา

### 2.4.1.3 Hofmann's method

ปี ค.ศ. 1937 Hofmann [28] ใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นผสมกับกรดไนตริกเข้มข้นและโพแทสเซียมเปอร์คลอเรตในการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์แทนการใช้ไอกรด ทำให้ได้แกรไฟต์ออกไซด์ที่ออกซิไดซ์สูงขึ้น และใช้ระยะเวลาสั้นลง

### 2.4.1.4 Hummers' method

Hummers [28] เกิดในช่วงเวลาประมาณ 20 ปี หลังจากการปรับปรุงของ Hofmann Hummers ได้เปลี่ยนสารผสมแบบใหม่เป็น ใช้การผสมของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนสกับกรดซัลฟิวริก สารเปอร์แมงกาเนสเป็นถูกใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ทั่วไป เพื่อให้ได้โดแมงกานีสเฮปโทไซด์ โดยเขียนเป็นสมการการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น:

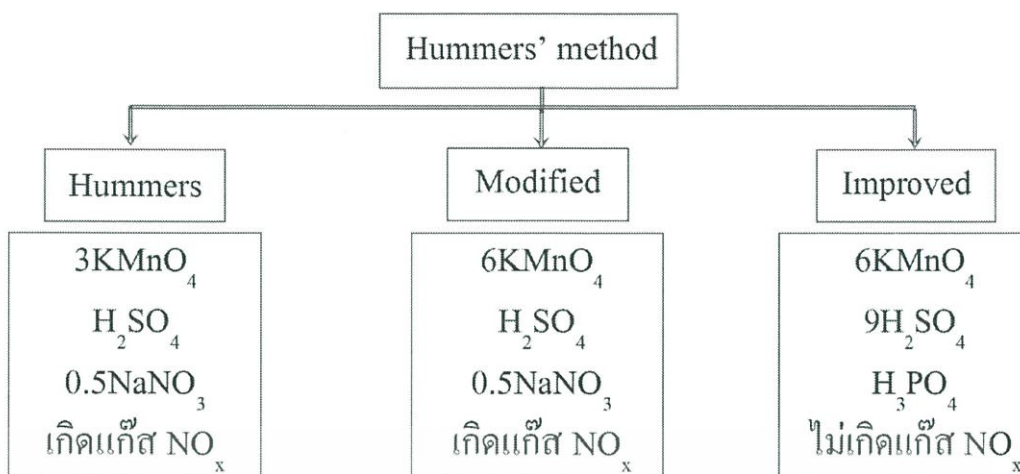


สารโดแมงกานีสเฮปโทไซด์จัดเป็นสารในตระกูลไบเมทัลลิกเฮปโทไซด์ (bimetallic heptoxide) ที่ทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าสารโมโนเมทัลลิกเตตราออกไซด์ (monometallic tetraoxide) สารนี้สามารถเกิดการระเบิดเมื่อให้อุณหภูมิสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส หรือเมื่อสัมผัสกับสารอินทรีย์ สาร  $\text{Mn}_2\text{O}_7$  จัดเป็นสารในกลุ่มนี้ที่มีความสามารถในการเลือกออกซิไดซ์พันธะคู่อะลิฟาติก (Aliphatic) ที่ไม่อ้อมตัวเหนือพันธะคู่ของอะโรมาติก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในโครงสร้างของแกรไฟต์ที่ทำให้เกิดเป็นพันธะออกไซด์ ซึ่งวิธีนี้ทำให้สามารถได้แกรไฟต์ออกไซด์คุณภาพเดียวกับวิธีอื่น ๆ แต่มีความปลอดภัยกว่า เพราะไม่ต้องกังวลกับการระเบิดของสารคลอเรต

หลังจากวิธีการของ Hummers เป็นต้นมา ไม่มีการปรับปรุงขนาดใหญ่อีก แต่มีการปรับปรุงสูตรของ Hummers เป็นสองแบบหลัก ๆ ดังรูปที่ 2.10 คือ

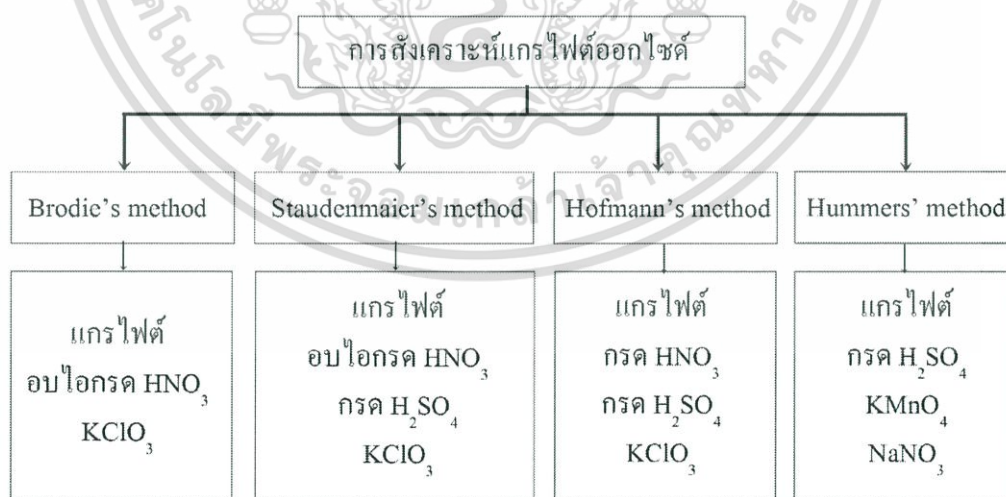
- แบบแรกนั้นจะเป็นการเปลี่ยนจากโซเดียมไนเตรดเป็นกรดฟอสฟอริก ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดแก๊สพิษตระกูลไนโตรเจนไดออกไซด์และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของแกรไฟต์ออกไซด์ เรียกวิธีนี้ว่า Improved Hummer's method
- แบบสองนั้นจะเปลี่ยนอัตราส่วนของสารผสม โดยเพิ่มสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนสเป็นสองเท่า ทำให้ได้สารที่มีคุณภาพสูงกว่าเดิมดังรูปที่ 2.10 เรียกวิธีนี้ว่า modified Hummer's method

นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่า วิธีของ Hummers นั้นเกิดแกรไฟต์ออกไซด์ที่ไม่สมบูรณ์ตรงกลางและล้อมรอบด้วยแกรไฟต์ออกไซด์ ในปี ค.ศ. 1999 Kovtyuhova [29] ได้เสนอกระบวนการก่อนการสังเคราะห์ โดยใช้แกรไฟต์มาผสมกับกรดซัลฟิวริก โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) และฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) ก่อน แล้วจึงทำการสังเคราะห์ด้วยวิธี Hummers ตามปกติจะช่วยให้ดีกร้ออกซิเดชันสูงมาก ๆ อย่างไรก็ตามวิธีการสังเคราะห์ที่หลายขั้นตอนนี้ทำให้วิธีอื่น ๆ นอกจาก Hummers ยังคงเป็นที่นิยมเช่นกัน



รูปที่ 2.10 การพัฒนาวิธีของ Hummers

การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์นั้นสรุปได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป แม้ว่าวิธี Hummers เป็นวิธีที่มีการพัฒนามาหลังสุด แต่มีข้อเสียคืออาจเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ทำให้วิธีการสังเคราะห์แบบอื่นยังคงเป็นที่นิยมเช่นกัน การสังเคราะห์ด้วยวิธีเหล่านี้จะได้สารกราฟีนออกไซด์ซึ่งยังต้องผ่านกระบวนการรีดิวซ์อีกครั้งเพื่อให้ได้คุณสมบัติเหมือนกราฟีน อย่างไรก็ตาม สารกราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติที่น่าสนใจเช่น สามารถปรับหมู่ฟังก์ชันเพื่อปรับสมบัติด้านต่าง ๆ เช่น การดูดกลืนแสง ช่องว่างพลังงาน ความชอบน้ำ เป็นต้น ที่สำคัญไปกว่านั้น กราฟีนออกไซด์เป็นสารที่สามารถแพร่กระจายในสารละลายได้หลายชนิดเช่น น้ำ และแอลกอฮอล์ ทำให้สามารถใช้งานง่าย ๆ ในการขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ ทั้งยังสามารถใช้งานในอุปกรณ์บางชนิดได้เลยหรือทำการรีดิวซ์เพื่อให้สมบัติการนำไฟฟ้าดีขึ้น เป็นต้น



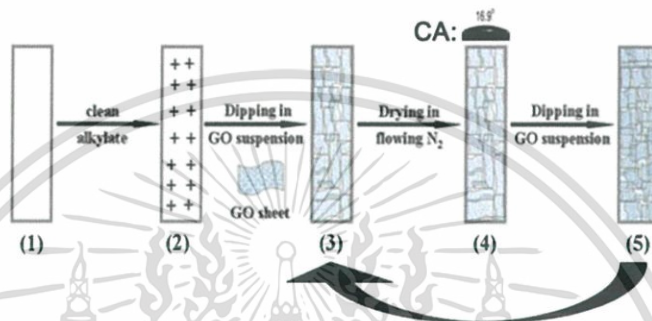
รูปที่ 2.11 แผนผังของการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์แบบต่าง ๆ

#### 2.4.2 การเคลือบฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์

แผ่นกราฟีนออกไซด์สามารถเคลือบบนฐานรองรับที่ต้องการได้โดยใช้วิธีต่าง ๆ เช่น หยดเคลือบ (drop-casting) จุ่มเคลือบ (dip-coating) การพ่น (spraying) การหมุนเคลือบ (spin-coating) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การเคลือบฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของสารเคลือบและสภาพแวดล้อมในการเคลือบไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(spin-coating) อิเล็กโตรโพลิติก (electrophoresis) ลังมัวบล็อดเก็ต (Langmuir-Blodgett) และการกรองด้วยระบบสุญญากาศ (Vacuum filtration) การควบคุมความสม่ำเสมอ พื้นผิว ความหนาจะขึ้นอยู่กับวิธีเคลือบและเงื่อนไขที่ใช้ในการขึ้นรูป

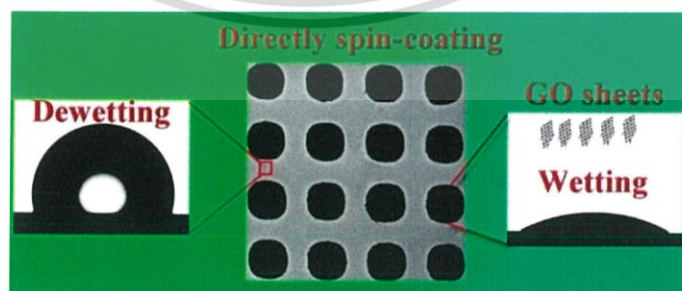
การหยดเคลือบ จุ่มเคลือบ และการพ่นจะให้ฟิล์มที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการจับตัวเป็นก้อนของกราฟีนออกไซด์ ทำให้ควบคุมความหนาได้ยาก เมื่อทำการเคลือบจะเกิดแรงแวนเดอวาล (Van der Waals) ซึ่งช่วยให้กราฟีนออกไซด์ติดกับฐานรองรับได้ แผ่นกราฟีนออกไซด์จะสามารถยึดกันได้ด้วยแรงไฮโดรเจนทำให้ฟิล์มมีพื้นผิวที่ขรุขระ



รูปที่ 2.12 แผนผังการเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ [30]

H. B. Sun et al. [30] ได้ทำการวิจัยการเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งจะใช้วิธีจุ่มแล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วจุ่มซ้ำวนไปเป็นวงจร ความหนาของฟิล์มควบคุมได้ด้วยจำนวนครั้งในการจุ่มและความเข้มข้นของสารผสม นอกจากนี้ฟิล์มกราฟีนออกไซด์มีการทะลุผ่านของแสงถึง 80%

การหมุนเคลือบจะใช้สารกราฟีนออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง ( $0.5-3 \text{ mg/mL}^{-1}$ ) เพื่อให้ได้ฟิล์มที่ต่อเนื่องสม่ำเสมอ อัตราการเหยที่รวดเร็วของตัวทำละลายจะช่วยให้แผ่นกราฟีนและฐานรองรับยึดติดกันได้ดีขึ้นในระหว่างการหมุนเคลือบ ความหนาของฟิล์มจะควบคุมได้จากการปรับความเข้มข้นของสารและจำนวนรอบที่หมุนเคลือบ การเคลือบด้วยวิธีนี้จะให้ฟิล์มที่มีรอยยับย่นน้อยที่สุด

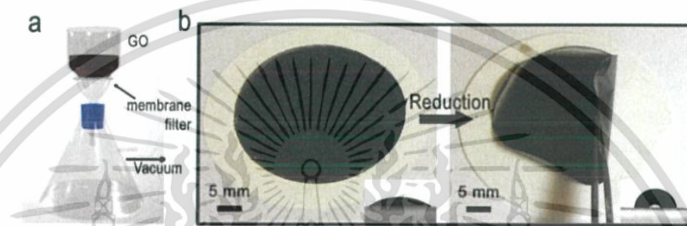


รูปที่ 2.13 การควบคุมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยการหมุนเคลือบ [31]

Yunlong Guo et al. [31] เสนอการควบคุมลักษณะกราฟีนออกไซด์โดยกระบวนการหมุนเคลือบ โดยทำการเตรียมรูปแบบบริเวณที่กราฟีนออกไซด์จะขึ้นรูปด้วยการเคลือบฟิล์มที่ไม่ขรุขระ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วตามด้วยการหมุนเคลือบด้วยกราฟีนออกไซด์ซึ่งเป็นสารที่ชอบน้ำ ทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งและรูปแบบของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ได้ โดยความเข้มข้นของสารกราฟีนออกไซด์เป็นปัจจัยหลักในการควบคุมคุณภาพของฟิล์มกราฟีนออกไซด์

การกรองด้วยวิธีสุญญากาศเป็นวิธีที่นิยมมากในการเคลือบฟิล์มกราฟีนออกไซด์ วิธีนี้ใช้สารที่มีความเข้มข้นต่ำ ( $0.5 \text{ mg/mL}^{-1}$ ) กรองผ่านเยื่อเอสเทอร์เซลลูโลส (cellulose ester membrane) ที่มีขนาดรูในระดับนาโนเมตร ขณะที่สารผ่านตัวกรอง ของเหลวจะสามารถผ่านรูได้ด้วยการช่วยเหลือของป้อนสุญญากาศ ในขณะที่แผ่นกราฟีนไม่สามารถผ่านไปได้ทำให้เกิดการเคลือบฟิล์มบนเยื่อกรอง กระบวนการนี้สามารถควบคุมความหนาได้ดีมาก ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่ได้สามารถย้ายฐานรองรับได้ด้วยวิธีการกดฟิล์มลงบนพื้นผิวที่ต้องการแล้วทำการละลายเยื่อกรองออก



รูปที่ 2.14 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ [32]

Bo Tang et al. [32] ได้เสนอกระบวนการเตรียมเยื่อเลือกผ่านวัสดุกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ เนื่องจากวิธีนี้ควบคุมความหนาได้ง่ายและราคาถูก แต่ความหนาจะอยู่ในระดับไมครอน จึงนิยมทำเป็นเยื่อเลือกผ่าน อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ยังเสนอถึงข้อควรระวังที่สำคัญของกระบวนการกรองด้วยสุญญากาศ คือ ลักษณะฟิล์มแต่ละด้านมีพื้นผิวที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน

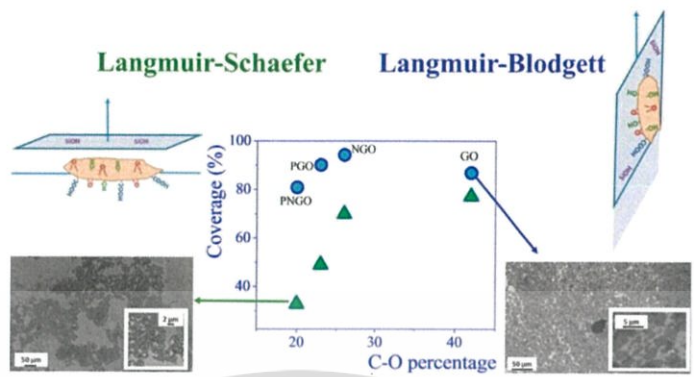
ลิ้งมัวบล็อคเก็ต (Langmuir-Blodgett) เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับควบคุมการเคลือบที่ต้องการสม่ำเสมอสูง เทคนิคนี้ใช้ประโยชน์จากแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตระหว่างไอออนของหมู่ฟังก์ชันในแผ่นกราฟีนออกไซด์ กระบวนการโดยย่อ คือ ใช้สารกราฟีนออกไซด์แพร่กระจายในสารผสมระหว่างน้ำกับเมทานอลที่แพร่กระจายไปบนผิวของน้ำเพื่อให้แผ่นกราฟีนถูกตรึงที่ผิวระหว่างน้ำกับอากาศ ความหนาแน่นของแผ่นกราฟีนออกไซด์จะควบคุมโดยการเปลี่ยนพื้นที่ระหว่างน้ำกับอากาศให้เหมาะสม แผ่นกราฟีนมีความเสถียรจากไฟฟ้าสถิตเนื่องจากแผ่นกราฟีนจะแผ่กระจายเป็นชั้นเดียวจนกระทั่งแรงผลักระหว่างขอบน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างชั้นได้ทำให้เกิดการซ้อนทับของชั้นกราฟีนออกไซด์ฟิล์มที่ลอยอยู่จะเคลือบลงบนฐานรองรับที่ต้องการด้วยการค่อย ๆ ปล่อยสารละลายออกไป

R. S. Hidalgo et al. [33] ได้นำเสนอการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีลิ้งมัวบล็อคเก็ตและวิธีลิ้งมัวสแชเฟอร์ (Langmuir-Schaefer) โดยการเตรียมฟิล์มกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีลิ้งมัวบล็อคเก็ตจะมีการกระจายตัวที่ดีกว่าและไม่ขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน ส่วนวิธีลิ้งมัวสแชเฟอร์จะสามารถควบคุมการกระจายตัวของกราฟีนออกไซด์ได้ตามปริมาณหมู่ C-O

ฟิล์มที่ได้จากการหมุนเคลือบจะมีความต่อเนื่องกันสูงมากและครอบคลุมทั่วทั้งฐานรองรับ ขณะที่ฟิล์มจากลิ้งมัวบล็อคเก็ตจะเหมาะกับผลิตฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอสูง มีการเรียงตัวเป็นชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างหนาแน่น การกรองด้วยระบบสุญญากาศจะให้ฟิล์มที่มีความหนาได้กว้างแต่ทำให้เกิดรอยย่น ส่วนวิธีจุ่มเคลือบ พ่นเคลือบ หยดเคลือบเป็นวิธีที่ง่ายในการขึ้นฟิล์ม



รูปที่ 2.15 การเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการลงม้วนบล็อกเก็ต [33]

วิธีที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นต่างก็ยังมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป วิธีที่จะช่วยให้ควบคุมความหนาได้ในช่วงกว้าง มีความสม่ำเสมอสูง ระบบไม่ซับซ้อน และควบคุมโครงสร้างได้นั้นยังคงเป็นปัญหาที่รอทำการพัฒนาต่อไป

### 2.5 การพ่นเคลือบด้วยระบบไฟฟ้าสถิต

#### 2.5.1 แหล่งกำเนิดหยดของเหลวที่ได้จากการพ่นด้วยไฟฟ้าสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง

การพ่นด้วยไฟฟ้าเป็นการใช้สนามไฟฟ้าช่วยให้หยดของเหลวสามารถแตกตัวเป็นฝอย ซึ่งการใช้สนามไฟฟ้าจะทำให้หยดของเหลวแตกตัวได้ดีกว่าวิธีอื่น ๆ หยดของเหลวซึ่งได้จากวิธีการนี้จะมีขนาดเล็กมากโดยเฉพาะในเงื่อนไขพิเศษบางอย่างสามารถทำให้หยดเล็กถึงหลักสิบนานومتر ในต้นศตวรรษที่ 19 Rayleigh [34] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหยดของเหลวที่มีประจุ และได้สร้างทฤษฎีในการประมาณค่าของปริมาณจำนวนประจุที่มากที่สุดในของเหลว เรียกว่า ขีดจำกัดของ Rayleigh (Rayleigh limit) สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$Q_R = 2\pi(16\sigma_1\epsilon_0r^3)^{\frac{1}{2}} \tag{2.5}$$

- โดยที่  $Q_R$  คือ ขีดจำกัดของ Rayleigh
- $\sigma_1$  คือ แรงตึงผิวของของเหลว
- $\epsilon_0$  คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศ (electric permittivity)
- $r$  คือ รัศมีของหยดของเหลว

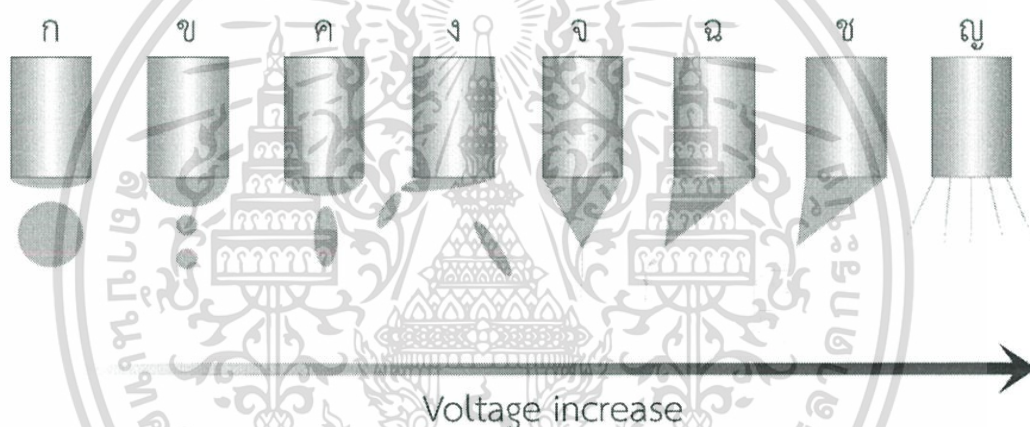
หยดของเหลวที่ปลายหลอดคาปิลลารี (capillary) จะมีรูปทรงในการสเปรย์ที่เปลี่ยนไปตามปริมาณสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองโหมด (mode) ใหญ่ คือ

- โหมดการหยด (dripping mode) โหมดนี้เกิดเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าน้อย หรือไม่มีสนามไฟฟ้า หยดของเหลวจะเกิดการหยดลงจากหลอดคาปิลลารี ถ้าของเหลวหยดลงมามีขนาดใหญ่เหมือนหยดปกติ เรียกว่า โหมดการหยด (dripping mode) แสดงดังรูปที่ 2.16k เมื่อสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น หยดจะมีขนาดเล็กลง เรียกว่า โหมดการหยดขนาดไมโคร (microdripping mode) ดังรูปที่ 2.16ข หลังจากนั้นสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้หยดมีลักษณะเรียวยาว เรียกว่า โหมดสปินเดิล (spindle mode) ดังรูปที่ 2.16ค เมื่อสนามไฟฟ้าสูงขึ้นไปอีก หยดเรียวยาวนี้จะเกิดการสลายไปมา เรียกว่า โหมดมัลติสปินเดิล (multispindle mode) ดังรูปที่ 2.16ง

- โหมดการพ่น (jet mode) เมื่อสนามไฟฟ้าสูงเพียงพอ แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะดึงหยดของเหลวให้ยาวขึ้นเป็นรูปกรวยคว่ำ ซึ่งมีลักษณะที่เสถียร และกระจายตัวสม่ำเสมอ เรียกว่า โหมดการพ่นรูปกรวย (cone-jet) หรือ โหมดการพ่นแบบกรวย Taylor (Taylor's cone jet) ดังรูปที่ 2.16จ สนามไฟฟ้าที่มากขึ้นอาจจะทำให้เกิดการหมุนของของเหลวรูปทรงกรวยรอบ ๆ หลอดคาปิลารี เรียกว่า โหมดการพ่นแบบหมุนควง (precession mode) ดังรูปที่ 2.16ฉ หรือเกิดการสั่นกลับไปกลับมา เรียกว่า โหมดการพ่นแบบสั่น (Oscillation mode) ดังรูปที่ 2.16ช หลังจากนั้น ถ้ายังคงเพิ่มปริมาณสนามไฟฟ้า ปลายกรวยจะแยกเป็นลักษณะกรวยเล็ก ๆ หลาย ๆ อัน เรียกว่า โหมดการพ่นหลายหัว (multi-jet mode) ดังรูปที่ 2.16ญ



รูปที่ 2.16 โหมดการพ่นแบบต่าง ๆ ของระบบสเปรย์ (ก) โหมดการหยด (ข) โหมดการหยดขนาดไมโคร (ค) โหมดสปินเดิล (ง) โหมดมัลติสปินเดิล (จ) โหมดการพ่นรูปกรวย (ฉ) โหมดการพ่นแบบหมุนควง (ช) โหมดการพ่นแบบสั่น (ญ) โหมดการพ่นหลายหัว

สำหรับการสเปรย์นั้น โหมดการพ่นรูปกรวยเป็นโหมดที่มีความสำคัญที่สุด เพราะหยดของเหลวที่ได้จะมีความเสถียร กระจายตัวสม่ำเสมอ และมีขนาดเล็กมาก แต่บางครั้งจะมีการเลือกใช้โหมดการพ่นหลายหัวแทนเนื่องจากจะให้หยดสารมีขนาดเล็กกว่าโหมดการพ่นรูปกรวย แต่หยดของเหลวจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอเท่ากับโหมดการพ่นรูปกรวย ขนาดของหยดของเหลวที่ได้จากโหมดการพ่นรูปกรวยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพของของเหลวและอัตราการไหลซึ่งสามารถเขียนได้เป็นสมการดังนี้ [35]

$$d = \alpha \left( \frac{Q^{\frac{1}{3}} \epsilon_0^{\frac{1}{2}} \rho_l^{\frac{1}{2}}}{\sigma_l^{\frac{1}{2}} \kappa^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

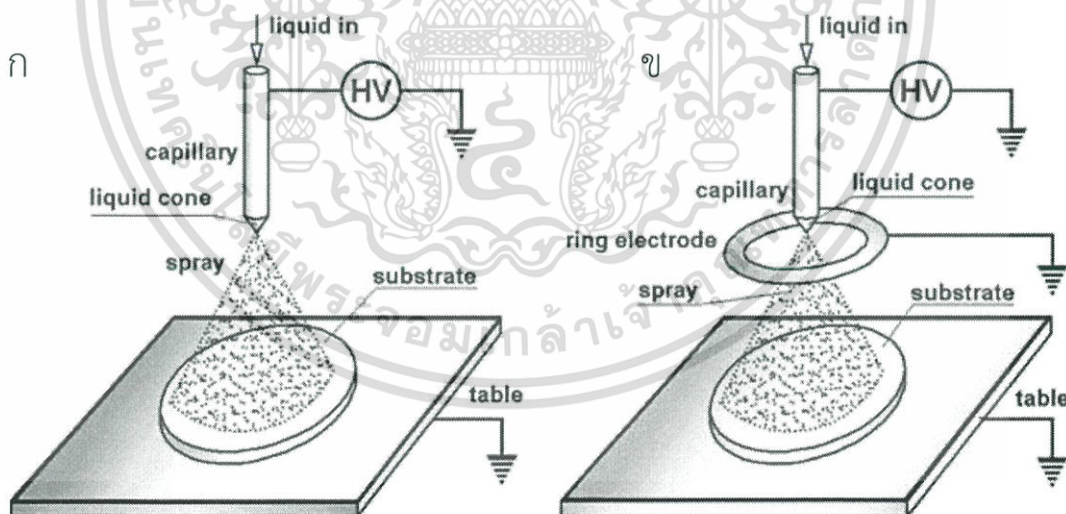
- โดยที่  $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของเหลว  
 $\alpha$  คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับสภาพยอมทางไฟฟ้าในของเหลว  
 $Q$  คือ อัตราการไหลของของเหลว  
 $\rho_l$  คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว  
 $\kappa_l$  คือ ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลว

การพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าเป็นเครื่องมือที่สามารถสร้างชั้นฟิล์มที่มีคุณภาพสูงเพราะมีองค์ประกอบต่าง ๆ ครบถ้วน เทคนิคไฟฟ้าสถิตช่วยให้สามารถสร้างหยดที่เล็กในระดับไมโครลงไปได้ และมีการกระจายตัวที่แคบ แรงไฟฟ้าสถิตช่วยทำให้การกระจายตัวของหยดสารมีความสม่ำเสมอ กระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสามารถควบคุมได้ง่ายด้วยการปรับอัตราการไหล ความต่างศักย์ที่จ่ายให้ปลายเข็ม และระบบในการผลิตฟิล์มบางแบบนี้มีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับระบบไอระเหยทางเคมีหรือทางฟิสิกส์ หรือพ่นด้วยพลาสมาซึ่งต้องใช้ระบบสุญญากาศ โดยความหนาของฟิล์มสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับความเข้มข้นและอัตราการไหลของสารตั้งต้น

## 2.5.2 ระบบพ่นเคลือบสำหรับฟิล์มบางนั้นมีสองระบบหลัก

### 2.5.2.1 ระบบพื้นฐาน

เป็นระบบที่ประกอบด้วยหลอดคาปิลารีซึ่งต่อกับกระบอกฉีดสาร มีฐานรองรับเป็นโลหะ มีระบบศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) สำหรับสร้างสนามไฟฟ้าต่อระหว่างฐานรองรับและปลายเข็มของหลอดคาปิลารี ดังรูปที่ 2.17ก ข้อเสียของระบบนี้คือใช้ฐานรองรับเป็นขั้ว ดังนั้นฐานรองรับต้องนำไฟฟ้าได้ดี ถ้ากระแสไฟฟ้าไหลไปยังฐานรองรับได้ไม่ดีจะทำให้ฐานรองรับเกิดความเสียหายได้



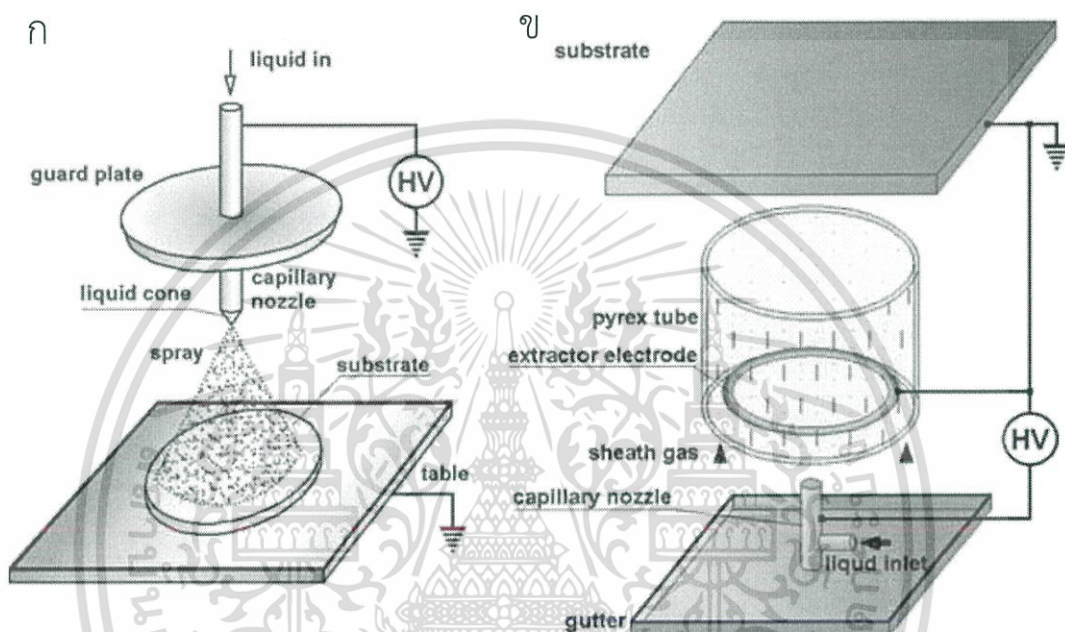
รูปที่ 2.17 ระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต (ก) ระบบพื้นฐาน (ข) ระบบเสริมตัวคัดแยก [36]

### 2.5.2.2 ระบบเสริมตัวคัดแยก

ระบบนี้จะมีอุปกรณ์เหมือนระบบพื้นฐาน และเพิ่มวงแหวนโลหะเข้ามา เพื่อใช้สำหรับดึงดูดหยดของเหลวที่มีขนาดใหญ่ออกไป โดยวงแหวนโลหะนี้จะต่อขั้วเดียวกันกับฐานรองรับดังรูปที่ 2.17ข ข้อดีของระบบนี้คือ ฐานรองรับไม่จำเป็นต้องนำไฟฟ้าได้ดี อย่างไรก็ตามเนื่องจากจะมีหยดของเหลว

บางส่วนไปเกาะบริเวณวงแหวน ซึ่งจะสามารถหยดลงไปบนฐานรองรับได้ ทำให้ฟิล์มที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงมีการปรับให้ระบบอยู่ในแวนอนหรือให้ฐานรองรับอยู่ด้านบนแทน

นอกจากนี้ยังมีการใช้อุปกรณ์เสริมเพื่อปรับปรุงระบบให้ดีขึ้น โดยแบบแรกจะใช้แผ่นจานโลหะวงกลมต่อกับเข็มโลหะ เพื่อช่วยให้สนามไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอมากขึ้น มุมในการพ่นเคลือบแคบลง และสามารถจ่ายความต่างศักย์ในช่วงที่กว้างขึ้น [36] แสดงดังรูปที่ 2.18ก นอกจากนี้ยังมีการนำท่อไพเร็กซ์ (Pyrex) มาต่อระหว่างเข็มกับฐานรองรับดังแสดงในรูปที่ 2.18ข เพื่อช่วยเป็นตัวบังคับทิศทางหยดของเหลวไปยังฐานรองรับ



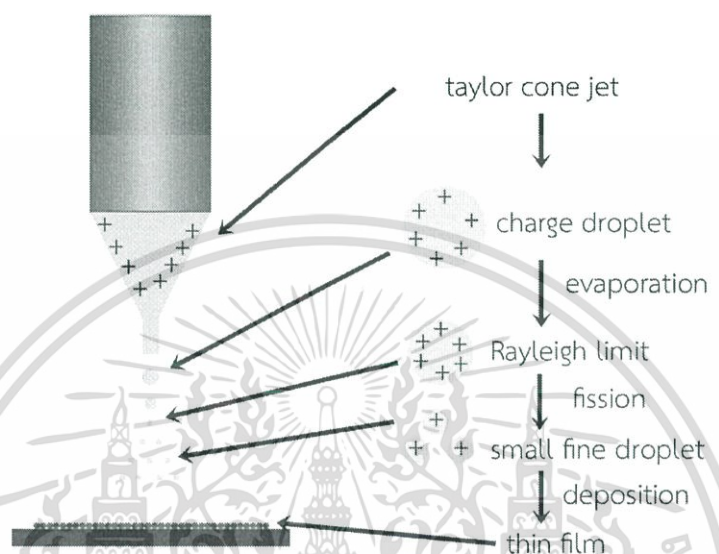
รูปที่ 2.18 ระบบที่มีการใส่อุปกรณ์เสริม (ก) แบบแผ่นจานโลหะ (ข) แบบท่อไพเร็กซ์ [36]

สารที่ใช้กับระบบนี้นั้นสามารถใช้ทั้งที่เป็นผงและเป็นของเหลว แต่โดยปกติจะนิยมสารที่เป็นของเหลว อาจจะเป็นของเหลวทั้งหมด หรือเป็นอนุภาคที่แพร่กระจายในของเหลวก็ได้ ทำการพ่นลงไปยังฐานรองรับ ของเหลวที่ใช้เป็นพาหะนี้เรียกว่าสารตั้งต้น สารตั้งต้นมีทั้งแบบปกติและแบบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงหรือแบบที่ทำปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการพ่น ทำให้เมื่อไปถึงฐานรองรับจะเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

การทำงานของระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถสรุปได้โดยย่อในรูปที่ 2.19 ในขั้นแรกทำการปล่อยสารที่ต้องการผ่านหลอดคาปิลารี สารจะเกิดเป็นหยดที่ปลายหลอดคาปิลารี โดยยึดติดกันด้วยแรงดึงดูดของสารเป็นรูปครึ่งทรงกลม เมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับ ประจุลบจะเคลื่อนที่ออกจากของเหลว ทำให้มีประจุบวกอยู่ในของเหลวจำนวนมาก สนามไฟฟ้าจึงทำให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตกับประจุบวกในของเหลวในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้า ทำให้มีแรงเฉือนที่ผิวของเหลว หากสนามไฟฟ้ามีค่าน้อย แรงดึงดูดจะยังสามารถรักษารูปทรงเดิมได้ทำให้เข้าสู่โหมดการหยด แต่เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอแรงเฉือนทางไฟฟ้าจะทำให้หยดของเหลวที่ปลายหลอดคาปิลารีเปลี่ยนรูปทรงเป็นกรวยคว่ำในโหมดกรวย Taylor ซึ่งเป็นโหมดหลักในการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต ของเหลวปลายกรวยคว่ำจะถูกยึดออกไปจนกลายเป็นหยดของเหลวที่มีประจุบวกไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นหยดต่อเนื่องกันไป โดยแรงตึงผิวที่มากเพียงพอจะยังรักษารูปทรงของเหลวเป็นทรงกลม แต่เมื่อหยดของเหลวเกิดการระเหยไปบางส่วนขนาดของของเหลวจะเล็กลงไปเรื่อย ๆ จนถึงขีดจำกัดของ Rayleigh ซึ่งเป็นหยดของเหลวที่มีประจุต่อปริมาตรมีค่าถึงขีดจำกัด ทำให้ไม่สามารถรักษารูปทรงเดิมได้ จึงเกิดการแตกตัวเป็นหยดประจุเล็ก ๆ กระจายตัวสม่ำเสมอด้วยไฟฟ้าสถิต จากนั้นหยดของเหลวจะเคลื่อนที่ไปยังฐานรองรับแล้วจับตัวกันเป็นฟิล์มบาง

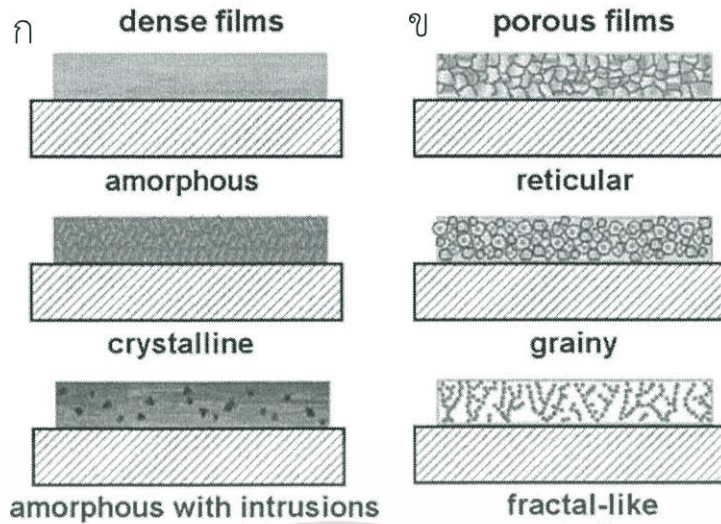


รูปที่ 2.19 แผนผังการทำงานของระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

กระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตควรทำที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเกิดปฏิกิริยาของของแข็ง เพื่อป้องกันการได้สารผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ นอกจากนี้อุณหภูมิของฐานรองรับยังเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ชั้นฟิล์มเกิดการเรียงตัวแบบสม่ำเสมอหรือเป็นแบบรูพรุน การเกิดรูพรุนนั้นเกิดจากการระเหยที่รวดเร็วของตัวทำละลายเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิฐานรองรับ ซึ่งแก้ได้โดยการเปลี่ยนองค์ประกอบของตัวทำละลาย โดยการเลือกใช้ของเหลวที่มีจุดเดือดที่สูงขึ้นจะช่วยให้การควบคุมอัตราการระเหย เช่น การใช้บิวทิลคาร์บิทอล (butyl carbitol) ผสมกับเอทานอล (ethanol) เป็นตัวทำละลายจะช่วยให้ฟิล์มมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

การก่อตัวของชั้นฟิล์มนั้นมีความซับซ้อนและมีหลายขั้นตอนทำให้สามารถอธิบายได้หลายมุมมอง ลักษณะพื้นผิวของชั้นฟิล์มโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับ อากาศ อุณหภูมิฐานรองรับ ชนิดของตัวทำละลาย และระยะเวลาที่ตัวทำละลายระเหยจากชั้นฟิล์ม ลักษณะของชั้นฟิล์มสามารถจำแนกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ ชั้นฟิล์มแบบหนาแน่น (dense) และแบบรูพรุน (porous) ดังรูปที่ 2.20g ชั้นฟิล์มแบบหนาแน่นสามารถเกิดได้ทั้งแบบอสัณฐาน แบบผลึก หรือแบบอสัณฐานผสมกับอนุภาค ส่วนแบบรูพรุนสามารถแบ่งได้เป็น แบบตาข่าย (reticular) แบบเป็นเม็ด (grainy) แบบรูปทรงซ้ำ ๆ (fractal) ดังแสดงในรูปที่ 2.20x ลักษณะโครงสร้างเหล่านี้สามารถเปลี่ยนไปตามความลึกของชั้นฟิล์ม การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่ถูกพ่นจะช่วยปรับแต่งลักษณะของฟิล์ม นอกจากนี้การหลอมชั้นฟิล์ม (annealing) ที่อุณหภูมิสูงจะช่วยปรับปรุงลักษณะฟิล์มได้ [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แผนผังการเกิดฟิล์ม (ก) ชั้นฟิล์มแบบหนาแน่น (ข) ชั้นฟิล์มแบบรูพรุน [36]

ระบบพ่นเคลือบสามารถสร้างฟิล์มได้บางมากซึ่งไม่มีรอยแตกและเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าวิธีอื่น ๆ กระบวนการสามารถทำได้ง่าย ราคาถูก ยืดหยุ่น และควบคุมได้ง่าย เทียบกับวิธีอื่น ๆ แล้ว อัตราการปลูกนั้นสูงกว่าและสามารถเคลือบในบรรยากาศปกติ หรือในแก๊สต่าง ๆ แม้กระทั่งที่อุณหภูมิต่ำ ๆ โดยไม่ต้องการระบบที่ซับซ้อน หรือระบบสุญญากาศ สารที่เคลือบด้วยวิธีนี้จะไม่ได้รับความเสียหายจากรังสีหรือสารชีวภาพ ระบบนี้สามารถเคลือบฟิล์มที่มีความบริสุทธิ์สูงซึ่งควบคุมโครงสร้างได้ในระดับนาโนเมตร ความเป็นผลึก เนื้อฟิล์ม ความหนา อัตราการเคลือบสามารถควบคุมได้โดยการปรับความต่างศักย์ อัตราการไหล และอุณหภูมิฐานรองรับ ชั้นฟิล์มที่เกิดจากระบบนี้ไม่เกิดการติสไลเคชันและรอยแยกขนาดไมครอน นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงเพราะ ปริมาณสารตั้งต้นในสัดส่วน 80-90% จะถูกเคลือบบนฐานรองรับ

## 2.6 การตรวจสอบคุณสมบัติทางวัสดุ

### 2.6.1 การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์

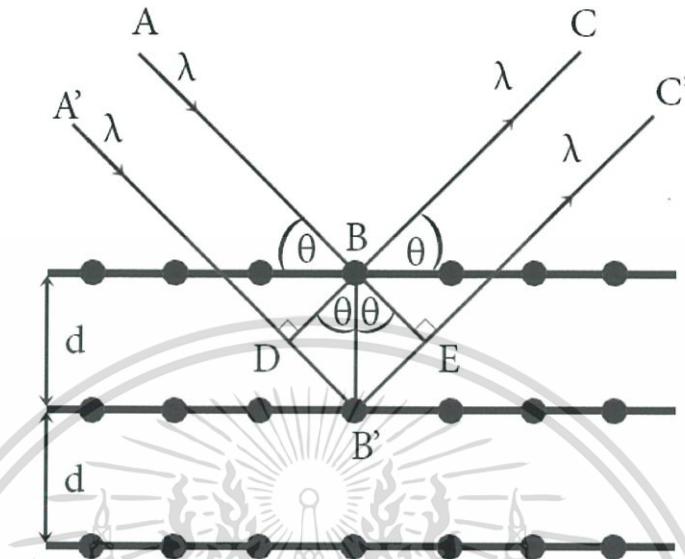
การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction : XRD) เป็นเทคนิคสำหรับวัดคุณสมบัติ (characterization) รูปแบบโครงสร้างและผลึก (structure and lattice) ของสารโดยใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเมื่อมีคลื่นเดินทางผ่านช่องว่างที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นจะเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่น ซึ่งถ้าต้องการวัดโครงสร้างในระดับใดก็จำเป็นต้องใช้ค่าความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับสิ่งที่จะวัด ในเทคนิคนี้เลือกความยาวคลื่นช่วง 0.5 – 2.5 อังสตรอม ซึ่งจัดว่าเป็นความยาวคลื่นในช่วงรังสีเอกซ์และทำให้สามารถเห็นโครงสร้างในระดับอะตอมและโมเลกุล จึงเป็นที่มาของชื่อเทคนิคนี้

จากรูปที่ 2.21 แสดงปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงผลึกของสาร พบว่ามุมที่เลี้ยวเบนเป็นมุม  $\theta$  จากสมการของการเลี้ยวเบนที่กล่าวมา ผลต่างของระยะทางจะเป็นเท่าของความยาวคลื่น ซึ่งผลต่างของเส้นทางเดิน ABC กับ A'B'C' เท่ากับระยะ DB'E ซึ่งสามารถใช้ตรีโกณมิติคำนวณได้เป็นระยะทาง  $2\sin\theta$  ดังนั้นเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.7)$$

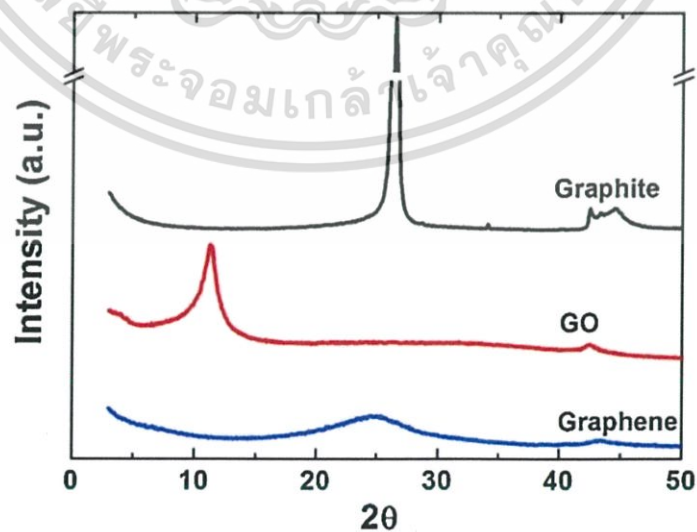
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\theta$  แทนมุมในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์  
 $d$  แทนระยะห่างระหว่างระนาบของโมเลกุล  
 $\lambda$  แทนความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



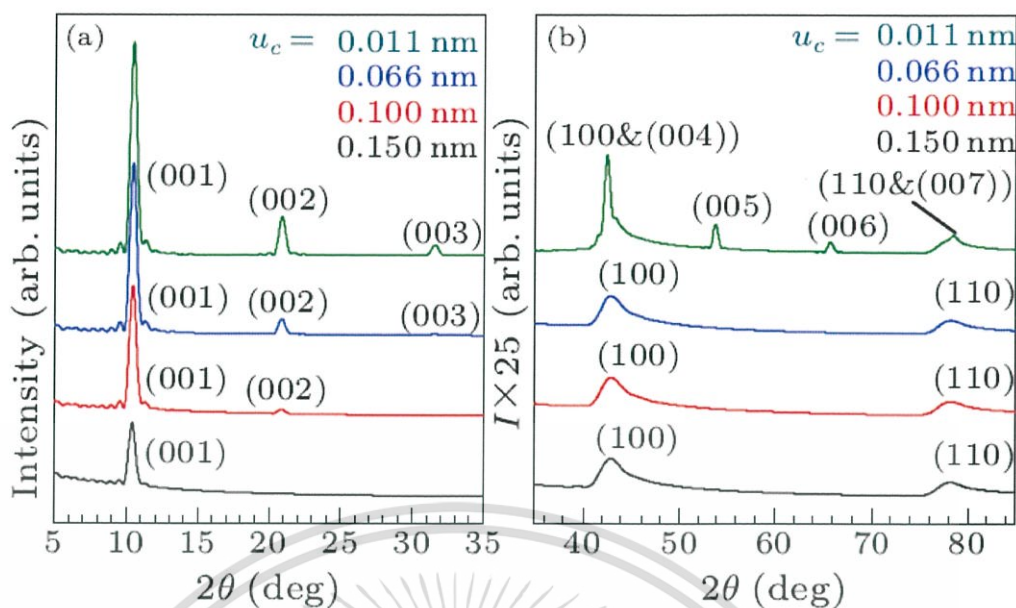
รูปที่ 2.21 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในวัสดุ

สมการที่ (2.7) นี้รู้จักกันในชื่อกฎของแบร็ก (Bragg's law) ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (pattern) การเลี้ยวเบนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้าง ขนาด และระนาบของโมเลกุล (Plane) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 สังเกตได้ว่า กราฟีนออกไซด์ กราฟีน และแกรไฟต์มีตำแหน่งของยอดกราฟ (peak) ที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถช่วยในการระบุโครงสร้างของสารได้ นอกจากนี้สำหรับกราฟีนนั้น จะสามารถคำนวณความกว้างระหว่างชั้น (interspace) ซึ่งมีบทบาทในการบ่งบอกชนิดของอนุพันธ์ของกราฟีนและการนำไปใช้ในอุปกรณ์บางชนิด เช่น อุปกรณ์ตรวจจับ ตัวเก็บประจุ ตัวกรองน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.22 รูปแบบการเลี้ยวเบนของสารอนุพันธ์กราฟีน [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของกราฟีนออกไซด์ [38]

ระนาบของกราฟีน กราฟีนออกไซด์นั้นอ้างอิงมาจากแกรไฟต์ โดยระนาบนั้นจะเรียกตามดัชนี มิลเลอร์ (miller indices) ระนาบต่าง ๆ ของกราฟีนจะมีระนาบหลักคือ (002) ระนาบนี้มันมีการกล่าวถึงในงานวิจัยที่แตกต่างกันคือ การเรียกตำแหน่งที่บริเวณ 11 องศาว่า ระนาบ (002) โดยอ้างอิงตามตำแหน่งของระนาบกราฟีนออกไซด์ หรือเรียกว่า ระนาบ (001) ตามการอ้างอิงของแกรไฟต์ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการอ้างอิงตามแบบหลัง [38]

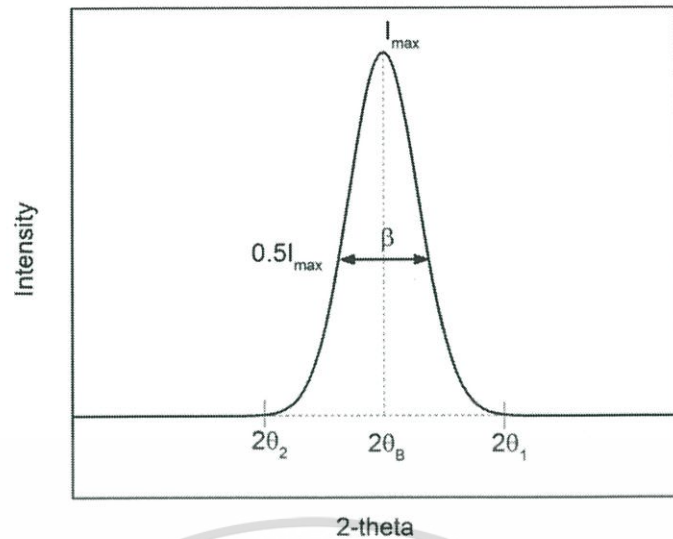
โดยปกติที่กราฟีนออกไซด์จะพบยอดกราฟที่ตำแหน่งประมาณ 11 องศา กราฟีนและแกรไฟต์จะพบที่ประมาณ 25 องศา และ 26.6 องศาตามลำดับ ซึ่งเป็นยอดกราฟหลักของสารเหล่านี้ การเลื่อนตำแหน่งของยอดกราฟกราฟีนออกไซด์ไปที่ 25 องศาจะสามารถแสดงถึงการรีดิวซ์ได้อย่างไรก็ตามมียอดกราฟอื่น ๆ สามารถพบได้เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งยอดกราฟ (001) นั้นจะเกี่ยวกับระยะห่างของระนาบระหว่างชั้นที่ทับซ้อนกัน ปกติจะพบเพียงระนาบ (001) และ (002) นอกจากนี้ระนาบอื่น ๆ เช่น (003) และ (004) นั้นพบได้ในสภาวะพิเศษบางอย่าง เช่น มีแรงกดระหว่างชั้นที่สูง หรือการสั่นเนื่องจากความร้อน ส่วนยอดกราฟ (hk0) นั้นสามารถเกิดได้เนื่องจากการซ้อนทับแบบบิดตัวของแผ่นกราฟีนออกไซด์ (a turbostratically stacked) ดังแสดงในรูปที่ 2.23

ในเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์นั้นสามารถนำข้อมูลมาทำการคำนวณเพื่อประมาณค่าจำนวนชั้นของกราฟีนได้จากยอดกราฟ (002) ซึ่งเป็นยอดกราฟหลักของกราฟีน โดยการคำนวณนั้นจะสามารถทำได้ 2 วิธี คือ ใช้สมการของ Scherrer (Scherrer's equation method) หรือใช้ฟังก์ชันลาเออ (Laue function method)

ในทางอุดมคติแล้ว ยอดกราฟที่ได้จาก XRD ควรจะเป็นเส้นทึบเดียว ๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการวัดจริง ยอดกราฟจะมีความกว้างออกไปดังแสดงในรูปที่ 2.24 มุมที่วัดได้มีค่าเป็นได้ตั้งแต่  $2\theta_1$  ถึง  $2\theta_2$  โดยมีความกว้างของยอดกราฟที่ครึ่งของความเข้มสูงสุดเป็น  $\beta$

ถ้าสมมติให้ผลึกมีความหนา  $t$  มีจำนวนระนาบเป็น  $n+1$  ระนาบในทิศทางการเลี้ยวเบน และ  $\theta$  เป็นมุมที่เกิดขึ้นตามกฎของแบรค ดังรูปที่ 2.25 จากสมการที่ (2.7) เมื่อทำการพิจารณาที่  $n=1$  และคูณด้วย  $m$  ทั้งสองข้างจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 ลักษณะของยอดกราฟ XRD ที่ได้จากการวัด

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

$$2t \sin \theta = m \lambda$$

(2.8)

จากสมการที่ (2.8) ทำการหาอนุพันธ์ทั้งสองฝั่งจะได้

$$2\Delta t \sin \theta + 2t \cos \theta \Delta \theta = 0$$

(2.9)

จากสมการที่ (2.9) สามารถคำนวณหา  $t$  ได้ตามสมการ

$$t = \frac{\Delta t \sin \theta}{\cos \theta \Delta \theta}$$

(2.10)

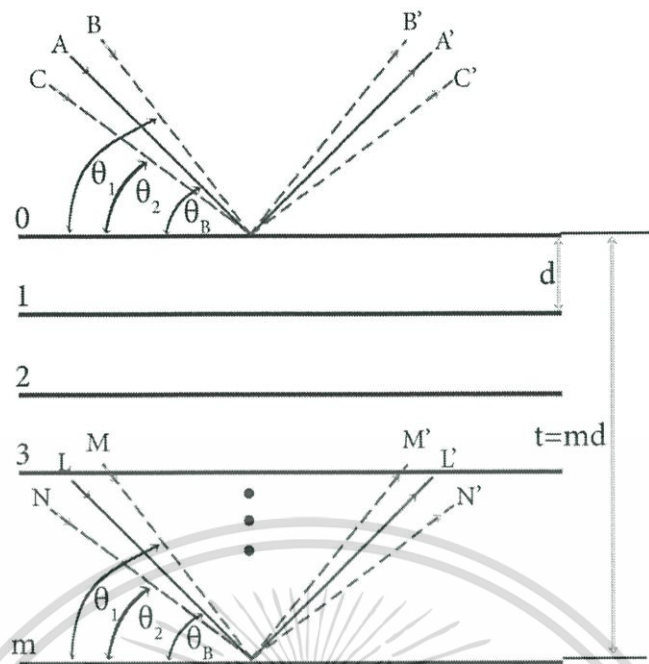
จากรูปที่ 2.25 ค่า  $\Delta t$  น้อยสุดคือค่า  $d$  และ  $\Delta \theta$  คือ  $\beta$  ดังนั้นจากสมการที่ (2.7) และ (2.10) จะได้เป็นสมการ Scherrer ซึ่งใช้ในการหาค่าของขนาดผลึก (crystalline size;  $D$ ) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ทั่วไปในเทคนิคนี้ สมการนี้แสดงได้ดังนี้

$$D = \frac{k \lambda}{\beta \cos \theta}$$

(2.11)

- โดยที่
- $k$  เป็นค่าคงที่ ซึ่งมีค่าทั่วไปอยู่ระหว่าง 0.89 – 0.94 ขึ้นอยู่กับรูปร่างผลึก
  - $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
  - $\beta$  เป็นความกว้างที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงยอดกราฟ (full width half maximum : FWHM)
  - $\theta$  เป็นมุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แผนภาพการวัดขนาดความเป็นผลึก

การประมาณค่าจำนวนชั้นกราฟีนจะสมมติว่า ผลึกกราฟีนเป็นผลึกรูปทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดเท่า ๆ กัน และเป็นแผ่นกราฟีนซ้อน ๆ กัน จึงเลือกใช้ค่า  $k = 0.89$  จากนั้นทำการหารด้วยระยะห่างระหว่างระนาบของกราฟีน ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$N = \frac{D-1}{d} \quad (2.12)$$

โดยที่  $N$  เป็นจำนวนชั้นของกราฟีน

$D$  เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณสมการ Scherrer

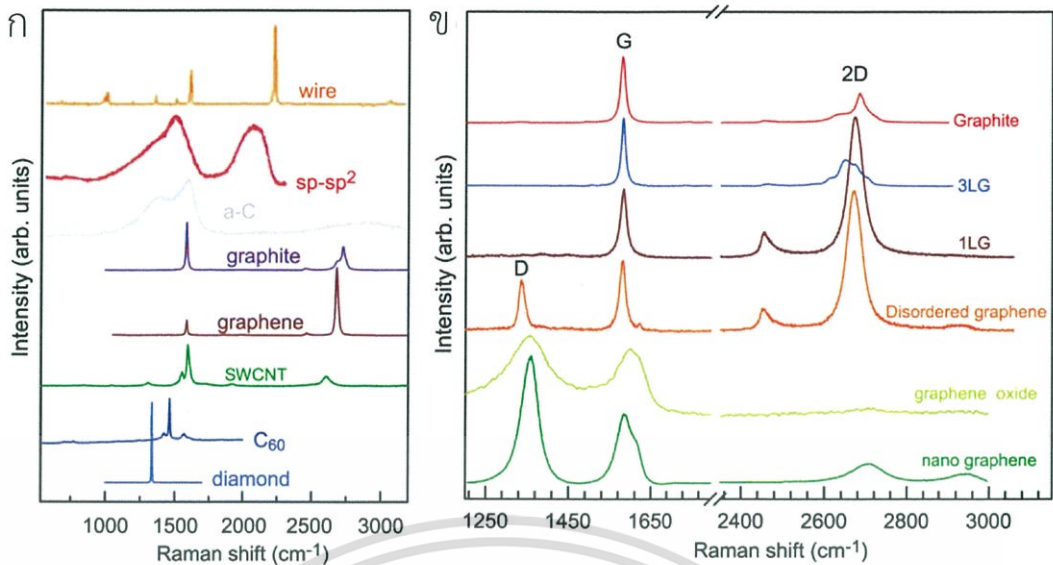
$d$  เป็นระยะระหว่างชั้นของแผ่นกราฟีน คำนวณได้จากกฎของแบร็ก

จากสมการดังกล่าว ทำให้สามารถประมาณค่าจำนวนชั้นของกราฟีนหรือกราฟีนออกไซด์ได้ ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของอนุพันธ์กราฟีน

### 2.6.2 รามานสเปกโตรสโคปี

รามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้โฟตอนพุ่งเข้าชนกับชิ้นงาน และเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานกันซึ่งการชนแบบนี้เรียกว่า โหมดรามัน การโหมดรามันสามารถเกิดได้ทั้งแบบยืดหยุ่น (ไม่มีการสูญเสียพลังงาน) และแบบไม่ยืดหยุ่น (เกิดการสูญเสียพลังงาน) ในเทคนิครามานสนใจการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานกับชิ้นงานบางส่วน โดยพลังงานที่ใช้ไปขึ้นอยู่กับโหมดการสั่นของชิ้นงาน พลังงานของโฟตอนหลังชนอาจเพิ่มมากขึ้น (เกิดแอนตี้สโตริก) หรือลดลงก็ได้ (เกิดสโตริก) ในการวิเคราะห์รามานนิยมใช้การเกิดสโตริกมาทำการวิเคราะห์เนื่องจากการเกิดสโตริกจะเกิดกับอิเล็กทรอนิกส์ในสภาวะพื้นซึ่งพบในธรรมชาติมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



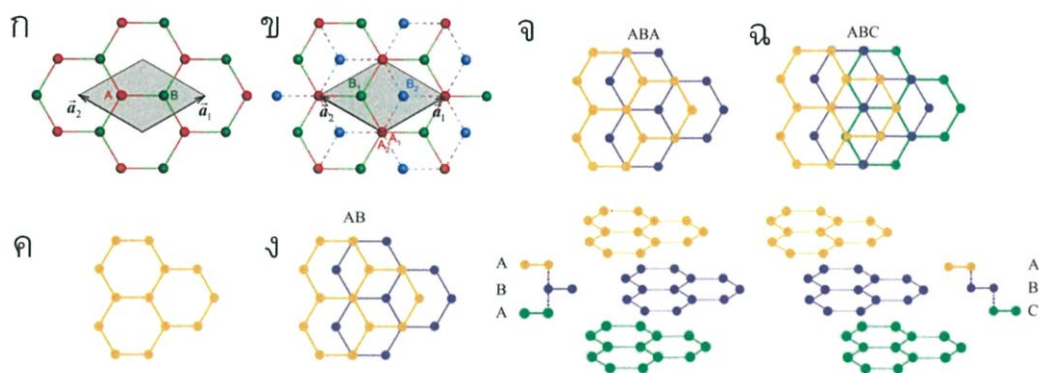
รูปที่ 2.26 กราฟรามานของ (ก) วัสดุคาร์บอนประเภทต่าง ๆ (ข) สารอนุพันธ์ของกราฟีน [39]

รามานสเปกโตรสโคปี จัดเป็นเทคนิคที่สำคัญสำหรับสารประกอบคาร์บอน เพราะสามารถใช้ในการแยกชนิดของคาร์บอนได้ดังรูปที่ 2.26ก และนอกจากนี้ยังสามารถใช้แยกลักษณะของสารแกรไฟต์และสารอนุพันธ์ของกราฟีนได้ดังรูปที่ 2.26ข เทคนิคนี้สามารถตรวจสอบได้รวดเร็ว ไม่ทำลายโครงสร้าง มีความละเอียดสูง และยังให้ข้อมูลสมบัติที่สำคัญของวัสดุคาร์บอนอีกหลายประการ เช่น สมบัติโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ทางแสง และโฟนอน (phonon)

### 2.6.2.1 โครงสร้างแถบอิเล็กทรอนิกส์ของกราฟีนชั้นเดียวและกราฟีนหลายชั้น

ในการทำความเข้าใจการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานต้องเข้าใจโครงสร้างพื้นฐานของกราฟีนก่อน กราฟีนชั้นเดียวเป็นอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกันกับอีกสามอะตอมคาร์บอนในลักษณะโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง 2.27ค หน่วยเซลล์ (unit cell) ของผลึกแลตทิซ (crystal lattice) ประกอบด้วยสองอะตอมคาร์บอน คือ อะตอม A และ อะตอม B จับตัวกันเป็นเครือข่ายรูปสามเหลี่ยมในระนาบ ดังรูปที่ 2.27ก การกระจัดระหว่างอะตอม A และ B มีความยาวของพันธะโคเวเลนต์เป็น 0.142 นาโนเมตร ซึ่งจะมีค่าที่แลตทิซ  $a = 0.246$  นาโนเมตร กราฟีนหลายชั้นจะเกิดจากการทับกันของโครงสร้างจากกราฟีนชั้นเดียวในทิศทางที่ไม่อยู่ในระนาบ โครงสร้างการทับกันของกราฟีนที่เสถียรที่สุดจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างการซ้อนทับกันแบบ AB คือ กราฟีนชั้นที่อยู่ติดกันจะหมุนเป็นมุม 60 องศา ทำให้อะตอมของคาร์บอนในชั้นถัดไปอยู่ตรงกึ่งกลางของรูปหกเหลี่ยมในชั้นก่อนหน้า รูปที่ 2.27ข เป็นโครงสร้างอะตอม กราฟีนสองชั้นที่ทับซ้อนกันแบบ AB ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าระยะห่างระหว่างชั้นเป็น 0.35 นาโนเมตร และมีหน่วยเซลล์สี่อะตอม ดังรูปที่ 2.27ข สำหรับกราฟีนสามชั้นสองชั้นแรกจะทำการซ้อนทับกันแบบ AB แล้วชั้นที่สามจะสามารถซ้อนทับกันได้สองแบบใหญ่ ๆ คือ หากซ้อนทับลงไปตรงกับตำแหน่งกราฟีนชั้นแรก ทำให้เขียนการทับกันได้เป็นโครงสร้างแบบ ABA ดังรูปที่ 2.27จ หรืออาจจะทับลงไปเลื่อนไปอีก 60 องศา จะเป็นการทับกันแบบ ABC ดังรูปที่ 2.27ฉ แต่โดยปกติแล้วกราฟีนจะซ้อนทับกันแบบ AB เพราะเป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 หน่วยเซลล์ของกราฟีน (ก) ชั้นเดียว (ข) สองชั้น และโครงสร้างของกราฟีน (ค) กราฟีนชั้นเดียว (ง) กราฟีนสองชั้นที่ซ้อนทับแบบ AB และกราฟีนที่ซ้อนทับกันสามชั้นแบบ (จ) ABA และ (ฉ) ABC [40]

ในรูปที่ 2.28ก แสดงจุดที่มีสมมาตรสูงในโซนบริลลูอิน (Brillouin zone) ของกราฟีนชั้นเดียวในโดเมนตาแหน่ง (reciprocal space) ได้แก่ จุด  $\Gamma$  อยู่ที่โซนกึ่งกลางของรูปหกเหลี่ยม จุด M อยู่ที่กึ่งกลางด้านของหกเหลี่ยม ส่วนจุด K และ K' อยู่ที่มุมทั้งสองของหกเหลี่ยม รูปที่ 2.28ข เป็นภาพจำลองการกระจายโครงสร้างแถบของโซนบริลลูอินของกราฟีนชั้นเดียว โดยตำแหน่งที่จุด K และ K' เป็นจุดที่แถบพลังงานมากสัมผัสกันมีลักษณะเป็นกรวยสองรูปชนกันพอดี เรียกว่า กรวย dirac (dirac cone) ซึ่งทำให้กราฟีนมีคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์

### 2.6.2.2 โหมดการสั่นของโฟนอน

โหมดของโฟนอนเป็นการสั่นของแลตทิซในกราฟีน เนื่องจากกราฟีนมีสองอะตอมจึงสามารถเกิดโหมดการสั่นโฟนอนได้ 6 โหมด คือ โหมดอะคูสติก (acoustic mode) 3 โหมด ได้แก่ โหมดอะคูสติกการสั่นในระนาบแบบตามขวาง (transverse acoustic mode : TA) โหมดอะคูสติกการสั่นในระนาบแบบยาว (longitudinal acoustic mode : LA) และโหมดอะคูสติกการสั่นนอกระนาบ (out-of-plane acoustic mode : ZA) และโหมดออปติก (optical mode) 3 โหมด ได้แก่ โหมดออปติกการสั่นในระนาบแบบตามขวาง (transverse optical mode : TO) โหมดออปติกการสั่นนอกระนาบ (out-of-plane optical mode : ZO) โหมดออปติกการสั่นนอกระนาบ (out-of-plane optical mode : ZO) โดยโหมดการสั่นนอกระนาบไม่ได้มีบทบาทสำคัญที่เกี่ยวข้องของกับสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของกราฟีน

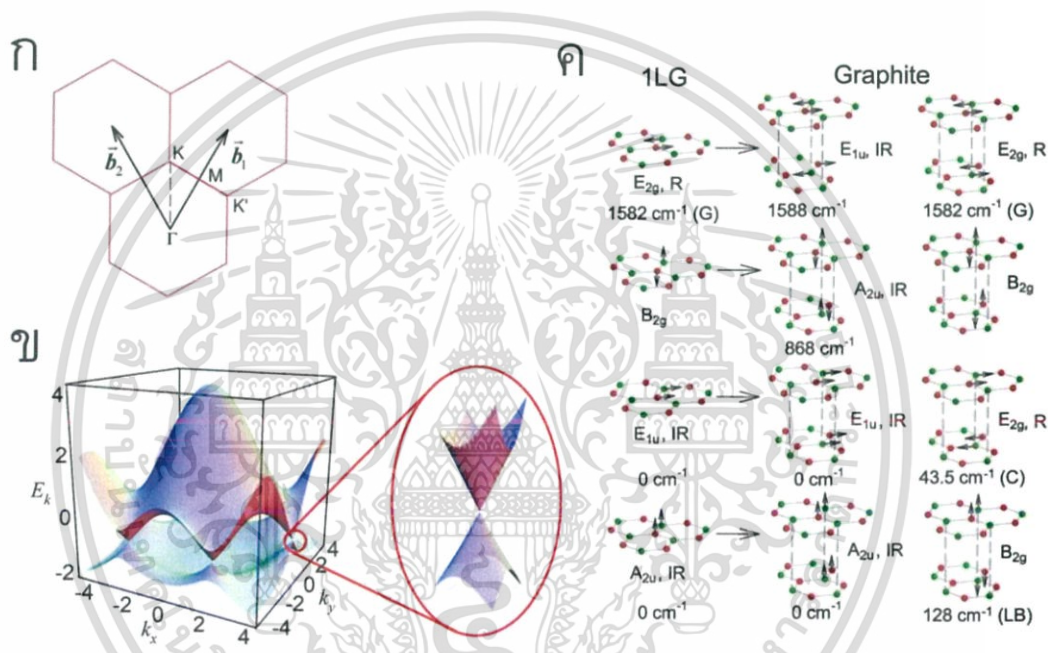
การสั่นของแลตทิซกราฟีนออกไซด์ชั้นเดียวและแกรไฟต์สามารถเขียนได้เป็น :

$$\Gamma_{\text{graphene}} = A_{2u} + B_{2g} + E_{1u} + E_{2g} \quad (2.13)$$

$$\Gamma_{\text{graphite}} = 2(A_{2u} + B_{2g} + E_{1u} + E_{2g}) \quad (2.14)$$

ตามลำดับ โหมดอะคูสติกสามโหมดทั้งในกราฟีนชั้นเดียวและแกรไฟต์ ทำให้เกิดโหมด  $A_{2u}$  และโหมด  $E_{2u}$  ส่วนโหมดออปติกสามโหมดทำให้เกิดโหมดในระนาบ  $E_{2g}$  และโหมดนอกระนาบ  $B_{2g}$  ดังรูปที่ 2.28ค ในแกรไฟต์มีพันธะระหว่างชั้นที่เบาบางมากจึงสามารถมองเป็นกราฟีนหลายชั้นได้ แต่ชั้นถัดจากชั้นแรกของแกรไฟต์มีการจัดเรียงที่ต่างไปจากชั้นแรกจึงทำให้แกรไฟต์เกิดการแยกโหมด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟีนชั้นเดียวเป็น 12 โหมด โดยเพิ่มโหมดการสั่นทิศทางเดียวกันและทิศทางต่างกัน ดังรูปที่ 2.28ค โดยที่ โหมด  $E_{2g}$  ในกราฟีนเกิดโหมด  $E_{1u}$  และ  $E_{2g}$  ในแกรไฟต์ โหมด  $B_{2g}$  ในกราฟีน จะแยกเป็นโหมด  $A_{2u}$  และ  $B_{2g}$  โดยโหมด  $E_{2g}$  และ  $B_{2g}$  ที่เหลือของกราฟีนจะทำให้เกิดโหมดการเฉือน (shear mode) และโหมดเลเยอร์บริดดิ้ง (layer-breathing mode : LB) ซึ่งตอบสนองกับการสั่นใน ระนาบและนอกระนาบระหว่างชั้นกราฟีนตามลำดับ ในการตรวจสอบโหมดต่าง ๆ สังเกตว่า โหมด  $E_{1u}$  และ  $A_{2u}$  ให้อุดกราฟในการตรวจสอบด้วยอินฟราเรด (infrared-active) ส่วนโหมด  $E_{2g}$  จะพบยอดกราฟ G ในการตรวจสอบด้วยรามาน โหมด  $E_{2g}$  เกิดจากการสั่นของ LO และ TO โหมด  $B_{2g}$  เกิดจากการสั่นของ ZO นอกจากนี้การสั่นอีกสามโหมดในโหมดอะคูสติคทำให้เกิดความเร็วเสียงที่มี ค่าสูงในระนาบ ทำให้กราฟีนมีคุณสมบัติการนำความร้อนได้ดี



