

การสังเคราะห์วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลต
สำหรับประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์ตรวจวัดแก๊ส

SYNTHESIS OF HYBRID GRAPHENE AND POLY(METHYL METHACRYLATE)
FOR GAS SENSOR APPLICATION



ชนกนันท์ รัตนบุษย์
CHANOKNAN RATTANABUT

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF HYBRID GRAPHENE AND POLY(METHYL METHACRYLATE)
FOR GAS SENSOR APPLICATION



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABAN

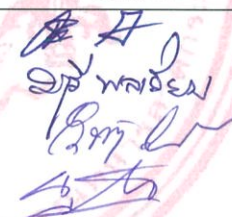
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลตสำหรับ
ประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์ตรวจวัดแก๊ส


Special Project Title Synthesis of Hybrid Graphene and Poly(methyl
Methacrylate) for Gas Sensor Application

นักศึกษา นางสาวชนกนันท์ รัตนบุษย์
รหัสประจำตัว 55110012
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2558
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.มยุรี พลเยี่ยม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ. ดร.อภิรักษ์ณ์	เอียดเอื้อ	
ดร.มยุรี	พลเยี่ยม	
ผศ.ดร.วินัดดา	วงศ์วิริยะพันธ์	
ดร.นงลักษณ์	หวงกำแพง	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูดีไพจิตร)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่.....17.....เดือน.....มิถุนายน.....พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การสังเคราะห์วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลตสำหรับ
	ประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์ตรวจวัดแก๊ส
นักศึกษา	นางสาวชนกนันท์ รัตนบุษย์
รหัสประจำตัว	55110012
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.มยุรี พลเยี่ยม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

บทคัดย่อ

ในงานโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการนำไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้งานเป็นแก๊สเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของกลุ่มสารอินทรีย์ระเหยง่าย กราฟีนที่นำมาศึกษาคือ กราฟีนที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคการตกตะกอนไอระเหยเคมีบนแผ่นคอปเปอร์ และพอลิเมอร์ที่เลือกใช้คือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต ขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ เริ่มจากการเคลือบพอลิเมทิลเมทาคริเลตลงบนกราฟีนด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง แล้วทำการไอน้ำ กราฟีนที่เคลือบด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตไปยังแผ่นซิลิกอนเคลือบด้วยชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการการไอน้ำแบบเปียก ในการศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดแก๊สของไฮบริดกราฟีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลต ได้ศึกษาการตอบสนองต่อไอระเหยของเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน และเปรียบเทียบความสามารถในตรวจวัดระหว่างวัสดุกราฟีน และวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่อสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยพบว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลต สามารถตอบสนองต่อไอระเหยของเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีนได้ โดยมีค่าการตอบสนองจากมากไปน้อยตามลำดับดังต่อไปนี้ เอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ตามลำดับ แต่แก๊สเซนเซอร์กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมทาคริเลต มีทิศทางการตอบสนองต่อไอระเหยในทิศตรงกันข้าม โดยค่าความต้านทานของกราฟีนลดลงในขณะที่ค่าความต้านทานของไฮบริดกราฟีนและพอลิเมทาคริเลตเพิ่มขึ้น กลไกการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนต่อสารอินทรีย์ระเหยง่ายอธิบายด้วยการกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนของโมเลกุลมายังจุดบกพร่องบนแผ่นกราฟีน ทำให้ค่าความต้านทานของกราฟีนลดลง ในขณะที่กลไกการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่อสารอินทรีย์ระเหยง่ายอธิบายด้วยการเกิดขึ้นไดโพลระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์ระเหยง่ายกับกราฟีน และการเกิดการพองตัวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตหลังจากการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย ทำให้ค่าความต้านทานของกราฟีนเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมทาคริเลตดีกว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีน โดยมีสาเหตุมาจากพอลิเมทาคริเลตทำหน้าที่เป็นกำแพงกั้นการดูดซับโมเลกุล แก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมทาคริเลตที่นำเสนอในครั้งนี้สามารถนำมาใช้งานร่วมกับแก๊สเซนเซอร์กราฟีนเพื่อเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่สามารถจำเพาะคัดเลือกชนิดไอระเหยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Synthesis of Hybrid Graphene and Poly(methyl Methacrylate) for Gas Sensor Application
Student	Miss Chanoknan Rattanabut
Student ID	55110012
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2015
Special Project Advisor	Dr. Mayuree Ponyiem
Special Project Co-Advisor	Assist. Prof. Dr. Winadda Wongwiriyanan

ABSTRACT

This special project studies on synthesis of hybrid graphene and polymer for application in volatile organic compound (VOC) vapor detection. Graphene was synthesized on copper foil by chemical vapor deposition (CVD) technique. Poly(methyl methacrylate) (PMMA) was used for the synthesis of the hybrid graphene and polymer. Firstly, PMMA was coated onto graphene by spin coating technique. Next, the PMMA-coated graphene (graphene/PMMA) was transferred to silicon dioxide/silicon substrate (SiO_2/Si) by wetting transfer process. The sensor responses to VOC vapors including ethanol, dichloromethane and benzene were investigated, and the sensor responses to these VOCs of the hybrid graphene/PMMA and the pristine graphene were compared. The sensitivity of the pristine graphene and the hybrid graphene/PMMA sensors to VOCs were in the following order: ethanol > dichloromethane > benzene. However their resistances upon VOC exposure were changed in opposite direction, i.e., the resistance of the pristine graphene decreased while that of the hybrid graphene/PMMA increased. Mechanism of the graphene sensor to VOCs is attributed to the electrons hopping from VOC molecules to defect sites on graphene, resulting in a decrease in the resistance, while mechanism of the hybrid graphene/PMMA can be explained by dipole formation between the VOC molecules and graphene, and the swelling of the polymer, resulting in an increase in the resistance. The superior sensitivity of the graphene sensor compared to that of the hybrid graphene/PMMA is due to the molecule blocking effect of PMMA. The proposed hybrid graphene/PMMA sensor can be integrated with the pristine graphene sensor, offering sensor arrays with selective detection of VOC vapors.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.มยุรี พลเยี่ยม และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ ผู้ที่ได้ชี้แนะและให้แนวทางกำหนดกรอบการวิจัย พร้อมทั้งคอยให้คำแนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ และให้การช่วยเหลือสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ทุกด้าน ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.วิน บรรจงปुरु ที่ได้เปิดโอกาสในการทำวิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ให้แนวทางการทำวิจัยและแนวคิดต่างๆ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ระหว่างการทำวิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ขอขอบพระคุณนักวิจัยทุกท่านของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการให้ความอนุเคราะห์ในการทำงานวิจัยและขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานและทุกคนที่อยู่ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และน้องสาวที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้และเป็นกำลังใจ คอยให้ความสนับสนุนตลอดมา

ชนกนันท์ รัตนบุษย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 สมมติฐานงานวิจัย	3
1.4 กรอบแนวคิดงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการดำเนินงาน	4
1.6 ขั้นตอนของการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 กราฟีน.....	6
2.1.1 สมบัติพื้นฐาน.....	6
2.1.2 การสังเคราะห์กราฟีนบนแผ่นคอปเปอร์.....	7
2.1.3 การโอนย้ายกราฟีน.....	8
2.1.4 การประยุกต์ใช้งานกราฟีน.....	10
2.2 แก๊สเซนเซอร์	11
2.2.1 หลักการทำงานพื้นฐาน	11
2.2.2 แก๊สเซนเซอร์วัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย	12
2.2.3 แก๊สเซนเซอร์กราฟีน.....	20
2.2.4 พารามิเตอร์การละลายของเฮนเซน (Hansen solubility parameter, HSP)	27
2.3 เทคนิคการวิเคราะห์.....	28
2.3.1 เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy).....	28
2.3.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy; AFM).....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 การโอนย้ายกราฟีน.....	33
3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นใช้งาน.....	33
3.1.1.1 การเตรียมแผ่นSiO ₂ /Si.....	33
3.1.2 ขั้นตอนการโอนย้ายกราฟีน.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาในเอกสารนี้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์	35
3.2.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	35
3.2.2 การตรวจสอบพันธะทางเคมีของวัสดุ	36
3.2.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิว	36
3.3 การประดิษฐ์แก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์	37
3.3.1 การเตรียมอุปกรณ์วัดแก๊สเซนเซอร์ด้วยวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์	37
3.3.2 การวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	38
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	42
4.1 วัสดุกราฟีน และวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA ที่ถูกโอนย้าย ลงบนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์.....	42
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของวัสดุกราฟีน และวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA บนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์	42
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีของวัสดุกราฟีน และวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA บนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์	43
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของวัสดุกราฟีน และวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA บนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์	45
4.2 แก๊สเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยเอทานอล ไคคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุกราฟีน	47
4.2.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนสภาพของแก๊สเซนเซอร์ วัสดุกราฟีน ต่อไอระเหยเอทานอล ไคคลอโรมีเทน และเบนซีน.....	47
4.2.2 ความเสถียรของแก๊สเซนเซอร์วัสดุกราฟีนต่อไอระเหยเอทานอล ไคคลอโรมีเทน และเบนซีน.....	52
4.3 แก๊สเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยเอทานอล ไคคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA.....	53
4.3.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนสภาพของแก๊สเซนเซอร์วัสดุไฮบริด กราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA ต่อไอระเหยเอทานอล ไคคลอโรมีเทน และเบนซีน	53
4.3.2 ความเสถียรของแก๊สเซนเซอร์วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA ต่อไอระเหยเอทานอล ไคคลอโรมีเทน และเบนซีน	59
4.4 การตอบสนองต่อไอระเหยของเอทานอลในช่วงระดับความเข้มข้นระดับ หนึ่งในพันส่วนของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA และแก๊สเซนเซอร์กราฟีน	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและแนวทางการพัฒนา	65
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
5.2 แนวทางการพัฒนา.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา หรือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	5
2.1 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์วัดแก๊สที่ใช้วัสดุต่างชนิดกัน.....	13
2.2 เปรียบเทียบอุปกรณ์เซนเซอร์ในการวัดแก๊ส DMMP.....	16
2.3 แสดงประสิทธิภาพการวัดแก๊ส.....	26
3.1 ลักษณะของแผ่น SiO ₂ /Si.....	33
3.2 เงื่อนไขการทำออกซิเจนพลาสมา.....	34
3.3 เงื่อนไขออกซิเจนพลาสมาสำหรับกัดกราฟีนบนแผ่นคอปเปอร์.....	34
3.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล.....	38
4.1 ค่า I _{2D} /I _G ของกราฟีน และไฮบริด Graphene/PMMA.....	44
4.2 ค่า I _G /I _D ของกราฟีน และไฮบริด Graphene/PMMA.....	44
4.3 แสดงความสูงของชั้นกราฟีนที่ทำการลบพอลิเมอร์ PMMA ออกเรียบร้อยแล้ว.....	45
4.4 ความสูงของชั้น Graphene/PMMA บนแผ่น SiO ₂ /Si.....	46
4.5 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบแก๊สเซนเซอร์กราฟีน.....	47
4.6 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหยชนิดต่างๆ.....	49
4.7 พารามิเตอร์สภาพผิวและขนาดของไอระเหยแต่ละชนิด.....	51
4.8 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบแก๊สเซนเซอร์กราฟีน.....	52
4.9 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA.....	53
4.10 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ.....	55
4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนของพอลิเมอร์ PMMA กับไอระเหยชนิดต่างๆ.....	57
4.12 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA.....	59
4.13 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล ที่ช่วงระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 20 ppt.....	63

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 รูปแบบการจัดเรียงอะตอมกราฟีน	6
2.2 รูปแบบโครงสร้างกราฟีน	7
2.3 แผนภาพอย่างง่ายของเครื่อง CVD.....	8
2.4 แผนภาพอย่างง่ายของลำดับชั้นการเรียงตัวเพื่อการโอนย้ายแผ่นกราฟีน.....	8
2.5 ไดอะแกรมการโอนย้ายกราฟีน	9
2.6 แสดงขั้นตอนการการโอนย้ายกราฟีนด้วยวิธี Facile one-step transfer process	9
2.7 การประยุกต์ใช้กราฟีนในอุปกรณ์ต่างๆ	10
2.8 โครงสร้างชั้นพลังงานสารกึ่งตัวนำ N-Type และ P-Type.....	11
2.9 รูปแบบการตอบสนองต่อแก๊สตรวจสอบของแก๊สเซนเซอร์	12
2.10 (a) สารละลายกราฟีนออกไซด์ (1 mg/ml), (b) และ (c) สารละลายรีดิวซ์กราฟีนด้วยปฏิกิริยาทางเคมี ในเอทานอล (1mg/ml และ 0.025 mg/ml ตามลำดับ).....	13
2.11 กราฟรามานของสาร กราฟีน, รีดิวซ์กราฟีนด้วยปฏิกิริยาทางเคมี และกราฟีนออกไซด์ตามสีที่กำหนด	14
2.12 ค่าการตอบสนองของ CRG วัดแก๊ส DMMP ภายใต้ความเข้มข้น 80 ppm.....	14
2.13 (a) ค่าการตอบสนองของ CRG วัดแก๊ส DMMP ภายใต้ความเข้มข้น 5-80 ppm (b) กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าการตอบสนองของ CRG ที่วัดแก๊ส DMMP ภายใต้ความเข้มข้นต่างๆ.....	15
2.14 ค่าการตอบสนองของ CRG วัดแก๊ส DMMP ภายใต้ความเข้มข้น 20 ppm.....	16
2.15 กราฟการเปรียบเทียบค่าการตอบสนองของอุปกรณ์แบบต่างๆ ที่ใช้วัดแก๊สอะซีโตน, เมทานอล, เมทานอล, เมทิลเอทิลคีโตน, และ น้ำ (@100% ของไออิมตัว).....	17
2.16 การวัด Transfer characteristic (IDS-VGS curves at VDS = -1 V) โดยรูป (a) เป็นของ SWNTs-RuOEP และ (b) เป็นของ SWNTs-FeTPP ที่วัดในอากาศและในอะซีโตน	18
2.17 (a) การพล็อต PCA (PC1 เทียบกับ PC2) โดยใช้ 7 เซนเซอร์ (bare SWNTs, SWNTs-OEP, SWNTs-RuOEP, SWNTs-FeOEP, SWNTs-TPP, SWNTs-RuTPP, and SWNTs-FeTPP) และ (b) การพล็อต PCA (PC2 เทียบกับ PC3) ของ 7 เซนเซอร์แสดงการแยกกลุ่มที่ดีของสาร VOCs 4 ชนิด (เมทานอล, เอทานอล, เมทิลเอทิลคีโตน, และอะซีโตน)	19
2.18 กราฟแสดงแนวโน้มการจลนศาสตร์ของแก๊สเซนเซอร์.....	20
2.19 โครงสร้าง SnO ₂ /G (3-D) ที่มี SnO ₂ อยู่บนกราฟีนแผ่นที่มีลักษณะแตกต่างกัน โดย (a-d) เพิ่มความเข้มข้นของการย่อยสลาย (0.0025 M, 0.005 M, 0.05 M และ 0.5 M) (e-h) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเผา (25 °C, 100 °C, 200 °C และ 300 °C) ขนาดแท่ง 500 นาโนเมตร	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2. 20 (a) ค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ SnO ₂ /G (สีดำ) และ SnO ₂ (สีแดง) ที่ให้แก๊สแตกต่างกันโดยให้ความเข้มข้นแก๊สละ 50 ppm (b) กราฟแสดงค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ SnO ₂ /G วัดแก๊ส H ₂ S ที่ความเข้มข้นต่างๆที่ 260 องศาเซลเซียส.....	21
2.21 ค่าการตอบสนอง ของอุปกรณ์เซนเซอร์ SnO ₂ /G วัดแก๊ส H ₂ S ที่ความเข้มข้นต่างๆที่ 260 องศาเซลเซียส โดยทั้งสี่สายมีลักษณะเซนเซอร์ดังภาพ SEM (a, b, c) และ (d) ตามลำดับ ขนาดสเกลในภาพทั้งหมด: 500 นาโนเมตร	22
2.22 ขั้นตอนการย้ายกราฟีนจากแผ่นคอปเปอร์มายังฐานวัสดุอุปกรณ์วัดแก๊ส.....	23
2.23 กราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่อให้แก๊สไนโตรเจนออกไซด์และอากาศแห้งของอุปกรณ์วัดแก๊สที่มี กราฟีนไม่ได้ทำทรีตเมนต์ และที่ทำทรีตเมนต์เป็นเวลา 60, 70, 80 และ 90 วินาที ตามลำดับ	23
2.24 ค่าการตอบสนองของกราฟีนและกราฟีนทรีตเมนต์ วัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ภายใต้ความเข้มข้นต่างๆ.....	24
2.25 ค่าการตอบสนองของกราฟีนทรีตเมนต์วัดแก๊ส NO ₂ ภายใต้ความเข้มข้น 200 ppm	25
2.26 เป็นกราฟแสดงค่า response wavelength ที่มีความไวต่อแก๊สต่างๆ (วัดการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นแสงที่เปลี่ยนไป) ได้แก่ แอมโมเนีย แก๊สไข่เน่า แก๊สคลอรีน แก๊สไนโตรเจนผสมแก๊สไฮโดรเจน 4% และแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ตามลำดับ โดยภาพ (a) rGO sensor (b) PMMA/rGO sensor	25
2.27 การกระเจิงแสงแบบ infrared absorption ,Rayleigh scattering , stroke scattering และ anti-stroke scattering	28
2.28 กลไกการทำงานของเครื่องรามาเนสเปกโตรสโคปี.....	29
2.29 ลักษณะกราฟรามานของกราฟีน	30
2.30 หลักการทำงานของเครื่อง AFM.....	31
2.31 ตัวอย่างภาพลักษณะผิววัสดุ รูปแบบ 3 มิติ ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง AFM	31
2.32 แสดงวิธีการทำงานของเครื่อง AFM	32
3.1 รูปถ่ายของแผ่น SiO ₂ /Si สำหรับโอนย้ายกราฟีน.....	34
3.2 ไดอะแกรมขั้นตอนการโอนย้ายกราฟีนเพื่อประดิษฐ์แก๊สเซนเซอร์.....	35
3.3 เครื่องมัลติมิเตอร์.....	36
3.4 เครื่อง The DXR™ Smart Raman spectrometer.....	36
3.5 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม รุ่น Spi - spa400.....	37
3.6 รูปภาพแก๊สเซนเซอร์ที่พร้อมใช้งาน.....	38
3.7 แผนผังแสดงระบบทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (a) ระบบวัดแก๊สความเข้มข้นสูง (b) ระบบวัดแก๊สความเข้มข้นต่ำ.....	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของไฮบริด Graphene/PMMA (a และ b) และกราฟีน (c และ d) ที่ถูกโอนย้ายลงบน SiO_2/Si ที่กำลังขยายเลนส์ใกล้วัตถุ 5 เท่า และ 50 เท่า ตามลำดับ	42
4.2 กราฟรามานสเปกตรัมของไฮบริด Graphene/PMMA และกราฟีนที่ถูกโอนย้ายลงบน SiO_2/Si	43
4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM (a) ภาพมุมบน 2 มิติ (b) ภาพ 3 มิติ และ (c) การวัดความสูงกราฟีนบนแผ่น SiO_2/Si ที่ทำการลบพอลิเมอร์ PMMA ออกเรียบร้อยแล้ว.....	45
4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM (a) ภาพมุมบน 2 มิติ และ (b) การวัดความสูง Graphene/PMMA บนแผ่น SiO_2/Si	46
4.5 ผลการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหย (a) เอทานอล, (b) ไคคลอโรมีเทน และ (c) เบนซีน	48
4.6 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอล (87.386 ppt), ไคคลอโรมีเทน (103.52 ppt) และเบนซีน (294.16 ppt) ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน (a) ผลการตอบสนอง และ (b) Normalized sensor response	50
4.7 กลไกการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน	51
4.8 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยตรวจสอบแบบเป็นวัฏจักร ได้แก่ เอทานอล (87.386 ppt), ไคคลอโรมีเทน (103.52 ppt) และเบนซีน (294.16 ppt) ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน	52
4.9 ผลการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหย (a) เอทานอล, (b) ไคคลอโรมีเทน และ (c) เบนซีน.....	54
4.10 ผลการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอล (87.386 ppt), ไคโครโลมีเทน (103.52 ppt) และเบนซีน (294.16 ppt) ของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA (a) ผลการตอบสนอง และ (b) Normalized sensor response	56
4.11 แสดงค่า Normalized sensor response ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนและแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA	58
4.12 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยตรวจสอบเป็น 3 วัฏจักร ได้แก่ เอทานอล (87.386 ppt), ไคคลอโรมีเทน (103.52 ppt) และเบนซีน (294.16 ppt) ของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA.....	60
4.13 แสดงค่าการตอบสนองไอระเหยเอทานอลช่วงระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 20 ppt ของ (a) แก๊สเซนเซอร์กราฟีน (b) แก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA (c) กราฟแนวโน้ม การตอบสนองไอระเหยเอทานอลระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 20 ppt ของแก๊สเซนเซอร์ กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA.....	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กราฟีน (Graphene) เป็นรูปแบบชนิดหนึ่งของวัสดุคาร์บอนในลักษณะแผ่นระนาบที่มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนแบบวงหกเหลี่ยมเรียงต่อกัน ลักษณะโครงสร้างแบบ 2 มิติ (2D structure) [1–4] จากโครงสร้างผลึกแบบรังผึ้งนี้ทำให้มีสมบัติที่น่าสนใจ ในเรื่องสมบัติด้านการนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี แต่มีน้ำหนักเบา [2] กราฟีนถูกเตรียมขึ้นได้เป็นครั้งแรกในปีพ.ศ. 2547 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซียได้แก่ ดร.อังเดร โก้ม (Andre Geim) และ ดร.คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Konstantin Novoselov) จากการค้นพบนี้ทำให้ โก้มและโนโวเซลอฟ ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี 2010 [4] ซึ่งทำให้เกิดการทำวิจัยเกี่ยวกับกราฟีนมากมาย ตั้งแต่องานวิจัยพื้นฐานเพื่อศึกษาสมบัติของกราฟีน การสังเคราะห์ และการนำกราฟีนไปใช้งาน