รูปที่ 2.28 (ก) หน่วยเซลล์ในโดเมนตำแหน่งของกราฟีนชั้นเดียว (ข) โครงสร้างแถบพลังงานของกราฟีนชั้นเดียว และ (ค) โหมดการเคลื่อนที่ของโฟนอนที่จุด  $\Gamma$  [39]

### 2.6.2.3 ยอดกราฟของกราฟของรามาน

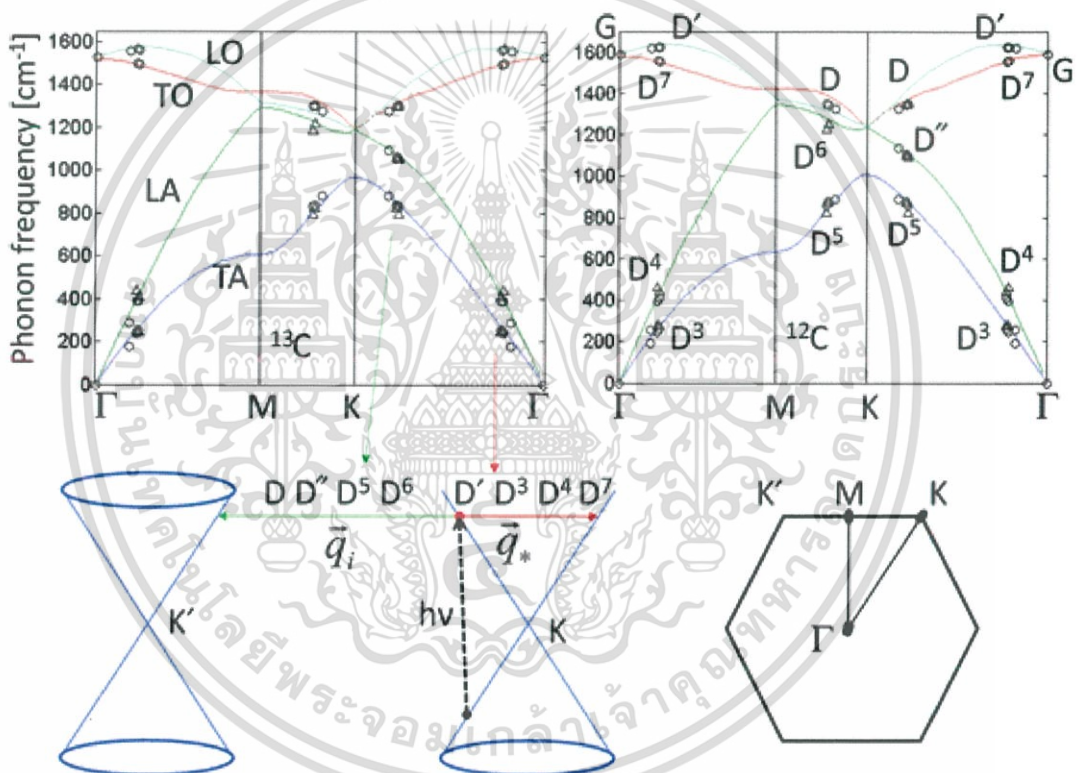
ในกราฟรามานของสารอนุพันธ์กราฟีนจะสามารถแบ่งกระบวนการเกิดยอดกราฟได้เป็น 3 กระบวนการหลัก คือ

กระบวนการที่ 1 ยอดกราฟกราฟ G จะเกี่ยวกับการเกิดโฟนอนที่จุด  $\Gamma$  ที่มีโมเมนตัมเป็นค่าศูนย์และอิเล็กตรอนไม่เกิดการเคลื่อนที่ในโซนบริลลูอินทำให้เกิดค่ายอดกราฟ G ที่ประมาณ  $1586\text{ cm}^{-1}$  ดังรูปที่ 2.29 ซึ่งตำแหน่งยอดกราฟไม่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าพลังงานเลเซอร์ที่ใช้กระตุ้น แต่เปลี่ยนไปตามการรบกวนจากภายนอกเช่น ข้อบกพร่อง การเจือ ความเครียด อุณหภูมิ เป็นต้น

กระบวนการที่ 2 การเคลื่อนที่บริเวณกรวย dirac เกี่ยวกับการปลดปล่อยโฟนอนเมื่อเกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นในกรวย dirac K หรือ K' กระบวนการจะเกิดระหว่างข้างกรวยข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่ง ทำให้โฟนอนหรืออิเล็กตรอนมีเลขคลื่น (wave number) ไปตามสมการ

$$q = \frac{\pi c}{\lambda v_F} \quad (2.15)$$

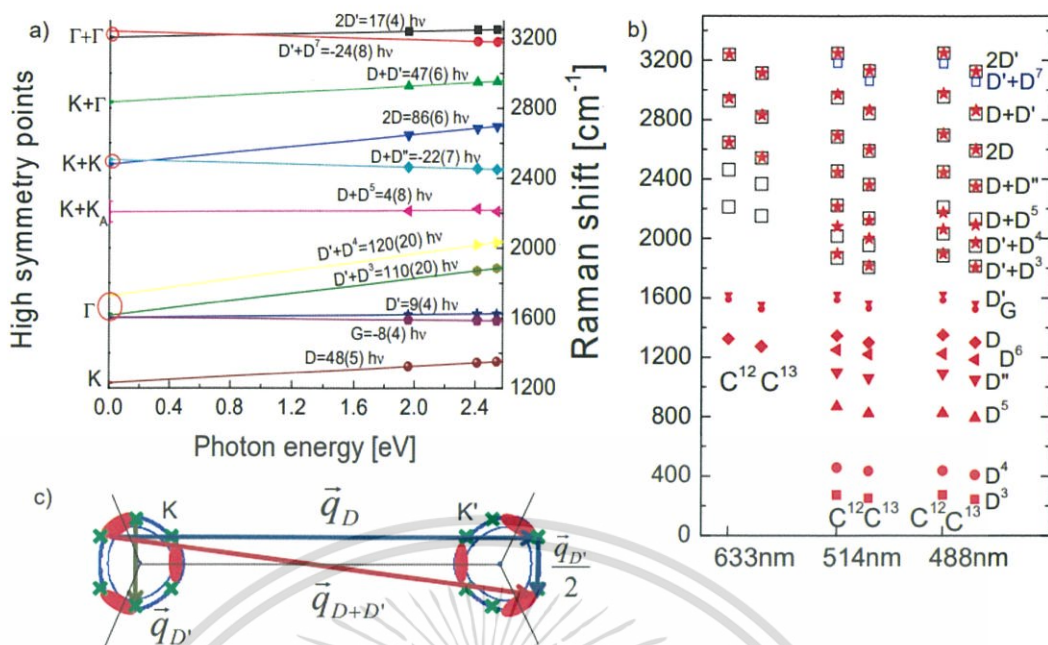
โดยที่  $c$  คือความเร็วแสง  $v_F$  คือค่าความเร็ว Fermi (Fermi velocity)  $10^6$  เมตรต่อวินาที และ  $\lambda$  คือค่าความยาวคลื่นของรามานเลเซอร์ ในกระบวนการนี้จะทำให้เกิดเส้น  $D^3$  จากโฟนอน TA เส้น  $D^4$  จากโฟนอน LA เส้น  $D^7$  จากโฟนอน TO และเส้น  $D'$  จากโฟนอน LO ที่มีค่าโมเมนตัม  $q$  ห่างจากจุด  $\Gamma$  ดังรูปที่ 2.29 (สัญลักษณ์  $\vec{q}_*$ )



รูปที่ 2.29 แผนผังแสดงการเกิดยอดกราฟต่าง ๆ ของกราฟีนในกราฟรามาน [40]

กระบวนการที่ 3 การเคลื่อนที่ระหว่างกรวย dirac เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยโฟนอนสำหรับการกระเจิงอิเล็กตรอนที่ตำแหน่ง K ไปยัง K' สมมติว่าอิเล็กตรอนกระเจิงจากด้านตรงข้ามของกรวย dirac ตามแผนผังตำแหน่ง K-M จะเกิดเลขคลื่นของการปลดปล่อยคือ  $K-K' + q$  ถ้าอิเล็กตรอนกระเจิงระหว่างด้านใน ตามแผนผังตำแหน่ง K-M จะได้เลขคลื่นเป็น  $K-K' - q$  (สัญลักษณ์  $\vec{q}_i$  ในรูปที่ 2.29) ปฏิกริยาทั้งสองแบบจะอยู่ห่างจากจุด K เป็น  $q$  กระบวนการนี้ทำให้เกิดเส้น  $D^5$  จากโฟนอน TA เส้น  $D''$  หรือ  $D^6$  จากโฟนอน TA และเส้น D จากโฟนอน TO หรือ LO (มักจะเกิดจากโฟนอน TO มากกว่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 ตำแหน่งยอดกราฟรามานของกราฟีนที่เปลี่ยนไปตามพลังงานโฟตอน [40]

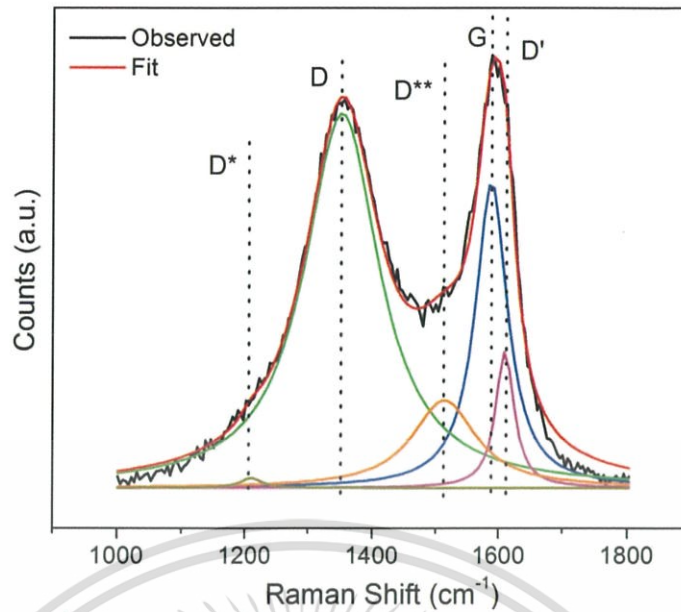
เส้นรามานดังกล่าวสามารถเขียนสรุปได้เป็นแผนผังตามรูปที่ 2.29 นอกจากนี้ยังมีอีกกระบวนการคือการสั่นพ้องเป็นสองเท่า (Double resonance) ซึ่งโฟตอนจะไปทำการปลดปล่อยโฟนอนสองตัวผสมกัน ทำให้เกิดยอดกราฟ เช่น ยอดกราฟ 2D ซึ่งสามารถใช้หาจำนวนชั้นของกราฟีนได้และคล้ายกันกับยอดกราฟ 2D' ที่เกิดจากโฟนอนที่พลังงานเท่ากันแต่มีค่าโมเมนตัมที่ตรงข้ามกัน

ยอดกราฟ D จะเกิดจากการกระเจิงข้ามกรวย dirac ซึ่งสามารถใช้ตรวจหาการเจือปน (impurity) ในระยะสั้น ๆ ได้ โดยจะมีค่ายอดกราฟสูงขึ้นตามการเกิดการเจือปน นอกจากนี้ยังมีกระบวนการเกิดคูโฟนอนที่เกิดจากโมเมนตัมตรงข้ามกันและมีพลังงานที่ต่างกันมารวมกัน ได้แก่  $D'+D^3$ ,  $D'+D^4$ ,  $D+D^5$ ,  $D+D^6$  และ  $D'+D^7$

ยอดกราฟรามานที่จุดต่าง ๆ ส่วนใหญ่มีการเลื่อนตำแหน่งไปตามพลังงานโฟตอนที่ถูกกระตุ้น โดยสามารถสรุปตำแหน่งยอดกราฟรามานของสารอนุพันธ์กราฟีนได้ดังรูปที่ 2.30

โดยทั่วไป กราฟีนออกไซด์จะพบยอดกราฟเพียงสามยอดกราฟคือยอดกราฟ D, G และ 2D อย่างไรก็ตามเพื่อทำการวิเคราะห์เชิงลึก ยอดกราฟ D และยอดกราฟ G สามารถแยกเป็นองค์ประกอบย่อยได้ห้ายอดกราฟดังรูปที่ 2.31 ยอดกราฟ D ที่ตำแหน่ง  $1350 \text{ cm}^{-1}$  ยอดกราฟ G ที่ตำแหน่ง  $1580 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นยอดกราฟที่พบได้ทั่วไป แลพบยอดกราฟ G ที่กว้างออกไปด้านพลังงานที่สูงนั้นเกิดจากยอดกราฟ D' ที่ตำแหน่ง  $1620 \text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้ยังมีอีกสองยอดกราฟที่ตำแหน่ง  $1190 \text{ cm}^{-1}$  และ  $1500 \text{ cm}^{-1}$  คือยอดกราฟ D\* และยอดกราฟ D\*\* ตามลำดับ สองยอดกราฟนี้จะเกิดในคาร์บอนที่เกิดความไม่เป็นระเบียบยอดกราฟ D\* จะมีความสัมพันธ์กับพันธะ  $sp^3$  ของคาร์บอนสัญญาณยอดกราฟ D\*\* จะเกิดจากการสั่นของ C-H ในคาร์บอน อย่างไรก็ตามสองยอดกราฟนี้อาจเกิดจากการสั่นของ C=C และ C-H แบบ โหมด wagging ของทรานโพลีซีไทลีน (สายของคาร์บอนพันธะ  $sp^2$  ที่มีไฮโดรเจนหนึ่งอะตอม) ไม่ได้เกิดจากคาร์บอนพันธะ  $sp^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

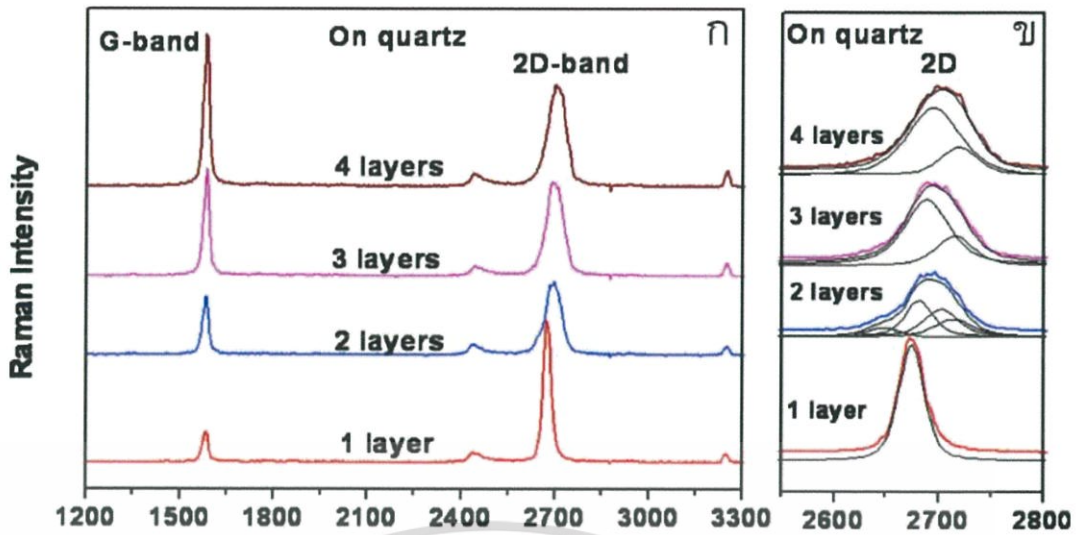


รูปที่ 2.31 การแยกเป็นองค์ประกอบย่อย ๆ ของรามาน [41]

อัตราส่วนของความเข้มที่จุดยอดระหว่าง  $I_D/I_G$  สามารถใช้อธิบายระดับความไม่เป็นระเบียบในกราฟีน โดยอัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  นั้นมีค่าเป็นส่วนกลับกับขนาดผลึก เมื่อเพิ่มความไม่เป็นระเบียบมากขึ้น จะทำให้สามารถแบ่งอัตราส่วนนี้เป็นสองบริเวณ คือ บริเวณที่มีความหนาแน่นของจุดบกพร่องต่ำ (low defect density) และบริเวณที่มีความหนาแน่นของจุดบกพร่องสูง (high defect density)

บริเวณที่มีความหนาแน่นของจุดบกพร่องต่ำนั้น อัตราส่วน  $I_D/I_G$  จะเพิ่มเมื่อมีเกิดจุดบกพร่องมากขึ้นซึ่งจะสร้างการกระเจิงแบบยืดหยุ่นมากขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราส่วนนี้จะเริ่มลดลงเมื่อเกิดจุดบกพร่องเพิ่มขึ้นทำให้มีความเป็นคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous) ในบริเวณที่มีความหนาแน่นของจุดบกพร่องสูง เรียกสองบริเวณนี้ได้ว่า เฟสนาโนคริสตัลแกรไฟต์ และเฟสคาร์บอนอสัณฐาน พันธะ  $sp^2$  ตามลำดับ

การเพิ่มของแรงจากอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างชั้นกราฟีนที่ทับซ้อนแบบ AB เมื่อมีจำนวนชั้นมากขึ้น ทำให้สเปกตรัมเปลี่ยนไปจากกราฟีนชั้นเดียวโดยที่เกิดการแยกตัวของยอดกราฟ 2D ตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนโหมดที่เกิดขึ้น ทำให้กราฟที่ได้จากการรวมกันมีลักษณะกว้างขึ้น สั้นลง และมีความถี่ที่สูงขึ้น ยอดกราฟ G จะเกิดการเลื่อนไปฝั่งพลังงานต่ำจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นกราฟีน ดังนั้นในโครงสร้างที่ทับซ้อนแบบ AB จะสามารถหาจำนวนชั้นได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเข้มของยอด  $I_{2D}/I_G$  หรือมองในมุมของตำแหน่งและรูปร่างของยอดนี้ การเกิดความไม่เป็นระเบียบ (disorder) แบบหมุนของกราฟีนหลายชั้นยังคงให้ยอดกราฟเดี่ยวของยอดกราฟ 2D โดยไม่เกี่ยวกับความหนา แต่ตำแหน่งและความกว้างที่ครึ่งของยอด (FWHM) ยังคงขึ้นอยู่กับจำนวนชั้น ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 การประมาณจำนวนชั้นของกราฟีน [42]

ค่า  $I_D$  และ  $I_G$  แปรผันตรงกับค่าความเข้มของจุดบกพร่อง ดังนั้นอัตราส่วน  $I_D/I_G$  จะไม่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของจุดบกพร่อง แต่ค่า  $I_D/I_G$  จะสามารถใช้ในการตรวจสอบธรรมชาติของจุดบกพร่องได้ โดยที่ ค่า  $I_D/I_G$  จะมีค่าประมาณ 13 เมื่อเป็นจุดบกพร่องแบบ  $sp^3$  มีค่าเป็น 7 เมื่อเป็นจุดบกพร่องแบบช่องว่าง (vacancies) และมีค่าเป็น 3.5 เมื่อเป็นจุดบกพร่องแบบขอบเกรน [39]

ตำแหน่งของยอดกราฟ  $D^*$  และ  $D^*$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณกลุ่มออกซิเจนของกราฟีนออกไซด์ดังนั้นจึงสามารถใช้ในการประมาณค่าออกซิเจนในกราฟีนออกไซด์ได้ โดยตำแหน่งของ  $D^*$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนออกซิเจน และตำแหน่งของ  $D^*$  จะลดลงไปตามค่าจำนวนออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น ค่า  $I_D/I_G$  และ ค่าความกว้างของยอดกราฟ  $D^*$  จะมีค่าลดลงเมื่อความเป็นผลึกสูงขึ้น และค่า  $I_D/I_G$  จะมีค่าลดลงตามจำนวนพันธะ  $sp^3$  ที่ลดลง [43]

กราฟรามานสามารถใช้ในการทำนายระดับการเจือของกราฟีนได้โดยประมาณจากตำแหน่งของยอดกราฟ G หรือ  $\omega(G)$  และ ค่า  $\sqrt{A(2D)/A(G)}$  โดยระดับเฟอร์มี (fermi) จะมีการเลื่อนแบบเชิงเส้นไปตามตำแหน่งยอดกราฟ G ถ้าระดับของพลังงานที่เลื่อนไปมีค่ามากกว่า 0.1 eV สามารถหาได้จากสมการ [39]

$$|E_F| = \Delta\omega(G) / 21 \quad (2.16)$$

หรือประมาณจาก

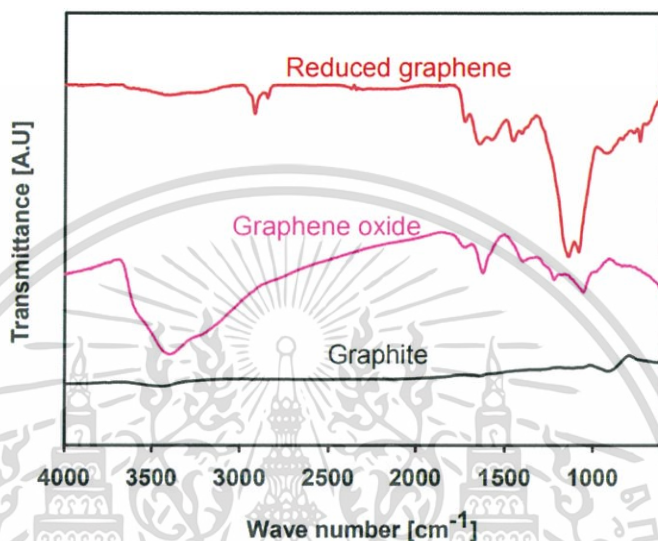
$$|E_F| = 0.9\sqrt{A(G)/A(2D)} - 0.23 \quad (2.17)$$

เมื่อ  $A(G)$  และ  $A(2D)$  เป็นค่าพื้นที่ใต้กราฟ G และ 2D ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม สมการที่ (2.16) และ (2.17) จะใช้ได้กับความยาวคลื่นรามานที่ 512 nm หากเป็นค่าความยาวคลื่นอื่น ค่าที่ใช้คำนวณจะต้องทำการปรับแก้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 เทคนิคฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป

เทคนิคฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) จะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 2,500 – 25,000 นาโนเมตร ส่งไปยังวัตถุตัวอย่างเพื่อวัดช่วงการดูดกลืนของความยาวคลื่นในช่วงนี้ โดยโมเลกุลที่สั่นพอดีกับความยาวคลื่นนั้น ๆ จะถูกดูดกลืน ทำให้สามารถแยกแยะชนิดการสั่นของโมเลกุลได้ ซึ่งการสั่นของโมเลกุลที่วัดได้ต้องเป็นการสั่นที่ทำให้เกิดขั้วคู่ของโมเลกุล (dipole moment)



รูปที่ 2.33 การเปรียบเทียบอนุพันธ์กราฟีนด้วยเทคนิค FTIR [42]

FTIR จัดเป็นวิธีการตรวจสอบที่รวดเร็วและเหมาะกับการตรวจสอบกราฟีนออกไซด์ ข้อเสียของ FTIR คือ ในช่วงการดูดกลืนในบริเวณที่เรียกว่า ย่านรอยนิ้วมือ (fingerprint region) ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวตามชนิดของสารที่ตรวจวัดนั้นไม่สามารถระบุชนิดของแถบการดูดกลืนที่แน่นอนได้อย่างไรก็ตาม FTIR เป็นเทคนิคสำคัญสำหรับตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันในกราฟีนออกไซด์

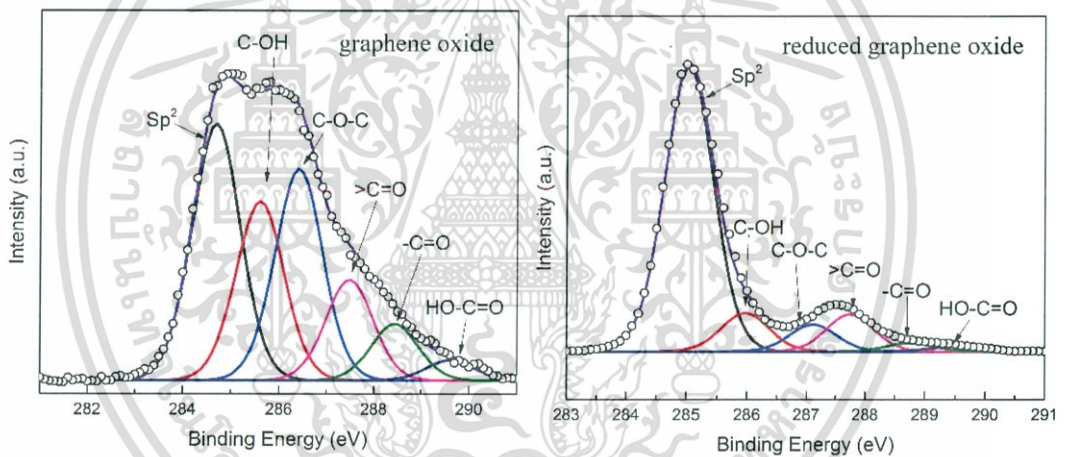
หลักการของ FTIR นั้นจะใช้คุณสมบัติการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพันธะของอะตอมในช่วงความถี่ 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  ในทางทฤษฎีแล้ว กราฟีนออกไซด์สามารถเตรียมตัวอย่างสำหรับการวัด FTIR ได้ทุกวิธีการเตรียมตัวอย่างของ FTIR แต่โดยทั่วไปแล้วจะนิยมเตรียมตัวอย่างกัน 2 วิธีคือ วิธีการใช้โหมดการทะลุผ่าน (transmission mode) ด้วยกราฟีนออกไซด์ที่อัดเม็ดด้วยสาร KBr และวิธีการ attenuated total reflection (ATR) แต่การเตรียมกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีอัดเม็ดจะมีการเตรียมที่ยุงยากกว่าการใช้วิธี ATR ที่สามารถใช้แผ่นกราฟีนออกไซด์วัดได้โดยตรงซึ่งใช้เวลาน้อยกว่า และที่สำคัญคือการวัดแบบ ATR จะมีผลให้ความเข้มของยอดกราฟต่ำลงเล็กน้อยเท่านั้น

เทคนิค FTIR เป็นเทคนิคที่สามารถตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของกราฟีนได้ครบ ทั้งหมู่ฮิพอกซี ( $\text{C-O}$ ; 1200  $\text{cm}^{-1}$ ) หมู่แอลคอกซี ( $\text{C-O}$ ; 1070  $\text{cm}^{-1}$ ) หมู่คาร์บอนิลหรือคาร์บอกซิล ( $\text{C=O}$ ; 1720  $\text{cm}^{-1}$ ) [44] นอกจากนี้ ยังสามารถเปรียบเทียบลักษณะสารแต่ละชนิดได้อีกด้วย ดังรูปที่ 2.33 ถึงแม้จะเป็นสารอนุพันธ์กราฟีนเหมือนกัน แต่จะมีช่องแถบลายนิ้วมือที่ต่างกันไปตามส่วนประกอบของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.4 เอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

เอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (X-Ray Photoelectron Spectroscopy : XPS) เป็นเทคนิคสำหรับตรวจวัดธาตุของสารประกอบ สูตรอย่างง่าย (empirical formula) สถานะทางเคมี และสถานะทางอิเล็กทรอนิกส์ของธาตุในวัสดุ XPS ยังสามารถใช้วิเคราะห์ระดับการออกซิเดชันที่แตกต่างกันของกราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นอกจากนี้สเปกตรัมของ C1s ของ กราฟีนออกไซด์ยังสามารถบ่งชี้ถึงระดับการเกิดออกซิเดชันจากส่วนประกอบสื่ออย่างจาก หมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ วงแหวนคาร์บอนที่ไม่มีออกซิเจน คาร์บอนเนื่องจากพันธะ C-O, คาร์บอนิลจาก C=O และ คาร์บอกซิลิกจาก O-C=O ถึงแม้ว่า C1s มีส่วนประกอบย่อยที่เหมือนกันกับ กราฟีนออกไซด์ แต่ว่าความเข้มยอดกราฟนั้นต่ำกว่ากราฟีนออกไซด์เป็นอย่างมาก ทำให้ยอดกราฟ C-C เด่นขึ้นมา ดังรูปที่ 2.34 ความสามารถในการนำไฟฟ้าก็ยังสามารถทำนายได้จาก XPS โดยสังเกตจากปริมาณของยอดกราฟ  $\pi-\pi^*$  นอกจากนี้ XPS ยังสามารถให้ข้อมูลการเกิดข้อบกพร่องใน กราฟีนออกไซด์หรือรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้อีกด้วย โดยดูจากอัตราส่วนระหว่างความสูงของกราฟที่ จุดยอดของ C 1s ต่อ O 1s ซึ่งสามารถใช้ประมาณข้อบกพร่องในการรีดิวซ์ โดยค่าอัตราส่วนที่มากจะ เกี่ยวเนื่องกับการรีดิวซ์ที่มีความบกพร่องต่ำ



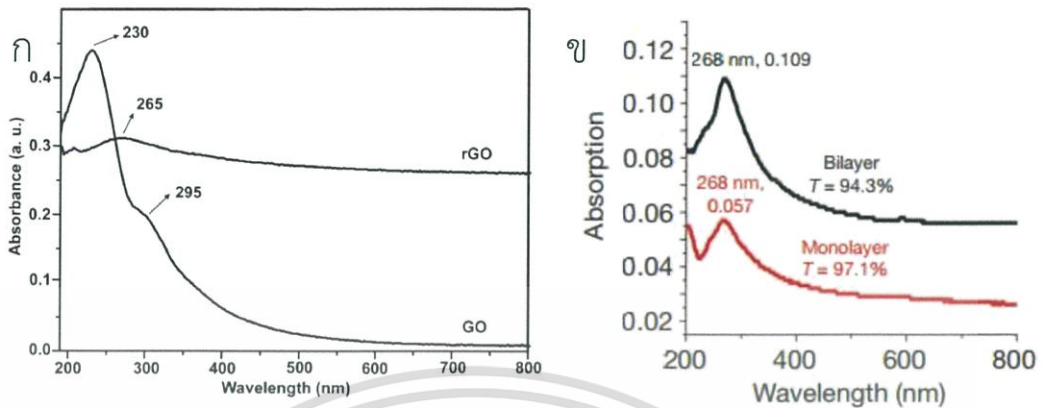
รูปที่ 2.34 การตรวจวัดสารอนุพันธ์กราฟีนด้วยเทคนิค XPS

### 2.6.5 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยระบบยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

ระบบยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Visible Spectroscopy : UV-Vis) เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นไปจนถึงช่วงอัลตราไวโอเล็ต เทคนิคนี้สามารถใช้ตรวจสอบเกี่ยวกับการเรียงตัวของและจำนวนชั้นของกราฟีนได้ โดยปกติแล้วกราฟีนที่มีลักษณะเป็นแผ่นใน ระบายสองมิตินั้นจะดูดกลืนที่ประมาณ 262 นาโนเมตร ขณะที่กราฟีนออกไซด์มีการดูดกลืนที่ 228 นาโนเมตร เนื่องจากการทรานซิชันของพันธะ  $\pi-\pi^*$  จากพันธะ C-C ในวงอะโรมาติก ดังนั้น ความโปร่งแสง (transparent) ของกราฟีนออกไซด์จะสูงกว่ากราฟีน เนื่องจากคินตัวของพันธะ  $sp^2$  จากการรีดิวซ์ นอกจากนี้ ความโปร่งใสของกราฟีนหลายชั้นมีค่าน้อยกว่ากราฟีนชั้นเดียวมาก งานวิจัยอื่น [45] ได้แสดงให้เห็นว่ากราฟีนชั้นเดียวนั้นมีความโปร่งใสถึง 97.1% ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับกราฟีนสองชั้นจะพบความโปร่งใสที่ 94.3% ซึ่งแสดงเป็นเส้นตรงในช่วงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดกลืนอัลตราไวโอเล็ต ดังรูปที่ 2.35 นอกจากนี้ เทคนิคนี้ยังสามารถใช้หาค่าการทะลุผ่านสำหรับอุปกรณ์โปร่งแสงและค่าแถบพลังงานทางแสง (optical band gap) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.35 กราฟการดูดกลืนแสงของ (ก) กราฟฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และ (ข) กราฟฟีนออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นต่างกัน [46]

### 2.6.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy : FE-SEM) หรือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดระบบสนามไฟฟ้า ใช้สำหรับศึกษาข้อมูลด้าน โทโพกราฟี (topography) และพื้นผิว (morphology) ของวัสดุตั้งแต่ขนาด รูปร่างของผลึกซึ่งแสดงถึงลักษณะแผ่นของกราฟีนออกไซด์ หลักการทำงานนั้นจะใช้ลำอิเล็กตรอน (electron beam) ในการส่องกราด (scan) ชิ้นงาน จากนั้นภาพ SEM จะสร้างขึ้นมาจากการตรวจจับอิเล็กตรอนที่ปล่อยมาจากชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นจากลำอิเล็กตรอน

### 2.6.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่าน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่าน (Transmission Electron Microscopy : TEM) เป็นเทคนิคการสร้างภาพจากลำอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานไปยังตัวรับ ภาพที่ได้จะให้ข้อมูลในเนื้อสาร ซึ่งในชิ้นงานกราฟีนออกไซด์จะให้ข้อมูลขนาด และรูปร่าง ซึ่ง TEM จะให้ข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงานกราฟีนออกไซด์ได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ต้องมีการเตรียมชิ้นงานที่มีกระบวนการเฉพาะ ทำให้มีความซับซ้อนในการวัด

## 2.7 อุปกรณ์วัดความชื้น

ความชื้นมีบทบาทสำคัญทั้งในสิ่งมีชีวิตและทางอุตสาหกรรมสำหรับควบคุมให้ได้สภาวะแวดล้อมที่ต้องการ ตั้งแต่การวัดความชื้นในดินเพื่อการเกษตร การวัดความชื้นในอากาศสำหรับควบคุมสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช การควบคุมความชื้นในโรงงานอาหารและยา เพื่อป้องกันจุลชีพ และรักษาสภาพอาหารและยา เป็นต้น ในปัจจุบันจึงยังมีการพัฒนาอุปกรณ์วัดความชื้นให้ดียิ่งขึ้นไป โดยเฉพาะให้มีคุณสมบัติที่ ตรวจวัดได้รวดเร็ว ใช้พลังงานต่ำ ราคาถูก ทนสมัย มีขนาดเล็ก และมีความน่าเชื่อถือสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.1 ความชื้น

ความชื้น (Humidity) คือปริมาณไอน้ำในอากาศโดยจะเปลี่ยนแปลงค่าไปตามสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศต่าง ๆ ความชื้นมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิต เครื่องมือวัด และการดำรงชีวิตของมนุษย์ทั้งในด้านความสะดวกสบาย การเก็บรักษาสินค้า กระบวนการผลิต เป็นต้น ความชื้นสามารถวัดได้หลายวิธีเช่น เช่น จากความดันไอ ความดันไออิ่มตัว จุดเยือกแข็ง และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์เป็นหน่วยความชื้นที่นิยมใช้กันมากที่สุด

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity; RH) เป็นอัตราส่วนของความดันไอในอากาศเทียบกับความดันไออิ่มตัวของอากาศ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น :

$$RH = \frac{P(H_2O)}{P_s(H_2O)} \times 100\% \quad (2.18)$$

โดย  $P(H_2O)$  เป็นความดันไอน้ำในอากาศและ  $P_s(H_2O)$  เป็นความดันไอน้ำอิ่มในอากาศ การพัฒนาอุปกรณ์วัดความชื้นในอุดมคติจะพัฒนาปัจจัยหลักบางประการ เช่น ความเที่ยงตรง ความแม่นยำ ปริมาณพลังงานที่ใช้ การทำซ้ำ เสถียรภาพ ระยะเวลาตอบสนอง ขนาด บรรจุภัณฑ์ และราคา โดยแนวทางการพัฒนาในปัจจุบันจะให้ความสำคัญกับราคาและความแม่นยำเป็นปัจจัยหลัก

### 2.7.2 อุปกรณ์วัดความชื้นแบบตัวต้านทาน

อุปกรณ์วัดความชื้นแบบตัวต้านทาน (Resistive Sensor) ใช้หลักการพื้นฐานของความต้านทานทางไฟฟ้า คือ ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุเป็นอัตราส่วนผกผันกับการนำไฟฟ้าของวัสดุ เมื่อสารที่ตรวจวัดมาทำปฏิกิริยากับวัสดุ จะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณสารตรวจวัด จึงทำให้สามารถวัดปริมาณสารที่ต้องการได้ ความชื้นเป็นปริมาณชนิดหนึ่งที่ทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้าหรือความต้านทานเชิงซ้อนของวัสดุเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด จึงมีการพัฒนาเป็นอุปกรณ์วัดความชื้นโดยใช้คุณสมบัติของความต้านทานทางไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้ว อุปกรณ์แบบตัวต้านทานมีส่วนประกอบ 4 ส่วน คือ ชั้นฐานรองรับ ชั้นขั้วไฟฟ้า ชั้นฟิล์มที่ตอบสนองต่อความชื้น และชั้นป้องกันอุปกรณ์ ในอุปกรณ์วัดความชื้นแบบตัวต้านทานนี้ ค่าความชื้นจะเป็นไปตามสมการดังนี้ :

$$\log\left(\frac{R(RH)}{R_0}\right) = \frac{\log(a) - \log(RH^n)}{1 + \frac{b}{RH^n}} \quad (2.19)$$

โดยที่  $R(RH)$  คือ ความต้านทานที่ความชื้นสัมพัทธ์ค่า RH

$R_0$  คือ ความต้านทานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%

a, b คือ ค่าคงที่

การตอบสนองการตรวจวัด (sensing response ;  $S_R$ ) สามารถวัดได้จากการใช้สมการ :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_R = \frac{R_{RH} - R_0}{R_0} \times 100\% \quad (2.20)$$

โดยที่  $R_{RH}$  คือ ค่าความต้านทานที่ความชื้นสัมพัทธ์ใด ๆ  
 $R_0$  คือ ค่าความต้านทานที่จุดเริ่มต้น

### 2.7.3 การตรวจวัดสมบัติของอุปกรณ์วัดความชื้น

#### 2.7.3.1 การตอบสนอง

การตอบสนอง (Sensitivity Response) คือ ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่อมีความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ยิ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองที่มากจะสามารถแยกความแตกต่างของความชื้นที่ใกล้เคียงกันได้ละเอียดและชัดเจน หากมีค่าการตอบสนองที่ต่ำจะทำให้สามารถระบุค่าความชื้นได้ไม่ละเอียดและมีโอกาสที่จะอ่านค่าความชื้นได้ผิดพลาด โดยค่าการตอบสนองหาได้จากความชันของกราฟระหว่างการตอบสนองและความชื้นสัมพัทธ์ การตอบสนองของอุปกรณ์วัดความชื้นแบบตัวต้านทานสามารถหาได้จากสมการที่ (2.20) นอกจากนี้ความถี่ยังมีผลต่อค่าการตอบสนองเนื่องจากในค่าความต้านทานเชิงซ้อนสามารถเปลี่ยนค่าไปตามความถี่ที่ทำการวัด ค่าการตอบสนองของอุปกรณ์วัดความชื้นจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มความถี่และอุปกรณ์วัดความชื้นจะให้ค่าการตอบสนองสูงสุดในช่วงความถี่ต่ำ ๆ อย่างไรก็ตาม ที่ค่าความถี่ที่ต่ำจะเกิดการรบกวนภายนอกและค่าความเร็วในการอ่านข้อมูลไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทำให้อ่านค่าได้ผิดพลาดไป จึงจำเป็นต้องเลือกค่าความถี่ให้เหมาะสมกับชิ้นงาน

#### 2.7.3.2 ระยะเวลาในการตอบสนองและการคืนตัว

ระยะเวลาการตอบสนองและการคืนตัว (Response and Recovery Time) เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับการประมาณคุณภาพของอุปกรณ์วัดความชื้น อุปกรณ์วัดความชื้นที่ดีควรมีระยะเวลาในการตอบสนองและการคืนตัวที่ต่ำ เพื่อให้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าไปตามความชื้นได้รวดเร็ว ระยะเวลาในการตอบสนองนิยามจากระยะเวลา 90 % ของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทั้งหมดเพื่อทำการดูดซับ ในขณะที่ระยะเวลาในการคืนตัวนิยามจากระยะเวลา 90 % ของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทั้งหมดของการคายไอน้ำ ความเร็วในการตอบสนองและการคืนตัวจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างเป็นหลัก

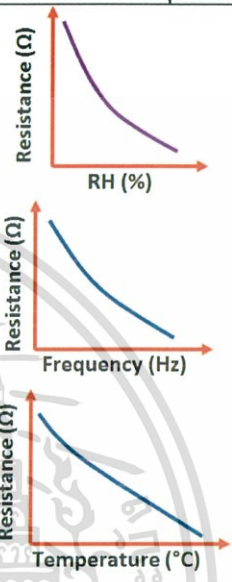
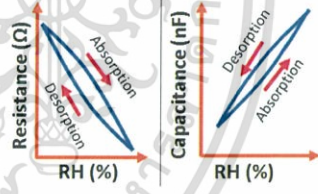
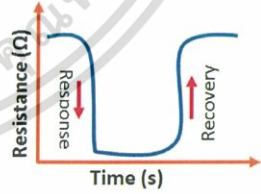
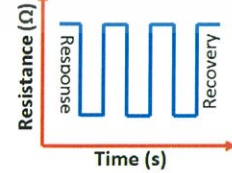


#### 2.7.3.3 ฮิสเทอรีซิส

ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) เป็นปริมาณที่บอกถึงความแตกต่างของค่าความต้านทานเชิงซ้อนในการวัดเมื่อมีการเปลี่ยนจากความชื้นมากไปความชื้นน้อยและเมื่อมีการเปลี่ยนจากความชื้นน้อยไปความชื้นมาก ค่าความต้านทานเชิงซ้อนที่วัดได้ควรมีค่าใกล้เคียงกันเพื่อป้องกันความผิดพลาดในการวัด ในอุปกรณ์ที่ดีค่าฮิสเทอรีซิสควรมีค่าน้อย

### 2.7.3.4 เสถียรภาพและการทำซ้ำ

การทำซ้ำ (Repeatability) เป็นการทดสอบอุปกรณ์วัดความชื้นระหว่างมีความชื้นสูงกับความชื้นต่ำสลับไปมา การทำซ้ำที่ดีควรจะต้องมีค่าการตอบสนอง ค่าความไวที่ใกล้เคียงกันทุกครั้ง ซึ่งแสดงถึงความเที่ยงของอุปกรณ์วัดความชื้น

ตารางที่ 2.2 ค่าในอุดมคติของอุปกรณ์วัดความชื้นแบบความต้านทานเชิงซ้อน [47]

รูปแบบการวัด	การตรวจวัดในอุดมคติ
ความต้านทานเชิงซ้อน	
ความถี่	
อุณหภูมิ	
ฮิสเตอร์ซิส	
ระยะเวลาการตอบสนองและการคืนตัว	
การทำซ้ำ	
เสถียรภาพ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรภาพ (Stability) เป็นค่าที่บอกถึงระยะเวลาที่ใช้งานของอุปกรณ์วัดความชื้น ซึ่งค่านี้จะหาได้จากการทดสอบวัดอุปกรณ์วัดความชื้นซ้ำ ๆ ในระยะเวลาห่างเท่า ๆ กันเป็นเวลานาน อุปกรณ์วัดความชื้นที่ดีควรมีสมบัติโดยรวมสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

#### 2.7.4 การตรวจวัดด้วยความต้านทานเชิงซ้อน

การตรวจวัดด้วยความต้านทานเชิงซ้อนเป็นการตรวจสอบระบบด้วยค่าความถี่ที่ต่างกันเพื่อสร้างแบบจำลองในการอธิบายระบบในรูปแบบของวงจรมูลทางไฟฟ้า

##### 2.7.4.1 ความต้านทานเชิงซ้อน

ความต้านทานไฟฟ้าโดยทั่วไปมักจะหมายถึงตัวต้านทานซึ่งจัดเป็นอุปกรณ์พื้นฐานของวงจรไฟฟ้าตัวหนึ่ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของโอห์ม ดังนี้

$$V=IR \quad (2.21)$$

โดยที่  $V$  เป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า  $I$  เป็นค่ากระแสไฟฟ้า และ  $R$  แทนค่าความต้านทานไฟฟ้า สมการที่ (2.21) นี้จะเป็นสมการที่บรรยายพฤติกรรมของตัวต้านทานในอุดมคติ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้ว อุปกรณ์ในวงจรไฟฟ้าจะมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนมากกว่านี้ ทำให้ไม่สามารถใช้ความสัมพันธ์แบบอุดมคติได้ จึงมีการใช้ระบบความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) แทนความต้านทานแบบทั่วไป ความต้านทานเชิงซ้อนวัดความสามารถต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า เช่นเดียวกับความต้านทาน แต่ไม่ต้องมีการทำให้ง่ายด้วยคุณสมบัติอุดมคติที่กล่าวไปในข้างต้น โดยทั่วไปแล้วมักจะกล่าวถึงความต้านทานเชิงซ้อนในวงจรที่เกิดจากการผสมกับของอุปกรณ์พื้นฐานทางไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของอุปกรณ์พื้นฐานทางไฟฟ้าและสมการในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

อุปกรณ์ไฟฟ้า	โดเมนเวลา	โดเมนความถี่
ตัวต้านทาน	$V=IR$	$Z = R$
ตัวเก็บประจุ	$V=L \frac{di}{dt}$	$Z = \frac{1}{j\omega C}$
ตัวเหนี่ยวนำ	$I=C \frac{dV}{dt}$	$Z = j\omega L$

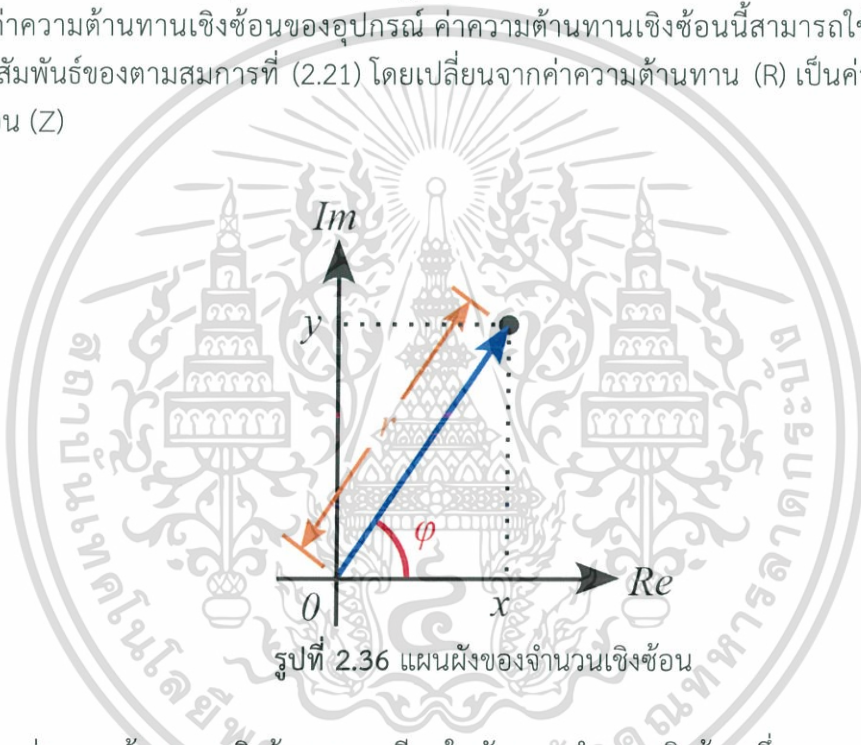
ในทางวงจรไฟฟ้าจะมีอุปกรณ์พื้นฐานอยู่สามตัว คือ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะมีความซับซ้อนในการอธิบายมากขึ้น โดยสมการในการอธิบายแสดงในตารางที่ 2.3 สมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางไฟฟ้าโดยพื้นฐานจะใช้สมการในโดเมนเวลา แต่ในอุปกรณ์ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ สมการจะมีความซับซ้อนมากขึ้นทำให้ยากต่อการใช้งาน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาโดเมนชนิดอื่นขึ้นมาเพื่อช่วยในการคำนวณ

เทคนิคการแปลงข้อมูล (Transformation) เป็นเทคนิคที่ช่วยในการแปลงข้อมูลให้เปลี่ยนจากโดเมนชนิดหนึ่งไปยังอีกชนิดหนึ่ง ในการแปลงข้อมูลจากโดเมนเวลาไปยังโดเมนความถี่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ถูกนำเสนอโดย Fourier กล่าวถึง ฟังก์ชันใด ๆ ที่มีการวนซ้ำ (periodic) จะสามารถเขียนในรูปของผลรวมค่าสัญญาณไซน์และสัญญาณโคไซน์ได้ ซึ่งสัญญาณในแต่ละตัวจะมีค่าความถี่และสัมประสิทธิ์ที่ไม่เท่ากัน โดยสมการที่ใช้เปลี่ยนแปลงโดเมนเวลานั้นเรียกว่า สมการการแปลงข้อมูล Fourier (Fourier transform) เขียนแสดงได้เป็น :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.22)$$

โดยที่  $f(t)$  เป็นฟังก์ชันในโดเมนเวลา และ  $F(\omega)$  เป็นฟังก์ชันในโดเมนความถี่  $\omega$  เป็นค่าความถี่เชิงมุม และ  $j$  เป็นค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์ซึ่งกำหนดให้  $j^2 = -1$  ดังนั้นเมื่อทำการแปลงสมการในโดเมนเวลาของอุปกรณ์วงจรพื้นฐานเป็นโดเมนความถี่จะแสดงในตารางที่ 2.3 โดยค่า  $Z$  แทนค่าความต้านทานเชิงซ้อนของอุปกรณ์ ค่าความต้านทานเชิงซ้อนนี้สามารถใช้ในการคำนวณความสัมพันธ์ของตามสมการที่ (2.21) โดยเปลี่ยนจากค่าความต้านทาน ( $R$ ) เป็นค่าความต้านทานเชิงซ้อน ( $Z$ )



รูปที่ 2.36 แผนผังของจำนวนเชิงซ้อน

ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจะถูกเขียนในลักษณะจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป  $x+ jy$  หรือในรูป  $r \angle \phi$  ดังแสดงในรูปที่ 2.36 โดยมีแกน  $x$  เป็นส่วนจำนวนจริง และแกน  $y$  เป็นส่วนจำนวนจินตภาพ  $r$  แทนขนาด หาได้จากสมการพีทาโกรัส  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  และ  $\phi$  เป็นมุมเฟสที่ทำกับแกนจำนวนจริงซึ่งหาได้จาก  $\phi = \tan^{-1} \frac{y}{x}$

ความต้านทานเชิงซ้อนของตัวต้านทานจะไม่ขึ้นอยู่กับความถี่และไม่มีส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ และมีเพียงส่วนที่เป็นจำนวนจริงเท่านั้น ทำให้เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวต้านทานจึงไม่เกิดการเลื่อนของมุมเฟส ทำให้มีกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้ามีมุมเฟสตรงกัน

ความต้านทานเชิงซ้อนของตัวเหนี่ยวนำแปรผันตรงกับความถี่ และมีส่วนประกอบแค่เพียงจำนวนจินตภาพ ทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะมีมุมเฟสเลื่อนไป 90 องศาเมื่อเทียบกับความต่างศักย์ ในทางกลับกัน ความต้านทานเชิงซ้อนของตัวเก็บประจุแปรผกผันกับความถี่ และมี

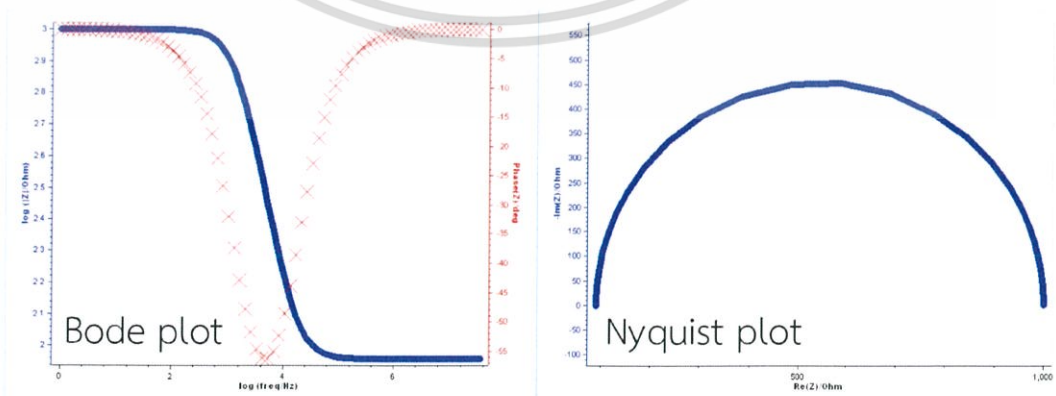
เพียงส่วนประกอบที่เป็นจำนวนเชิงซ้อน ทำให้เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมุมเฟสจะเกิดการเลื่อนไป -90 องศา เมื่อเทียบกับความต่างศักย์

ตารางที่ 2.4 อุปกรณ์ในวงจรสมมูลในระบบความต้านทานเชิงซ้อน [48, 49]

อุปกรณ์	ความต้านทานเชิงซ้อน
R	$R$
C	$\frac{1}{j\omega C}$
L	$j\omega L$
$W_s$	$\frac{A_w \tanh(B\sqrt{j\omega})}{C\sqrt{j\omega}}$
$W_o$	$\frac{A_w \coth(B\sqrt{j\omega})}{C\sqrt{j\omega}}$
Q (CPE)	$\frac{1}{C(j\omega)^\alpha}$

นอกจากอุปกรณ์ในวงจรพื้นฐานข้างต้นแล้ว ยังมีอุปกรณ์พิเศษบางตัวที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการอธิบายลักษณะแบบจำลองต่าง ๆ เพิ่มเข้ามา ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.5 โดย  $Z'$  คือส่วนที่เป็นจำนวนจริง และ  $Z''$  คือส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ

ความต้านทานเชิงซ้อน Warburg (Warburg impedance) เป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดการแพร่ (diffusion) โดยที่ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของศักย์ไฟฟ้ารบกวน โดย ณ ความถี่สูง ความต้านทานเชิงซ้อน Warburg จะมีค่าเล็กน้อยเนื่องจากเริ่มต้นเกิดการแพร่ในทางกลับกัน ที่ความถี่ต่ำ ค่าความต้านทานเชิงซ้อน Warburg จะสูงขึ้นตามปฏิกิริยาการแพร่ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ได้สองแบบคือ  $W_s$  แทนค่าความต้านทานเชิงซ้อน Warburg เมื่อจำนวนชั้นการแพร่มีปริมาณสูงมาก และ  $W_o$  แทนค่าความต้านทานเชิงซ้อน Warburg เมื่อทราบจำนวนชั้นการแพร่ที่แน่นอน

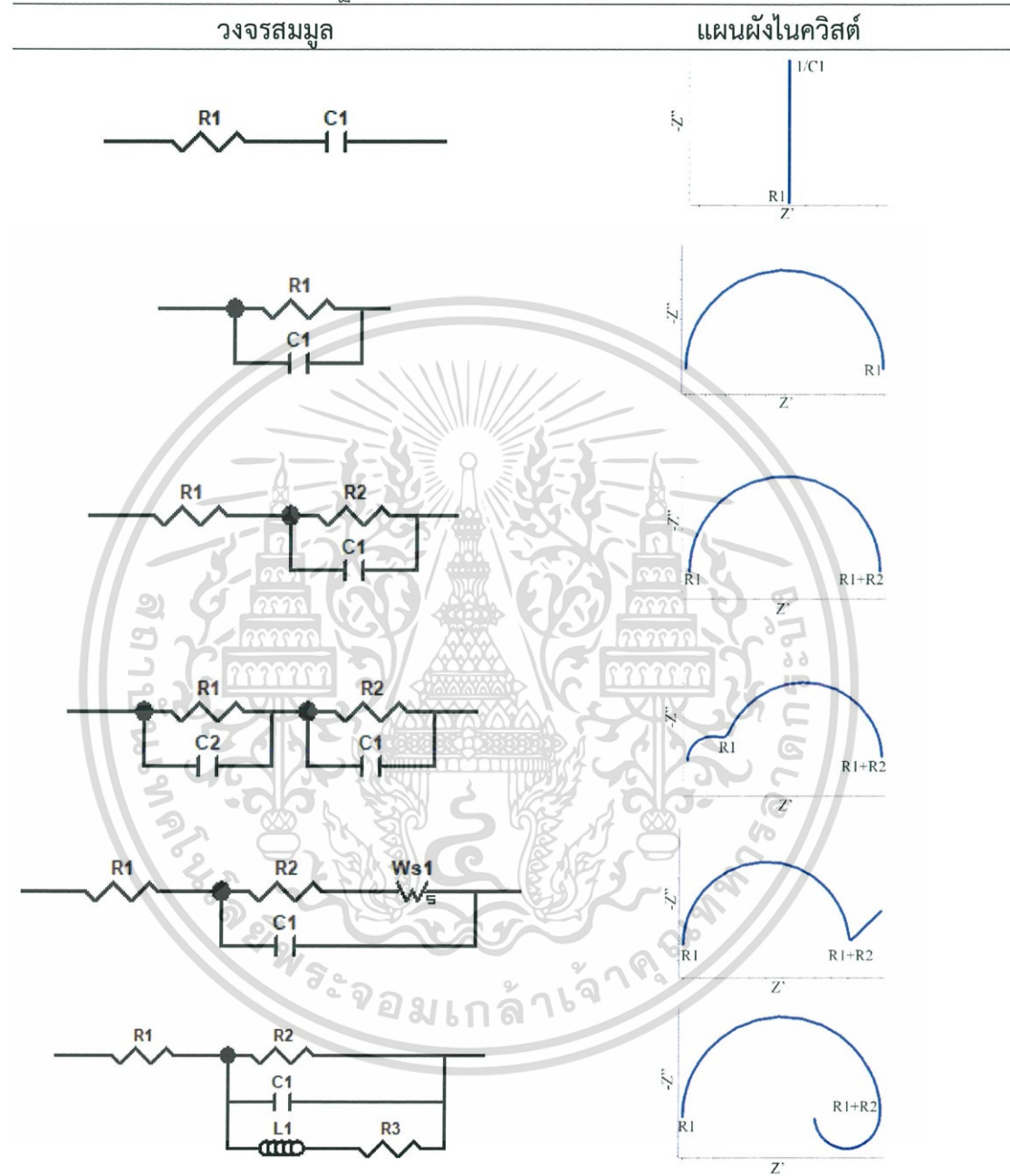


รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแผนภาพไนควิสต์และแผนภาพ Bode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปร  $Q$  (CPE) เป็นอุปกรณ์ตัวเก็บประจุซึ่งไม่ได้เป็นแบบอุดมคติ ตัว  $Q$  นี้จะมีลักษณะของมุมเฟสเป็นค่าคงที่ โดยค่า  $\alpha$  จะมีค่าน้อยกว่า 1 เช่น ตัวเก็บประจุแบบสองชั้น เป็นต้น

ตารางที่ 2.5 แผนผังไนควิสต์พื้นฐานระหว่างความสัมพันธ์จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ



#### 2.7.4.2 การตรวจวัดด้วยระบบความต้านทานเชิงซ้อน

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวไปในหัวข้อที่แล้วทำให้เห็นว่า อุปกรณ์พื้นฐานแต่ละชนิดให้มุมเฟสที่ไม่เท่ากัน แต่โดยทั่วไปในธรรมชาติ ค่าตัวเหนี่ยวนำในอุปกรณ์จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการสร้างวงจรสมมูล ดังนั้นมุมเฟสที่เปลี่ยนไปจะมาจากค่าตัวเก็บประจุเท่านั้น ทำให้สามารถสร้างวงจรสมมูลของระบบต่าง ๆ จากการวัดการตอบสนองทางความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่จะทำการตรวจวัดโดยการให้ความถี่กับระบบที่ต้องการตรวจวัด จากนั้นจะทำการวัดความต้านทานเชิงซ้อนออกมาแล้วทำการวิเคราะห์ระบบ และสร้างวงจรมูล ข้อมูลความต้านทานเชิงซ้อนนั้นสามารถสร้างกราฟได้สองแบบหลัก ๆ ตามหลักการของจำนวนเชิงซ้อนคือ แผนภาพไนควิสต์ (Nyquist Plot) ซึ่งเป็นการสร้างกราฟจากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและค่าติดลบของจำนวนจินตภาพ (เนื่องจากตัวเก็บประจุมีมุมเฟสติดลบจึงนิยมกลับกราฟเพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์) และแผนภาพ Bode (Bode Plot) ซึ่งเป็นการสร้างกราฟจากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกับความถี่และมุมเฟสกับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.37 แผนภาพไนควิสต์จะมีข้อดีกว่าในด้านการสร้างกราฟและวิเคราะห์ได้ง่าย แต่ค่าความต้านทานเชิงซ้อนที่มีค่าน้อยมักถูกลดทอนจากการแสดงจากตัวต้านทานที่มีค่ามากกว่า ในทางกลับกัน แผนภาพ Bode จะสามารถแสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนได้ดีทั้งขนาดใหญ่และเล็ก รวมถึงมีความสัมพันธ์กับความถี่ แต่จะวิเคราะห์ในการสร้างวงจรมูลได้ยากกว่า โดยในการสร้างวงจรมูลสามารถทำนายวงจรได้โดยอาศัยลักษณะของวงจรมูลพื้นฐานซึ่งสรุปได้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.6 การพัฒนาอุปกรณ์วัดความชื้นจากกราฟอินออกไซด์

ปี ค.ศ.	วัสดุ	การขึ้นรูป	ลักษณะการตอบสนอง	การตอบสนอง	เวลาตอบสนอง (วินาที)	เวลาคืนตัว (วินาที)	ช่วงการตอบสนอง (%RH)	เอกสารอ้างอิง
2011	GO	จุ่มเคลือบ	ตัวเก็บประจุ	-95.6%	5	n/a	25-65	[50]
2011	GO-Si	หมุนเคลือบ	QCM	2610%	18	12	6.4-93.5	[51]
2012	rGO	อบด้วยเอทานอล	การนำไฟฟ้า	3.33%	n/a	n/a	3-30	[52]
2012	GO	หยดด้วยอะตอม	SAW	20%	21	16	8-18	[53]
2012	GO	หมุนเคลือบ	ความเครียด	28.02 V/%RH	19	10	10-98	[54]
2013	GO	เคลือบ/พ่นเคลือบ	ความต้านทาน	22.85%	41	10	15-95	[55]
2013	GO	พ่นเคลือบ	ตัวเก็บประจุ	3333%	0.03	0.02	30-80	[56]
2014	rGO/PDDA	จุ่มเคลือบ	ความต้านทาน	37.43%	300	147	11-97	[57]
2014	GO:PSS	กรอง	ตัวเก็บประจุ	70%	57	21	0-80	[58]

### 2.7.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์วัดความชื้นโดยใช้สารอนุพันธ์กราฟีน

สารกราฟีนออกไซด์ได้รับความนิยมในงานวิจัยมากขึ้นหลังจากการประกาศรางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 2010 งานวิจัยแรก ๆ ที่เกี่ยวกับอุปกรณ์วัดความชื้นเริ่มในปี ค.ศ. 2011 โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cheng-Long Zhao et al. [50] ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำกราฟีนออกไซด์มาแทนสารโพลีอิมิด (polyimide) ซึ่งเป็นสารที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในทางการค้าขายเพื่อเป็นชั้นฟิล์มตอบสนองต่อความชื้นของอุปกรณ์วัดความชื้นชนิดตัวเก็บประจุ บนขั้วอินเตอร์ดิจิทัล (interdigital) ด้วยการจุ่มเคลือบ (dripping) พบว่าสารกราฟีนออกไซด์มีความสามารถในการตอบสนอง (sensitivity) มากกว่าสารโพลีอิมิดถึง 23 เท่า และตอบสนองอย่างรวดเร็วกว่า ในปีเดียวกัน Yao Yao et al. [51] สนใจที่จะนำวัสดุคาร์บอนมาใช้แทนวัสดุโพลีเมอร์ เช่น โพลีอิมิด เนื่องจากวัสดุคาร์บอนมีความแข็งแรง มีพื้นผิวต่อปริมาตรสูง และมีความเสถียรมากกว่า โดยใช้กระบวนการหมุนเคลือบบนฐานรองรับซิลิกอน โดยใช้โครงสร้างเป็น ไมโครบาลานซ์ผลึกควอตซ์ (Quartz crystal microbalance; QCM) พบว่ากราฟีนให้การตอบสนองที่สูง โดยเฉพาะเมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้นจะตอบสนองได้ดีขึ้น และยังมีค่าฮิสเตอร์ซิสม์ที่ต่ำมาก อย่างไรก็ตามต้องใช้พลังงานในการอ่านค่าที่สูง ในปี ค.ศ. 2012 Qingqu Huang et al. [52] ได้สังเคราะห์สารกราฟีนชั้นให้มีโครงสร้างเป็นลักษณะที่มีข้อบกพร่องจำนวนมาก เพื่อจะสามารถเติมหมู่ฟังก์ชันจากน้ำตาลคาร์โบไฮเดรตในการปรับปริมาณหมู่ฟังก์ชัน โดยเลือกใช้กระบวนการอบด้วยไอเอทานอล (Solvothermal method) พบว่าหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนมีบทบาทสำคัญในการตอบสนองต่อความชื้นของสารอนุพันธ์กราฟีน ในปีเดียวกัน S.M. Balashov et al. [53] ทำการวิจัยสาร กราฟีนออกไซด์เป็นอุปกรณ์วัดความชื้น โครงสร้าง การสั่นด้วยคลื่นเสียงพื้นผิว (Surface acoustic wave; SAW) พบว่ากราฟีนออกไซด์สามารถที่จะตอบสนองได้รวดเร็ว ปีต่อมา Hengchang Bi et al. [54] พยายามที่จะพัฒนาอุปกรณ์วัดความชื้นให้มีความการตอบสนองที่สูงและสามารถตอบสนองความชื้นได้ในช่วงที่กว้างขึ้น โดยเลือกเป็นกราฟีนออกไซด์เนื่องจากสามารถผลิตจำนวนมากได้ จึงเลือกใช้อุปกรณ์วัดความชื้นชนิดตัวเก็บประจุทำให้ได้การตอบสนองที่สูงมาก ในปีเดียวกัน Stefano Borini et al. [55] ได้พัฒนาอุปกรณ์วัดความชื้นกราฟีนออกไซด์โดยใช้แรงดันลมในการพ่นเคลือบทำให้ได้ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่บางประมาณ 15 นาโนเมตร ฟิล์มที่มีความบางมากทำให้กราฟีนออกไซด์สามารถตอบสนองได้รวดเร็วในระดับมิลลิวินาที อย่างไรก็ตาม ค่าการตอบสนองของกราฟีนออกไซด์ก็ลดต่ำลงไปเช่นเดียวกัน ในปี ค.ศ. 2014 Hyun-Woo Yu et al.[56] ทำวิจัยในการพัฒนาสร้างกราฟีนออกไซด์วัสดุผสมกับสารโพลีเมอร์ Poly(Sodium 4-Styrenesulfonate) (PSS) [57] เพื่อลดพลังงานของอุปกรณ์วัดความชื้น ในปีเดียวกัน Dongzhi Zhang et al. [58] พยายามที่จะพัฒนาอุปกรณ์วัดความชื้นจากวัสดุรีดิคัลกราฟีนออกไซด์ผสมกับสาร poly(diallylimethylammonium chloride) (PDDA) เพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์วัดความชื้นโครงสร้างความต้านทานซึ่งสะดวกในการนำไปใช้งานมากขึ้น การพัฒนาอุปกรณ์วัดความชื้นที่เป็นสารอนุพันธ์ของกราฟีนออกไซด์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

## 2.8 อุปกรณ์หน่วยเก็บความจำ

หน่วยเก็บความจำ (memory) นั้นมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับการจำแนก เช่น FRAM (ferroelectric RAM), RRAM (resistive RAM), PRAM (phase-change RAM) เป็นต้น โดยทั่วไปข้อมูลดิจิทัลจะเก็บในอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลเป็นกลุ่มที่เรียกว่า RAM (random access memory) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ หน่วยความจำชั่วคราว (volatile RAM) และหน่วยความจำถาวร (non-volatile RAM) หน่วยความจำชั่วคราวยังแบ่งได้เป็น SRAM (static RAM) และ DRAM (dynamic RAM) ส่วนหน่วยความจำแฟลช (Flash) จัดเป็นเทคโนโลยีหลักของหน่วยความจำถาวร หน่วยความจำแต่ละแบบนี้มีข้อดีข้อเสียที่ต่างกัน หน่วยความจำชั่วคราวจะมีความเร็วสูงแต่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่และแพง ขณะที่หน่วยความจำแฟลชมีความทนทานต่ำ ทำงานช้า และกินพลังงาน อย่างไรก็ตาม ในกลุ่มของหน่วยความจำ FRAM, RRAM, MRAM และ PRAM สามารถลบข้อจำกัดของ DRAM และหน่วยความจำแฟลชได้ เทคโนโลยีเหล่านี้มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าหน่วยความจำแฟลชแต่ยังคงมีขีดจำกัดที่ยังคงรอพัฒนาเพื่อจะใช้งานจริงในอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น FRAM และ MRAM มีปัญหาในการขยายขนาด กินพลังงานสูงเนื่องจากต้องการกระแสเพื่อเปลี่ยนแปลงเฟส หน่วยความจำแต่ละชนิดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบอุปกรณ์หน่วยความจำชนิดต่าง ๆ [59]

คุณสมบัติ	DRAM	SRAM	Flash	FRAM	MRAM	PCRAM	RRAM
เวลาเขียน (ns)	<10 ns	0.2 ns	1 ms	65	35	100	10
เวลาลบ (ns)	<10 ns	0.2 ns	1 ms	65	35	100	30
ความทนทาน	$>10^6$	$>10^6$	$10^4$	$10^{14}$	$>10^{12}$	$10^9$	$10^6$
ศักย์ไฟฟ้าเขียน (V)	2.5	1	12	1.3-3.3	1.8	3	1.4
ศักย์ไฟฟาลบ (V)	1.8	1	1.8	1.3-3.3	1.8	3	0.5

### 2.8.1 ตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำ

ตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำได้แก่ ความต่างศักย์ใช้งาน อัตราส่วนความต้านทาน ความทนทาน การอ่านช้า ความเร็วในการทำงาน จำนวนระดับการเก็บข้อมูล ซึ่งจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.8.1.1 ความต่างศักย์ใช้งาน

ความต่างศักย์ใช้งาน (operating Voltage) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความต่างศักย์ที่อุปกรณ์ต้องการเพื่ออ่านข้อมูลหน่วยความจำ ค่าความต่างศักย์ใช้งานที่สูงจะทำให้ใช้พลังงานมากขึ้น ทำให้อุปกรณ์ต้องเสียดพลังงานไปเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการเขียนข้อมูลและลบข้อมูลของอุปกรณ์ควรมีค่าความต่างศักย์ใช้งานที่ต่ำ

#### 2.8.1.2 อัตราส่วนความต้านทาน

อัตราส่วนความต้านทาน (Resistance Ratio) เป็นอัตราส่วนของความต้านทานของสองสถานะที่ต่างกันในอุปกรณ์หน่วยความจำ อัตราส่วนความต้านทานจะแสดงถึงปริมาณความต่างของสถานะทั้งสองในอุปกรณ์ ยิ่งมีความต่างมากจะเกิดการอ่านข้อมูลพลาดระหว่างสถานะได้ยากขึ้น ในทางการออกแบบวงจร อัตราส่วนความต้านทานต่ำสุดที่ต้องการคือ 10 ในขณะที่อัตราส่วนความต้านทานที่สูงเพียงพอจะสามารถใช้ออกแบบเป็น หน่วยความจำที่มากกว่าสองสถานะได้ ทำให้อุปกรณ์หน่วยความจำสามารถเก็บข้อมูลได้เยอะขึ้น

#### 2.8.1.3 ความทนทาน

อุปกรณ์หน่วยความจำสามารถเปลี่ยนสถานะความต้านทานระหว่างสูงต่ำได้ แต่การทำงานแต่ละครั้งทำให้เกิดความเสียหายทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไป ความทนทาน (Endurance) นิยาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากจำนวนรอบของการเซตและรีเซต ที่สามารถทนได้โดยไม่เห็นความแตกต่างจากเดิม เพื่อให้มีคุณภาพที่ดีกว่าหน่วยความจำแฟลช ค่าความทนทานควรจะสูงกว่า  $10^7$  ครั้ง

#### 2.8.1.4 การอ่านซ้ำ

การอ่านซ้ำ (Retention Time) คือระยะเวลาที่เซลล์สามารถเก็บรักษาสถานะข้อมูลที่ถูกโปรแกรมหรือลบออก ในทางการค้าขายจะตั้งเป้าหมายระยะเวลาที่เกินชั้นไว้ที่ 10 ปี

#### 2.8.1.5 ความเร็วในการทำงาน

ความเร็วในการทำงาน (Operating Speed) คือ ระยะเวลาที่สั้นที่สุดที่ใช้สำหรับการเขียนหรือลบข้อมูลบนอุปกรณ์ ความเร็วในการทำงานที่สูงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ได้ดีขึ้น

#### 2.8.1.6 จำนวนระดับการเก็บข้อมูล

โดยทั่วไปอุปกรณ์หน่วยความจำจะสามารถเก็บข้อมูลได้เพียงสองสถานะ แต่ในการประยุกต์ใช้งานจะถูกจำกัดด้วยพื้นที่ของอุปกรณ์ ทำให้สามารถสร้างจำนวนอุปกรณ์หน่วยความจำในพื้นที่หนึ่ง ๆ ได้จำกัด การเพิ่มจำนวนสถานะของข้อมูลจะช่วยเพิ่มจำนวนหน่วยความจำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 2.8.1.7 ประสิทธิภาพอุปกรณ์

ประสิทธิภาพอุปกรณ์ (Device yield) คือ ร้อยละของจำนวนอุปกรณ์หน่วยความจำที่ใช้งานได้ ในทางอุดมคติแล้ว อุปกรณ์หน่วยความจำทุกตัวที่ผลิตควรจะสามารถใช้เก็บข้อมูลได้ทุกตัว อย่างไรก็ตาม ในการผลิตอุปกรณ์หน่วยความจำอาจเกิดความผิดพลาดบางประการ ทำให้หน่วยความจำบางตัวไม่สามารถใช้งานได้ทำให้สามารถเก็บความจำได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น

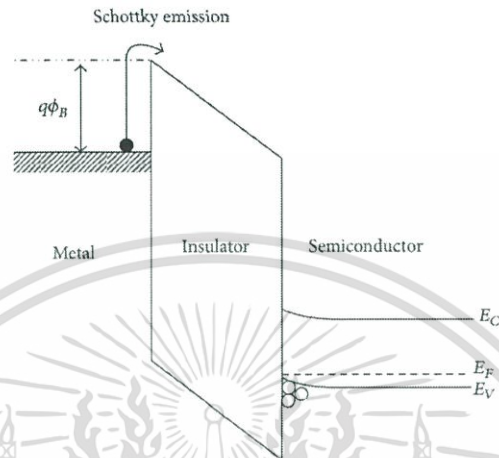
### 2.8.2 กลไกการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ

ในโครงสร้างแบบชั้นไดอิเล็กตริก (dielectric) ชั้นเดียวประกบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้วจะเกิดกลไกนำไฟฟ้าได้สองแบบใหญ่ ๆ คือ กลไกการนำไฟฟ้าที่รอยต่อของไดอิเล็กตริกกับขั้วไฟฟ้า ได้แก่ กลไกการปลดปล่อยแบบ Schottky (Schottky emission) การผ่านทะลุแบบ Fowler-Nordheim (Fowler-Nordheim tunneling : F-N) และการผ่านทะลุโดยตรง (direct tunneling) และกลไกการนำของพาหะ (carrier) ในชั้นไดอิเล็กตริก ได้แก่ กลไกการปลดปล่อยแบบ Poole-Frenkel (Poole-Frenkel emission: P-F) การนำไฟฟ้าแบบไอโธม SCLC การนำไฟฟ้าของไอออน การนำไฟฟ้าแบบกระโดด (hopping conduction) และการผ่านทะลุด้วยกับดัก (trap-assisted tunneling : TAT)

#### 2.8.2.1 กลไกการปลดปล่อยแบบเทอร์มไอออนิก

กลไกการปลดปล่อยแบบ Schottky หรือกลไกการปลดปล่อยแบบเทอร์มไอออนิก (Schottky or Thermionic Emission; TE) กลไกการปลดปล่อยแบบ Schottky เป็นกลไกการนำไฟฟ้าซึ่งประจุจะได้รับพลังงานกระตุ้นที่เพียงพอจากความร้อน ทำให้ประจุสามารถเอาชนะกำแพงศักย์ (energy barrier) ระหว่างผิวรอยต่อของโลหะและสารไดอิเล็กตริก (dielectric) เข้าไปในสารไดอิเล็กตริก ดังรูปที่ 2.38 แสดงแผนผังแถบพลังงานโครงสร้าง โลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (MIS) เมื่อโลหะเป็นขั้วลบ เมื่อเทียบกับฝั่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นขั้วบวก ความสูงของกำแพงศักย์ที่ผิวหน้าของเอกซารีนเป็นเอกซารีนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

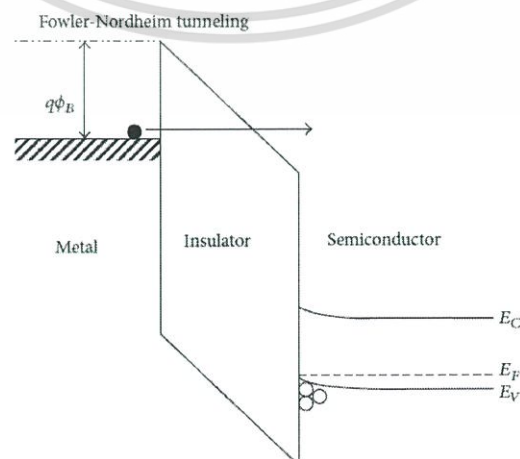
โลหะและสารไดอิเล็กทริกจะเกิดการเอียงเนื่องจากสนามไฟฟ้า การเอียงนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ Schottky (Schottky effect) ซึ่งกลไกการนำเนื่องจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนไปยังสารไดอิเล็กทริกจะเรียกว่า กลไกการปลดปล่อยแบบ Schottky หรือกลไกการปลดปล่อยแบบเทอร์มไอออนิก กลไกการปลดปล่อยแบบเทอร์มไอออนิกเป็นกลไกที่พบมากในกลไกการนำไฟฟ้าในสารไดอิเล็กทริก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.38 กลไกการนำไฟฟ้าแบบการปล่อยเนื่องจากความร้อน [60]

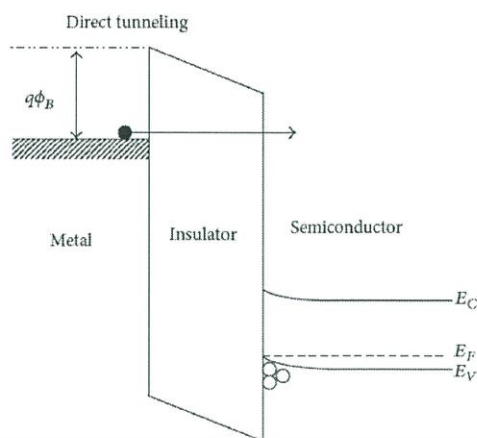
### 2.8.2.2 กลไกการผ่านทะลุแบบ Fowler-Nordheim และกลไกการผ่านทะลุโดยตรง

กลไกการผ่านทะลุแบบ Fowler-Nordheim (Fowler-Nordheim Tunneling; FT) ในฟิสิกส์ดั้งเดิมแล้ว เมื่ออิเล็กตรอนไปเจอกำแพงศักย์ที่มีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะเกิดการสะท้อน แต่ในทฤษฎีควอนตัมทำนายว่า ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนจะสามารถทะลุผ่านกำแพงศักย์ได้โดยตรงถ้าหากกำแพงศักย์นั้นมีความบางมากพอ (น้อยกว่า 10 นาโนเมตร) ดังนั้นความน่าจะเป็นที่จะเจออิเล็กตรอนอีกฝั่งของกำแพงศักย์จะไม่เป็นศูนย์ เพราะทำให้เกิดปรากฏการณ์ผ่านทะลุ (tunneling effect) ดังที่กล่าวมา ในรูปที่ 2.39 แสดงถึงแผนภาพแถบพลังงานของการผ่านทะลุแบบ FT โดยกลไกแบบนี้เกิดเมื่อสนามไฟฟ้าที่สูงเพียงพอจนทำให้ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านกำแพงศักย์รูปสามเหลี่ยมไปยังแถบการนำของสารไดอิเล็กทริกได้



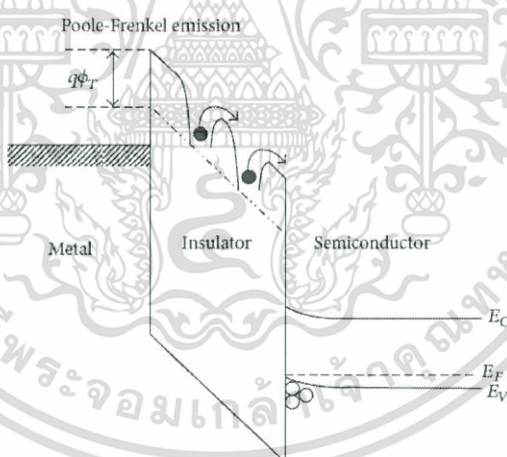
รูปที่ 2.39 แผนภาพของการปล่อยแบบ Fowler-Nordheim [60]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.40 แผนภาพของกลไกการผ่านทะลุโดยตรง [60]

กลไกการผ่านทะลุโดยตรง (Direct Tunneling; DT) เป็นกลไกการผ่านทะลุคล้ายแบบ FT แต่จะเกิดเมื่อสนามไฟฟ้าที่ไม่น่าสูงเพียงพอและชั้นของไดอิเล็กทริกบางเพียงพอ ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนจะสามารถผ่านทะลุชั้นไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูไปยังสารกึ่งตัวนำได้โดยตรง ดังรูปที่ 2.40 โดยไม่ต้องเข้าไปอยู่ในแถบการนำของไดอิเล็กทริกก่อน จากกลไกการนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันของ FT และ DT ทำให้หลาย ๆ ครั้งจะพบกลไกทั้งสองพร้อมกัน โดยเริ่มจากกลไก DT ในขณะที่มีความต่างศักย์ต่ำ และเปลี่ยนเป็นกลไก FT ในตอนที่ความต่างศักย์สูงขึ้น

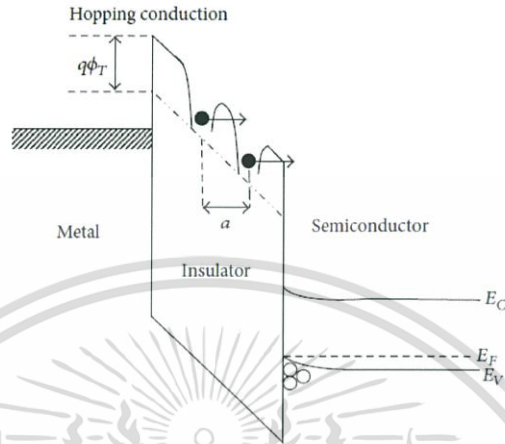


รูปที่ 2.41 แผนภาพกลไกการปลดปล่อยแบบ Poole-Frenkel [60]

### 2.8.2.3 กลไกการปลดปล่อยแบบ Poole-Frenkel

กลไกการปลดปล่อยแบบ Poole-Frenkel (Poole-Frenkel Emission; PF) เป็นกลไกที่มีลักษณะคล้ายเคียงกับกลไกการปลดปล่อยแบบ Schottky ซึ่งเป็นการใช้การกระตุ้นด้วยความร้อนให้อิเล็กตรอนเข้าสู่แถบการนำของไดอิเล็กทริก ในส่วนของกลไก PF จะเป็นการใช้ความร้อนกระตุ้นประจุเช่นเดียวกัน แต่เป็นประจุที่อยู่ในกับดักประจุ (trap) เข้าไปยังแถบการนำของไดอิเล็กทริกแทน ดังนั้นจึงสามารถเรียกกลไก PF ว่า กลไกการปลดปล่อยแบบ Schottky ภายใน (internal Schottky emission) หากพิจารณาประจุในกับดักแล้ว ศักย์ไฟฟ้าของกำแพงศักย์ของประจุสามารถลดลงได้จากการให้สนามไฟฟ้าแก่สารไดอิเล็กทริก การที่กำแพงศักย์มีพลังงานลดลงจะทำให้ความน่าจะเป็นเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

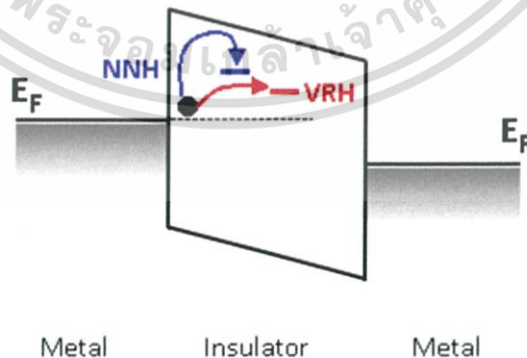
ในการกระตุ้นประจุด้วยพลังงานความร้อนจนออกจากกับดักไปยังแถบการนำของสารไดอิเล็กตริกจะมีโอกาสสูงขึ้น โดยแผนภาพแถบพลังงานของกลไกการนำแบบ PF สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.41 เนื่องจากกลไก PF เป็นกลไกที่ต้องใช้พลังงานความร้อนกระตุ้นภายในสนามไฟฟ้า ดังนั้นกลไกนี้จะพบเจอได้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิและสนามไฟฟ้าสูง



รูปที่ 2.42 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดด [60]

#### 2.8.2.4 กลไกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดด

กลไกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดด (Hopping Conduction) เกิดจากปรากฏการณ์ผ่านทะลุของอิเล็กตรอนในกับดักเกิดการกระโดดจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งในสารไดอิเล็กตริก เขียนเป็นแผนภาพแถบพลังงานได้ดังรูปที่ 2.42 เมื่อทำการเปรียบเทียบกลไกนี้กับกลไก PF กลไก PF เป็นปรากฏการณ์เทอร์มไอออนิกซึ่งใช้ความร้อนในการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในกับดักหนึ่งเข้าไปในแถบการนำของสารไดอิเล็กตริกแล้วไปยังกับดักถัดไป ส่วนกลไกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดดเป็นปรากฏการณ์ผ่านทะลุของอิเล็กตรอนจากกับดักหนึ่งไปยังอีกกับดักหนึ่งแทน กลไกนี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็นอีกสองกลไกคือ

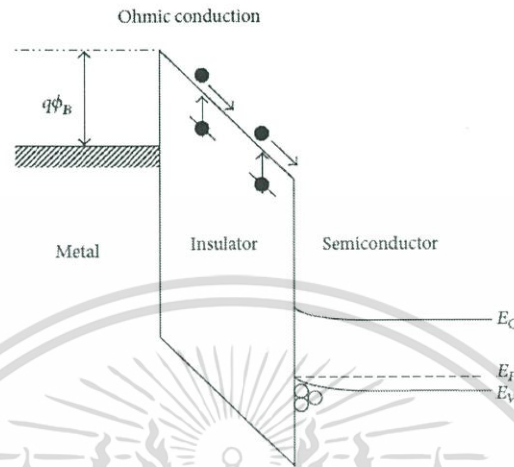


รูปที่ 2.43 แผนภาพการนำไฟฟ้าแบบ NNH และ VRH [60]

การกระโดดระยะใกล้ (Nearest Neighbor Hopping : NNH) เกิดจากอิเล็กตรอนในหลุมกับดักหลุมหนึ่งกระโดดไปยังหลุมกับดักใกล้เคียงด้วยปรากฏการณ์ผ่านทะลุโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระโดดแบบมอท์ (Mott Variable Range Hopping : VRH) เป็นอีกรูปแบบของกลไกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดด ซึ่งเกิดจากการกระโดดของอิเล็กตรอนในระบบที่มีจุดความบกพร่องจำนวนมาก โดยอิเล็กตรอนที่กระโดดไม่จำเป็นต้องไปยังหลุมกับดักที่อยู่ใกล้เคียง แต่สามารถไปยังหลุมที่อยู่ไกลแต่มีพลังงานของหลุมกับดักที่ต่ำกว่าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.44 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าแบบโอห์ม [60]

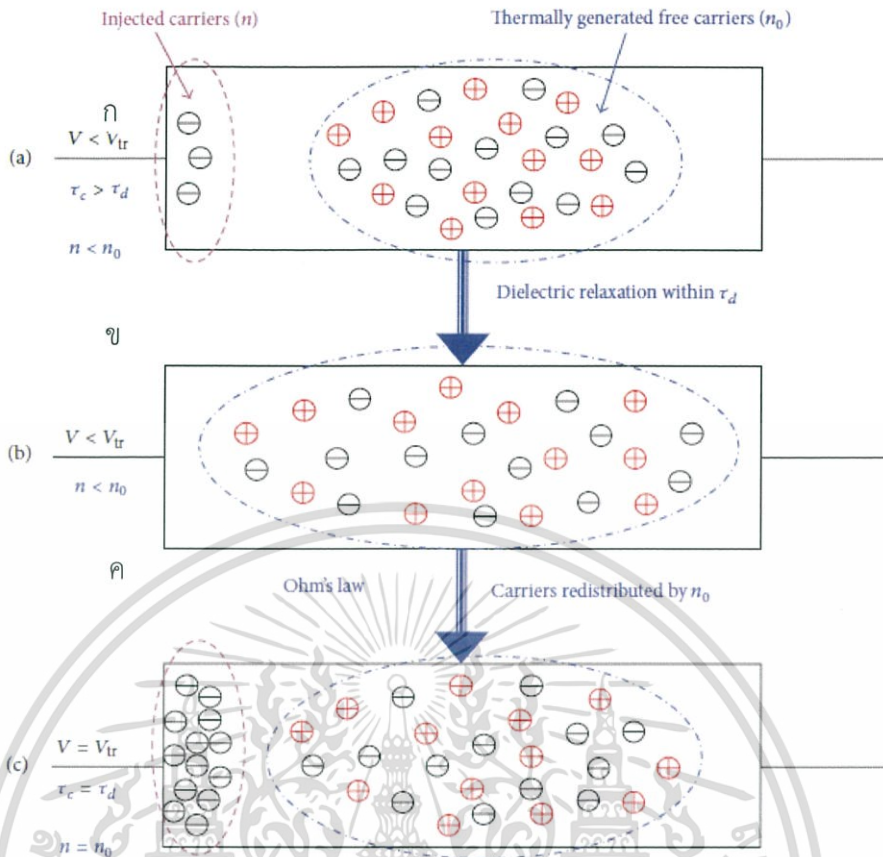
### 2.8.2.5 กลไกการนำไฟฟ้าแบบโอห์ม

กลไกการนำไฟฟ้าแบบโอห์ม (Ohmic Conduction) เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอนอิสระในแถบการนำ และโฮล (holes) ในแถบวาเลน (valence band) กลไกการนำแบบนี้มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นระหว่างความหนาแน่นของกระแสกับสนามไฟฟ้า โดยเขียนเป็นแผนภาพแถบพลังงานเนื่องจากอิเล็กตรอนได้ดังรูปที่ 2.44 ถึงแม้ว่าแถบช่องว่างพลังงานของสารไดอิเล็กทริกจะกว้างมาก แต่ก็ยังสามารถมีพาหะ (carriers) เกิดขึ้นได้เล็กน้อยเนื่องจากการพลังงานกระตุ้นของความร้อน โดยอิเล็กตรอนสามารถที่ถูกกระตุ้นไปยังแถบการนำจากแถบวาเลนหรือจุดบกพร่องในชั้นพลังงาน ทำให้พาหะไม่เป็นศูนย์ ทำให้มีกระแสที่เกิดเพียงเล็กน้อย ดังนั้นกระแสที่เกิดในกลไกนี้จะสามารถสังเกตได้เมื่อไม่มีกลไกการนำไฟฟ้าแบบอื่นในสารไดอิเล็กทริก กลไกการนำไฟฟ้าแบบนี้เกิดจากอิเล็กตรอนพาหะในแถบการนำซึ่งเป็นเชิงเส้นกับสนามไฟฟ้า ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดในกลไกนี้จะพบได้ในบริเวณที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่สูงมากนัก นอกจากนี้การสังเกตการเกิดกลไกนี้มักจะสอดคล้องกับกลไกการนำไฟฟ้าแบบเส้นใยโลหะ (metal filament)

### 2.8.2.6 การนำไฟฟ้าแบบประจุปริภูมิจำกัดกระแส

การนำไฟฟ้าแบบประจุปริภูมิจำกัดกระแส (space-charge limited current : SCLC) เป็นกลไกที่คล้ายกันกับการนำของอิเล็กตรอนในไดโอดสูญญากาศ แต่ในสารที่เป็นของแข็ง การนำไฟฟ้าแบบประจุปริภูมิจำกัดกระแส จะมีสาเหตุมาจากการฉีดอิเล็กตรอนที่ผิวสัมผัสเป็นแบบโอห์ม (ohmic contact) ทำให้เกิดการแพร่กระจายแบบเลขยกกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

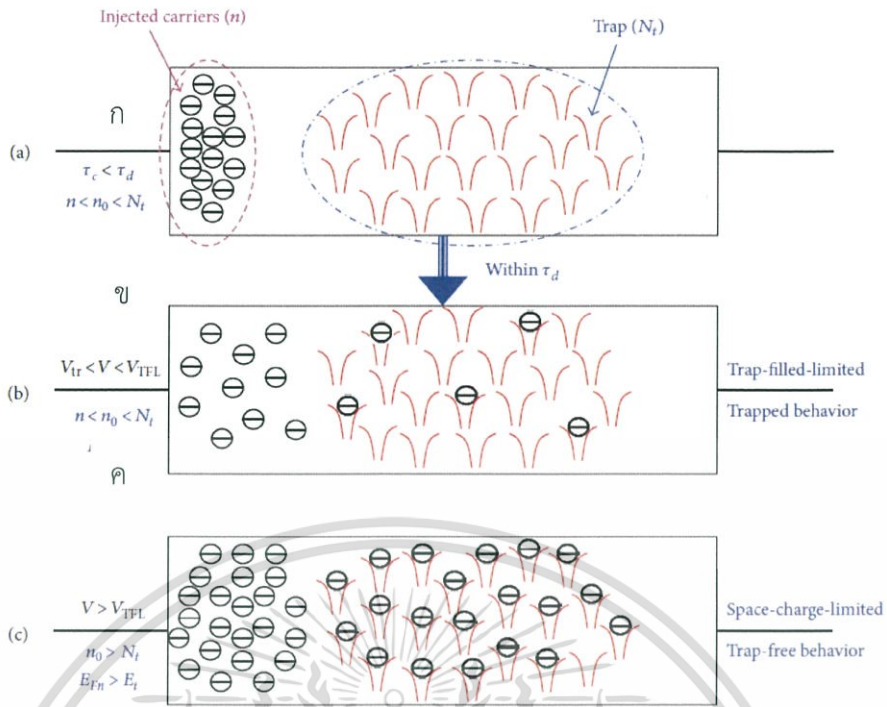


รูปที่ 2.45 แผนผังการกระจายตัวของพาหะในสารไดอิเล็กทริกในสถานะ (ก) มีการฉีดพาหะเล็กน้อย (ข) การคลายตัวและการกระจายตัวของพาหะ และ (ค) การฉีดพาหะเล็กน้อยในขณะความต่างศักย์เป็น  $V_{tr}$  [60]

ในสถานะที่มีความต่างศักย์ต่ำ ( $V < V_{tr}$ ) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสและแรงดันจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม ความหนาแน่นของพาหะอิสระที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนภายในฟิล์มจึงมีปริมาณมากกว่าพาหะที่ถูกฉีดเข้าไป ในช่วงนี้จะมีระยะเวลาในการกระตุ้นพาหะที่นานกว่าระยะเวลาในการคลายตัวของสารไดอิเล็กทริก (dielectric relaxation) ดังนั้นพาหะที่ถูกฉีดเข้าไปจะถูกทำให้เกิดในสถานะที่เสมือนเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral state) ซึ่งจะกระจายตัวในสารไดอิเล็กทริกแทนประจุในสารไดอิเล็กทริกส่วนใหญ่ที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อน ดังนั้นพาหะที่ฉีดเข้ามาจะไม่สามารถผ่านสารไดอิเล็กทริกได้ ต่อมาเมื่อความต่างศักย์มากขึ้น ( $V_{tr}$ ) ปริมาณพาหะที่ฉีดจะมากขึ้นจนกระทั่งเกิดสมดุลระหว่างพาหะที่เข้ามากับประจุที่ถูกกระตุ้น ทำให้สามารถเขียนเป็นแผนผังการกระจายตัวของพาหะในสารไดอิเล็กทริกได้ดังรูปที่ 2.45

ในสถานะที่มีปริมาณการฉีดพาหะเข้ามามากขึ้น ระยะเวลาในการคลายตัวจะใช้มากขึ้น ทำให้ประจุที่เข้ามาสามารถถึงจะถูกกระตุ้นได้ก่อนที่จะเกิดการคลายตัว จึงทำให้บทบาทการนำไฟฟ้าแบบโอห์มลดลง ประจุที่ฉีดเข้ามาจะเข้าไปเติมในแถบกับดักที่มีในสารไดอิเล็กทริก ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าแบบการเติมกับดัก (trap fill) ต่อมาเมื่อมีการเติมกับดักจนเต็ม ประจุจะสามารถข้ามไปยังแถบการนำได้โดยตรง ทำให้ในแถบการนำมีประจุมหาศาลจนถูกจำกัดด้วยประจุปริภูมิในแถบการนำ เรียกว่า การนำไฟฟ้าแบบประจุปริภูมิจำกัดกระแส แผนผังการกระจายตัวของพาหะในสารไดอิเล็กทริกแสดงได้ดังรูปที่ 2.46

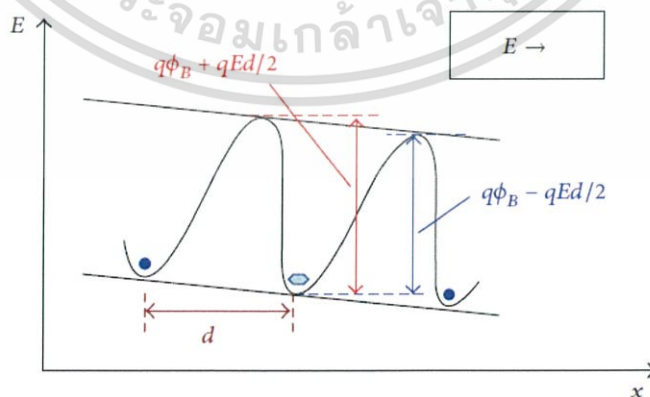
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.46 แผนภาพของการกระจายตัวของพาหะและกับดักในสารไดอิเล็กตริกในสถานะ (ก) การฉีดปริมาณมาก (ข) การเติมกับดัก และ (ค) SCLC [60]

### 2.8.2.7 การนำไฟฟ้าจากไอออน

กลไกการนำไฟฟ้าแบบไอออน (Ionic Conduction) เป็นกลไกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนเนื่องจากการให้สนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของไอออนอาจเกิดจากข้อบกพร่องของแลตทิซในสารไดอิเล็กตริก อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจะส่งผลต่อระดับพลังงานของจุดบกพร่อง ทำให้ไอออนสามารถกระโดดข้ามกำแพงศักย์ไปยังจุดบกพร่องอีกจุดหนึ่งได้ โดยเขียนเป็นแผนภาพแถบพลังงานได้ดังรูปที่ 2.47 อย่างไรก็ตาม ไอออนนั้นมีมวลที่มาก ทำให้ไม่ได้มีความสำคัญในระบบการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ



รูปที่ 2.47 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าแบบไอออน [60]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการนำไฟฟ้าทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์เป็นปัจจัยหลักในการใช้จำแนกกลไกการนำไฟฟ้าเมื่อทำการหาความสัมพันธ์ของกลไกแต่ละแบบตามตารางแล้ว ค่าความเป็นเส้นตรง (R-square) จะเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจว่าแบบจำลองแบบไหนเข้ากับข้อมูลได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม ในบางความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์มีสมการความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกัน เช่น กลไกการนำไฟฟ้าแบบโอห์ม การกระโดดระยะใกล้ การนำไฟฟ้าจากไอออน เป็นต้น ดังนั้นกลไกเหล่านี้จึงต้องการใช้ความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิช่วยในการตัดสินใจ

ตารางที่ 2.8 รายละเอียดสมการและความสัมพันธ์ของกลไกการนำไฟฟ้า [60]

กลไกการนำไฟฟ้า	สมการกระแสไฟฟ้า	ความสัมพันธ์
การปลดปล่อยแบบ Schottky	$J = \frac{4\pi q m^* (kT)^2}{h^3} \exp\left(\frac{-q(\Phi_B - \sqrt{qE/4\pi\epsilon})}{kT}\right)$	$J \propto T^2 \exp\left(A \frac{\sqrt{E}}{T} - B\right)$
การผ่านทะลุแบบ Fowler-Nordheim	$J = \frac{q^2}{8\pi h \Phi_B} E^2 \exp\left(\frac{-8\pi\sqrt{2q} m^* \Phi_B^{3/2}}{3hE}\right)$	$J \propto E^2 \exp\left(\frac{-A}{E}\right)$
การผ่านทะลุโดยตรง	$J \approx \exp\left(\frac{-8\pi\sqrt{2q}}{3h} (m^* \Phi_b)^{1/2} - kt_{ox}\right)$	$J \propto \exp(-Akt_{ox})$
การปลดปล่อยแบบ Poole-Frenkel	$J = q\mu N_c E \exp\left(\frac{-q(\Phi_r - \sqrt{qE/\pi\epsilon})}{kT}\right)$	$J \propto E \exp\left(A \frac{\sqrt{E}}{T} - B\right)$
การนำไฟฟ้าแบบโอห์ม	$J = \sigma E = q\mu N_c E \exp\left(\frac{-(E_C - E_F)}{kT}\right)$	$J \propto E \exp\left(\frac{-A}{T}\right)$
การนำไฟฟ้าแบบประจุปริภูมิจำกัดกระแส	$J = \frac{9}{8} \epsilon \mu \theta \frac{V^2}{d^3}$	$J \propto E^2$
การกระโดดระยะใกล้	$J = \sigma_0 \exp\left(\frac{-T_0}{T}\right) E$	$J \propto \frac{E}{T} \exp\left(\frac{-A}{T}\right)$
การกระโดดแบบมอท์	$J = \sigma_0 \exp\left(\frac{-T_0}{T}\right)^{1/4} E$	$J \propto \frac{E}{T} \exp\left(\frac{-A}{T}\right)^{1/4}$
การนำไฟฟ้าจากไอออน	$J \propto \frac{E}{T} \exp\left(\frac{-\Delta G^*}{kT}\right)$	$J \propto \frac{E}{T} \exp\left(\frac{-A}{T}\right)$

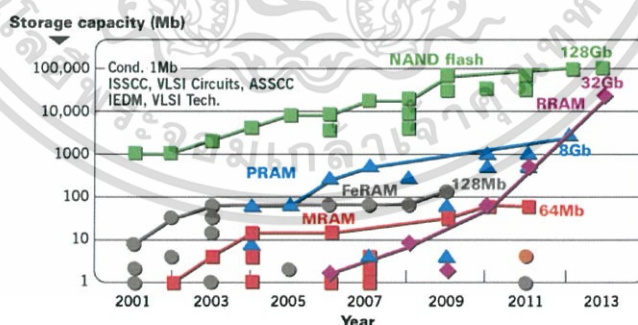
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.3 การพัฒนาเทคโนโลยีหน่วยความจำ

เทคโนโลยีหน่วยความจำในปัจจุบันเน้นการพัฒนาให้สามารถเก็บความจำได้ถาวรโดยไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการรักษาสถานะ (non-volatile) สามารถเข้าถึงข้อมูลได้แบบสุ่ม (random access) ซึ่งหมายถึงใช้เวลาในการเข้าถึงข้อมูลทุกตำแหน่งได้เท่ากัน และใช้ระยะเวลาอ่านเขียนที่รวดเร็ว โดยเทคโนโลยีหน่วยความจำตัวต้านทานแบบสุ่ม (Resistive random access memory; RRAM) เป็นโครงสร้างที่พื้นฐานที่สุดของเทคโนโลยีในปัจจุบัน

ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1960 โดย Hickmott [61] หลังจากนั้นมีการพัฒนาต่อเนื่องจนมาเป็นเทคโนโลยี RRAM เทคโนโลยีนี้ใช้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานเป็นหน่วยความจำ ซึ่งสามารถใช้ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าจากกราฟแรงดันและกระแสในการควบคุมและปรับปรุงคุณสมบัติของความต้านทาน จากการพัฒนายาวนานจนกระทั่งช่วงต้นปี ค.ศ. 2000 งานวิจัยก็ไปถึงเป้าหมาย คือ มีงานวิจัยที่นำเสนอหน่วยความจำได้เร็วเทียบเท่าหน่วยความจำ DRAM (dynamic RAM) เช่น PRAM, MRAM และ FRAM เมื่อเทียบกันแล้ว RRAM มีโครงสร้างเรียบง่ายเป็นลักษณะ โลหะ-ฉนวน-โลหะ (MIM) และใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ต่ำ อ่านได้รวดเร็ว และสามารถอ่านซ้ำได้ยาวนาน แต่ความหนาแน่นต่ำ และใช้กระแสไฟฟ้าในการอ่านเขียนที่สูง

เทคโนโลยีคู่แข่งของ RRAM คือ หน่วยความจำ NAND เป็นอุปกรณ์ที่มีการพัฒนาความหนาแน่นได้อย่างรวดเร็ว โดยไปถึง 1 TB (2017, Samsung) [62] ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์หน่วยความจำที่รู้จักกันในชื่อ SSD ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการพัฒนาหน่วยความจำ RRAM มากขึ้น โดยเฉพาะกลไกการนำไฟฟ้าที่มีการศึกษามากขึ้น จึงพัฒนาหน่วยความจำโครงสร้าง RRAM ได้รวดเร็วขึ้นจากอดีต นอกจากนี้ด้วยโครงสร้างที่เรียบง่ายและอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำ RRAM ที่ซับซ้อนโดยใช้แท็บไม่ต้องการกระบวนการอื่นเพิ่มเติมได้ รูปที่ 2.48 เปรียบเทียบเทคโนโลยีในปัจจุบันให้เห็นว่าเทคโนโลยี RRAM เป็นเทคโนโลยีที่มีความหนาแน่นและความเร็วที่สูงมาก



รูปที่ 2.48 เปรียบเทียบเทคโนโลยีอุปกรณ์หน่วยความจำ [63]

หน่วยความจำ RRAM โดยทั่วไปจะใช้โครงสร้างเป็นวัสดุฉนวนประกบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้ว และใช้แรงดันไฟฟ้าในการเปลี่ยนสถานะระหว่างความต้านทานสูง (สถานะปิด) และความต้านทานต่ำ (สถานะเปิด) โดยการเปลี่ยนจากสถานะปิดไปเปิดเรียกว่า SET และในทางกลับกัน การเปลี่ยนแปลงจากสถานะเปิดมาสถานะปิดเรียกว่า RESET นอกจากนี้หน่วยความจำถาวรสามารถแบ่งออกเป็นหน่วยความจำแบบเขียนครั้งเดียวอ่านได้หลายครั้ง (write-once-read-many times ; WORM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยความจำการสลับแบบขั้วเดียว (unipolar switching memory) และหน่วยความจำการสลับแบบสองขั้ว (bipolar switching memory) ขึ้นอยู่กับลักษณะของกราฟแรงดันและกระแส การเปลี่ยนแปลงสถานะเปรียบเทียบกับสถานะ '1' และสถานะ '0' ของระบบคอมพิวเตอร์ โดยหน่วยความจำที่มีประสิทธิภาพสูงนั้นต้องมีความเร็วในการเขียนและค่าอัตราส่วนสถานะเปิดต่อสถานะปิดสูง มีการอ่านข้อมูลได้ยาวนาน มีความทนทานสูง และราคาถูก

วัสดุควมวนมีบทบาทสำคัญในต่อคุณสมบัติของอุปกรณ์หน่วยความจำ โดยสารกราฟีนออกไซด์ ไรตวิซกราฟีนออกไซด์ และวัสดุผสมกราฟีนออกไซด์ เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมากในงานวิจัยด้านอุปกรณ์หน่วยความจำ เนื่องจากมีความบาง และใช้กระบวนการขึ้นรูปที่ไม่ซับซ้อน และมีความเร็วในการเขียนที่รวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม หน่วยความจำที่มีกราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุพื้นฐานนั้นยังขาดการศึกษากลไกในการอธิบายที่แน่ชัด ทำให้การพัฒนาอุปกรณ์หน่วยความจำกราฟีนออกไซด์ยังคงมีข้อจำกัด อุปกรณ์หน่วยความจำที่ใช้สารกราฟีนออกไซด์เป็นองค์ประกอบพื้นฐานสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.9 กลไกการนำไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์และสารอนุพันธ์ได้รับการพัฒนาและศึกษาอย่างต่อเนื่อง เพื่อศึกษากลไกและปรับปรุงหน่วยความจำโครงสร้างที่มีสารกราฟีนออกไซด์เป็นพื้นฐาน นอกจากนี้คุณสมบัติหลายประการเช่น ความทนทาน ระยะเวลาการอ่านต่อเนื่อง ความหนาแน่น ความโปร่งใส ความยืดหยุ่น รวมถึงกลไกการนำไฟฟ้ายังเป็นหัวข้อที่ท้าทายในการพัฒนาต่อไป

ตารางที่ 2.9 การเปรียบเทียบอุปกรณ์หน่วยความจำที่มีกราฟีนออกไซด์เป็นองค์ประกอบ [64]

วัสดุ	ขั้วไฟฟ้า	กระบวนการเตรียมอุปกรณ์	ชนิดชนิด	จุดเปลี่ยนสถานะ (V)	อัตราส่วนสถานะเปิดต่อปิด	ระยะเวลาเสถียรในการอ่านข้อมูล (s)	กลไกไฟฟ้า
GO	บน : Cu ล่าง : Pt	การกรอง	สองขั้ว	1	20	$10^4$	เส้นใยโลหะ
GO	บน : Al ล่าง : Al	หมุนเคลือบ	สองขั้ว	2.5	$10^2$	$10^5$	เส้นใยโลหะ
GOZNS	บน : Al ล่าง : ITO	สารผสม GO กับแท่ง Zn	สองขั้ว	2	$10^3$	n/a	ไอออนออกซิเจน
GO	บน : Al ล่าง : Al	หมุนเคลือบ	สองขั้ว	n/a	n/a	n/a	เส้นใยโลหะ
MoS <sub>2</sub> -GO	บน : Al ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	สองขั้ว	1.5	$10^2$	n/a	ไอออนออกซิเจน
GO	บน : LiF/Al ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	WORM	3	$10^4$	n/a	SCLC
GO	บน : Al ล่าง : ITO	สารละลาย	สองขั้ว	4	$10^3$	n/a	SCLC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ	ชั้นไฟฟ้า	กระบวนการเตรียมอุปกรณ์	ชนิด	จุดเปลี่ยนสถานะ (V)	อัตราส่วนสถานะเปิดต่อปิด	ระยะเวลาเสถียรในการอ่านข้อมูล (s)	กลไกไฟฟ้า
GO	บน : Au ล่าง : Al	สารละลาย	สองชั้น	2	$10^5$	n/a	SCLC
TiO <sub>2</sub> -GO	บน : Al ล่าง : ITO	สารละลาย	สองชั้น	1	$10^3$	n/a	SCLC
GO:PI	บน : Ag ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	สองชั้น	3.5	$10^5$	$10^3$	SCLC
GNFs-PVA	บน : Ag ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	ชั้นเดียว	1.5	$10^2$	$10^4$	SCLC
GO-BCP	บน : Al ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	WORM	8	$10^5$	$10^4$	SCLC, PF
GO-terracene	บน : Au ล่าง : Au	หยดเคลือบ	สองชั้น	3	$10^2$	5	TE,PF
RGO	บน : ITO ล่าง : ITO	Sol-gel	ชั้นเดียว	3-21	$10^5$	10 years	Ohmic,TE,SE
GO	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Redox
GO-DMF	บน : Al ล่าง : ITO	หยดเคลือบ	สองชั้น	3	$10^2$	n/a	pyridinium N doped PrGODMF
GO-PVK	บน : Al ล่าง : ITO	ขึ้นรูปด้วย โทลูอิน	สองชั้น	2	$10^3$	$10^4$	HOMO,LU MO
TRAMPAM-GO	บน : Al ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	สองชั้น	1	$10^3$	10800	HOMO,LU MO
GO-PFZ	บน : Al ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	สองชั้น	1.3	$10^3$	10800	HOMO,LU MO
AUNP-frGO	บน : Al ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	WORM	2	$10^3$	700	Au trapped
GO-Au-GO	บน : Al ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	สองชั้น	18	$10^9$	$10^4$	Au trapped

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ	ชั้นไฟฟ้า	กระบวนการเตรียมอุปกรณ์	ชนิด	จุดเปลี่ยนสถานะ (V)	อัตราส่วนสถานะเปิดต่อปิด	ระยะเวลาเสถียรในการอ่านข้อมูล (s)	กลไกไฟฟ้า
Pr-GO-Br <sup>-</sup>	บน : Aul ล่าง : ITO	สารละลาย	ชั้นเดียว	2	10 <sup>9</sup>	10 <sup>2</sup>	ไอออน Br <sup>-</sup>

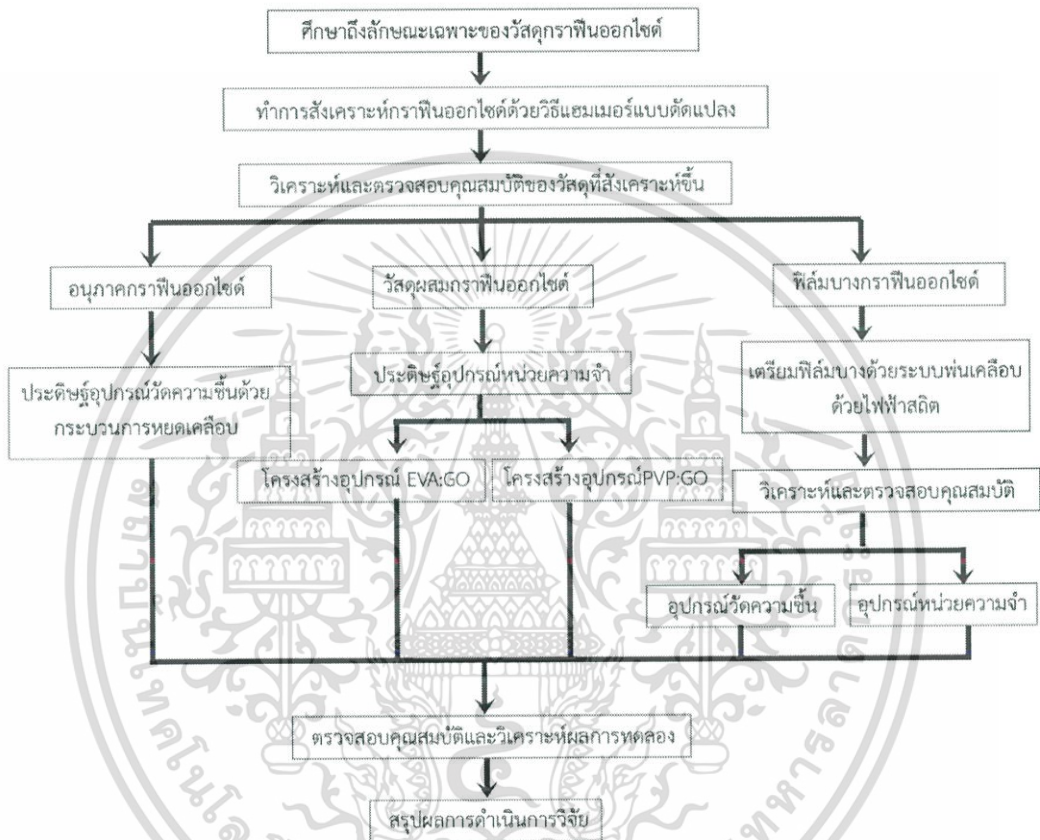
SCLC: ประจุปริภูมิจำกัดกระแส, PF: การปล่อยแบบ Poole-Frenkel, TE: การปลดปล่อยแบบเทอร์มิโอออนิก, SE: การปล่อยแบบ Schottky



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินวิจัยจะเริ่มจากการศึกษาข้อมูลความเป็นมาของกราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ รวมถึงระบบเครื่องมือวัด ระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 จากนั้นขั้นตอนลำดับต่อไปจะเป็นไปตามแผนผังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

เมื่อทำการศึกษาวิธีสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์แล้ว จึงทำการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ ด้วยกระบวนการ modified Hummer's method แล้วทำให้สารแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้แตกตัวเป็นกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการสั่นด้วยคลื่นเหนือเสียง จากนั้นทำการตรวจสอบสารที่สังเคราะห์ได้เพื่อทำการยืนยันวัสดุและคุณสมบัติของสารที่ได้ว่าเป็นกราฟีนออกไซด์

ขั้นตอนต่อมา ทำการเตรียมอุปกรณ์วัดความชื้นบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยวิธีหยดเคลือบ โดยเตรียมให้มีจำนวนครั้งของหยดที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการตรวจวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าแล้วทำการวิเคราะห์ผล

ขั้นตอนต่อมา ทำการเตรียมอุปกรณ์หน่วยความจำด้วยโครงสร้างผสมของกราฟีนและโพลีเมอร์ โดยจะทำการผสมระหว่างกราฟีนกับสาร EVA และกราฟีนกับ PVP จากนั้นทำการตรวจวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการทำความสะอาดฐานรองรับที่เป็นกระจกสำหรับเคลือบฟิล์มบาง แล้วทำการเตรียมฟิล์มบางด้วยระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต ด้วยเงื่อนไขเวลาต่างกันและเงื่อนไขอุณหภูมิต่างกัน จากนั้นทำการตรวจสอบฟิล์มที่ได้และทำการวิเคราะห์ผล เมื่อสามารถควบคุมความหนาและระดับการรีดิวซ์ได้แล้ว จึงทำการทดสอบการขยายขนาดฟิล์มที่ได้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยการเพิ่มอุปกรณ์ให้ฐานรองรับเคลื่อนที่ได้ แล้วทำการวัดเปรียบเทียบความหนาที่เปลี่ยนไป เมื่อทำการสร้างฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้แล้วจะทำการทดสอบเพิ่มเติมด้วยการทดสอบประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตามคุณสมบัติของฟิล์มที่ได้ คือ อุปกรณ์วัดความชื้นและอุปกรณ์หน่วยความจำ

อุปกรณ์วัดความชื้นจะทำการเตรียมบวมวัสดุที่เป็นกระจกนำไฟฟ้าและพลาสติกนำไฟฟ้าด้วยเงื่อนไขของเวลาเคลือบและอุณหภูมิของฐานรองรับขณะเคลือบที่แตกต่างกัน เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการเตรียมอุปกรณ์วัดความชื้น จากนั้นทำการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุและทำการตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่มีต่อความชื้นที่ต่างกัน แล้วทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

อุปกรณ์หน่วยความจำ จะทำการเตรียมบวมฐานรองรับกระจกนำไฟฟ้า จากนั้นเคลือบฟิล์มที่มีเงื่อนไขที่แตกต่างกัน แล้วทำการเคลือบซ้ำเป็นชั้นถัดไปด้วยระบบการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติของวัสดุ และทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า แล้วทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

### 3.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมี

การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์จะทำการเตรียมจากการใช้สารตั้งต้นเป็นแกรไฟต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยกระบวนการ modified Hummer's method จนได้เป็นสารประกอบแกรไฟต์ออกไซด์ แล้วทำให้เกิดการแตกตัวด้วยคลื่นเหนือเสียง จะได้สารกราฟีนออกไซด์

#### 3.1.1 สารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์

● แกรไฟต์ (Graphite powder, ACROS Organics)	ปริมาณ	1 กรัม
● โซเดียมไนเตรท ( $\text{NaNO}_3$ ; CARLO ERBA)	ปริมาณ	1 กรัม
● โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนส ( $\text{KMnO}_4$ ; CARLO ERBA)	ปริมาณ	6 กรัม
● กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ 98%; CARLO ERBA)	ปริมาณ	46 มิลลิลิตร
● น้ำไร้ประจุ (Deionized Water; LEE CIER HUAD)	ปริมาณ	170 มิลลิลิตร
● ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ 30%; CARLO ERBA)	ปริมาณ	30 มิลลิลิตร

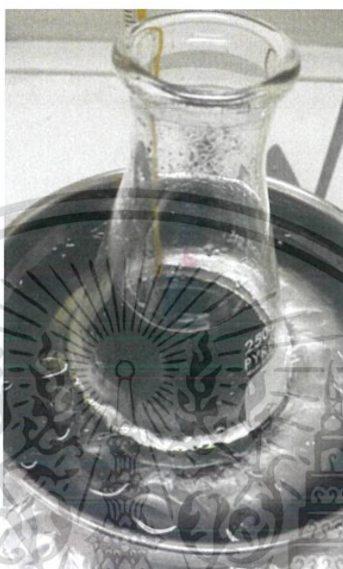
#### 3.1.2 กระบวนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วย modified Hummer's method

1. เติมสารแกรไฟต์ปริมาณ 1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วตามด้วยสารโซเดียมไนเตรทปริมาณ 1 กรัม

2. เติมกรดซัลฟิวริกปริมาตร 46 มิลลิลิตร ลงในสารผสม กวนให้เข้ากันด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirred) ด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที โดยให้ความเย็นกับระบบด้วยน้ำแข็ง ทิ้งปฏิกิริยาไว้ 5 นาที ไอออน  $\text{NO}_3^-$  จากโซเดียมไนเตรทจะช่วยตัดผงแกรไฟต์ให้มีขนาดเล็กลง ทำให้

ไอออน  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HSO}_4^-/\text{SO}_4^{2-}$  จากกรดซัลฟิวริกสามารถแทรกตัวเข้าไปยังระหว่างชั้นของแกรไฟต์ให้ทั่วถึงได้ง่ายขึ้น

3. เติมสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนสปริมาณ 6 กรัม ลงในสารผสมอย่างช้า ๆ ป้อนกันไม่ให้อุณหภูมิในขณะเกิดปฏิกิริยาเกิน 20 องศาเซลเซียส (เพื่อป้องกันการระเบิดในขณะทำการผสม) แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที ดังรูปที่ 3.2 สารผสมจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามสมการที่ (2.3) ทำให้ได้ไอออน  $\text{MnO}_3^+$  ซึ่งทำให้สีของสารผสมมีสีเขียวผสมกับสีดำของแกรไฟต์



รูปที่ 3.2 สารตั้งต้นที่ผสมกันในขวดรูปชมพู่

4. ให้ความร้อนกับสารผสมจนกระทั่งมีอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จากนั้นกวนสารทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ไอออน  $\text{MnO}_3^+$  เข้าไปแทรกตัวในระหว่างชั้นของแกรไฟต์อย่างทั่วถึง ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนบนพื้นผิวกราฟีน (ชั้นเดียวของแกรไฟต์) จากนั้นไอออน  $\text{MnO}_3^+$  จะจับตัวกับไอออน  $\text{HSO}_4^-/\text{SO}_4^{2-}$  เกิดเป็นสาร  $\text{MnO}_3\text{HSO}_4/(\text{MnO}_3)_2\text{SO}_4$  แทรกตามชั้นของแกรไฟต์

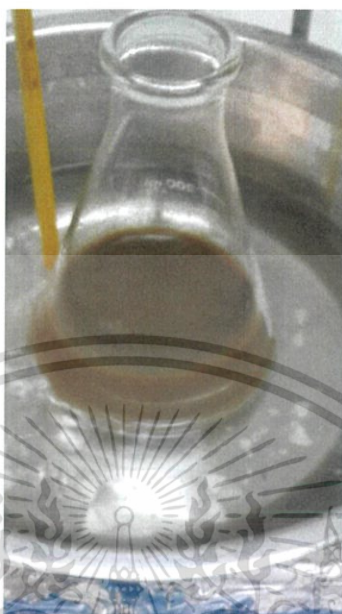
5. เติมน้ำไร้ประจุปริมาณ 70 มิลลิลิตร ลงในสารผสม ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที น้ำไร้ประจุจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (การทำให้แตกตัวด้วยน้ำ) กับสาร  $\text{MnO}_3\text{HSO}_4/(\text{MnO}_3)_2\text{SO}_4$  จนได้เป็นไอออนอีกครั้ง จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.4) ทำให้ได้สาร  $\text{Mn}_2\text{O}_7$  ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรุนแรงกับวงอะโรมาติก ทำให้อุณหภูมิของสารผสมเพิ่มสูงขึ้น (อุณหภูมิของสารผสมควรเพิ่มขึ้นเกิน 40 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา) แกรไฟต์จะเปลี่ยนเป็นแกรไฟต์ออกไซด์ทำให้สารผสมเปลี่ยนเป็นสีเหลืองสว่างดังรูปที่ 3.3

6. เติมน้ำไร้ประจุปริมาณ 100 มิลลิลิตร ตามด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 30 มิลลิลิตร เพื่อหยุดการเกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (3.1) ทำให้ได้สาร  $\text{MnSO}_4$  ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแกรไฟต์



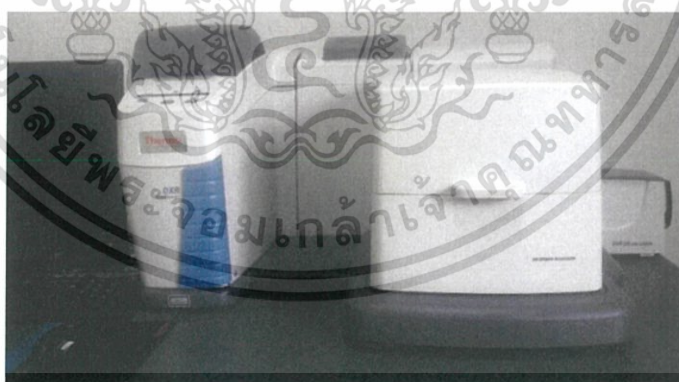
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ล้างสารผสมที่ได้ด้วยน้ำไร้ประจุหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้ล้างสารที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้ดี โดยจะเหลือเพียงสารแกรไฟต์ออกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนแห้ง จะได้ผงของสารแกรไฟต์ออกไซด์



รูปที่ 3.3 สารที่ทำปฏิกิริยาเคมีเป็นสารแกรไฟต์ออกไซด์

8. นำผงของสารแกรไฟต์ออกไซด์ ผสมกับน้ำไร้ประจุด้วยความเข้มข้น 0.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นทำการสั่นด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้สารแกรไฟต์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้แตกตัวเป็นสารกราฟีนออกไซด์แล้วทำการตรวจสอบวิเคราะห์คุณสมบัติ



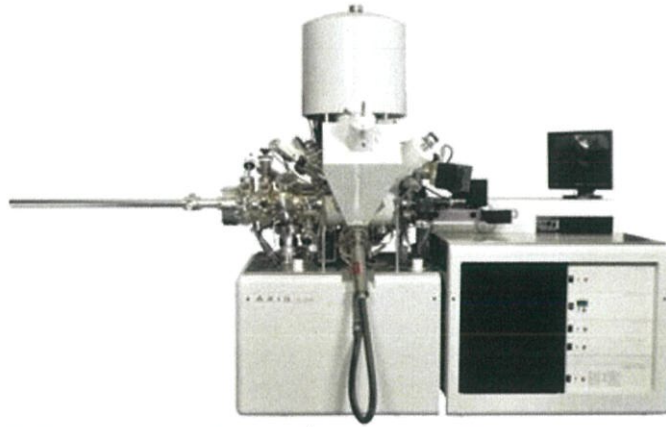
รูปที่ 3.4 รามาโนสเปกโตรสโกปี รุ่น Thermo Scientific DXR Smart Raman

### 3.1.3 การตรวจสอบคุณสมบัติของสารกราฟีนออกไซด์

สารที่ได้จากการสังเคราะห์จะทำการตรวจสอบคุณสมบัติเพื่อยืนยันว่าสารที่ได้เป็นกราฟีนออกไซด์โดยทำการตรวจสอบดังนี้

1. ตรวจสอบจากลักษณะสีของสารผสมกราฟีนออกไซด์ที่แพร่กระจายในน้ำ ซึ่งสีของสารแกรไฟต์และสีของรีดิวซ์กราฟีนจะเป็นสีดำแต่สีของกราฟีนออกไซด์จะเป็นสีเหลืองน้ำตาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



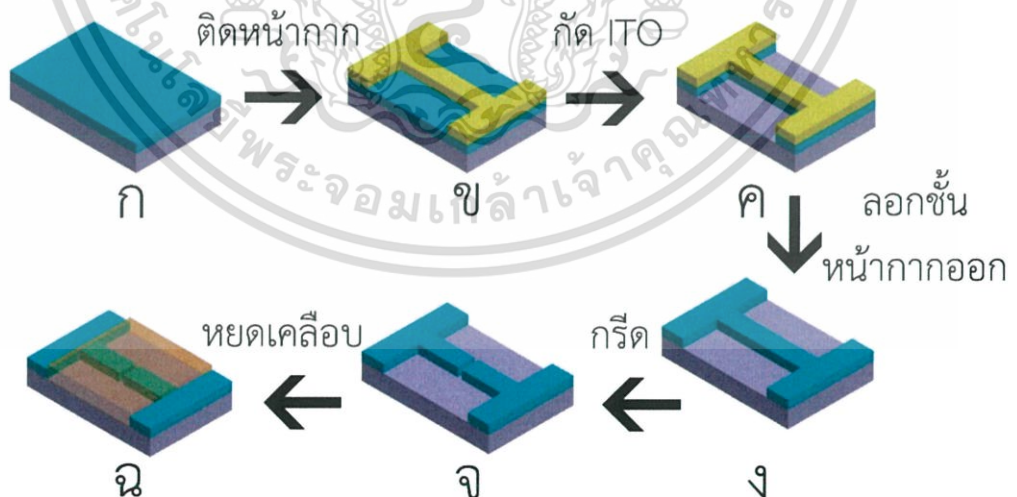
รูปที่ 3.5 สเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์รุ่น Kratos AXIS Ultra DLD

2. ตรวจสอบการกระเจิงแบบรามานโดยใช้เครื่อง รามานสเปกโตรสโคปี รุ่น Thermo Scientific DXR Smart Raman ที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจะให้ข้อมูลการสั่นเชิงรามานของฟิล์ม ซึ่งสามารถอธิบายข้อมูลทางโครงสร้าง ชนิดของสารประกอบคาร์บอน ความไม่สมบูรณ์ (defect) ค่าประมาณจำนวนชั้น และคุณภาพของฟิล์มได้

3. ตรวจสอบเทคนิคสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ ทำการวัดด้วยเครื่องรุ่น Kratos AXIS Ultra DLD ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งให้ข้อมูลธาตุและลักษณะสารประกอบที่เกิดขึ้น ทำให้บอกลักษณะปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มาเกาะบนพื้นผิวกราฟีนออกไซด์ได้

### 3.2 อุปกรณ์วัดความชื้นจากกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีหยดเคลือบ

งานวิจัยนี้จะนำสารกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์มาเตรียมเป็นอุปกรณ์วัดความชื้นที่มีความโปร่งใส โดยจะมีกระบวนการเตรียมดังนี้



รูปที่ 3.6 แผนผังการเตรียมอุปกรณ์วัดความชื้น (ก) ITO บนฐานรองรับกระจก (ข) ITO ติดหน้ากาก (ค) หลังกัด ITO (ง) หลังนำชั้นหน้ากากออกไป (จ) ชั้นที่เตรียมเสร็จ (ฉ) อุปกรณ์วัดความชื้น

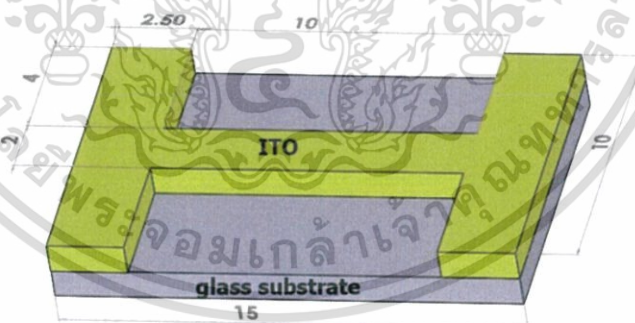
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การเตรียมขั้วอินเดียมทินออกไซด์บนกระจก

การเตรียมขั้วไฟฟ้าอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide : ITO) จะใช้แผ่น ITO ที่เคลือบบนกระจกของบริษัท Xinyan technology Ltd. (รูปที่ 3.6ก) ตัดให้มีขนาด 10x15 ตารางมิลลิเมตร จากนั้นทำการติดเทป 3M เป็นรูปตัว I เพื่อเป็นหน้ากาดังรูปที่ 3.6ข โดยมีขนาดตามรูปที่ 3.7 จากนั้นนำไปแช่ในสาร Aqua regia เป็นเวลา 20 นาที เพื่อกัด ITO ในส่วนที่ไม่ต้องการออก ดังรูปที่ 3.6ค แล้วทำการถอดหน้ากาดอกและล้างด้วยน้ำยาล้างขจัดคราบไขมัน จากนั้นแช่ในสารอะซิโตนแล้วล้างด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 20 นาที ทำซ้ำแบบเดิมตั้งแต่ขั้นตอนการแช่ในสารอะซิโตนแต่เปลี่ยนจากสารอะซิโตนเป็น น้ำไร้ประจุ อะซิโตน เมทานอล และไอโซโพรพานอลตามลำดับ แล้วเป่าให้แห้งด้วยอากาศแห้ง จะเป็นดังรูปที่ 3.6ง หลังจากนั้นใช้คัตเตอร์ที่มีใบมีดทึ่ม 30 องศา กรีด ITO หนึ่งครั้งให้ขาดจากกันดังรูปที่ 3.6จ จะได้ฐานรองรับ ITO บนกระจกสำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความชื้น

### 3.2.2 การเตรียมฟิล์มบางด้วยการหยดเคลือบ

การเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ทำได้โดย นำผงกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์มาแพร่กระจายในน้ำไร้ประจุที่ความเข้มข้น 0.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วล้างด้วยคลื่นเหนือเสียงเพื่อให้แตกตัวเป็นกราฟีนออกไซด์ นำสารกราฟีนออกไซด์ที่ได้มาทำการสร้างฟิล์มด้วยกระบวนการหยดเคลือบโดยการหยดสารปริมาตร 20 ไมโครลิตร บนขั้ว ITO ที่เตรียมไว้ ให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส บนถาดให้ความร้อน (hot plate) จะได้ฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์จากกระบวนการหยดเคลือบหนึ่งหยด ให้ทำซ้ำกระบวนการนี้แต่เปลี่ยนเงื่อนไขในการทำซ้ำกระบวนการหยดเคลือบเป็น 3 ครั้ง 5 ครั้ง และ 7 ครั้ง ตามลำดับ จะได้อุปกรณ์วัดความชื้นที่เงื่อนไขต่างกัน 4 เงื่อนไข ดังรูปที่ 3.6ฉ



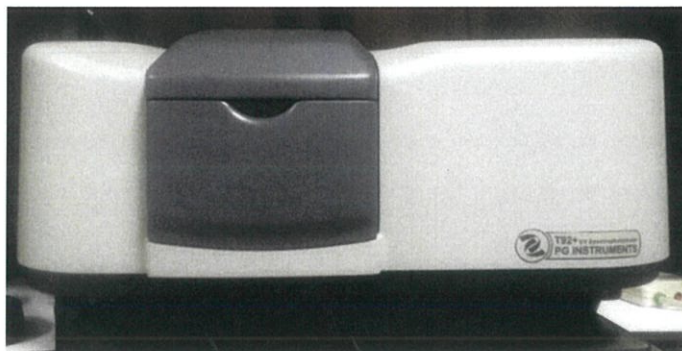
รูปที่ 3.7 แผนผังการทำลวดลาย

### 3.2.3 การตรวจสอบคุณสมบัติฟิล์ม

อุปกรณ์วัดความชื้นกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากการหยดเคลือบจะทำการตรวจสอบคุณสมบัติดังนี้

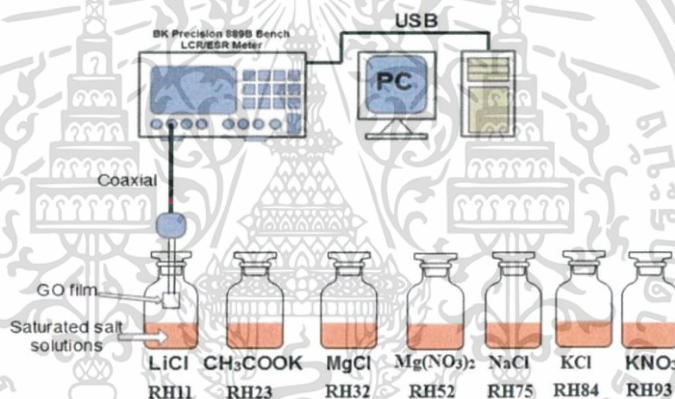
1. การตรวจสอบยืนยันสารกราฟีนออกไซด์ด้วยการเตรียมเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์บนฐานรองรับกระจกจากนั้นตรวจสอบด้วยเทคนิคการตรวจสอบด้วยรามานโดยใช้เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี รุ่น Thermo Scientific DXR Smart Raman โดยแหล่งกำเนิดแสงมีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ระบบยูวี-วิสทิเบิลสเปกโทรสโกป T92+ PG instrument

2. ทำการตรวจสอบความโปร่งใสโดยการเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์บนฐานรองรับ ITO บนกระจกที่ไม่ผ่านกระบวนการกัด จากนั้นทำการวัดค่าการทะลุผ่านด้วยระบบยูวี-วิสทิเบิลสเปกโทรสโกป T92+ PG instrument ในช่วงความยาวคลื่น 900 ถึง 350 นาโนเมตร ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งช่วยให้ข้อมูลเกี่ยวกับการดูดกลืนและทะลุผ่านของสาร และสามารถใช้คำนวณช่องว่างพลังงานเชิงแสงได้ (Optical bandgap)



รูปที่ 3.9 ระบบการวัดความชื้นในการตอบสนอง

3. ความชื้นในการตอบสนอง การตรวจสอบความชื้นในการตอบสนองของอุปกรณ์ (Sensitivity) ใช้ระบบการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยใช้สารละลายอิ่มตัวมาตรฐานซึ่งจะมีความชื้นคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่ง (25 °C) ได้แก่ LiCl, CH<sub>3</sub>COOH, MgCl, Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, NaCl, KCl และ KNO<sub>3</sub> ทำการแช่อุปกรณ์บริเวณอากาศเหนือสารละลายอิ่มตัว และทำการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ด้วยเครื่อง LCR meter BK 889B (รูปที่ 3.10) ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตเป็นเวลาขดละ 15 นาที จากนั้นทำการเปลี่ยนขวดไปเรื่อย ๆ จนครบทุกขวด แล้วนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์และค่าความต้านทานเชิงซ้อนที่วัดได้

4. ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดกลืนและคาย (Response and Recovery) นั้นมีผลต่อความสามารถของอุปกรณ์ โดยจะทำการตรวจวัดตั้งแผนภาพในรูปที่ 3.11 คือ เริ่มจากตรวจวัดที่ความชื้นต่ำ (11%RH) เป็นเวลา 500 วินาที แล้วจึงสลับไปตรวจวัดที่ความชื้นสูง (93%RH) 500 วินาที จากนั้นให้เปลี่ยนค่าความชื้นสลับกันไป เพื่อสังเกตระยะเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความชื้นในการตอบสนอง

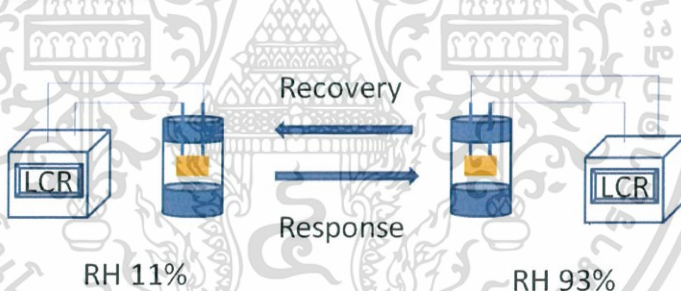
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 เครื่องมือวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน

5. ฮิสเทอรีซิส (hysteresis) เป็นการตรวจประสิทธิภาพความแม่นยำในการวัดว่ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเพียงใด โดยทำการวัดคล้ายความไวในการตอบสนอง แต่ทำการวัดต่อเนื่องเรียงจากค่าความชื้นต่ำไปยังความชื้นสูง และเรียงกลับจากค่าความชื้นสูงมายังความชื้นต่ำ

6. การตอบสนองเชิงความถี่ (Cole-Cole plot) เป็นการวัดคล้ายกับการวัดความไวในการตอบสนอง แต่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ใช้ในการวัดแทน โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 20 เฮิร์ตถึง 2 เมกะเฮิร์ต ซึ่งจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิความชื้น



รูปที่ 3.11 การวัดเวลาที่ใช้ในการดูดและคาย

### 3.3 อุปกรณ์หน่วยความจำจากวัสดุผสม

อุปกรณ์หน่วยความจำจากวัสดุผสมที่ทำการวิจัยในงานนี้มีสองวัสดุผสมซึ่งมีกระบวนการดังนี้

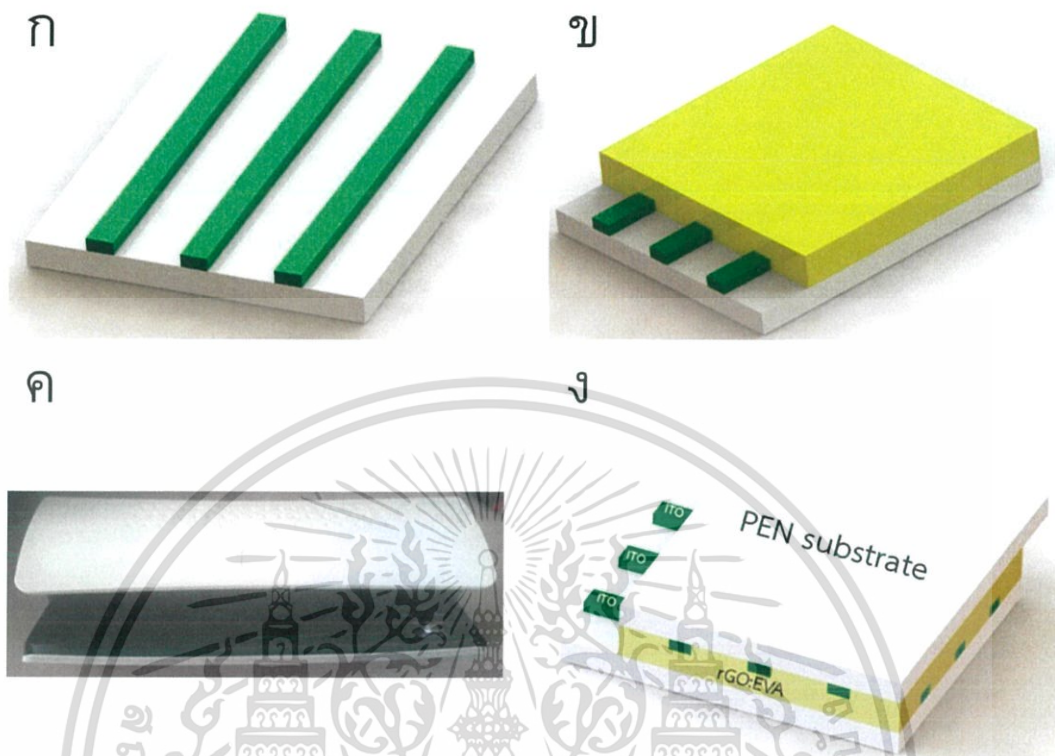
#### 3.3.1 วัสดุผสม EVA:rGO

##### 3.3.1.1 การเตรียมฐานรองรับ ITO บนพลาสติก PEN

ทำการเตรียมฐานรองรับที่เป็นชั้นฟิล์ม ITO บนพลาสติก PEN (Polyethylene naphthalate) ของบริษัท Peccell Technologies Company ให้มีขนาด 25x30 ตารางมิลลิเมตร จากนั้นใช้เทป 3M ทำการสร้างชั้นหน้ากากเป็นเส้นกว้าง 3 มิลลิเมตร จำนวนสามเส้น แล้วทำการสร้างลวดลายด้วย aqua regia เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทำการลอกชั้นหน้ากากออกแล้วล้างด้วยน้ำยาล้างขจัดคราบไขมัน แชนน้ำไร้ประจุ แล้วทำการสั่นด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 20 นาที ทำซ้ำกระบวนการเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำไร้ประจุแต่เปลี่ยนเป็น เมทานอล และไอโซโพรพานอลตามลำดับ หลังจากนั้นเป่าให้แห้งด้วย อากาศแห้ง จะเป็นดังรูปที่ 3.12ก



รูปที่ 3.12 (ก) ขั้ว ITO บนกระจก (ข) फिल्मวัสดุผสม EVA:GO บนขั้ว ITO (ค) เครื่องรีดบัตร (ง) อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/EVA:rGO/ITO