เทคนิคที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์กราฟีนคือเทคนิคการสะสมไอระเหยเคมี (Chemical vapor deposition: CVD) โดยการสังเคราะห์กราฟีนลงบนแผ่นทองแดง (Copper foil: Cu foil) โดยจะให้ความร้อนในการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1000 - 1060 องศาเซลเซียส [5,6] ให้กราฟีนที่มีลักษณะแผ่น 2 มิติ ขนาดใหญ่ (Large lateral size) และกราฟีนมีจุดบกพร่อง (Defect) น้อย เมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม กราฟีนที่สังเคราะห์ได้บนแผ่นทองแดงไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องมีเทคนิคการย้าย (Transfer) กราฟีนลงบนฐานรองรับที่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น แผ่นซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide: SiO₂) กระดาษนำไฟฟ้า เป็นต้น ในกระบวนการย้ายกราฟีนนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น วิธีเปียก (Wet process) ด้วยการกัดผิวโลหะที่เป็นฐานรองรับขณะสังเคราะห์ด้วยน้ำยากัดโลหะ (Wet etching) [7] หรือวิธีการโอนย้ายชั้นตอนเดียว (Facile one-step transfer process) ด้วยการสร้างพันธะระหว่างฐานรองรับกับแผ่น กราฟีน [7] เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีทั้งข้อดีและข้อเสียแล้วแต่ความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน แต่อย่างไรก็ตาม การโอนย้ายกราฟีนนั้นมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก โดยหลังจากการสังเคราะห์กราฟีนแล้ว จะทำการเคลือบฟิล์มพอลิเมอร์เพื่อให้สามารถโอนย้ายกราฟีนไปยังฐานรองรับใช้งานต่อไปได้ พอลิเมอร์ที่นิยมใช้คือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly(methyl methacrylate): PMMA) พอลิไดเมทิลไซโลเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) เป็นต้น จากนั้นจึงกำจัดพอลิเมอร์ออกจากกราฟีนในภายหลัง ทำให้ความบริสุทธิ์ของกราฟีนลดลง เนื่องจากปัญหาการตกค้างของพอลิเมอร์หรือสารเคมี ส่งผลให้ประสิทธิภาพอุปกรณ์จากกราฟีนต่ำลง หรือทำให้สมบัติของอุปกรณ์เกิดความไม่เสถียร [8] วิธีแก้ไขปัญหานี้ สามารถทำได้โดยการสังเคราะห์กราฟีนลงบนแผ่นใช้งานโดยตรง หรือการนำโครงสร้างไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ไปใช้งานโดยตรง ตัวอย่างการสังเคราะห์กราฟีนลงบนแผ่นใช้งานโดยตรง เช่น การสังเคราะห์ลงบนแผ่น SiO₂/Si เพื่อใช้เป็นทรานซิสเตอร์ [9,10] หรือการสังเคราะห์ลงบนแผ่นควอตซ์เพื่อใช้เป็นแก๊สเซนเซอร์ [11] หรือบนแผ่นแคลเซียมไนไตรด์เพื่อใช้เป็นไดโอดเปล่งแสง เป็นต้น [12] ตัวอย่างของการนำโครงสร้างไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ไปใช้งาน เช่น การนำไปใช้วัสดุเสริมแรง โดยทำให้อยู่โครงสร้างแผ่นลามิเนตและไฟเบอร์ เป็นต้น [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่พิมพ์ขึ้นสำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบัน ปัญหามลพิษทางอากาศจากการปนเปื้อนสารเคมี ทวีความรุนแรงมากขึ้น ซึ่งสาเหตุหลักของการปนเปื้อนทางอากาศ คือกลุ่มสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds: VOCs) เนื่องจาก VOCs ในบรรยากาศส่วนมากมาจากอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเลียม สาเหตุหลักมาจากการรั่วไหลในระหว่างการถ่ายเทสารเคมีลงถังเก็บ การรั่วของท่อส่งสารเคมี และกลิ่นของน้ำเสีย เป็นต้น และสาร VOCs เป็นสารเคมีที่สำคัญในผลิตภัณฑ์ในครัวเรือนหลายประเภท เช่น ทินเนอร์ สารทำความสะอาด น้ำมันหล่อลื่น ควันบุหรี่ ยาฆ่าแมลง [14] และสาร VOCs ยังสามารถแฝงตัวอยู่ในอากาศ อาหาร และแหล่งน้ำ เป็นต้น [15] สาร VOCs มีสมบัติที่สำคัญคือระเหยเป็นไอได้ง่ายที่อุณหภูมิและความดันปกติทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ ซึ่งเมื่อในบรรยากาศมีความเข้มข้นของไอระเหย VOCs เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ จะมีผลกระทบต่อสุขภาพของคนทำงานและผู้อยู่อาศัยบริเวณนั้นๆ โดย E. F. Heineman, *et al.* [16] รายงานว่าการสัมผัสกับสารคาร์บอนเตตระคลอไรด์, เตตระคลอโรเอทิลีน, ไตรคลอโรเอทิลีนในกลุ่มคนงานที่ทำงานในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี มีปัจจัยเสี่ยงก่อการเกิดโรคมะเร็งสมองชนิด Astrocytic รวมถึงการได้รับสาร VOCs ในบริเวณปิดเช่นในบ้าน ก่อให้เกิดอันตรายมากกว่าในบริเวณเปิดโล่งมากถึง 5 เท่า [17] ทั้งนี้กรมมลพิษของประเทศไทยเอง ก็ได้กำหนดมาตรฐานค่าเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 24 ชั่วโมง เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ไม่เกิน 150 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เตตระคลอโรเอทิลีน ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไตรคลอโรเอทิลีน ไม่เกิน 130 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นต้น [18] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีระบบการเฝ้าระวังระดับแก๊สพิษในอากาศที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำ สามารถแจ้งเตือนเมื่อความเข้มข้นของแก๊สพิษถึงระดับที่อันตราย

ระบบการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของแก๊สพิษนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น วิธีโครมาโตกราฟี (Chromatography) แมสสเปกโตรเมตรี (Mass spectrometry) เป็นต้น แต่วิธีการเหล่านี้ ใช้เวลานาน ค่าใช้จ่ายสูง และยุ่งยาก ซึ่งแก๊สเซนเซอร์เป็นอีกวิธีในการตรวจสอบระดับความเข้มข้นของแก๊สพิษ ที่มีการทำงานที่ง่ายกว่าและใช้เวลาน้อยกว่าวิธีข้างต้น แต่ประสบปัญหาในเรื่อง อุณหภูมิการทำงานที่สูง (แก๊สเซนเซอร์จากโลหะออกไซด์) ขาดประสิทธิภาพการเลือกตรวจวัดชนิดแก๊ส และการตอบสนองแก๊สค่อนข้างต่ำ เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ วัสดุนาโนได้รับการพัฒนาเป็นแก๊สเซนเซอร์ชนิดใหม่ เช่น อนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ ท่อนาโนคาร์บอน เป็นต้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ดีเยี่ยม (High sensitivity) ในระดับความเข้มข้นต่ำถึงหนึ่งในร้อยล้านส่วน (Parts per billion: ppb) เช่น การตรวจวัดไนโตรเจนไดออกไซด์ แอมโมเนีย หรือ ไฮโดรเจน เป็นต้น [19–21] ทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ยังไม่สามารถแก้ปัญหาการเลือกตรวจวัดชนิดแก๊สได้อย่างแน่ชัด และการตอบสนองแก๊สประเภท VOCs ค่อนข้างต่ำ จึงมีความจำเป็นในการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการวัดแก๊ส VOCs เพื่อนำไปใช้งานจริง ในปัจจุบัน ได้มีการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัด VOCs เช่น การใช้ไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ เป็นต้น ซึ่งพบว่าแก๊สเซนเซอร์ไฮบริดของท่อนาโนคาร์บอนและ PMMA สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยของไดคลอโรมีเทนได้ 5.4 เท่า เมื่อเทียบกับแก๊สเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอน เป็นต้น [22] โดยอาศัยหลักการพองตัวของพอลิเมอร์เมื่อสัมผัสกับไอ VOCs

ในงานวิจัยนี้ เพื่อแก้ปัญหาค่าคงของพอลิเมอร์บนกราฟีน และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหย VOCs ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการนำไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้งานเป็นแก๊สเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของ VOCs โดยในงานวิจัยจะโอนย้ายกราฟีนจากแผ่นคอปเปอร์ไปยังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่น SiO_2/Si ด้วยกระบวนการ Wet process และเลือกใช้ PMMA สำหรับเคลือบชั้นกราฟีน และศึกษาถึงความสามารถในการทำงานของแก๊สเซนเซอร์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างแก๊สเซนเซอร์กราฟีนและแก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและ PMMA

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการย้ายวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA จากแผ่นคอปเปอร์ไปยังแผ่น SiO_2/Si
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ที่ทำมาจากวัสดุกราฟีน และวัสดุไฮบริดกราฟีน และพอลิเมอร์ PMMA
- 1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดคลอโรมีเทน และเบนซีนของวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุกราฟีน

1.3 สมมติฐานงานวิจัย

เนื่องจากวัสดุกราฟีน มีสมบัติพิเศษในด้านการนำไฟฟ้าที่ดีเมื่อเทียบขนาดน้ำหนักมวลและมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่สูง เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นวัสดุตรวจวัดแก๊สนอกจากนี้การถ่ายโอนกราฟีนด้วยวิธีการ Wet process โดยมีชั้นพอลิเมอร์ PMMA เคลือบทับนั้น หากไม่กำจัดชั้น PMMA ออก จะทำให้ได้วัสดุไฮบริดกราฟีนและ PMMA ซึ่งหากนำวัสดุไฮบริดนี้ไปใช้เป็นวัสดุตรวจวัดแก๊สแล้ว ชั้น PMMA จะสามารถทำหน้าที่ได้ 2 อย่าง ได้แก่ (1) เป็นชั้นป้องกันกราฟีน ทำให้กราฟีนยังคงความบริสุทธิ์ รักษาสมบัติเดิมไว้ได้ ไม่เกิดจุดบกพร่อง (Defect) ที่อาจจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการล้าง PMMA ออก และ (2) PMMA ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดแก๊ส โดย PMMA นั้นจะเกิดการพองตัว หรือปรากฏการณ์ Swelling ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุเปลี่ยนและทำให้มีความจำเพาะ (Selectivity) ต่อแก๊ส

1.4 กรอบแนวคิดงานวิจัย

ศึกษาถึงความสามารถในการทำงานของแก๊สเซนเซอร์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างแก๊สเซนเซอร์กราฟีนและแก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและ PMMA ต่อประสิทธิภาพการตรวจวัด VOCs โดยใช้การนำไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้งานเป็นแก๊สเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของ VOCs เนื่องจากการล้างพอลิเมอร์จะทำให้เกิดปัญหาการตกค้างของพอลิเมอร์หรือสารเคมีที่ไม่สามารถล้างออกได้หมด ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกราฟีนต่ำลง แต่ในขณะที่การเคลือบพอลิเมอร์ทั่วทั้งกราฟีนน่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพแก๊สเซนเซอร์ได้ โดยอาศัยหลักการพองตัวของพอลิเมอร์เมื่อสัมผัสกับไอ VOCs

1.5 ขอบเขตการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษาการโอนย้ายวัสดุกราฟีนที่ปลูกบนแผ่นคอปเปอร์ไปยังแผ่น SiO_2/Si โดยวิธี Wet process
- 1.5.2 ศึกษาสัณฐานวิทยา โครงสร้าง และค่าการนำไฟฟ้า ของวัสดุกราฟีนที่ถูกโอนย้ายไปยังแผ่น SiO_2/Si ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) กล้องจุลทรรศน์ทางแสง กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy: AFM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM) และเครื่องมือวัดตามลำดับ
- 1.5.3 ศึกษาประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA ที่ได้จากการโอนย้ายกราฟีนมายังแผ่น SiO_2/Si โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อไอระเหย VOCs ได้แก่ เอทานอล ไนโตรเจนไดออกไซด์ และเบนซีน

1.6 ขั้นตอนของการวิจัย

สำหรับแผนการดำเนินงานวิจัยในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก คือ

- 1.6.1 ออกแบบระบบวัดแก๊สเซนเซอร์และการตรวจสอบความเสถียรของระบบวัดแก๊ส
- 1.6.2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการโอนย้ายวัสดุกราฟีน ระบบการวัดแก๊สเซนเซอร์ และแก๊สเซนเซอร์กราฟีน
- 1.6.3 โอนย้ายวัสดุกราฟีนและพอลิเมอร์ จากแผ่นคอปเปอร์ไปยัง แผ่น SiO_2/Si
- 1.6.4 วัดประสิทธิภาพการวัดแก๊สของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีน และพอลิเมอร์ PMMA

ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยทั้ง 5 ส่วนแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	สิงหาคม 2558	กันยายน - พฤศจิกายน 2558	ธันวาคม 2558	มกราคม 2559	กุมภาพันธ์ - มีนาคม 2559	เมษายน - พฤษภาคม 2559
ทบทวนวรรณกรรมและ ตรวจสอบความเสถียร ของระบบวัด						
ศึกษาการโอนย้ายก ราฟีนจากแผ่นคอปเปอร์ ไปยังแผ่นSiO ₂ /Si						
ศึกษาประสิทธิภาพแก๊ส เซนเซอร์ กราฟีนที่ได้ จากการโอนย้าย						
เขียนเล่มโครงการพิเศษ บทที่ 1-3						
ศึกษาประสิทธิภาพแก๊ส เซนเซอร์ กราฟีน และ แก๊สเซนเซอร์ไฮบริด กราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA						
สรุปผลงานและเขียน เล่มโครงการพิเศษ						

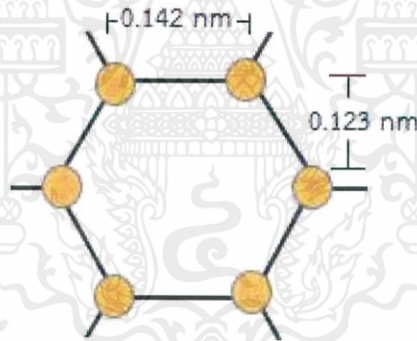
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 กราฟีน

กราฟีน (Graphene) คือวัสดุที่มีโครงสร้างที่เกิดจากการจัดเรียงของอะตอมคาร์บอนแบบวงหกเหลี่ยม (Hexagonal configuration) ในแนวระนาบ 2 มิติ [4] หลายๆ วงต่อกันในลักษณะคล้ายรังผึ้งเกิดเป็นแผ่นกราฟีน ที่มีความหนาเท่ากับขนาดอะตอมคาร์บอน หรือประมาณ 0.34 นาโนเมตร และมีระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอน 0.142 นาโนเมตร ดังภาพที่ 2.1 กราฟีนมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลากหลายซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกัน เป็นวัสดุชนิดแรกที่มีเพียง 2 มิติ อย่างแท้จริง โดยลักษณะทางกายภาพนั้นกราฟีนเป็นวัสดุโปร่งแสง มีความต้านทานต่ำ มีน้ำหนักต่อพื้นที่เบา มีความแข็งแรงมาก และยังสามารถบิดหรือโค้งงอได้โดยไม่ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย และด้วยความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีเยี่ยมจึงทำให้กราฟีนได้รับความสนใจอย่างมาก



ภาพที่ 2.1 รูปแบบการจัดเรียงอะตอมกราฟีน [2]

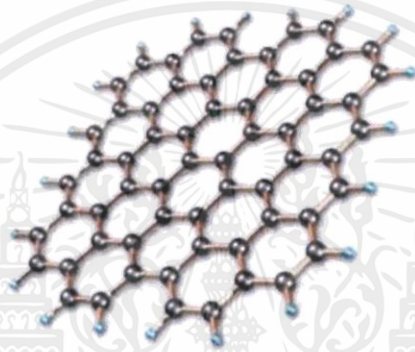
วัสดุกราฟีนถูกเตรียมขึ้นได้เป็นครั้งแรกในปี 2547 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซียได้แก่ ดร. อังเดร ไกม์ (Andre Geim) และ ดร.คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Konstantin Novoselov) โดยทั้งสองคนสามารถทำให้กราฟีนมีขนาดบางลงจนเหลือเพียงชั้นเดียวได้ ซึ่งมีความหนาเท่ากับอะตอมเดียว อีกทั้งยังมีความเสถียรได้สภาวะธรรมชาติ และเรียกวัดนี้ว่า “กราฟีน” การค้นพบนี้ทำให้ ไกม์ และโนโวเซลอฟ ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี 2553 ที่ผ่านมา [4]

2.1.1 สมบัติพื้นฐาน

เนื่องจากโครงสร้างกราฟีนมีลักษณะโครงสร้างกราฟีนที่เป็นแบบรังผึ้ง ดังภาพที่ 2.2 อีกทั้งโครงสร้างของกราฟีนมีความบางมากมีความหนาอยู่ประมาณ 0.34 นาโนเมตร ทำให้กราฟีนมีสมบัติต่างๆ ที่น่าสนใจดังต่อไปนี้ [3,23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.1.1.1 สมบัติทางแสง ที่สามารถให้แสงทะลุผ่านได้โดยมีค่าดูดซับแสงเพียงร้อยละ 2.3 [23]
- 2.1.1.2 สมบัติการนำไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้าต่ำ กราฟีนมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนที่สูงที่อุณหภูมิห้อง โดยมีค่าตามรายงาน มากกว่า $15,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [3]
- 2.1.1.3 สมบัติเชิงกล ความแข็งแรงมากแต่กลับสามารถบิดงอได้โดยโครงสร้างไม่เสียหายอีกด้วย วัสดุความแข็งแรงทำลายมากกว่า 100 เท่า [3] ของแผ่นเหล็กสมมุติที่มีความหนาเท่ากัน ด้วยโมดูลัสแรงดึง (ความแข็ง) จาก 1 TPa [3]
- 2.1.1.4 สมบัติการนำความร้อน วัสดุค่าความนำความร้อนจำเพาะของกราฟีนได้สูงกว่าวัสดุประเภทอื่นๆ และยังสามารถนำความร้อนได้ดีกว่าเพชร



ภาพที่ 2.2 รูปแบบโครงสร้างกราฟีน

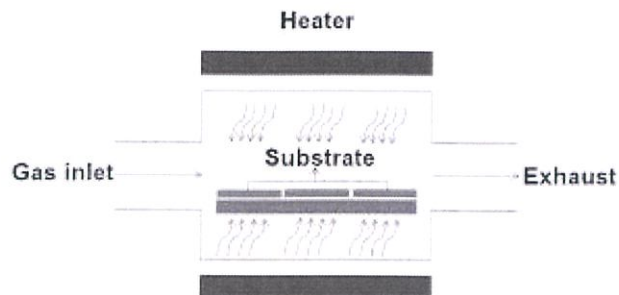
(<https://www.flickr.com/photos/93153439@N06/8468735996/>)

2.1.2 การสังเคราะห์กราฟีนบนแผ่นคอปเปอร์

กราฟีนถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกด้วยวิธี Micromechanical Exfoliation หรือการลอกชั้นบางๆ ของกราฟีนออกจากกราไฟต์ (Graphite) ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ได้กราฟีนในปริมาณที่น้อย เหมาะสำหรับ การนำไปศึกษาสมบัติพื้นฐาน แต่ในการสังเคราะห์กราฟีนในปริมาณมากนั้นนิยมใช้วิธีการสังเคราะห์ ทางเคมี และ ไอระเหยเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD)

หลักการในการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD นั้น เป็นการให้ความร้อนกับท่อควอตซ์ที่ภายในมี ฐานรองรับที่เราต้องการปลูกกราฟีนอยู่ภายใน ดังภาพที่ 2.3 โดยให้ความร้อนสูงภายในท่อควอตซ์ จากนั้นปล่อยให้แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen: H_2) ไหลเข้าไปในระบบท่อควอตซ์เป็นเวลาหนึ่ง จากนั้น ค่อยให้แก๊สมีเทน (Methane: CH_4) เข้าไปผสมกับแก๊สไฮโดรเจนที่ละน้อยๆ เมื่อแก๊สมีเทนเจอความร้อนสูงจะแตกตัวเป็นไอออน และเมื่อลดอุณหภูมิไอออนคาร์บอนจะไปเกาะเรียงตัวอยู่บนแผ่น ฐานรองรับและเมื่ออุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง ไอออนคาร์บอนที่เรียงตัวอยู่บนฐานรองรับจะมีการ จัดเรียงโครงสร้างเป็นลักษณะรังผึ้งเป็นโครงสร้างของกราฟีนเกาะอยู่บนฐานรองรับ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



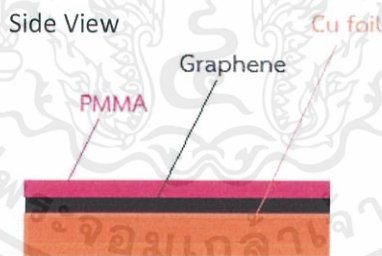
ภาพที่ 2.3 แผนภาพอย่างง่ายของเครื่อง CVD

(file:///C:/Users/USER/Downloads/DigitalFile_89637.pdf)

2.1.3 การโอนย้ายกราฟีน

การโอนย้ายกราฟีนนั้นเป็นเทคนิคในการนำกราฟีนที่สังเคราะห์ที่ได้นำไปใช้งานต่อ ซึ่งเทคนิคในการโอนย้ายนั้นก็มีอยู่ด้วยกันหลายวิธีเช่น วิธีการกระบวนการเปียก (wet process) โดยการใช้สารเคมีกัดกร่อน (wet etching) วิธีการโอนย้ายขั้นตอนเดียว เป็นต้น ในงานวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้เทคนิคการโอนย้ายกราฟีนด้วยวิธี wet process เนื่องจากจะได้กราฟีนที่สมบูรณ์เมื่อทำการโอนย้ายเสร็จ

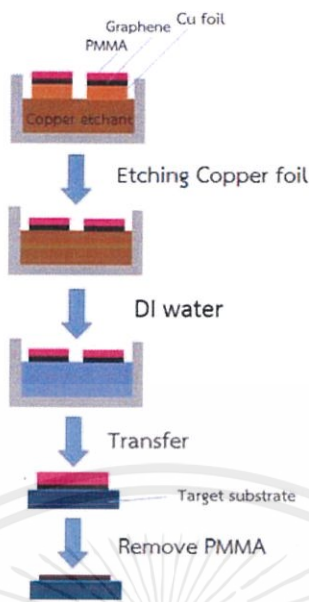
โดยวิธีการ wet process จะเคลือบด้วยพอลิเมอร์บนกราฟีน ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งพอลิเมอร์ที่นิยมนั้นมีพอลิเมทิลเมทาไครเลต (Poly(methyl methacrylate): PMMA) และพอลิไดเมทิลไซโลเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) เคลือบพอลิเมอร์บนกราฟีนด้วยวิธีการเคลือบหมุนเหวี่ยง เพื่อเป็นการรับรองกราฟีนเมื่อต้องการโอนย้ายกราฟีนไปยังฐานรองรับที่ใช้งานในอุปกรณ์ต่างๆต่อไป



ภาพที่ 2.4 แผนภาพอย่างง่ายของลำดับชั้นการเรียงตัวเพื่อการโอนย้ายแผ่นกราฟีน

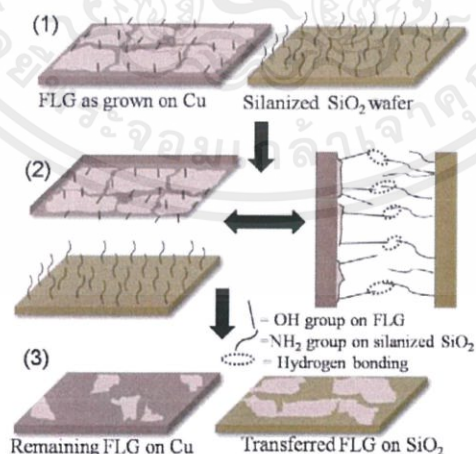
ส่วนหลักการ wet etching นั้นคือที่สารละลายมีการแตกตัวเป็นไอออน แล้วไอออนของสารละลายนั้นไปชนกับผิวสารแล้วเกิดการทำปฏิกิริยาเคมีทำให้ผิวสารถูกละลายออกมาอยู่ในสารละลายทำให้สามารถนำกราฟีนออกมาจากฐานรองได้ จากนั้นทำความสะอาดแผ่นกราฟีนก่อนโอนย้ายไปยังฐานรองที่ใช้งาน ดังภาพที่ 2.5 ฐานรองที่นิยมใช้เป็นส่วนใหญ่นั้นคือซิลิกอนไดออกไซด์ โดยใช้แผ่นซิลิกอนไดออกไซด์ค้อยๆ ซ้อนแผ่นกราฟีนขึ้น รองจนกระทั่งกราฟีนแห้งและติดกับฐานรองสนิทแล้วจึงนำไปให้ความร้อนและนำไปล้างพอลิเมอร์ออกด้วยการแช่สารละลายอะซีโตน [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.5 โดอะแกรมการโอนย้ายกราฟีน

ส่วนวิธีการ Facile one-step transfer process นั้นเป็นการใช้หลักการยึดเกาะ กราฟีนกับฐานรองรับ ด้วยวิธีการสร้างพันธะระหว่างฐานรองรับและแผ่นกราฟีนที่สังเคราะห์ได้ โดยฐานรองรับนิยมใช้เป็นส่วนใหญ่นั้นคือซิลิกอนไดออกไซด์ โดยสร้างหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH groups) บนแผ่นกราฟีนและสร้างหมู่ฟังก์ชันเอไมด์ (-NH₂ groups) บนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์ จากนั้นนำทั้งสองมาประกบกันจะทำให้หมู่ฟังก์ชันเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนขึ้น [7] ดังรูป 2.6 ทำให้สามารถลอกกราฟีนออกจากฐานปลูกมายังฐานรองรับที่ต้องการได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้พอลิเมอร์เคลือบกราฟีน แต่วิธีการนี้มีข้อเสียหลักๆ คือกราฟีนที่ได้จะไม่เป็นแผ่นที่สมบูรณ์