### 3.3.1.2 การเตรียมอุปกรณ์หน่วยความจำ

ทำการเตรียมโพลิเมอร์ poly (ethylene-co-vinyl acetate) หรือ EVA มาละลายในตัวทำละลาย toluene ด้วยความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นเติมผงแกรไฟต์ออกไซด์ใน EVA ที่ความเข้มข้น 4 % โดยน้ำหนัก แล้วสั่นด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแตกตัวเป็น กราฟีนออกไซด์ (GO) จากนั้นขึ้นรูปฟิล์มโดยนำสารผสมที่ได้มาทำการหมุนเคลือบ (spin coat) บนฐานรองรับ ITO บน PEN ที่ได้เตรียมไว้ ด้วยเงื่อนไขความเร็วในการหมุน 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นอบเป็นเวลา 3 นาที ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เพื่อทำการระเหยตัวทำละลายจะได้ฟิล์ม EVA:GO ดังรูปที่ 3.12ข ต่อมาให้ นำแผ่น ITO บน PEN อีกแผ่นทำการประกบบนฟิล์ม EVA:GO ที่ได้กล่าวถึงข้างต้นแล้วใช้กระบวนการรีดร้อนด้วยเครื่องรีดบัตรที่ความร้อน 170 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.12ค ซึ่ง GO จะถูกรีดวอร์คกลายเป็น รีดวอร์คกราฟีนออกไซด์ (rGO) ทำให้ได้โครงสร้างอุปกรณ์เป็น PEN/ITO/EVA:rGO/ITO/PEN ดังรูปที่ 3.12ง

### 3.3.1.3 การตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์

1. ตรวจสอบคุณสมบัติการทะลุผ่านของแสงในอุปกรณ์ด้วยระบบยิววี-วิสสิเบิลสเปกโทรสโกปีรุ่น T92+ PG instrument ในช่วงความยาวคลื่นแสง 350 ถึง 900 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL JSM-7001F

2. ตรวจสอบพื้นระเคมีด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ เครื่องรุ่น Kratos AXIS Ultra DLD

3. ตรวจสอบความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL JSM-7001F ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดสมบัติทางไฟฟ้า รุ่น Keithley 2410-C

4. ตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องรุ่น Keithley 2410-C ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งจะทำให้การจ่ายความต่างศักย์และวัดกระแสไฟฟ้าที่ออกมา เพื่อให้ข้อมูลลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์

### 3.3.2 วัสดุผสม PVP:GO

#### 3.3.2.1 การเตรียมฐานรองรับ ITO บนกระจก

เตรียมฐานรองรับที่มีชั้นฟิล์ม ITO บนกระจกให้มีขนาด 25x30 ตารางเซนติเมตร จากนั้นสร้างชั้นหน้ากักด้วยเทป 3M เป็นเส้นกว้าง 2 มิลลิเมตร จำนวนสามเส้น แล้วทำการสร้างลวดลายการกัดด้วย aqua regia เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นลอกชั้นหน้ากักออกแล้วล้างด้วยน้ำยาล้างขจัดคราบไขมัน แชนในสารอะซิโตน แล้วล้างด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 20 นาที ทำซ้ำกระบวนการแช่แต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

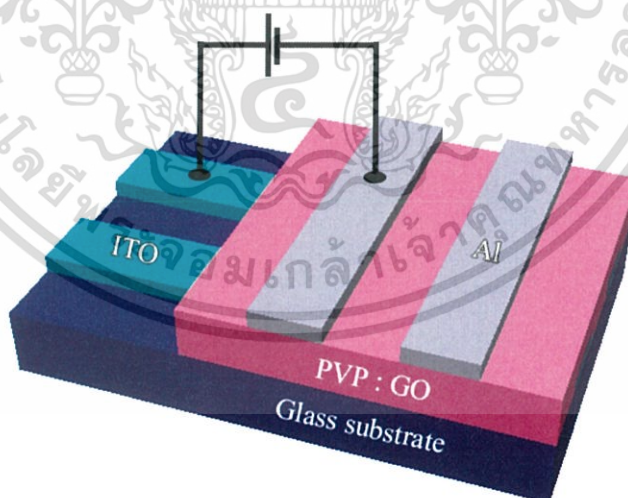
เปลี่ยนจากสารอะซิโตนเป็น น้ำไร้ประจุ อะซิโตน เมทานอล และไอโซโพรพานอลตามลำดับ หลังจากนั้นเป่าให้แห้งด้วยอากาศแห้ง



รูปที่ 3.15 เครื่องระเหยสารด้วยความร้อน

### 3.3.2.2 การเตรียมอุปกรณ์หน่วยความจำ

นำโพลีเมอร์ Polyvinylpyrrolidone (PVP) มาผสมกับเอทานอลที่ความเข้มข้น 70 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วสั่นด้วยคลื่นเหนือเสียง 20 นาที ต่อมาเติมผงแกรไฟต์ออกไซด์ลงไปเป็นสัดส่วนร้อยละ 0, 2, 4, 6 และ 8 ของน้ำหนัก PVP แล้วสั่นด้วยคลื่นเหนือเสียงอีก 20 นาที จะได้สารผสม PVP:GO



รูปที่ 3.16 โครงสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำของวัสดุผสม PVP:GO

นำสารที่ได้มาทำการหมุนเคลือบฐานรองรับ ITO ที่ได้เตรียมไว้ด้วยเงื่อนไข 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 วินาที ต่อด้วย 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที แล้วอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยตัวทำละลาย ส่วนชั้นอะลูมิเนียม (Al) ด้านบนจะทำการเตรียมด้วยวิธีระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

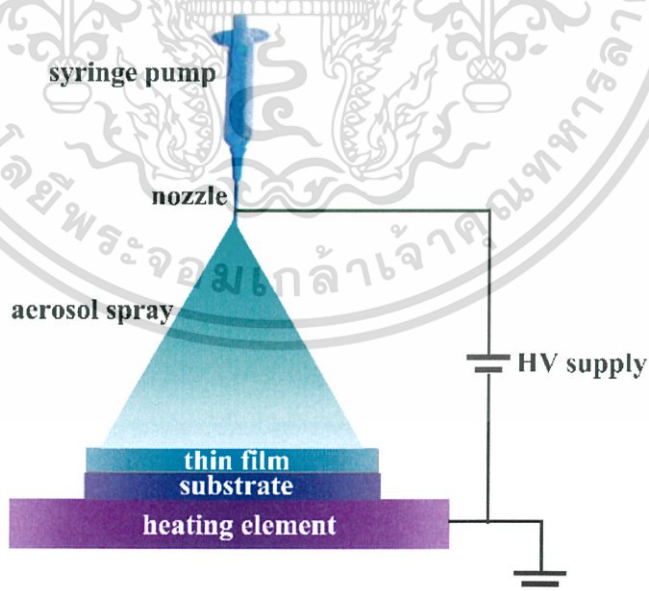
ด้วยความร้อน ดังรูปที่ 3.15 ให้มีความหนา 100 นาโนเมตร จะได้อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง Glass/ITO/PVP:GO/Al ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.17 ฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปรุ่น perkinelmer uatr two

### 3.3.2.3 การตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์

1. ตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุด้วยเทคนิคการตรวจสอบด้วยรามาน
  2. ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป ดังรูปที่ 3.17
- 3.17 ฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโคปรุ่น perkinelmer uatr two ทำงานในโหมด ATR

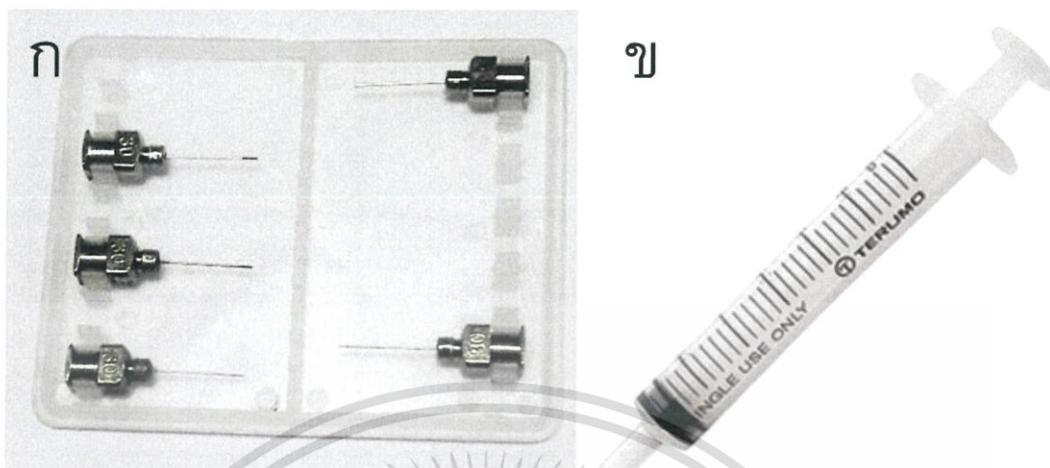


รูปที่ 3.18 โครงสร้างของระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

3. ตรวจสอบพันธะเคมีด้วยเทคนิคสเปกโทรสโคปของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ เครื่องรุ่น Kratos AXIS Ultra DLD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ตรวจสอบความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL JSM-7001F
5. ตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องรุ่น Keithley 2410-C



รูปที่ 3.19 (ก) เข็มสแตนเลสเบอร์ 30GA (ข) หลอดฉีดยา

### 3.4 ระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

ในงานวิจัยนี้จะทำการขึ้นปลุกฟิล์มบางด้วยระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต โดยเครื่องที่ใช้จะมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ บีมฉีดยา ฐานรองรับแบบปรับอุณหภูมิได้ แหล่งกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงและเข็มฉีดยา ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.20 บีมฉีดยาที่ใช้ในระบบ

#### 3.4.1 ส่วนประกอบของระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

##### 3.4.1.1 หัวเข็มและหลอดฉีดยา

เข็มฉีดยา (Needle) ที่ใช้เป็นเข็มฉีดยาวัสดุสแตนเลสเบอร์ 30GA (รหัส ST30050) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.19ก ส่วนหลอดฉีดยา (Syringe) ใช้ขนาดหลอดที่ 3 มิลลิลิตร รุ่น Terumo ซึ่งเกลียวตรงปลายดังรูปที่ 3.19ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.2 ป้อนฉีดสาร

ลักษณะของปั๊มฉีดสาร (Syringe pump) แสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งใช้สำหรับควบคุมปริมาณสารที่ฉีดต่อหน่วยเวลาทำให้มีความแม่นยำในการควบคุมปริมาตรของสารที่ใช้ในการเคลือบ ปั๊มที่ใช้เป็นปั๊มรุ่น NE-1050 single syringe pump ของบริษัท new era pump systems inc. ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลได้ตั้งแต่ 0.2 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง ไปจนถึง 50 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถตั้งปริมาตรของสารที่ไหลได้สูงสุด 9999 มิลลิลิตร เมื่อสารไหลถึงปริมาตรที่ตั้งค่าไว้ เครื่องจะหยุดทำงานโดยอัตโนมัติ เครื่องสามารถตั้งค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดฉีดสารได้สูงสุด 50 มิลลิลิตร และยังมีระบบฉีดสารและดูดสารอีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถจับเวลาและดูปริมาตรของสารที่ได้ฉีดไปได้ตลอดเวลาที่เครื่องทำงานอยู่อีกด้วย



รูปที่ 3.21 ฐานปรับความสูง

### 3.4.1.3 ฐานปรับความสูง

รูปที่ 3.21 แสดงรูปฐานปรับความสูงซึ่งช่วยในการปรับระยะระหว่างปลายเข็มและฐานรองรับให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ โดยฐานปรับความสูงจะสามารถปรับให้มีความสูงเปลี่ยนแปลงได้สูงสุด 20 เซนติเมตร



รูปที่ 3.22 ฐานรองรับและชัตเตอร์

### 3.4.1.4 ฐานรองรับและชัตเตอร์

รูปที่ 3.22 แสดงให้เห็นถึงฐานรองรับซึ่งมีลักษณะเป็นวงกลมทำจากวัสดุสแตนเลสเพื่อใช้เป็นขั้วของไฟฟ้า นอกจากนี้ลักษณะเป็นวงกลมจะช่วยให้ฟิล์มกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้นอีกด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานรองรับยังคงมีสายสีแดงสำหรับจ่ายความร้อนเพื่อควบคุมความร้อนให้กับตัวอย่าง ส่วนที่มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กจะเป็นซีตเตอร์ซึ่งใช้สำหรับเปิดปิดให้สารทำการเคลื่อนบนตัวอย่าง ความร้อนสูงสุดที่สามารถให้แก่ระบบได้จะอยู่ที่ 290 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.23 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

#### 3.4.1.5 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 3.23 แสดงอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิซึ่งมีลักษณะเป็นกล่องสีดำด้านล่าง ใช้สำหรับปรับอุณหภูมิฐานรองรับซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบ PID คือ ทำงานโดยการให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ หากอุณหภูมิสูงเกินไปจะตัดวงจร และเปิดวงจรอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าที่กำหนด ส่วนกล่องด้านบนเป็นตัวควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ตัวแปลงไฟฟ้าสามารถจ่ายไฟฟ้าได้สูงสุด 25 โวลต์



รูปที่ 3.24 อุปกรณ์แปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

#### 3.4.1.6 อุปกรณ์แปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

รูปที่ 3.24 แสดงอุปกรณ์แปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูงซึ่งสามารถเพิ่มจากศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเป็น 2,000 เทา ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงจะมีบทบาทในการเหนี่ยวนำให้เกิดไฟฟ้าสถิตในสารที่ใช้เตรียมตัวอย่าง อย่างไรก็ตามอุปกรณ์สามารถศักย์ไฟฟ้าให้แก่ระบบได้สูงสุดที่ 20 กิโลโวลต์

ส่วนประกอบทั้งหมดนั้นสามารถประกอบได้ตามรูปที่ 3.25 ซึ่งจะมีส่วนที่เป็นระบบปิดและมีท่อสำหรับใช้ระบายไอสารส่วนเกินออกไป

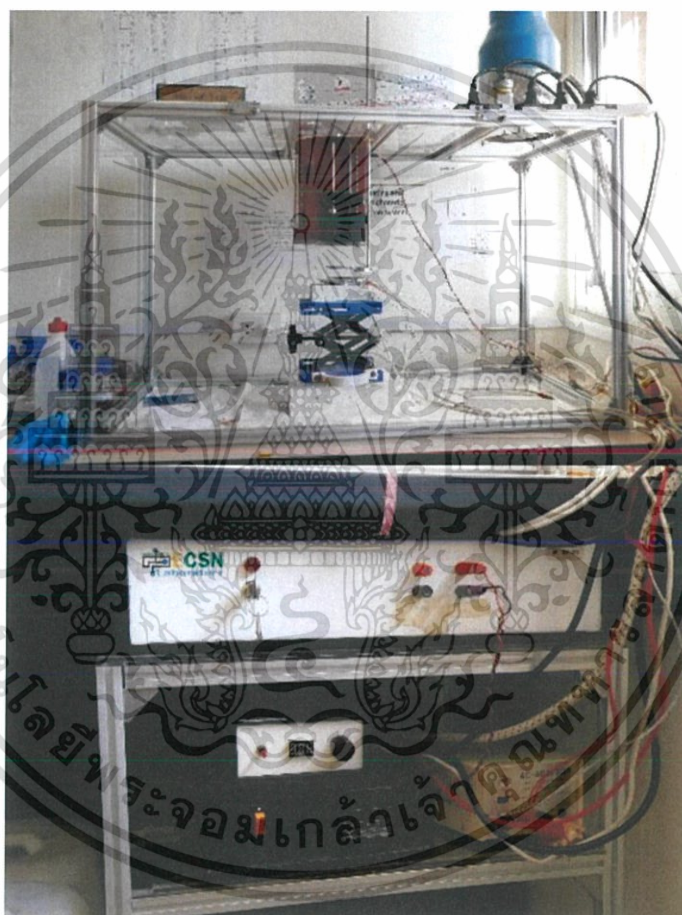
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การเตรียมฐานรองรับตัวอย่าง

#### 3.4.2.1 ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

กระจกจะถูกตัดเป็นชิ้น ขนาด 2.5x2.5 ตารางเซนติเมตร จากนั้นจึงล้างด้วยกระบวนการทาง แอลกอฮอล์ดังนี้ (Alcohol wash process)

1. ล้างกระจกด้วยน้ำยาขจัดคราบไขมัน
2. แช่ในน้ำไร้ประจุ แล้วล้างด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 20 นาที
3. ทำซ้ำข้อ 2. แต่เปลี่ยนจากน้ำไร้ประจุเป็น อะซิโตน (Acetone) เมทานอล (methanol) และไอโซโพรพานอล (IPA) ตามลำดับ
4. เป่าให้แห้งด้วยอากาศแห้ง



รูปที่ 3.25 ระบบรวมของการฟ้นเคลือบด้วยไฟฟ้าสเถิต

#### 3.4.2.2 ฐานรองรับที่เป็นกระจกอินเดียมทินออกไซด์

กระจกอินเดียมทินออกไซด์เป็นกระจกที่ถูกเคลือบด้วยสารที่นำไฟฟ้าได้ มีความโปร่งใสสูง และมีกระบวนการทำความสะอาดดังนี้

1. ตัดกระจกอินเดียมทินออกไซด์ให้ได้ขนาดที่ต้องการ
2. ติดเทป 3M ให้ได้รูปร่างที่ต้องการ
3. แช่ในสารอควารีเจีย (Aqua Regia) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกัดส่วนที่ไม่ต้องการออกไป
4. ลอกเทปออก แล้วล้างด้วยน้ำยาขจัดคราบไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แช่ในสารอะซิโตน แล้วสั่นด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 20 นาที
6. ทำซ้ำข้อ 5. แต่เปลี่ยนจากสารอะซิโตนเป็น น้ำไร้ประจุ อะซิโตน เมทานอล และไอโซโพรพานอล ตามลำดับ
7. เป่าให้แห้งด้วยอากาศแห้ง

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขที่ควบคุมในระบบ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของฐานรองรับ (°C)					
	150	175	200	225	250	275
15	✓					
30	✓	✓	✓	✓	✓	✓
45	✓					
60	✓					

### 3.5 การเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยระบบพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

#### 3.5.1 การเตรียมสารกราฟีนออกไซด์

สารละลายกราฟีนออกไซด์เตรียมได้จากการนำผงแกรไฟต์ออกไซด์มาผสมกับสาร จากนั้นจึง สั่นด้วยคลื่นเสียงให้เกิดการแตกตัว (exfoliation) เป็นสารกราฟีนออกไซด์ซึ่งแพร่กระจายในสารผสม ของเอทานอลกับบิวทิลคาร์บิทอล (butyl carbitol; diethylene glycol butyl ether) ซึ่งผสมกันใน อัตราส่วน 1: 1 โดยให้มีกราฟีนออกไซด์เข้มข้น 0.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

#### 3.5.2 เงื่อนไขที่ทำการศึกษา

ในการเตรียมฟิล์มนั้น เงื่อนไขต่าง ๆ ได้แก่ อัตราไหล (flow rate) ระยะระหว่างปลายเข็ม และฐานรองรับ ขนาดของปลายเข็ม ความต่างศักย์ ลักษณะรูปร่างฐานรองรับ ขนาดรัศมีหัวโลหะ ได้ ทำการทดลองปรับเปลี่ยนเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดตามลักษณะของกรวย Taylor ซึ่งถูกควบคุมค่า ตามตารางที่ 3.1 เงื่อนไขอื่น ๆ ที่ทำการศึกษาเป็นหลักในงานนี้คือ เงื่อนไขของเวลาและเงื่อนไขของ อุณหภูมิ ซึ่งมีการทดลองดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขที่ทำการศึกษา

เงื่อนไข	ค่าที่ใช้
อัตราไหล	2 มิลลิตรต่อชั่วโมง
ระยะระหว่างปลายเข็มและฐานรองรับ	4 เซนติเมตร
ขนาดของปลายเข็ม	0.3 มิลลิเมตร
ความต่างศักย์	6.8 กิโลโวลต์
ลักษณะรูปร่างฐานรองรับ	วงกลม
ขนาดรัศมีหัวโลหะ	4 เซนติเมตร
ความเข้มข้น	0.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
ชนิดของแอลกอฮอล์	บิวทิลคาร์บิทอลผสมเอทานอล 1:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านวัสดุ

#### 3.6.1 การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์

การตรวจสอบด้วยการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์นั้นทำการตรวจสอบด้วยเครื่องรุ่น Bruker AXS, D8 Discover โขว์ในรูปแบบที่ 3.26 ซึ่งมีแหล่งกำเนิดเป็น  $\text{Cu K}\alpha$  มีความยาวคลื่นที่ 1.5418 อังสตรอม การตรวจสอบนี้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับ มุมในการเลี้ยวเบนซึ่งให้ข้อมูลเชิงโครงสร้างของฟิล์มเช่น ระยะระหว่างชั้นของฟิล์ม ค่าประมาณจำนวนชั้น โครงสร้าง เป็นต้น

#### 3.6.2 รามานสเปกโตรสโคปี

การตรวจสอบการกระเจิงแบบรามานนั้นใช้เครื่อง รามานสเปกโตรสโคปี รุ่น Thermo Scientific DXR SmartRaman ที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ซึ่งให้ข้อมูลการสั่นเชิงรามานของฟิล์ม ทำให้สามารถตีความด้านโครงสร้าง ความไม่สมบูรณ์ (defect) ค่าประมาณจำนวนชั้น และคุณภาพของฟิล์มได้

#### 3.6.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น JEOL JSM-7001F ซึ่งให้ข้อมูลลักษณะภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์ม



รูปที่ 3.26 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ รุ่น Bruker AXS, D8 Discover

#### 3.6.4 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยระบบยูวี-วิสลิเบิลสเปกโทรสโกปี

ระบบยูวี-วิสลิเบิลสเปกโทรสโกปีรุ่น T92+ PG instrument ในช่วงความยาวคลื่น 900 ถึง 350 นาโนเมตร ซึ่งช่วยให้ข้อมูลเกี่ยวกับการดูดกลืนและทะลุผ่านของสาร และสามารถใช้คำนวณช่องว่างพลังงานเชิงแสงได้ (Optical bandgap)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.5 เทคนิคฟลูอริเออร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป

ฟลูอริเออร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปรุ่น perkinelmer uatr two ทำงานในโหมด ATR ซึ่งจะให้ข้อมูลหมู่ฟังก์ชันของฟิล์ม

### 3.6.6 สเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์

เทคนิคสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ ทำการวัดด้วยเครื่องรุ่น Kratos AXIS Ultra DLD ซึ่งจะให้ข้อมูลธาตุและลักษณะสารประกอบที่เกิดขึ้น

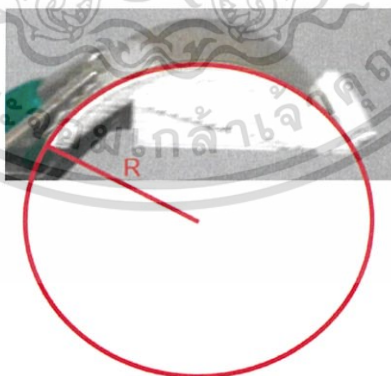
## 3.7 การตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านอุปกรณ์วัดความชื้น

### 3.7.1 ความไวในการตอบสนอง

ความไวในการตอบสนองจะทำการตรวจสอบโดยใช้สารละลายอิมิตัวมาตรฐานซึ่งจะมีความชื้นคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่ง (วัดที่ 25 °C) ได้แก่ LiCl, CH<sub>3</sub>COOH, MgCl, Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, NaCl, KCl และ KNO<sub>3</sub> โดยจะทำการแช่อุปกรณ์เหนือสารละลายอิมิตัว และทำการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ด้วยเครื่อง LCR meter BK 889B ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตเป็นเวลาชดละ 15 นาที จากนั้นทำการเปลี่ยนชดไปเรื่อย ๆ จนครบทุกชด แล้วนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นและค่าความต้านทานเชิงซ้อน

### 3.7.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดกลืนและคาย

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดและคายนั้นมึผลต่อความสามารถของอุปกรณ์ โดยจะทำการวัดตั้งแผนภาพในรูปที่ 3.11 คือทำการวัดที่ความชื้นต่ำ (11%RH) ๆ เป็นเวลา 500 วินาที แล้วจึงสลับไปวัดที่ความชื้นสูง (93%RH) เป็นเวลา 500 วินาที และทำการเปลี่ยนกลับไปกลับมา เพื่อดูเวลาช่วงที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความไวในการตอบสนอง



รูปที่ 3.27 การโค้งงอของอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นเป็นรัศมี R

### 3.7.3 ฮิสเตอร์ซิส

ฮิสเตอร์ซิส จะเป็นการตรวจประสิทธิภาพความแม่นยำในการวัดว่ามีการเปลี่ยนแปลงมากน้อยเพียงใด โดยจะทำการวัดคล้ายความไวในการตอบสนอง แต่ทำการวัดต่อเนื่องเรียงจากความชื้นต่ำไปยังความชื้นสูง และเรียงกลับจากความชื้นสูงมายังความชื้นต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.4 การตอบสนองเชิงความถี่

การตอบสนองเชิงความถี่จะเป็นการวัดคล้ายกับการวัดความไวในการตอบสนอง แต่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ใช้ในการวัดแทน โดยเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 20 เฮิรต์ถึง 2 เมกะเฮิรต์ ซึ่งจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองการตอบสนองต่ออุปกรณ์ความถี่

### 3.7.5 เสถียรภาพ

เสถียรภาพจะเป็นการวัดความไวในการตอบสนองซ้ำ ๆ ทุกสามวัน เป็นเวลา 15 วัน เพื่อทดสอบการใช้งานระยะยาวของอุปกรณ์

### 3.7.6 การทดสอบความโค้งงอ

การทดสอบว่าอุปกรณ์มีความยืดหยุ่นและสามารถโค้งงอได้ ทดสอบโดยการวางอุปกรณ์ให้โค้งงอไปตามตัวรองรับโค้งงอที่มีรัศมีของวงกลมดังรูปที่ 3.27 โดยมีรัศมีเป็น 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ หลังจากนั้น นำอุปกรณ์ที่ผ่านการโค้งงอจำนวน 1 ครั้ง ทำการทดสอบการตอบสนองที่ความถี่สัมพันธ์ 11% และ 93% เพื่อเปรียบเทียบผลของอุปกรณ์ก่อนการโค้งงอและหลังการโค้งงอ



รูปที่ 3.28 ระบบโค้งงออุปกรณ์ต่อเนื่อง ณ ช่วงเวลาที่ (ก) อุปกรณ์คืนตัว และ (ข) อุปกรณ์โค้งงอ

### 3.7.7 การทดสอบความทนทานต่อการโค้งงอ

อุปกรณ์สามารถตรวจสอบจำนวนครั้งในการโค้งงอได้โดยใช้การเขียนโปรแกรมสั่งให้ทำการเลื่อน step motor เข้าออกต่อเนื่องให้อุปกรณ์มีรัศมีความโค้ง 20 มิลลิเมตร ในตอนเริ่มต้น อุปกรณ์จะอยู่ในตำแหน่งดังรูปที่ 3.28ก หลังจากเลื่อนเข้าไปอุปกรณ์จะอยู่ตำแหน่งรูปที่ 3.28ข ซึ่งอุปกรณ์เกิดการโค้งงอ โดยจะมีการโค้งงอและคืนตัวกันต่อเนื่อง 2000 รอบ แล้วทำการตรวจสอบค่าการตอบสนองของอุปกรณ์

## 3.8 การตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านอุปกรณ์สองสถานะ

### 3.8.1 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์

คุณสมบัติสำหรับวัดการใช้งานอุปกรณ์สองสถานะนั้นถูกวัดจากเครื่องรุ่น Keithley 2410-C ซึ่งจะทำให้การจ่ายความต่างศักย์และวัดกระแสไฟฟ้าที่ออกมา เพื่อให้ข้อมูลลักษณะของโครงสร้างเชิงอุปกรณ์ไฟฟ้าของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8.2 ค่าการอ่านซ้ำ

เป็นการวัดเพื่อตรวจสอบการใช้งานในระยะยาวและความเสถียรภาพของอุปกรณ์ โดยจะทำการจ่ายด้วยศักย์ไฟฟ้าคงที่เป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง



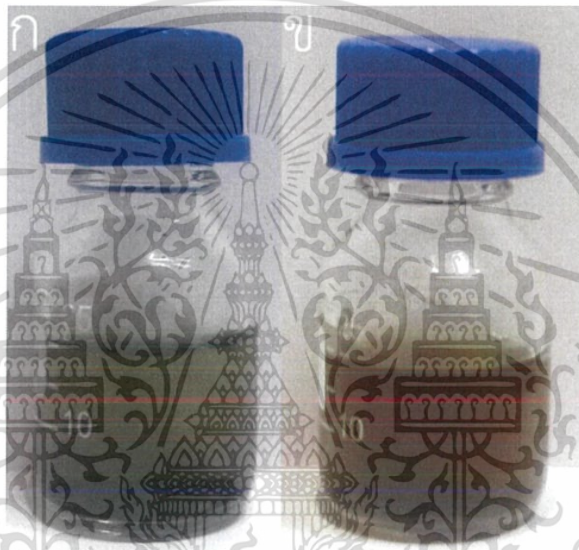
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

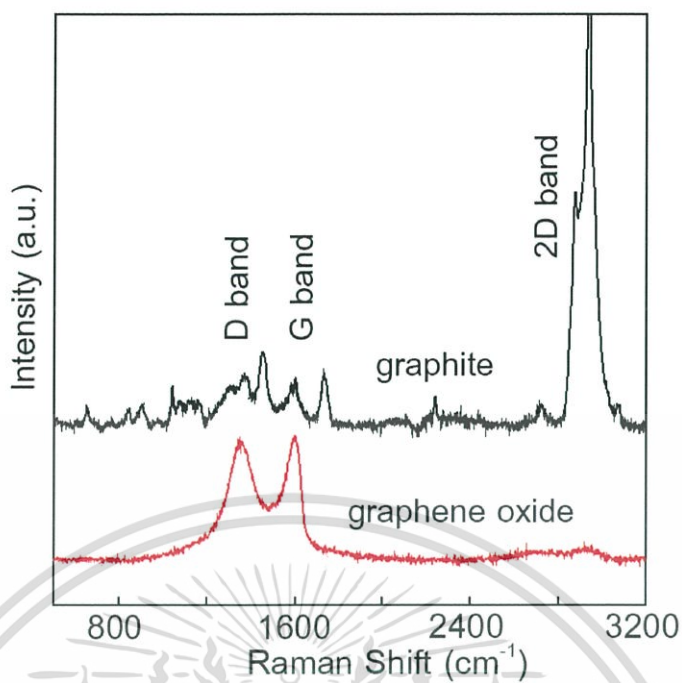
#### 4.1 การตรวจสอบผงกราฟีนออกไซด์

แกรไฟต์ออกไซด์ได้ทำการสังเคราะห์ดังแสดงรูปที่ 4.1ก นำไปทำการแพร่กระจายในน้ำให้แตกตัวเป็น กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่าสีที่เห็นได้ชัดมีลักษณะเป็นสีเหลืองสว่างซึ่งเป็นลักษณะของออกไซด์ดังรูปที่ 4.1ข แสดงถึงความเป็น กราฟีนออกไซด์ [65] เพื่อทำการยืนยันจึงหยดเคลือบบนกระจกเพื่อนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี เพื่อยืนยันว่า สารที่ได้เป็นสารกราฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.1 (ก) แกรไฟต์ออกไซด์ และ (ข) กราฟีนออกไซด์

รูปที่ 4.2 แสดงกราฟที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี ลักษณะกราฟของผงแกรไฟต์จะมียอดกราฟช่วงแถบ G และแถบ D ไม่ได้แยกกันเป็นยอดชัดเจน แต่กราฟแถบยอด 2D มีความเข้มสูงมาก ซึ่งลักษณะความเข้มที่สูงของยอด 2D และมีความกว้างของยอดนี้มากเป็นสิ่งที่ยืนยันถึงการมีจำนวนชั้นที่ทับซ้อนกันจำนวนมากของแผ่นแกรไฟต์ซึ่งตรงกับงานวิจัยอื่น [66] อย่างไรก็ตามในกราฟของกราฟีนออกไซด์ ยอดกราฟ 2D มีความเข้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นถึงการซ้อนทับที่เปลี่ยนไปเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันของกราฟีนออกไซด์ซึ่งไม่เป็นระเบียบเท่ากับยอดกราฟ 2D ของแกรไฟต์ เป็นข้อบ่งชี้ถึงความเป็นกราฟีนออกไซด์ นอกจากนี้กราฟกราฟีนออกไซด์พบยอดกราฟ D และ G ที่เห็นได้ชัดและแยกกันชัดเจน ซึ่งเกิดจากลักษณะความบกพร่องในแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่ไปจับกับหมู่ฟังก์ชัน จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ยืนยันได้ว่า สารแกรไฟต์ได้เปลี่ยนเป็นกราฟีนออกไซด์ตามที่คาดไว้แล้ว



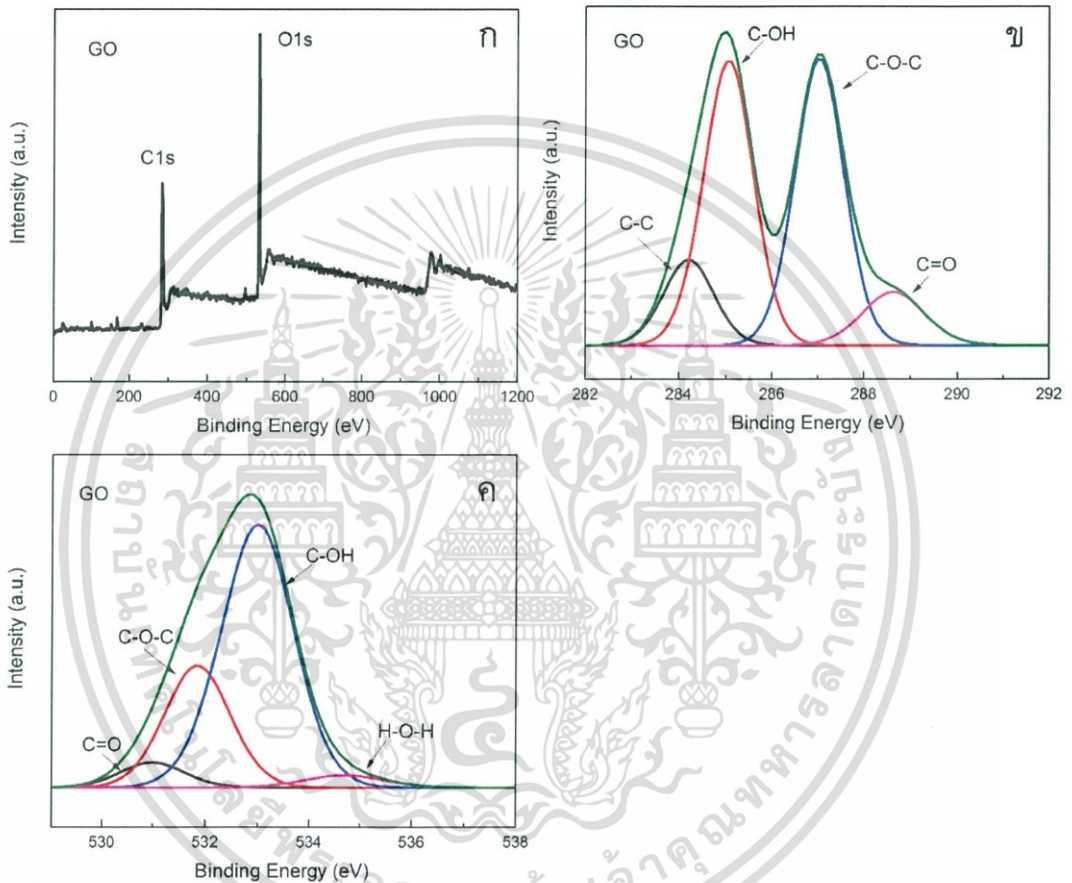
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบระหว่างแกรไฟต์และกราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิครามาน

นอกจากนี้ได้ทำการตรวจวัดด้วยเทคนิค XPS เพื่อตรวจสอบข้อมูลเพิ่มเติมของสารกราฟีนออกไซด์ที่ได้ รูปที่ 4.3ก เป็นกราฟ survey แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่พบในสารกราฟีนออกไซด์ที่ได้ พบว่ามี องค์ประกอบของ C 1s และ O 1s เป็นหลัก ซึ่งมาจากโครงสร้างของส่วนที่เป็นกราฟีนออกไซด์และหมู่ฟังก์ชัน ไม่พบองค์ประกอบของธาตุ N, S, และ Mn ทำให้ยืนยันได้ว่าไม่มีการเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีธาตุ N และ S เป็นองค์ประกอบ และไม่มีสารประกอบของโลหะ Mn ตกค้างจากการสังเคราะห์

ข้อมูลของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่เกิดกับกราฟีนออกไซด์สามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟ C 1s ในรูปที่ 4.3ข ซึ่งทำการแยกกราฟเป็นส่วนประกอบย่อย ๆ (deconvolution) ได้เป็น กราฟย่อย ดังนี้ ตำแหน่งพลังงานพันธะ (binding energy) 284.2 eV, 285 eV, 287 eV และ 288.6 eV คือ พันธะ C-C หรือ  $sp^3$  ในแผ่นกราฟีนออกไซด์, C-OH ของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl), C-O-C ของหมู่ฟังก์ชันอีพอกไซด์ (Epoxide) และ C=O ของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (carboxyl) ตามลำดับ [67] ซึ่งสอดคล้องกับกราฟ O 1s ในรูปที่ 4.3ค ที่แสดงถึงพันธะของออกซิเจน โดยที่ตำแหน่งพลังงานพันธะเป็น 530.9 eV, 531.8 eV, 532.9 eV และ 534.6 eV คือ พันธะ C=O, C-O-C, C-OH และ H-O-H ซึ่งเป็นพันธะของน้ำ ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า กราฟีนออกไซด์ที่ได้ มีความเป็นออกไซด์สูงมาก หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและอีพอกไซด์จะเกิดบริเวณในระนาบของกราฟีน ทำให้มีข้อบกพร่องในวงแหวนกราฟีนและเกิดยอดกราฟเป็นพันธะ C-C ส่วนหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล จะเกิดบริเวณตรงขอบของกราฟีนออกไซด์ทำให้มีปริมาณความเข้มยอดกราฟต่ำกว่าหมู่ฟังก์ชันข้างต้น พันธะ H-O-H บ่งชี้ถึงน้ำที่จับตัวบนพื้นผิวกราฟีนออกไซด์บริเวณหมู่ฟังก์ชันและมีบางส่วนแทรกชั้นในระหว่างกราฟีนออกไซด์ การพบว่าน้ำจับตัวกับสารกราฟีนออกไซด์ปริมาณมากบ่งชี้ถึงการตอบสนองต่อความชื้นได้ดี

จากข้อมูลทั้งลักษณะสี การตรวจสอบด้วยเทคนิครามาน และการตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS ดังที่กล่าวไปข้างต้นสามารถยืนยันถึงสารที่ได้จากการสังเคราะห์เป็นสารกราฟีนออกไซด์ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวสามารถบ่งชี้ได้ว่าสารที่ได้นั้นเป็นสารกราฟีนออกไซด์ที่มีคุณภาพสูง อย่างไรก็ตามทั้งสีและลักษณะสีอาจเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่ฟังก์ชันปริมาณมาก และไม่มีสารตกค้างอื่น ๆ จากการสังเคราะห์ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้กับวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัย Jesus Guerrero-Contreras [68] ซึ่งทำการศึกษาเปรียบเทียบระดับออกซิเดชัน ซึ่งแสดงปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS ประมาณ 80% และ 20% ซึ่งคำนวณเป็นอัตราส่วน C/O ได้เป็น 3.75 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ที่มีปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนเป็น 64.22% และ 33.04 % คิดเป็นอัตราส่วน C/O ที่ 1.94 ค่าที่ได้นี้นั้นต่ำกว่า ดีความได้ว่ากราฟีนออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มากกว่า



รูปที่ 4.3 กราฟีนออกไซด์ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS โนโหมด (ก) survey (ข) C 1s และ (ค) O 1s

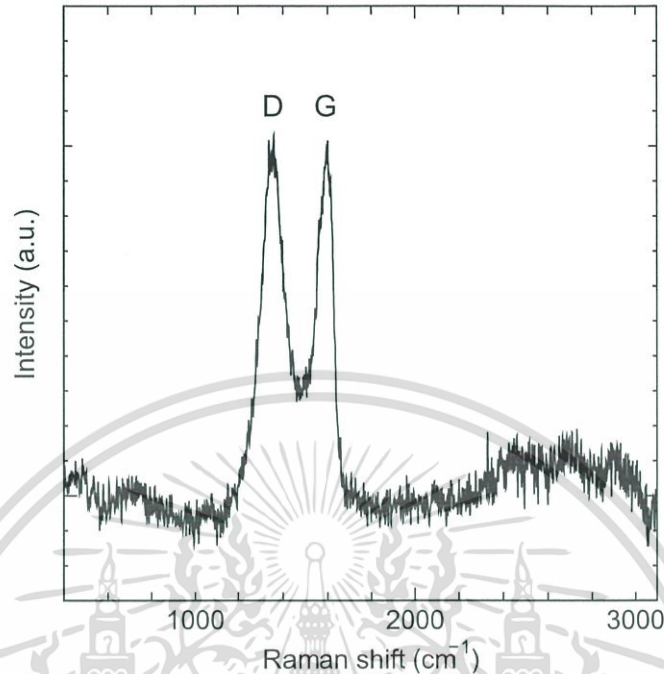
## 4.2 อุปกรณ์วัดความชื้นด้วยวิธีหยดเคลือบ

ข้อมูลผลการตรวจสอบกราฟีนออกไซด์ที่ได้ในหัวข้อที่ผ่านมา กราฟีนออกไซด์แสดงคุณสมบัติในการตอบสนองต่อความชื้นได้ดี ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์วัดความชื้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์วัดความชื้นจากกราฟีนออกไซด์

กราฟีนออกไซด์ที่นำไปผสมกับน้ำไร้ประจุและทำการหยดเคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แล้วทำการตรวจสอบด้วยเทคนิครามาน ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 ซึ่งพบยอดกราฟ D, G และ 2D เช่นเดียวกับกราฟกราฟีนออกไซด์ในหัวข้อที่ผ่านมา อัตราส่วนความเข้มของยอดกราฟ I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> ทั้งในรูปที่ 4.2 และ 4.3 มีค่าประมาณ 1 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิขณะทำการหยดเคลือบอาจไม่มีผลให้กราฟีนออกไซด์เกิดกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีดิวซ์กลายเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งตอบสนองต่อความชื้นได้น้อยลงเนื่องจากปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.4 กราฟีนออกไซด์บนฐานรองรับที่เป็นกระจกที่ตรวจสอบด้วยเทคนิครามาน [69]

การตอบสนองกับความชื้นวัดได้จากการวางอุปกรณ์ในสภาพแวดล้อมที่ความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกันแล้วทำการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนซึ่งได้ค่าตามรูปที่ 4.5 สังเกตได้ว่า ค่าความชื้นสัมพัทธ์จะแปรผกผันกับค่าความต้านทานเชิงซ้อน ในการเปรียบเทียบความสามารถของอุปกรณ์ นิยมเปรียบเทียบจากค่าการตอบสนอง (sensitivity; S) โดยค่าการตอบสนองสามารถคำนวณได้จาก

$$S = \frac{\Delta Z}{Z_0} \times 100\% \quad (4.1)$$

หรือคำนวณจาก

$$S = \frac{\Delta Z}{Z_0 \times \Delta RH} \times 100\% \quad (4.2)$$

โดยที่  $Z$  และ  $Z_0$  แทนปริมาณที่ใช้ตรวจวัด ณ ความชื้นสัมพัทธ์ที่สนใจและความชื้นสัมพัทธ์อ้างอิง ตามลำดับ  $\Delta RH$  เป็นช่วงของความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมดที่ตรวจวัด สมการทั้งสองนั้นสามารถคำนวณการตอบสนองได้เช่นเดียวกัน แต่เพื่อเปรียบเทียบกับผลในงานวิจัยอื่น จึงเลือกใช้สมการที่ (4.1) ซึ่งเป็นที่นิยมมากกว่า ในงานวิจัยนี้ใช้ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดและต่ำสุดของแต่ละเงื่อนไขที่สามารถตรวจวัดได้มาคำนวณ พบว่าการตอบสนองของอุปกรณ์ที่เงื่อนไข 1 ครั้ง 3 ครั้ง 5 ครั้ง และ 7 ครั้ง เป็น 88.8 %, 98.92%, 99.64% และ 99.71% ตามลำดับ ที่เงื่อนไข 5 ครั้ง และ 7 ครั้งให้การตอบสนองต่อความชื้นที่สูงที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เงื่อนไข 5 ครั้ง และ 7 ครั้งสามารถตอบสนองต่อความชื้นได้กว้างที่สุด ตั้งแต่ความชื้นสัมพัทธ์ 11% - 93 % ต่างจากเงื่อนไข 1

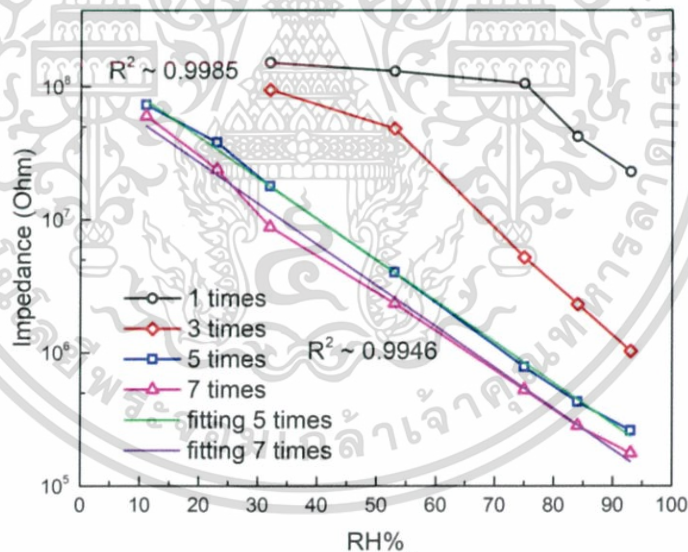
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้ง และ 3 ครั้งที่สามารถตอบสนองกับความชื้นได้ในช่วง 32%-93% ส่วนช่วงข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ 11%-23% ที่ไม่มีข้อมูลในกราฟเนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นสองเงื่อนไขนี้มีความต้านทานเชิงซ้อนสูงมากจนถึงขีดจำกัดของเครื่องมือทำให้ไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ จากนั้นเลือกเพียงเงื่อนไข 5 ครั้งในการตรวจสอบคุณสมบัติอื่น ๆ ของอุปกรณ์ เพราะเงื่อนไขที่สูงกว่า 5 ครั้งไม่ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองอย่างมีนัยยะสำคัญ ทำให้เงื่อนไข 5 ครั้งจึงเป็นเงื่อนไขที่มีค่าเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้กราฟของการตอบสนองความต้านทานเชิงซ้อนและความชื้นสัมพัทธ์ที่เงื่อนไข 5 ครั้งมีลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่สูงสังเกตได้จากค่า  $R^2$  ที่สูงกว่าทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานจริงในเชิงปฏิบัติ โดยสามารถเขียนเป็นสมการความชื้นได้เป็น :

$$\text{ความชื้นสัมพัทธ์} = 33.478 * \log(\text{ความต้านทานเชิงซ้อน}) + 274.29 \quad (4.3)$$

การศึกษาระยะเวลาในการตอบสนองและคืนตัวสามารถทำได้โดยการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนของอุปกรณ์ ณ ตำแหน่งที่มีค่าความชื้นสูงสุดและต่ำสุดซึ่งเป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ 11% และ 93% สลับกันไปเป็นวงจรแสดงได้ดังกราฟที่ 4.6 จากกราฟสามารถหาค่าระยะเวลาในการตอบสนองและค่าระยะเวลาในการคืนตัวที่ 90% ของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดได้ประมาณ 17 วินาทีและ 5 วินาที ตามลำดับ ค่าที่ได้แสดงถึงอุปกรณ์วัดความชื้นมีการตอบสนองและการคืนตัวที่รวดเร็ว นอกจากนี้การทดสอบอ่านค่าเป็นวงจรเห็นได้ว่าอุปกรณ์สามารถวัดค่าซ้ำได้ ทำให้สามารถใช้อุปกรณ์ได้หลายครั้ง



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความชื้นของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่มีจำนวนหยดแตกต่างกัน

รูปที่ 4.6 แสดงถึงกราฟฮิสเตอร์ิซิสของเงื่อนไขกราฟีนออกไซด์หยดเคลือบจำนวน 5 ครั้ง จากสมการความคลาดเคลื่อนของฮิสเตอร์ิซิสคือ

$$\gamma_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{F_{FS}} \quad (4.4)$$

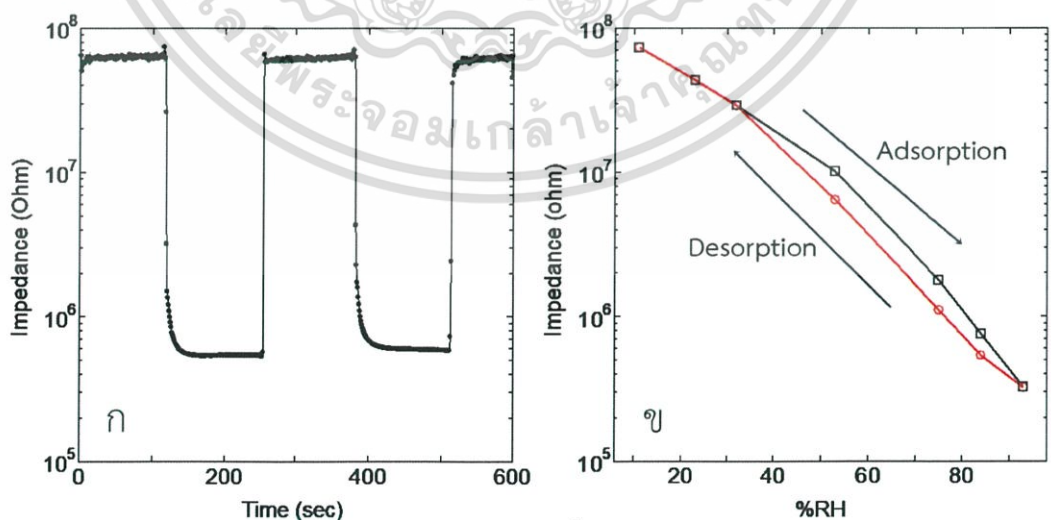
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	$\gamma_H$	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของฮิสเตอรีซิส
	$\Delta H_{max}$	คือ ค่าความแตกต่างสูงสุดของกระบวนการดูดซับ (adsorption) และกระบวนการคายตัว (desorption)
	$F_{FS}$	คือ ช่วงของค่าฮิสเตอรีซิสของอุปกรณ์ที่สามารถวัดได้

จากสมการที่ (4.4) สามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนของฮิสเตอรีซิสสูงสุดได้ ณ ตำแหน่งความชื้นสัมพัทธ์ 53% ได้ค่าเป็น  $\pm 3.64\%$

กลไกการตอบสนองของอุปกรณ์วัดความชื้นกราฟีนออกไซด์สามารถศึกษาได้จากการตรวจสอบตอบสนองเชิงความถี่ กราฟการตอบสนองเชิงความถี่ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงและค่าติดลบของส่วนจินตภาพ ซึ่งทำการศึกษาการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์วัดความชื้นการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์วัดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกันสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 4.7ก กราฟแสดงรูปทรงเป็นสองรูปแบบ ดังนั้นกลไกการตอบสนองความชื้นจะมี 2 รูปแบบแบบแรกสังเกตเห็นได้ในบริเวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่สูงมากนักและกราฟเป็นรูปครึ่งวงกลม โดยมีขนาดแตกต่างกันไปตามค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 11-53% กราฟจะมีขนาดใหญ่มากจนกระทั่งเห็นกราฟเสมือนเป็นกราฟเส้นตรง ลักษณะกราฟครึ่งวงกลมเป็นลักษณะของวงจรที่มีอุปกรณ์ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุมาต่อขนาดกันสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังเช่นรูปที่ 4.7ข ในส่วนที่เป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้นไป กราฟจะมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมและมีปลายเป็นเสมือนหางยาวเป็นเส้นตรง ซึ่งปลายหางเส้นตรงที่ลากยาวเพิ่มขึ้นมาเป็นลักษณะของอุปกรณ์ Warburg ทำให้วงจรสมมูลมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปที่ 4.7ค

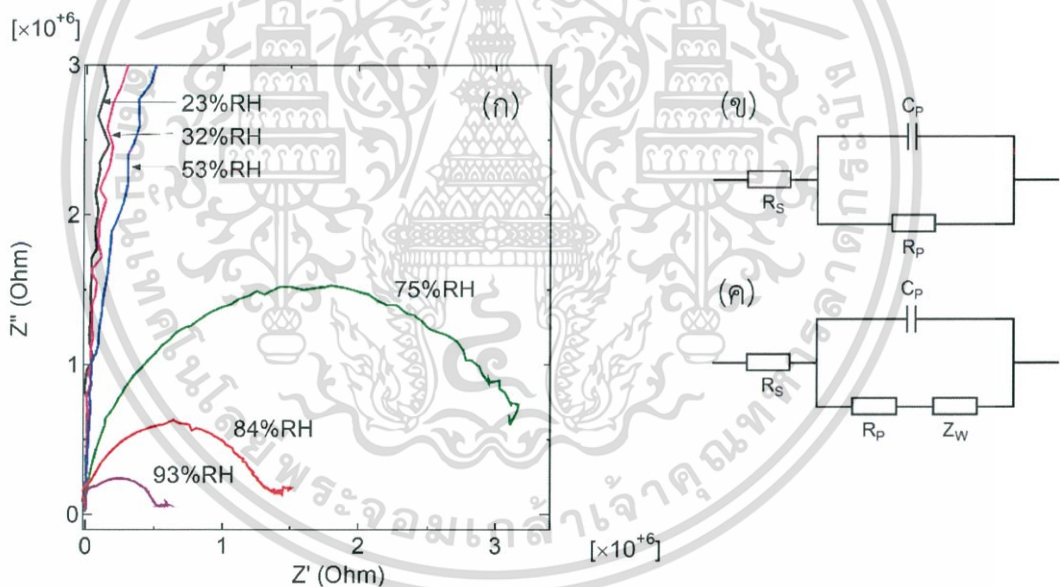
จากวงจรทั้ง 4.7ข และ 4.7ค ให้  $R_s$  แทนความต้านทานที่จุดสัมผัส (contact resistance) ของอุปกรณ์ซึ่งรวมค่าความต้านทานทุกค่าความต้านทานที่เกิดจากจุดสัมผัส เช่น รอยต่อของขั้วและฟิล์ม รอยต่อการตรวจวัด เป็นต้น  $R_p$  และ  $C_p$  แทนค่าความต้านทานและค่าการเก็บประจุของฟิล์มกราฟีนออกไซด์และ  $Z_w$  แทน ค่าความต้านทานเชิงซ้อนของ Warburg



รูปที่ 4.6 (ก) การทดสอบวงจรการตอบสนองของความชื้นในช่วง 11-93 % และ (ข) ลักษณะฮิสเตอรีซิสของเงื่อนไขหยดเคลือบด้วยกราฟีนออกไซด์ 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกของอุปกรณ์วัดความชื้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์มีค่าที่ตำแหน่งความถี่สูงใกล้เคียงกัน ซึ่งที่ค่าความถี่มีค่ามากจะทำให้วงจรในส่วนที่ขนานกันมีค่าใกล้เคียงค่าศูนย์ ทำให้ค่าที่ได้บ่งบอกถึงค่า  $R_s$  จากกราฟ 4.7ก พบว่าค่า  $R_s$  มีค่าใกล้เคียงกันมากทุกค่าความชื้นสัมพัทธ์และมีค่าน้อย ๆ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ผลของรอยต่อและจุดสัมผัสของอุปกรณ์ไม่มีผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนไปในวงจรทางไฟฟ้า เมื่อนำอุปกรณ์ที่มีค่ามากมาต่อขนานกับอุปกรณ์ที่มีค่าน้อยจะทำให้ค่าความต้านทานรวมของวงจรที่ขนานกันมีค่าเท่ากับอุปกรณ์ที่มีค่าน้อย ดังนั้นที่ตำแหน่งความถี่ที่มีค่าน้อยมาก ๆ จะทำให้ค่า  $C$  มีค่าสูงมาก และสามารถที่จะไม่สนใจค่า  $C$  ทำให้ตำแหน่งนี้คือค่า  $R_s+R_p$  โดยที่ไม่ต้องสนใจค่า  $Z_w$  เพราะเป็นลักษณะที่เป็นเส้นตรงยาวออกไปซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับผลของตัวต้านทาน โดยสรุปแล้ว ตำแหน่งที่อยู่ขวามือที่มีค่าส่วนจินตภาพใกล้เคียงค่าศูนย์จะเป็นตัวแทนค่า  $R_s+R_p$  ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่มีค่ามากขึ้นจะมีค่า  $R_s+R_p$  มีค่าน้อยลง แต่อุปกรณ์วัดความชื้นมีค่า  $R_s$  ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงมีค่า  $R_p$  ลดลงไปตามความชื้นสัมพัทธ์ที่มากขึ้น จากข้อมูลส่วนนี้สามารถตีความได้ว่า ค่าความต้านทานของอุปกรณ์มีค่าลดลงเมื่อมีน้ำมาจับตัวกับอุปกรณ์ ส่วนค่า  $C_p$  เป็นส่วนกลับของขนาดของครึ่งวงกลม จะเห็นได้ว่าวงกลมมีขนาดเล็กลงเมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงค่า  $C_p$  ที่เพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ โดยค่า  $C_p$  เป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับปริมาณประจุในฟิล์มบาง ส่วนค่า  $Z_w$  เป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดกลไกการแพร่ในอุปกรณ์วัดความชื้น



รูปที่ 4.7 (ก) การตอบสนองความถี่ของกราฟนอกไฮโดรเจนไอ 5 ครั้ง ณ ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน และวงจรสมมูลของอุปกรณ์วัดความชื้นในบริเวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ (ข) ต่ำ (ค) สูง [69]

กลไกที่ทำให้ค่า  $R_p$  และ  $C_p$  เปลี่ยนแปลงไปนั้นเกิดจากปริมาณน้ำที่มาจับตัวบนฟิล์มกราฟีนออกไซด์ โดยความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้นจะมีปริมาณน้ำในอากาศมากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำที่มาจับตัวกับฟิล์มมีมากขึ้น น้ำสามารถมาจับตัวกับกราฟีนออกไซด์ได้ในบริเวณหมู่ฟังก์ชัน เนื่องจากมีสภาพขั้วใกล้เคียงกัน โดยชั้นของน้ำที่มาจับตัวชั้นแรกจะจับตัวกันอย่างเดี่ยวเหนียวแน่นกว่าชั้นอื่น ๆ เรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemisorption) และชั้นของน้ำชั้นถัด ๆ ไปจะเกิดการจับตัวกันระหว่างโมเลกุลของน้ำ ซึ่งจะยึดกันด้วยแรงที่เบาบางกว่าชั้นแรก เรียกว่า การดูดซับทางฟิสิกส์ (physisorption) [70] โดยน้ำจะสามารถเกาะกับหมู่ที่มีขั้วสูงเช่น คาร์บอกซิลได้ดี ดังนั้นจึงมีน้ำเกาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

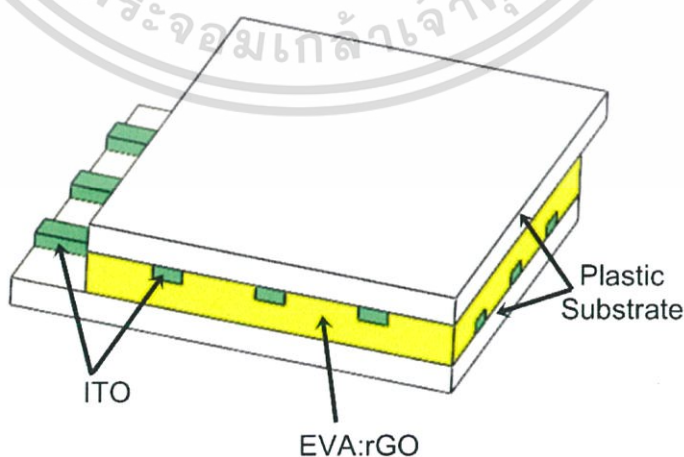
ที่บริเวณขอบได้มากกว่าบริเวณในแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลและอีพอกไซด์ การจับตัวกันของน้ำจะช่วยลดระยะการกระโดดของไอออนระหว่าง หมู่ฟังก์ชันหรือชั้นของน้ำ ทำให้มีค่าความต้านทานในวงจรสมมูล ( $R_p$ ) ลดลง เมื่อมีน้ำมาเกาะ น้ำจะเพิ่มประจุโปรตอน ( $H_3O^+$ ) ในฟิล์มกราฟีนออกไซด์ ทำให้ค่าการเก็บประจุ  $C_p$  มีค่าสูงขึ้นตามความชื้นที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่กระจายอยู่บนพื้นผิวกราฟีนอยู่ห่างกัน ทำให้โอกาสเกิดชั้นของน้ำเคลือบบนผิวนั้นเป็นไปได้ยากกว่าวัสดุออกไซด์ชนิดอื่น ๆ แต่การซ้อนทับกันของกราฟีนเป็นชั้น ๆ ทำให้เมื่อน้ำมีปริมาณมากพอจะสามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นของกราฟีนออกไซด์ได้ การแทรกเข้าไปของโมเลกุลน้ำในปริมาณที่มากพอจะเกิดเป็นชั้นของน้ำเชื่อมกันและสามารถแตกตัวเป็นไอออนแล้วเกิดกลไกการนำไฟฟ้าแบบการแพร่ ( $Z_w$ ) ที่ตำแหน่งความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลของอุปกรณ์วัดความชื้น

ปี ค.ศ.	วัสดุ	การขึ้นรูป	ลักษณะการตอบสนอง	การตอบสนอง	เวลาตอบสนอง (วินาที)	เวลาคืนตัว (วินาที)	ช่วงการตอบสนอง (%RH)	เอกสารอ้างอิง
2011	GO	จุ่มเคลือบ	ตัวเก็บประจุ	-95.6%	5	n/a	25-65	[50]
2011	GO-Si	หมุนเคลือบ	OCM	2610%	18	12	6.4-93.5	[51]
2012	rGO	อบด้วยเอทานอล	การนำไฟฟ้า	3.33%	n/a	n/a	3-30	[52]
2012	GO	ด้วยอะตอม	SAW	20%	21	16	8-18	[53]
2012	GO	หมุนเคลือบ	ความเครียด	28.02 V/%RH	19	10	10-98	[54]
2013	GO	เคลือบ/พ่นเคลือบ	ความต้านทาน	22.85%	41	10	15-95	[55]
2013	GO	พ่นเคลือบ	ตัวเก็บประจุ	3333%	0.03	0.02	30-80	[56]
2014	rGO/PDD A	จุ่มเคลือบ	ความต้านทาน	37.43%	300	147	11-97	[57]
2014	GO:PSS	การกรอง	ตัวเก็บประจุ	70%	57	21	0-80	[58]
2016	GO	หยดเคลือบ	ความต้านทานเชิงซ้อน	99.64%	17	5	11-93	This work

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการนำไฟฟ้าสามารถประยุกต์ไปอธิบายการตอบสนองในรูปที่ 4.5 ได้โดย ในช่วงแรกกราฟแต่ละเงื่อนไขมีความต้านทานสูงจากที่การนำไฟฟ้าผ่านกระบวนการกระโดดนั้นมียาระยะห่างมาก และเมื่อชั้นฟิล์มน้ำมากขึ้นทำให้ระยะการกระโดดของประจุลดลงจึงทำให้ความต้านทานลดลง เงื่อนไขจำนวนครั้งในการหยดที่แตกต่างกันจะความหนาของฟิล์มที่แตกต่างกัน Stefano Borini et al. [55] ได้ศึกษาปัจจัยความหนาของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่ความหนา 15 นาโนเมตร 25 นาโนเมตร และที่ความหนามากกว่า 1 ไมโครเมตร และตรวจสอบการตอบสนองเชิงความถี่เพื่อเปรียบเทียบผลของความหนาพบว่า ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่บางมากนั้นมีกลไกที่คล้ายกับตัวเก็บประจุที่ขนานกับตัวต้านทานและเกิดการแพร่ในฟิล์ม แต่ในเงื่อนไขที่หนามากกว่า 1 ไมโครเมตร มีกลไกคล้ายกับตัวต้านทานมากกว่าโดยที่สามารถตัดกลไกการแพร่ออกไปได้ ดังนั้นการเกิดการแพร่จะเกิดในฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่มีความหนาระดับหนึ่ง Roman Strzelczyk et al. [71] ได้ทดลองผลกระทบของความหนาของฟิล์มกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์พบว่า ความหนาไม่มีผลต่อการตอบสนองความถี่ของกราฟีนออกไซด์ ในงานวิจัยของ Ning Li et al. [72] พบว่า ความหนาของฟิล์มที่มากขึ้นทำให้แผ่นกราฟีนออกไซด์มีความต่อเนื่องกันมากขึ้นจึงช่วยให้การจับตัวของน้ำและการเคลื่อนที่ประจุเกิดได้ง่ายขึ้น ในงานวิจัยนี้ในเงื่อนไขการหยด 1 ครั้งมีความต้านทานที่สูงมาก และการตอบสนองมีค่าน้อย เนื่องจากในขั้นการก่อตัวแรกนั้นความต่อเนื่องของฟิล์มระหว่างขั้วไฟฟ้ายังมีน้อยทำให้น้ำไฟฟ้าได้ไม่ดี และตอบสนองต่อความถี่ได้ต่ำ เมื่อหยดซ้ำ 3 ครั้ง ช่วยให้ฟิล์มมีความต่อเนื่องมากขึ้น จึงนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นและจับน้ำได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานของฟิล์มยังคงสูงมากทำให้ไม่สามารถตรวจสอบการตอบสนองที่ความถี่สัมพันธ์ต่ำได้ แต่เมื่อเพิ่มเป็นเงื่อนไข 5 ครั้ง ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น การจัดเรียงตัวของฟิล์มทำได้ดีขึ้นจึงทำให้ความต้านทานต่ำลงและจับตัวกับน้ำได้ดีขึ้นความต้านทานเชิงซ้อนที่ต่ำลงมากพอที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือได้ ทำให้พบว่ามีค่าการตอบสนองที่สูงขึ้นจากเงื่อนไข 3 ครั้งอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม ที่เงื่อนไข 7 ครั้งนั้นทำให้ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นและช่วยในการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นดังนั้นค่าความต้านทานเชิงซ้อนจึงต่ำลง นอกจากนี้ยังมีผลต่อการเรียงตัวของกราฟีนที่น้อยลง ทำให้การตอบสนองของฟิล์มนั้นมีค่าเปลี่ยนไปน้อยมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าฟิล์มเงื่อนไข 7 ครั้งขึ้นไป ช่วยให้ค่าความต้านทานต่ำลงได้บางส่วนแต่แทบไม่ช่วยเพิ่มค่าการตอบสนอง



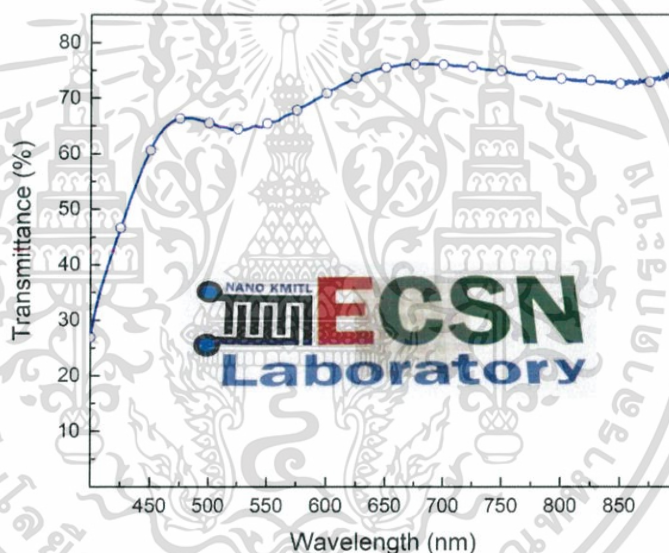
รูปที่ 4.8 แผนภาพอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/EVA:rGO/ITO [73]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของอุปกรณ์วัดความชื้นเปรียบเทียบกับงานอื่นแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 พบว่าอุปกรณ์วัดความชื้นในงานนี้ มีสมบัติของอุปกรณ์วัดความชื้นที่ดีมาก รวมถึงลักษณะโครงสร้างเป็นชนิดความต้านทานเชิงซ้อนซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีราคาถูกกว่าโครงสร้างอื่น ๆ

### 4.3 หน่วยความจำโปร่งแสงโครงสร้าง ITO/EVA:rGO/ITO

กราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจในการทำเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำเนื่องจากคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์และสมบัติการทะลุผ่านของแสง ทำให้เป็นสารที่น่าสนใจในการสร้างเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำแบบโปร่งแสงได้ โดยจะใช้โครงสร้างขั้วทั้งสองเป็นขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส ITO บนฐานรองรับพลาสติก PEN และชั้นตรงกลางเลือกเป็นสารกราฟีนออกไซด์ อย่างไรก็ตาม ในการยึดติดกันระหว่างขั้ว ITO จำเป็นต้องมีตัวกลางในการช่วยยึด จึงเลือกวัสดุโพลีเมอร์ EVA ที่เป็นส่วนประกอบที่รู้จักกันดีของแท่งปืนกาบที่ยึดจับได้ดีนำมาผสมกับกราฟีนออกไซด์ ทำให้ได้โครงสร้างเป็น ITO/EVA:rGO/ITO ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งพื้นที่หน่วยความจำต่อเซลล์มีขนาด 3x3 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 4.9 การทะลุผ่านของโครงสร้าง PEN/ITO/EVA:rGO/ITO/PEN [73]

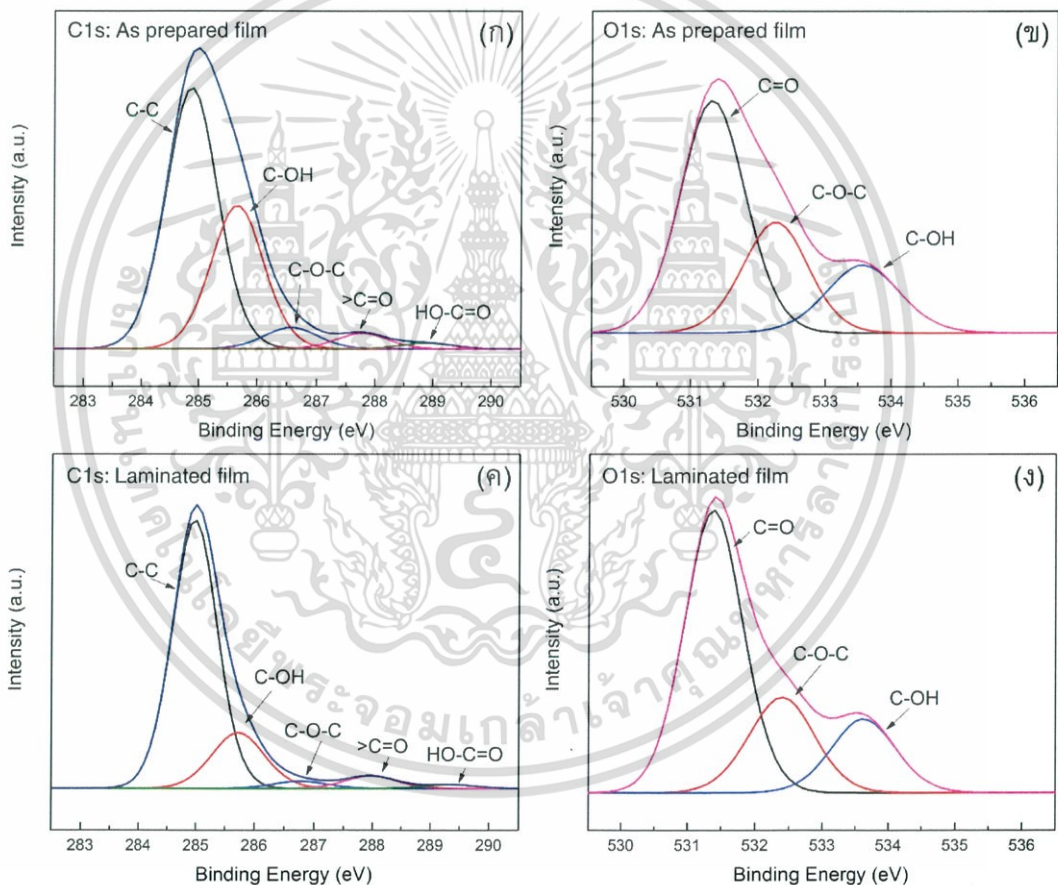
การตรวจสอบค่าการทะลุผ่านของอุปกรณ์หน่วยความจำใช้เทคนิค UV-Vis โหมดการทะลุผ่าน ได้ผลตามรูปที่ 4.9 ในย่านความยาวคลื่นที่ตามองเห็นช่วง 400-900 นาโนเมตร มีการทะลุผ่านของแสงมากกว่า 60 % ยืนยันว่าวัสดุมีคุณสมบัติความโปร่งแสง นอกจากนี้ภาพเล็ก ๆ ที่ใส่ในรูปที่ 4.9 เป็นรูปถ่ายอุปกรณ์หน่วยความจำที่วางบนโลโก้ของหน่วยวิจัยเพื่อให้เห็นความโปร่งแสงของอุปกรณ์หน่วยความจำ ซึ่งสามารถเห็นภาพโลโก้ด้านหลังได้ชัดเจน ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่า อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้างนี้มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนานำไปใช้กับอุปกรณ์โปร่งแสงได้

กระบวนการขึ้นรูปอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง PEN/ITO/EVA:rGO/ITO/PEN จำเป็นต้องมีการรีดร้อนเพื่อประกบขั้ว ITO ด้านบนให้ติดกับอุปกรณ์ ความร้อนที่ใช้มีค่าประมาณ 170 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงเพียงพอที่จะเกิดกระบวนการรีดตัวในกราฟีนออกไซด์ได้ การตรวจสอบพันธะเคมีเพื่อยืนยันโครงสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำจะใช้เทคนิค XPS ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเชิงปริมาณได้ดี การตรวจวัดกราฟีนออกไซด์ด้วย XPS จะมีองค์ประกอบธาตุหลักที่สำคัญคือ C 1s และ O 1s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

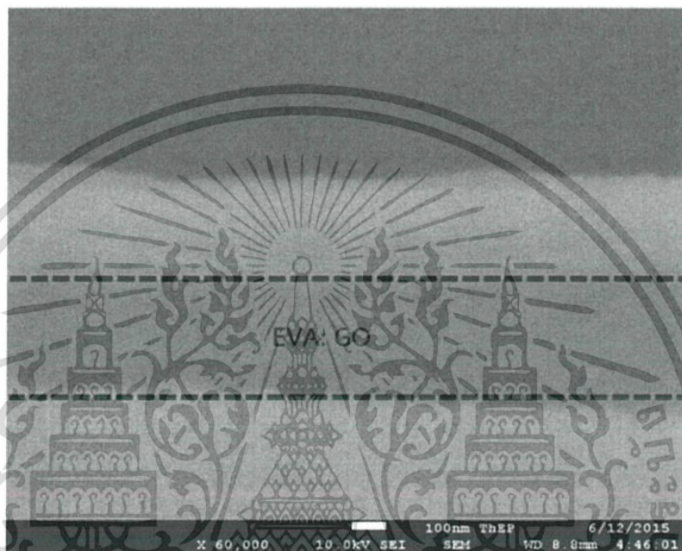
โดยที่ C 1s เป็นผลจากพันธะคาร์บอนในกราฟีนออกไซด์และคาร์บอนในสาร EVA เช่นเดียวกับ O 1s เป็นผลมาจากหมู่ฟังก์ชันในสาร EVA และกราฟีนออกไซด์ ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบ C 1s และ O 1s ในเทคนิค XPS ได้ผลลัพธ์เป็นกราฟในรูปที่ 4.10 ยอดกราฟ XPS จะทำการแยกเป็นองค์ประกอบย่อยโดยใช้แบบจำลองของ Gaussian-Lorentzian รูปที่ 4.10ก และ ค จะเป็นการแยกองค์ประกอบของ C 1s ซึ่งจะประกอบด้วยยอดกราฟที่ไม่มีออกซิเจนในวงแหวนคาร์บอน C-C ที่ตำแหน่ง 284.86 eV พันธะคาร์บอน C-OH ซึ่งเป็นองค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลพบได้ที่ตำแหน่ง 285.65 eV หมู่ฟังก์ชันอีพอกไซด์ที่มีพันธะเป็น C-O-C สังเกตได้ที่ตำแหน่ง 286.56 eV หมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล >C=O พบที่ตำแหน่ง 287.76 eV และองค์ประกอบที่มีขนาดเล็กตรงตำแหน่ง 288.89 eV เป็นหมู่คาร์บอกซิลที่มีพันธะเป็น HO-C=O หรือ -COOH ในรูปที่ 4.10ข และ 4.10ง จะเป็นกราฟ O 1s ซึ่งจะสามารถแยกเป็นองค์ประกอบของพันธะ C=O, C-O-C และ C-OH ได้ที่ตำแหน่ง 531.32, 532.25 และ 533.58 eV ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 การตรวจสอบจาก XPS ของฟิล์ม EVA:GO ก่อนกระบวนการรีดร้อนโดยมีองค์ประกอบ (ก) C 1s และ (ข) O 1s และ XPS ของฟิล์ม EVA:rGO หลังกระบวนการรีดร้อนโดยมีองค์ประกอบ (ค) C 1s และ (ง) O 1s [73]

วัสดุในรูปที่ 4.10 นั้นเป็นการทดสอบของสาร EVA:GO ซึ่งจะเป็นลักษณะการผสมกราฟีนออกไซด์ใน EVA ทำให้กราฟ XPS ที่ได้มีองค์ประกอบของสาร EVA เป็นหลัก โดยสาร EVA มีองค์ประกอบพันธะเป็น C-C, C-O-C และ C=O เป็นองค์ประกอบหลัก และองค์ประกอบของกราฟีนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ประกอบด้วยพันธะ C-C, C-OH, C-O-C, >C=O และ HO-C=O ซึ่งเป็นองค์ประกอบทั้งหมดที่พบในกราฟ XPS ดังนั้นเมื่อทำการตรวจวัด XPS องค์ประกอบของ EVA จะมีค่าสูงมาก ในส่วนของ O1s พบว่าพันธะที่เป็นส่วนหนึ่งของ EVA มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับระหว่างกระบวนการก่อนและหลังรีดร้อน อย่างไรก็ตามในองค์ประกอบ C 1s ก่อนและหลังการรีดร้อนมีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัด เพื่อทำการเปรียบเทียบที่ชัดเจนขึ้นจึงนำองค์ประกอบต่าง ๆ มาใส่ค่าเปรียบเทียบสัดส่วนโดยประมาณของกราฟ C 1s ดังตารางที่ 4.2 สังเกตได้ว่าหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจะมีสัดส่วนที่ลดลงหลังกระบวนการรีดร้อน ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันถึงการเกิดกระบวนการรีดิวซ์ของกราฟีนออกไซด์ในระหว่างกระบวนการจึงได้สารเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.11 ความหนาของฟิล์มหลังทำการรีดร้อน [73]

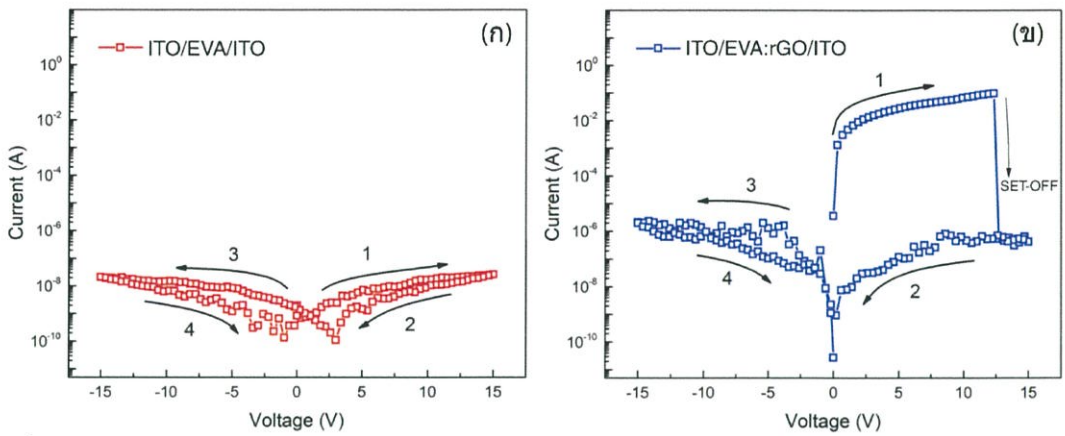
อุปกรณ์หน่วยความจำโปร่งแสงทั้งหมดสามารถเตรียมด้วยกระบวนการเดียวกัน โดยความหนาของฟิล์มจะตรวจสอบด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้านข้างของ FE-SEM การตรวจสอบความหนาเพื่อเปรียบเทียบความหนาของอุปกรณ์หน่วยความจำแต่ละเงื่อนไข ในรูปที่ 4.11 เป็นอุปกรณ์หน่วยความจำที่มีเงื่อนไขความเข้มข้น 4 % โดยน้ำหนักของกราฟีนออกไซด์ ซึ่งมีความหนาประมาณ  $325 \pm 40$  นาโนเมตรใกล้เคียงกับความหนาของอุปกรณ์หน่วยความจำที่ไม่ได้ผสม GO เนื่องจากความหนาที่ใกล้เคียงกันดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่าความหนาไม่ใช่ปัจจัยหลักในการเปรียบเทียบกลไกของอุปกรณ์หน่วยความจำ

ตารางที่ 4.2 ค่าสัดส่วนโดยประมาณขององค์ประกอบ C 1s

พันธะทางเคมี	หมู่ฟังก์ชัน	พลังงานพันธะ (eV)		สัดส่วน (%)	
		ก่อนรีดร้อน EVA:GO	หลังรีดร้อน EVA:rGO	ก่อนรีดร้อน EVA:GO	หลังรีดร้อน EVA:rGO
C-C	sp <sup>2</sup> คาร์บอน	284.86	284.99	58.40	74.40
C-OH	ไฮดรอกซิล	285.65	285.72	32.10	18.00
C-O-C	อีพอกไซด์	286.56	286.76	4.80	2.30
C=O	คาร์บอนิล	287.76	287.97	3.50	4.10
COOH	คาร์บอกซิล	288.89	289.33	1.30	1.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ภายในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



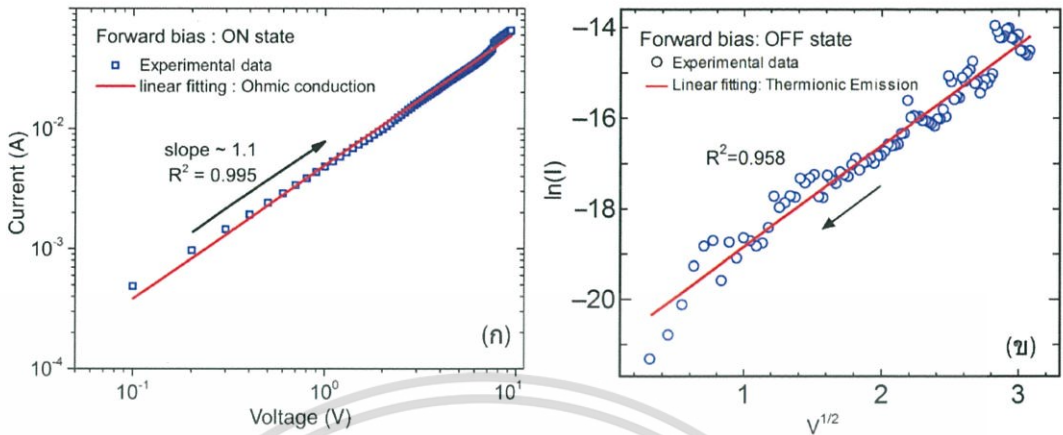
รูปที่ 4.12 ลักษณะของกราฟกระแส-แรงดันทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ (ก) ไม่มี rGO และ (ข) มี rGO ผสมในชั้น EVA [73]

สมบัติทางไฟฟ้าเป็นสมบัติที่สำคัญในการแสดงถึงความเป็นหน่วยความจำ โดยสมบัติทางไฟฟ้าสามารถหาได้จากการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า (แรงดัน) กับอุปกรณ์ แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ออกมา ในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของกราฟกระแส-แรงดันทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ โดยโครงสร้าง ITO/EVA/ITO นั้นจะได้ค่ากราฟตามรูปที่ 4.12ก ซึ่งมีค่าฮิสเตอร์ซิสที่ต่ำ ส่วนโครงสร้าง ITO/EVA:rGO/ITO ซึ่งมี rGO เป็นส่วนผสมแสดงในรูปที่ 4.12ข จากกราฟสังเกตว่าค่าฮิสเตอร์ซิสขนาดใหญ่และชัดเจนในช่วงกราฟที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นค่าบวก โดยทั่วไปกราฟของอุปกรณ์หน่วยความจำจะเริ่มต้นจากกระแสต่ำก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นกระแสสูง แต่ในกราฟนี้จะเห็นได้ว่า กราฟเริ่มต้นจากกระแสไฟฟ้าที่สูงก่อนจะเปลี่ยนไปต่ำ โดยกระแสสูงนั้นจะให้ เป็นสถานะเปิด (ON-state) หลังจากที่เริ่มจากกระแสสูง เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ ตามเส้นโค้งที่ 1 กระแสจะเพิ่มตามศักย์ไฟฟ้าเช่นกัน แต่เมื่อศักย์ไฟฟ้าถึงค่าศักย์ไฟฟ้าปิดวงจร (SET-OFF ;  $V_{OFF}$ ) ที่ประมาณ 13 โวลต์ซึ่งกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นสถานะที่มีกระแสต่ำ เรียกว่า สถานะปิด (OFF-state) หลังจากนั้นจะลดความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 15 โวลต์จนเป็น 0 โวลต์ ตามเส้นโค้งที่ 2 ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างสถานะเปิดต่อสถานะปิดจะเป็นตัวแทนในการบอกคุณภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำ โดยอัตราส่วนค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างสถานะเปิดต่อสถานะปิดมีค่าสูงสุดประมาณ  $5 \times 10^5$  ที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ เมื่อจ่าย ศักย์ไฟฟ้าด้านลบให้กับอุปกรณ์หน่วยความจำ อุปกรณ์จะค้างอยู่ในสถานะปิด โดยไม่มีการเปลี่ยนไป ยังสถานะเปิดเลย (เส้นโค้งที่ 3 และ 4) ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่า อุปกรณ์นี้เป็นอุปกรณ์หน่วยความจำประเภท เขียนครั้งเดียวแต่อ่านได้หลายครั้ง (write-once-read-many-times ; WORM)

ในการศึกษาหลักการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบ WORM ทำได้โดยการใช้ ข้อมูลกระแส-แรงดัน ในช่วงบวกทั้งสถานะเปิดและสถานะปิดมาทำการคำนวณและสร้างเส้นกราฟ ตามความสัมพันธ์ของแบบจำลองการนำไฟฟ้าแต่ละแบบ กราฟระหว่าง  $\log(I) - \log(V)$  และกราฟ ระหว่าง  $\ln(I) - V^{1/2}$  เป็นแบบจำลองที่เข้ากันได้ดีกับข้อมูลในช่วงสถานะเปิดและสถานะปิดตามลำดับ ในรูปที่ 4.13ก แสดงถึงกราฟลอการิทึมของข้อมูล กระแส - แรงดัน ของสถานะเปิด ที่มีลักษณะเป็น เส้นเชิงเส้นแบบพฤติกรรมกรนำไฟฟ้าแบบโอมซึ่งสังเกตได้จากค่าความชันของกราฟเชิงเส้นมีค่า ใกล้เคียง 1 หลังจากนั้น เมื่อจ่ายความต่างศักย์ให้อุปกรณ์หน่วยความจำจนกระทั่งถึงจุด  $V_{OFF}$

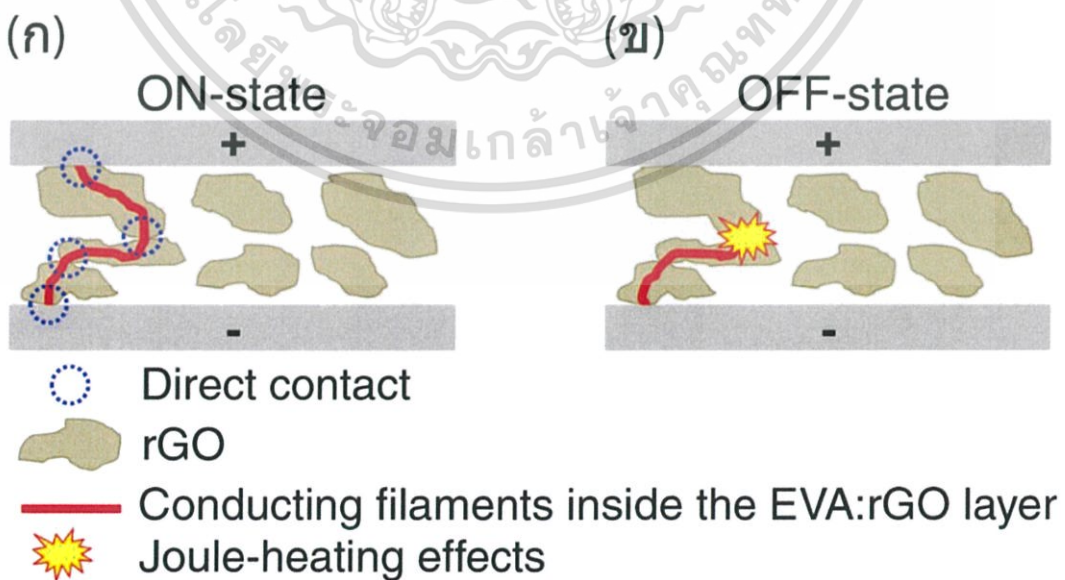
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนไป โดยกลไกในการนำไฟฟ้าหลักในช่วงสถานะปิดจะเกิดจากกลไกการปลดปล่อยแบบเทอร์มิอออนิกดังแสดงในรูปที่ 4.13ข



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองและเส้นที่ทำการเลือกให้เหมาะสมกับผลการทดลองของ (ก) กราฟ  $\log(I)$  กับ  $\log(V)$  ของสถานะเปิดช่วงบวกและ (ข) แบบจำลองกลไกการปลดปล่อยแบบเทอร์มิอออนิกของสถานะปิดช่วงบวก [73]

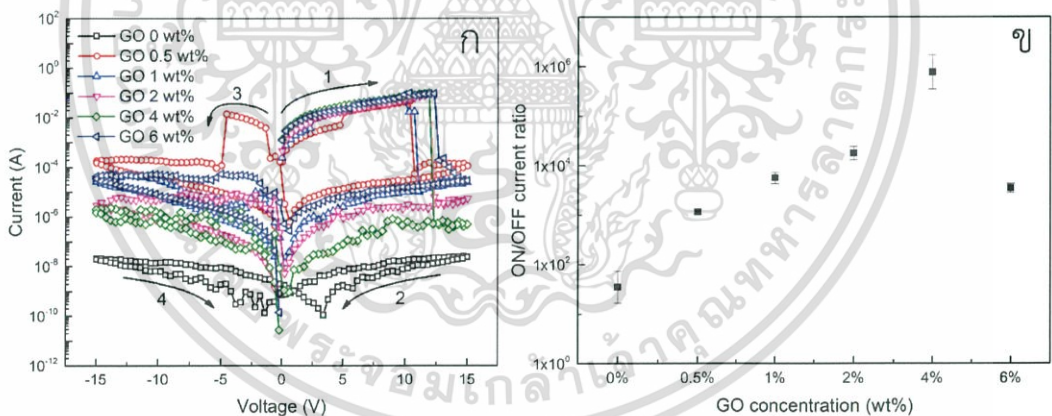
มีรายงานวิจัยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นอนุภาคนาโนที่ผสมในวัสดุโพลีเมอร์ของอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน [74]–[79] กลไกการนำไฟฟ้าในงานวิจัยเหล่านี้ประกอบด้วย การก่อตัวของเส้นใยโลหะ (metallic filaments) ซึ่งเส้นใยโลหะของอุปกรณ์หน่วยความจำที่มี GO เป็นโครงสร้างพื้นฐานจะเกิดจากกลไกการเคลื่อนที่ของไอออนออกซิเจนภายในวัสดุโพลีเมอร์ โดยเริ่มต้น อุปกรณ์จะอยู่ในสถานะปิดก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนเป็นสถานะเปิด อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์หน่วยความจำในงานวิจัยนั้นเริ่มต้นจากสถานะเปิดก่อนแล้วจึงมีการเปลี่ยนเป็นสถานะปิด ดังนั้นกลไกการนำไฟฟ้าควรมีกระบวนการที่ต่างออกไป



รูปที่ 4.14 แผนภาพของกลไกการนำไฟฟ้าด้วยกลไกเส้นใยโลหะ (ก) สถานะเริ่มต้น (ข) สถานะปิด [73]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 แสดงกลไกการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์นำไฟฟ้า WORM แบบโปร่งแสง ถึงแม้ว่ากลไกการนำไฟฟ้ายังไม่แน่นอน แต่กลไกการนำไฟฟ้าแบบเส้นใยโลหะจัดเป็นกลไกที่ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวางในการสร้างเส้นทางนำไฟฟ้าภายใต้สนามไฟฟ้า [74], [75], [79], [80] เส้นใยโลหะสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การรวมกันในพื้นที่เล็ก ๆ (local fusing) การเคลื่อนที่ของโลหะจากขั้วไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของไอออนออกซิเจน เป็นต้น สำหรับอุปกรณ์หน่วยความจำในงานวิจัยนี้ กลไกการนำไฟฟ้าในช่วงสถานะเปิดจะสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการนำไฟฟ้าแบบเส้นใยโลหะ อย่างไรก็ตาม เส้นใยโลหะของสถานะเปิดควรจะมีจุดกำเนิดที่แตกต่างไปจากตัวอย่างที่อ้างอิงในข้างต้น เส้นทางในการนำไฟฟ้าในงานนี้ควรจะเป็นการสัมผัสกันโดยตรงของ rGO หลังจากการรีดร้อน แสดงดังรูปที่ 4.41ก แผ่น rGO ในฟิล์มอาจจะเกิดการต่อกันกับแผ่น rGO ใกล้เคียงและสร้างเป็นเส้นทางนำไฟฟ้าในชั้นวัสดุ EVA:rGO ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงมีโอกาสเคลื่อนที่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองได้ง่ายขึ้นผ่านจุดที่สัมผัสกันของแผ่น rGO และการฉีดอิเล็กตรอนตามกลไกการนำไฟฟ้าแบบโอห์ม ในสถานะเริ่มต้น ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นทางนำไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นจนกระทั่งถึง  $V_{OFF}$  ที่ประมาณ 13 โวลต์ ซึ่งเป็นจุดที่เกินกำลังการกระจายความร้อนของเส้นทางนำไฟฟ้า เส้นใยโลหะจะเกิดการขาดออกจากกันทำให้กระแสไฟฟาลดลงอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นสถานะปิด ดังรูปที่ 4.14ข ซึ่งเรียกปรากฏการณ์ความร้อนที่เกิดจากความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปรากฏการณ์ความร้อนของจุด (Joule heating) หลังจากนั้น เส้นทางนำไฟฟ้าจะขาดจากกันถาวรทำให้อุปกรณ์อยู่ในสถานะปิดอย่างถาวร

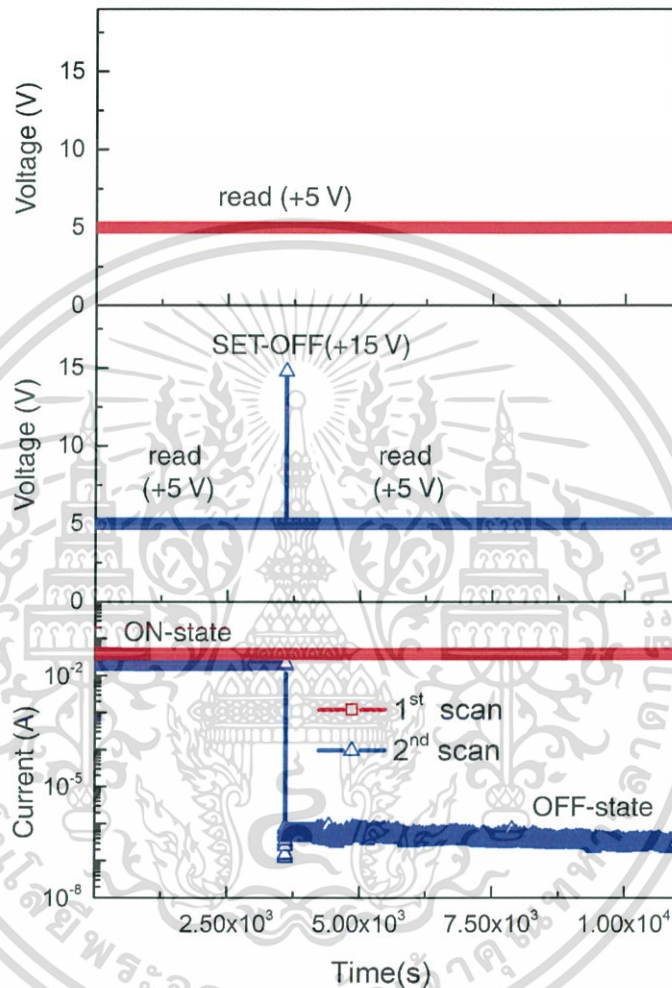


รูปที่ 4.15 (ก) ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของทุกความเข้มข้นในการเจือ GO (ข) อัตราส่วนของกระแสช่วงเปิดต่อช่วงปิดของอุปกรณ์หน่วยความจำในฝั่งความต่างศักย์เป็นค่าบวก ที่มีความเข้มข้นในการเจือ GO แตกต่างกัน [73]

เงื่อนไขความเข้มข้นของ GO ในอุปกรณ์หน่วยความจำค่าอื่น ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15ก ซึ่งใช้กระบวนการขึ้นรูปวิธีเดียวกัน สังเกตเห็นได้ชัดว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงระดับของกระแสไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกราฟีนออกไซด์ในฟิล์มดังที่ได้อธิบายกลไกการนำไฟฟ้าข้างต้นไป อุปกรณ์หน่วยความจำทุกความเข้มข้นได้แสดงให้เห็นว่า สถานะเริ่มต้นเป็นสถานะเปิดเช่นเดียวกันหมด เนื่องจากการมีอยู่ของช่องทางเส้นใยโลหะในเนื้อฟิล์ม อย่างไรก็ตาม ช่องทางการนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของจำนวนกราฟีนออกไซด์ ดังนั้นอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

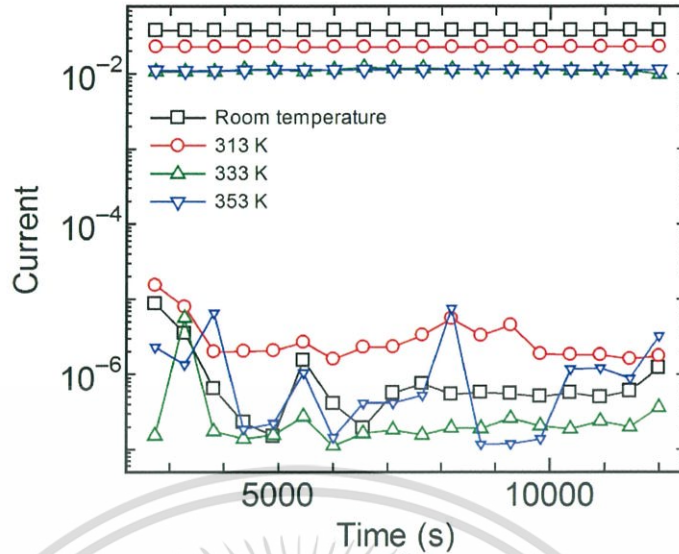
หน่วยความจำควรจะใช้พลังงานมากขึ้นในการทำลายเส้นใยโลหะ สมมติฐานดังกล่าวนี้มีข้อสนับสนุนได้จากข้อมูลของความต่างศักย์ไฟฟ้า  $V_{OFF}$  มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าในสถานะเปิดต่อสถานะปิด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ สังเกตได้ว่า ที่ความเข้มข้น 4 % โดยมวล จะให้ค่าที่สูงที่สุด ซึ่งเป็นค่าที่ได้เลือกมาอธิบายกลไกการนำไฟฟ้าง่ายๆ ทั้งหมด



รูปที่ 4.16 การทดสอบอ่านซ้ำเป็นเวลานาน (retention time) ของการเปลี่ยนสถานะครั้งหนึ่งแล้วทำการอ่านค่าต่อเนื่องของอุปกรณ์หน่วยความจำ [73]

การตรวจสอบเสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำโปร่งแสง WORM ระหว่างก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะสามารถทำได้โดยใช้วิธีอ่านซ้ำเป็นเวลานาน (retention time) ในสถานะที่มีศักย์ไฟฟ้าในการอ่านคงที่ที่ 5 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ในสถานะเริ่มต้น จะทำการอ่านค่าต่อเนื่องกันของสถานะเปิดเป็นเวลามากกว่า  $10^4$  วินาที (การสแกนครั้งแรก) หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์โดยให้ความต่างศักย์สั้น ๆ (pulse) ที่ 15 โวลต์ (การสแกนครั้งที่สอง) แล้วทำการอ่านค่าของสถานะปิดต่อเนื่องกันอีกครั้ง ลักษณะเฉพาะของการอ่านค่าซ้ำแสดงให้เห็นว่าการนำไฟฟ้าทั้งสองสถานะของอุปกรณ์นั้นสามารถรักษาระดับของแต่ละสถานะค้างไว้ได้ โดยมีการลดลงของอัตราส่วนกระแสสถานะเปิดต่อสถานะปิดเพียงเล็กน้อย

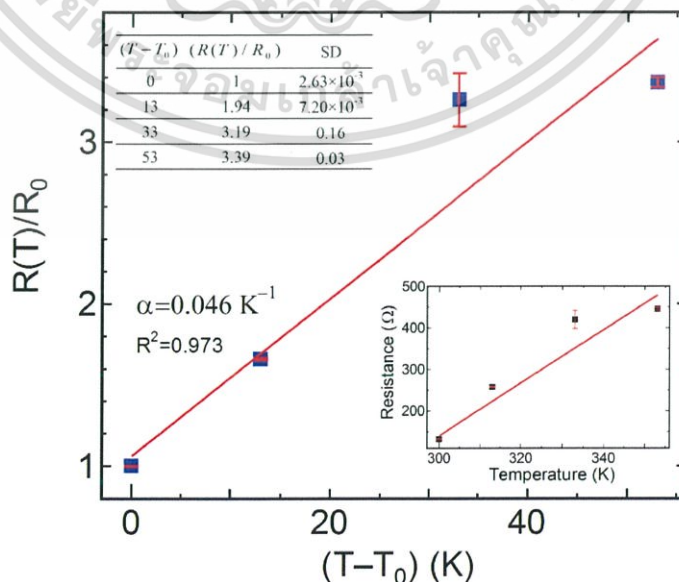
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสถานะเปิดของอุปกรณ์หน่วยความจำโปร่งแสง WORM [73]

นอกจากนี้ ยังได้ทำการยืนยันกลไกการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำโปร่งแสงดังรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นค่าการอ่านซ้ำเป็นเวลานานในสถานะที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้าในสถานะเปิดนั้นมีสมบัติการอ่านซ้ำเป็นเวลานานที่ดี อย่างไรก็ตาม กระแสไฟฟ้าในสถานะเปิดนั้นมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ดังนั้นผลการทดลองจึงช่วยสนับสนุนกลไกการนำไฟฟ้าในสถานะเปิดของอุปกรณ์หน่วยความจำโปร่งแสง WORM นั้นอยู่ในสถานะเป็นโลหะที่มีสาเหตุมาจากเส้นใยโลหะในชั้น EVA:rGO เป็นที่รู้กันดีว่าสมการในการเพิ่มขึ้นของความต้านทานในโลหะนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความต้านทานของโลหะสามารถเขียนได้เป็น

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \tag{4.5}$$



รูปที่ 4.18 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในสถานะเปิด [73]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การสรุปผลของงานวิจัยหน่วยความจำโครงสร้างโพลิเมอร์ผสม GO

ชั้น หน่วยความจำ	ชนิด	V <sub>read</sub> (V)	V <sub>ON</sub> (V)	V <sub>OFF</sub> (V)	ON/OFF ratio	ความ โปร่งใส (%)	การ อ่าน ค่าซ้ำ (s)	จำนวน ครั้งใน การสลับ ค่า (cycles)	เอกสาร อ้างอิง
P3HT:HDAGO	rewritable	1	1.5	-2.3	~10 <sup>5</sup>	n/a	>10 <sup>4</sup>	>10 <sup>6</sup>	[81]
TPAPAM:GO	rewritable	-1	-1	3.5	~10 <sup>3</sup>	n/a	>10 <sup>4</sup>	>10 <sup>8</sup>	[82]
PVDF:GO	rewritable	0.1	~2.2	-2.3	~10 <sup>4</sup>	n/a	>10 <sup>4</sup>	>150	[83]
c-PVP:rGO	WORM	1	4	-	~10 <sup>5</sup>	n/a	>10 <sup>5</sup>	-	[77]
EVA:rGO	WORM	5	-	15	~10 <sup>5</sup>	>60	-	-	this work

โดยที่ R(T) เป็นค่าความต้านทานที่วัด ณ อุณหภูมิต่าง ๆ  
 R<sub>0</sub> เป็นค่าความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง  
 T<sub>0</sub> เป็นอุณหภูมิที่ 300 เคลวิน  
 α เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ  
 สมการที่ (4.5) สามารถจัดรูปใหม่ให้อยู่รูปของสมการเส้นตรงดังนี้

$$\frac{R(T)}{R_0} = \alpha(T - T_0) + 1 \quad (4.6)$$

ดังนั้นข้อมูลกระแสไฟฟ้าในสถานะเปิดของรูปที่ 4.17 สามารถจัดเรียงใหม่ทำให้ได้กราฟที่มีค่าความคลาดเคลื่อนตามรูปที่ 4.18 โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถคำนวณได้จากข้อมูลของการอ่านซ้ำเป็นเวลานานทั้งหมดในแต่ละอุณหภูมิที่ทำการวัด ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของอุณหภูมิ (α) คำนวณค่าได้ประมาณ 0.046 K<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นลักษณะพฤติกรรมคล้ายโลหะ ข้อมูลการทดลองนี้จึงช่วยสนับสนุนว่าพฤติกรรมของอุปกรณ์หน่วยความจำโปร่งแสง WORM เกิดในสถานะความเป็นโลหะที่มีสาเหตุมาจากเส้นใยโลหะในชั้น EVA:rGO ดังนั้น อุปกรณ์หน่วยความจำโปร่งแสง WORM สามารถใช้เก็บข้อมูลถาวรได้โดยกลไกการสัมผัสและการแตกตัวของเส้นทางการนำไฟฟ้า

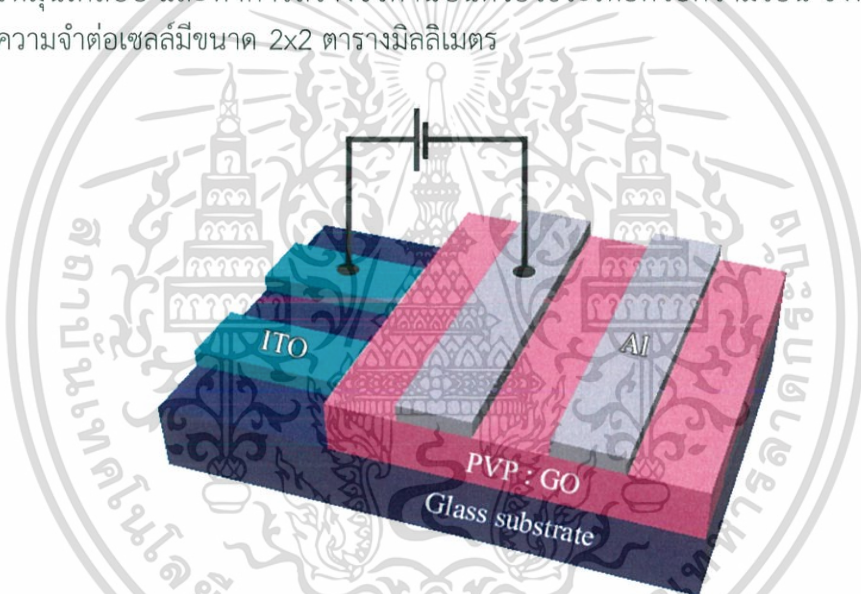
การเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ Shi et al. [80] ได้รายงานถึง อุปกรณ์หน่วยความจำโปร่งแสง WORM ที่ใช้ GO ชั้นเดียวเป็นหลัก งานวิจัยนี้แสดงถึงอุปกรณ์หน่วยความจำที่มีค่าการทะลุผ่านของแสง 70 % ในช่วงแสงที่ตามองเห็น และมีค่าอัตราส่วนกระแสสถานะเปิดต่อสถานะปิดเป็น 10<sup>4</sup> และมีระยะเวลาในการอ่านซ้ำเป็น 10<sup>4</sup> วินาที นอกจากนี้ กราฟพื้นที่ชั้นเดียวยังสามารถสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำที่เขียนซ้ำได้ซึ่งรายงานโดย Wu et al. [84] ในงานนี้แสดงค่าการทะลุผ่านของแสงถึง 80 % และมีระยะเวลาการอ่านซ้ำ 10<sup>5</sup> วินาที โดยมีค่าอัตรากระแสสถานะเปิดต่อสถานะปิดประมาณ 10 เท่า อย่างไรก็ตาม งานวิจัยหลักที่เกี่ยวกับอุปกรณ์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีเมอร์กับชั้นกราฟีนออกไซด์ได้แสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่า อุปกรณ์หน่วยความจำ WORM โครงสร้าง ITO/EVA:rGO/ITO ให้ค่าอัตราส่วนกระแสสถานะเปิดต่อสถานะปิดที่สูง และมีความโปร่งแสง

#### 4.4 หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/PVP:GO/Al

หน่วยความจำโครงสร้างในหัวข้อที่แล้วเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำที่มีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตามยังคงจะใช้ความต่างศักย์ในการเปลี่ยนสถานะที่สูง ทำให้ต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก จึงมีการพัฒนาเป็นโครงสร้างโพลีเมอร์ผสมกราฟีนออกไซด์โดยใช้กราฟีนออกไซด์ทำหน้าที่คล้ายกับดักในการกักประจุในสารโพลีเมอร์ ในงานวิจัยนี้จะออกแบบให้มีโครงสร้างเป็น ITO/PVP:GO/Al ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โพลีเมอร์ที่เลือกใช้ในโครงสร้างนี้เป็น PVP เนื่องจากเป็นโพลีเมอร์ที่เป็นสารไดอิเล็กตริก (dielectric polymer) ซึ่งมีแถบพลังงานที่กว้าง มีราคาไม่แพง และมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้กราฟีนออกไซด์ที่มีแถบพลังงานที่แคบกว่าและสามารถปรับค่าแถบพลังงานได้เป็นตัวผสมทำให้ได้ชั้นในการเป็นหน่วยความจำเป็น PVP:GO ซึ่งจะใช้การขึ้นรูปด้วยวิธีการหมุนเคลือบ และทำการสร้างขั้วด้านบนด้วยวิธีระเหยด้วยความร้อน ซึ่งพื้นที่ในการเป็นหน่วยความจำต่อเซลล์มีขนาด 2x2 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 4.19 แผนภาพโครงสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/PVP:GO/Al

การตรวจสอบวัสดุที่ใช้จะทำการศึกษาด้วยเทคนิครามาน เพื่อใช้ในการยืนยันวัสดุกราฟีนออกไซด์ รูปที่ 4.20ก แสดงกราฟรามานของกราฟีนออกไซด์ซึ่งจะสังเกตุยอดกราฟได้ทั้งหมด 3 ยอดกราฟ ได้แก่ ยอดกราฟที่ตำแหน่ง  $1350\text{ cm}^{-1}$  คือ ตำแหน่งของยอดกราฟ D ที่เกิดจากข้อบกพร่อง  $sp^3$  ยอดกราฟ G จากการสั่นของคาร์บอน  $sp^2$  ที่ตำแหน่ง  $1580\text{ cm}^{-1}$  และยอดกราฟ 2D ที่ตำแหน่ง  $2680\text{ cm}^{-1}$  และ  $2924\text{ cm}^{-1}$  ยอดกราฟ 2D มีลักษณะที่ต่ำและกว้างแสดงถึงการซ้อนทับในลักษณะหลายชั้น จากลักษณะที่มีความเข้มของเส้นกราฟต่ำมาก ทำให้มีแนวโน้มที่จะเป็นลักษณะกราฟีนออกไซด์มากกว่ารีดิวซ์กราฟีนหรือกราฟีน เนื่องจากการเกิดข้อบกพร่องในแผ่นกราฟีนออกไซด์จากหมู่ฟังก์ชัน ทำให้การสั่นของโฟนอนที่ตำแหน่งนี้มีค่าน้อยลง เมื่อวิเคราะห์อัตราส่วนค่าความเข้มของยอดกราฟ  $I_{2D}/I_G$  ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ประมาณจำนวนชั้นกราฟีน มีค่าประมาณ 0.08 เมื่อเทียบค่ากับงานวิจัยอื่น ๆ จึงสามารถทำนายได้ว่าเป็นกราฟีนออกไซด์หลายชั้น (มากกว่า 4 ชั้น) [65] นอกจากนี้ ค่าความเข้มของยอดกราฟ  $I_D/I_G$  ยังเป็นค่าที่สามารถใช้เปรียบเทียบข้อบกพร่องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และชนิดของวัสดุคาร์บอนซึ่ง จากกราฟจะได้ค่าประมาณ 0.98 ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าเป็น วัสดุกราฟีนออกไซด์ [66] J. Kim et. al. [85] ได้นำเสนองานวิจัยในการประมาณค่าแถบพลังงานของ กราฟีนออกไซด์จากอัตราส่วนความเข้มของยอดกราฟ  $I_D/I_G$  เปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ที่มีค่า  $I_D/I_G$  ประมาณ 0.98 ทำให้สามารถประมาณค่าแถบพลังงานได้โดยจะมีแถบพลังงานการนำ (conduction band) และแถบพลังงานวาเลน (valence band) เป็น 2.2 eV และ 5.4 eV ตามลำดับ

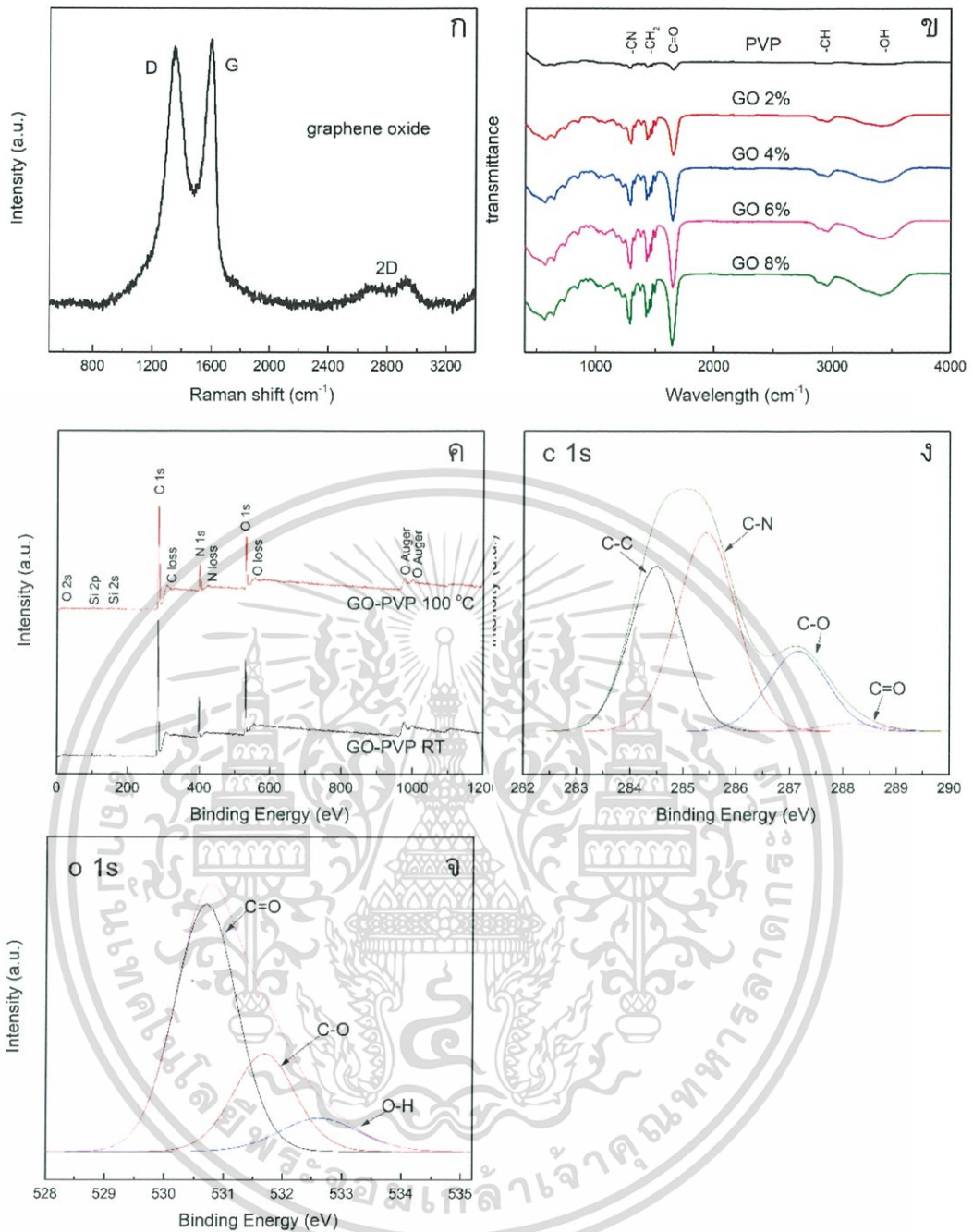
ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มผสม PVP:GO ทำได้โดยใช้เทคนิค FTIR ดังแสดงในรูปที่ 4.20ข แถบการดูดกลืนที่  $3406\text{ cm}^{-1}$  คือการสั่นของ O-H ในโหมด stretching จากน้ำที่เกาะกับ ฟิล์ม แถบการดูดกลืนที่ บริเวณ  $2940\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นจาก C-H ในโหมด stretching ของหมู่ไวนิล (vinyl group) ของสาร PVP ยอดการดูดกลืนที่  $1279\text{ cm}^{-1}$  และ  $1647\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากการสั่นของ C-N และ C=O ในโหมด stretching ของส่วนที่เป็นกลุ่มไพโรโรโดน (pyrrolidone) ใน PVP และ ยอดกราฟที่ตำแหน่ง  $1433\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากการสั่นของ  $\text{CH}_2$  ในโหมด bending จากโหมดการสั่นที่ กล่าวมาสอดคล้องกับโครงสร้างของสาร PVP ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าสารที่ใช้เป็นสาร PVP

ในเงื่อนไขที่เป็น สาร PVP:GO จะเกิดยอดกราฟใหม่ขึ้นมาที่ตำแหน่ง  $1080\text{ cm}^{-1}$  และ  $1377\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นของ C-O จากหมู่ฟังก์ชันแอลคอกซี และอีพอกซี ตามลำดับ นอกจากนี้ ยอดกราฟยังคงมีความเข้มของยอดสูงขึ้นตามปริมาณของความเข้มข้น GO ใน PVP เป็นตัวยืนยัน สาร PVP:GO ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XPS ในรูปที่ 4.20ค แสดงข้อมูลการสำรวจ องค์ประกอบธาตุของสาร PVP:GO พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุ N, C, O และ Si ธาตุ Si เป็น องค์ประกอบของกระจกที่ใช้เป็นฐานรองรับในการตรวจวัด ธาตุ C, N, O เป็นองค์ประกอบของ สาร PVP และ GO มีองค์ประกอบของธาตุ C และ O ซึ่งทับซ้อนกับสาร PVP ในกระบวนการเตรียม PVP:GO ได้มีการให้ความร้อนจึงทำการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส ของสาร PVP:GO ดังรูปที่ 4.20ค สังเกตได้ว่าอัตราส่วนของ C/O ทั้งเงื่อนไขก่อนและ หลังให้ความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงตีความได้ว่าไม่เกิดกระบวนการรีดิวซ์ระหว่างการทำ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นค่าแถบพลังงานที่คำนวณได้จากรามานจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จากการให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส ในการศึกษาเชิงลึก กราฟที่มีความละเอียดสูงได้ขยาย ข้อมูลของตำแหน่ง C 1s และ O 1s ดังรูปที่ 4.20ง-จ กราฟ C 1s ได้ทำการแยกเป็นส่วนประกอบย่อย ๆ เป็น พลังงานที่ 284.49, 285.44, 287.16 และ 288.15 eV คือ C-C, C-N, C-O และ C=O ตามลำดับ และกราฟ O 1s ได้ทำการแยกเป็นส่วนประกอบย่อย ๆ เป็น พลังงานที่ 530.70, 531.70, 532.62 eV ตีความเป็น C=O, C-O และ O-H ตามลำดับ องค์ประกอบ C-C, C-N และ C=O เป็น องค์ประกอบที่พบในสาร PVP และองค์ประกอบ C-C, C-O และ C=O พบในสารกราฟีนออกไซด์ พันธะ C-O เป็นพันธะที่พบแต่ใน GO แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของ GO ซึ่งความเข้มยอดกราฟที่สูงแสดง ถึงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่สูงและช่วยยืนยันความเป็นกราฟีนออกไซด์ที่ไม่เกิดการรีดิวซ์ จากข้อมูล โดยรวมของ XPS ทำให้มั่นใจได้ว่าชั้นผสมเป็นสาร PVP:GO ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบจาก FTIR

จากข้อมูลในรูปที่ 4.21 แสดงภาพถ่ายตัดขวางของชิ้นงานด้วยเทคนิค FE-SEM ในเงื่อนไข PVP ดังรูปที่ 4.21ก และเงื่อนไข PVP:GO ที่ความเข้มข้น 4 % โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.21ข จากภาพ ทั้งสองทำให้ประมาณค่าความหนาของชั้นฟิล์มได้เป็น 131 และ 122 นาโนเมตรตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้ นั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก ทำให้สามารถตัดผลจากความหนาออกไปได้

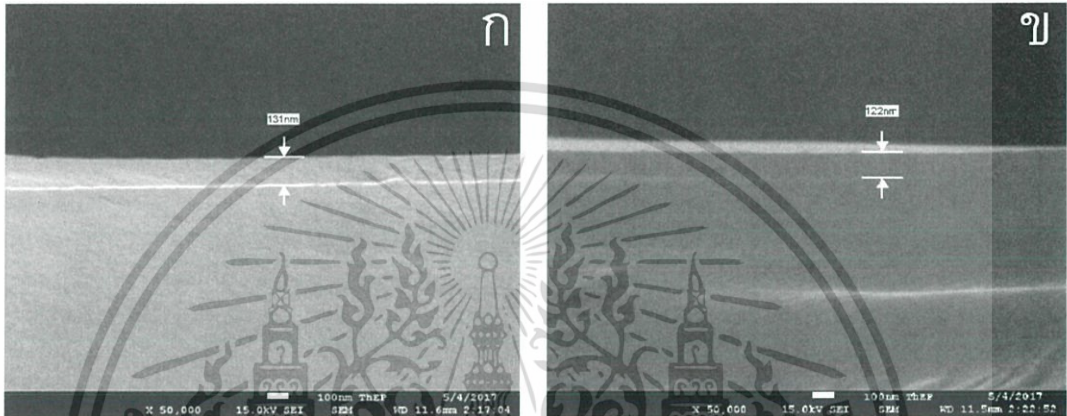
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 (ก) กราฟรามานของผงกราฟีนออกไซด์ (ข) กราฟ FTIR ของ PVP และ PVP:GO ที่เงื่อนไขความเข้มข้นแตกต่างกัน และเทคนิคการตรวจสอบ XPS ด้วย (ค) การสำรวจธาตุในสาร PVP:GO และเทคนิคความละเอียดสูงของ (ง) C1s และ (จ) O 1s

ในการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ แต่ละโครงสร้างจะทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้า 3 ชั้น ชั้นแรก เพิ่มจาก 0 โวลต์ไปยัง 5 โวลต์ ชั้นต่อมา ลดจาก 5 โวลต์ไปยัง -5 โวลต์ และสุดท้ายจะเพิ่มจาก -5 โวลต์ ไปยัง 0 โวลต์ที่จุดเริ่มต้น เพื่อศึกษาลักษณะทางไฟฟ้าของแต่ละโครงสร้าง ในโครงสร้างที่เป็นสาร PVP ได้กราฟลักษณะทางไฟฟ้าดังรูปที่ 4.22ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า กราฟมีค่าฮิสเทอรีซิสเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแถบพลังงานที่สูงของสาร PVP ทำให้ประจุไหลผ่านได้ไม่ดี ในรูปที่ 4.22ข-จ เป็นโครงสร้าง PVP:GO ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้น 2% - 8% โดยมวล ตามลำดับ ค่าฮิสเตอร์ิซิสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการผสมสาร GO เข้าไป โดยในช่วงแรก ค่าฮิสเตอร์ิซิสจะเพิ่มตามปริมาณของกราฟีนออกไซด์ที่ใส่ลงไปจนกระทั่งค่าสูงสุดที่ 4 % โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าอัตราส่วนของกระแสสถานะเปิดต่อสถานะปิดประมาณ  $10^4$  หลังจากนั้น การเพิ่มจำนวน GO ไม่ได้ช่วยปรับปรุงค่าฮิสเตอร์ิซิสให้ดีขึ้น แต่ลดลงมาเรื่อย ๆ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ค่าฮิสเตอร์ิซิสจะลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ค่าฮิสเตอร์ิซิสของเงื่อนไขที่มี GO ยังคงสูงกว่าเงื่อนไขที่ไม่เติม GO ในสถานะที่มีกระแสต่ำ ในทางกลับกัน ในสถานะที่มีกระแสสูง เมื่อมีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุปกรณ์หน่วยความจำอีกครั้ง สถานะจะค้างอยู่ที่สถานะเปิด ทำให้สามารถจำแนกประเภทของหน่วยความจำนี้เป็น หน่วยความจำแบบ WORM



รูปที่ 4.21 ภาพตัดขวางจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค FE-SEM ของ (ก) PVP บนฐานรองรับกระจก และ (ข) PVP:GO ความเข้มข้น 4 % โดยน้ำหนัก บนฐานรองรับที่เป็นกระจก

ในการวิเคราะห์กลไกของอุปกรณ์หน่วยความจำ ข้อมูลจะนำมาทดลองหากราฟที่เข้ากันได้มากที่สุดในกลุ่มแบบต่าง ๆ โดยกลไกที่ใช้ในงานวิจัยส่วนนี้จะมีทั้งหมด 4 กลไก คือ TE, SCLC, DT และ FN กลไกการนำไฟฟ้าแบบ TE สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$J = A * T^2 \exp\left(-q\left(\Phi_B - \sqrt{\frac{qV}{4\pi\epsilon_0}}\right)/kT\right) \quad (4.7)$$

โดยที่  $A^*$  เป็นค่าคงที่ของ Richardson  $T$  เป็นค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์  $q$  เป็นค่าคงที่ของประจุ  $\Phi_B$  เป็นความสูงของกำแพงศักย์ Schottky  $\epsilon_0$  เป็นค่าสภาพจำยอมในของวัสดุ และ  $k$  เป็นค่าคงที่ของ Boltzmann ในการพิจารณาความสัมพันธ์เชิงเส้นเพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์ สมการจึงจัดรูปใหม่ให้เป็น

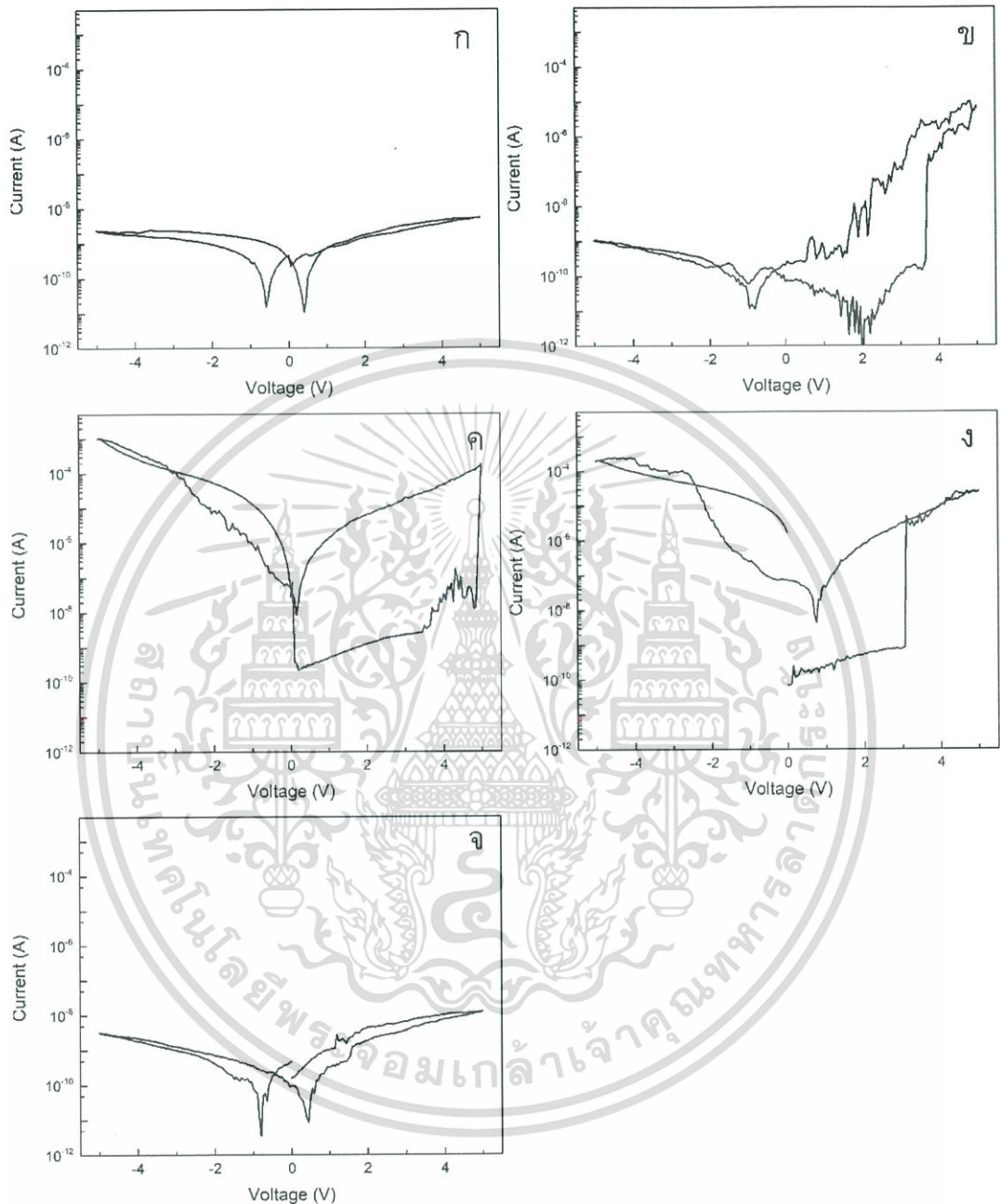
$$\ln\left(\frac{I}{T^2}\right) = \frac{q\sqrt{q/4\pi\epsilon_0}d}{kT} \sqrt{V} - \frac{q\Phi_B}{kT} \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.8) จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $\ln\left(\frac{I}{T^2}\right)$  และ  $\sqrt{V}$  โดยมีค่า

ความชันเป็น  $\frac{q\sqrt{q/4\pi\epsilon_0}d}{kT}$  และกราฟตัดแกน  $y$  ที่จุด  $-\frac{q\Phi_B}{kT}$  จากค่าทั้งความชันและค่าจุดตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกน y ทำให้สามารถหาค่าระยะทางของการกลไกการปลดปล่อยแบบเทอร์มิโอออนิกและค่า  
 กำแพงศักย์ของ Schottky ได้

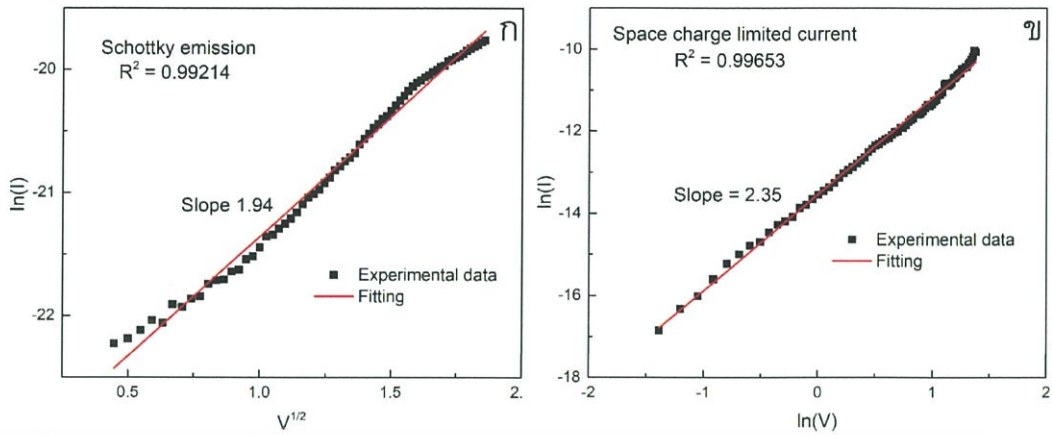


รูปที่ 4.22 ลักษณะเฉพาะของกราฟ กระแส-แรงดัน ของอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง (ก) PVP และ PVP:GO ที่เงื่อนไขความเข้มข้นแตกต่างกันที่ (ข) 2%, (ค) 4%, (ง) 6% และ (จ) 8% โดยน้ำหนัก

กลไกนำไฟฟ้าอีกกลไกหนึ่งที่มีผลในงานวิจัยนี้คือ กลไกการนำแบบ SCLC ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$I \propto V^\alpha \quad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 การเลือกกลไกของโครงสร้าง ITO/PVP:GO (4 wt%)/Al โดย (ก) เป็นกลไกการปลดปล่อยแบบเทอร์มิอออนิก (TE) ในสถานะปิด และ (ข) เป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบประจุปริภูมิจำกัดกระแส

โดยที่  $\alpha$  เป็นค่าคงที่ ในสมการที่ (4.9) นั้นจะสามารถแยกเป็นกลไกที่แตกต่างกันจากค่า  $\alpha$  ที่แตกต่างกัน เมื่อค่า  $\alpha = 1$  แสดงถึงกลไกการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นกลไกการนำไฟฟ้าของโอห์ม ถ้า  $\alpha = 2$  แสดงถึงการนำไฟฟ้าด้วยกลไก SCLC แต่หากค่า  $\alpha$  มีค่าสูงกว่า 2 มาก ๆ จะเกิดกลไกการนำแบบ SCLC ที่เป็นกับดักประจุ (Trap SCLC ; TCLC) ในส่วนของอีกสองกลไก ได้แก่ FN และ DT จะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้

$$I \propto \begin{cases} V \exp\left(-\frac{2d\sqrt{2m^*}\phi}{\hbar}\right) & (V < V_{\text{tran}}) : \text{for direct tunneling} \\ V^2 \exp\left(-\frac{4d\sqrt{2m^*}\phi^3}{3\hbar eV}\right) & (V > V_{\text{tran}}) : \text{for Fowler-Nordheim} \end{cases} \quad (4.10)$$

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลการสรุปแบบจำลองของทุกเงื่อนไขในโครงสร้าง PVP และ PVP:GO

เงื่อนไข	สถานะปิด			สถานะเปิด		
	กลไก	R <sup>2</sup>	ความชัน	กลไก	R <sup>2</sup>	ความชัน
PVP	TE	0.99507	1.599	TE	0.98380	1.682
2 wt%	TE	0.95852	9.601	DT	0.98535	5.489
				FN	0.81933	-63.044
4 wt%	TE	0.99214	1.940	SCLC	0.99653	2.350
6 wt%	TE	0.95538	1.593	SCLC	0.99586	3.789
8 wt%	TE	0.98787	2.517	SCLC	0.98344	2.555
	SCLC	0.97033	1.400			

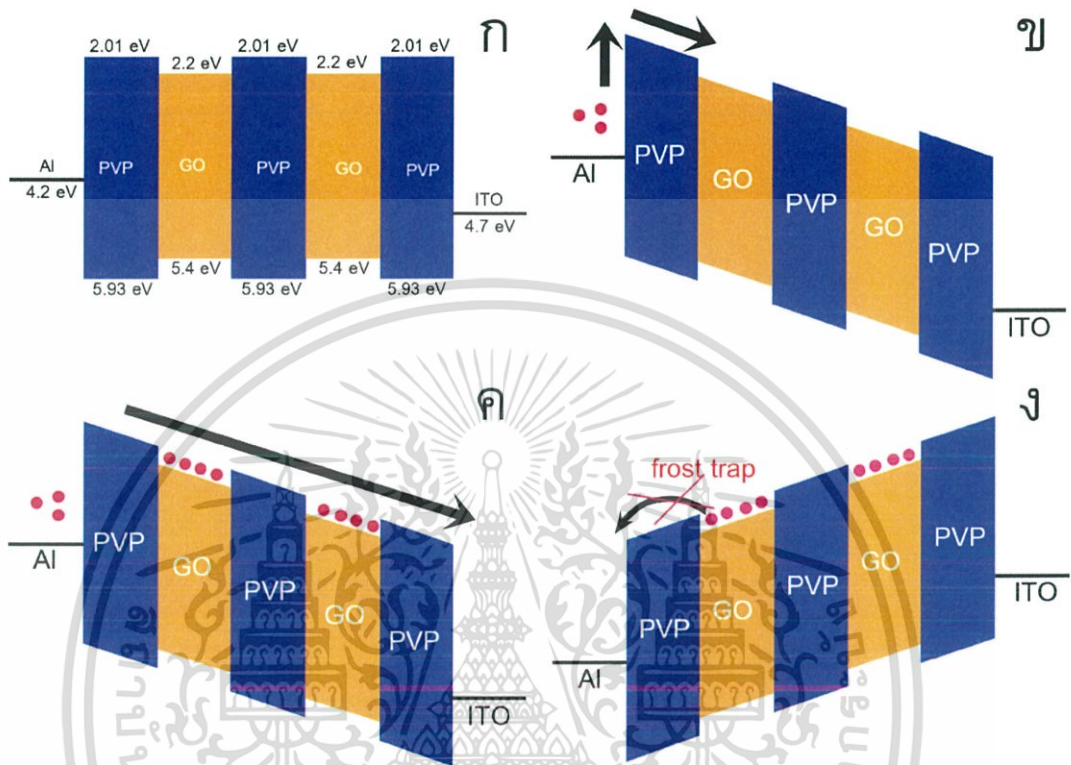
โดยที่ d แทนความหนาของชั้นที่ทะลุผ่าน  $m^*$  แทนค่ามวลประสิทธิผล (effective mass) ของอิเล็กตรอน  $\phi$  แทนค่าความสูงของกำแพงศักย์  $\hbar$  แทนค่าคงที่ของพลังค์ และ e แทนค่าประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอิเล็กตรอน ในกลไกการทะลุผ่านจะสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างกลไก DT และ FN ได้ที่ ตำแหน่งความต่างศักย์เปลี่ยนแปลง  $V_{tran}$  นิยามได้จาก

$$V_{tran} = \frac{\phi}{e} \quad (4.11)$$



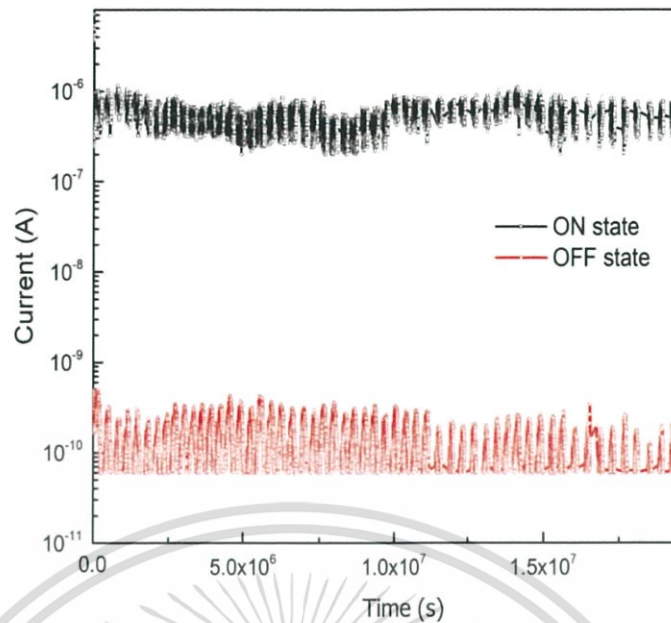
รูปที่ 4.24 แผนภาพแถบพลังงานของอุปกรณ์หน่วยความจำในขณะ (ก) ไม่มีการให้สนามไฟฟ้า (ข) สนามไฟฟ้าเป็นบวกในสถานะปิด (ค) สนามไฟฟ้าเป็นบวกในสถานะเปิด และ (ง) สนามไฟฟ้าเป็นลบ

นอกจากนี้ค่า  $V_{tran}$  ยังสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(1/V^2)$  กับ  $\ln(1/V)$  ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการจากสมการที่ (4.11) ได้เป็น

$$\ln\left(\frac{I}{V^2}\right) \propto \begin{cases} \ln\left(\frac{I}{V}\right) & (V < V_{tran}): \text{for direct tunneling} \\ -\frac{I}{V} & (V > V_{tran}): \text{for Fowler-Nordheim} \end{cases} \quad (4.12)$$

ผลลัพธ์จากการเลือกกลไกเป็นไปตามตารางที่ 4.4 ในสถานะปิด ทุกเงื่อนไขจะเริ่มต้นด้วย กลไก TE และจะเปลี่ยนเป็นสถานะเปิดด้วยกลไกที่แตกต่างกัน แต่ส่วนใหญ่จะเกิดการนำไฟฟ้าด้วย กลไก SCLC เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายกลไก จึงเลือกเงื่อนไขที่ความเข้มข้นของ GO 4% โดยน้ำหนัก มาทำการวิเคราะห์และจะขยายผลไปยังเงื่อนไขอื่น ๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ระยะเวลาการอ่านซ้ำของอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง PVP:GO ที่ความเข้มข้น 4% โดยมวล

การเลือกแบบจำลองทางไฟฟ้าให้เข้ากับข้อมูลของอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง PVP:GO 4% โดยน้ำหนักในสถานะปิดเป็นไปตามกลไกการนำไฟฟ้า TE ดังแสดงในรูปที่ 4.23ก กลไกนี้จะเป็นการใช้พลังงานความร้อนในการฉีดอิเล็กตรอนให้ข้ามผ่านกำแพงศักย์ Schottky อุดหนุนที่มากขึ้นจะช่วยให้การเพิ่มโอกาสการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ในสถานะเปิดนั้น จะสามารถอธิบายได้ด้วยกลไก SCLC ดังแสดงในรูปที่ 4.23ข สังเกตว่า ค่าความชันของกราฟนั้นมีค่าประมาณ 2.35 ซึ่งในทางทฤษฎีแล้ว กลไก SCLC แบบไม่มีกับดักจะเกิดเมื่อค่าความชันของกราฟประมาณ 2 อย่างไรก็ตาม จากค่าที่เกิน 2 มานั้นทำให้ควรจะมีกับดักประจุหลงเหลืออยู่บ้าง ทำให้กราฟนอกไซด์เป็นเหมือนตัวกับดักในโพลิเมอร์ PVP

แบบจำลองกลไกการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/PVP:GO/Al สามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพแถบพลังงานดังรูปที่ 4.24ก แถบพลังงานของสาร PVP จะมีค่าแถบพลังงานการนำที่ 2.01 eV และแถบพลังงานวาเลนซ์ที่ 5.93 eV [86] ในช่วงที่ไม่มีให้พลังงานไฟฟ้า และค่าแถบพลังงานของกราฟีนออกไซด์จะใช้ค่าประมาณที่อธิบายในเทคนิครามาน และใช้ค่าฟังก์ชันพลังงานของ Al และ ITO เป็น 4.2 eV และ 4.7 eV ตามลำดับ โดยมี ITO เป็นขั้วบวก

เมื่อทำการให้สนามไฟฟ้า แถบพลังงานทั้งหมดจะมีการเอียงไปจากผลของสนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.24ข ประจุจะถูกฉีดผ่านกำแพงศักย์ของ Schottky จากขั้ว Al เข้าไปในชั้น PVP:GO จากพลังงานความร้อนที่ได้รับ แต่โอกาสการนำไฟฟ้ายังต่ำอยู่ เนื่องจากกับดักประจุของ GO ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ไม่ดี ดังนั้นในตอนเริ่มต้น อุปกรณ์จึงอยู่ในสถานะปิด อย่างไรก็ตาม เมื่อให้สนามไฟฟ้ามากขึ้น อิเล็กตรอนจะไปเติมเต็มในกับดักประจุจนเกือบเต็มทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลไกการนำไฟฟ้าเป็น TCLC ดังรูปที่ 4.23ค ซึ่งประจุสามารถวิ่งผ่านไปตรง ๆ ได้เลย ทำให้การนำไฟฟ้าดีขึ้นจึงกลายเป็นสถานะเปิด เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าเป็นลบ แผนภาพพลังงานจะเกิดการเอียงกลับด้านดังรูปที่ 4.23ง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพลังงานความต่างของกำแพงศักย์ระหว่าง GO กับ PVP ยังคงมีค่าสูงจนอิเล็กตรอนที่ถูกกักไว้ในกับดักประจุส่วนมากไม่สามารถหลุดออกมาได้ ดังนั้นอุปกรณ์หน่วยความจำจึงยังคงค้างที่สถานะเปิดอย่างถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ผสมโพลีเมอร์ [64]