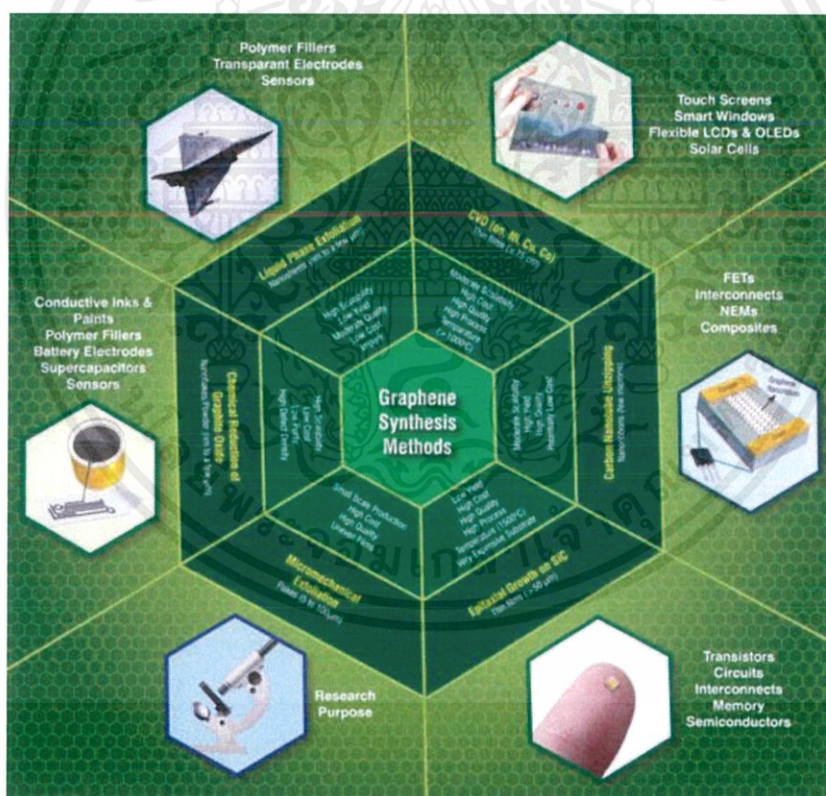


ภาพที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการการโอนย้ายกราฟีนด้วยวิธี Facile one-step transfer process [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การประยุกต์ใช้งานกราฟีน

ปัจจุบันได้มีการนำกราฟีนมาใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง ดังภาพที่ 2.7 เพราะความสามารถทางการนำไฟฟ้า ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าท่อคาร์บอนนาโนแบบผนังชั้นเดียวมากกว่าสองเท่า ดังนั้นจึงมีการนำกราฟีนมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์หลายด้าน อาทิเช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistor) อุปกรณ์บันทึกความจำ (Memory device) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical sensor) เป็นต้น [4] อีกทั้งกราฟีนสามารถใช้เป็นตัวนำโปร่งแสงที่ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น หน้าจอแบบสัมผัส (Touch screen) แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor) และเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) ซึ่งสามารถใช้แทนที่การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้อินเดียมทินออกไซด์ (Indium-Tin-Oxide: ITO) ที่เป็นวัสดุราคาแพงได้ [24] กราฟีนสามารถปรับแต่งได้อย่างหลากหลายโดยการเติมสารเคมี หรือโดยการใช้สนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้กราฟีนเป็นวัสดุที่น่าสนใจมากสำหรับการใช้ไฟฟ้าความถี่สูง นอกจากนี้จากปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์ (Quantum Hall effect) ในกราฟีนยังอาจจะนำไปสู่มาตรฐานความต้านทานที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นในการชั่งตวงวัด (Metrology) และการคิดค้นวัสดุผสมชนิดใหม่โดยใช้ กราฟีนที่มีความแข็งแรงมากและน้ำหนักเบาเพื่อใช้ผลิตดาวเทียมและวัสดุการบินต่อไปในอนาคต



ภาพที่ 2.7 การประยุกต์ใช้กราฟีนในอุปกรณ์ต่างๆ
(<http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=34184.php>)

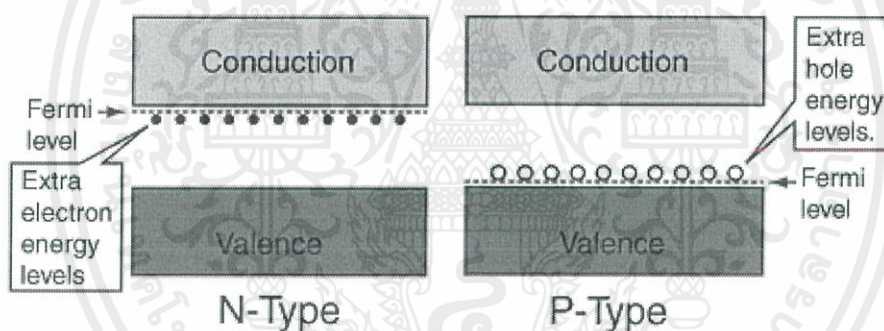
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แก๊สเซนเซอร์

แก๊สเซนเซอร์คือ อุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดแก๊สได้เมื่อมีแก๊สสัมผัสกับตัวอุปกรณ์ เพื่อป้องกันแก๊สอันตรายที่เกิดการรั่วไหล แล้วไม่สามารถตรวจจับได้โดย มอง หรือการดมกลิ่นอีกทั้งยังอาจมีความเป็นพิษสูง ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการตรวจสอบโดยการดมกลิ่น เนื่องจากจะเกิดอันตรายกับผู้ที่สูดดมได้ ดังนั้นอุปกรณ์แก๊สเซนเซอร์นั้นจึงมีความจำเป็นในการนำมาใช้ในการตรวจสอบสารระเหยง่าย

2.2.1 หลักการทำงานพื้นฐาน

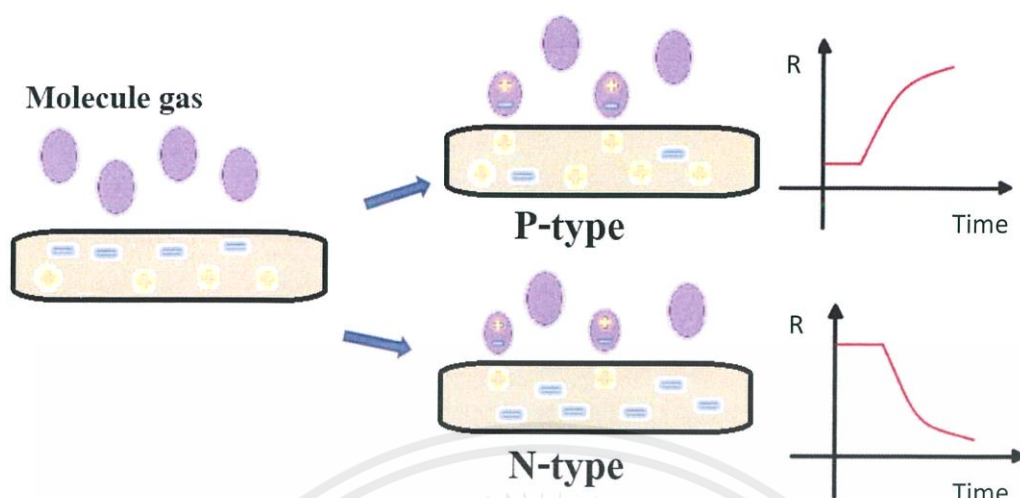
หลักการการทำงานของแก๊สเซนเซอร์นั้นเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์เมื่อสัมผัสกับแก๊สต่างชนิดกัน เนื่องมาจากสารที่ใช้ในอุปกรณ์เซนเซอร์นั้นเป็นสารจำพวกสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า ซึ่งสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งการนำไฟฟ้าทั้งสองชนิดนั้นแตกต่างกัน โดยแบบ N-type เป็นสารที่มีการสะสมอิเล็กตรอน (Electron: e^-) มากกว่าโฮล (Hole) จึงเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ส่วนแบบ P-type สารที่มีการสะสมอิเล็กตรอนน้อยกว่าโฮล จึงเป็นการเคลื่อนที่ของโฮล



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างชั้นพลังงานสารกึ่งตัวนำ N-Type และ P-Type
(<https://www.mwit.ac.th/~physicslab/hbase/solids/dope.html>)

โดยหลักการการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของอุปกรณ์นั้น เกิดจากการแลกเปลี่ยนพาหะอิเล็กตรอนกันระหว่างแก๊สกับสารกึ่งตัวนำ โดยเมื่อแก๊สสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำของอุปกรณ์ แก๊สจะให้อิเล็กตรอนแก่สารกึ่งตัวนำ ทำให้สารกึ่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงเรื่องความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะในสารกึ่งตัวนำทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไป โดยสารกึ่งตัวนำชนิด P-type จะทำให้การเคลื่อนที่ของพาหะโฮล เคลื่อนที่ได้น้อยลงเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ได้จากแก๊สจะไปเหนี่ยวนำให้โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำ P-type มาอยู่ที่บริเวณผิว ซึ่งสารแบบ P-type นั้นมีพาหะโฮล อยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การเคลื่อนที่ของโฮลเป็นไปได้ยากขึ้น จึงทำให้ค่าความต้านทานสูงขึ้น ส่วนโดยสารกึ่งตัวนำชนิด N-type จะทำให้การเคลื่อนที่ของพาหะอิเล็กตรอน เคลื่อนที่ได้มากขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ได้จากแก๊สจะช่วยเหนี่ยวนำโฮลที่มีอยู่จำนวนน้อยภายในสารแบบ N-type ไปยังบริเวณพื้นผิว ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ของพาหะอิเล็กตรอนภายในสารกึ่งตัวนำ N-type ไม่ถูกรบกวน จึงทำให้ค่าความต้านทานน้อยลง ดังภาพที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 รูปแบบการตอบสนองต่อแก๊สตรวจสอบของแก๊สเซนเซอร์

2.2.2 แก๊สเซนเซอร์วัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds: VOCs) คือ กลุ่มสารประกอบอินทรีย์ (Organic Compounds) ที่ระเหยเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศ ได้ในที่อุณหภูมิและความดันปกติ โมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจน อาจมีออกซิเจนหรือคลอรีนร่วมด้วย สามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้อง ในชีวิตประจำวันเราได้รับ VOCs จากผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น สีทาบ้าน, ควันบุหรี่, น้ำยาฟอกสี, สารตัวทำละลายในพิมพ์, จากอุปกรณ์สรีดยนต์, โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น สารที่เกิดจากเผาไหม้ และปะปนในอากาศ น้ำดื่ม เครื่องดื่ม อาหาร สารอินทรีย์ ไอระเหยที่สะสมไว้มากนาน ๆ จะมีผลกระทบทางชีวภาพและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ การแบ่งประเภทตามลักษณะของโมเลกุลแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

2.2.2.1 กลุ่มที่ไม่มีธาตุคลอรีน หรือธาตุในกลุ่มฮาโลเจนเป็นส่วนประกอบในโมเลกุล (Non-Chlorinated VOCs หรือ Non-Halogenated Hydrocarbons) ซึ่งประกอบด้วยสารในกลุ่มน้ำมันเชื้อเพลิง ได้แก่ Hexane, Alcohol, Aldehyde, Toluene, Benzene, Ethylbenzene, Xylene, Styrene และ Phenol

2.2.2.2 กลุ่มที่มีธาตุคลอรีน หรือธาตุในกลุ่มฮาโลเจนเป็นส่วนประกอบในโมเลกุล Chlorinated VOCs หรือ Halogenated Hydrocarbons ซึ่งมักเป็นสารเคมีที่สังเคราะห์ใช้ในอุตสาหกรรม และโดยทั่วไปมีความเป็นพิษมากกว่าและเสถียรตัวในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารกลุ่มที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล เพราะมีโครงสร้างที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนและธาตุฮาโลเจนที่ทนทานมากยากต่อการสลายตัวในธรรมชาติ ทางชีวภาพ ทางกายภาพ หรือโดยทางเคมีทั่วไป มีความคงตัวสูงและสะสมได้นาน สารในกลุ่มนี้ได้แก่ 1,1,1-Trichloroethane, Tetrachloroethylene, Perchloroethylene (PCE), Trichloroethylene (TCE) สำหรับในกลุ่มนี้โดยเฉพาะสาร TCE เป็นสารตัวทำละลายในน้ำยาซักแห้ง น้ำยาละลายคราบน้ำมัน หรือคราบไขมัน และเรซินต่าง ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม สำหรับสาร TCE ซึ่งเป็นน้ำยาซักแห้งและใช้มากในกลุ่มร้านซักกรีด ซึ่งจัดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมในครัวเรือนที่เปิดให้บริการอยู่ทั่วไป ดังตัวอย่างของสารอินทรีย์ระเหยที่พบได้ในสิ่งแวดล้อม ชนิด Halogenated Hydrocarbons [25]

ในปัจจุบันอุปกรณ์แก๊สเซนเซอร์นั้นเป็นที่นิยมอย่างมากและมีการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวอุปกรณ์ซึ่งมีผลถึงประสิทธิภาพในการทำงานของตัวอุปกรณ์วัดแก๊สเซนเซอร์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพนั้นมีหลากหลายไม่ว่าจะเป็น วัสดุที่นำมาใช้ แก๊สที่นำมาวัด อุณหภูมิที่วัดแก๊ส หรือแม้กระทั่งรูปแบบระบบวัดก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์วัดแก๊สเซนเซอร์ทั้งสิ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงขออธิบายถึงปัจจัยของวัสดุที่นำมาใช้ที่ประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์วัดแก๊สเซนเซอร์ที่นำมาใช้วัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่วัสดุคาร์บอนที่นิยมนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์วัดแก๊สสารอินทรีย์ระเหยง่าย ดังตารางที่ 2.1 พบว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แก๊สเซนเซอร์นั้นมีผลมาจากวัสดุที่จัดทำและชนิดของสาร

ตารางที่ 2.1 แสดงประสิทธิภาพของอุปกรณ์วัดแก๊สที่ใช้วัสดุต่างชนิดกัน

Organic Materials		gas	concentration (ppm)	Response ΔR	Response time (min)	Recovery time (min)	Ref.
2D structure	PPD - modified RGO	DMMP	20	8%	18	6	[26]
1D structure	SWNT/ PMMA	MeOH	271	10%	-	-	[22]
	Polymer - modified CNTs	DMMP	20	< 5	1200	600	[26]

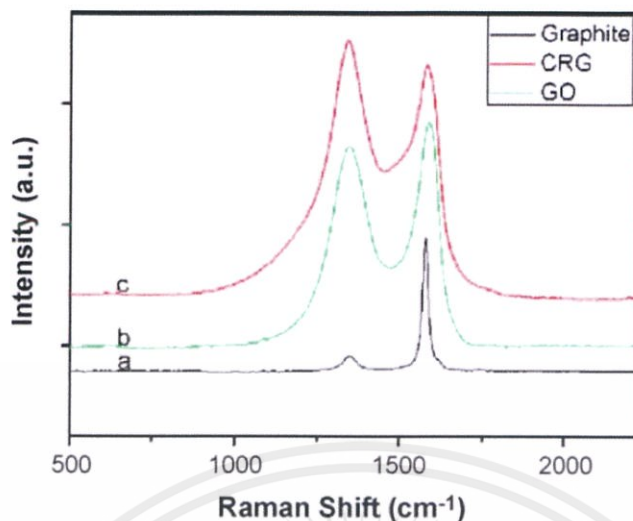
ในงานวิจัย Gas sensor based on p-phenylenediamine reduced graphene oxide โดย Hu และคณะ [26] ได้มีการนำกราฟีนมาทำเป็นแก๊สเซนเซอร์ โดยนำกราฟีนมาทำเป็น กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มาทำเป็นแก๊สเซนเซอร์วัดแก๊สต่างๆโดยใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงาน



ภาพที่ 2.10 (a) สารละลายกราฟีนออกไซด์ (1 mg/ml), (b) และ (c) สารละลายรีดิวซ์กราฟีนด้วย

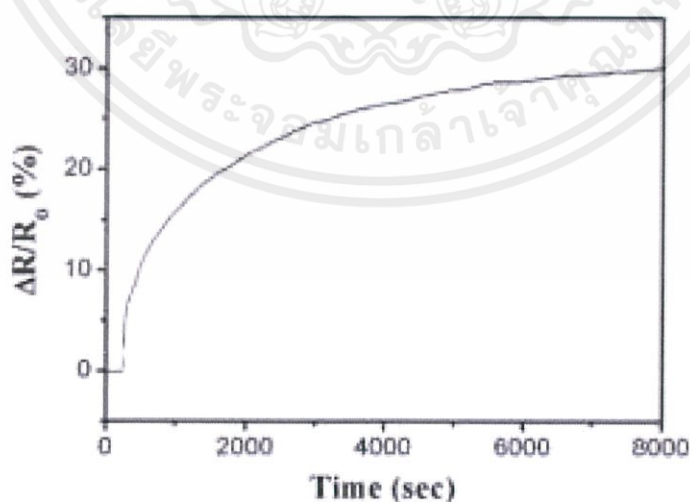
ปฏิกิริยาทางเคมี ในเอทานอล (1mg/ml และ 0.025 mg/ml ตามลำดับ) [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 กราฟรามานของสาร กราฟีน, รีดิวซ์กราฟีนด้วยปฏิกิริยาทางเคมี และกราฟีนออกไซด์ ตามลึที่กำหนด [26]

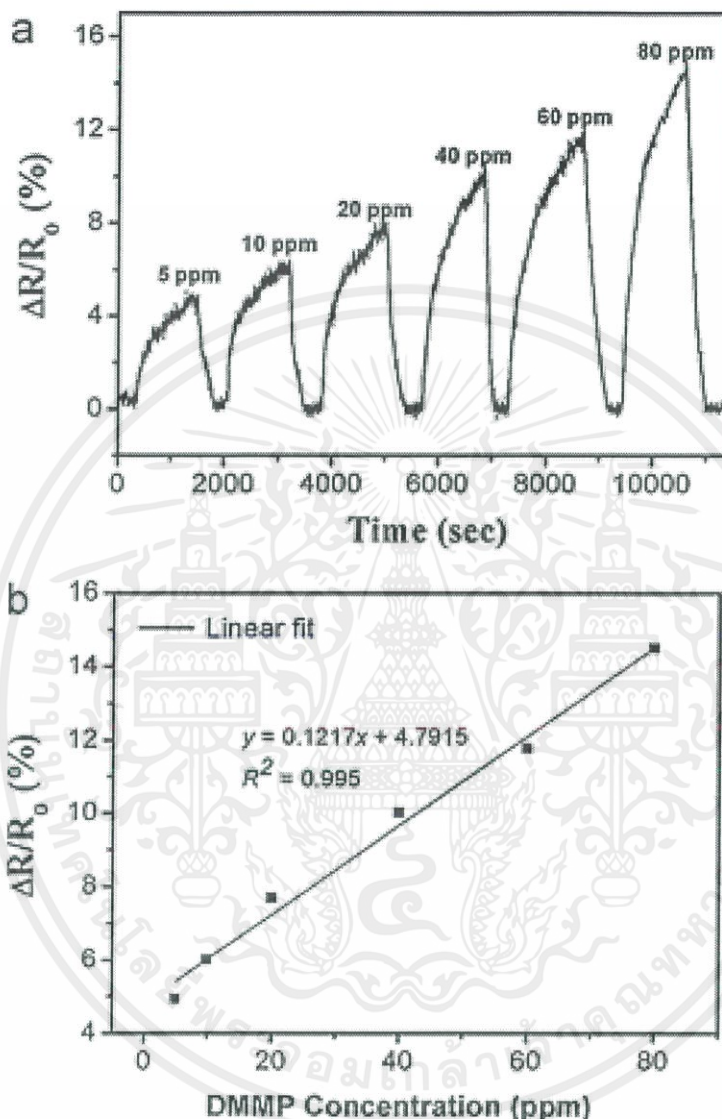
จากภาพที่ 2.11 พบว่าค่า Raman shift ของสารทั้งสองมีค่าช่วงที่พิกสูงตรงกันทั้งสองพิก คือ พิกของช่วง D-band และช่วง G-band โดยความถี่ประมาณ 1340 cm^{-1} เรียกว่า D-band (D: disorder) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกันกับพันธะของกราฟไฟต์ที่ไม่เป็นระเบียบ และในช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่าง $1500\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ เรียกว่า G-band จะตอบสนองกับพันธะของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยยิ่งพิก D-band ยิ่งสูงยิ่งแสดงถึงความเป็นไม่ระเบียบของโครงสร้าง ซึ่งจากภาพที่ 2.11 พบว่าพิก D-band สูงกว่าพิก G-band ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาทางเคมี (chemically reduced graphene oxide: CRG) เมื่อเทียบกับสารอื่นๆ



ภาพที่ 2.12 ค่าการตอบสนองของ CRG วัดแก๊ส DMMP ภายใต้ความเข้มข้น 80 ppm [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.12 พบว่าแก๊สเซนเซอร์ CRG เมื่อวัดแก๊ส DMMP แล้วนั้นจะให้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงเวลาที่วินาที 8000 จึงจะให้ค่าความต้านทานที่คงที่แสดงให้เห็นค่าการอิ่มตัวในการวัดแก๊สนี้ที่ความเข้มข้น 80 ppm



ภาพที่ 2.13 (a) ค่าการตอบสนองของ CRG วัดแก๊ส DMMP ภายใต้ความเข้มข้น 5-80 ppm (b) กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าการตอบสนองของ CRG ที่วัดแก๊ส DMMP ภายใต้ความเข้มข้นต่างๆ [26]

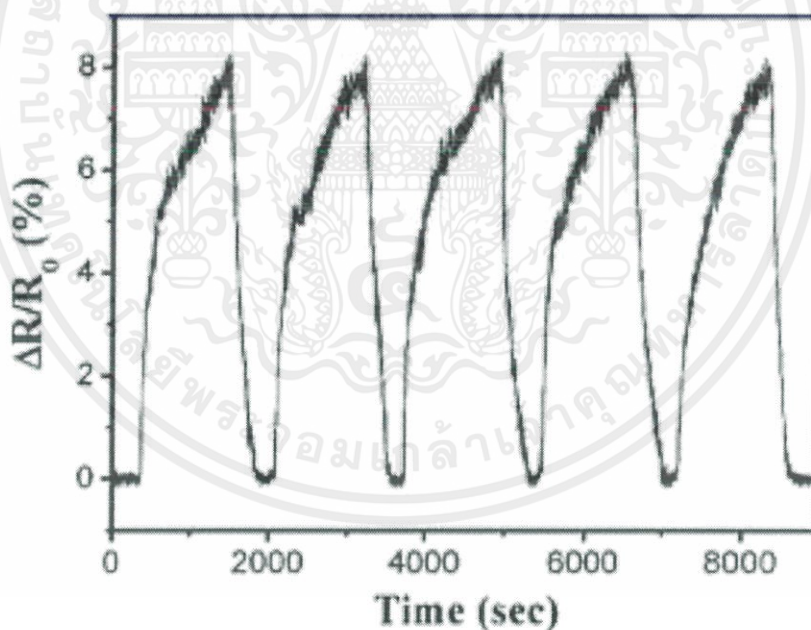
จากภาพที่ 2.13 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแก๊ส DMMP มากขึ้นค่าความเปลี่ยนแปลงความต้านทานของอุปกรณ์เซนเซอร์ CRG ยิ่งเพิ่มมากขึ้นในภาพที่ 2.13(a) เมื่อนำมาทำความเข้าใจความสัมพันธ์กันในค่า response ของความเข้มข้นต่างๆที่วัดพบว่าให้เส้นสมการเป็นสมการเส้นตรง นั่นก็คือยิ่งเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานยิ่งเพิ่มมากขึ้นแสดงในภาพที่ 2.13(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบอุปกรณ์เซนเซอร์ในการวัดแก๊ส DMMP

DMMP sensing materials	Deposition method	Response time (s)	Response to 20 ppm DMMP (%)	Recovery time (s)
CRG	Dip-dropping	1080	8	360
SnO ₂	Precipitation	500	>80	-
6FBPA modified CNTs	Dip-dropping	960	5.1	720
Polymer-modified CNTs	Dip-dropping	1200	<5	600