วัสดุ	ชั้นไฟฟ้า	กระบวนการ	ชนิด	จุดเปลี่ยนสถานะ (V)	อัตราส่วนสถานะเปิดต่อปิด	ระยะเวลาเสถียรในการอ่านข้อมูล (s)	กลไกไฟฟ้า
GO:PI	บน : Ag ล่าง : ITO	หมუნเคลือบ	สองชั้น	3.5	$10^5$	$10^3$	SCLC
GNFs-PVA	บน : Ag ล่าง : ITO	หมუნเคลือบ	ชั้นเดียว	1.5	$10^2$	$10^4$	SCLC
GO-BCP	บน : Al ล่าง : ITO	หมუნเคลือบ	WORM	8	$10^5$	$10^4$	SCLC, PF
GO-terracene	บน : Au ล่าง : Au	หยดเคลือบ	สองชั้น	3	$10^2$	5s	TE,PF
RGO	บน : ITO ล่าง : ITO	Sol-gel	ชั้นเดียว	3-21	$10^5$	10 years	Ohmic,TE,SE
GO-DMF	บน : Al ล่าง : ITO	หยดเคลือบ	สองชั้น	3	$10^2$	n/a	pyridinium N doped PrGODMF
GO-PVK	บน : Al ล่าง : ITO	ขึ้นรูปด้วย โพลูอิน	สองชั้น	2	$10^3$	$10^4$	HOMO,LU MO
TRAMPAM-GO	บน : Al ล่าง : ITO	หมუნเคลือบ	สองชั้น	1	$10^3$	10800	HOMO,LU MO
GO-PFZ	บน : Al ล่าง : ITO	หมუნเคลือบ	สองชั้น	1.3	$10^3$	10800	HOMO,LU MO
GO:PVP	บน : Al ล่าง : ITO	หมუნเคลือบ	WORM	5	$10^4$	$10^7$	TE,SCLC

SCLC: ประจุปริภูมิจำกัดกระแส, PF: การปล่อยแบบ Poole-Frenkel, TE: การปลดปล่อยแบบเทอร์มไอออนิก, SE: การปล่อยแบบ Schottky

ในเงื่อนไขโครงสร้าง PVP มีกลไกการนำไฟฟ้าด้วย TE เป็นหลักทั้งกรณีที่ทำให้ความต่างศักย์สแกนไป และสแกนกลับ ในกลไกนี้จะมีพลังงานความร้อนที่เกิดเป็นปัจจัยหลักในการผลักดันประจุให้ข้ามกำแพงศักย์ระหว่างชั้น ITO และชั้น PVP อย่างไรก็ตาม PVP เป็นโพลีเมอร์ที่มีกำแพงศักย์สูงมาก จึงทำให้โอกาสที่อิเล็กตรอนจะข้ามกำแพงศักย์ไปได้จึงมีน้อย ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจึงอยู่ในสถานะปิดตลอด เมื่อมีการเติม GO ลงไปในชั้น PVP วัสดุ GO จะทำหน้าที่เป็นกับดักในชั้นกำแพงศักย์ของ PVP เนื่องจากมีพลังงานต่ำกว่า ทำให้ค่ากำแพงศักย์โดยรวมของ PVP มีลักษณะที่เป็นหลุมกับดักประจุ ซึ่งจะมีความสูงเฉลี่ยของชั้นกำแพงศักย์ต่ำลง เพิ่มโอกาสให้ประจุไหลผ่านได้ดีขึ้น ดังนั้นข้อมูลที่แสดงว่า สถานะเริ่มต้นทั้งหมดเป็นสถานะปิดที่นำไฟฟ้าด้วยกลไก TE จึงสนับสนุนแนวความคิดนี้ เมื่อมีสนามไฟฟ้าสูงเพียงพอ ประจุจะไปเติมในกับดักประจุจนเต็มหรือเกือบเต็ม ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ทำให้เปลี่ยนสถานะเป็นสถานะเปิด การเพิ่มปริมาณของ GO เป็นการเพิ่มจำนวนกับดัก ทำให้ค่าเฉลี่ยของกำแพงศักย์เสมือนต่ำลง จึงทำให้นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ GO มากขึ้นอีก จำนวนกับดักประจุจะเพิ่มขึ้นมากเกินกว่าที่จะเติมกับดักทั้งหมดได้เต็ม

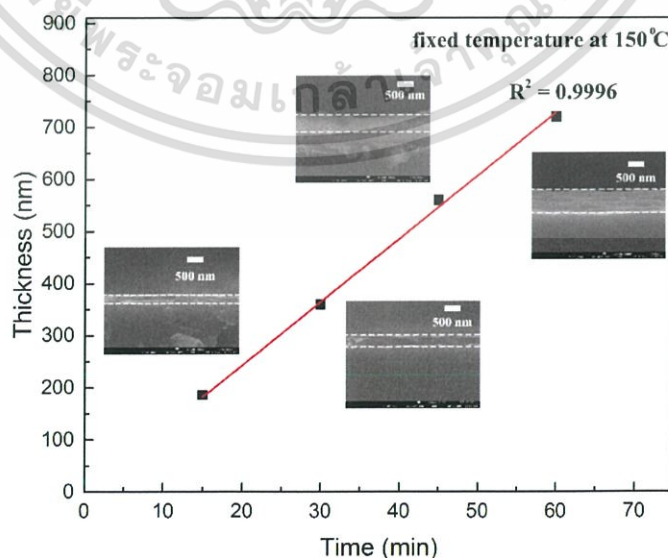
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเงื่อนไข 6 % โดยมวลนั้น ยังมีประจุเต็มในกับดักมากพอจึงสามารถเปลี่ยนเป็นสถานะเปิดได้ แต่ค่าความชันในสถานะเปิดนั้นมีค่าประมาณ 3.789 ซึ่งแสดงถึงยังคงเกิดกลไกการเติมเต็มในกับดักประจุอยู่ ซึ่งกับดักควรจะยังเหลือมากเพราะมีค่าความชันห่างค่า 2 ซึ่งเป็นจุดที่ไม่มีกับดักประจุเหลืออยู่ในเงื่อนไข 8% นั้น กับดักประจุมีจำนวนมากเกินไปจนสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ไม่เพียงพอในการช่วยเติมเต็มกับดักให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะกระแส แต่กระแสหลังจากเติมกับดักประจุยังคงสูงกว่าโครงสร้าง PVP ซึ่งเป็นการยืนยันในกลไกแบบจำลองแผนภาพแถบพลังงานที่กล่าวไปทั้งหมด

นอกจากนี้ อุปกรณ์ยังได้ทำการทดสอบการอ่านค่าอย่างต่อเนื่องที่ 1 โวลต์ ของโครงสร้าง ITO/PVP:GO (4% โดยมวล)/Al ของอุปกรณ์ทุก ๆ 300 มิลลิวินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ค่าระยะเวลาในการอ่านซ้ำทั้งสถานะเปิดและสถานะปิดมีค่ามากกว่า  $10^7$  วินาที โดยที่ค่าอัตราส่วนกระแสสถานะเปิดต่อสถานะปิดมีค่า  $10^4$  ซึ่งเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย นอกจากนี้ ยังใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการเปลี่ยนสถานะเพียง 5 โวลต์ซึ่งใช้พลังงานน้อยลงจากเงื่อนไขที่ผ่านมา อย่างไรก็ตาม ค่าสถานะเปิดนั้นมีค่าที่เปลี่ยนแปลงแกว่งไปมาจากการที่เกิดความไม่เสถียรเนื่องจากพลังงานความร้อนที่กระทำต่อประจุที่ถูกกัก แต่อย่างไรก็ตามค่าไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นจำนวนมาก ซึ่งแสดงว่าอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้างนี้สามารถใช้เก็บข้อมูลถาวรได้ การเปรียบเทียบอุปกรณ์หน่วยความจำสรุปได้ในตารางที่ 4.5 ถึงแม้ว่าการใช้วัสดุโพลีเมอร์ PVP เป็นหลักจะช่วยลดราคาของอุปกรณ์ลงเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาถูก และมีระยะเวลาเสถียรในการอ่านข้อมูลที่ยาวนานอย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ยังคงใช้แรงดันไฟฟ้าการเขียนข้อมูลที่สูงกว่า

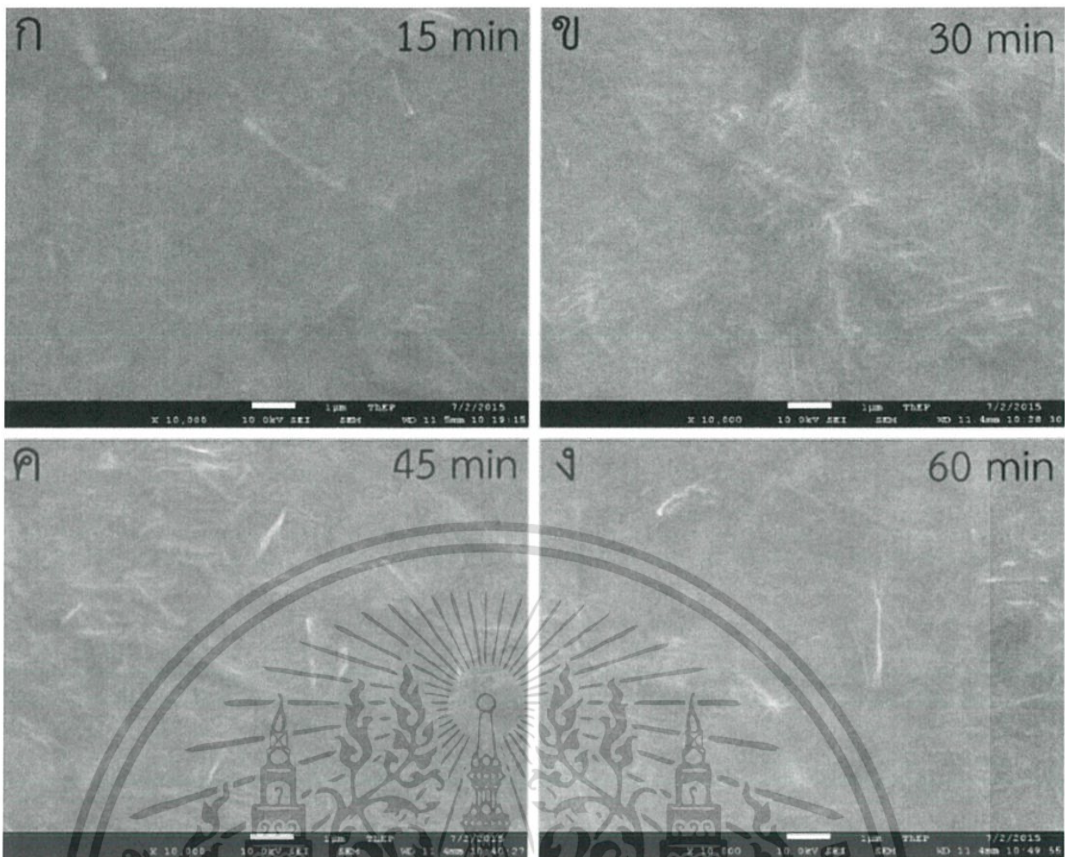
#### 4.5 การเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

ในหัวข้อที่ผ่านเป็นการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการหยดเคลือบและหมุนเคลือบ ซึ่งการหยดเคลือบนั้นจะมีข้อจำกัดในการขยายขนาดฟิล์ม ส่วนการหมุนเคลือบนั้นจะมีข้อจำกัดในการควบคุมความหนาในช่วงที่กว้างขึ้น ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะเป็นการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งสามารถปรับลักษณะฟิล์มได้ดีกว่าสองวิธีดังกล่าว



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเงื่อนไขเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ซึ่งถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า ที่เงื่อนไขระยะเวลาพ่นเคลือบ (ก) 15 นาที (ข) 30 นาที (ค) 45 นาที และ (ง) 60 นาที

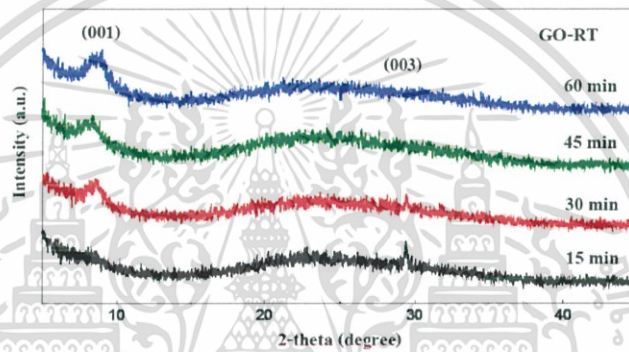
การเตรียมสารผสมกราฟีนออกไซด์เพื่อใช้ในระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตนั้นจะต้องเลือกสารที่เป็นตัวกลางในการพ่นเคลือบให้เหมาะสม ทั้งปัจจัยความชอบน้ำ (hydrophilic) จุดเดือด อัตราการระเหย และความตึงผิว นอกจากนี้ยังต้องเป็นสารที่มีการตกตะกอนของกราฟีนออกไซด์ได้ยาก ดังนั้นจึงเลือกใช้สารบิวทิลคาร์บิเลตซึ่งมีความชอบน้ำสูง สามารถคงสภาพสารผสมกราฟีนออกไซด์ได้นาน แต่เนื่องจากมีจุดเดือดอยู่ที่ 230 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นจุดที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงผสมสารเอทานอลลงไปในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ทำให้สามารถลดจุดเดือดลงได้ จึงสามารถพ่นเคลือบในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเกิดการระเหยของน้ำในตัวสารกราฟีนออกไซด์ซึ่งอยู่ประมาณ 170 องศาเซลเซียสที่เป็นจุดเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างกราฟีน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสารผสมนั้นยังมีจุดเดือดที่ยังสูง จึงมีการให้อุณหภูมิฐานรองรับเริ่มต้นที่ 150 องศาเซลเซียส ในส่วนเงื่อนไขการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น ได้เลือกใช้อัตราการไหลที่ 2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เพื่อให้ใช้เวลาในการสร้างฟิล์มไม่นานเกินไปในช่วงความหนาหลักร้อยนาโนเมตร เงื่อนไขสนามไฟฟ้านั้นเลือกจากการทดลองปรับให้เกิดโหมดพ่นรูปกรวยแล้วเลือกช่วงที่เกิดวงฟิล์มเป็นวงกลมสม่ำเสมอ และเลือกใช้ระยะระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับที่ 4 เซนติเมตร เพราะเป็นระยะที่ไม่ใกล้เกินไปจนหยดของเหลวไม่เกิดการแตกตัวจากสนามไฟฟ้า นอกจากนั้น ระยะห่างที่มากขึ้นอาจให้ขนาดฟิล์มที่ใหญ่ขึ้นแต่อาจมีข้อบกพร่องได้มากขึ้น

เงื่อนไขเวลาเป็นเงื่อนไขแรกในการทดสอบฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต ในเงื่อนไขเวลาจะใช้เวลาในการพ่นเคลือบที่แตกต่างกัน โดยให้ทุกเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีอุณหภูมิฐานรองรับ 150 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิขั้นต่ำในการระเหยสารผสม พิล์มที่ได้จะถูกถ่ายภาพตัดขวางเพื่อตรวจสอบความหนาด้วยเทคนิค FE-SEM ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความหนาได้ดังแสดงในรูปที่ 4.26 เมื่อทำการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยการภาพด้านข้างของกล้องจุลทรรศน์ส่องกราดด้วยอิเล็กตรอน แล้วทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม (แกนนอน) และความหนาในหน่วยนาโนเมตร (แกนตั้ง) พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) ของข้อมูลมีค่าประมาณ 0.9996 แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของข้อมูลกับกราฟเส้นตรงที่ใช้ประมาณค่าข้อมูล มีความสอดคล้องสูงมาก ซึ่งสมการเส้นตรงที่ได้เขียนได้เป็น

$$\text{ความหนา (นาโนเมตร)} = 12.15 \times \text{เวลา (นาที)} \quad (4.13)$$



รูปที่ 4.28 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระยะเวลาในการเคลือบต่างกัน

สมการที่ (4.13) นี้ยืนยันได้ว่าระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถควบคุมความหนาได้ด้วยเงื่อนไขของเวลาซึ่งสามารถปรับความหนาได้ในช่วงกว้าง (จากการทดลองข้อมูล 200-800 นาโนเมตร) การควบคุมความหนาของฟิล์มเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากต่อคุณสมบัติของฟิล์มที่ได้

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณค่าจากเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบ

ระยะเวลาเคลือบ (นาที)	อุณหภูมิฐานรองรับ (°C)	2-theta (องศา)	ระยะระหว่างชั้นกราฟีนออกไซด์ (Å)	FWHM (degree)	จำนวนชั้น GO จากการคำนวณ
15	150	8.66	10.202	2.048	3.78
30		8.60	10.274	1.731	4.44
45		8.32	10.619	1.989	3.73
60		8.74	10.109	2.116	3.69

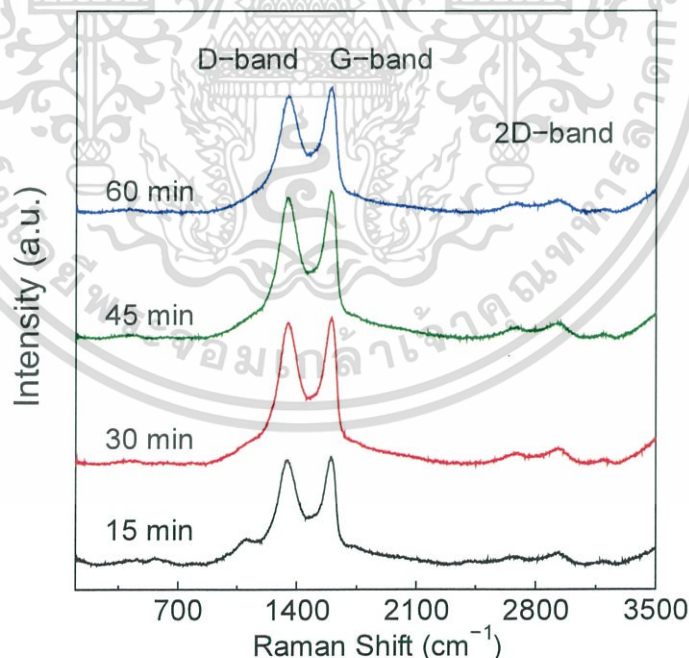
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดยังสามารถใช้ศึกษาลักษณะคุณสมบัติพื้นผิวได้ ผลการถ่ายภาพที่กล่าวขยาย 10,000 เท่าแสดงดังรูปที่ 4.27ก-ง พื้นผิวของฟิล์มทุกเงื่อนไขเวลา มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ฟิล์มมีลักษณะเป็นแผ่นที่ทับซ้อนกันอย่างหนาแน่น เมื่อเงื่อนไขเวลาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้นจำนวนแผ่นที่ทับซ้อนมีมากขึ้น แสดงถึงแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่ทับกับบนฐานรองรับที่มีปริมาณมากขึ้นตามระยะเวลาในการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลการคำนวณของกราฟรามานของเงื่อนไขระยะเวลาในการเคลือบ

ระยะเวลาเคลือบ (นาที)	อุณหภูมิของฐานรองรับ (°C)	I <sub>D</sub> /I <sub>G</sub>	I <sub>D*</sub> /I <sub>G</sub>	I <sub>2D</sub> /I <sub>G</sub>
15	150	1.518	0.291	0.170
30		1.533	0.227	0.144
45		1.526	0.138	0.161
60		1.480	0.148	0.139

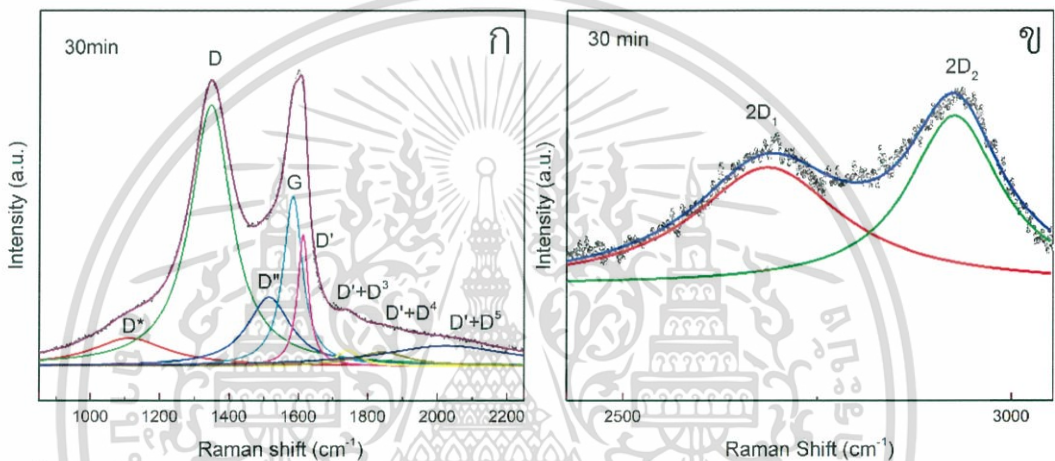
ฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาในการเลี้ยวเบนกับระยะเวลาในการเคลือบแสดงดังในรูปที่ 4.6 พบว่า ที่เงื่อนไขระยะเวลาเคลือบเกิดยอดที่ตำแหน่ง 29 องศา ซึ่งตรงกับตำแหน่งระนาบ (002) ที่เกิดจากการเลื่อนระยะระหว่างแผ่นกราฟีนออกไซด์มาชิดกันมากกว่าปกติ [87] และลดลงไปเมื่อใช้เวลาค่อยนานขึ้น เนื่องจากเกิดการคลายตัวของแรงกดบนแผ่น กราฟีนออกไซด์ นอกจากนี้ยังเกิดส่วนยอดกว้างบริเวณช่วง 20-30 องศา เป็นผลมาจากฐานรองรับที่เป็นกระจก



รูปที่ 4.29 กราฟรามานของกราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขระยะเวลาเคลือบที่ต่างกัน

ยอดที่ตำแหน่งการเลี้ยวเบนประมาณ 8 องศา สังเกตเห็นชัดเจนมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเคลือบเพิ่มมากขึ้น ยอดนี้จะตรงกับระนาบ (001) ของกราฟีน นอกจากนี้ระยะระหว่างชั้นของกราฟีนออกไซด์คำนวณได้จากกฎของแบรคตามสมการที่ (2.7) และจำนวนชั้นของกราฟีนออกไซด์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถประมาณได้จากสมการของ Sherrer ตามสมการที่ (2.12) แสดงดังตารางที่ 4.6 สังเกตว่า ระยะระหว่างชั้นกราฟีนออกไซด์ (d-space) มีค่าประมาณ 10 อังสตรอม ซึ่งสอดคล้องกับระยะห่าง กราฟีนออกไซด์ในงานวิจัยอื่น ๆ [55], [56], [87] การเลื่อนตำแหน่งของยอดแกรไฟต์ซึ่งโดยทั่วไปจะ พบที่ประมาณ 25 องศา [88] มาเป็น 8 องศาตีความได้ว่า มีหมู่ฟังก์ชันเกิดขึ้นบนแผ่นกราฟีนทำให้เกิดการผลักระหว่างแผ่นกราฟีนออกไซด์ให้ห่างออกไปหรือมีโมเลกุลของน้ำแทรกระหว่างชั้น ค่าที่แตกต่างกันนี้อาจมาจากการกระจายตัวของกราฟีนออกไซด์ที่มีชั้นแตกต่างกัน หรือปริมาณ สัดส่วนของหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกันหรือ [88] ปริมาณโมเลกุลไอน้ำที่เข้ามาแทรก นอกจากนี้ ค่าความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของยอดกราฟ (FWHM) จะให้ข้อมูลความเป็นผลึก (crystalline) ของ กราฟีนออกไซด์ ค่าที่กว้างหมายถึงมีลักษณะความเป็นผลึกน้อยกว่า ซึ่งพบว่าที่ 30 นาทีนั้นมีความ เป็นผลึกสูงสุด ความเป็นผลึกที่ต่างกันจะเหมาะกับงานที่ต่างกัน



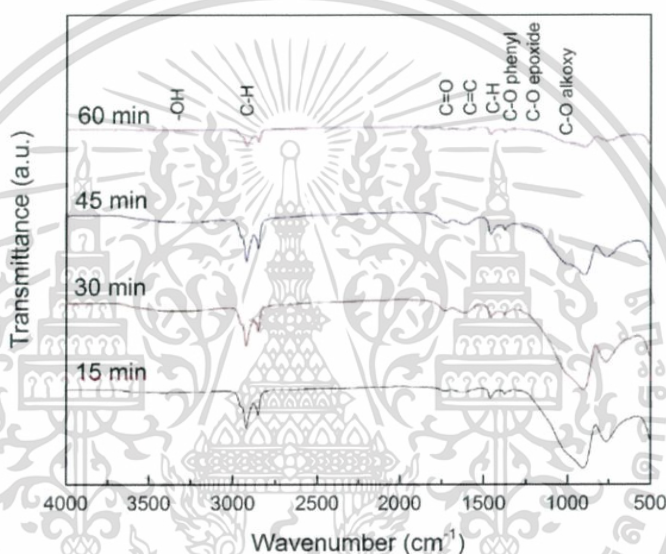
รูปที่ 4.30 การแยกเป็นองค์ประกอบย่อยของกราฟรามานที่ (ก) แถบ D และแถบ G (ข) แถบ 2D

จำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณนี้เป็นการประมาณค่าโดยมองว่าผลึก กราฟีนออกไซด์นั้นมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากจากนั้นทำการหารด้วยระยะระหว่างชั้นเพื่อ ประมาณค่าจำนวนชั้นโดยเฉลี่ย ซึ่งจำนวนชั้นนี้เป็นจำนวนชั้นของชั้นส่วนกราฟีนออกไซด์ที่ กระจายตัวในแผ่นฟิล์ม จากตารางที่ 4.1 ให้ข้อมูลจำนวนชั้นกราฟีนที่ใกล้เคียงกันประมาณ 4 ชั้น จัดเป็นกราฟีนออกไซด์แบบหลายชั้น ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ต่างออกไปจากกราฟีนออกไซด์ชั้นเดียว และกราฟีนออกไซด์สองชั้น

เทคนิครามานสเปกโตรสโคปีจัดเป็นเทคนิคที่สำคัญสำหรับสารตระกูลกราฟีนทั้งหมด เนื่องจากเป็นวิธีตรวจสอบที่ไม่ทำลายพื้นผิวของฟิล์มและยังให้ข้อมูลโครงสร้างของสารตระกูลกราฟีน รูปที่ 4.29 แสดงกราฟฟิล์มบางที่ได้เคลือบด้วยเงื่อนไขเวลาที่ต่างกัน กราฟแสดงแถบยอดกราฟ D แถบยอดกราฟ G และแถบยอดกราฟ 2D โดยยอดกราฟ D และ G มีความเข้มสูงมากเมื่อเทียบกับ ยอดกราฟ 2D ซึ่งลักษณะเหล่านี้เป็นตัวแสดงถึงลักษณะที่เป็นกราฟีนออกไซด์ หรือ รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์

ลักษณะของแถบ D และแถบ G นั้นมีลักษณะที่กว้างซึ่งเกิดจากข้อบกพร่องและความไม่เป็น ระเบียบในตัวฟิล์มซึ่งจะทำให้เกิดยอดกราฟเพิ่มเติม ดังนั้นเพื่อตีความข้อมูลเชิงลึกยิ่งขึ้น กราฟกราฟีนออกไซด์ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิครามานถูกแยกเป็นองค์ประกอบย่อย ๆ เรียกว่า กราฟรามานลำดับที่ 2 โดยทำการแยกออกเป็นทั้งหมด 8 ยอดกราฟ โดยใช้สมการของลอเรนซ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Lorentzian) ได้แก่ ยอดกราฟ  $D^*$ ,  $D$ ,  $D''$ ,  $G$ ,  $D'$ ,  $D'+D^3$ ,  $D'+D^4$  และ  $D'+D^5$  ที่ตำแหน่ง 1140, 1340, 1510, 1580, 1610, 1740, 1830 และ 2010 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.30ก ยอดกราฟ  $D^*$  กับ ยอดกราฟ  $D''$  มักพบในคาร์บอนที่มีการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ งานวิจัยบางงานเสนอว่า ยอดกราฟ  $D^*$  เกิดในเฟสคาร์บอนสัณฐานที่มีปริมาณพันธะ  $sp^3$  สูง ในขณะที่ยอดกราฟ  $D''$  เกิดจากการกระจายตัวของโฟนอนในผลึกแกรไฟต์หรือเกิดจากการสั่นของพันธะ C-H อย่างไรก็ตาม Ferrari และ Robertson [89] ได้แย้งว่าสองยอดกราฟนี้เกิดจากผลรวมและผลต่างของการย่นตัวของ C=C และ CH wagging mode ในโดมอณผลึกนาโนไมโซใน  $sp^3$  คาร์บอน ยอดกราฟ G เป็นยอดที่เกิดจากการสั่นในระนาบของวงอะโรมาติกซึ่งเกี่ยวข้องกับการสั่นของพันธะ  $sp^2$  ยอดกราฟ D มีความเกี่ยวข้องกับโครงสร้างที่บกพร่องและพันธะ  $sp^3$  ยอดอื่น ๆ นั้นสามารถเจอได้ทั่วไปในสารตระกูลคาร์บอนที่มีความบกพร่องสูง



รูปที่ 4.31 กราฟฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของฟิล์มที่เคลือบด้วยเรซินไขเวลาที่แตกต่างกัน

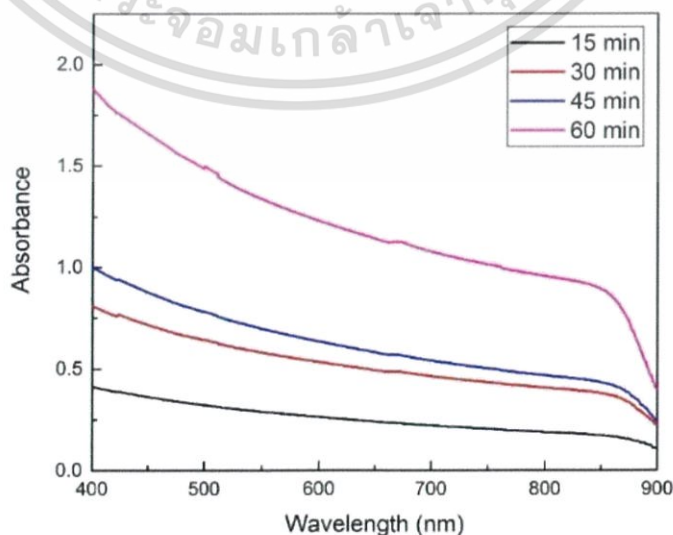
ยอดกราฟ D กับยอดกราฟ G มักจะใช้ในการประมาณค่าความบกพร่องและความไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างของสารตระกูลคาร์บอนในการเปรียบเทียบจะใช้อัตราส่วนความเข้มของยอดกราฟ  $I_D/I_G$  ซึ่งให้ข้อมูลอัตราส่วนพันธะ  $sp^3$  ต่อพันธะ  $sp^2$  ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลที่ได้จากการคำนวณของกราฟรามาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนความเข้มยอดกราฟ  $I_D/I_G$  มีความใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบ เป็นการยืนยันว่าลักษณะข้อบกพร่องและพันธะต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการเคลือบ

ยอดกราฟ 2D เป็นยอดที่เป็นลำดับที่สองของยอดกราฟ D ซึ่งพบได้ชัดเจนในโครงสร้างกราฟีนและแกรไฟต์ ในแกรไฟต์จะมียอดกราฟนี้ที่สูง ต่างจากในกราฟีนออกไซด์ที่มีค่าต่ำกว่ามาก งานวิจัยหลายงาน [90], [91] นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างยอดเหล่านี้กับจำนวนชั้นของกราฟีน ถึงแม้ว่าความเข้มของยอดกราฟนี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนชั้นกราฟีน แต่รูปร่างจำนวนยอดกราฟบริเวณนี้จะให้ข้อมูลจำนวนชั้นของกราฟีนได้ ซึ่งในรูปที่ 4.29 นั้นมียอดกราฟนี้ที่ไม่สูงและยังแตกออกเป็นสองยอดกราฟย่อยที่มีบางส่วนทับกัน เพื่อตีความให้ชัดเจน จึงสมการลอเรนซ์ในการแยกองค์ประกอบเป็นสองยอดกราฟ คือ ยอดกราฟ  $2D_1$  และยอดกราฟ  $2D_2$  ที่ตำแหน่ง  $2600\text{ cm}^{-1}$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $2900\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.30x เพื่อเปรียบเทียบระหว่างกราฟรามาน อัตราส่วนความเข้มระหว่างยอด  $I_{201}/I_G$  ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ประมาณค่าจำนวนชั้นแสดงดังตารางที่ 4.8 อัตราส่วนนี้จะมีค่าแตกต่างกันไปตามจำนวนชั้น เมื่อเทียบกับข้อมูลในตารางแล้วพบว่าเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบให้ฟิล์มที่มีจำนวนชั้นมากกว่าสามชั้นขึ้นไป จัดเป็นกราฟีนออกไซด์หลายชั้นซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณจากเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์

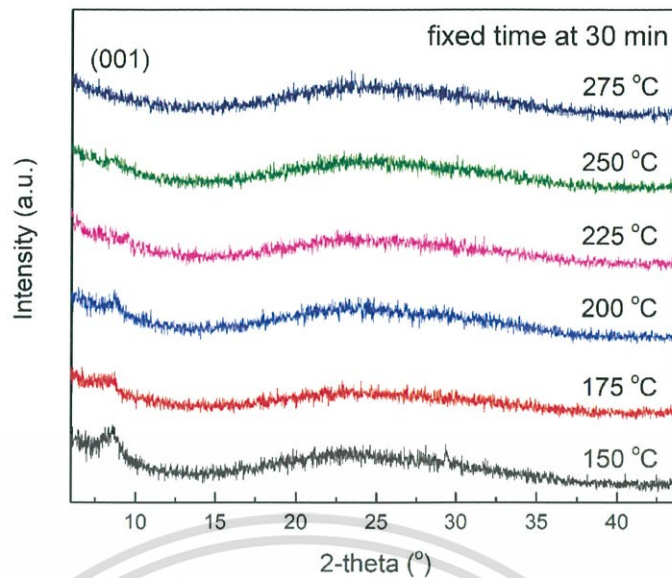
เทคนิค FTIR เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่พบในฟิล์ม ถึงแม้ว่าเทคนิคอื่น ๆ จะสามารถจำนวนฟิล์มได้ว่าเป็นฟิล์มกราฟีนออกไซด์ แต่ก็เป็นการให้ข้อมูลทางอ้อมและยังไม่สามารถยืนยันได้ตรง ๆ ว่าเกิดหมู่ฟังก์ชันจริงหรือไหม หรือเกิดหมู่ฟังก์ชันอะไรบ้าง จึงต้องการเทคนิคนี้เพื่อให้ข้อมูลเพิ่มเติมในส่วนของคุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันฟิล์ม กราฟีนออกไซด์ได้แสดงดังรูปที่ 4.31 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (wavenumber) และความสามารถในการทะลุผ่านของแสงอินฟราเรด (transmittance) จากข้อมูลพบบอกไซด์ของหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกันได้แก่ ที่ตำแหน่ง  $1044\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบ stretching จากหมู่แอลคอกซี C-O)  $1256\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบ stretching จากหมู่อีพอกไซด์ C-O)  $1372\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบ stretching จากหมู่ฟีนิล C-O)  $1450\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบ bending จาก C-H)  $1600\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นจากโครงสร้างอะโรมาติกที่ไม่เกิดออกไซด์)  $1730\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบ stretching จากพันธะ C=O)  $2850\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบ stretching จากหมู่แอลดีไฮด์ C-H)  $2925\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบ stretching จากพันธะ  $sp^3$  C-H) และ  $3380\text{ cm}^{-1}$  (การสั่นแบบ stretching จากพันธะ O-H) ข้อมูลเหล่านี้เป็นตัวยืนยันการเกิดหมู่ฟังก์ชันจำนวนมากบนแผ่นกราฟีนและยังยืนยันเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบที่นานไม่มีผลที่ชัดเจนต่อหมู่ฟังก์ชัน

ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ได้วัดการดูดกลืนด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโตรสโคปีแสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่าที่ความหนาต่างกันจะมีช่วงดูดกลืนที่ต่างกันเพิ่มขึ้นไปตามความหนา ยอดการดูดกลืนจะอยู่ที่ประมาณ 300 นาโนเมตร ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกราฟีนออกไซด์ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพลาสมอน  $\pi-\pi^*$  ซึ่งเกิดจากพันธะเอสพีสองหรือเกิดจากพันธะ C=C, C=O และ C-O ซึ่งยืนยันการเกิดหมู่ฟังก์ชันสอดคล้องกับข้อมูลจากเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี อย่างไรก็ตามปัจจัยหลักในการดูดกลืนมาจากความหนาของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น



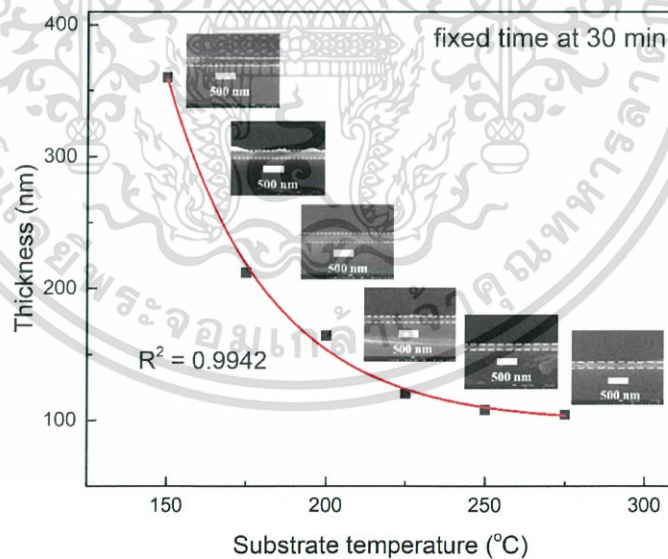
รูปที่ 4.32 ความสามารถในการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 มุมการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ที่อุณหภูมิฐานรองรับที่ต่างกัน

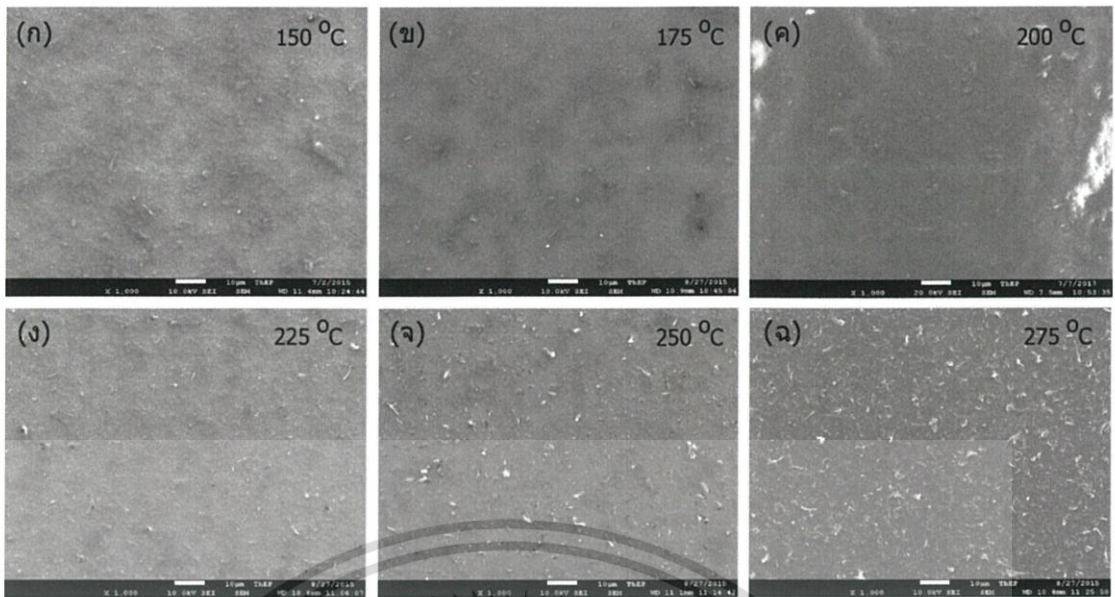
เนื่องจากลักษณะความเป็นผลึกที่สูงกว่าเงื่อนไขอื่นในข้อมูลเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ และลักษณะภาพจากเครื่องส่องกราดด้วยอิเล็กตรอนที่มีการกระจายตัวที่ดี ทั้งคุณสมบัติอื่น ๆ จากเทคนิคต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจึงเลือกเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบที่ 30 นาทีสำหรับเป็นตัวแทนในการศึกษาผลของอุณหภูมิฐานรองรับที่มีต่อกราฟีนออกไซด์เพื่อปรับระดับการรีดิวซ์ (หมู่ฟังก์ชัน) ในการเตรียมฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.34 ผลของเงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับที่มีต่อความหนา

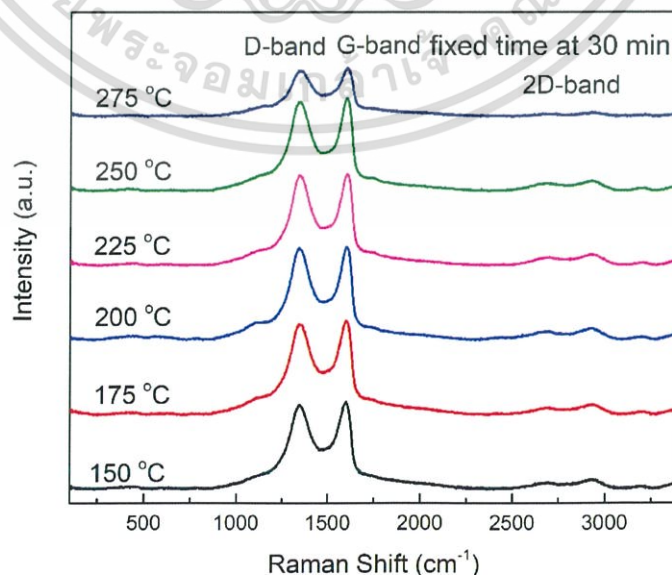
จากข้อมูลที่ทำกรวิเคราะห์ไปข้างต้น ฟิล์มกราฟีนออกไซด์เงื่อนไขระยะเวลาเคลือบที่ 30 นาที สังเกตเห็นยอดกราฟกราฟีนออกไซด์ได้ดี ค่า FWHM และการดูดกลืนแสงไม่มาก และยังมีลักษณะความบกพร่องใกล้เคียงกับเงื่อนไขอื่น ๆ ดังนั้นฟิล์มกราฟีนออกไซด์จะถูกเคลือบที่ระยะเวลา 30 นาทีเท่ากัน แต่มีอุณหภูมิฐานรองรับที่เปลี่ยนไป เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก

อุณหภูมิของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 ลักษณะภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ส่องกราดด้วยอิเล็กตรอนที่อุณหภูมิต่างกัน

ผลของอุณหภูมิฐานรองรับที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 4.33 จากรูปจะเห็นได้ว่ายอดกราฟ (001) จะค่อย ๆ หายไปเมื่อมีอุณหภูมิฐานรองรับสูงขึ้น ค่าต่าง ๆ จากเทคนิคนี้คำนวณได้ตามตาราง ช่วงอุณหภูมิฐานรองรับ 150-200 องศาเซลเซียส พบยอดกราฟมีความสูงลดลงและมีความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของยอดกราฟมากขึ้นและตำแหน่งยอดกราฟมีการขยับสูงขึ้นเล็กน้อย เพราะโมเลกุลของน้ำที่ทำการแทรกตัวอยู่ในระหว่างชั้นกราฟีนออกไซด์ถูกทำให้ระเหยออกไป [4.24] ช่วง 200 องศาเซลเซียสขึ้นไปนั้นความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของยอดกราฟมากขึ้นและความสูงของยอดกราฟลดลงอย่างเห็นได้ชัด ตำแหน่งยอดกราฟมีการขยับมากขึ้นและระยะระหว่างชั้นลดลงจนกระทั่งยอดกราฟหายไป เนื่องจากเกิดการหายไปของหมู่ฟังก์ชันบางส่วนทำให้ระยะระหว่างชั้นลดลง จึงทำให้เกิดความเป็นผลึกน้อยลงนอกจากนี้ข้อมูลจำนวนชั้นยังแสดงให้เห็นว่าฟิล์มยังคงมีจำนวนชั้นแบบหลายชั้นอยู่เช่นเดิม



รูปที่ 4.36 กราฟรามานสเปกโตรสโคปีที่เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

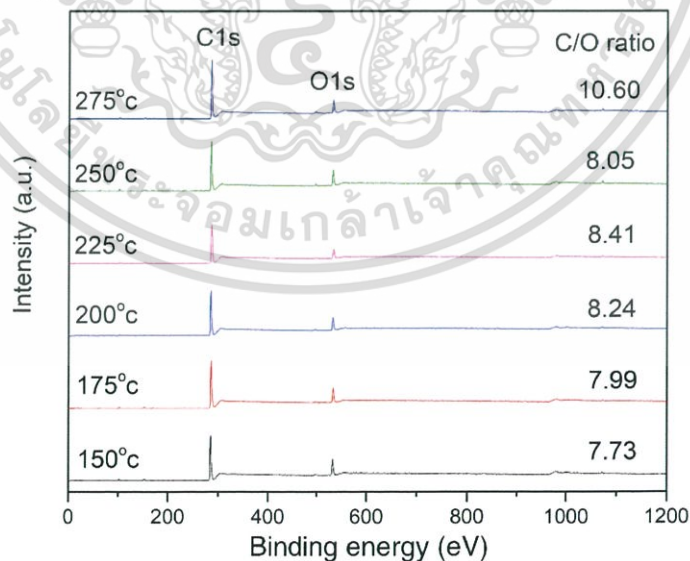
ความหนาของฟิล์มได้ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ส่องกราดด้วยอิเล็กตรอนดังรูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเงื่อนไขอุณหภูมิของฐานรองรับความหนาของฟิล์มได้ลดลงอย่างมากเมื่อทำการเคลือบที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการระเหยของโมเลกุลน้ำที่แทรกอยู่ในชั้นกราฟีนออกไซด์ซึ่งสอดคล้องกับผลของการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ นอกจากนี้การลดลงของความหนายังอาจเกิดจากการลดลงของหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งความหนาที่ลดลงเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{thickness (nm)} = 41056 \times e^{\frac{\text{substrate temperature}}{29.64}} + 99.81 \quad (4.14)$$

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณของกราฟรามาน

อุณหภูมิของฐานรองรับ (°C)	I <sub>D</sub> /I <sub>G</sub>	I <sub>2D</sub> /I <sub>G</sub>
150	1.533	0.144
175	1.537	0.148
200	1.506	0.174
225	1.541	0.177
250	1.477	0.159
275	1.481	0.098

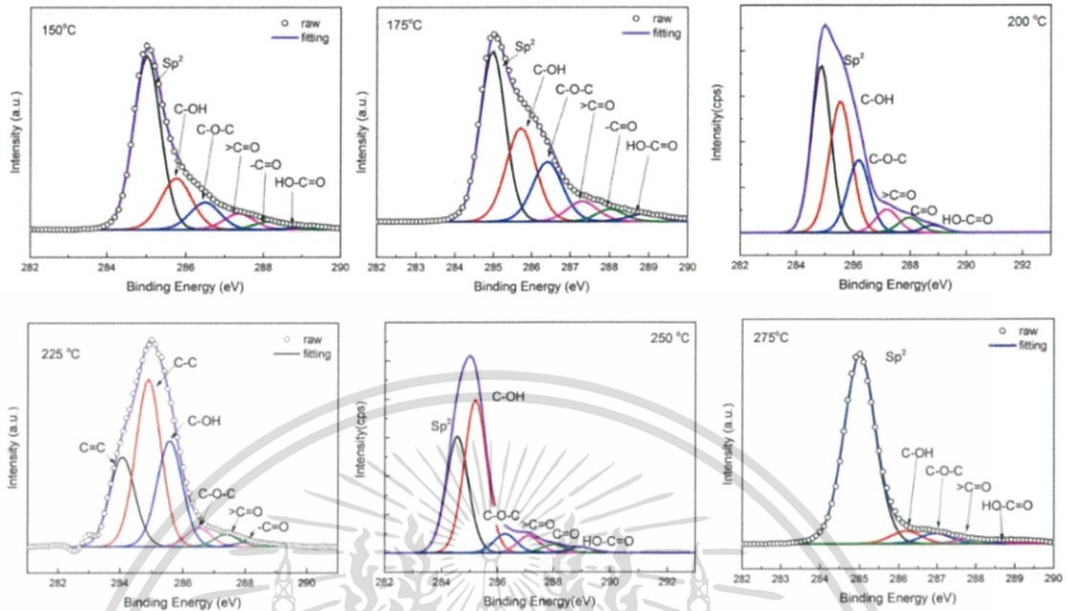
ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มกราฟีนออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทุกเงื่อนไขอุณหภูมิของฐานรองรับ แต่มีขนาดเกรนใหญ่ขึ้นตามอุณหภูมิเนื่องจากอัตราการระเหยที่สูงของสารละลายในระหว่างการเคลือบ



รูปที่ 4.37 ข้อมูลธาตุของฟิล์มในเงื่อนไขอุณหภูมิของฐานรองรับ

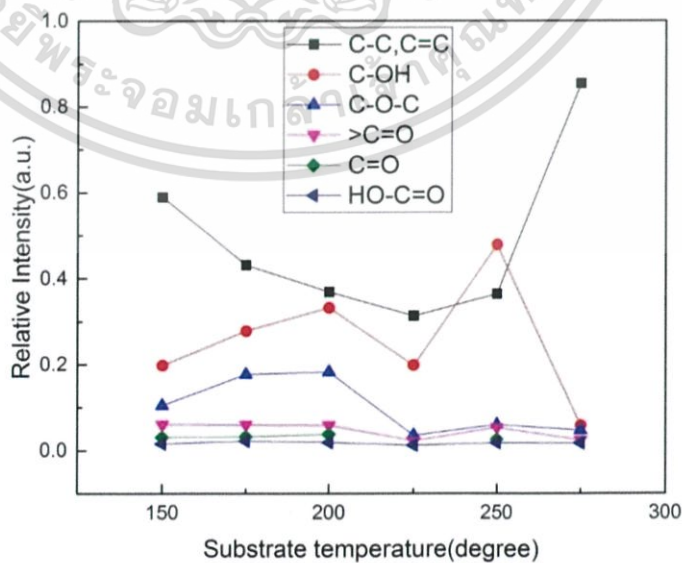
เพื่อยืนยันกันการรีดิวซ์ของกราฟีนออกไซด์ด้วยความร้อน จึงใช้เทคนิครามานสเปกโตรสโคปีในการตรวจสอบฟิล์ม พบว่ากราฟเป็นดังรูปที่ 4.36 พบว่าลักษณะยอดเป็นเหมือนเงื่อนไขอุณหภูมิคือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบยอดกราฟ D ยอดกราฟ G และยอดกราฟ 2D เพื่อตรวจสอบเชิงลึกจึงทำการแยกเป็นองค์ประกอบย่อยเช่นเดียวกับเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบ จากนั้นทำการคำนวณอัตราส่วนต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.38 การวัดองค์ประกอบธาตุของคาร์บอนของเงื่อนไขอุณหภูมิของฐานรองรับ

อัตราส่วนความเข้มระหว่างยอดกราฟ  $I_D/I_G$  นั้นมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงแรกแสดงให้เห็นว่าช่วงแรกนี้ปัจจัยหลักที่เกิดการลดลงของความหนาจากการระเหยของโมเลกุลน้ำเป็นหลัก อย่างไรก็ตามเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น อัตราส่วนนี้มีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงถึงปริมาณพันธะ  $sp^3$  ที่ลดลง ซึ่งตีความได้ว่า หมู่ฟังก์ชันมีการลดลง นอกจากนี้อัตราส่วนความเข้มระหว่างยอดกราฟ  $I_{2D}/I_G$  แสดงให้เห็นค่าจำนวนชั้นที่ยังคงเป็นกราฟีนหลายชั้นอยู่ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดจากการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์



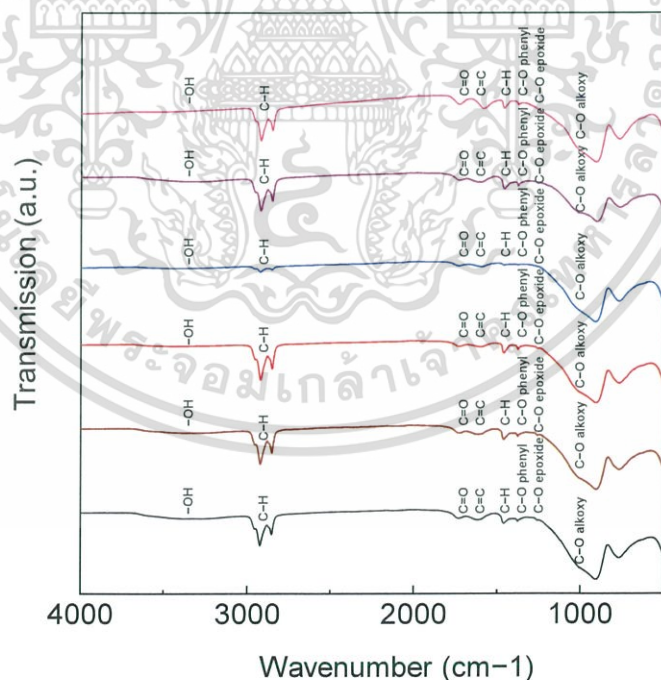
รูปที่ 4.39 แนวโน้มของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิของฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิค XPS เป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลองค์ประกอบของธาตุและลักษณะพันธะที่เกิดขึ้น เพื่อการยืนยันการเกิดรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ดังนั้น จึงทำการตรวจสอบธาตุของฟิล์มในเงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับดังแสดงรูปที่ 4.37 พบว่า ธาตุที่พบนั้นมีธาตุคาร์บอน และออกซิเจนเป็นหลัก อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อออกซิเจนเป็นตัวชี้วัดถึงระดับการรีดิวซ์ของกราฟีนออกไซด์ อัตราส่วนที่แสดงในรูปที่ 4.13 นี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออุณหภูมิฐานรองรับสูงขึ้น เป็นการยืนยันการเกิดรีดิวซ์ออกไซด์

นอกจากการวัดสารประกอบของธาตุแล้ว ยังมีการวัดข้อมูลของ C 1s อย่างละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.38 ซึ่งได้ทำการแยกเป็นองค์ประกอบย่อย ๆ โดยกำหนดตำแหน่งองค์ประกอบย่อย ดังนี้ ที่พลังงานพันธะ 284.0, 285.7, 286.5, 287.4, 288.2 และ 289.2 eV แทนด้วย พันธะ  $sp^2$  (C-C, C=C) หมู่ไฮดรอกซิล (C-OH) หมู่อีพอกไซด์ (C-O-C) หมู่คาร์บอนิล (>C=O) หมู่แลกโตน (-C=O) และหมู่คาร์บอกซิล (HO-C=O) ตามลำดับ เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงจิงวาดกราฟใหม่ดังรูปที่ 4.39

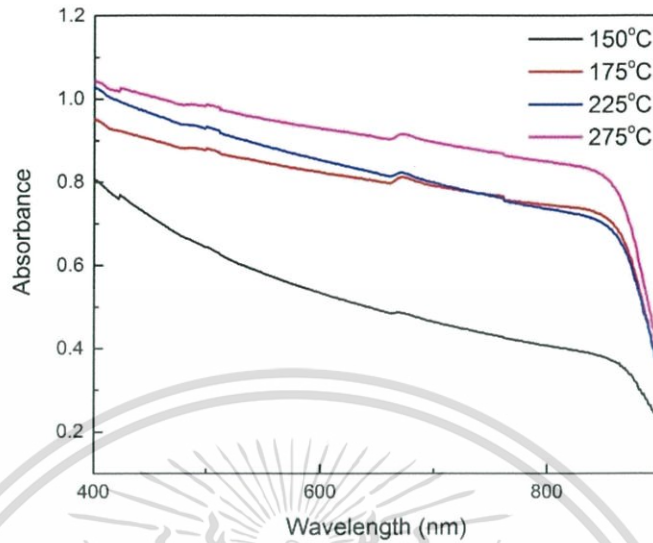
พันธะ C-C และ C=C มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งอาจเกิดจากการสลายตัวเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ [92] หมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลโดยทั่วไปจะจับตัวที่ขอบในกราฟีนออกไซด์ทำให้ง่ายที่จะเกิดการรีดิวซ์หรือเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้ พันธะ C=C บางส่วนอาจเปลี่ยนเป็นพันธะ C-C ทำให้ง่ายต่อการจับตัวกับหมู่ฟังก์ชันบางตัวที่เกิดการรีดิวซ์ อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 275 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันก็ได้ลดลงอย่างมาก ทำให้อัตราส่วนของคาร์บอนต่อออกซิเจนสูงขึ้นอย่างก้าวกระโดด



รูปที่ 4.40 ผลของอุณหภูมิของฐานรองรับที่ตรวจสอบฟิล์มด้วยเทคนิคฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

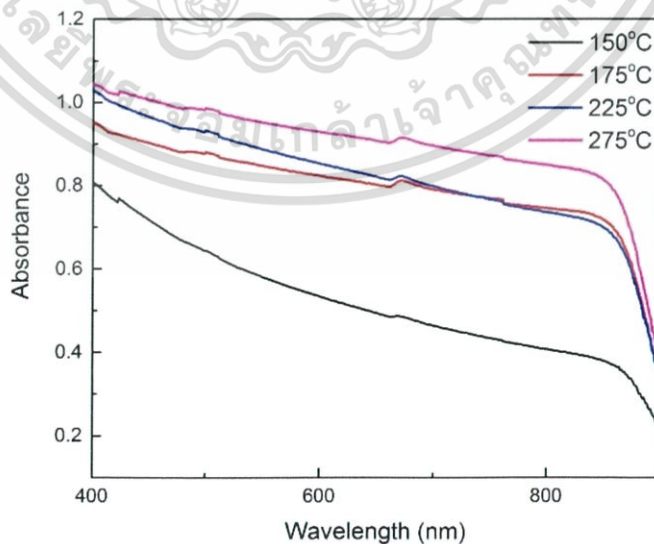
การตรวจสอบฟิล์มด้วยเทคนิคฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีเพื่อเป็นการยืนยันหมู่ฟังก์ชันที่พบแสดงดังในรูปที่ 4.40 ซึ่งมีลักษณะการสั่นเช่นเดียวกับเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า มีลักษณะการสั่นเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชันต่างมีความสอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชันที่พบในเทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี อย่างไรก็ตาม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในการวัดนี้



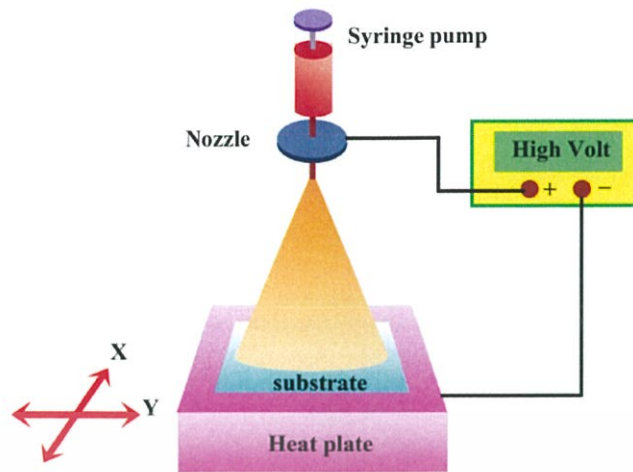
รูปที่ 4.41 ความสามารถในการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ของเงื่อนไขอุณหภูมิของฐานรองรับ

ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ได้ตรวจสอบการดูดกลืนแสงเนื่องจากผลของอุณหภูมิของฐานรองรับ แสดงดังรูปที่ 4.41 ยอดการดูดกลืนจะอยู่ที่ประมาณ 300 นาโนเมตร ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกราฟีนออกไซด์ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพลาสมอน  $\pi-\pi^*$  ซึ่งเกิดจากพันธะ  $sp^2$  หรือเกิดจากพันธะ C=C C=O และ C-O เช่นเดียวกับเงื่อนไขระยะเวลา กราฟที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส มีการดูดกลืนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลของน้ำและปริมาณของหมู่ฟังก์ชันซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากเทคนิคการวัดอื่น ๆ



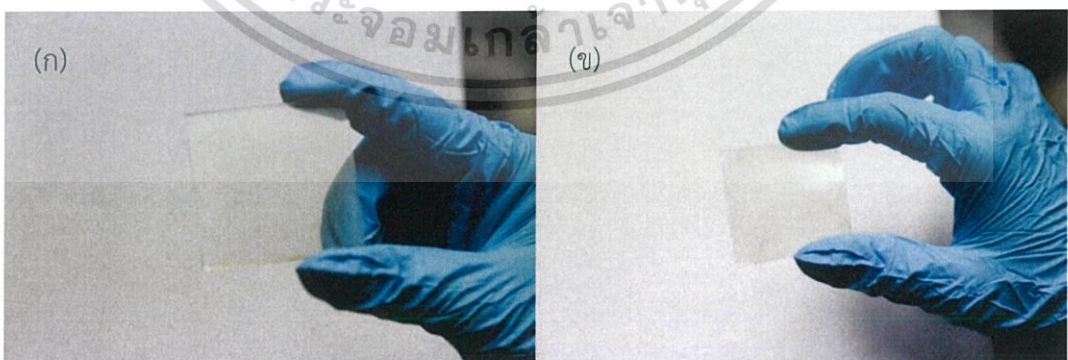
รูปที่ 4.41 ความสามารถในการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ของเงื่อนไขอุณหภูมิของฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 ระบบเคลื่อนที่เพิ่มฐานรองรับเคลื่อนที่แกน x และแกน y

กลไกการเคลือบฟิล์มกราฟีนออกไซด์ด้วยระบบพ่นเคลือบด้วยระบบไฟฟ้าสถิตนั้น สารตั้งต้นใช้เคลือบฟิล์มโดยผ่านสารละลายตัวกลางซึ่งในที่นี้คือ สารละลายเอทานอลผสมบิวทิลคาร์บิโพล ทำให้มีจุดเดือดอยู่ที่ประมาณ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการเลือกอุณหภูมิฐานรองรับ สารผสมจะเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยด้วยแรงเฉือนในปลายเข็มและสนามไฟฟ้า ซึ่งละอองฝอยจะผลักรันให้ห่างเท่า ๆ กันด้วยแรงไฟฟ้าสถิตทำให้ละอองฝอยมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อตกลงไปบนฐานรองรับหยดสารจะสามารถแผ่ตัวได้เล็กน้อยทำให้เกิดฟิล์มบาง ๆ เคลือบฐานรองรับ ในขณะที่อุณหภูมิของฐานรองรับและอุณหภูมิของสารละลายตัวพาหะใกล้เคียงกันจะทำให้ฟิล์มที่เคลือบนั้นจะระเหยได้ทันก่อนที่ไอละอองใหม่จะมา นอกจากนี้ลักษณะวงเคลื่อนที่ที่ไม่ใหญ่มากทำให้ฟิล์มสามารถแผ่ถึงกันได้ทำให้ไม่เกิดรอยแตกในเนื้อฟิล์ม ทำให้ได้ฟิล์มที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและปรับความหนาได้จากระยะเวลาเคลือบ อุณหภูมิฐานรองรับที่สูงขึ้นนั้นทำให้ละอองสารระเหยได้รวดเร็วขึ้น ทำให้เมื่อตกลงไปยังฐานรองรับมีการแผ่เชื่อมต่อกันได้ไม่ดี ทำให้มีลักษณะเกรนที่สูงขึ้นและมีความบกพร่องในเนื้อฟิล์มที่มากขึ้น

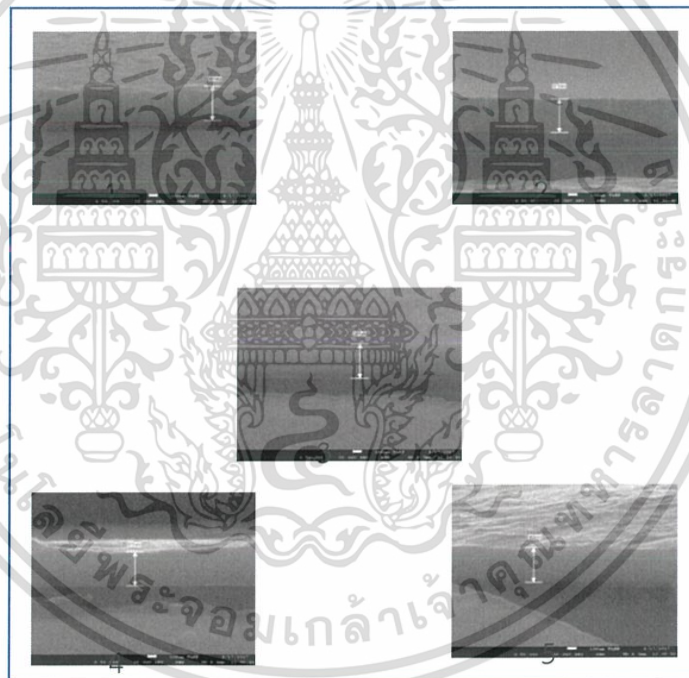


รูปที่ 4.43 ภาพฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์บนฐานรองรับ (ก) กระจก (ข) พลาสติก PEN

จากผลของข้อมูลทั้งหมดนั้นพบว่า เทคนิคการพ่นเคลือบด้วยระบบไฟฟ้าสถิตนั้นสามารถเตรียมกราฟีนออกไซด์ที่สามารถปรับความหนาได้ด้วยระยะเวลาในการเคลือบ และยังสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้ในที่เดียวด้วยการปรับอุณหภูมิของฐานรองรับ ซึ่งลักษณะของฟิล์มขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเคลือบ อย่างไรก็ตามฟิล์มที่เคลือบนั้นไม่ได้มีขนาดใหญ่มาก (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 มิลลิเมตร)

การเตรียมฟิล์มกราฟีนออกไซด์ขนาดใหญ่นั้นทำได้ด้วยการปรับปรุงระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งทำได้ทั้งการเพิ่มจำนวนหัวพ่นและการเคลื่อนที่ฐานรองรับ ซึ่งในที่นี้จะเพิ่มระบบการเคลื่อนที่ฐานรองรับเพื่อให้ฟิล์มมีลักษณะใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.42 โดยเพิ่มแกน x และแกน y ลงไป ซึ่งปรับให้มีความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำให้ได้ฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ที่มีขนาด 50x50 ตารางมิลลิเมตร รูปที่ 4.43 แสดงภาพที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไข 150 องศาเซลเซียส 30 นาที บนกระจกและบนพลาสติกนำไฟฟ้า PET เคลือบ ITO ซึ่งฟิล์มมีลักษณะสม่ำเสมอทั้งทั้งแผ่น เพื่อยืนยันการกระจายตัวของฟิล์ม จึงตรวจสอบด้วยกล้องส่องกราดด้วยอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.44 พบว่ามีความหนาของฟิล์มที่ตำแหน่ง 1, 2, 3, 4 และ 5 เป็น 381, 371, 381, 377 และ 383 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งความหนาของฟิล์มจะลดลงตามขนาดที่เพิ่มขึ้น และยืนยันว่าฟิล์มมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ

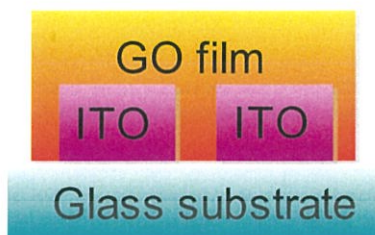


รูปที่ 4.44 ความหนาของฟิล์มขนาดใหญ่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน

#### 4.6 อุปกรณ์วัดความชื้นที่จากกราฟีนออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

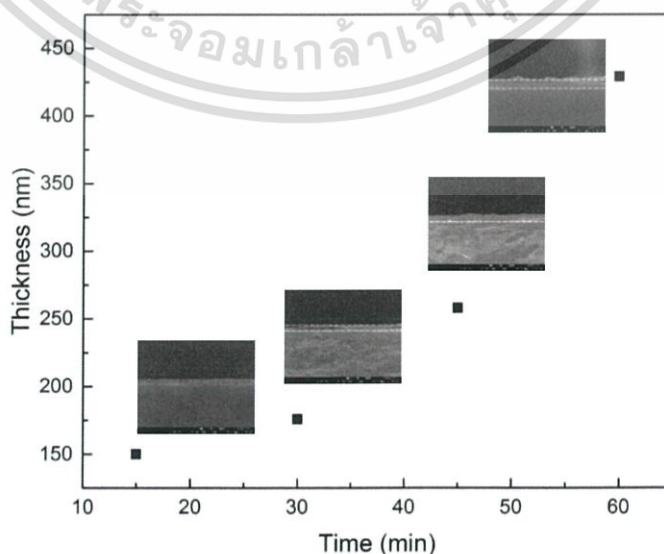
จากหัวข้อที่ผ่านมาแสดงถึงการเตรียมฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต ในหัวข้อนี้เป็นการนำผลจากหัวข้อที่ผ่านมาปรับใช้กับอุปกรณ์ตรวจสอบวัดความชื้นซึ่งจะตอบสนองกับปริมาณไอน้ำในอากาศ โครงสร้างของสารกราฟีนโดยทั่วไปมีลักษณะที่ไม่ชอบน้ำ จึงไม่เหมาะกับอุปกรณ์วัดความชื้น แต่เหมาะกับอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สมากกว่า ในทางกลับกัน กราฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันหลายชนิดซึ่งมีความชอบน้ำ ทำให้สามารถจับตัวกับไอน้ำในอากาศได้ดี จึงเหมาะกับการประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นในอากาศ ดังนั้นการเลือกเงื่อนไขในการขึ้นฟิล์มด้วยไฟฟ้าสถิตจึงเลือกที่อุณหภูมิฐานรองรับมีค่าน้อย ๆ เพื่อให้มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่ฟังก์ชันปริมาณสูง ๆ อย่างไรก็ตาม หมู่ฟังก์ชันไม่ได้เป็นปัจจัยเดียวในการนำไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ ดังนั้นจึงมีการเลือกเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบ และอุณหภูมิของฐานรองรับมาทำการทดสอบ โดยจะเปลี่ยนสารตัวกลางในการพ่นเคลือบจากสารบิวทิลคาร์บิโพลเป็นสารเมทานอลที่มีจุดเดือดต่ำกว่า เพื่อลดอุณหภูมิของฐานรองรับลง



รูปที่ 4.45 โครงสร้างของอุปกรณ์วัดความชื้นจากกราฟีนออกไซด์

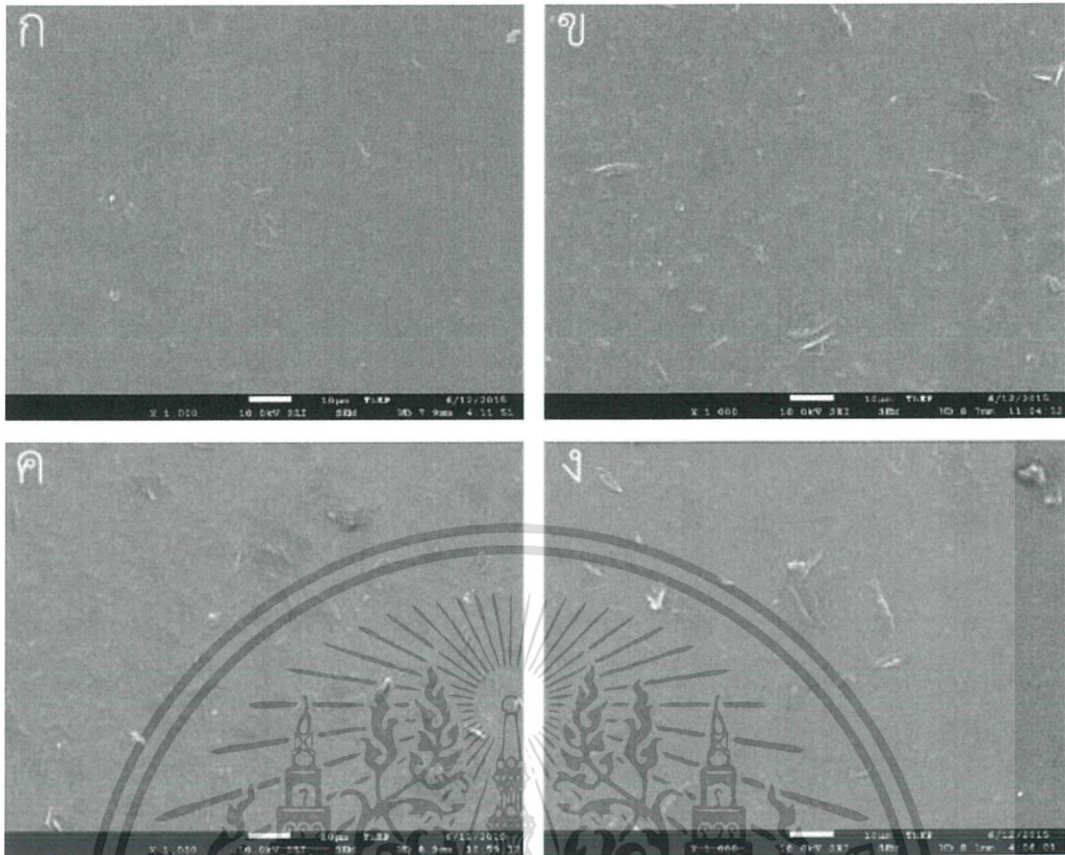
อุปกรณ์วัดความชื้นจากสารกราฟีนออกไซด์ใช้การเตรียมด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสลับบนฐานรองรับที่เป็นกระจกนำไฟฟ้า ITO ซึ่งทำละลายกลายเป็นเส้นขนานกับสองเส้นได้โครงสร้างดังรูปที่ 4.45 ความหนาของแต่ละเงื่อนไขทำการตรวจวัดโดยใช้เทคนิค FE-SEM ถ่ายภาพตัดขวางของกราฟีนออกไซด์ที่พ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสลับบนฐานรองรับกระจก ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเคลือบกับความหนาแสดงได้ดังรูปที่ 4.46 ความหนาสามารถประมาณเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระยะเวลาเคลือบ ดังนั้นเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบสามารถใช้เปรียบเทียบผลจากความหนาในชั้นกราฟีนออกไซด์ของอุปกรณ์ได้ นอกจากนี้ เทคนิค FE-SEM ยังสามารถถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่ระยะเวลาที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.47 พื้นผิวมีลักษณะเป็นแผ่น ๆ กระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยมีปริมาณมากขึ้นตามเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบ ขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นตามระยะเวลาเคลือบ อาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของทิศทางกราฟีนออกไซด์ที่เคลือบบนพื้นผิว ทำให้มีกราฟีนออกไซด์บางส่วนหันด้านข้างขึ้นจึงเห็นเป็นลักษณะเกรนที่มีขนาดใหญ่ ในงานด้านอุปกรณ์วัดความชื้นนั้น วัสดุที่มีข้อบกพร่องเยอะ มีแนวโน้มที่จะเกิดการตอบสนองได้ดีกว่า ดังนั้นเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบที่นานจึงมีแนวโน้มที่จะตอบสนองได้ดีกว่า



รูปที่ 4.46 ภาพตัดขวางของกราฟีนออกไซด์บนฐานรองรับกระจกที่ถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

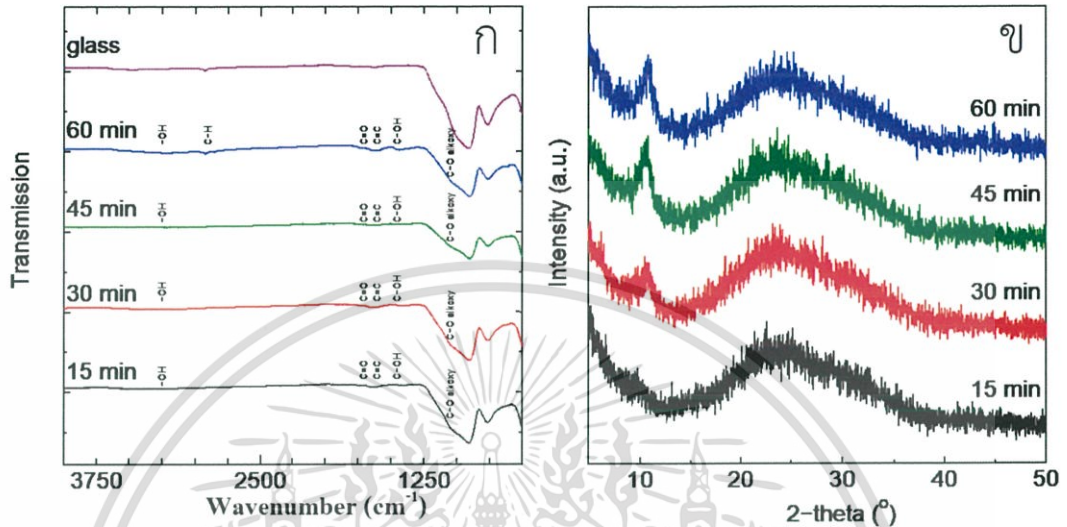


รูปที่ 4.47 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM ของเงื่อนไขระยะเวลา (ก) 15 นาที (ข) 30 นาที (ค) 45 นาที และ (ง) 60 นาที

XRD เป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างชั้นกราฟีนออกไซด์และจำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์ ในรูปที่ 4.48 แสดงกราฟของกราฟีนออกไซด์ที่ระยะเวลาเคลือบที่ต่างกัน ซึ่งสำรวจข้อมูลด้วยเทคนิค XRD สังเกตได้ว่า พบยอดกราฟที่ประมาณ 10 องศา ซึ่งเป็นระนาบ (001) ของกราฟีนออกไซด์ ยอดกราฟจะมีความเข้มสูงขึ้นตามจำนวนระยะเวลาที่เคลือบ แสดงถึงปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่มากขึ้นมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้เคลือบ ข้อมูลจากรูปที่ 4.48 สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าระยะห่างระหว่างชั้น และจำนวนชั้นของกราฟีนออกไซด์แสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าระยะระหว่างชั้นกราฟีนมีค่าลดลงตามระยะเวลาเคลือบที่มากขึ้น อาจเกิดจากปริมาณน้ำในระหว่างชั้นที่ลดลงในขั้นตอนการขึ้นฟิล์ม อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาห่างระหว่างชั้นของกราฟีนออกไซด์จะมีผลต่อความเร็วในการดูดซับและคายตัวของน้ำ ระยะห่างระหว่างชั้นที่มากจะมีความเร็วในการดูดซับและคายตัวของน้ำที่เร็วกว่า เนื่องจากการดูดซับส่วนหนึ่งของกราฟีนออกไซด์มาจากการแทรกตัวของน้ำเข้าไปในระหว่างชั้นกราฟีนออกไซด์ ซึ่งความกว้างของชั้นจะบอกถึงพลังงานของน้ำที่ใช้ในการแทรกเข้าไปในระหว่างชั้น ซึ่งชั้นที่กว้างจะใช้พลังงานที่ต่ำกว่า ทำให้ความเร็วที่ได้ในอุปกรณ์มีค่าน้อยกว่า ข้อมูลจากตารางจึงอนุมานได้ว่า เงื่อนไขระยะเวลาเคลือบที่ 15 นาที ควรจะมีความเร็วในการดูดคายมากที่สุดแล้วลดลงไปตามระยะเวลาที่มากขึ้น จำนวนชั้นที่คำนวณได้ของกราฟีนออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเคลือบ จนกระทั่งใกล้เคียงกัน อาจเกิดจากสภาพฟิล์มในช่วงแรกจะเป็นฟิล์มที่เกิดระหว่างฐานรองรับกับกราฟีนออกไซด์จะมีลักษณะการเรียงตัวที่แตกต่างจากการเกิดชั้นฟิล์มที่เกิดจากกราฟีนออกไซด์กับกราฟีนออกไซด์ ทำให้ลักษณะจำนวนชั้นที่คำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ในช่วงแรกมีค่าน้อยกว่า ในการกักเก็บน้ำของกราฟีนส่วนหนึ่งจะเกิดจากการแทรกตัวของน้ำในระหว่างชั้นกราฟีนออกไซด์ ดังนั้นจำนวนชั้นของกราฟีนออกไซด์ที่มากกว่าจะมีแนวโน้มที่จะพบค่าการตอบสนองได้ดีกว่า ดังนั้น เงื่อนไขระยะเวลาเคลือบที่ 45 นาที มีแนวโน้มที่จะมีค่าการตอบสนองได้ดีที่สุด



รูปที่ 4.48 กราฟีนออกไซด์ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค (ก) FTIR และ (ข) XRD ที่ระยะเวลาเคลือบแตกต่างกัน

เทคนิครามานเป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลจำนวนชั้นได้เช่นเดียวกับกับเทคนิค XRD ดังนั้น การตรวจวัดด้วยเทคนิครามานจะช่วยยืนยันข้อมูลจำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณได้ เทคนิครามานของกราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขระยะเวลาเคลือบที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.49ก โดยมีความเข้มของยอดกราฟ D และ G เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเคลือบ เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลกราฟที่วัดได้ จะนำไปทำการคำนวณได้ผลตามตารางที่ 4.11 อัตราส่วนค่า I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> มีค่าลดลงตามระยะเวลาเคลือบที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงข้อบกพร่องที่ลดลงในตัวฟิล์ม ซึ่งอาจเกิดจากการเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้นของแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่ทับซ้อนกัน ค่าจำนวนชั้นของกราฟีนออกไซด์สามารถประมาณได้จากค่า I<sub>2D</sub>/I<sub>G</sub> ซึ่งค่าที่คำนวณออกมาแสดงดังตาราง สังเกตว่า ที่ตำแหน่งระยะเวลาเคลือบ 15 นาที มีจำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์ 3 ชั้น ซึ่งตรงกับค่าประมาณจำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากเทคนิค XRD เงื่อนไขที่เหลือนั้นแสดงข้อมูลการประมาณค่าจำนวนชั้นด้วยเทคนิครามานเป็นหลายชั้น ซึ่งหมายถึงจำนวนชั้นตั้งแต่ 4 ชั้นขึ้นไป ข้อมูลส่วนนี้ก็ยังสอดคล้องกับผลจากเทคนิค XRD ดังนั้นจึงทำนายได้ว่า ผลของอุปกรณ์ที่เงื่อนไขระยะเวลาเคลือบ 45 นาที มีค่าการตอบสนองสูงที่สุด

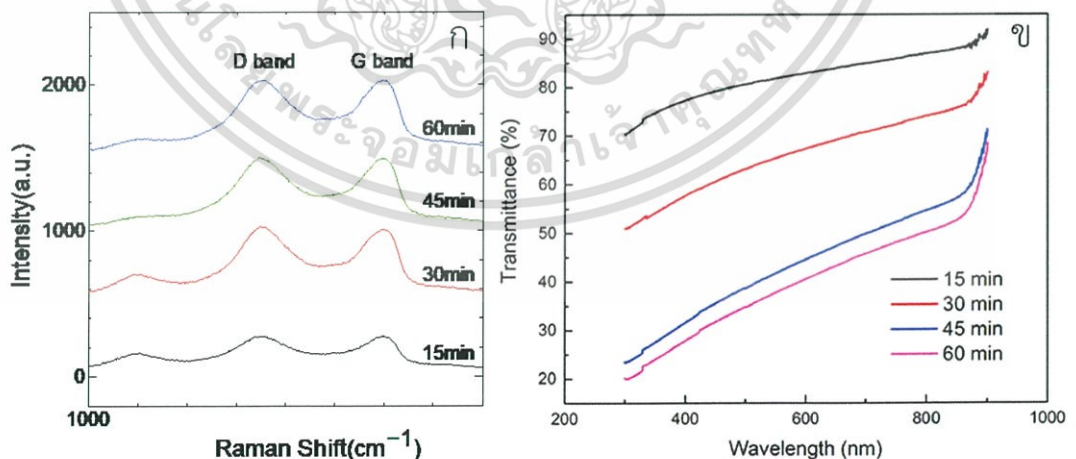
อุปกรณ์วัดความชื้นที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตย์ยังได้ตรวจสอบค่าการดูดกลืนของแสงในช่วง 400-900 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.49ข เงื่อนไข 15 นาที มีการดูดกลืนมากกว่า 70 % และมีค่าลดลงตามระยะเวลาเคลือบที่เพิ่มขึ้น ปัจจัยที่หนึ่งที่ทำให้ค่าการดูดกลืนมีค่าแตกต่างกันนั้นมาจากความหนาของฟิล์มที่มากขึ้น นอกจากนี้ จำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์ยังมีความสามารถทะลุผ่านแสงตามจำนวนชั้นของกราฟีนออกไซด์ ในจำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์ที่น้อยจะมีค่าการทะลุผ่านของแสงได้ดีกว่า เมื่อมีจำนวนชั้นที่มากขึ้นจะมีค่าการทะลุผ่านของแสงที่ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด ถึงแม้ว่าความหนาของเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบที่ 60 นาที มากกว่า 45 นาทีเช่นเดียวกับเงื่อนไขความแตกต่างระหว่างเงื่อนไข 45 นาทีกับ 30 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม ค่าการดูดกลืนของแสงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น ปัจจัยจำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์ที่ใกล้เคียงกัน จึงอาจมีผลสำคัญต่อค่าการทะลุผ่านมากกว่าความหนาของฟิล์ม

ตารางที่ 4.10 จำนวนชั้นกราฟีนจากการคำนวณของกราฟีนด้วยเทคนิค XRD

ระยะเวลาเคลือบ (นาทีก)	2-theta (องศา)	ระยะระหว่างชั้น (นาโนเมตร)	FWHM	จำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์จากการคำนวณ
15	9.76	9.06	3.55	2.5
30	10.6	8.34	2.53	3.7
45	10.66	8.29	1.88	5.1
60	10.74	8.23	1.90	5.0

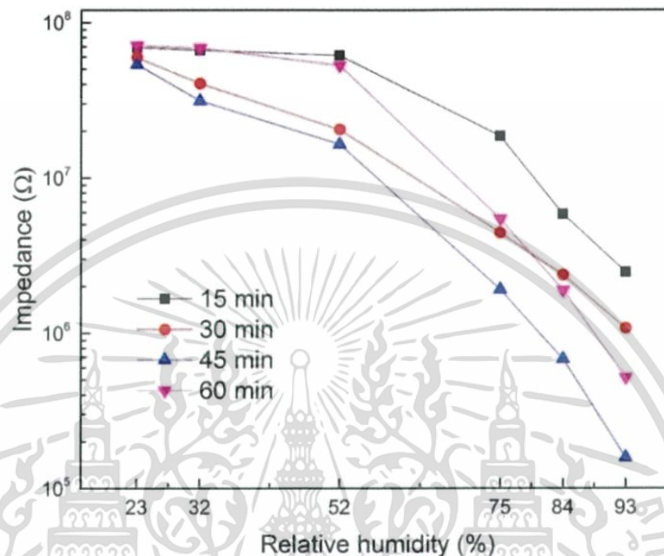
อุปกรณ์วัดความชื้นกราฟีนออกไซด์ที่ระยะเวลาเคลือบแตกต่างกัน มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์และค่าความต้านทานเชิงซ้อนแสดงได้ดังรูปที่ 4.50 โดยค่าความต้านทานเชิงซ้อนมีค่าลดลงตามปริมาณค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการตอบสนองของเงื่อนไข 15 นาที 30 นาที 45 นาที และ 60 นาที เป็น 96.42% 98.20% 99.70% และ 99.27% ตามลำดับ เงื่อนไขระยะเวลาเคลือบ 45 นาที มีค่าการตอบสนองในช่วงความต้านทานเชิงซ้อนมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลจากเทคนิครามานและ XRD ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่มีค่าน้อย ค่าความต้านทานเชิงซ้อนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเป็นปัจจัยจากปริมาณหมู่ฟังก์ชันบริเวณพื้นผิวที่แตกต่างกันทำให้สามารถจับตัวกับน้ำที่ต่างกัน ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ ระยะเวลาเคลือบ 45 นาที มีค่าความต้านทานเชิงซ้อนต่ำที่สุด ปัจจัยนี้อาจเกิดจากปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวและจำนวนชั้นของกราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถจับตัวกับน้ำได้ต่างกัน



รูปที่ 4.49 กราฟีนออกไซด์ที่ระยะเวลาเคลือบที่ต่างกันตรวจวัดด้วยเทคนิค (ก) รามาน (ข) UV-Vis

จากข้อมูลการตอบสนองต่อความชื้นสัมพัทธ์ที่พบว่าเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบ 45 นาที ให้ค่าการตอบสนองที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกเงื่อนไขนี้มาศึกษาผลกระทบจากฐานรองรับ ซึ่งจะมีผลต่อหมู่ฟังก์ชันในฟิล์ม ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.51ก-ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตได้ว่าพื้นผิวมีลักษณะแผ่นกราฟีนที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบมากขึ้นตามอุณหภูมิฐานรองรับที่สูงขึ้น เป็นผลมาจากอุณหภูมิฐานรองรับไปเพิ่มอัตราการระเหยตัวของสารตัวกลางเมทานอลในขณะที่ทำการเคลือบฟิล์ม ดังนั้นแผ่นกราฟีนออกไซด์จึงมีระยะเวลาในการเรียงตัวที่น้อยลงทำให้มีลักษณะไม่เป็นระเบียบ และเกิดข้อบกพร่องมากขึ้นตามอุณหภูมิของฐานรองรับ อย่างไรก็ตาม ความไม่เป็นระเบียบจะทำให้หน้าสามารถแทรกตัวในกราฟีนออกไซด์ได้ง่ายขึ้น เป็นปัจจัยที่จะมีผลกับความเร็วในการดูดคายน้ำของฟิล์มกราฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.50 การตอบสนองความชื้นของกราฟีนออกไซด์ที่ระยะเวลาเคลือบแตกต่างกัน

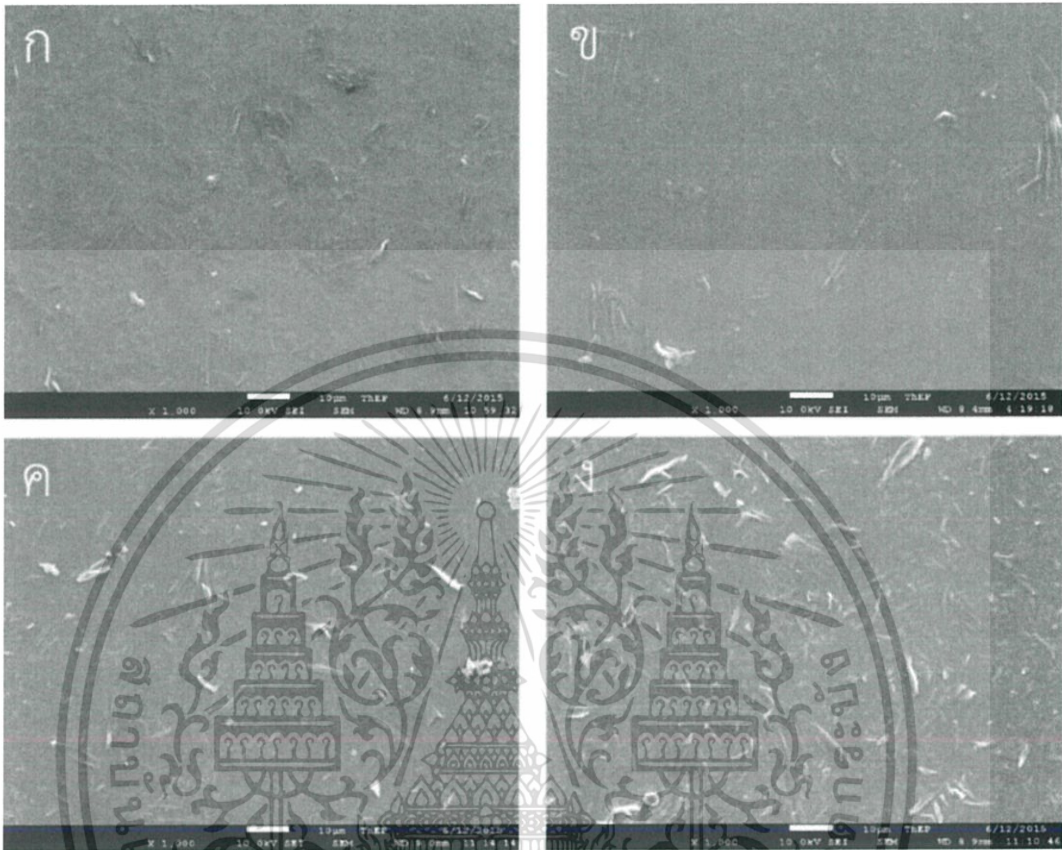
กราฟีนออกไซด์เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับที่แตกต่างกันซึ่งตรวจวัดด้วยเทคนิค XRD แสดงได้ดังรูปที่ 4.52ก พบยอดกราฟบริเวณ 10 องศา ซึ่งเกิดจากระนาบ 001 ของกราฟีนออกไซด์ที่ซ้อนทับกัน ความเข้มของยอดกราฟมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงข้อบกพร่องที่มากขึ้นตามอุณหภูมิ ในรูปที่ 4.52ข เป็นกราฟที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Raman ซึ่งจะพบยอดกราฟ D และ G เช่นเดียวกันทุกเงื่อนไขอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.11 ผลของการคำนวณจำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์จากเทคนิครามาน

ระยะเวลาเคลือบ (นาที)	I <sub>D</sub> /I <sub>G</sub>	I <sub>2D</sub> /I <sub>G</sub>	จำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์จากการคำนวณ
15	1.621	0.101	3 ชั้น
30	1.614	0.158	หลายชั้น
45	1.593	0.154	หลายชั้น
60	1.572	0.144	หลายชั้น

จากข้อมูลของ XRD และ Raman ทำให้สามารถคำนวณค่าจำนวนชั้นของกราฟีนออกไซด์ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ซึ่งข้อมูลสอดคล้องกันจากการคำนวณทั้งสองแบบ สังเกตได้ว่า จำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์มีค่าลดลงเมื่อมีจำนวนชั้นที่มาก ดังนั้นจะมีแนวโน้มที่จะเก็บน้ำได้น้อยลง ทำให้อาจมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

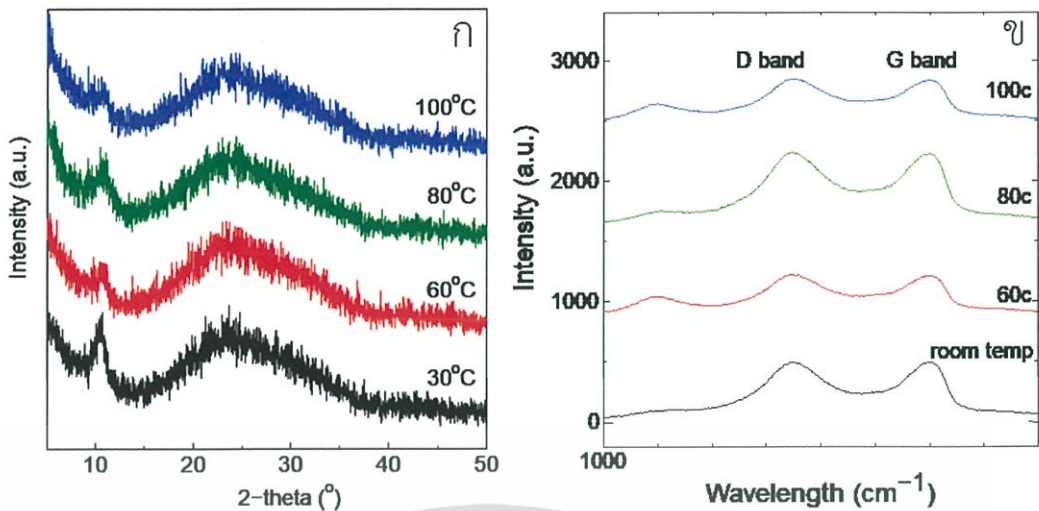
ค่าการตอบสนองที่ต่ำลง อย่างไรก็ตาม จำนวนหมู่ฟังก์ชันยังคงเป็นอีกปัจจัยที่ตัดสินค่าการตอบสนอง นอกจากนี้ ค่าอัตราส่วนยอดกราฟ  $I_D/I_C$  มีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิฐานรองรับ เป็นข้อสนับสนุนข้อมูลจากเทคนิค FE-SEM ที่แสดงว่า ฟิล์มมีข้อบกพร่องมากขึ้นตามอุณหภูมิ



รูปที่ 4.51 ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยเทคนิค FE-SEM ที่เงื่อนไขระยะเวลาเคลือบ 45 นาที อุณหภูมิฐานรองรับ (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 60 °C (ค) 80 °C (ง) 100 °C

หมู่ฟังก์ชันของกราฟีนออกไซด์เป็นส่วนที่สำคัญต่อการตอบสนองต่อความชื้นของอุปกรณ์เทคนิค XPS เป็นเทคนิคที่สามารถใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของกราฟีนออกไซด์ได้ดี โดยกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.53ก-ง ตำแหน่งของยอดกราฟที่ 284.5 eV แทนพันธะ  $sp^3$  ในระนาบของกราฟีนออกไซด์ ยอดกราฟที่ 285 eV แทนพันธะ  $sp^2$  ในวงคาร์บอนในระนาบกราฟีนออกไซด์ ตำแหน่งของยอดกราฟ 285.6 eV, 286.6 eV, 287.6 eV, 288.2 eV และ 289.5 eV แทนหมู่ฟังก์ชันของกราฟีนออกไซด์ ซึ่งเป็นหมู่ไฮดรอกซิล C-OH , อีพอกไซด์ C-O-C, คาร์บอนิล  $>C=O$ , แอลคอกซี  $-C=O$  และ คาร์บอกซิลิก  $HO-C=O$  ตามลำดับ ตำแหน่งยอดกราฟ 290.7 eV แทน  $\pi-\pi^*$  shake up จากการเกิดวงแหวนกราฟีนที่สมบูรณ์ สังเกตได้ว่า พันธะ  $sp^3$  มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และพบพันธะ  $sp^2$  ที่อุณหภูมิฐานรองรับที่สูงขึ้น จึงเป็นไปได้ว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้พันธะ  $sp^3$  ที่เหลืออยู่ของกราฟีนออกไซด์พยายามที่จะคืนตัวเป็นพันธะ  $sp^2$  ทำให้เกิดพันธะ  $\pi-\pi^*$  ซึ่งแสดงถึงบริเวณที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีเหมือนกราฟีน อุณหภูมิฐานรองรับที่สูงมากขึ้นทำให้พันธะคาร์บอนิลและแอลคอกซีซึ่งอยู่บริเวณของกราฟีนออกไซด์บางส่วนจะเปลี่ยนไปเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก ทำให้สัดส่วนของหมู่ฟังก์ชันที่ขอบของกราฟีนออกไซด์มีค่าเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.52 กราฟอินทริกซ์ของเส้นใยออกไซด์ของสังกะสีที่เตรียมด้วย (ก) XRD (ข) Raman

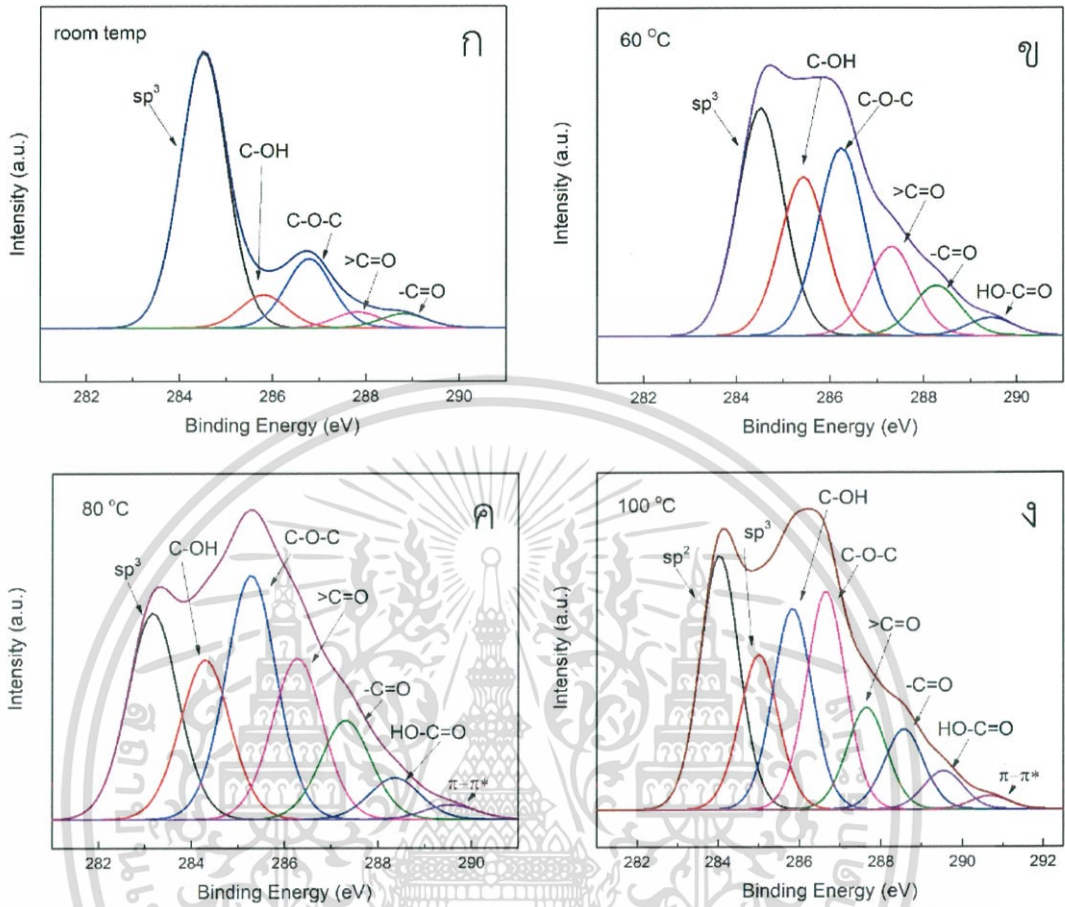
การตอบสนองต่อความชื้นของอุปกรณ์ที่เส้นใยฐานรองรับแตกต่างกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.54 ช่วงความชื้นต่ำ ๆ เส้นใยออกไซด์ของสังกะสีจะมีค่าความต้านทานเชิงซ้อนใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกัน ยกเว้นเส้นใย 100 °C ซึ่งเกิดพันธะ  $sp^2$  และ  $\pi-\pi^*$  ทำให้มีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าเส้นใยอื่น ๆ ต่อมาในช่วงความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ จำนวนชั้นของกราฟีนออกไซด์จะมีบทบาทสำคัญในการตอบสนอง จำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์ที่มากกว่า จะสามารถกักเก็บน้ำในระหว่างชั้นกราฟีนออกไซด์ได้เพิ่มเติมจากหมู่ฟังก์ชัน ดังนั้นที่เส้นใยออกไซด์ของสังกะสีจึงมีความต้านทานเชิงซ้อนที่ต่ำกว่าเส้นใยอื่น ๆ และเส้นใย 100 °C ที่มีจำนวนชั้นกราฟีนน้อยที่สุด รวมถึงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่น้อยกว่าจึงจับตัวกับน้ำได้น้อยกว่าทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้น้อยกว่าเส้นใยอื่น ๆ ค่าการตอบสนองของเส้นใย 30 °C 60 °C 80 °C และ 100 °C เป็น 99.70% 99.66% 99.63% และ 71.73% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เส้นใยที่ดีที่สุด อยู่ที่ระยะเวลาเคลือบ 45 นาที และมีอุณหภูมิฐานรองรับเป็นอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.12 ค่าจากการคำนวณจำนวนชั้นกราฟีนออกไซด์ของเส้นใยออกไซด์ของสังกะสี

อุณหภูมิฐานรองรับ (°C)	XRD			Raman			
	2-theta	ระยะระหว่างชั้น	FWHM	จำนวนชั้น	$I_D/I_G$	$I_{2D}/I_G$	จำนวนชั้น
30	10.66	8.29	1.88	5.06	1.593	0.154	หลายชั้น
60	10.56	8.37	3.45	2.69	1.703	0.109	3
80	10.64	8.31	2.68	3.54	1.636	0.145	หลายชั้น
100	10.9	8.11	3.62	2.69	1.706	0.070	2

อุปกรณ์ยังได้รับการตรวจวัดซ้ำ ๆ เป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่าอุปกรณ์สามารถใช้งานได้อย่างน้อยสองสัปดาห์ขึ้นไป อย่างไรก็ตาม ในช่วงแรกอุปกรณ์จะมีค่าการตอบสนองที่ลดลงจากการแตกตัวของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่ฟังก์ชัน ทำให้มีค่าการตอบสนองแกว่งเล็กน้อย ทำให้สามารถนำอุปกรณ์ไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้

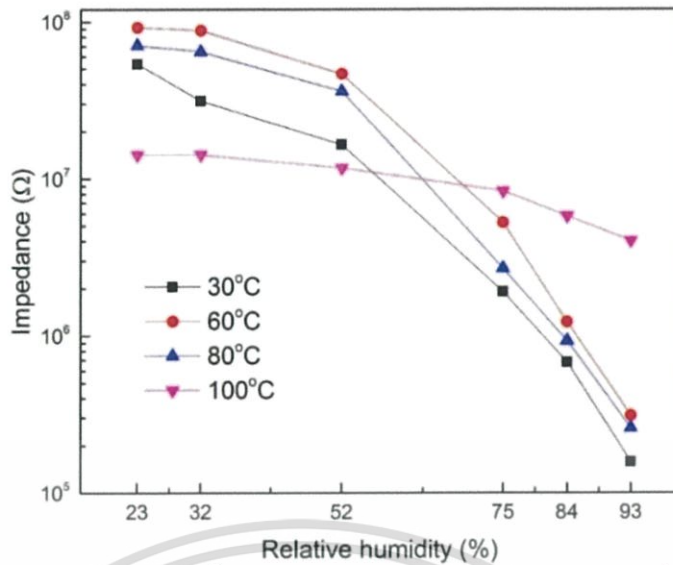


รูปที่ 4.53 กราฟีนออกไซด์ที่ตรวจวัดด้วย XPS ความละเอียดสูงตำแหน่ง C1s ที่เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับ (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 60 °C (ค) 80 °C และ (ง) 100 °C

คุณสมบัติอื่น ๆ ของอุปกรณ์สามารถตรวจสอบได้ดังรูปที่ 4.55 โดยความแม่นยำน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ตรวจสอบด้วยค่า ฮิสเตอร์ซิส ดังรูปที่ 4.55ก พบว่าอุปกรณ์มีค่าฮิสเตอร์ซิสที่  $\pm 2.99\%$  ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ส่วนความเร็วในการตอบสนองสามารถตรวจสอบได้จากกราฟรูปที่ 4.55ข โดยระยะเวลาการตอบสนองเป็นระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงจากความชื้นต่ำ (ความต้านทานเชิงซ้อนสูง) ไปยังความชื้นสูง (ความต้านทานเชิงซ้อนต่ำ) พบว่ามีระยะเวลาการตอบสนอง 11 วินาทีในทางกลับกัน ระยะเวลาคืนตัวสามารถหาได้จากช่วงเวลาที่เปลี่ยนจากความชื้นสูงไปยังความชื้นต่ำ ซึ่งมีค่า 8 วินาที นอกจากนี้รูปที่ 4.55ข ยังแสดงถึงอุปกรณ์สามารถใช้ซ้ำได้

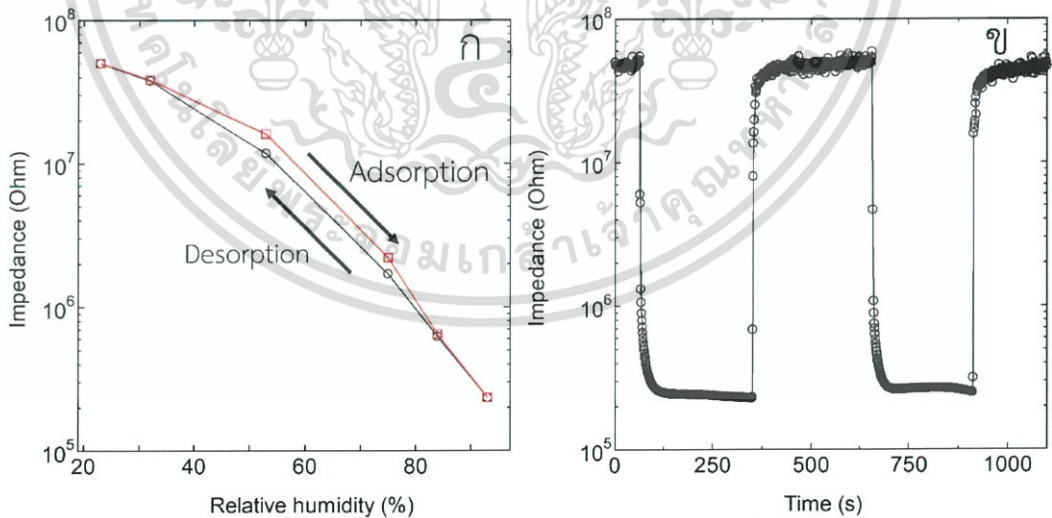
จากข้อมูลที่ผ่านมา อุปกรณ์วัดความชื้นกราฟีนออกไซด์บนฐานรองรับที่เป็นกระจกมีเงื่อนไขระยะเวลาเคลือบที่ดีที่สุดที่ 45 นาที แต่ในส่วนของอุณหภูมิฐานรองรับนั้น อุปกรณ์มีความสามารถในการตอบสนองที่ต่างกันเล็กน้อย ในเงื่อนไขต่อไปที่จะทำการศึกษาคือ การขึ้นรูปอุปกรณ์วัดความชื้นให้สามารถที่โค้งงอได้ จึงทำการเปลี่ยนฐานรองรับเป็นพลาสติก PEN และเลือกเงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับมาทำการตรวจสอบอีกครั้ง เพื่อดูผลของการโค้งงอที่มีต่ออุปกรณ์ซึ่งมีอุณหภูมิฐานรองรับขณะเคลือบที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพันธ์และความต้านทานเชิงซ้อนที่อุณหภูมิฐานรองรับแตกต่างกัน

ข้อมูลผลการตอบสนองต่อความชื้นของอุปกรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.57 แนวโน้มการตอบสนองต่อความชื้นของอุปกรณ์เป็นไปตามเงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับเป็นกระจกก่อนหน้า อย่างไรก็ตาม ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ มีความแตกต่างในการตอบสนองที่มากกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากฐานรองรับที่แตกต่างกัน ทำให้การเคลือบฟิล์มในชั้นแรกมีความแตกต่างกันบางส่วน ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มาจึงมีความแตกต่างกัน เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับ 100 °C ยังคงตอบสนองได้ไม่ค่อยดีแม้เปลี่ยนชนิดฐานรองรับแล้วก็ตาม

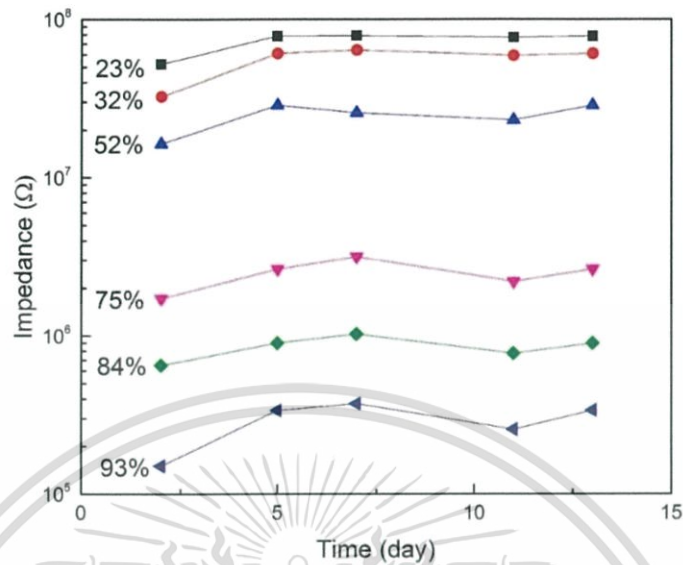


รูปที่ 4.55 อุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดความชื้นกราฟีนออกไซด์ที่ทำการวัด (ก) ฮิสเตอรีซิส และ (ข) ระยะเวลาตอบสนอง

ภาพถ่ายพื้นผิวของอุปกรณ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.58ก-ค พื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ที่เคลือบบนฐานรองรับพลาสติกเป็นลักษณะแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่ซ้อนทับกันเป็นระเบียบ ทำให้มีข้อบกพร่องใน

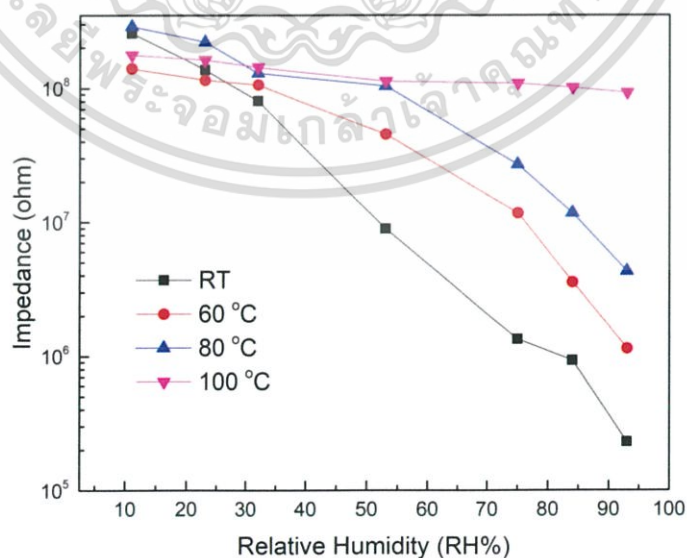
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเรียงตัวที่ต่ำกว่าเงื่อนไขที่ขึ้นฟิล์มบนฐานรองรับที่เป็นกระจก อาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าการตอบสนองของอุปกรณ์มีความแตกต่างกันมากกว่าเงื่อนไขฐานรองรับที่เป็นกระจก



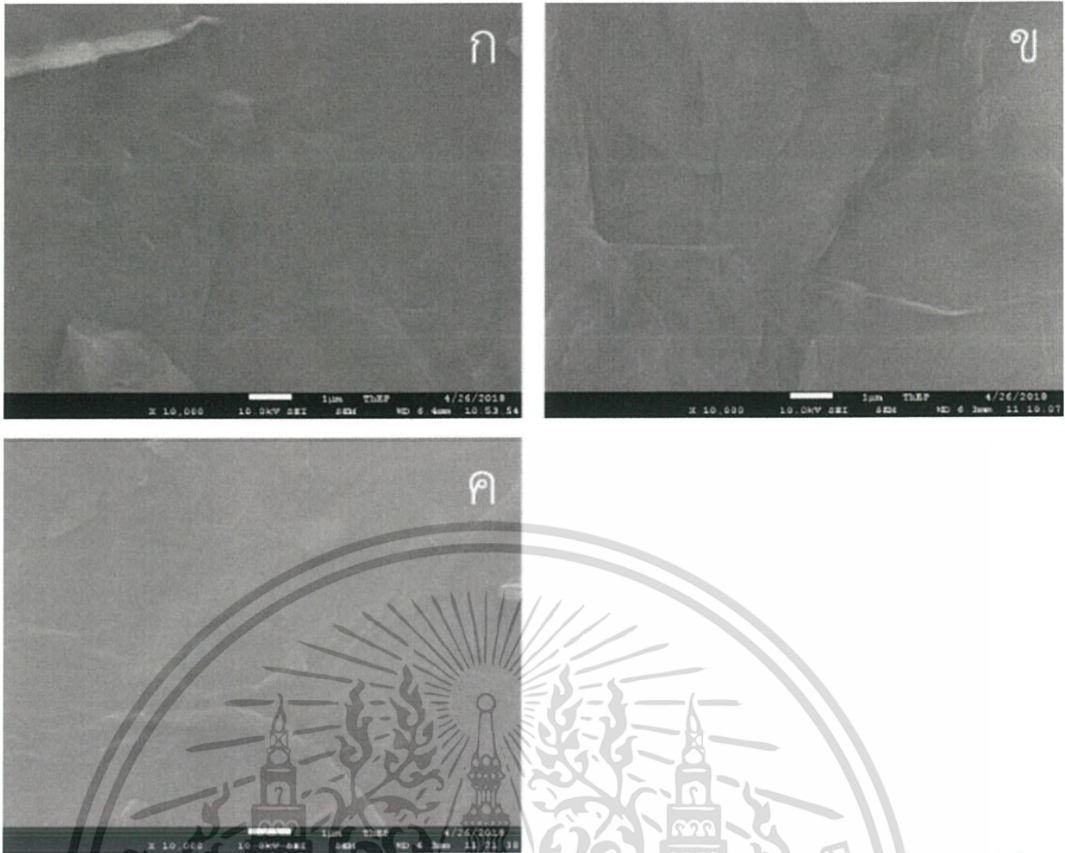
รูปที่ 4.56 การทดสอบระยะเวลาความทนทานของอุปกรณ์

การทะลุผ่านของอุปกรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.59ก อุปกรณ์ทั้งสามเงื่อนไขมีค่าการทะลุผ่านซึ่งรวมฐานรองรับ มากกว่า 60 % ในช่วง 450-800 นาโนเมตร ดังนั้นอุปกรณ์วัดความชื้นมีความโปร่งแสงในรูปเล็กเป็นภาพถ่ายอุปกรณ์จริงบนโลโก้ของหน่วยวิจัย อุปกรณ์ทำให้เห็นภาพมืดลง ในรูปที่ 4.59ข เป็นกราฟเปรียบเทียบฮิสเตอรีซิสของอุปกรณ์ทั้งสามเงื่อนไข โดยค่าฮิสเตอรีซิสของเงื่อนไขอุณหภูมิห้อง 60 °C และ 80 °C เป็น 3.53 % ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 83%, 7.72% ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% และ 2.87 % ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขอุณหภูมิห้องยังคงมีค่าการตอบสนองในช่วงความต้านทานเชิงซ้อนที่ดีกว่า



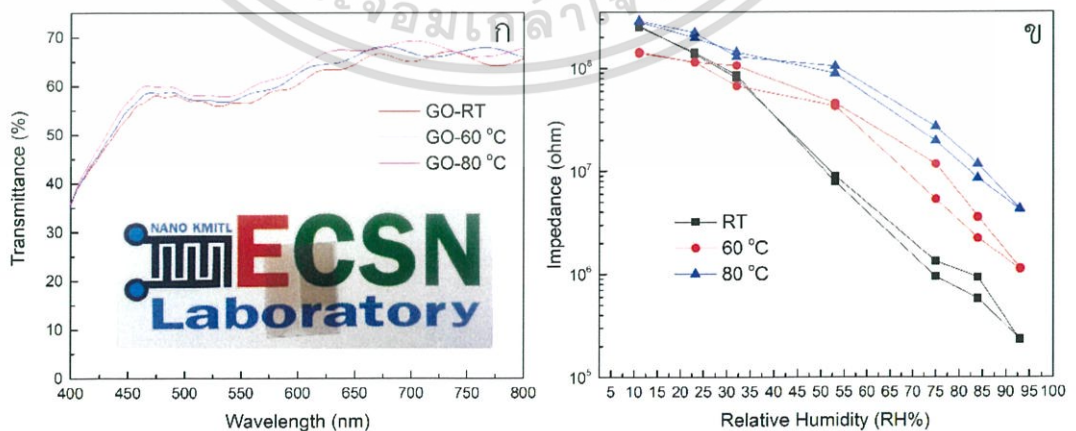
รูปที่ 4.57 การตอบสนองต่อความชื้นของอุปกรณ์วัดความชื้นบนฐานรองรับพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



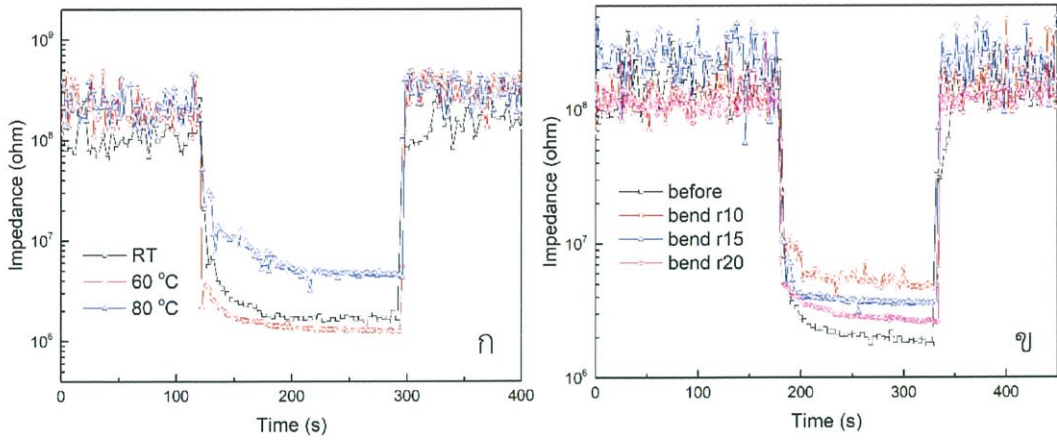
รูปที่ 4.58 ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยเทคนิค FE-SEM ของอุปกรณ์บนฐานรองรับพลาสติกที่เจือปนไ (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 60 °C และ (ค) 100 °C

ระยะเวลาในการตอบสนองคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงระหว่างความชื้นต่ำและความชื้นสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.60ก จากรูปสังเกตได้ว่า ระยะเวลาในการตอบสนองของอุปกรณ์มีค่าลดลงตาม อุณหภูมิฐานรองรับขณะเคลือบที่เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับผลการวัดของฟิล์มกราฟีนออกไซด์จาก เทคนิค XRD และ Raman ที่อธิบายไปในข้างต้น ในทางกลับกัน ระยะเวลาในการคืนตัวทั้งสาม เจือปนนั้นใกล้เคียงกันมาก ใช้เวลาการคืนตัวน้อยกว่า 2 วินาที ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระบบการวัด



รูปที่ 4.59 (ก) การทะลุผ่านของอุปกรณ์ในช่วง 400-800 นาโนเมตร และ (ข) กราฟฮิสเตอร์ซิสของ อุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

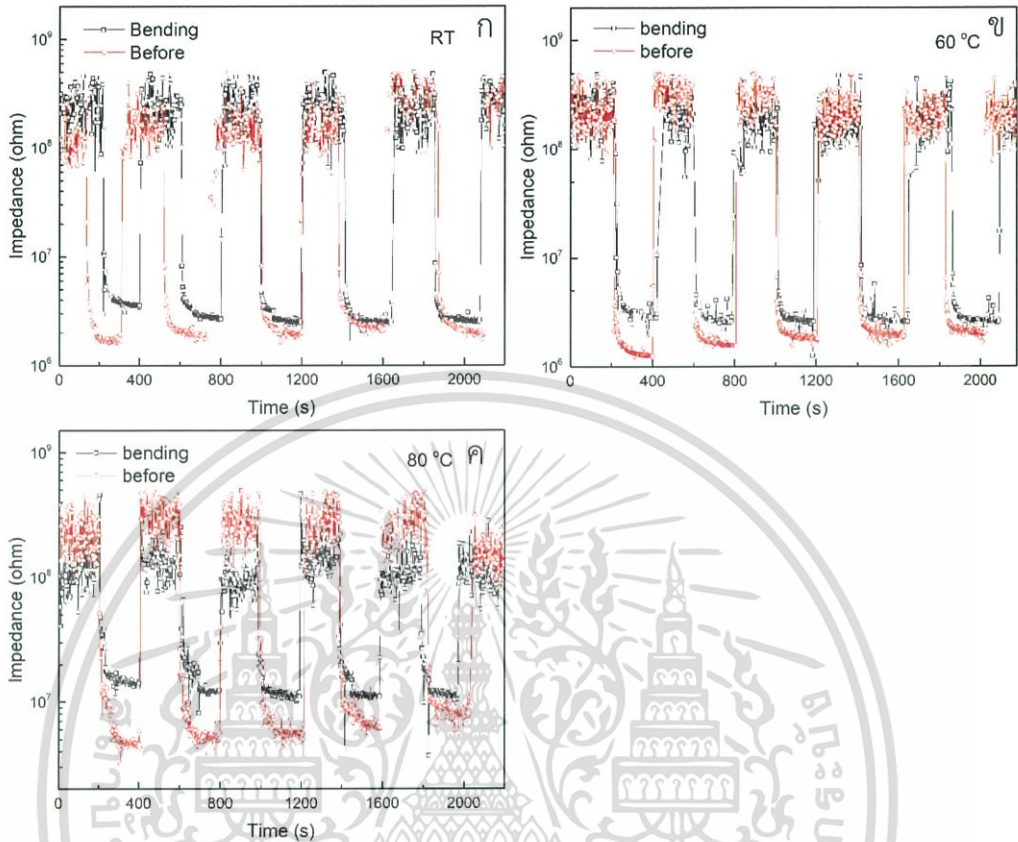


รูปที่ 4.60 อุปกรณ์วัดความชื้นที่ตรวจสอบระยะเวลาการตอบสนอง (ก) เจือ้นโซลิดโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์ และ (ข) เจือ้นโซลิดโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่มีการโค้งงอแตกต่างกัน

การทดสอบการโค้งงอของอุปกรณ์ที่วัดความชื้นที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.60 พบว่าค่าความชื้นที่น้อยลง (อุปกรณ์จะมีมุมโค้งงอมาก) จะทำให้ค่าการตอบสนองลดลง แต่มีค่าระยะเวลาตอบสนองที่เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าการตอบสนองที่ลดลงยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยังใช้เป็นอุปกรณ์วัดความชื้นได้ ดังนั้นอุปกรณ์จึงสามารถโค้งงอได้ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบการโค้งงอของอุปกรณ์ที่เจือ้นโซลิดโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์ในขณะเคลือบฟิล์มที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.61ก-ค สังเกตได้ว่า ทั้งสามเงื่อนไขสามารถใช้ซ้ำได้ถึงแม้จะมีการโค้งงอไปแล้ว อย่างไรก็ตาม ค่าการเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองที่เจือ้นโซลิดโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์มีค่าน้อยที่สุด โดยเมื่อทำการวัดไปช่วงหนึ่ง แทบจะมีการคืนตัวของค่าการตอบสนองใกล้เคียงกับค่าก่อนการโค้งงอ ดังนั้นจะเลือกเงื่อนไขในการทดสอบการโค้งงอที่แตกต่างกันออกไป

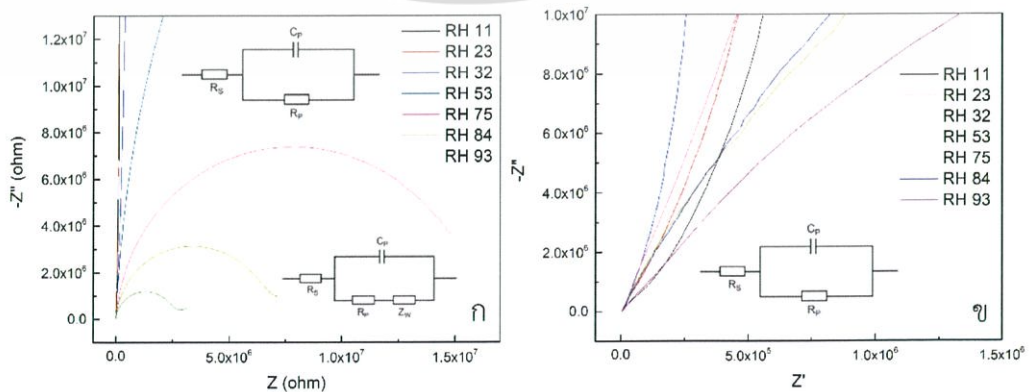
กลไกการตอบสนองของอุปกรณ์สามารถพิจารณาได้จากกราฟการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์ ในรูปที่ 4.62ก แสดงกราฟการตอบสนองของอุปกรณ์ก่อนทำการโค้งงอที่เจือ้นโซลิดโพลีเมอร์อิเล็กโทรไลต์เป็นอนุกรมที่มีลักษณะเป็นวงกลม ซึ่งจะสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลเป็นดังรูปที่แทรกด้านบน คือมี ค่า  $R_s$  ต่ออนุกรมกับ  $C_p$  และ  $R_p$  ที่ต่อขนานกัน โดย  $R_s$  เป็นค่าความต้านทานที่จุดสัมผัสทั้งหมด ซึ่งจากกราฟมีค่าน้อยมาก ๆ และเท่ากันทุกค่าความชื้นสัมพัทธ์ จึงสามารถตัดผลของจุดสัมผัสออกไปได้ ส่วนค่า  $C_p$  และ  $R_p$  แทนค่าการเก็บประจุและความต้านทานของฟิล์มกราฟีนออกไซด์ตามลำดับ เนื่องจากรูปวงกลมมีขนาดเล็กลงตามค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น  $R_p$  จึงมีค่าเล็กลงด้วย เป็นผลจากน้ำที่มาจับกับฟิล์มกราฟีนออกไซด์แล้วทำให้ฟิล์มลดระยะในการกระโดดระหว่างหมู่ฟังก์ชันของกราฟีน ทำให้น้ำไฟฟ้าได้ดีขึ้น จึงมีความต้านทานลดลง ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 84%-92% พบว่ากราฟมีหางบริเวณครึ่งวงกลม แสดงถึงการเกิดการนำแบบการแพร่ในอุปกรณ์ ทำให้อุปกรณ์มีการเติมอุปกรณ์ Warburg ลงไปแทนการแพร่ของน้ำ การแพร่เกิดขึ้นได้จากปริมาณน้ำจำนวนมากที่จับกันเป็นชั้นของน้ำทำให้สามารถแตกตัวได้ ในรูปที่ 4.62ข แสดงการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์หลังโค้งงอที่วัด 15 มิลลิเมตร กราฟของอุปกรณ์ตลอดทุกค่าความชื้นสัมพัทธ์มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงมีวงจรสมมูลแบบเดียว ค่า  $R_s$  ของอุปกรณ์ยังคงมีค่าใกล้เคียงค่าศูนย์เช่นเดียวกับก่อนทำการโค้งงอ ดังนั้นบริเวณจุดสัมผัสต่าง ๆ จึงไม่ใช่ปัจจัยที่ทำให้ค่าการตอบสนองเปลี่ยนไป แต่เมื่อสังเกตค่า  $R_p$  ซึ่งเป็นความต้านทานของกราฟีนออกไซด์มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ความต้านทานที่สูงขึ้นของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟีนออกไซด์อาจจะมาจากการเกิดการยึดตัวในแผ่นระนาบกราฟีน หรืออาจจะเกิดจากการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ จึงทำให้การเคลื่อนที่ประจุเกิดได้ยากขึ้น [93], [94]



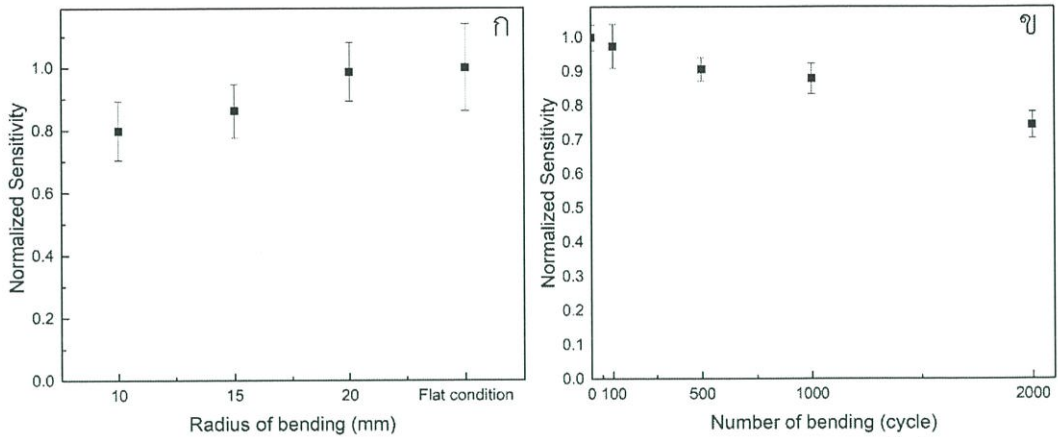
รูปที่ 4.61 การทดสอบโค้งงอของอุปกรณ์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับ (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 60 °C และ (ค) 80 °C

อุปกรณ์วัดความชื้นที่เกิดการโค้งงอในรัศมีที่แตกต่างกัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองและรัศมีการโค้งงอ ดังรูปที่ 4.63 รัศมีที่ทำการโค้งงอมีค่ามาก แทบจะไม่มีผลต่อการตอบสนองของอุปกรณ์ อย่างไรก็ตามเมื่อรัศมีเพิ่มไปจนถึง 15 มิลลิเมตร ทำให้อุปกรณ์มีค่าการตอบสนองลดลงเกือบ 20 % ซึ่งลดประสิทธิภาพของอุปกรณ์อย่างมาก



รูปที่ 4.62 การตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์ที่เงื่อนไข (ก) ก่อนโค้งงอ และ (ข) โค้งงอที่รัศมี 15 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.63 (ก) อุปกรณ์วัดความชื้นที่โค้งงอรัศมีต่างกัน และ (ข) ทดสอบจำนวนครั้งที่สามารถโค้งงอ

อุปกรณ์วัดความชื้นกราฟีนออกไซด์ถูกนำมาทำการโค้งงอติดต่อกันเพื่อทำการทดสอบความสามารถในการโค้งงอของอุปกรณ์โดยยึดเงื่อนไขรัศมีการโค้งงอที่ 20 มิลลิเมตร พบว่า ในช่วง 100 ครั้ง ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ยังมีมากกว่า 95 % และลดลงเรื่อย ๆ ตามจำนวนครั้งที่โค้งงอจนเหลือ 80 % ที่จำนวน 2000 ครั้ง ดังนั้นอุปกรณ์จึงสามารถโค้งงอได้มากกว่า 2000 ครั้ง

อุปกรณ์วัดความชื้นกราฟีนออกไซด์ที่พันเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตมีการตอบสนองที่สูงระยะเวลาตอบสนองคืนตัวที่รวดเร็ว มีช่วงการตอบสนองที่กว้าง เมื่อเทียบกับผลของงานวิจัยอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าอุปกรณ์มีคุณสมบัติที่ดีมาก นอกจากนี้ยังมีความโปร่งแสงและสามารถโค้งงอได้อีกด้วย

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบผลของอุปกรณ์วัดความชื้น [64]

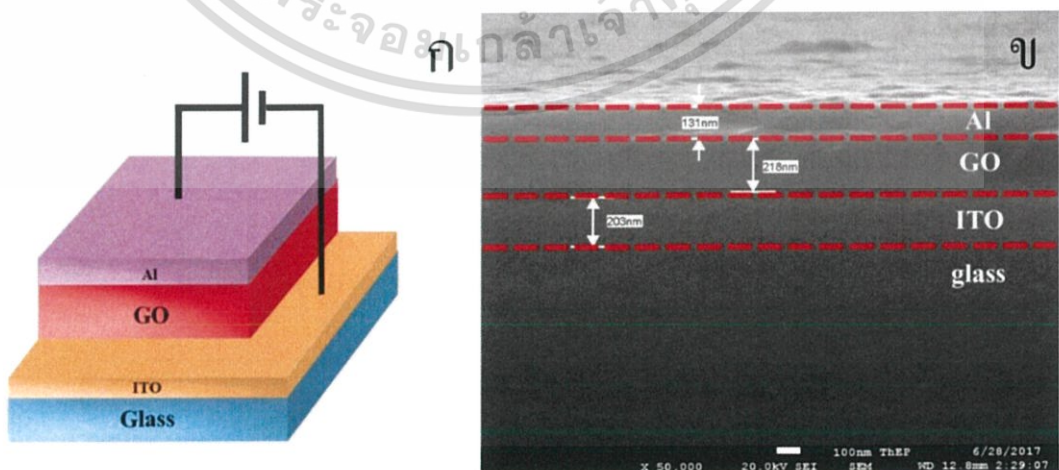
ปี ค.ศ.	วัสดุ	การขึ้นรูป	ลักษณะการตอบสนอง	การตอบสนอง	เวลาตอบสนอง (วินาที)	เวลาคืนตัว (วินาที)	ช่วงการตอบสนอง (%RH)	เอกสารอ้างอิง
2011	GO	จุ่มเคลือบ	ตัวเก็บประจุ	-95.6%	5	n/a	25-65	[50]
2011	GO-Si	หมุนเคลือบ	QCM	2610%	18	12	6.4-93.5	[51]
2012	กราฟีน	อบด้วยเอทานอล	การนำไฟฟ้า	3.33%	n/a	n/a	3-30	[52]
2012	GO	หยดด้วยอะตอม	SAW	20%	21	16	8-18	[53]
2012	GO	หมุนเคลือบ	ความเครียด	28.02 V/%RH	19	10	10-98	[54]
2013	GO	หยดเคลือบ/พันเคลือบ	ความต้านทาน	22.85%	41	10	15-95	[55]
2013	GO	พันเคลือบ	ตัวเก็บประจุ	3333%	0.03	0.02	30-80	[56]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี ค.ศ.	วัสดุ	การขึ้นรูป	ลักษณะการตอบสนอง	การตอบสนอง	เวลาตอบสนอง (วินาที)	เวลาคืนตัว (วินาที)	ช่วงการตอบสนอง (%RH)	เอกสารอ้างอิง
2014	rGO/PDDA	จุ่มเคลือบ	ความต้านทาน	37.43%	300	147	11-97	[57]
2014	GO:PSS	กรอง	ตัวเก็บประจุ	70%	57	21	0-80	[58]
2016	GO	หยดเคลือบ	ความต้านทานเชิงซ้อน	99.64%	17	5	11-93	This work
2017	GO	พ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต	ความต้านทานเชิงซ้อน	97.75%	11	8	11-93	This work

#### 4.7 อุปกรณ์หน่วยความจำที่เตรียมด้วยวิธีการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

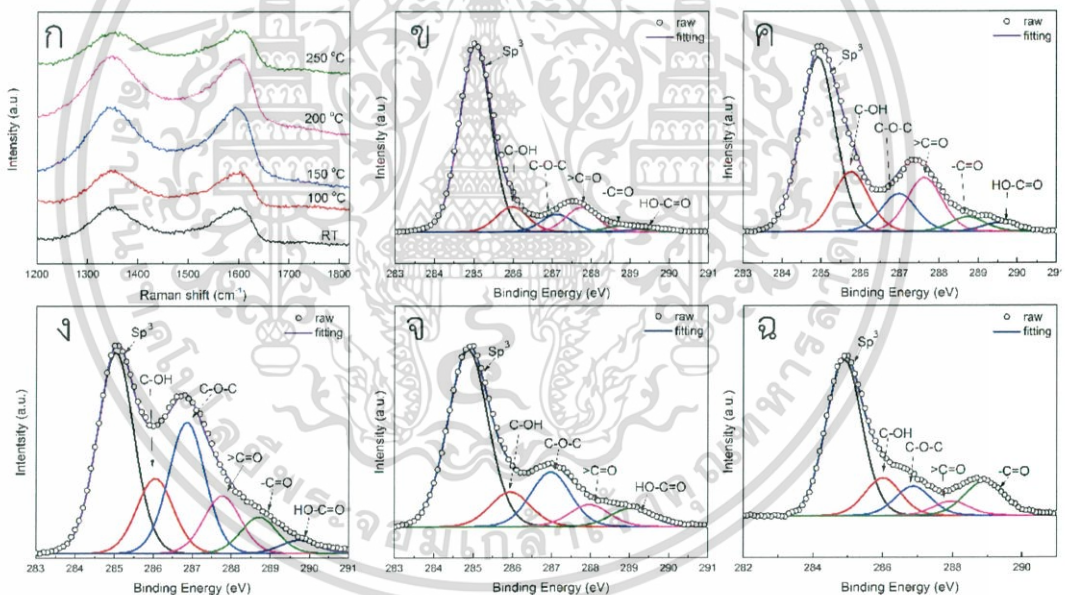
จากหัวข้อที่ผ่านมา พบว่า การพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์วัดความชื้นแบบโค้งงอได้ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์หน่วยความจำ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิฐานรองรับที่มีต่อการเกิดหน่วยความจำของอุปกรณ์ โครงสร้างที่เลือกใช้เป็นโครงสร้างแบบพื้นฐานที่มีชั้นหน่วยความจำชั้นเดียวประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทั้งสองฝั่ง โดยขั้วไฟฟ้าชั้นล่างเลือกใช้เป็นกระจกนำไฟฟ้า ITO ที่นำมาทำสวดลายเป็นเส้น จากนั้นทำการเคลือบฟิล์มลงไป แล้วขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าด้านบนจากการระเหยด้วยความร้อนเป็นขั้วอลูมิเนียม (Al) ได้โครงสร้างดังรูปที่ 4.64ก ความหนาของอุปกรณ์ตรวจสอบยืนยันด้วยภาพตัดขวางที่ถ่ายด้วยกล้อง FE-SEM ที่เงื่อนไขระยะเวลาเคลือบ 60 นาที และมีอุณหภูมิฐานรองรับเป็น 250 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.64ข พบว่าชั้นขั้วไฟฟ้า ITO หนาประมาณ 203 นาโนเมตร หรือรัศมีวงแหวนออกไซด์ และขั้วไฟฟ้า Al มีความหนาเป็น 203 นาโนเมตร 131 นาโนเมตร และ 216 นาโนเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.64 (ก) แผนผังโครงสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/GO/Al และ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของอุปกรณ์ด้วยกล้อง FE-SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มกราฟีนออกไซด์เจือปนไฮดรอกซีระยะเวลาเคลือบ 60 นาที และมีเจือปนไฮดรอกซีฐานรองรับขณะเคลือบที่ต่างกันซึ่งเคลือบบนฐานรองรับกระจกสามารถตรวจสอบลักษณะโครงสร้างและพันธะเคมีด้วยเทคนิครามานและเทคนิค XPS แสดงดังรูปที่ 4.65 โดยรูปที่ 4.65ก แสดงถึงยอดกราฟ D ที่ตำแหน่ง  $1350\text{ cm}^{-1}$  และยอดกราฟ G ที่ตำแหน่ง  $1600\text{ cm}^{-1}$  เจือปนไฮดรอกซีฐานรองรับขณะเคลือบทำให้อัตราส่วนทั้งสองนี้มีอัตราส่วนที่แตกต่างไป อัตราส่วนระหว่างยอดกราฟ I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> แสดงถึงปริมาณความบกพร่องที่พบในฟิล์มกราฟีนออกไซด์ และยังสัมพันธ์กับอัตราส่วน  $sp^3/sp^2$  อีกด้วย โดยอัตราส่วนยอดกราฟ I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> แต่ละเจือปนไฮดรอกซีแสดงในตารางที่ 4.14 พบว่า อุณหภูมิฐานรองรับขณะเคลือบที่  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีอัตราส่วนที่ต่ำที่สุด และอัตราส่วนมีค่าสูงสุดเมื่ออุณหภูมิฐานรองรับขณะเคลือบเป็น  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  อัตราส่วนของ I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> ที่สูงขึ้นจะแสดงแนวโน้มถึงปริมาณพันธะ  $sp^2$  ที่ลดลง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องไปยัง  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทำให้อัตราส่วนในฟิล์มลดลง มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนจากพันธะ  $sp^3$  ไปเป็น  $sp^2$  ได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปมากขึ้น ค่า I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> ที่สูงขึ้นแสดงถึงการเกิดข้อบกพร่องที่มากขึ้นในตัวฟิล์ม และมีแนวโน้มการลดลงของพันธะ  $sp^2$  อย่างไรก็ตาม ค่า I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> ที่เปลี่ยนไปนั้นอาจเกิดจากข้อบกพร่องในตัวฟิล์มจากการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบมากขึ้นจากอุณหภูมิของฐานรองรับในขณะเคลือบทำให้อัตราการระเหยของหยดสารขณะเคลือบรวดเร็วขึ้น ซึ่งจะลดระยะเวลาจัดเรียงตัวของฟิล์มในขณะเคลือบ



รูปที่ 4.65 ฟิล์มกราฟีนออกไซด์เจือปนไฮดรอกซีฐานรองรับที่ตรวจวัดด้วย (ก) เทคนิครามาน และเทคนิค XPS ความละเอียดสูงของ C 1s ที่เจือปนไฮ (ข) อุณหภูมิห้อง (ค)  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ง)  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ (จ)  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$

พันธะทางเคมีของฟิล์มกราฟีนออกไซด์แสดงได้ดังรูปที่ 4.65ข-จ โดยตรวจวัดที่ตำแหน่ง C 1s แบบความละเอียดสูงในเทคนิค XPS และแยกเป็นองค์ประกอบย่อยได้ 6 องค์ประกอบ ได้แก่ พันธะ  $sp^3$ , C-OH, C-O-C,  $>\text{C}=\text{O}$ ,  $-\text{C}=\text{O}$  และ  $\text{HO}-\text{C}=\text{O}$  ที่ตำแหน่ง 285.0 eV, 285.96 eV, 287.11 eV, 287.74 eV, 288.75 eV และ 289.47 eV ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงข้อบกพร่องและหมู่ฟังก์ชันจำนวนมากของกราฟีนออกไซด์ ปริมาณร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟของแต่ละยอดกราฟในทุกเจือปนไฮดรอกซีแสดงได้ดังตารางที่ 4.11 ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันลดลงตามปริมาณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

150 °C เป็นจุดที่มีปริมาณฟังก์ชันอีพอกไซด์เพิ่มขึ้น (C-O-C) อาจเกิดจากเป็นอนุมูลมีที่น้ำเริ่มระเหยออกจากฟิล์ม ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันบางส่วนเป็นหมู่อีพอกไซด์มากขึ้น จึงมียอดกราฟที่สูงขึ้น นอกจากนี้พันธะ  $sp^3$  มีค่าลดลงตามอุณหภูมิจนถึง 150 °C แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึง 250 °C การเปลี่ยนแปลงนี้อาจมาจากพันธะ  $sp^3$  ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชัน จากหมู่ไฮดรอกซิล (C-OH) ที่ใช้คาร์บอน 1 ตัวเป็นหมู่อีพอกไซด์ที่ใช้คาร์บอน 2 ตัว ทำให้ปริมาณพันธะ  $sp^3$  ของคาร์บอนลดลง หรือพันธะ  $sp^3$  บางส่วนอาจเกิดการคืนตัวเป็นพันธะ  $sp^2$  อย่างไรก็ตาม ข้อมูลจากรามานที่มีอัตราส่วน I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> สูงขึ้น จึงมีแนวโน้มที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันเป็นหลัก