จากตารางที่ 2.2 พบว่า อุปกรณ์เซนเซอร์ CRG มีเวลาการใช้ในการไล่แก๊ส DMMP ออกจากอุปกรณ์เป็นเวลาน้อยที่สุดและมีค่าเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อแก๊ส DMMP เป็นเวลา 1080 วินาที ซึ่งจากการเทียบกับอุปกรณ์อื่นพบว่าเวลาที่ใช้อยู่ในช่วงการใช้เวลาปานกลางไม่มากไม่น้อยจนเกินไปและให้เปอร์เซ็นต์ค่าการตอบสนองต่อแก๊สอยู่ที่ร้อยละ 8 ซึ่งดีรองลงมาจากอุปกรณ์ SnO₂ แต่เนื่องจากอุปกรณ์เซนเซอร์นี้ไม่สามารถไล่แก๊สออกได้เมื่อใช้ในการวัดแก๊สแล้ว จึงสามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์เซนเซอร์ CRG มีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากใช้เวลาในการไล่แก๊สออกได้เร็วที่สุด

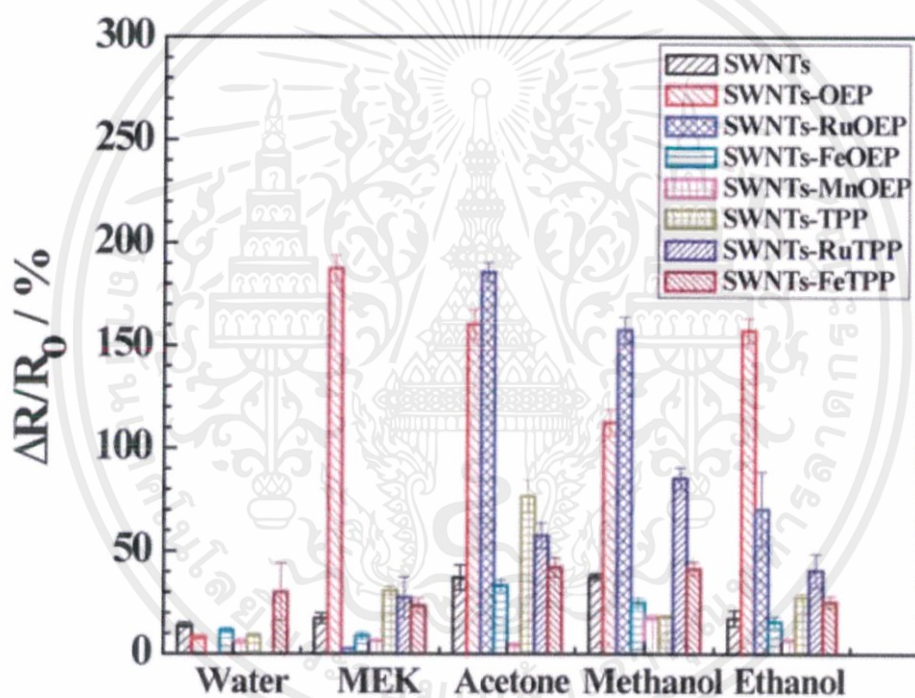


ภาพที่ 2.14 ค่าการตอบสนองของ CRG วัดแก๊ส DMMP ภายใต้ความเข้มข้น 20 ppm [26]

จากภาพที่ 2.14 พบว่าค่าการตอบสนองของอุปกรณ์มีความเสถียรอีกทั้งอุปกรณ์ยังสามารถไล่แก๊ส DMMP ออกจากอุปกรณ์ได้หมดเนื่องจากค่าการตอบสนองของอุปกรณ์กลับมาเท่าเดิมซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

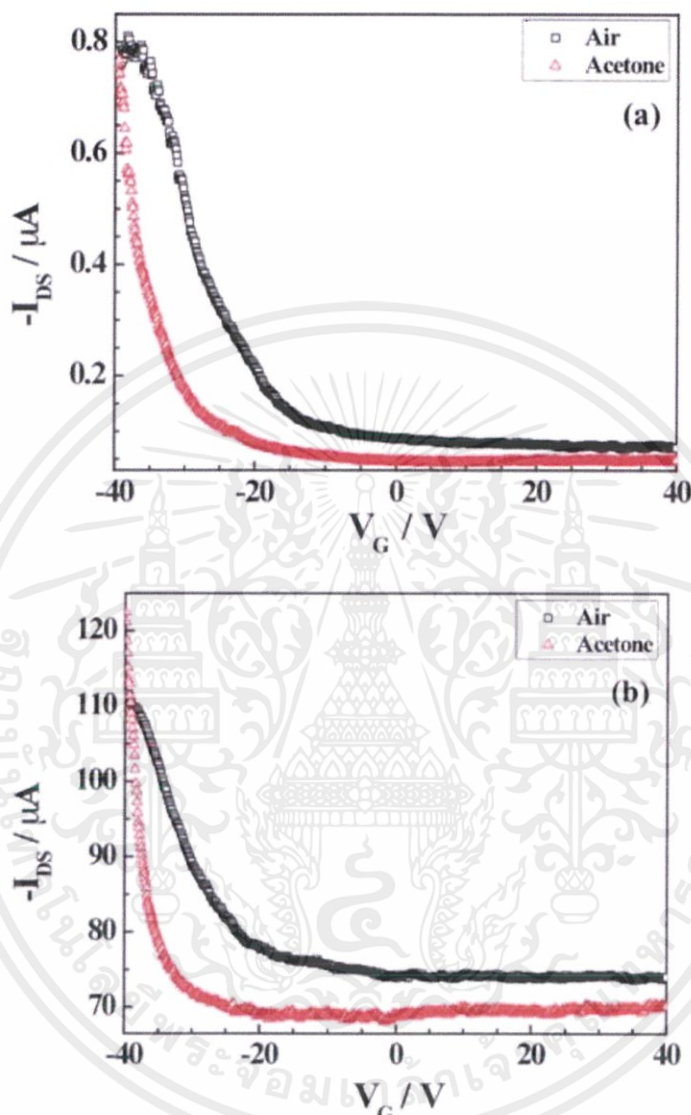
และในงานวิจัย Porphyrin-Functionalized Single-Walled Carbon Nanotube Chemiresistive Sensor Arrays for VOCs ของ Shirsat และคณะ [27] ได้แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงวัสดุส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์การวัดแก๊สเซนเซอร์โดยในงานวิจัยนี้ได้้นำคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียว (Single Walled Carbon Nanotube : SWNTs) มาทำแก๊สเซนเซอร์เนื่องจากมีสมบัติพิเศษด้านการนำไฟฟ้า และเมื่อนำ SWNTs มาปรับปรุงโครงสร้างได้เป็น hybrid SWNTs โดยใช้สารดังต่อไปนี้ octaethyl porphyrin (OEP), ruthenium OEP (RuOEP), iron OEP (FeOEP), manganese OEP (MnOEP), tetraphenyl porphyrin (TPP), ruthenium TPP (RuTPP), และ iron TPP (FeTPP) ในการปรับปรุงโครงสร้าง SWNTs แล้วนำมาวัดแก๊ส VOCs ได้แก่ น้ำ เมทิลเอทิลคีโตน (MEK) เอทานอลและเมทานอล โดยวิธีวัดแก๊สจะใช้วิธีการวัดจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของวัสดุที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีแก๊สสัมผัส ทำให้ค่าความต้านทานของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าวัสดุแต่ละชนิดจะให้ผลการวัดแก๊สที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 กราฟการเปรียบเทียบค่าการตอบสนองของอุปกรณ์แบบต่างๆ ที่ใช้วัดแก๊สอะซีโตน, เมทานอล, เมทานอล, เมทิลเอทิลคีโตน, และ น้ำ (@100% ของไออิ่มตัว) [27]

จากภาพที่ 2.15 จะพบว่า SWNTs ที่ได้รับการปรับปรุงโครงสร้างจะมีการตอบสนองต่อแก๊สได้ดีกว่า SWNTs แบบปกติ และ SWNTs ที่ได้รับการปรับปรุงโครงสร้างก็จะมี การตอบสนองต่อแก๊สแต่ละตัวไม่เหมือนกันโดย การวัดน้ำ SWNTs-FeTPP จะตอบสนองได้ดีที่สุด การวัดแก๊สอะซีโตนและเมทานอล แก๊สเอทานอล เช่น เซอร์ SWNTs-OEP จะตอบสนองได้ดีที่สุด การวัดแก๊สอะซีโตนและเมทานอล แก๊สเช่น เซอร์ SWNT-RuOEP จะตอบสนองได้ดีที่สุด ซึ่งจะสรุปได้อย่างง่ายๆ ว่าการปรับปรุงวัสดุคาร์บอน เช่น SWNTs ให้มีโครงสร้างใหม่จะช่วยให้การตอบสนองต่อแก๊สต่างๆ ดียิ่งขึ้น โดยการใช้

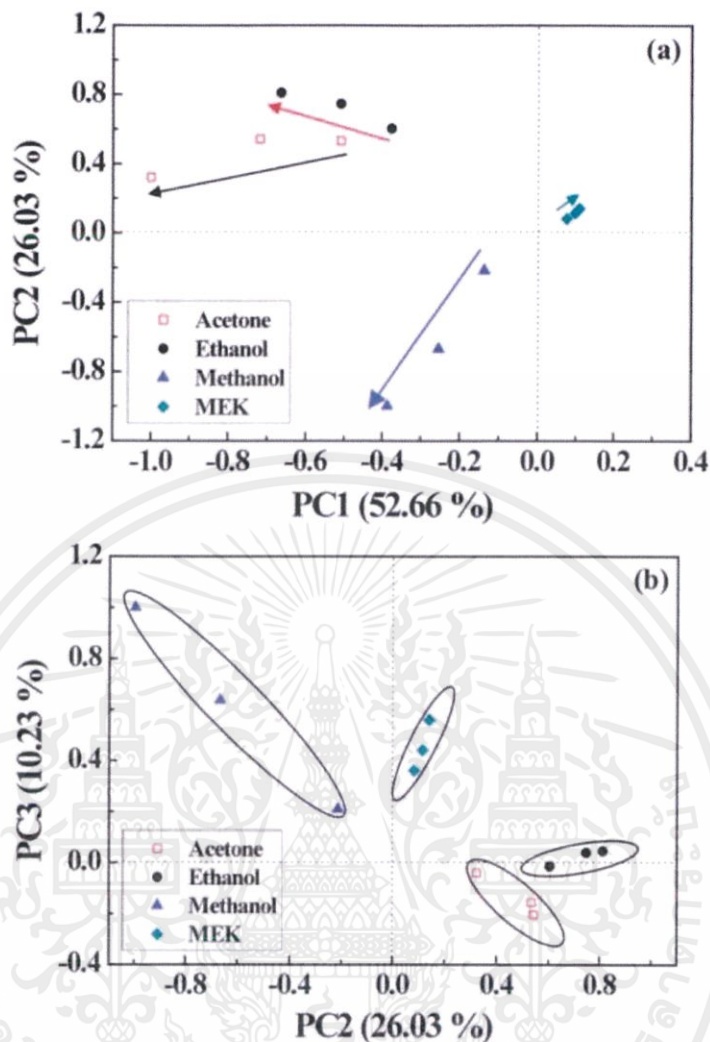
ประโยชน์จากสมบัติพิเศษของ SWNTs ในเรื่องสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีมาประยุกต์ใช้ให้แก๊สเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น



ภาพที่ 2.16 การวัด Transfer characteristic (I_{DS} - V_{GS} curves at $V_{DS} = -1$ V) โดย รูป (a) เป็นของ SWNTs-RuOEP และ (b) เป็นของ SWNTs-FeTPP ที่วัดในอากาศและในอะซิโตน [27]

จากภาพที่ 2.16 เป็นการวัดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวแก๊สเซ็นเซอร์พบว่า SWNTs-FeTPP และ SWNTs-RuOEP มีการไหลของกระแสเหมือนกันเป็นแบบ Schottky barrier โดยในตัวแก๊สเซ็นเซอร์ SWNTs-FeTPP มีความแตกต่างของค่ากระแสที่วัดได้ในแก๊สที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

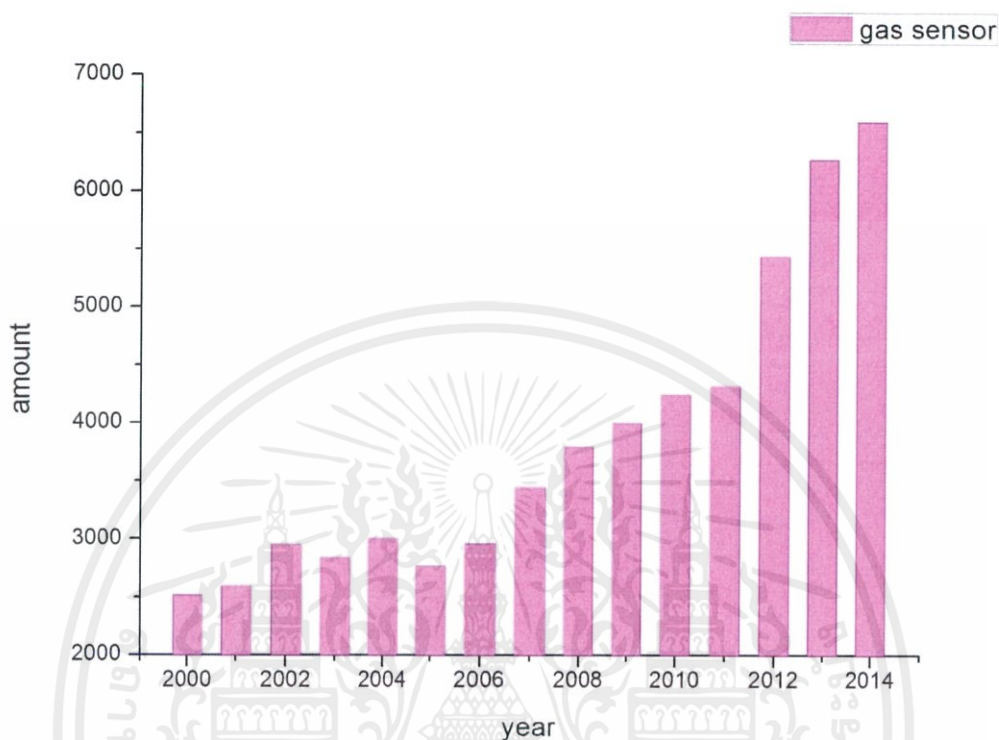


ภาพที่ 2.17 (a) การพล็อต PCA (PC1 เทียบกับ PC2) โดยใช้ 7 เซนเซอร์ (bare SWNTs, SWNTs-OEP, SWNTs-RuOEP, SWNTs-FeOEP, SWNTs-TPP, SWNTs-RuTPP, and SWNTs-FeTPP) และ (b) การพล็อต PCA (PC2 เทียบกับ PC3) ของ 7 เซนเซอร์ แสดงการแยกกลุ่มที่ดีของสาร VOCs 4 ชนิด (เมทานอล, เอทานอล, เมทิลเอทิลคีโตน และอะซีโตน) [27]

จากภาพที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงความจำเพาะต่อการตอบสนองแก๊สต่างๆของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ทำให้สามารถแยกแยะแก๊สที่ทำการตรวจวัดได้ ซึ่งสามารถทำอุปกรณ์ไปพัฒนาต่อได้ โดยสามารถนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้เป็นจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nose: E-nose)

ในปัจจุบันพบว่ามีจำนวนสิทธิบัตรเรื่องแก๊สเซนเซอร์ค่อยๆ เพิ่มขึ้นในแต่ละปี โดยในช่วงปี เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงปี 2011-2012 โดยเพิ่มจากจำนวนประมาณ 4000 มาที่ประมาณ 6000 ดังภาพที่ 2.18 โดยแนวโน้มในปี 2015 และในปีต่อๆ คาดว่าจะมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น ด้วยจากงานเรื่องแก๊สเซนเซอร์กำลังเป็นที่สนใจ เนื่องจากมีความต้องการพัฒนาอุปกรณ์ให้มีความไวต่อการตอบสนองมากขึ้นและตลาดมีความต้องการอุปกรณ์ที่มีความหลากหลายในด้านการตอบสนองต่อแก๊สมากขึ้นด้วย อีกทั้งระบบการวัดของอุปกรณ์เซนเซอร์ที่มีในปัจจุบันยังสามารถพัฒนาไปต่อได้อีกไกล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการค้นพบความรู้ใหม่ ๆ และความสามารถของวัสดุอุปกรณ์นาโนยังสามารถพัฒนาได้อีกกว้างขวางทำให้อุปกรณ์วัดแก๊สยังเป็นที่ยอดนิยมในงานวิจัยและในโรงงานอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2.18 กราฟแสดงแนวโน้มการจดทะเบียนเรื่องแก๊สเซนเซอร์
(<http://worldwide.espacenet.com>)

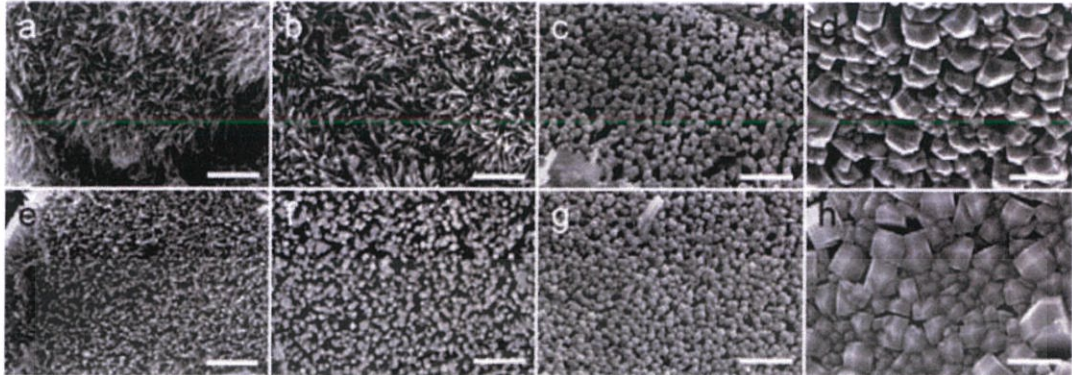
2.2.3 แก๊สเซนเซอร์กราฟีน

แก๊สเซนเซอร์กราฟีนเริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติข้างต้นในหัวข้อ 2.1.1 ทำให้กราฟีนเริ่มเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นอุปกรณ์วัดแก๊สเซนเซอร์ ซึ่งในปัจจุบันมีงานวิจัยในหัวข้อเกี่ยวกับแก๊สเซนเซอร์ออกมาเป็นจำนวนไม่น้อยใน 10 ปีที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้ผู้จัดทำขอเสนองานวิจัยที่น่าสนใจมา 2-3 งานวิจัย

งานวิจัย Highly aligned SnO_2 nanorods on graphene sheets for gas sensors โดย Zhang และคณะ [28] ได้มีการนำ SnO_2 ที่ลักษณะ nanorods (1-D) มาผสมกับ กราฟีน (2-D) จะได้เป็น SnO_2/G (3-D) โดยในงานวิจัยจะควบคุมขนาดของกราฟีนโดยจะสังเคราะห์กราฟีนด้วยกระบวนการ CVD โดยจะปรับขนาดและลักษณะของ SnO_2 โดยจะปรับความเข้มข้นของ SnCl_4 ดังนี้ 0.0025 M, 0.005 M, 0.05 M และ 0.5 M โดยนำกราฟีนมาผสมในแต่ละความเข้มข้นจากนั้นจะสารแขวนลอยจะถูกย่อยเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นตะกอนจะถูกนำไปเผาทำให้แห้งตามเวลาที่กำหนด 25 °C, 100 °C, 200 °C และ 300 °C โดยมีสารตั้งต้นได้แก่ 0.1 M SnCl_4 , 1M NaOH and 0.33 M SDS (sodium dodecyl sulfate) และสารลดแรงตึงผิวถูกกวนให้เนื้อสารเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากกราฟีนและ SnO_2 ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจะถูกย้ายลงหม้อนึ่งความดัน ที่

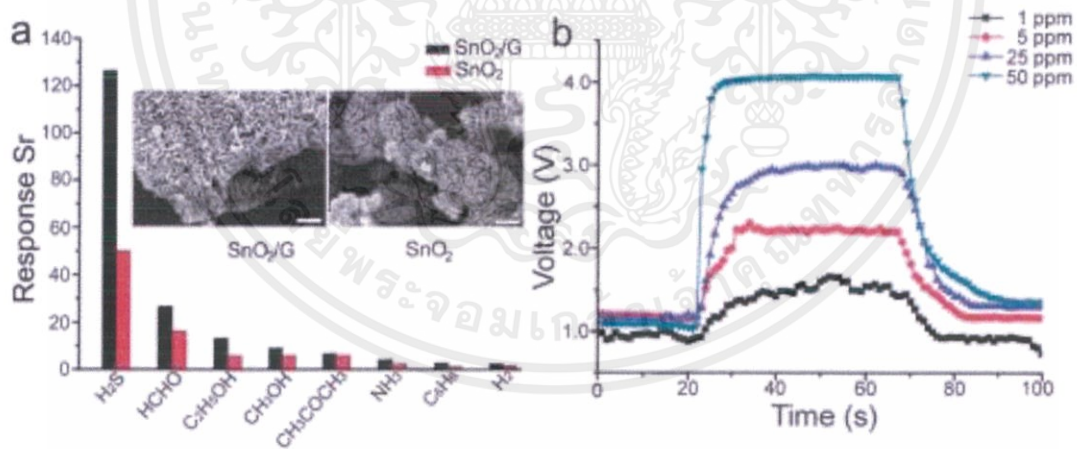
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง จากนั้นให้เย็นตามธรรมชาติจนถึงอุณหภูมิห้อง และนำตะกอนมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและแอลกอฮอล์หลายๆ รอบ



ภาพที่ 2.19 โครงสร้าง SnO₂/G (3-D) ที่มี SnO₂ อยู่บนกราฟีนแผ่นที่มีลักษณะแตกต่างกัน โดย (a-d) เพิ่มความเข้มข้นของการย่อยสลาย (0.0025 M, 0.005 M, 0.05 M และ 0.5 M) (e-h) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเผา (25 °C, 100 °C, 200 °C และ 300 °C) ขนาดแท่ง 500 นาโนเมตร [28]

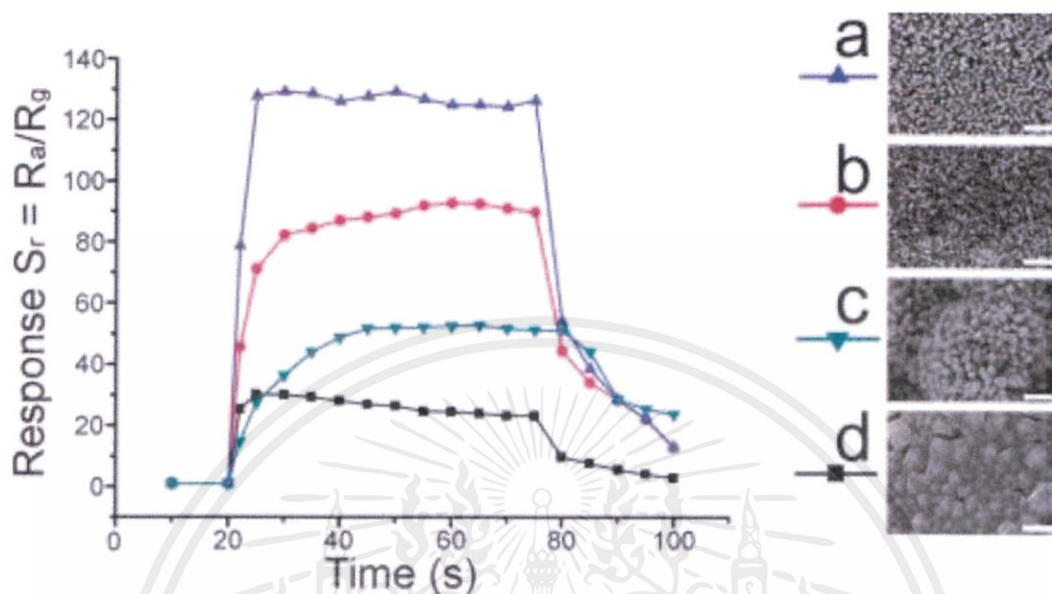
จากภาพที่ 2.19 พบว่า SnO₂ จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีความเข้มข้นของการย่อยสลาย และเมื่อเพิ่มขึ้นอุณหภูมิในการเผา