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบด้วยการให้แรงดันไฟฟ้าแล้ววัดกระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์ รูปที่ 4.66 แสดงความสัมพันธ์ของกราฟแรงดันกับกระแสที่เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับที่ 250 °C โครงสร้าง ITO/GO/Al ในช่วงแรกที่จ่ายแรงดัน 0-5 โวลต์ พบว่า กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์มีค่าต่ำ แสดงถึงสถานะปิดของอุปกรณ์ เมื่อแรงดันมีค่าสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามไปด้วยจนกระแสสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วง 3-5 โวลต์ เรียกว่า ช่วง SET-ON หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงจากเดิมในช่วงแรงดันจาก 5 โวลต์ ถึง 0 โวลต์ เรียกว่าสถานะเปิด หลังจากนั้นอุปกรณ์ก็ยังคงรักษาสถานะเปิดไว้แม้ทำการจ่ายแรงดันกลับซ้ำให้กับอุปกรณ์ พฤติกรรมที่รักษาระดับกระแสไฟฟ้าไว้เรียกว่าอุปกรณ์หน่วยความจำแบบ WORM โดยค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าในสถานะเปิดต่อสถานะปิด เป็น  $2 \times 10^4$

สถานะเปิดและสถานะปิดจะนำมาทดสอบกับแบบจำลองทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมในการอธิบายกลไกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ รูปที่ 4.67k แสดงกลไกการนำไฟฟ้าแบบการผ่านทะลุโดยตรง (DT) และกลไกการนำไฟฟ้าการผ่านทะลุแบบ Fowler-Nordheim (FN) โดยทั่วไปกลไกการนำไฟฟ้าทั้งสองแบบนี้จะเกิดเมื่ออุปกรณ์มีความหนาในระดับไม่เกิน 8 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของอุปกรณ์ที่มีมากกว่า 200 นาโนเมตร ดังนั้นไม่น่าใช้แบบจำลองที่เหมาะสม ในรูปที่ 4.67x ในช่วงแรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ถึง 5 โวลต์ แสดงถึงกลไกการนำไฟฟ้าอีกแบบที่เหมาะสมคือ การนำไฟฟ้าแบบประจุปริภูมิจำกัดกระแส (SCLC) ซึ่งมีความชันประมาณ 15 ค่าความชันที่สูงกว่า 2 ในแบบจำลองแบบ SCLC แสดงถึงการเกิดการนำแบบ SCLC ที่มีกับดักประจุเป็นจำนวนมาก แต่แบบจำลองแบบ SCLC ยังไม่เพียงพอต่อการอธิบายในสถานะปิดที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ ๆ ดังนั้นแบบจำลองที่เหลือที่เป็นไปได้คือ แบบจำลองแบบกับดักประจุช่วยในการผ่านทะลุ (trap assisted tunneling; TAT) ซึ่งจะอธิบายถึงการผ่านทะลุระหว่างกับดักประจุจำนวนมากในอุปกรณ์ โดยสมการการอธิบายแบบจำลอง TAT สามารถเขียนในรูปอย่างง่ายได้เป็น [95]

ตารางที่ 4.14 ผลการตรวจวัดกราฟีนออกไซด์เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับด้วยเทคนิครามานและ XPS

อุณหภูมิฐานรองรับ	รามาน		XPS					HO-C=O
	D/G	$sp^3$	C-OH	C-O-C	>C=O	-C=O		
27	0.973	71.1	9.5	6.7	9.2	2.1	1.3	
100	0.950	49.9	17.2	10.8	15.4	4.2	2.5	
150	0.990	39.1	14.6	25.5	11.2	7.1	2.5	
200	0.973	57.9	11.3	17.8	7.1	n/a	6	
250	1.044	56.8	13.7	10.6	5.2	13.6	n/a	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J = \frac{2C_t N_t q \phi_t \exp\left[-\left(\frac{A}{E}\right)\phi_t^{3/2}\right]}{3E} \quad (4.16)$$

โดยที่  $\phi_t$  แทนค่าพลังงานของกับดักประจุ (trap energy)

$N_t$  แทนความหนาแน่นของกับดักประจุ (trap density)

$C_t$  แทนฟังก์ชันที่แตกต่างกันของพลังงานอิเล็กตรอน โดยมีค่าประมาณเป็น 1

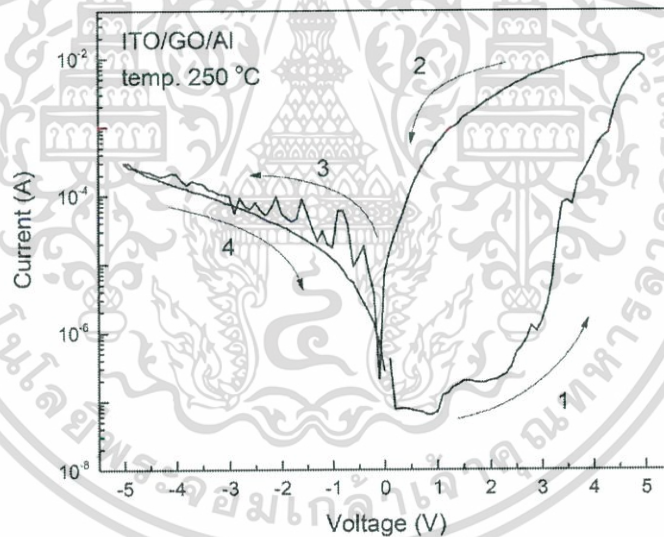
$q$  แทนค่าคงที่ของประจุ

และ  $A$  แทนค่าคงที่ของ  $4\sqrt{2}qm_0/3\hbar$  โดยที่  $m_0$  เป็นมวลของอิเล็กตรอน และ  $\hbar$  เป็นค่าคงที่ของพลังค์

สมการที่ (4.16) สามารถจัดรูปเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณได้เป็น

$$\ln(JE) = (-A)\phi_t^{3/2}\left(\frac{1}{E}\right) + \ln(G) \quad (4.17)$$

โดยที่  $G = (2/3)(C_t N_t q \phi_t)$



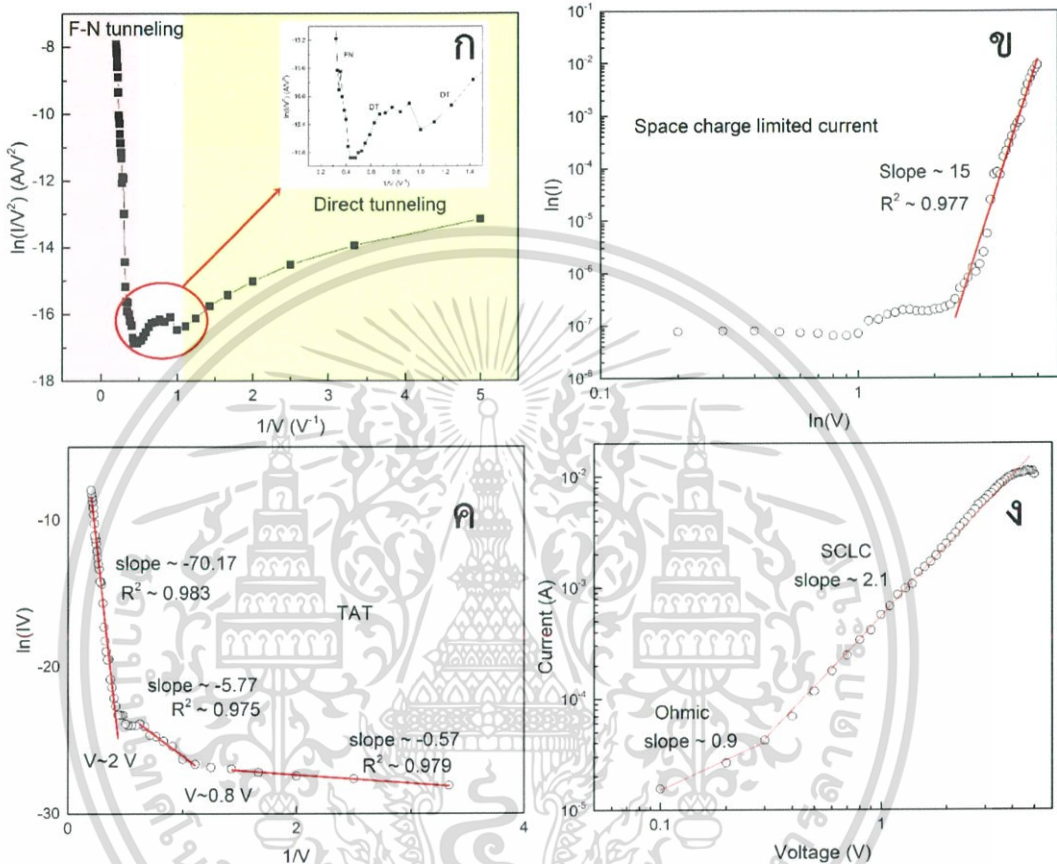
รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ของกราฟแรงดันกับกระแสของอุปกรณ์ที่เสื่อนโซลนโทรมิฐานรองรับ 250 °C

จากสมการที่ (4.17) หากเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(JE)$  กับ  $\left(\frac{1}{E}\right)$  จะได้ความสัมพันธ์

เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4.67ค ซึ่งมีค่าที่บอกความเป็นเชิงเส้น  $R^2$  สูงมากกว่า 0.97 ดังนั้นข้อมูลมีความเหมาะสมกับแบบจำลอง TAT นอกจากนี้ สมการที่ (4.17) ยังสามารถหาค่า  $\phi_t$  ได้จากความชันของกราฟและ หาค่า  $N_t$  ได้จากจุดตัดแกน y จากกราฟสังเกตได้ว่ามีค่าความชันของกราฟและจุดตัดแกน y ที่แตกต่างกัน 3 ค่า โดยค่าความชันลดลงเมื่อมีแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น แสดงถึงค่า พลังงานของกับดักประจุที่มากขึ้น และค่าความชันที่ลดลงยังแสดงถึงปริมาณความหนาแน่นของกับดักประจุที่ลดลง นอกจากนี้ ในสถานะเปิดของอุปกรณ์สามารถหาแบบจำลองที่เหมาะสมได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับกราฟให้มีความสัมพันธ์แบบ log-log พบว่าแบบจำลองทางไฟฟ้า กลไกการนำไฟฟ้าแบบโอห์ม และกลไกการนำไฟฟ้าแบบ SCLC เป็นกลไกที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.67 ในช่วงแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อย ความชันของกราฟมีค่าประมาณ 1 เป็นลักษณะกลไกการนำไฟฟ้าแบบโอห์ม และในช่วงที่แรงดันไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น ความชันของกราฟมีการเปลี่ยนเป็นค่าประมาณ 2 เป็นลักษณะกลไกการนำไฟฟ้าแบบ SCLC ที่ไม่มีกับดักประจุ (Trap free SCLC)



รูปที่ 4.67 แบบจำลองทางไฟฟ้าที่เหมาะสมกับอุปกรณ์โดยสถานะปิดแสดงถึงแบบจำลอง (ก) DT-FN (ข) SCLC (ค) TAT และสถานะเปิดแสดงถึงแบบจำลอง (ง) SCLC

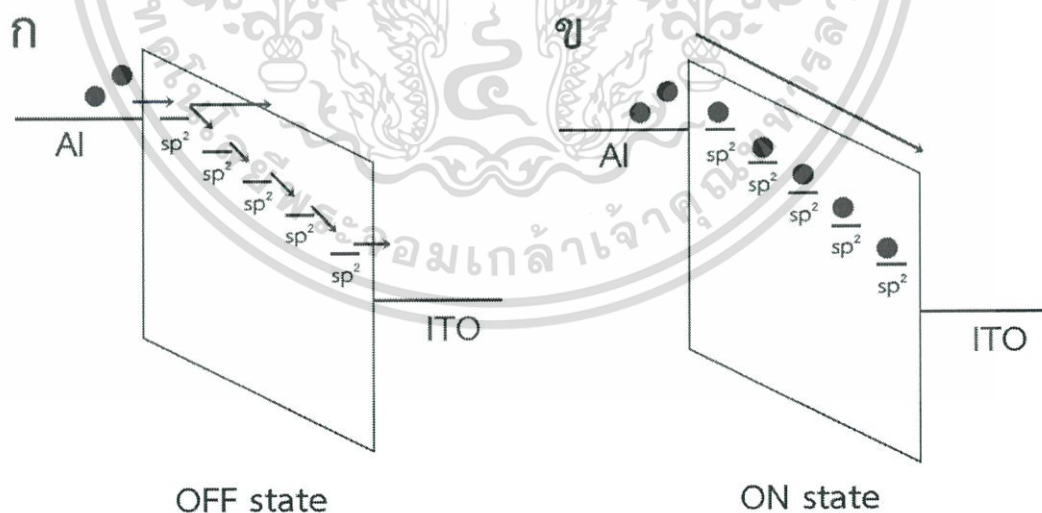
กลไกการนำไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงสถานะของอุปกรณ์ของสารตระกูลกราฟีนออกไซด์ยังไม่มีความเข้าใจในแบบจำลองที่แน่ชัด กลไกที่ใช้ในการอธิบายแบบจำลองของสารกราฟีนออกไซด์สามารถแบ่งได้เป็นสองกลไก คือ กลไกการนำแบบการก่อตัวของเส้นใยโลหะ (metallic filament formation) และกลไกการนำแบบการเคลื่อนที่ของออกซิเจนไอออนเนื่องจากสนามไฟฟ้า (field-assisted oxygen ion migration) [96]

กลไกการนำแบบการก่อตัวของเส้นใยโลหะ มีกลไกพื้นฐานมาจากการแพร่กระจายของขั้วไฟฟ้าเช่น ทองแดง แพลตตินัม อลูมิเนียม เป็นต้น เข้าไปยังชั้นฟิล์มของกราฟีนออกไซด์ เกิดเป็นเส้นทางการนำไฟฟ้าแบบเส้นใยโลหะขึ้น กลไกแบบนี้มักจะพบกลไกการนำไฟฟ้าแบบโอห์มในสถานะเปิด เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่มีกลไกการนำไฟฟ้าแบบ SCLC ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงไม่เหมาะสมกับอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกกลไกหนึ่งนั้นเป็นการอธิบายถึงการเคลื่อนที่ของไอออนออกซิเจน ซึ่งมีคำอธิบายเป็นสองแนวทาง คือ แนวทางแรกเป็นการอธิบายถึงบริเวณจุดสัมผัสของขั้วไฟฟ้าและชั้นฟิล์ม โดยมากมักพบในขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม เนื่องจากมักจะเกิดชั้นอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) บาง ๆ บริเวณรอยต่อของอุปกรณ์ อีกแนวทางในการอธิบายจะเป็นการอธิบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงระหว่างพันธะ  $\text{sp}^2$  และ  $\text{sp}^3$  ในฟิล์มกราฟีนออกไซด์ โดยปริมาณพันธะ  $\text{sp}^2$  ที่มากช่วยให้การนำไฟฟ้าของอุปกรณ์ดีขึ้น ในทางกลับกัน ปริมาณพันธะ  $\text{sp}^3$  ที่มากทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำลง

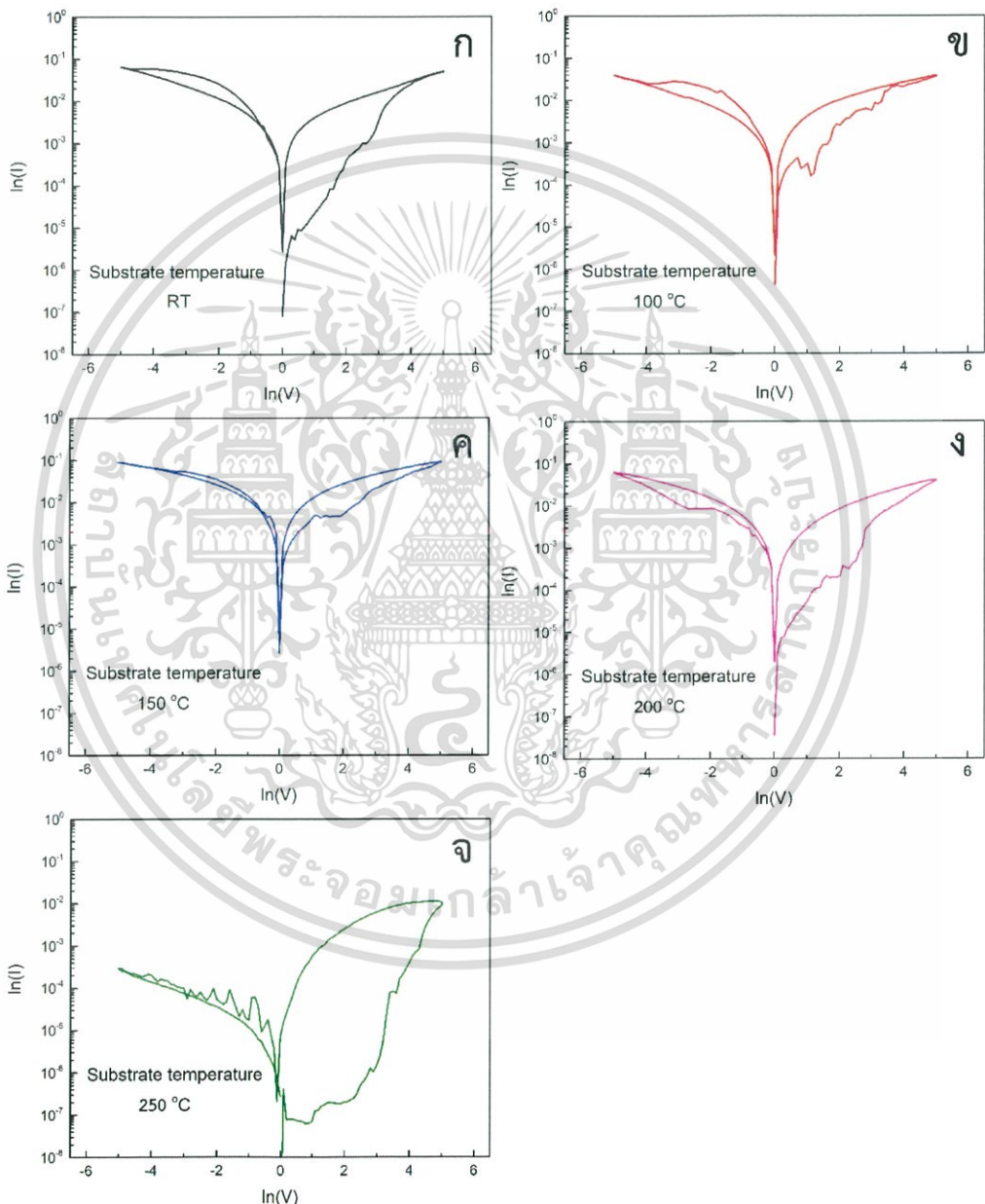
กลไกการเกิดชั้นฟิล์มอลูมิเนียมออกไซด์ที่รอยต่อบริเวณจุดสัมผัสระหว่างฟิล์มกราฟีนออกไซด์และขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมนั้นเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการนำไฟฟ้าแบบ FN และ DT ในสถานะปิดอย่างไรก็ตาม ในรูปที่ 4.67ก ในภาพเล็ก ๆ นั้น แสดงถึงการเกิดลักษณะการนำไฟฟ้าแบบ DT และ FT ที่มีความชันแตกต่างกัน แสดงถึงการเกิดชั้นฟิล์มที่แตกต่างกันตั้งแต่สองชั้นขึ้นไป การเกิดชั้นฟิล์มอลูมิเนียมออกไซด์ที่รอยต่อบริเวณจุดสัมผัสนั้นไม่เพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์นี้ ในงานวิจัยของ H. Seo et al. [97] ได้อธิบายลักษณะการเกิดกลไกการนำไฟฟ้าแบบ DT หลายครั้งว่าเกิดจากชั้นฟิล์มสองชั้น โดยการเกิด DT ครั้งแรกมาจากฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่บางกว่า 8 นาโนเมตรในงานวิจัยนี้ และการเกิดกลไกแบบ DT ครั้งที่สองมาจากการเคลื่อนที่ของไอออนออกซิเจนจากหมู่ฟังก์ชันเนื่องจากสนามไฟฟ้า โดยที่สนามไฟฟ้าประมาณใกล้ ๆ 1 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่เพียงพอสำหรับสามารถเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนออกซิเจนได้ นอกจากนี้ ยังได้พิสูจน์ว่าเมื่อฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความหนา 390 นาโนเมตร จะเกิดการเคลื่อนที่ไอออนมาก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มออกไซด์อีกชั้นได้ยาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลในงานนี้ที่มีความหนา 218 นาโนเมตร จึงไม่น่าเกิดชั้นออกไซด์อีกชั้นจากการเคลื่อนที่ไอออน แต่ที่น่าสนใจคือ จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงกลไกการนำไฟฟ้าระหว่าง DT และ FT ในงานนี้เกิดที่ประมาณ 0.8 โวลต์ ซึ่งอาจเกิดการเคลื่อนที่ไอออนได้บางส่วนใน



รูปที่ 4.68 แผนภาพแบบจำลองกลไกการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ (ก) สถานะปิดและ (ข) สถานะเปิด

นอกจากกลไกการนำไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว ยังมีอีกงานวิจัยที่น่าสนใจในการอธิบายการนำไฟฟ้าของกราฟีน E. W. Lim et al. [96] ได้นำเสนอกลไกแบบโพนอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายตัวช่วยในการผ่านทะลุของกราฟีนออกไซด์ (multiphonon trap-assisted tunneling; MTAT) เป็นการนำเสนอผลการสร้างแบบจำลอง (simulation) โดยอาศัยหลักการที่กราฟีนมีทั้งพันธะ  $sp^2$  และ  $sp^3$  โดยที่พันธะ  $sp^3$  มีแถบพลังงานที่กว้างกว่า ทำให้พันธะ  $sp^2$  ทำหน้าที่เหมือนกับดักประจุในฟิล์มกราฟีนออกไซด์ ซึ่งมีปริมาณมากพอที่จะเกิดการผ่านทะลุโดยตรงระหว่างพันธะ  $sp^2$  ด้วยกันไปยังอีกขั้วไฟฟ้าได้ และสามารถเกิดในลักษณะฟิล์มที่มีความหนามากกว่า 8 นาโนเมตรได้ แบบจำลองแบบนี้จึงเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับผลการทดลองในอุปกรณ์นี้ ดังรูปที่ 4.67ค ดังนั้นแบบจำลองจะทำการประยุกต์โดยอาศัยที่อธิบายไปข้างต้น



รูปที่ 4.69 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของอุปกรณ์ที่มีอุณหภูมิฐานรองรับขณะเคลือบที่ (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 100 °C (ค) 150 °C (ง) 200 °C และ (จ) 250 °C

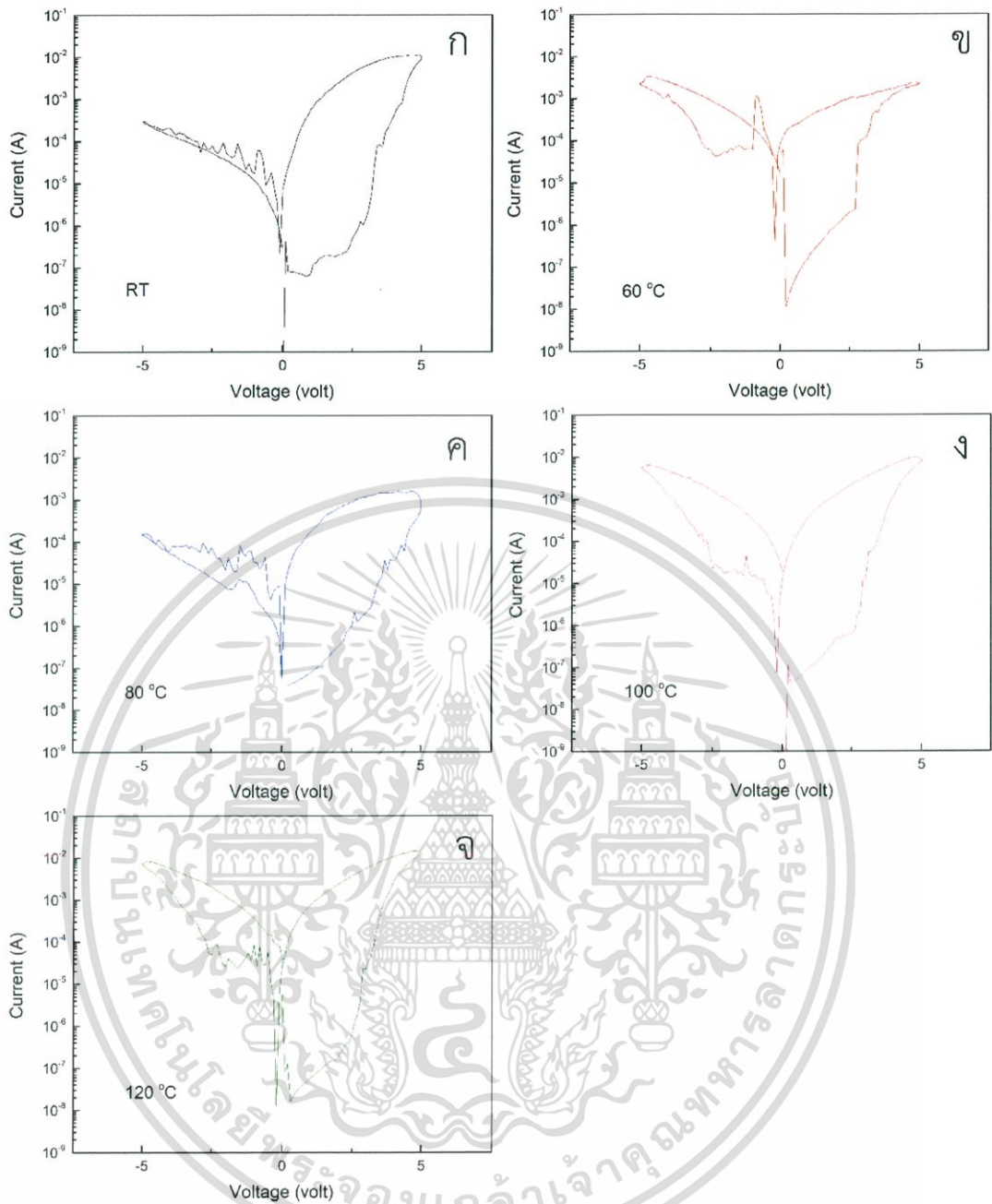
แบบจำลองกลไกการนำไฟฟ้าสามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.68 โดยเริ่มต้น ฟิล์มกราฟีนออกไซด์จะมีแถบพลังงานที่กว้างจากพันธะ  $sp^3$  และหมู่ฟังก์ชัน และมีพันธะ  $sp^2$  ที่กระจายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวในฟิล์มทำหน้าที่เป็นกับดักประจุในฟิล์มกราฟีนออกไซด์ โดยปริมาณพันธะ  $sp^2$  ที่มีจำนวนมาก ทำให้ระยะระหว่างพันธะ  $sp^2$  มีค่าน้อยพอที่จะเกิดการผ่านทะลุโดยตรงได้ ดังนั้นในช่วงเริ่มต้นประจุ จะเกิดการผ่านทะลุโดยตรงไปยังขั้วไฟฟ้าอีกฝั่ง แสดงได้ดังรูปที่ 4.68g เมื่อมีแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น ประมาณ 1 โวลต์ ไอออนออกซิเจนจากหมู่ฟังก์ชันจะเกิดการเคลื่อนที่ได้บางส่วน ทำให้ระยะระหว่างพันธะ  $sp^2$  มีค่าลดลง จึงเกิดการนำไฟฟ้าแบบ TAT ได้ดีขึ้น เมื่อมีประจุไหลเข้าไปในฟิล์ม กราฟีนออกไซด์มากกว่าความสามารถในการกระจายตัวของประจุในฟิล์มจะเกิดประจุปริภูมิขึ้น แล้วประจุจะไปเติมเต็มในกับดักประจุ ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าแบบ trap SCLC ผสมกับ TAT ในช่วงแรงดันไฟฟ้า 2 โวลต์ถึง 5 โวลต์ เมื่อกับดักประจุมีการเติมจนเต็ม ทำให้ประจุสามารถนำไฟฟ้าแบบ trap free SCLC เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.68ข อุปกรณ์จะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนเป็นสถานะเปิดในอุปกรณ์ และยังคงค้างที่สถานะเปิด เนื่องจากมีประจุที่ยังคงค้างในฟิล์มกราฟีนออกไซด์ อย่างไรก็ตาม บางครั้งเมื่อมีการจ่ายแรงดันกลับทิศทาง จะทำให้ประจุบางส่วนหลุดจากกับดักประจุได้ ดังนั้นจึงสามารถเกิดค่าฮิสเตอร์ซิซขนาดเล็กได้

แบบจำลองการนำไฟฟ้าที่ได้กล่าวไปนั้นมีปริมาณพันธะ  $sp^2$  และ  $sp^3$  เป็นปัจจัยหลักในการเกิดกลไกการนำไฟฟ้า ดังนั้นปริมาณอัตราส่วนของพันธะทั้งสองที่แตกต่างกันจึงควรจะมี ความสามารถในการนำไฟฟ้าในสถานะปิดที่แตกต่างกัน โดยปริมาณพันธะ  $sp^2$  ที่มากขึ้นควรจะนำ ไฟฟ้าได้มากขึ้น นอกจากนี้ การนำไฟฟ้าในสถานะเปิด นั้นเป็นการนำไฟฟ้าแบบ trap free SCLC ซึ่ง จะไม่ขึ้นกับปริมาณประจุ จึงควรมีค่าที่ใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไขของกราฟีนออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตาม ช่วงในการเปลี่ยนสถานะนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณกับดักประจุ ดังนั้น ถ้ามีกับดักประจุน้อยกว่าจะมี แนวโน้มที่จะใช้พลังงานในการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่า โดยข้อมูลเหล่านี้สามารถยืนยันได้ ด้วยการศึกษารูปร่างของกราฟของฐานรองรับขณะเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน ที่เงื่อนไขระยะเวลาเคลื่อนที่ 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.69 ก-จ สังเกตได้ว่า ในช่วงสถานะเปิด นั้นค่ากระแสไฟฟ้าจะอยู่ในช่วง ประมาณ  $10^{-2}$  A ใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไข ซึ่งสอดคล้องกับการนำไฟฟ้าแบบ trap free SCLC ในส่วนของสถานะปิดของอุปกรณ์ แต่ละเงื่อนไขมีความแตกต่างกันของกระแสไฟฟ้าอย่างเห็นได้ชัด เมื่อรวมกับผลจากการวิเคราะห์ของเทคนิครามานและ XPS พบว่า เงื่อนไขที่มีอัตราส่วน พันธะ  $sp^3/sp^2$  ที่ต่ำกว่า จะสามารถนำไฟฟ้าในสถานะปิดได้ดีกว่า ทำให้มีค่าอัตราส่วนกระแส สถานะเปิดต่อสถานะปิดที่ต่ำกว่า โดยเงื่อนไขของอุณหภูมิฐานรองรับ  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีค่าอัตราส่วนกระแสที่สูง ที่สุด สอดคล้องกับค่า  $I_{on}/I_{off}$  ของรามานที่แสดงถึงอัตราส่วน  $sp^3/sp^2$  สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับ แบบจำลองไฟฟ้าที่ใช้อธิบายกลไกการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์

อุปกรณ์หน่วยความจำเงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับที่  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีค่าอัตราส่วนกระแสไฟฟ้าใน สถานะเปิดต่อสถานะปิดสูงที่สุด จึงเลือกมาทำการทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ ของอุปกรณ์ รูปที่ 4.70ก-จ เป็นการทดสอบวัดอุปกรณ์หน่วยความจำที่อุณหภูมิขณะทำการวัดที่แตกต่างกัน โดย อุปกรณ์หน่วยความจำที่ใช้วัดจะเป็นคนละเซลล์กัน เนื่องจากอุปกรณ์เป็นแบบ WORM ซึ่งสามารถวัด ค่าได้ครั้งเดียว ผลพบว่า อุปกรณ์สามารถใช้ได้ถึงอุณหภูมิ  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยมีกราฟความสัมพันธ์ของ แรงดันและกระแสที่ไม่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามความต่างศักย์ในช่วง SET ON มีค่า น้อยลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น อธิบายได้จากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะช่วยทำให้ไอออนมีพลังงานมากขึ้น ทำให้พลังงานที่ต้องใช้ในการเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนออกซิเจนลดต่ำลง [96] ดังนั้นจึงนำไฟฟ้าได้ ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองทางไฟฟ้าของอุปกรณ์

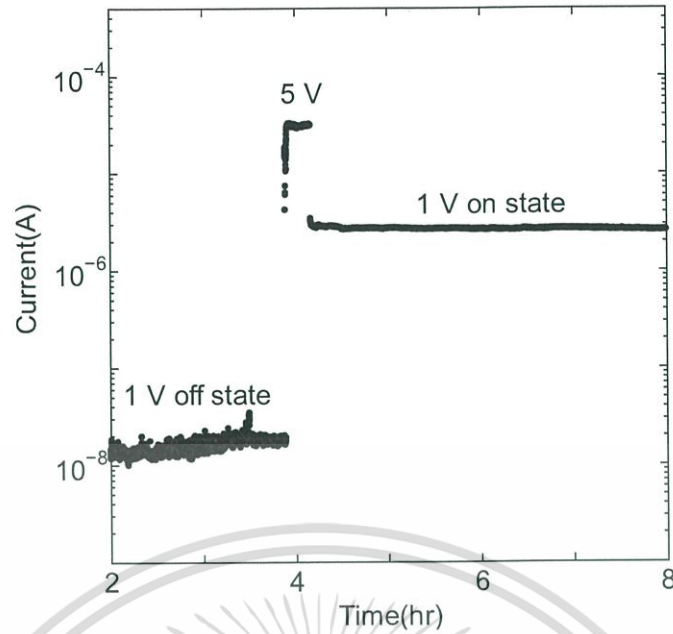
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับขณะเคลือบ 250 °C โดยมีอุณหภูมิขณะทำการตรวจวัดเป็น (ก) อุณหภูมิห้อง (ข) 60 °C (ค) 80 °C (ง) 100 °C และ (จ) 120 °C

อุปกรณ์หน่วยความจำยังได้ทดสอบคุณสมบัติอ่านเขียน โดยเลือกแรงดันไฟฟ้าในการอ่านและเขียนที่ 1 โวลต์ และ 5 โวลต์ตามลำดับ และทำการอ่านข้อมูลทุก ๆ ระยะเวลา 300 มิลลิวินาที แสดงได้ดังกราฟที่ 4.71 ซึ่งอุปกรณ์สามารถอ่านต่อได้ในแต่ละสถานะได้มากกว่า 3 ชั่วโมง (~ 10<sup>4</sup> วินาที) และสามารถเก็บรักษาข้อมูลได้สองสถานะ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์หน่วยความจำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.71 การทดสอบอ่านเขียนในอุปกรณ์หน่วยความจำ

อุปกรณ์หน่วยความจำที่มีกราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.15 อุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างด้วยการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสวิตได้ อุปกรณ์หน่วยความจำที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับวัสดุกราฟีนออกไซด์ด้วยกัน นอกจากนี้ยังนำเสนอแบบจำลองการนำไฟฟ้า แบบ TAT มาอธิบายกลไกการนำไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ แสดงให้เห็นว่า สามารถใช้ทั้งกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มาสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำได้ โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพันธะ  $sp^2/sp^3$  ของฟิล์ม อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่เป็นวัสดุโพลีเมอร์ ยังคงมีพลังงานในจุดเปลี่ยนสถานะที่สูงกว่า

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ [64]

วัสดุ	ขั้วไฟฟ้า	กระบวนการ	ชนิด	จุดเปลี่ยนสถานะ (V)	อัตราส่วนสถานะเปิดต่อปิด	ระยะเวลาเสถียรในการอ่านข้อมูล (s)	กลไกไฟฟ้า
GO	บน : Cu ล่าง : Pt	การกรอง	สองขั้ว	1	20	$10^4$	เส้นใยโลหะ
GO	บน : Al ล่าง : Al	หมุนเคลือบ	สองขั้ว	2.5	$10^2$	$10^5$	เส้นใยโลหะ
GO	บน : Al ล่าง : Al	หมุนเคลือบ	สองขั้ว	n/a	n/a	n/a	เส้นใยโลหะ
GO	บน : LiF/Al ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	WORM	3	$10^4$	n/a	SCLC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ	ขั้วไฟฟ้า	กระบวนการ	ชนิด	จุดเปลี่ยนสถานะ (V)	อัตราส่วนสถานะเปิดต่อปิด	ระยะเวลาเสถียรในการอ่านข้อมูล (s)	กลไกไฟฟ้า
GO	บน : Al ล่าง : ITO	สารละลาย	สองขั้ว	4	$10^3$	n/a	SCLC
GO	บน : Au ล่าง : Al	สารละลาย	สองขั้ว	2	$10^5$	n/a	SCLC
GO:PI	บน : Ag ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	สองขั้ว	3.5	$10^5$	$10^3$	SCLC
GNFs-PVA	บน : Ag ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	ขั้วเดียว	1.5	$10^2$	$10^4$	SCLC
GO-BCP	บน : Al ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	WORM	8	$10^5$	$10^4$	SCLC, PF
GO-terracene	บน : Au ล่าง : Au	หยดเคลือบ	สองขั้ว	3	$10^2$	5	TE,PF
RGO	บน : ITO ล่าง : ITO	Sol-gel	ขั้วเดียว	3-21	$10^5$	10 years	Ohmic,TE,SE
GO-DMF	บน : Al ล่าง : ITO	หยดเคลือบ	สองขั้ว	3	$10^2$	n/a	pyridinium N doped PrGODMF
GO-PVK	บน : Al ล่าง : ITO	ขึ้นรูปด้วย โทลูอีน	สองขั้ว	2	$10^3$	$10^4$	HOMO,LU MO
TRAMPAM-GO	บน : Al ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	สองขั้ว	1	$10^3$	10800	HOMO,LU MO
GO-PFZ	บน : Al ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	สองขั้ว	1.3	$10^3$	10800	HOMO,LU MO
GO:PVP	บน : Al ล่าง : ITO	หมุนเคลือบ	WORM	5	$10^4$	$10^7$	TE,SCLC
GO	บน : Al ล่าง : ITO	พ่นเคลือบ ด้วยไฟฟ้า สถิต	WORM	5	$10^4$	14400	TAT,SCLC

SCLC: ประจุปริภูมิจำกัดกระแส, PF: การปล่อยแบบ Poole-Frenkel, TE: การปลดปล่อยแบบเทอร์มไอออนิก, SE: การปล่อยแบบ Schottky

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

### 5.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธี modified Hummer's method

การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธี modified Hummer's method สังเคราะห์จากแกรไฟต์ได้เป็นสารกราฟีนออกไซด์ โดยยืนยันผลการสังเคราะห์ด้วยเทคนิครามานและ XPS กราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่สูงเมื่อเทียบกับกราฟีนออกไซด์ที่ขายทางการค้า

### 5.2 อุปกรณ์วัดความชื้นด้วยกระบวนการหยุดเคลื่อน

อุปกรณ์วัดความชื้นเป็นการนำกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบประยุกต์เป็นอุปกรณ์วัดความชื้นโดยใช้กระบวนการหยุดเคลื่อน เงื่อนไขในการหยุดเคลื่อนที่ดีที่สุดอยู่ที่การหยุดเคลื่อน 5 ครั้ง อุปกรณ์สามารถตอบสนองได้ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 11-93 % มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้น โดยมีค่าการตอบสนองเป็น 99.71% มีความเร็วในการตอบสนองและการคืนตัวเป็น 17 วินาที และ 5 วินาที ตามลำดับ มีฮิสเทอรีซิสของอุปกรณ์  $\pm 3.64\%$  และอธิบายกลไกการนำไฟฟ้าด้วยการตอบสนองเชิงความถี่ พบว่ามีกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดและน้ำช่วยในการลดความต้านทานของอุปกรณ์ ดังนั้นสารกราฟีนออกไซด์สามารถใช้เป็นอุปกรณ์วัดความชื้นอย่างง่ายได้ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่าอุปกรณ์ประสิทธิภาพสูงกว่างานวิจัยอื่น ๆ รวมทั้งมีโครงสร้างที่เรียบง่าย เหมาะกับการนำไปพัฒนาใช้งานต่อไป

### 5.3 อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/EVA:rGO/ITO

อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/EVA:rGO/ITO เป็นโครงสร้างที่นำกราฟีนออกไซด์ทำการผสมกับ EVA ซึ่งทำหน้าที่เป็นกาวในการยึดติดขั้ว ITO ทั้งสองฝั่ง โดยขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีดร้อน ซึ่งกระบวนการรีดร้อนนี้ทำได้ง่ายโดยใช้เครื่องรีดบัตรธรรมดา เป็นเทคนิคในการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้างที่มีสารกราฟีนเป็นพื้นฐานด้วยกระบวนการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน อุปกรณ์ที่ได้เป็นอุปกรณ์หน่วยความจำประเภท WORM เก็บข้อมูลได้ 2 สถานะโดยมีเงื่อนไขความเข้มข้นที่ดีที่สุดคือ 4 % โดยน้ำหนัก อุปกรณ์ที่ได้มีความโปร่งแสง 60% ในช่วง 450-800 นาโนเมตร มีค่าอัตราส่วนสถานะเปิดต่อปิดประมาณ  $5 \times 10^4$  อุปกรณ์สามารถทนความร้อนได้ถึง 80 °C และสามารถอ่านต่อเนื่องได้นานกว่า  $10^4$  วินาที กลไกของอุปกรณ์สามารถอธิบายด้วยกลไกการเกิดเส้นใยโลหะที่มาจากตัว rGO มาต่อกัน สารผสม EVA:GO สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์หน่วยความจำแบบโปร่งแสงได้ ทั้งเป็นโครงสร้างที่สามารถทำได้ง่ายด้วยเครื่องรีดบัตรทั่วไป รวมถึงราคาวัสดุ EVA ที่มีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

### 5.4 อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/PVP:GO/Al

อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/PVP:GO/Al เป็นโครงสร้างที่นำกราฟีนออกไซด์ทำการผสมกับ PVP แล้วขึ้นรูปด้วยการหมุนเคลือบ และระเหยขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมด้วยกระบวนการระเหย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยความร้อน อุปกรณ์ที่ได้สามารถใช้เก็บข้อมูลได้สองสถานะ และเป็นหน่วยความจำประเภท WORM เงื่อนไขความเข้มข้นที่ดีที่สุดอยู่ที่ 4 % โดยน้ำหนักซึ่งจะมีค่าอัตราส่วนของสถานะเปิดต่อสถานะปิดเป็น  $10^4$  อุปกรณ์สามารถอ่านต่อเนื่องกันได้นานกว่า  $10^7$  วินาที โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในการอ่านและเขียนข้อมูลที่ 1 โวลต์และ 5 โวลต์ ตามลำดับ กลไกของอุปกรณ์อธิบายได้ด้วยแผนภาพแถบพลังงาน โดยมีสารกราฟีนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นกับดักประจุ ดังนั้นสารผสมกราฟีนออกไซด์และ PVP สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้างโพลีเมอร์ราคาถูกได้ และมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับโครงสร้างวัสดุผสมที่มีราคาสูงในงานวิจัยอื่น

## 5.5 การสร้างฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์และการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์วัดความชื้นและอุปกรณ์หน่วยความจำที่ผ่านมาเป็นการทดสอบการนำไปประยุกต์ใช้งานของสารกราฟีนออกไซด์ ในหัวข้อนี้จะเป็นการเสนอวิธีการขึ้นรูปฟิล์มกราฟีนออกไซด์แบบใหม่โดยใช้ระบบการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตซึ่งมีการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม สารกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ถูกแพร่กระจายในสารผสมบิวทิลคาร์บิโธลและเอทานอลซึ่งสารผสมกันที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร ทำให้ได้สารกราฟีนออกไซด์ที่มีความเสถียรสูง แล้วพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อให้ได้ฟิล์มกราฟีนออกไซด์โดยเงื่อนไขระยะเวลาในการเคลือบทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาเป็นสมการเส้นตรง ทำให้สามารถควบคุมความหนาได้ และเงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองรับขณะเคลือบทำให้สารกราฟีนออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชัน ทำให้สามารถปรับหมู่ฟังก์ชันและรีดิวซ์เป็นสารรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้ในขณะเคลือบได้ทันทีโดยไม่ต้องมีกระบวนการรีดิวซ์เพิ่มเติม นอกจากนี้ยังมีการทดสอบการขยายขนาดฟิล์มโดยใช้ฐานรองรับที่เคลื่อนที่ได้ พบว่าฟิล์มกราฟีนออกไซด์สามารถที่จะขยายขนาดได้ โดยมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ยืนยันผลการทดลองด้วยภาพถ่ายจากกล้อง FE-SEM ดังนั้นเทคนิคนี้จึงเหมาะที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ที่สามารถปรับโครงสร้างทางเคมีและความหนาได้ โดยระดับการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถเลือกได้จากการปรับอุณหภูมิฐานรองรับโดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการอื่นเพิ่มเติม

## 5.6 อุปกรณ์วัดความชื้นจากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิต

จากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มกราฟีนออกไซด์ได้ ดังนั้นในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบนำฟิล์มที่ใช้กระบวนการดังกล่าวมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์วัดความชื้น โดยในส่วนแรกทดสอบบนฐานรองรับที่เป็นกระจกนำไฟฟ้า ITO พบว่า เงื่อนไขที่สามารถใช้เป็นอุปกรณ์วัดความชื้นที่ดีที่สุดอยู่ที่ระยะเวลาเคลือบ 45 นาทีที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งทำให้อุปกรณ์สามารถตอบสนองได้ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 11-93 % มีค่าการตอบสนองเป็น 97.75% และความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนอง ระยะเวลาการตอบสนองและคืนตัวเป็น 11 วินาทีและ 8 วินาที ตามลำดับ ค่าฮิสเทอรีซิสมีค่า  $\pm 2.99$  % ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53 % นอกจากนี้ยังมีการทดสอบเคลือบบนฐานรองรับพลาสติก (PEN) นำไฟฟ้า ITO พบว่าอุปกรณ์มีความโปร่งแสงที่ 60 % ในช่วง 450-800 นาโนเมตร โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดเป็นเงื่อนไขเดียวกับบนกระจก นอกจากนี้อุปกรณ์เมื่อนำไปทดสอบการโค้งงอพบว่าคุณสมบัติของอุปกรณ์เปลี่ยนไปเล็กน้อย โดยสามารถโค้งงอได้มากที่สุดที่รัศมี 10 มิลลิเมตร และสามารถโค้งงอได้มากกว่า 2000 รอบ โดยที่ยังสามารถใช้งานได้ ดังนั้นอุปกรณ์วัดความชื้นกราฟีนออกไซด์ที่พ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตมีความโปร่งแสงและเป็นอุปกรณ์โค้งงอได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์มีคุณภาพสูงเมื่อเทียบกับโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ในงานวิจัยอื่น ๆ เหมาะกับการพัฒนาเพิ่มเติม

## 5.7 อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/GO/Al

กราฟีนออกไซด์ที่พันเคลือบด้วยไฟฟ้ายังมีการทดสอบประติขันธ์เป็นอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้าง ITO/GO/Al โดยใช้กระบวนการนี้ในขั้นตอนการขึ้นรูปกราฟีนออกไซด์ พบว่าอุปกรณ์สามารถใช้เก็บหน่วยความจำได้สองสถานะ เป็นลักษณะ WORM และสามารถใช้เป็นอุปกรณ์หน่วยความจำได้ทั้งกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยมีอัตราส่วนสถานะเปิดต่อสถานะปิดประมาณ  $10^4$  มีแรงดันไฟฟ้าในการอ่านเขียนข้อมูลที่ 1 โวลต์และ 5 โวลต์ตามลำดับสามารถอ่านต่อเนื่องได้มากกว่า  $10^4$  วินาที อุปกรณ์สามารถใช้งานได้ถึงอุณหภูมิ  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  กลไกการทำงานอธิบายได้ด้วยแผนภาพแถบพลังงาน โดยคุณภาพของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับปริมาณพันธะ  $sp^3/sp^2$  ของฟิล์มกราฟีนออกไซด์อุปกรณ์ซึ่งสามารถใช้อธิบายปัจจัยของอุปกรณ์หน่วยความจำในงานวิจัยโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ที่ทำให้ประสิทธิภาพแตกต่างกันได้ นอกจากนี้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในงานวิจัยมีค่าสูงเมื่อเทียบกับงานวิจัยโครงสร้างกราฟีนออกไซด์อื่น ๆ

ข้อมูลผลการทดลองโดยรวมชี้ให้เห็นว่าการใช้เทคนิคพันเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถควบคุมความหนาและอัตรารีดิวซ์ของอุปกรณ์ได้ในขั้นตอนเดียว รวมถึงสามารถที่ขยายขนาดของฟิล์มได้ และยังประติขันธ์เป็นอุปกรณ์วัดความชื้นและหน่วยความจำได้ สามารถขึ้นรูปฟิล์มกราฟีนออกไซด์บนฐานรองรับได้แตกต่างกัน เหมาะกับการนำไปต่อยอดใช้งานในอุตสาหกรรม

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพสูงชันสามารถทำได้โดยการเพิ่มอัตราส่วนของพันธะ  $sp^3/sp^2$  ในชั้นฟิล์มกราฟีนออกไซด์ของอุปกรณ์ โดยสามารถปรับเปลี่ยนได้จากกระบวนการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ให้มีความเป็นออกไซด์สูงชัน หรือเพิ่มอุณหภูมิฐานรองรับขณะทำการพันเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตให้สูงชัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ประโชนเทพสิริพัฒน์, ควอนตัมและนาโนเทคโนโลยี, 1st ed. กรุงเทพมหานคร: มิน เซอร์วิสเซ็ฟฟลาย, 2558.
- [2] A. K. Geim and K. S. Novoselov, "The rise of graphene," **Nature Materials**, Vol. 6, 2007, pp. 183–191.
- [3] A. J. Hong *et al.*, "Graphene Flash Memory," **ACS Nano**, Vol. 5, 2011, pp. 7812–7817.
- [4] A. Nag, A. Mitra, and S. C. Mukhopadhyay, "Graphene and its sensor-based applications: A review," **Sensors and Actuators A: Physical**, Vol. 270, 2018, pp. 177–194.
- [5] K. Rana, J. Singh, and J.-H. Ahn, "A graphene-based transparent electrode for use in flexible optoelectronic devices," **Journal of Materials Chemistry C**, Vol. 2, 2014, pp. 2646–2656.
- [6] Q. Ke and J. Wang, "Graphene-based materials for supercapacitor electrodes – A review," **Journal of Materiomics**, Vol. 2, 2016, pp. 37–54.
- [7] S. Homaeigohar and M. Elbahri, "Graphene membranes for water desalination," **Npg Asia Materials**, Vol. 9, 2017, p. e427.
- [8] X. Chen, L. Zhang, and S. Chen, "Large area CVD growth of graphene," **Synthetic Metals**, Vol. 210, 2015, pp. 95–108.
- [9] S. Park and R. S. Ruoff, "Chemical methods for the production of graphenes," **Nature Nanotechnology**, Vol. 4, 2009, p. 217.
- [10] S. K. Sarkar, K. K. Raul, S. S. Pradhan, S. Basu, and A. Nayak, "Magnetic properties of graphite oxide and reduced graphene oxide," **Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures**, Vol. 64, 2014, pp. 78–82.
- [11] X. Wang *et al.*, "A spectrally tunable all-graphene-based flexible field-effect light-emitting device," **Nature Communications**, Vol. 6, 2015, p. 7767.
- [12] V. B. Mohan, R. Brown, K. Jayaraman, and D. Bhattacharyya, "Characterisation of reduced graphene oxide: Effects of reduction variables on electrical conductivity," **Materials Science and Engineering: B**, Vol. 193, 2015, pp. 49–60.
- [13] S. Roy, N. Soin, R. Bajpai, D. S. Misra, J. A. McLaughlin, and S. S. Roy, "Graphene oxide for electrochemical sensing applications," **Journal of Materials Chemistry**, Vol. 21, 2011, pp. 14725–14731.
- [14] G. Eda and M. Chhowalla, "Chemically Derived Graphene Oxide: Towards Large-Area Thin-Film Electronics and Optoelectronics," **Advanced Materials**, Vol. 22, 2010, pp. 2392–2415.
- [15] R. Thyer and J. Ellefson, "New letters for life's alphabet," **Nature**, Vol. 509,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2014, p. 291.

- [16] โภโคยอุดมสิทธิชัย, *เรื่องราวแสนอัศจรรย์ของกลศาสตร์เชิงควอนตัม (THE WONDEROUS STORY OF QUANTUM MECHANICS)*, 1st ed. กรุงเทพมหานคร, 2554.
- [17] D. P. DiVincenzo and E. J. Mele, “Self-consistent effective-mass theory for intralayer screening in graphite intercalation compounds,” *Phys. Rev. B*, Vol. 29, 1984, pp. 1685–1694.
- [18] K. Spyrou and P. Rudolf, “An Introduction to Graphene,” *Functionalization of Graphene*. 21-Mar-2014.
- [19] D. Sundholm, L. N. Wirz, and P. Schwerdtfeger, “Novel hollow all-carbon structures,” *Nanoscale*, Vol. 7, 2015, pp. 15886–15894.
- [20] A. Hirsch, “The era of carbon allotropes,” *Nature Materials*, Vol. 9, 2010, p. 868.
- [21] J. E. Dahl, S. G. Liu, and R. M. K. Carlson, “Isolation and Structure of Higher Diamondoids, Nanometer-Sized Diamond Molecules,” *Science*, Vol. 299, 2003, p. 96 LP-99.
- [22] C. S. Casari and A. Milani, “Carbyne: from the elusive allotrope to stable carbon atom wires,” *MRS Communications*, Vol. 8, 2018, pp. 207–219.
- [23] X. Li *et al.*, “Mechanochemical Synthesis of Carbon Nanothread Single Crystals,” *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 139, 2017, pp. 16343–16349.
- [24] V. Nagarajan and R. Chandiramouli, “Alcohol molecules adsorption on graphene nanosheets – A first-principles investigation,” *Applied Surface Science*, Vol. 441, 2018, pp. 734–743.
- [25] M. Hu, Q. Huang, Z. Zhao, B. Xu, D. Yu, and J. He, “Superhard and high-strength yne-diamond semimetals,” *Diamond and Related Materials*, Vol. 46, 2014, pp. 15–20.
- [26] E. H. L. Falcao and F. Wudl, “Carbon allotropes: beyond graphite and diamond,” *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Vol. 82, 2007, pp. 524–531.
- [27] A. Zurutuza and C. Marinelli, “Challenges and opportunities in graphene commercialization,” *Nature Nanotechnology*, Vol. 9, 2014, p. 730.
- [28] D. R. Dreyer, S. Park, C. W. Bielawski, and R. S. Ruoff, “The chemistry of graphene oxide,” *Chemical Society Reviews*, Vol. 39, 2010, pp. 228–240.
- [29] N. I. Kovtyukhova *et al.*, “Layer-by-Layer Assembly of Ultrathin Composite Films from Micron-Sized Graphite Oxide Sheets and Polycations,” *Chemistry of Materials*, Vol. 11, 1999, pp. 771–778.
- [30] H. B. Sun, J. Yang, Y. Z. Zhou, N. Zhao, and D. Li, “Preparation of reduced graphene oxide films by dip coating technique and their electrical conductivity,” *Materials Technology*, Vol. 29, 2014, pp. 14–20.

[31] Y. Guo *et al.*, “General Route toward Patterning of Graphene Oxide by a  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Combination of Wettability Modulation and Spin-Coating,” *ACS Nano*, Vol. 4, 2010, pp. 5749–5754.
- [32] B. Tang, L. Zhang, R. Li, J. Wu, M. N. Hedhili, and P. Wang, “Are vacuum-filtrated reduced graphene oxide membranes symmetric?,” *Nanoscale*, Vol. 8, 2016, pp. 1108–1116.
- [33] R. S. Hidalgo, D. López-Díaz, and M. M. Velázquez, “Graphene Oxide Thin Films: Influence of Chemical Structure and Deposition Methodology,” *Langmuir*, Vol. 31, 2015, pp. 2697–2705.
- [34] K. Tang and A. Gomez, *Charge and Fission of Droplets in Electrostatic Sprays*, Vol. 6, Issue 1. 1994.
- [35] A. Jaworek, A. T. Sobczyk, A. Krupa, A. Marchewicz, A. Krella, and T. Czech, *Thin films by EHDA - A review*, Vol. 10. 2016.
- [36] A. Jaworek, *Electrospray droplet sources for thin film deposition*, Vol. 42. 2007.
- [37] F. T. Johra, J.-W. Lee, and W.-G. Jung, “Facile and safe graphene preparation on solution based platform,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 20, 2014, pp. 2883–2887.
- [38] M. S.-J. and S. Y.-C. and X. L.-H. and L. S.-D. and H. T. and T. Hong-Bo, “X-Ray Diffraction Pattern of Graphite Oxide,” *Chinese Physics Letters*, Vol. 30, 2013, p. 96101.
- [39] J.-B. Wu, M.-L. Lin, X. Cong, H.-N. Liu, and P.-H. Tan, “Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices,” *Chemical Society Reviews*, Vol. 47, 2018, pp. 1822–1873.
- [40] Y. Shan *et al.*, “Stacking symmetry governed second harmonic generation in graphene trilayers,” *Science Advances*, Vol. 4, 2018.
- [41] Y. ying Wang *et al.*, “Raman Studies of Monolayer Graphene: The Substrate Effect,” *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 112, 2008, pp. 10637–10640.
- [42] E.-Y. Choi *et al.*, “Noncovalent functionalization of graphene with end-functional polymers,” *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 20, 2010, pp. 1907–1912.
- [43] S. Claramunt, A. Varea, D. López-Díaz, M. M. Velázquez, A. Cornet, and A. Cirera, “The Importance of Interbands on the Interpretation of the Raman Spectrum of Graphene Oxide,” *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 119, 2015, pp. 10123–10129.
- [44] H. Zhang, D. Hines, and D. L. Akins, “Synthesis of a nanocomposite composed of reduced graphene oxide and gold nanoparticles,” *Dalton Transactions*, Vol. 43, 2014, pp. 2670–2675.
- [45] A. M. D. S. Eigler, Ed., *Graphene Oxide: Fundamentals and Applications*, 1st ed. John Wiley & Sons, Ltd.

[46] S. Yang, W. Yue, D. Huang, C. Chen, H. Lin, and X. Yang, “A facile green strategy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- for rapid reduction of graphene oxide by metallic zinc,” *RSC Advances*, Vol. 2, 2012, pp. 8827–8832.
- [47] A. Tripathy, S. Pramanik, J. Cho, J. Santhosh, and N. A. A. Osman, “Role of morphological structure, doping, and coating of different materials in the sensing characteristics of humidity sensors,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, Vol. 14, 2014, pp. 16343–16422.
- [48] J. Bisquert, G. Garcia-Belmonte, P. Bueno, E. Longo, and L. O. S. Bulhões, “Impedance of constant phase element (CPE)-blocked diffusion in film electrodes,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 452, 1998, pp. 229–234.
- [49] M. Singh *et al.*, “The double layer capacitance of ionic liquids for electrolyte gating of ZnO thin film transistors and effect of gate electrodes,” *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 5, 2017, pp. 3509–3518.
- [50] C.-L. Zhao, M. Qin, W.-H. Li, and Q.-A. Huang, *Enhanced performance of a CMOS interdigital capacitive humidity sensor by graphene oxide*. 2011.
- [51] Y. Yao, X. Chen, H. Guo, Z. Wu, and X. Li, “Humidity sensing behaviors of graphene oxide-silicon bi-layer flexible structure,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 161, 2012, pp. 1053–1058.
- [52] Q. Huang, D. Zeng, S. Tian, and C. Xie, “Synthesis of defect graphene and its application for room temperature humidity sensing,” *Materials Letters*, Vol. 83, 2012, pp. 76–79.
- [53] S. Balashov, O. Balachova, A. Pavani Filho, M. C. Bazetto, and M. G. de Almeida, *Surface Acoustic Wave Humidity Sensors Based on Graphene Oxide Thin Films Deposited with the Surface Acoustic Wave Atomizer*, Vol. 49. 2012.
- [54] H. Bi *et al.*, “Ultrahigh humidity sensitivity of graphene oxide,” *Scientific Reports*, Vol. 3, 2013, p. 2714.
- [55] S. Borini *et al.*, “Ultrafast Graphene Oxide Humidity Sensors,” *ACS Nano*, Vol. 7, 2013, pp. 11166–11173.
- [56] H.-W. Yu *et al.*, “Self-Powered Humidity Sensor Based on Graphene Oxide Composite Film Intercalated by Poly(Sodium 4-Styrenesulfonate),” *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 6, 2014, pp. 8320–8326.
- [57] D. Zhang, J. Tong, and B. Xia, “Humidity-sensing properties of chemically reduced graphene oxide/polymer nanocomposite film sensor based on layer-by-layer nano self-assembly,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 197, 2014, pp. 66–72.
- [58] H.-W. Yu *et al.*, “Self-powered humidity sensor based on graphene oxide composite film intercalated by poly(sodium 4-styrenesulfonate).,” *ACS applied materials & interfaces*, Vol. 6, 2014, pp. 8320–6.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [59] G. Khurana, “Graphene oxide complexes for resistive memory device applications,” university of Puerto Rico, USA, 2016.
- [60] W. E. Lim and R. Ismail, “Conduction Mechanism of Valence Change Resistive Switching Memory: A Survey,” *Electronics*, Vol. 4. 2015.
- [61] A. Sawa, “Resistive switching in transition metal oxides,” *Materials Today*, Vol. 11, 2008, pp. 28–36.
- [62] S. Hong, O. Auciello, and D. Wouters, Eds., *Emerging Non-Volatile Memories*, 1st ed. Springer US, 2014.
- [63] D. Wouters, R. Waser, and M. Wuttig, *Phase-Change and Redox-Based Resistive Switching Memories*, Vol. 103. 2015.
- [64] A. Rani and D. H. Kim, “A mechanistic study on graphene-based nonvolatile ReRAM devices,” *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 4, 2016, pp. 11007–11031.
- [65] T. F. Emiru and D. W. Ayele, “Controlled synthesis, characterization and reduction of graphene oxide: A convenient method for large scale production,” *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 4, 2017, pp. 74–79.
- [66] H. J. Kim *et al.*, “Unoxidized Graphene/Alumina Nanocomposite: Fracture- and Wear-Resistance Effects of Graphene on Alumina Matrix,” *Scientific Reports*, Vol. 4, 2014, p. 5176.
- [67] S. Muralikrishna, K. Sureshkumar, T. S. Varley, D. H. Nagaraju, and T. Ramakrishnappa, “In situ reduction and functionalization of graphene oxide with l-cysteine for simultaneous electrochemical determination of cadmium(ii), lead(ii), copper(ii), and mercury(ii) ions,” *Analytical Methods*, Vol. 6, 2014, pp. 8698–8705.
- [68] J. Guerrero-Contreras and F. Caballero-Briones, “Graphene oxide powders with different oxidation degree, prepared by synthesis variations of the Hummers method,” *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 153, 2015, pp. 209–220.
- [69] P. Songkeaw, K. Ontaor, and B. Tunhoo, “Humidity Sensor Based on Graphene Oxide Film Prepared by Simple Drop-Casting Process,” *Key Engineering Materials*, Vol. 728, 2017, pp. 199–203.
- [70] Y. Xia, H. Zhao, S. Liu, and T. Zhang, “The humidity-sensitive property of MCM-48 self-assembly fiber prepared via electrospinning,” *RSC Advances*, Vol. 4, 2014, pp. 2807–2812.
- [71] R. Strzelczyk, C. E. Giusca, F. Perrozzì, G. Fioravanti, L. Ottaviano, and O. Kazakova, “Role of substrate on interaction of water molecules with graphene oxide and reduced graphene oxide,” *Carbon*, Vol. 122, 2017, pp. 168–175.
- [72] N. Li, X. Chen, X. Chen, X. Ding, and X. Li, “Subsecond Response of Humidity Sensor Based on Graphene Oxide Quantum Dots,” *IEEE Electron Device Letters*,

- Vol. 36, 2015, pp. 615–617.
- [73] P. Songkeaw, B. Tunhoo, T. Thiwawong, and K. Onlaor, “Transparent write-once-read-many-times memory devices based on an ITO/EVA:rGO/ITO structure,” **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, Vol. 29, 2018, pp. 17517–17524.
- [74] H. Y. Jeong *et al.*, “Graphene Oxide Thin Films for Flexible Nonvolatile Memory Applications,” **Nano Letters**, Vol. 10, 2010, pp. 4381–4386.
- [75] F. Zhuge, B. Hu, C. He, X. Zhou, Z. Liu, and R.-W. Li, “Mechanism of nonvolatile resistive switching in graphene oxide thin films,” **Carbon**, Vol. 49, 2011, pp. 3796–3802.
- [76] V. Senthilkumar, A. Kathalingam, S. Valanarasu, V. Kannan, and J.-K. Rhee, “Bipolar resistive switching of solution processed TiO<sub>2</sub>–graphene oxide nanocomposite for nonvolatile memory applications,” **Physics Letters A**, Vol. 377, 2013, pp. 2432–2435.
- [77] G. Khurana, P. Misra, and R. S. Katiyar, “Multilevel resistive memory switching in graphene sandwiched organic polymer heterostructure,” **Carbon**, Vol. 76, 2014, pp. 341–347.
- [78] D. Y. Yun and T. W. Kim, “Nonvolatile memory devices based on Au/graphene oxide nanocomposites with bilateral multilevel characteristics,” **Carbon**, Vol. 88, 2015, pp. 26–32.
- [79] S. Porro, E. Accornero, C. F. Pirri, and C. Ricciardi, “Memristive devices based on graphene oxide,” **Carbon**, Vol. 85, 2015, pp. 383–396.
- [80] I. Hwang *et al.*, “Resistive switching transition induced by a voltage pulse in a Pt/NiO/Pt structure,” **Applied Physics Letters**, Vol. 97, 2010, p. 52106.
- [81] L. Zhang, Y. Li, J. Shi, G. Shi, and S. Cao, “Nonvolatile rewritable memory device based on solution-processable graphene/poly(3-hexylthiophene) nanocomposite,” **Materials Chemistry and Physics**, Vol. 142, 2013, pp. 626–632.
- [82] X.-D. Zhuang *et al.*, “Conjugated-Polymer-Functionalized Graphene Oxide: Synthesis and Nonvolatile Rewritable Memory Effect,” **Advanced Materials**, Vol. 22, 2010, pp. 1731–1735.
- [83] M. A. Mamo, A. O. Sustaita, N. J. Coville, and I. A. Hümmelgen, “Polymer composite of poly(vinyl phenol)-reduced graphene oxide reduced by vitamin C in low energy consuming write-once-read-many times memory devices,” **Organic Electronics**, Vol. 14, 2013, pp. 175–181.
- [84] H.-Y. Wu, C.-C. Lin, and C.-H. Lin, “Characteristics of graphene-oxide-based flexible and transparent resistive switching memory,” **Ceramics International**, Vol. 41, 2015, pp. S823–S828.

- [85] J. Kim, S. Ganorkar, Y.-H. Kim, and S.-I. Kim, “Graphene oxide hole injection layer for high-efficiency polymer light-emitting diodes by using electrophoretic deposition and electrical reduction,” *Carbon*, Vol. 94, 2015, pp. 633–640.
- [86] X. Yu, X. Yu, J. Zhang, D. Zhang, H. Cai, and Y. Zhao, “Interfacial modification for improving inverted organic solar cells by poly(N-vinylpyrrolidone),” *RSC Advances*, Vol. 5, 2015, pp. 58966–58972.
- [87] Y. Wang, J. E. Panzik, B. Kiefer, and K. K. M. Lee, “Crystal structure of graphite under room-temperature compression and decompression,” *Scientific reports*, Vol. 2, 2012, p. 520.
- [88] T.-H. Kim, E. K. Jeon, Y. Ko, B. Y. Jang, B.-S. Kim, and H.-K. Song, “Enlarging the d-spacing of graphite and polarizing its surface charge for driving lithium ions fast,” *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 2, 2014, pp. 7600–7605.
- [89] A. C. Ferrari and J. Robertson, “Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon,” *Physical Review B*, Vol. 61, 2000, pp. 14095–14107.
- [90] A. Das, B. Chakraborty, and A. Sood, *Raman spectroscopy of graphene on different substrates and influence of defects*, Vol. 31. 2007.
- [91] A. C. Ferrari, “Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects,” *Solid State Communications*, Vol. 143, 2007, pp. 47–57.
- [92] A. Ganguly, S. Sharma, P. Papakonstantinou, and J. Hamilton, “Probing the Thermal Deoxygenation of Graphene Oxide Using High-Resolution In Situ X-ray-Based Spectroscopies,” *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 115, 2011, pp. 17009–17019.
- [93] N. Wang, G. Han, Y. Xiao, Y. Li, H. Song, and Y. Zhang, “Polypyrrole/graphene oxide deposited on two metalized surfaces of porous polypropylene films as all-in-one flexible supercapacitors,” *Electrochimica Acta*, Vol. 270, 2018, pp. 490–500.
- [94] W. Xuan *et al.*, “High sensitivity flexible Lamb-wave humidity sensors with a graphene oxide sensing layer,” *Nanoscale*, Vol. 7, 2015, pp. 7430–7436.
- [95] K. H. Goh, A. S. M. A. Haseeb, and Y. H. Wong, *Trap-assisted tunneling, capacitance–voltage characteristics, and surface properties of Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film on Si substrate*, Vol. 28. 2016.
- [96] E. W. Lim, M. Ahmadi, and R. Ismail, *Modeling and simulation of graphene-oxide-based RRAM*, Vol. 15. 2016.
- [97] H. Seo, S. Ahn, J. Kim, Y.-A. Lee, K.-H. Chung, and K.-J. Jeon, “Multi-resistive Reduced Graphene Oxide Diode with Reversible Surface Electrochemical Reaction induced Carrier Control,” *Scientific Reports*, Vol. 4, 2014, p. 5642.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในระดับนานาชาติ

- P. Songkeaw, B. Tunhoo, T. Thiwawong, K. Onlaor, "Transparent write-once-read-many-times memory devices based on an ITO/EVA:rGO/ITO structure", **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, vol. 29, 2018. pp 17517-17524. (IF 2018: 2.324)
- Potiyan Songkeaw, Korakot Onlaor, and Benchapol Tunhoo, "Humidity Sensor Based on Graphene Oxide Film Prepared by Simple Drop-Casting Process", **Key Engineering Materials**, vol. 728, pp 199-203. (SJR: 0.18)

## ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการ

- Potiyan Songkeaw, Korakot Onlaor, Benchapol Tunhoo, "A humidity sensor based on iron oxide films prepared by spin coating process", **Materials Today: Proceedings (STEMa2016)**, vol. 4, 2017. pp 6512-6518.
- Punnapa Keeratithiwakorn, Potiyan Songkeaw, Korakot Onlaor, Benchapol Tunhoo, "Structural properties of copper phthalocyanine films grown by electrophoretic deposition process", **Materials Today: Proceedings**, Vol. 4, 2017, pp 6194-6199.
- Natpasit Chaithanatkun, Direklit Chantarawong, Potiyan Songkeaw, Korakot Onlaor, Thutiyaoporn Thiwawong, Benchapol Tunhoo, "Electrical bistable properties of ZnO nanoparticles thin film prepared by electrostatic spray deposition technique" **10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems**, Article number 7147398, 2015. pp 152-155.
- Natpasit Chaithanatkun, Direklit Chantarawong, Potiyan Songkeaw, Korakot Onlaor, Thutiyaoporn Thiwawong, Benchapol Tunhoo, "Effect of ascorbic acid on structural properties of ZnO nanoparticles prepared by precipitation process", **10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems**, Article number 7147396, pp 145-148.

## ผลงานที่อยู่ในระหว่างการขอสิทธิบัตร

- หน่วยงานความจำแบบโปร่งแสงที่เตรียมได้จากวิธีการประกบรีดด้วยความร้อน เลขที่คำขอ 1701003912
- การเตรียมฟิล์มบางแกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการกระบวนการพ่นเคลือบด้วยไฟฟ้าสถิตย์ เลขที่คำขอ 1501000578

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายโพธิญาณ สองแก้ว  
วัน เดือน ปีเกิด 28 กรกฎาคม 2533 ณ จังหวัดตรัง  
ที่อยู่ 52/1 ม.1 ต. กะลาเส อ. สีเกา จ. ตรัง 92150  
ประวัติการศึกษา

2545-2551 มัธยมศึกษา โรงเรียนบูรณะรำลึกตรัง จ.ตรัง

2552-2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาแมคคาทรอนิกส์ ภาควิชาระบบควบคุมและ  
วัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2556-ปัจจุบัน เข้าศึกษาต่อปริญญาโทสาขาวิชาเทคโนโลยีและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้