ภาพที่ 2. 20 (a) ค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ SnO₂/G (สีดำ) และ SnO₂ (สีแดง) ที่ให้แก๊สแตกต่างกันโดยให้ความเข้มข้นแก๊สละ 50 ppm (b) กราฟแสดงค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ SnO₂/G วัดแก๊ส H₂S ที่ความเข้มข้นต่างๆที่ 260 องศาเซลเซียส [28]

จากภาพที่ 2.20 พบว่าแก๊สเซนเซอร์ SnO₂/G สามารถวัดแก๊สต่างๆที่ความเข้มข้นที่ 50 ppm ได้ดีกว่าแก๊สเซนเซอร์ SnO₂ และแก๊สเซนเซอร์สามารถวัดแก๊ส H₂S ได้ดีที่สุด ในภาพที่ 2.20(a) ทำให้ผู้วิจัยนำข้อดีทั้งสองมาทดลองต่อในภาพที่ 2.20(b) โดยจากรูปพบว่าผู้วิจัยทำการวัด H₂S ที่ความเข้มข้น 1, 5, 25 และ 50 ppm ตามลำดับและแก๊สเซนเซอร์สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงความต่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงได้มากที่สุดที่ความเข้มข้น 50 ppm ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการทดลองต่อไป

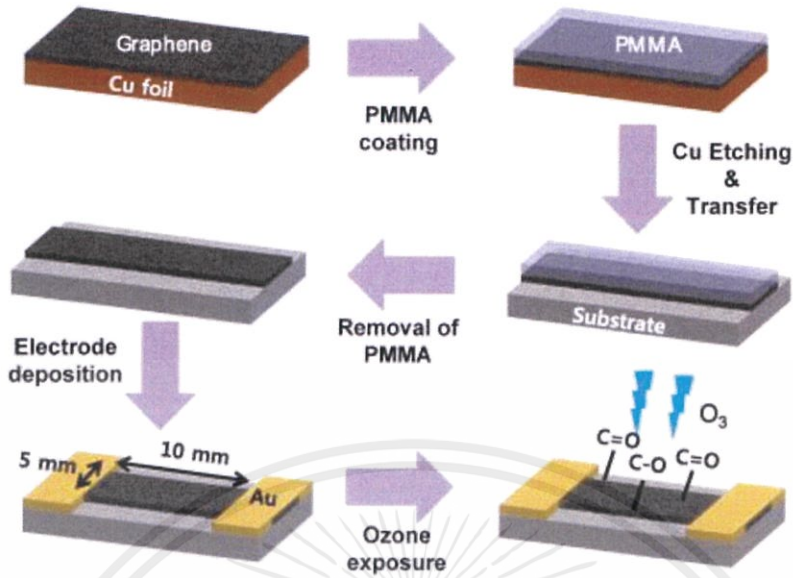


ภาพที่ 2.21 ค่าการตอบสนอง ของอุปกรณ์เซนเซอร์ SnO₂/G วัดแก๊ส H₂S ที่ความเข้มข้นต่างๆที่ 260 องศาเซลเซียส โดยทั้งสี่สายมีลักษณะเซนเซอร์ดังภาพ SEM (a, b, c) และ (d) ตามลำดับ ขนาดสเกลในภาพทั้งหมด: 500 นาโนเมตร [28]

จากภาพที่ 2.21 จะพบว่าขนาดของ SnO₂ มีผลต่อค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ โดยยังมีขนาดของ SnO₂ เล็ก ก็ยังมีค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ที่สูงขึ้นไปอีกด้วย ด้วยความที่ SnO₂ มีคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ที่เหนือกว่าของกราฟีน ขนาดใหญ่และผลผลิตสูงของอาเรย์คอมโพสิต โครงสร้างที่มีพื้นผิวที่มีความยืดหยุ่นจะเป็นประโยชน์สำหรับการผลิตแก๊สเซนเซอร์ อีกทั้งการเพิ่ม SnO₂ ยังเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของอุปกรณ์อีกด้วย

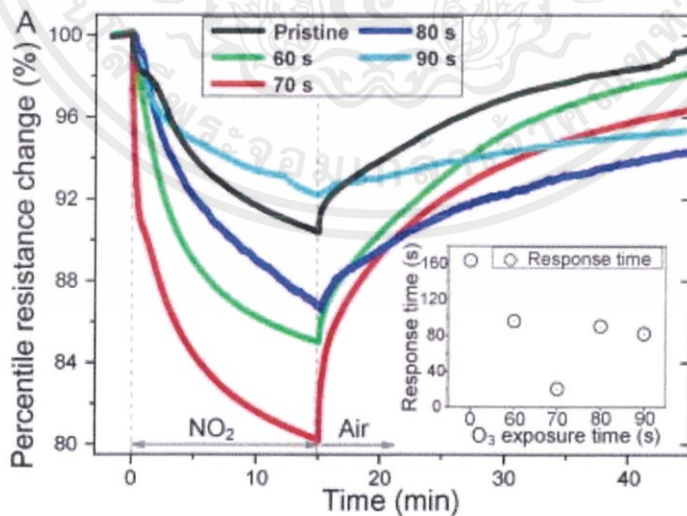
จากงานวิจัย Highly sensitive NO₂ gas sensor based on ozone treated graphene โดย Chung และคณะ [29] ได้มีการนำกราฟีนมาทำเป็นแก๊สเซนเซอร์โดยนำกราฟีนมาทำทริตเมนต์ด้วย โอโซนเพื่อให้กราฟีนมีหมู่ฟังก์ชันก่เพื่อที่จะได้สามารถดักจับแก๊สตรวจสอบได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นโดย งานวิจัยนี้ใช้แก๊สตรวจสอบเป็นแก๊สไนโตรเจนออกไซด์โดยใช้อากาศแห้งเป็นเบสไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.22 ขั้นตอนการย้ายกราฟีนจากแผ่นคอปเปอร์มายังฐานวัสดุอุปกรณ์วัดแก๊ส [29]

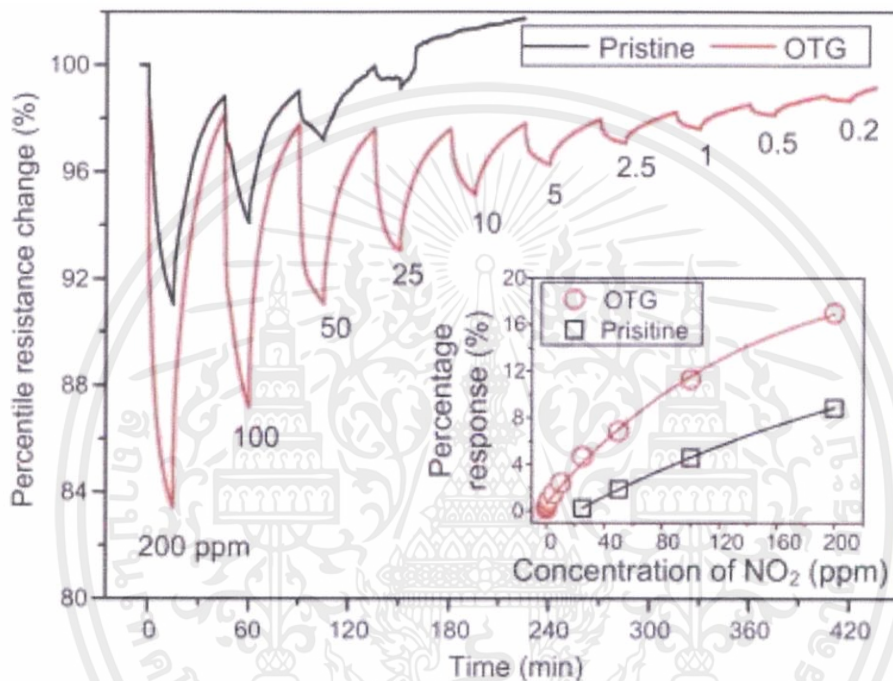
วิธีการสังเคราะห์กราฟีนในงานวิจัยนี้นั้นใช้วิธีการ CVD โดยใช้แก๊สมีเทนผสมแก๊สไฮโดรเจน เป็นสารสังเคราะห์กราฟีนขึ้นมา เมื่อได้กราฟีนบนแผ่นคอปเปอร์แล้วนั้นก็ทำการย้าย กราฟีนออกไปยังวัสดุอุปกรณ์วัดแก๊สโดยมีขั้นตอนการย้าย ดังภาพที่ 2.22 โดยวัสดุอุปกรณ์วัดแก๊สนั้นในงานวิจัยใช้ แผ่นซิลิกอนออกไซด์ และกราฟีนใช้ขนาด 15 x 5 ตารางมิลลิเมตร และขั้วไฟฟ้าใช้ Au ขนาด 10 x 2.5 ตารางมิลลิเมตร ก่อนนำไปทำทรีตเมนต์โอโซนบนกราฟีนต้องเอาพอลิเมอร์ PMMA ออกเสียก่อน ดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.23 กราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่อให้แก๊สไนโตรเจนออกไซด์และอากาศแห้งของอุปกรณ์วัดแก๊สที่มี กราฟีนไม่ได้ทำทรีตเมนต์ และที่ทำทรีตเมนต์เป็นเวลา 60 70 80 และ 90 วินาที ตามลำดับ [29]

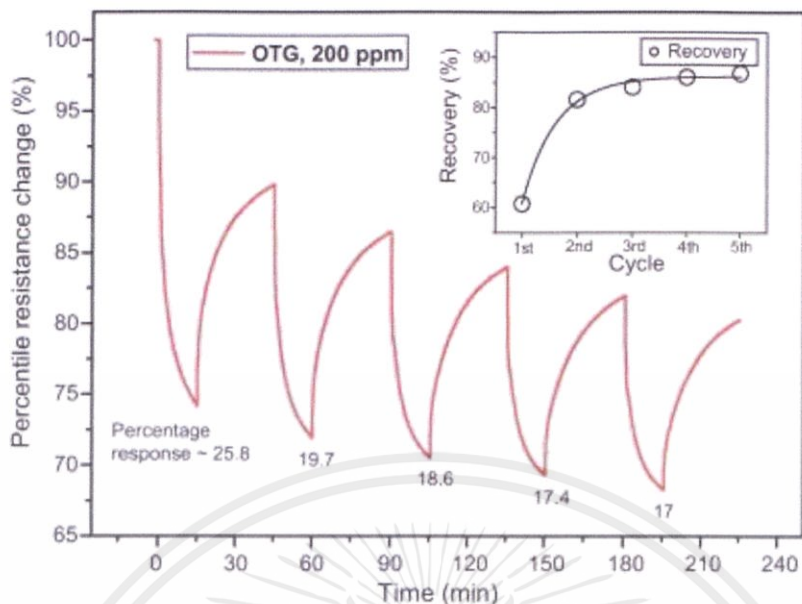
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.23 พบว่าค่าความต้านทานเมื่อให้แก๊สไนโตรเจนออกไซด์และอากาศแห้งของแก๊สเซนเซอร์ที่มีกราฟีนไม่ได้ทำทริตเมนต์ และที่ทำทริตเมนต์เป็นเวลา 60 ,70 ,80 และ 90 วินาทีตามลำดับ นั้นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานมากในอุปกรณ์วัดแก๊สที่มีกราฟีนที่ทำทริตเมนต์เป็นเวลา 70 วินาทีมากที่สุด และที่ทำทริตเมนต์เป็นเวลา 90 วินาทีที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยสุด เนื่องมาจากการทำทริตเมนต์ที่เวลา 70 วินาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของกราฟีนนั้นสามารถทำได้เต็มที่ในเวลาสั้น เมื่อใช้เวลามากเกินไปจะทำให้หมู่ฟังก์ชันที่ต้องการบนกราฟีนถูกทำให้หลุดไปเนื่องจากการทำทริตเมนต์

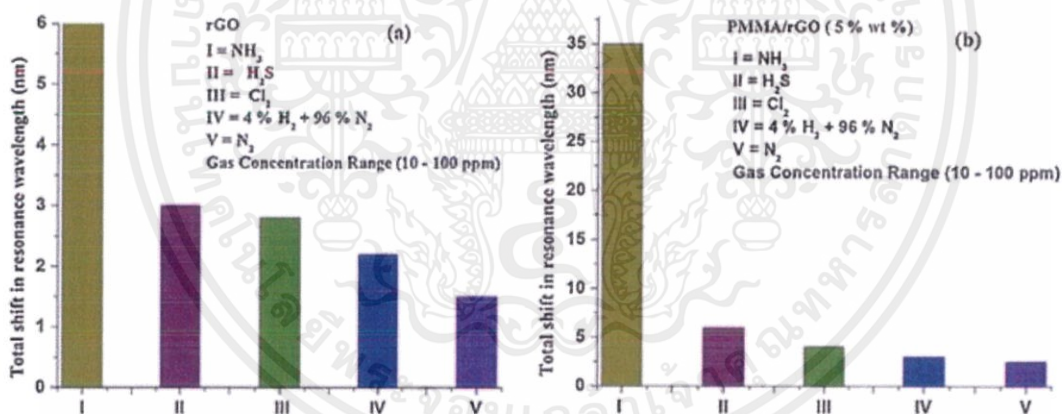


ภาพที่ 2.24 ค่าการตอบสนองของกราฟีนและกราฟีนทริตเมนต์ วัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ภายใต้ความเข้มข้นต่างๆ [29]

จากภาพที่ 2.24 พบว่า อุปกรณ์เซนเซอร์กราฟีนและกราฟีนทริตเมนต์เมื่อวัดแก๊ส NO₂ แล้วนั้น จะให้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่ลดลงเมื่อให้แก๊ส NO₂ และเมื่อเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนและกราฟีนทริตเมนต์เมื่อวัดแก๊ส NO₂ แล้วนั้นพบว่าในแก๊สเซนเซอร์กราฟีนทริตเมนต์มีความเสถียรในการวัดแก๊สที่ความเข้มข้นต่างๆและอุปกรณ์สามารถไล่แก๊สออกได้หมดเนื่องจากค่าความต้านทานสามารถกลับมาที่ค่าความต้านทานเดิมที่วัดอากาศแห้งได้อย่างใกล้เคียง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์กราฟีนทริตเมนต์มีประสิทธิภาพในการวัดแก๊ส NO₂ ได้ดีกว่าอุปกรณ์กราฟีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทริตเมนต์



ภาพที่ 2.25 ค่าการตอบสนองของกราฟฟีนทรีดเมนต์วัดแก๊ส NO_2 ภายใต้ความเข้มข้น 200 ppm [29]



ภาพที่ 2.26 เป็นกราฟแสดงค่า response wavelength ที่มีความไวต่อแก๊สต่างๆ (วัดการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นแสงที่เปลี่ยนไป) ได้แก่ แอมโมเนีย แก๊สไข่เน่า แก๊สคลอรีน แก๊สไนโตรเจนผสมแก๊สไฮโดรเจน 4% และแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ตามลำดับ โดยภาพ (a) ใช้ rGO sensor (b) ใช้ PMMA/rGO sensor [29]

จากภาพที่ 2.25 พบว่าค่าการตอบสนองของอุปกรณ์มีความไม่เสถียรอีกทั้งอุปกรณ์ยังสามารถไล่แก๊ส NO_2 ออกจากอุปกรณ์ไม่ได้หมดเนื่องจากค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ไม่กลับมาเท่าเดิมซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถไม่เหมาะกับการนำกลับมาใช้ใหม่

จากภาพภาพที่ 2.26 พบว่าเมื่อเราใส่พอลิเมอร์เคลือบลงไปบนชั้นผิวของวัสดุ Reduce Graphene oxide (rGO) จะช่วยให้แก๊สเซ็นเซอร์มีความจำเพาะต่อแก๊สมากขึ้นจะเห็นได้ชัดว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

rGO/PMMA จะวัดแก๊สแอมโมเนียได้ดีกว่า rGO ปกติ และจากตารางเปรียบเทียบการวัดแก๊สจะพบว่า การใส่สารอื่นลงไปมีผลต่อค่า Response และแก๊สที่ตรวจวัดก็มีผลต่อค่านี้เช่นกัน

ซึ่งจากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีปัจจัยต่างที่ใช้มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการวัดแก๊ส โดยสิ่งสำคัญที่สุดคือ วัสดุที่มาวัดและแก๊สที่ตรวจสอบ เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ในการวัดแก๊สเซ็นเซอร์มีความจำเพาะเจาะจงกับแก๊สที่ตรวจสอบอีกทั้งเวลาในการใส่แก๊สและวัดแก๊สแต่ละตัวใช้เวลาไม่เท่ากันดังต่อไปนี้ด้วย

ตารางที่ 2.3 แสดงประสิทธิภาพการวัดแก๊ส

Organic Materials	gas	Concentration (ppm)	Response ΔR	Response time (min)	Recovery time (min)	Ref.
Graphene/Pd	H ₂	1000	5.00%	1.00	1.50	[30]
Graphene/SnO ₂	NO ₂	50	-6.00%	3.15	3.75	
Reduce Graphene oxide/CNTs	NO ₂	10	20.00%	60.00	>60.00	
Graphene/P MMA membrane-coated Pd NP	H ₂	2000	66.67%	1.81	5.52	

จากตารางที่ 2.3 พบว่าเมื่อมีการเติมพอลิเมอร์หรือเพิ่มสารในแก๊สเซ็นเซอร์จะทำให้มีค่าการตอบสนอง ซึ่งจากภาพที่ 2.26 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพอลิเมอร์ลงไปช่วยในการเพิ่มความจำเพาะเจาะจงในการวัดแก๊สได้ และจากตารางเปรียบเทียบการวัดแก๊สจะพบว่า การใส่สารอื่นลงไปมีผลต่อค่า Response และแก๊สที่ตรวจวัดก็มีผลต่อค่านี้เช่นกัน ซึ่งเมื่อดูจากตารางที่ 2.3 แล้วนั้นในแก๊สไฮโดรเจนมีค่าการตอบสนองที่ดีต่อแก๊สเซ็นเซอร์ Graphene/PMMA membrane-coated Pd NP ดีกว่า และในส่วนของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ มีค่าการตอบสนองที่ดีกับแก๊สเซ็นเซอร์ Graphene/SnO₂

2.2.4 พารามิเตอร์การละลายของเฮนเซน (Hansen solubility parameter, HSP)

เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการทำนายความสามารถในการละลายให้เข้ากันระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลาย โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ แรงแพร่กระจาย (dispersion force; δ_d) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (intermolecular force; δ_p) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond; δ_h) โดยตัวถูกละลายจะละลายเข้ากันได้กับตัวทำละลายเมื่อมีค่าความเป็นขั้วใกล้เคียงกัน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2

$$R_a = \sqrt{4(\delta_{d2} - \delta_{d1})^2 + (\delta_{p2} - \delta_{p1})^2 + (\delta_{h2} - \delta_{h1})^2} \quad (1)$$

R_a คือ พารามิเตอร์การละลายของเฮนเซนของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย

δ_d คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงแพร่กระจายของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย

δ_p คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย

δ_h คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของพันธะไฮโดรเจนของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย

$$RED = \frac{R_a}{R_0} \quad (2)$$

RED คือ ระยะทางพลังงานสัมพันธ์ (Relative energy distance)

R_0 คือ รัศมีอันตรกิริยา (Interaction radius) ของพอลิเมอร์

โดยพิจารณาจากค่า Relative energy distance, RED) แบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

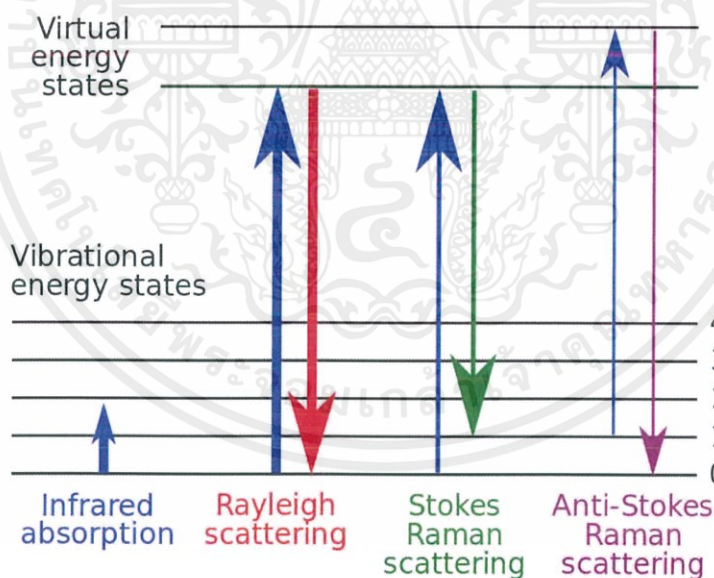
1. กรณีที่ค่า $RED < 1$ หมายความว่า ตัวถูกละลายสามารถละลายเข้ากับได้ดีกับตัวทำละลาย
2. กรณีที่ค่า $RED = 1$ หมายความว่า ตัวถูกละลายสามารถละลายเข้ากันได้บางส่วนกับตัวทำละลาย
3. $RED > 1$ หมายความว่า ตัวถูกละลายไม่สามารถละลายเข้ากันได้กับตัวทำละลาย

2.3 เทคนิคการวิเคราะห์

2.3.1 เครื่องรามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)

ในการตรวจสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี เพื่อเป็นการตรวจสอบสารตัวอย่างด้วยการดูองค์ประกอบชนิดของสารในการแยกแยะสารตัวอย่างบนพื้นผิว เครื่องมือที่ใช้คือ เครื่อง The DXR™ Smart Raman spectrometer

อาศัยปรากฏการณ์ที่เกิดการชนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าการตัวกลางโปร่งใส (Transparent medium) ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการกระเจิงโดยมีการเปลี่ยนแปลงความถี่และเปลี่ยนเฟส ซึ่งเรียกว่า Raman scattering หรือ Raman effect ซึ่งการกระเจิงแสงนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสาร [31] ดังนั้นรามานสเปกโตรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้ปรากฏการณ์ในการกระเจิงของแสง ที่เกิดจากการที่แสงตกกระทบวัตถุทำให้โมเลกุลได้รับพลังงานเกิดการสั่นและส่งผลทำให้อิเล็กตรอนของโมเลกุลสารถูกกระตุ้นย้ายสถานะไปอยู่ในสถานะกระตุ้น และเมื่ออิเล็กตรอนพยายามที่จะกลับมายังสถานะพื้น ก็จะไปปล่อยพลังงานแสงทำให้เกิดการกระเจิงแสง (Scattered light) ออกมา [32] ซึ่งการกระเจิงแสงที่ได้นั้นจะมีทั้งกระบวนการกระเจิงแสงแบบยืดหยุ่น (Elastic process) ซึ่งพลังงานแสงคงที่และกระบวนการกระเจิงแสงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic process) ซึ่งแสงที่กระเจิงออกมาจะให้พลังงานหรือความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นเริ่มต้นของแสงที่ตกกระทบ ดังภาพที่ 2.27



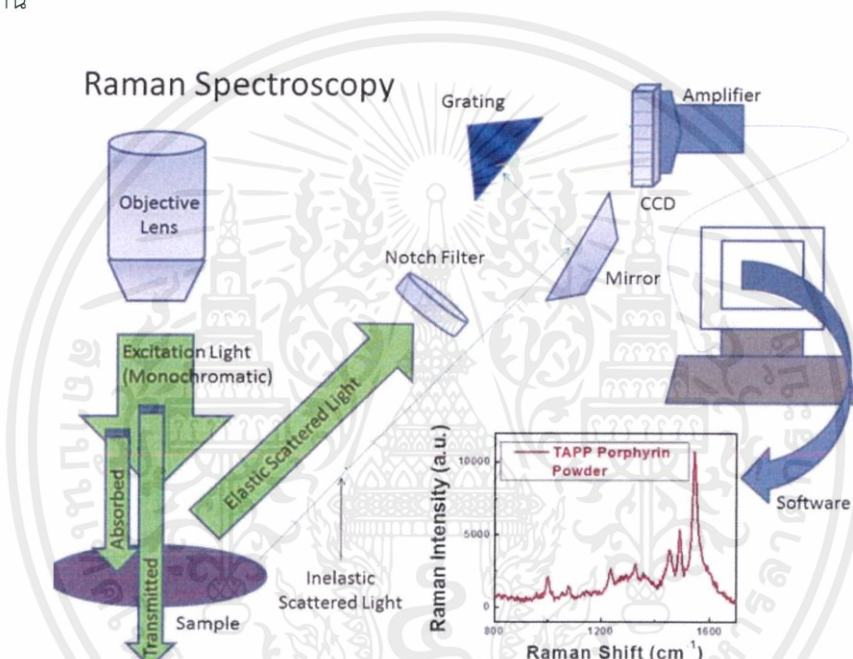
ภาพที่ 2.27 การกระเจิงแสงแบบ infrared absorption ,Rayleigh scattering , stroke scattering และ anti-stroke scattering

(<http://www.geo.arizona.edu/xtal/geos306/geos306-12.htm>)

ส่วนใหญ่แล้วแสงที่ตกกระทบจะเกิดการกระเจิงแสงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) เป็นกระบวนการแบบยืดหยุ่น ส่วนน้อยแสงที่ตกกระทบจะเป็นแบบรามานที่เป็นกระบวนการแบบเอกซอร์นี่เป็นเอกซอร์นี่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ยืดหยุ่น โดยที่พลังงานแสงที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นอาจจะเป็นได้ทั้งแบบลดลง (Stoke scattering) หรือเพิ่มขึ้น (Anti-stoke scattering) ดังภาพที่ 2.27 ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดแบบ Stoke scattering เนื่องจากการปลดปล่อยแสงที่ให้พลังงานน้อยกว่าเดิมนั้นง่ายกว่าที่จะปลดปล่อยแสงที่ให้พลังงานมากกว่าพลังงานเริ่มต้น

ซึ่งแสงที่ได้จากการกระเจิงในแบบรามานนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดสาร เนื่องจากการกระเจิงแบบรามาน ก็คือผลต่างของพลังงาน ของแสงที่ตกกระทบกับพลังงานแสงที่กระเจิง เรียกว่า Raman shift จะมีค่าตรงกันกับพลังงานหรือความถี่ ของพันธะในการสั่นของ โมเลกุลที่วัดได้จากเทคนิคอินฟราเรด ดังภาพที่ 2.27 ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิครามาน จึงมีลักษณะคล้ายกันกับสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิคอินฟราเรด ดังภาพที่ 2.28 แสดงกลไกการทำงานของ เครื่องรามาน



ภาพที่ 2.28 กลไกการทำงานของเครื่องรามานสเปกโตรสโคปี
(https://www3.nd.edu/~kamatlab/facilities_spectroscopy.html)

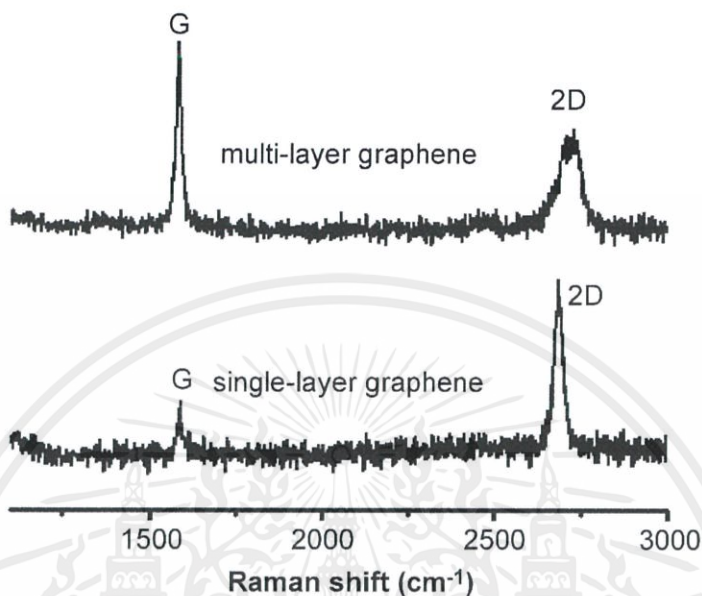
โดยการประยุกต์ใช้วัดกราฟีนนั้น ชิ้นงานที่ใช้วัดจะไม่เกิดความเสียหายและไม่เสียเวลาในการเตรียมชิ้นงาน ซึ่งสามารถระบุกราฟีนได้จากการสังเกตความถี่ที่ทำให้เกิดพีคที่ได้จากกราฟรามาน

โดยทั่วไปจากการวัดด้วยเครื่องรามานมีความถี่ที่น่าสนใจอยู่ 3 ความถี่ ได้แก่

1. ความถี่ประมาณ 1350 cm^{-1} เรียกว่า D-band เกิดจากการที่โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ มีความผิดปกติของการยึดกันของไฮบริดแบบ sp^2 หรือมี Defect
2. ช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่าง $1580 - 1600\text{ cm}^{-1}$ เรียกว่า G-band จะตอบสนองกับพันธะระหว่างคาร์บอน (C-C bond) ที่ยึดกันแบบ sp^2
3. ช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่าง $2500-2600\text{ cm}^{-1}$ เรียกว่า 2D-band เป็นการตอบสนองการสั่นของพันธะคาร์บอนที่ยึดกันแบบ sp^2 ซึ่งเป็นพีคที่เป็นเหมือนการยืนยันถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดวัสดุกราฟไฟต์ โดยในกราฟีนชั้นเดียวจะมีพีค 2D-band ที่ชัดเจนและมีความถี่สูงมาก โดยลักษณะกราฟกราฟีนที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องรามานจะมีลักษณะ ดังภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 ลักษณะกราฟรามานของกราฟีน

(<http://cnx.org/contents/f06226c5-c2a4-4798-9c75-b016acea73cd@2/Characterization-of-Graphene-b>)

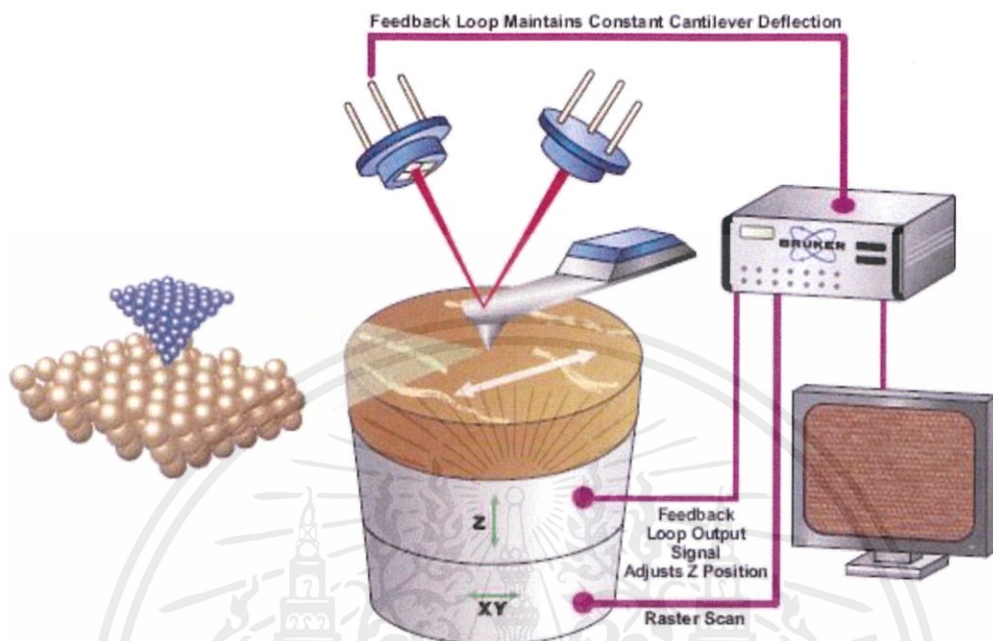
2.3.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy; AFM)

กราฟีนเป็นวัสดุระดับนาโนที่มีขนาดความหนาในระดับนาโนเมตร ดังนั้นการตรวจสอบเชิงโครงสร้างและสัญญาณวิทยาจึงมีความจำเป็นต้องใช้ AFM ในการวิเคราะห์

โดยเครื่อง AFM เป็นเครื่องมือที่ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน ใช้สำหรับตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของแรงอันตรกิริยาระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างผิวของสารกับหัวเข็มวัดในระดับนาโน แล้วทำการประมวลผลออกมาในลักษณะของภาพพื้นผิว ซึ่งหลักการนี้สามารถใช้ในการวัดหาความสูงของชั้นฟิล์มได้ โดยเครื่อง AFM สามารถที่จะตรวจสอบวัดพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ เช่น พื้นผิวพอลิเมอร์ เซรามิก คอมโพสิต หรือกระทั่งโมเลกุลทางชีวภาพ ก็สามารถที่จะวัดได้ โดยหลักการการทำงานของเครื่อง AFM จะใช้การส่งผ่านแสงเลเซอร์ไปให้กับส่วนของปลายแหลม (tip) ของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมอะตอม ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานจะมีเข็มโพรบ นั้นไปสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุ และเมื่อเครื่อง AFM ลากเข็มโพรบผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากระหว่างอะตอมของพื้นผิววัสดุกับอะตอมของเข็มเกิดขึ้น เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) และแรงพันธะเคมีอื่นๆ จากแรงดังกล่าวจะทำให้คานโค้งงอพอที่จะทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนผิววัสดุกับส่วนของเข็ม เกิดการยกขึ้นลงของคานตามลักษณะของผิววัสดุ ซึ่งเมื่อนำมาแปลงสัญญาณร่วมกันจะสามารถสร้างภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิง

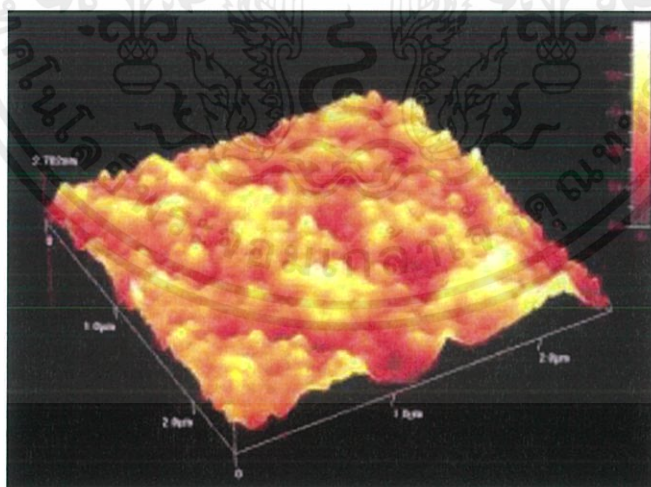
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังขยายสูงไปแสดงบนจอแสดงภาพ ดังรูป 2.30 [34] โดยภาพที่ได้สามารถบอกความสูง-ต่ำของพื้นผิวในรูปแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ ดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.30 หลักการทำงานของเครื่อง AFM

(<http://blog.brukerafmprobes.com/guide-to-spm-and-afm-modes/contact-mode-afm/>)



ภาพที่ 2.31 ตัวอย่างภาพลักษณะผิววัสดุ รูปแบบ 3 มิติ ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง AFM

(<http://nanovuv.eu/AFMGallery.htm>)

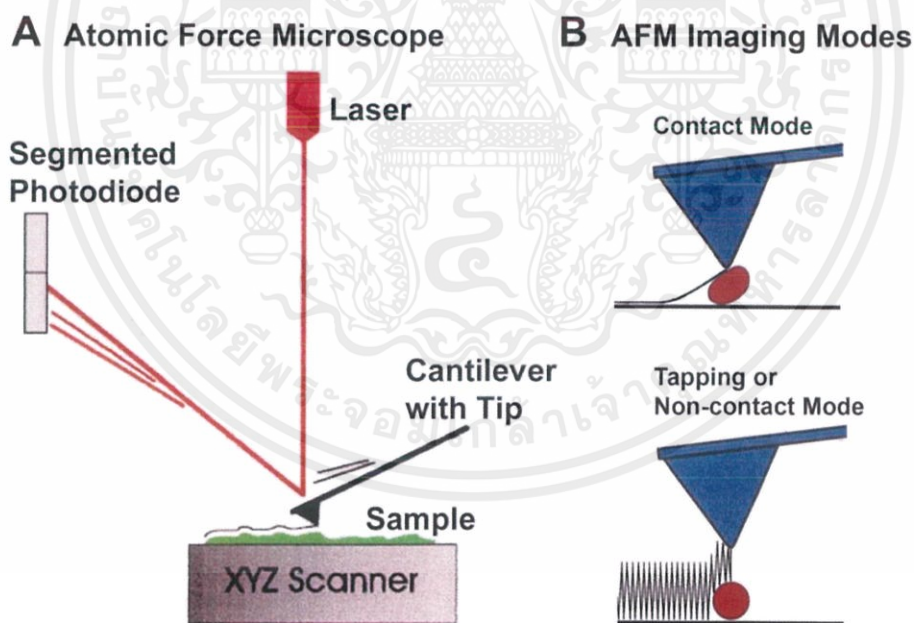
วิธีการทำงานของเครื่อง AFM ที่นำมาใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ดังภาพที่ 2.31 ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Contact Mode เป็นการที่ปลายเข็มจะสัมผัสพื้นผิวของวัสดุพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆ ตลอดเวลา ข้อเสียของวิธีนี้คือ จะทำให้เกิดแรงต้านทานในแนวของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะชนกับพื้นผิวขึ้น ซึ่งอาจทำให้คานของโพรบที่ใช้วัดเกิดการโก่งงอตัวหรือเกิดบิดเบี้ยวไป โดยที่ไม่ได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเข็ม จากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงและโครงสร้างของพื้นผิววัสดุที่วัดได้ อาจผิดเพี้ยนไปจากความเป็นแท้จริง อีกทั้งยังอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับเข็มโพรบ และผิววัสดุเนื่องจากการลากเข็มบนผิววัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงอย่างรวดเร็วได้

2. Non-Contact Mode จะเป็นการให้ปลายเข็มโพรบไม่สัมผัสกับพื้นผิววัสดุ ให้ห่างประมาณ 1-10 นาโนเมตร โดยรูปแบบนี้จะเป็นการใช้แรงระหว่างเข็มโพรบกับผิววัสดุควบคุมระยะห่างระหว่างของปลายเข็ม เพื่อป้องกันการทำลายผิวหน้าของวัสดุและการเสียหายของเข็มโพรบวัดด้วย แต่วิธีการนี้มีข้อจำกัดเรื่องความละเอียดในการวัด เพราะแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นนี้น้อยกว่าในแบบวิธีแรกอยู่มาก

3. Tapping Mode วิธีการนี้จะเป็นการรวมวิธีแบบสัมผัสต่อเนื่อง และแบบการไม่สัมผัสเข้าด้วยกัน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย แต่ยังได้ภาพที่มีความคมชัดและแม่นยำได้ จะเป็นการให้ปลายเข็มโพรบสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้นๆ ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว ด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงต้านในแนวตั้งฉากจะไม่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากปลายเข็มโพรบสัมผัสพื้นผิวเป็นระยะสั้นๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของคาน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้นไม่คงที่



ภาพที่ 2.32 แสดงวิธีการทำงานของเครื่อง AFM

(<http://web.physics.ucsb.edu/~hhansma/biomolecules.htm>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การโอนย้ายกราฟีน

กราฟีนถูกโอนย้ายจากแผ่นคอปเปอร์มายังแผ่นใช้งาน ได้แก่ แผ่นซิลิกอนที่เคลือบด้วยชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2/Si) การโอนย้ายกราฟีนจากแผ่นคอปเปอร์มายังแผ่นใช้งาน SiO_2/Si แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นใช้งาน

3.1.1.1 การเตรียมแผ่น SiO_2/Si

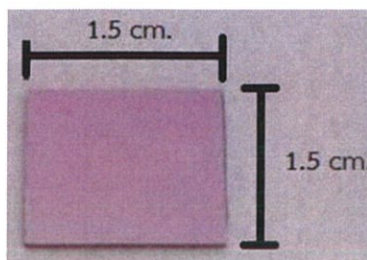
ลักษณะของแผ่น SiO_2/Si ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ลักษณะของแผ่น SiO_2/Si

Thickness of SiO_2 layer	$625 \pm 25 \mu\text{m}$
Type	P-doped
Orientation	1-0-0

ขั้นตอนการเตรียมแผ่น SiO_2/Si มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) นำแผ่น SiO_2/Si มาตัดให้ได้ขนาด 1.5×1.5 ตารางเซนติเมตร ดังภาพที่ 3.1
- (2) นำไปทำความสะอาดพื้นผิวเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ โดยล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ เป็นเวลา 10 นาที
- (3) ล้างด้วยไอโซโพรพานอล (Isopropanol: IPA) ด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ เป็นเวลา 10 นาที
- (4) ล้างด้วยน้ำกลั่นไร้ไอออน (DI water) ด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ เป็นเวลา 10 นาที
- (5) เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
- (6) ทรีตเมนต์พื้นผิวแผ่น SiO_2/Si ด้วยวิธีออกซิเจนพลาสมา ตามเงื่อนไขการทำออกซิเจนพลาสมา ดังตารางที่ 3.2



ภาพที่ 3.1 รูปถ่ายของแผ่น SiO_2/Si สำหรับโอนย้ายกราฟีน

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทำออกซิเจนพลาสมา

พารามิเตอร์	เงื่อนไขในการทดลอง
แก๊ส	ออกซิเจน
ความดันในสุญญากาศ	4000 mtorr
Radio frequency power level	Low
ระยะเวลา	60 วินาที

3.1.2 ขั้นตอนการโอนย้ายกราฟีน

กราฟีนถูกสังเคราะห์บนแผ่นคอปเปอร์ด้วยเทคนิคการตกสะสมไอทางเคมี (Chemical vapor deposition; CVD) โดยการสังเคราะห์กราฟีนได้รับความอนุเคราะห์จาก Atomic Research of Nano-Materials Research Laboratory Sungkungwan University นำกราฟีนบนแผ่นคอปเปอร์มาตัดให้ได้ขนาด 7 X 7 ตารางมิลลิเมตร แล้วนำไปทำการโอนย้ายตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เคลือบสารละลายพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly(methyl methacrylate: PMMA) ลงบนแผ่นกราฟีน ด้วยวิธีเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงด้วยเงื่อนไขสเปดที่ 1 ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที (rounds per minute: rpm) เป็นเวลา 5 วินาที และสเปดที่ 2 ความเร็วรอบ 3000 rpm เป็นเวลา 45 นาที และนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
2. นำไปแผ่นกราฟีนที่เคลือบด้วย PMMA แล้วไปทำการทรานส์เฟอร์ด้วยออกซิเจนพลาสมา โดยพลิกด้านที่ไม่ได้เคลือบ PMMA ไว้ด้านบน เพื่อกัดเอากราฟีนอีกด้านหนึ่งออก เงื่อนไขของออกซิเจนพลาสมา แสดงในตารางที่ 3.4

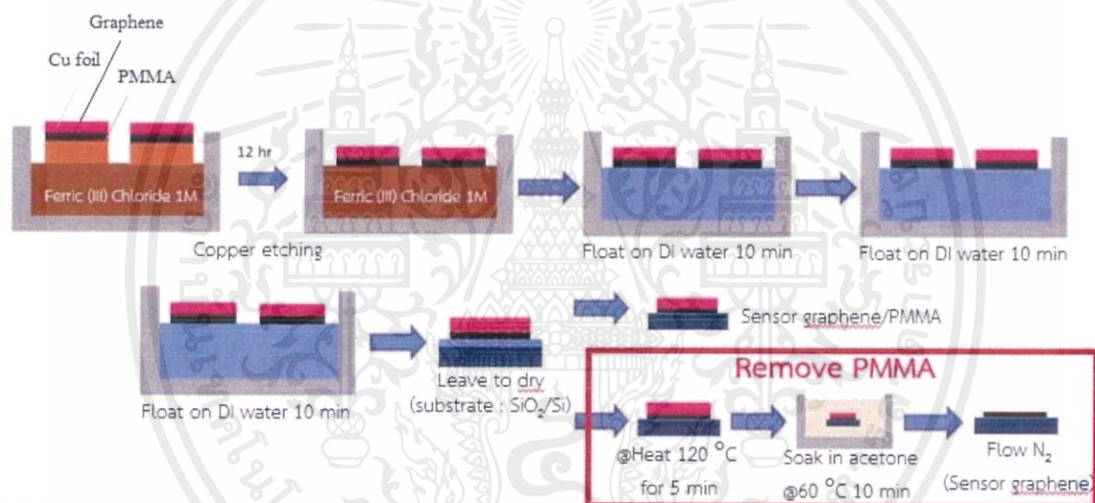
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขออกซิเจนพลาสมาสำหรับกัดกราฟีนบนแผ่นคอปเปอร์

พารามิเตอร์	เงื่อนไขในการทดลอง
แก๊ส	ออกซิเจน
อัตราการไหล	5 sccm
ความดันบรรยากาศ	460 มิลลิทอร์
กำลัง	25 วัตต์
เวลา	30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำกราฟีนจากข้อที่ 2 ไปแช่ในสารละลายเหล็กคลอไรด์ (Ferric (III) chloride) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยให้ด้านที่เป็นคอปเปอร์สัมผัสกับน้ำยากัด และด้านที่เคลือบด้วย PMMA ลอยอยู่ด้านบน แช่เป็นเวลาอย่างต่ำ 1 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.2
4. ใช้แผ่น SiO_2/Si ซ้อนแผ่นกราฟีนขึ้นจากน้ำยากัดคอปเปอร์ไปแช่ในน้ำกลั่นไร้ไอออน เป็นเวลา 10 นาที เป็นจำนวน 3 ครั้ง
5. ซ้อนแผ่นกราฟีนขึ้นจากน้ำกลั่นไร้ไอออนด้วยแผ่นที่จะนำไปใช้งานต่อไป เช่น แผ่น SiO_2/Si แล้วนำไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
6. นำกราฟีนในข้อ 5 ไปแช่อะซิโตนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำการกำจัดพอลิเมอร์ PMMA บนชั้นกราฟีนให้หลุดออกไป
7. เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

ในกรณีที่เป่าไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA จะเตรียมถึงขั้นตอนที่ 5



ภาพที่ 3.2 โดอะแกรมขั้นตอนการโอนย้ายกราฟีนเพื่อประดิษฐ์แก๊สเซนเซอร์

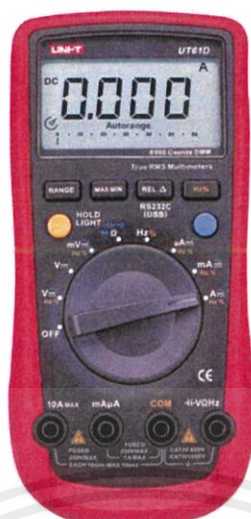
3.2 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์

การวิเคราะห์โครงสร้าง สัณฐานวิทยา และสมบัติของกราฟีนบนแผ่น SiO_2/Si ที่ได้จากการโอนย้ายจากจากแผ่นคอปเปอร์ เพื่อเป็นการยืนยันว่าสามารถโอนย้ายกราฟีนมาได้จริง จำเป็นต้องมีเครื่องมือตรวจสอบที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ดังนี้

3.2.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

ทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นด้วยเครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ (Multimeter) ดังรูป 3.3 โดยนำตัวอย่างที่ได้จากการโอนย้ายมายังแผ่น SiO_2/Si มาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 เครื่องมัลติมิเตอร์

3.2.2 การตรวจสอบพันธะทางเคมีของวัสดุ

นำตัวอย่างสารที่ได้จากการโอนย้ายมาผ่าน SiO_2/Si มาตรวจสอบพันธะของคาร์บอนด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี เครื่องรามานสเปกโตรสโกปีที่ใช้คือ เครื่อง DXR™ Smart Raman spectrometer, Thermo Scientific ดังภาพที่ 3.4 ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ใช้คือ 532 นาโนเมตร

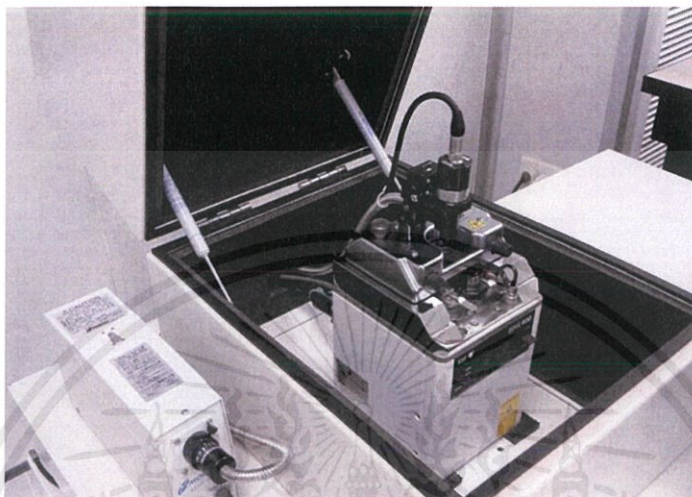


ภาพที่ 3.4 เครื่อง The DXR™ Smart Raman spectrometer

3.2.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิว

นำตัวอย่างกราฟีนที่อยู่บนแผ่น SiO_2/Si มาตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของกราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสง และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม การตรวจสอบกราฟีนบนแผ่น SiO_2/Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสงนั้น เป็นการวิเคราะห์ที่ง่ายที่สุด โดยสังเกตจากความแตกต่างของคอนทราสต์บนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่น SiO_2/Si ซึ่งเกิดการหักเหของแสงที่ต่างกันระหว่างบนกราฟีน และบนแผ่น SiO_2/Si นอกจากนี้ การตรวจสอบกราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม จะทำให้ทราบความหนาของแผ่นกราฟีนที่เตรียมได้ โดยในงานวิจัยกล้องจุลทรรศน์ทางแสงที่ใช้คือ OLYMPUS EX51 และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่ใช้คือรุ่น Spi - spa400 ดังรูป 3.5



ภาพที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม รุ่น Spi - spa400

3.3 การประดิษฐ์แก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์

แก๊สเซนเซอร์นั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ มีขั้นตอนในการเตรียมการเพื่อการประดิษฐ์อุปกรณ์แก๊สเซนเซอร์และขั้นตอนการตรวจสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

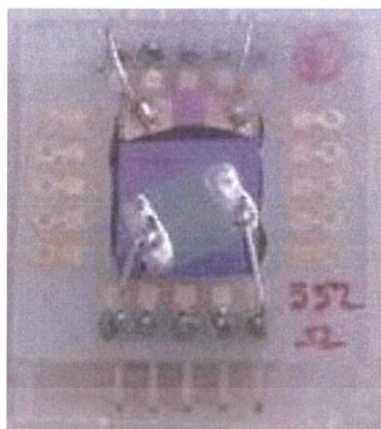
3.3.1 การเตรียมอุปกรณ์วัดแก๊สเซนเซอร์ด้วยวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์

การเตรียมอุปกรณ์วัดแก๊สเซนเซอร์นั้น สามารถทำได้ โดยนำกราฟีนที่โอนย้ายบนแผ่น SiO_2/Si แล้วมาต่อขั้วไฟฟ้า ดังภาพที่ 3.6

การต่อขั้วไฟฟ้าบนแผ่น SiO_2/Si มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำแผ่น SiO_2/Si ที่มีแผ่นกราฟีนเรียบร้อยแล้ว มาทากาวบริเวณด้านหลังแผ่น SiO_2/Si แล้วนำไปติดบนแผ่น PCB ที่ออกแบบไว้ใช้เป็นฐาน
2. นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
3. ทากาวเงินบริเวณขอบกราฟีนเพื่อทำเป็นขั้วทั้งสองข้าง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วประมาณ 5 มิลลิเมตร
4. นำขาคั่วต้านทานมาตัดเป็นขั้วต่อ แล้วนำไปติดระหว่างขั้วกาวเงินและขั้วบนแผ่น PCB
5. นำไปอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.6 รูปภาพแก๊สเซนเซอร์ที่พร้อมใช้งาน

3.3.2 การวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อสารอินทรีย์ระเหยง่าย

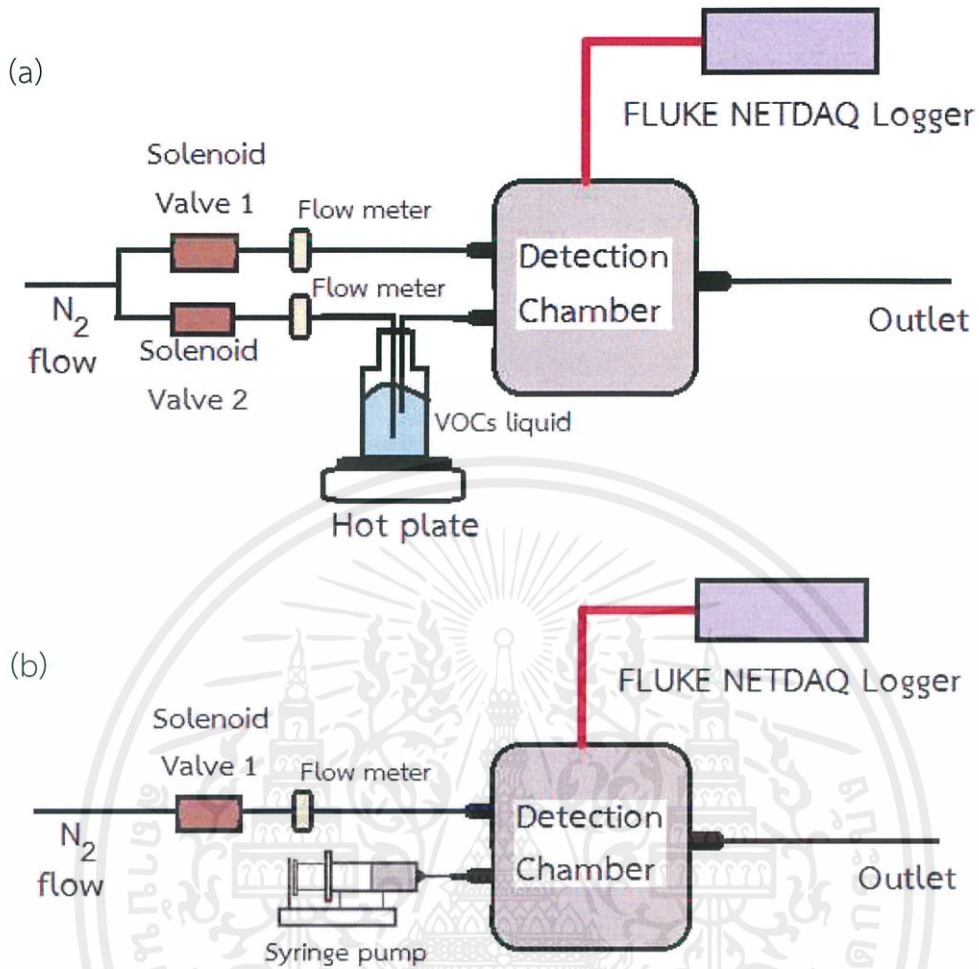
ในงานวิจัยนี้ศึกษาการประสิทธิภาพการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ต่อสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบวัดแก๊สทั้งหมด 2 ระบบ โดยระบบวัดแก๊สแบบแรก ภาพที่ 3.7(a) เป็นระบบวัดแก๊สที่ใช้การนำพาไอระเหยของแก๊สตรวจสอบเข้าสู่ระบบ เป็นระบบวัดที่สามารถวัดได้ที่มีความเข้มข้นสูง ในส่วนระบบวัดที่ 2 ดังภาพที่ 3.7 (b) เป็นระบบวัดแก๊สที่ใช้การฉีดสารละลายตรวจสอบเข้าสู่ระบบ ซึ่งเป็นระบบวัดที่สามารถวัดได้ที่มีความเข้มข้นต่ำ และเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล ดังตารางที่ 3.5 โดยระบบวัดแก๊สเซนเซอร์นั้นประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยแต่ละชนิด

เงื่อนไข	รายละเอียด
ไอระเหย	: เอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน
ความเข้มข้น	: 5 ppt* – 300 ppt
อุณหภูมิในระบบวัด	: อุณหภูมิห้อง

* ppt: parts per thousand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.7 แผนผังแสดงระบบทดสอบประสิทธิภาพตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (a) ระบบวัดแก๊สความเข้มข้นสูง (b) ระบบวัดแก๊สความเข้มข้นต่ำ

โดยรูปแบบการวัดแก๊สของระบบวัดนั้นจะใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สอ้างอิง แล้วใช้แก๊สเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และแก๊สเบนซีนเป็นแก๊สตรวจสอบ โดยมีรูปแบบการวัดแก๊ส ดังภาพที่ 3.7 โดยมีขั้นตอนการวัด 2 แบบดังต่อไปนี้

1. ให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้าระบบเพื่อเป็นแก๊สอ้างอิง โดยให้อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
2. สำหรับระบบวัดแก๊สสำหรับใช้วัดแก๊สความเข้มข้นสูง ทำการให้ไอระเหยเอทานอลไหลเข้าไปในระบบวัด โดยให้อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที โดยมีเงื่อนไขเป็นความเข้มข้นของแก๊สเอทานอล ส่วนสำหรับระบบวัดแก๊สสำหรับใช้วัดแก๊สความเข้มข้นต่ำ จะทำการฉีดสารละลายเอทานอลเข้าสู่ระบบปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 35 นาทีเพื่อให้สารละลายกลายเป็นไอระเหยทั้งหมด
3. ปลอ่ยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในระบบเป็นเวลา 20 นาที เพื่อทำการไล้โมเลกุลเอทานอลที่ติดอยู่ที่อุปกรณ์แก๊สเซนเซอร์พร้อมทั้งศึกษาเวลาการคืนตัว (Recovery time) ของแก๊สเซนเซอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้งานใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ค่าการตอบสนองไอระเหยเอทานอล ถูกบันทึกอยู่ในรูปของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ด้วยเครื่อง FLUKE NetDAQ NETWORKED DATA ACQUISITION UNIT ซึ่งค่าการตอบสนอง (Sensor response; SR) สามารถคำนวณหาได้ดังสมการ (3)

$$\text{Sensor response (SR)} = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (3)$$

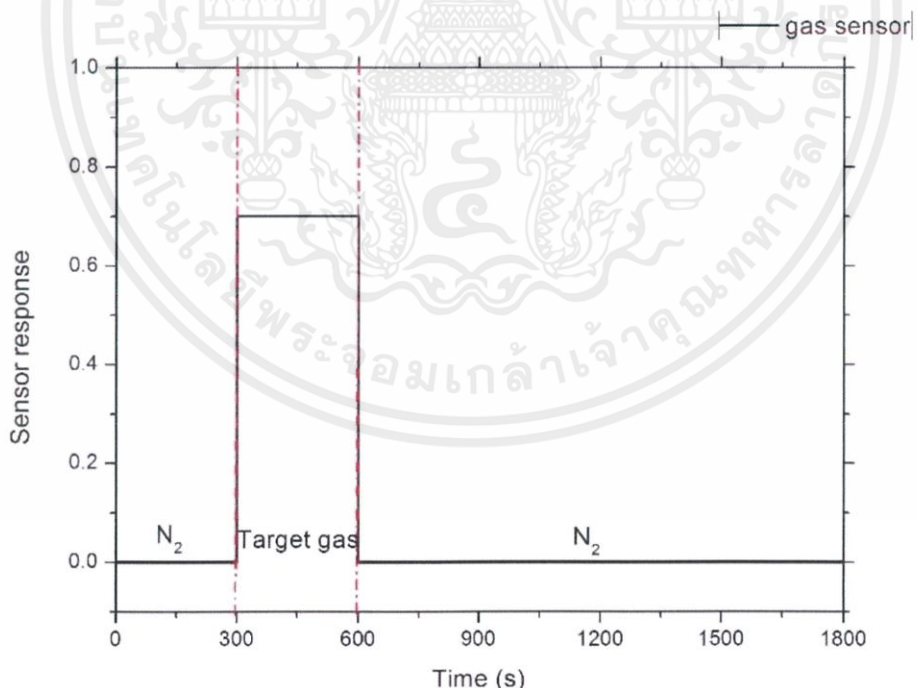
โดยที่ R_0 คือค่าความต้านทานเริ่มต้นของแก๊สเซนเซอร์

R คือค่าความต้านทานของแก๊สเซนเซอร์ภายใต้บรรยากาศไอระเหยของ VOCs

5. คำนวณค่าการตอบสนองนอร์มัลไลซ์ (Normalized sensor response) โดยการนำค่าจากอัตราส่วนระหว่างค่า Sensor response ที่วินาทีที่ 600 (SR_{600}) กับค่าความเข้มข้นของไอระเหยของ VOCs (N) ที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละครั้งดังสมการ (4) เพื่อทำการเปรียบเทียบการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์

$$\text{Normalized sensor response} = \frac{SR_{600}}{N} \quad (4)$$

6. ทำการทดลองวัดแก๊สเซนเซอร์ ตามขั้นตอนข้อที่ 1-5 โดยทำการเปลี่ยนไอระเหยเอทานอลเป็นไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ตามลำดับ



ภาพที่ 3.6 รูปแบบกราฟการตอบสนองของประสิทธิภาพอุปกรณ์วัดแก๊สเซนเซอร์ในอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั้น จะศึกษาในหัวข้อต่อไปนี้

1. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อสารอินทรีย์ระเหยง่ายระหว่างกราฟีนและไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์
2. ศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการอิมมัลชันต่อแก๊สตรวจสอบแต่ละชนิด และเวลาในการคืนสภาพของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีน
3. ศึกษาความสามารถในการวัดแก๊สแบบเป็นวัฏจักรต่อแก๊สตรวจสอบแต่ละชนิด ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

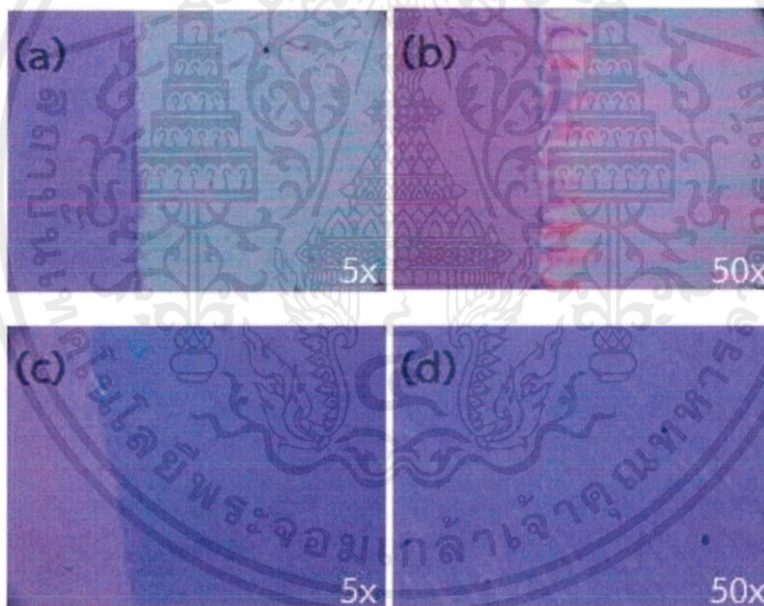
บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 วัสดุกราฟีน และวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA ที่ถูกโอนย้ายลงบนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของวัสดุกราฟีน และวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA บนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์

ภาพที่ 4.1 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA (Graphene/PMMA) (a และ b) และกราฟีน (c และ d) ที่ถูกโอนย้ายลงบนแผ่น SiO_2/Si ตามลำดับ



ภาพที่ 4.1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของไฮบริด Graphene/PMMA (a และ b) และกราฟีน (c และ d) ที่ถูกโอนย้ายลงบน SiO_2/Si ที่กำลังขยายเลนส์ใกล้วัตถุ 5 เท่า และ 50 เท่า ตามลำดับ

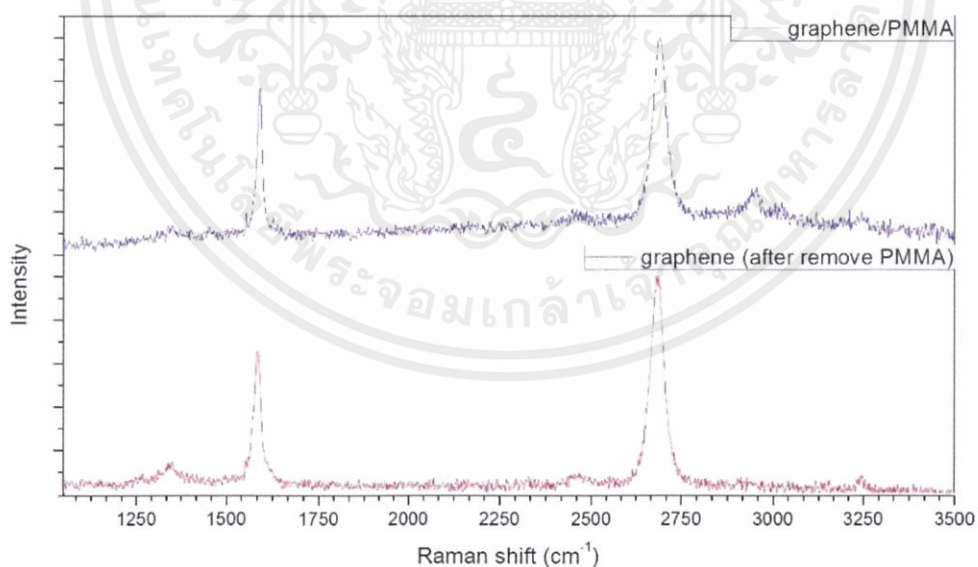
จากภาพกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่าไฮบริด Graphene/PMMA ที่โอนย้ายลงบน SiO_2/Si นั้น มีสีฟ้าเขียวซึ่งคาดว่าเป็นสีของ PMMA (ภาพที่ 4.1(a)) และเมื่อสังเกตด้วยกำลังขยายที่สูงขึ้นพบว่าผิวของ Graphene/PMMA นั้นมีลักษณะเป็นริ้วๆ (ภาพที่ 4.1(b)) ซึ่งริ้วนี้อาจจะเกิดจากการเคลือบ PMMA โดยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงลงบนแผ่นคอปเปอร์ซึ่งบางมาก ทำให้แผ่นคอปเปอร์ไม่สามารถแนบสนิทกับฐานรอง ทำให้ไม่สามารถเคลือบ PMMA ได้อย่างสม่ำเสมอ และเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล้าง PMMA ออกด้วยอะซิโตน พบว่ากราฟีนบนแผ่น SiO_2/Si มีสีน้ำเงินอมม่วง (ภาพที่ 4.1(c) และ (d)) ซึ่งมีสีที่แตกต่างจากแผ่น SiO_2/Si ซึ่งมีสีม่วง ซึ่งความแตกต่างของสีระหว่างกราฟีนและ SiO_2/Si ทำให้สามารถสังเกตกราฟีนได้ง่ายโดยใช้เพียงกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ซึ่งความแตกต่างของสีนี้เกิดจากสมบัติการแทรกสอดของแสงระหว่างกราฟีนกับชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ และชั้นซิลิกอนไดออกไซด์กับซิลิกอน ในกรณีของกราฟีน และการแทรกสอดของแสงระหว่างอากาศกับชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ และชั้นซิลิกอนไดออกไซด์กับซิลิกอน ในกรณีของแผ่น SiO_2/Si เปล่า [35,36] นอกจากนี้เมื่อสังเกตรูปกราฟีนด้วยกำลังขยายที่สูงขึ้นพบว่าผิวของกราฟีนมีรอยแตกบางจุด ซึ่งอาจจะเกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD ที่มีข้อจำกัดในเรื่องขนาดเกรนของกราฟีน หรืออาจจะเกิดจากการฉีกขาดระหว่างการล้าง PMMA ออกด้วยอะซิโตน ซึ่งหากมีจุดบกพร่อง (Defect) บนแผ่นกราฟีน อาจจะทำให้มีแรงปฏิกิริยาระหว่างกราฟีนและ PMMA และเมื่อล้าง PMMA ออก อาจจะทำให้กราฟีนบางส่วนหลุดออกไปด้วย (ภาพที่ 4.1(d)) นอกจากนี้ ยังพบตำแหน่งสีฟ้าเขียวบางจุดบนกราฟีน ซึ่งเป็นสีของ PMMA แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถล้าง PMMA ออกได้ทั้งหมด ซึ่งถือเป็นข้อเสียของวิธี Wet transfer

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีของวัสดุกราฟีน และวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA บนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์

ภาพที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีของวัสดุกราฟีน และวัสดุไฮบริด Graphene/PMMA



ภาพที่ 4.2 กราฟรามานสเปกตรัมของไฮบริด Graphene/PMMA และกราฟีนที่ถูกโอนย้ายลงบน SiO_2/Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่า I_{2D}/I_G ของกราฟีน และไฮบริด Graphene/PMMA

ตัวอย่าง	I_{2D}/I_G
ไฮบริด Graphene/PMMA	1.25 ± 0.08
กราฟีน	1.39 ± 0.19

จากรูปพบว่า การโอนย้าย Graphene/PMMA สามารถโอนย้ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากการวิเคราะห์ผลรามานสเปกตรัมของ Graphene/PMMA พบพีคหลัก 4 ตำแหน่งคือ 1350, 1580, 2680 และ 2940 cm^{-1} โดยพีคแต่ละตำแหน่งแสดงถึงตำแหน่งของ D, G, 2D-band และ PMMA ตามลำดับ และรามานสเปกตรัมของกราฟีนพบพีคหลัก 3 ตำแหน่งคือ 1350, 1580, และ 2680 cm^{-1} โดยไม่ปรากฏพีคของ PMMA แสดงว่าสามารถล้าง PMMA ออกได้สำเร็จ โดยที่ D-band แสดงถึงความบกพร่องของแกรไฟต์และคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบเจือปนอยู่ G band แสดงถึงความสมบูรณ์แบบของแกรไฟต์ ส่วน 2D-band แสดงถึงคุณภาพของกราฟีน ซึ่งผลของความสูงและลักษณะของพีค 2D-band สามารถอธิบายถึงจำนวนชั้นของกราฟีนได้ โดยทั่วไปสามารถคำนวณหาจำนวนชั้นกราฟีนได้จากอัตราส่วนระหว่างความสูงของ 2D-band ต่อ G-band (I_{2D}/I_G) ค่า I_{2D}/I_G แสดงในตารางที่ 4.1

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ค่า I_{2D}/I_G ของทั้งกราฟีน และ Graphene/PMMA มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่ากราฟีนที่วิเคราะห์นั้นมีลักษณะของกราฟีนเป็นชั้นเดียว [37] และนอกจากนี้ สามารถคำนวณหาความสมบูรณ์ของกราฟีนได้จากอัตราส่วนระหว่างความสูงของ G band ต่อ D band (I_G/I_D) ค่า I_G/I_D แสดงในตารางที่ 4.2

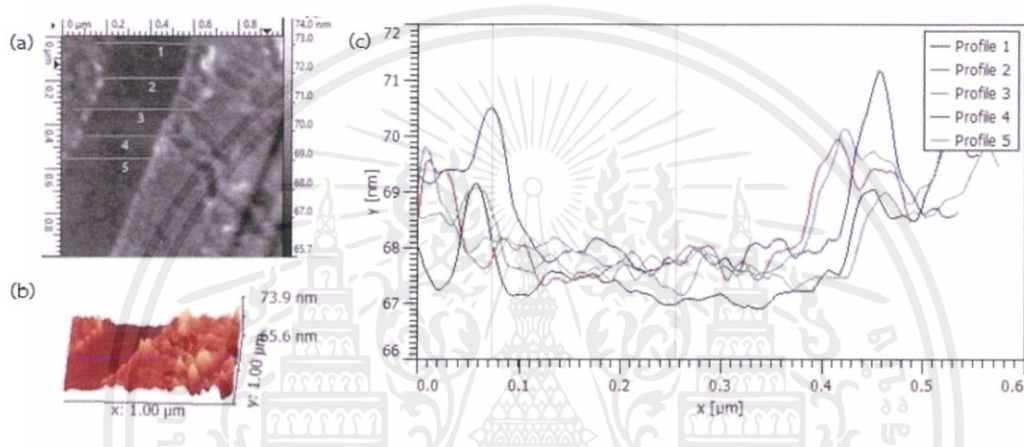
ตารางที่ 4.2 ค่า I_G/I_D ของกราฟีน และไฮบริด Graphene/PMMA

ตัวอย่าง	I_G/I_D
ไฮบริด Graphene/PMMA	6.49 ± 1.23
กราฟีน	3.27 ± 1.68

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ค่า I_G/I_D ของกราฟีน มีค่าน้อยกว่าค่า I_G/I_D ของ Graphene/PMMA แสดงว่าหลังจากการล้าง PMMA ออก ส่งผลให้กราฟีนมีโครงสร้างบกพร่อง (Defect) เกิดขึ้นมากกว่า ซึ่งอาจเกิดจากขั้นตอนการล้าง PMMA ทำให้เกิดความเสียหายแก่กราฟีน

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของวัสดุกราฟีน และวัสดุไฮบริด กราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA บนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์

ได้ทำการวิเคราะห์ความหนาของกราฟีนและไฮบริด Graphene/PMMA ด้วยเทคนิค กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ก่อนทำการตรวจวัดชั้นกราฟีนบนแผ่น SiO_2/Si ได้ขีดชั้นกราฟีนให้เกิดรอยก่อนทำการวัดเพื่อเป็นขอบอ้างอิงสำหรับตรวจสอบหาความสูงของชั้นกราฟีนที่ได้ทำการโอนย้ายภาพที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย AFM โดย (a) แสดงภาพมุมบน 2 มิติ (b) ภาพ 3 มิติ ส่วน (c) แสดงผลการวัดความสูงของชั้นกราฟีนที่อยู่บนแผ่น SiO_2/Si ที่ทำการล้าง PMMA ออกเรียบร้อยแล้ว โดยผลการวิเคราะห์ความสูงของชั้นกราฟีน 5 จุด แสดงผลในตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM (a) ภาพมุมบน 2 มิติ (b) ภาพ 3 มิติ และ (c) การวัดความสูงกราฟีนบนแผ่น SiO_2/Si ที่ทำการลบพอลิเมอร์ PMMA ออกเรียบร้อยแล้ว

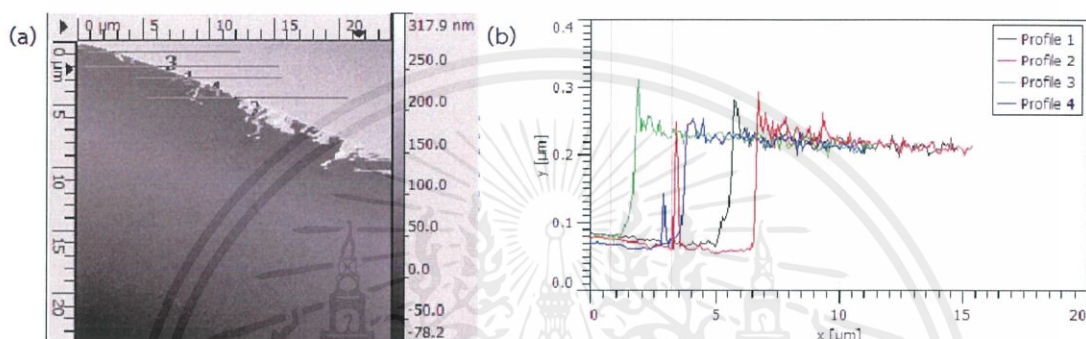
ตารางที่ 4.3 แสดงความสูงของชั้นกราฟีนที่ทำการลบพอลิเมอร์ PMMA ออกเรียบร้อยแล้ว

ตำแหน่งที่	ความสูง (nm)
1	2.06
2	1.57
3	1.01
4	1.67
5	0.94
เฉลี่ย	1.45 ± 0.47

ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วย AFM พบว่าชั้นกราฟีนบริเวณขอบรอยต่อระหว่างกราฟีนและแผ่น SiO_2/Si มีความสูงเฉลี่ยประมาณ 1.45 nm แสดงให้เห็นว่ากราฟีนมีจำนวนชั้นประมาณ 4 ชั้น ซึ่งผลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ที่ได้นั้นไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากกราฟรามานสเปกตรัมในหัวข้อที่ 4.1.2 คาดว่ามาจากสาเหตุดังต่อไปนี้ 1. ยังมีการตกค้างของพอลิเมอร์ PMMA ที่ไม่สามารถล้างได้หมดในระดับโมเลกุลอยู่บนชั้นของกราฟีน 2. เกิดจากส่วนเกินของกราฟีนบริเวณขอบที่ทำการขีดให้เป็นรอยเพื่อทำการวัด กราฟีนอาจเกิดการซ้อนทับกันจากการเสกกราฟีนที่ถูกขูดให้หลุดออก 3. เกิดจากความผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องมือวัด

ภาพที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ไฮบริด Graphene/PMMA ด้วย AFM โดย (a) แสดงภาพมุมมองบน 2 มิติ และ (b) แสดงผลการวัดความสูงของ Graphene/PMMA ที่อยู่บนแผ่น SiO_2/Si โดยผลการวิเคราะห์ความสูงของ Graphene/PMMA 4 จุด แสดงผลในตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM (a) ภาพมุมมองบน 2 มิติ และ (b) การวัดความสูง Graphene/PMMA บนแผ่น SiO_2/Si

ตารางที่ 4.4 ความสูงของชั้น Graphene/PMMA บนแผ่น SiO_2/Si

ตำแหน่งที่	ความสูง (nm)
1	182.90
2	176.80
3	168.90
4	182.10
เฉลี่ย	177.68 ± 6.45

จากผลการวิเคราะห์ด้วย AFM พบว่า Graphene/PMMA ที่โอนย้ายลงแผ่น SiO_2/Si มีความสูงเฉลี่ย 166.43 nm ซึ่งสามารถคำนวณหาความหนาของชั้นพอลิเมอร์ PMMA ได้จากการลบความสูงของชั้นกราฟีนที่วัดได้จากเครื่อง AFM พบว่าความหนาของชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบมีความหนาอยู่ที่ 164.98 nm ซึ่งจากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวที่ได้จากเครื่อง AFM พบรอยริ้วพอลิเมอร์เหมือนกับผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในข้อ 4.1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

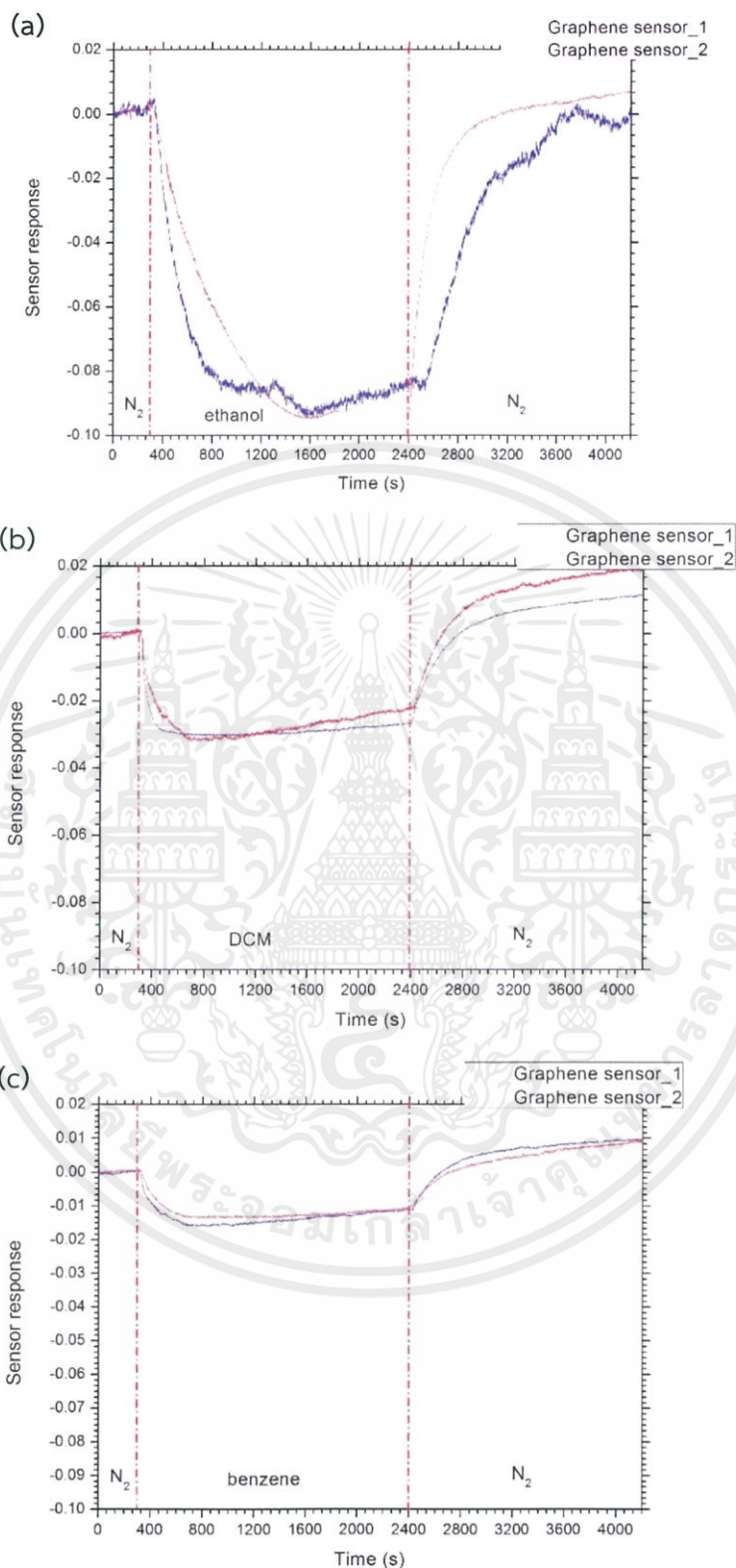
4.2 แก๊สเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุกราฟีน

4.2.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนสภาพของแก๊สเซนเซอร์วัสดุกราฟีน ต่อไอระเหยเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน

จากภาพที่ 4.5 แสดงกราฟการตอบสนองและ Normalized sensor response ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน ต่อไอระเหยเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยทั้ง 3 ชนิดเป็นไปดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบแก๊สเซนเซอร์กราฟีน

ไอระเหย VOCs	ค่าความเข้มข้น (parts per million; ppt)
เอทานอล	38.75
ไดคลอโรมีเทน	35.40
เบนซีน	35.53



ภาพที่ 4.5 ผลการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหย (a) เอทานอล, (b) ไดคลอโรมีเทน และ (c) เบนซีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

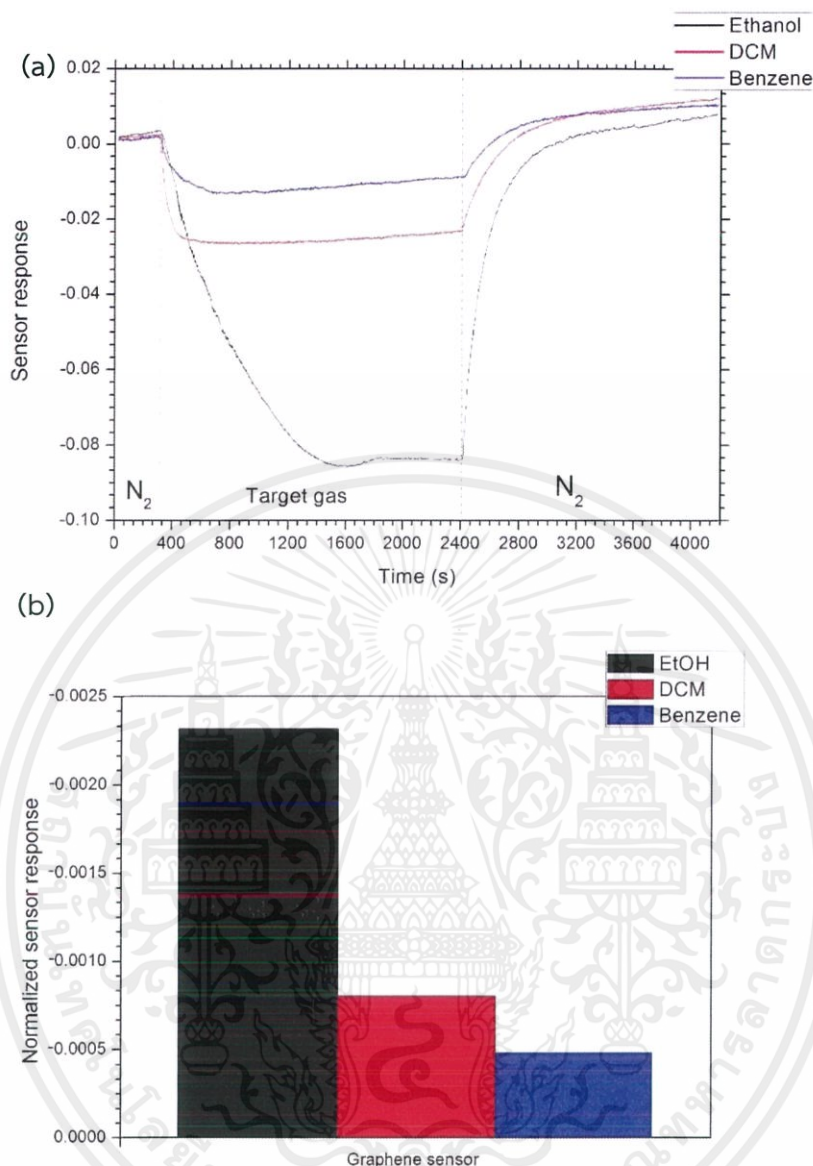
ก่อนการตรวจวัดไอระเหยจะทำการปรับระบบการตรวจวัดด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที ก่อนทำการทดลองตรวจวัดแก๊สเพื่อให้เซนเซอร์ปรับสภาพให้อยู่ในระบบบรรยากาศไนโตรเจน โดยการตรวจวัดนี้จะใช้ระบบวัดที่ 2 ดังรูป 3.5(b) จะทำการตรวจวัดด้วยแก๊สไนโตรเจนเพื่อกำหนดเป็นค่าแก๊สอ้างอิงเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการสารถละลายตรวจสอบเข้าไปในระบบการตรวจวัดเป็นจำนวน 1 มิลลิลิตร แล้วปล่อยให้สารถละลายตรวจสอบระเหยเป็นเวลา 35 นาที ต่อมาให้แก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเพื่อทำการไลโมเลกุลไอระเหยตรวจสอบเป็นเวลา 30 นาที พบว่าแก๊สเซนเซอร์มีค่าความต้านทานลดลงเมื่อสัมผัสกับไอระเหย จากนั้นแก๊สเซนเซอร์จะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อทำการไลโมเลกุลของไอระเหยตรวจสอบด้วยแก๊สไนโตรเจน พบว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีนมีค่าการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีที่สุด ตามมาด้วยไดคลอโรมีเทน และ เบนซีน ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีนสามารถกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นได้ภายในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจน

ค่าเวลาการตอบสนอง (Response time) ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหยตรวจสอบสามารถคำนวณได้จากเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อแก๊สที่ระดับ 90% เทียบกับค่าการตอบสนองสูงสุดในขณะที่ค่าเวลาการคืนตัว (Recovery time) ของแก๊สเซนเซอร์ คำนวณได้จากเวลาที่แก๊สเซนเซอร์ใช้ในการคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นภายในบรรยากาศไนโตรเจน ดังตารางที่ 4.6 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนต่อแก๊สชนิดต่างๆ พบว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีนใช้เวลาในการตอบสนองต่อไอระเหยไดคลอโรมีเทนน้อยที่สุด และใช้เวลาคืนตัวต่อเบนซีนได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหยชนิดต่างๆ

ไอระเหย VOCs	เวลาการตอบสนอง (s)	เวลาคืนตัว (s)
เอทานอล	900	1200
ไดคลอโรมีเทน	135	998
เบนซีน	160	730

จากรูป 4.6(a) แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน ต่อไอระเหยแต่ละชนิด โดยเป็นผลการตอบสนองค่าเฉลี่ยแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน และรูป 4.6(b) แสดงค่า Normalized sensor response ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหยตรวจสอบแต่ละชนิด โดยการนำค่าการตอบสนองต่อไอระเหยตรวจสอบของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนหารด้วยค่าความเข้มข้นของไอระเหยตรวจสอบของการทดลองมาเปรียบเทียบกัน



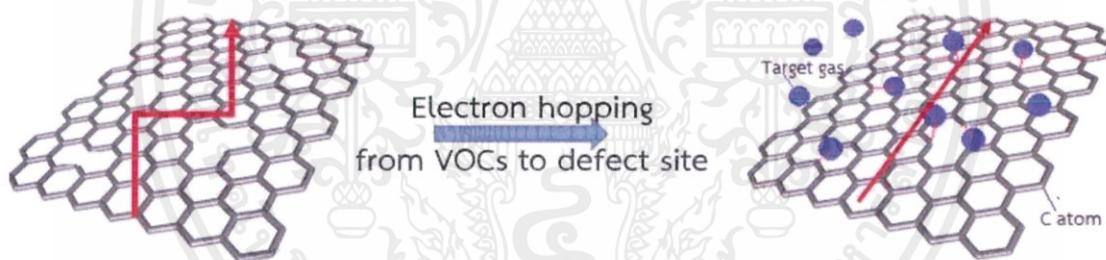
ภาพที่ 4.6 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอล (87.386 ppt), ไคคลอโรมีเทน (103.52 ppt) และเบนซีน (294.16 ppt) ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน (a) ผลการตอบสนอง และ (b) Normalized sensor response

จากรูป 4.6 (a) พบว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีนสามารถตอบสนองต่อไอระเหยของเอทานอลได้ดีที่สุด ตามด้วย แก๊สไคคลอโรมีเทน และแก๊สเบนซีน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อตรวจสอบค่า Normalized sensor response พบว่ามีแนวโน้มค่าสอดคล้องกัน (รูป 4.6 (b)) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีนมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลได้ดีที่สุดเมื่อความเข้มข้นของไอระเหยทั้ง 3 ชนิดเท่ากัน คาดว่าเกิดจากการที่ไอระเหยทั้ง 3 ชนิดมีสภาพขั้ว (Dielectric constant, ϵ_r) และขนาดที่ต่างกัน ทำให้เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีส่วนในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปกราฟีนถือเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) [38-40] หลักการที่นำมาใช้ในการอธิบายการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหยตรวจวัดได้แก่ เอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน นั้นอธิบายได้จากการที่กราฟีนมีจุดบกพร่อง การฉีกขาดของอะตอมคาร์บอนทำให้เกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งทำให้บริเวณนี้จะมีค่าความต้านทานที่สูงกว่าบริเวณอื่น เมื่อโมเลกุลไอระเหยตรวจสอดเข้ามาสัมผัสกับกราฟีนบริเวณจุดบกพร่อง เกิดเป็นสะพานเชื่อมระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ขาดจากกัน ทำให้เกิดปรากฏการณ์การกระโดดข้ามของอิเล็กตรอน (electron hopping) ระหว่างอะตอมคาร์บอนที่บริเวณจุดบกพร่อง โดยใช้โมเลกุลแก๊สเป็นทางผ่าน จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของกราฟีนเมื่อสัมผัสกับไอระเหยตรวจสอดมีค่าลดลง ดังภาพที่ 4.7 ซึ่งสอดคล้องซึ่งสอดคล้องกับผลการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์

สำหรับกลไกการตอบสนองต่อไอระเหยแต่ละชนิด สามารถอธิบายได้จากค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และขนาดของไอระเหย (Molecule size) ค่าอัตราการกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก [41,42] โดยยิ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ค่าอัตราการกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานลดลงมาก ในขณะที่เดียวกันหากขนาดของไอระเหยมีขนาดเล็ก ก็ทำให้จำนวนโมเลกุลที่เข้าไปสัมผัสกับกราฟีนมีมากขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานลดลงมาก จากผลการวัดแก๊สเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหยชนิดต่างๆ พบว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีนมีการตอบสนองต่อไอระเหยแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน โดยเรียงลำดับได้ตามขนาดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและขนาดของไอระเหย โดยแสดงในตารางที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 กลไกการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์สภาพขั้วและขนาดของไอระเหยแต่ละชนิด

ไอระเหย VOCs	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r)*	ขนาดโมเลกุล (cm^3/mol)
เอทานอล	$24.30\epsilon_0$	58.39 [43]
ไคคลอโรมีเทน	$8.93\epsilon_0$	63.85 [44]
เบนซีน	$2.27\epsilon_0$	89.12 [45]

(http://depts.washington.edu/eooptic/linkfiles/dielectric_chart%5B1%5D.pdf)*

จากตารางที่ 4.7 พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของไอระเหยแต่ละชนิดสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ เอทานอล > ไคคลอโรมีเทน > เบนซีน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไอระเหยของเอทานอลสามารถที่จะทำให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

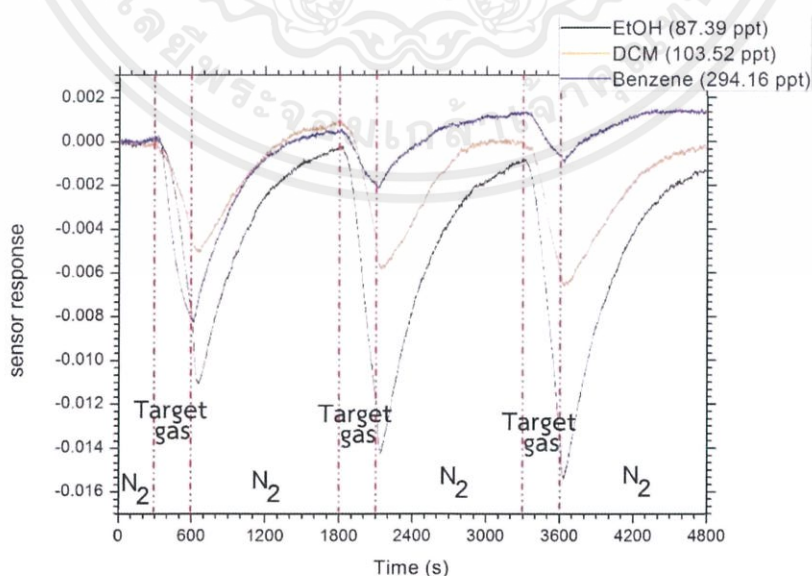
อัตราการกระโดดข้ามของอิเล็กทรอนิกส์ที่ผิวของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนได้ดีที่สุด อีกทั้งเมื่อตรวจสอบดูขนาดโมเลกุลของไอระเหยพบว่าแนวโน้มของขนาดเป็นดังต่อไปนี้ เอทานอล < ไดคลอโรมีเทน < เบนซีน ตามลำดับ ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าเมื่อไอระเหยของเอทานอลมีขนาดโมเลกุลเล็กที่สุด จึงทำให้จำนวนโมเลกุลแก๊สที่มีขนาดเล็กสามารถสัมผัสกับแก๊สเซนเซอร์ได้จำนวนมากกว่าโมเลกุลแก๊สขนาดใหญ่ได้ [22, 46] จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้แก๊สเซนเซอร์ กราฟีนตอบสนองต่อไอระเหยของเอทานอลได้มากที่สุด

4.2.2 ความเสถียรของแก๊สเซนเซอร์วัสดุกราฟีนต่อไอระเหยเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน

จากรูป 4.8 แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน ต่อไอระเหยแต่ละชนิด โดยเป็นผลการตอบสนองค่าเฉลี่ยแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน โดยวัดเป็น 3 วัฏจักร (loop) เพื่อศึกษาความเสถียรของแก๊สเซนเซอร์ โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยทั้ง 3 ชนิดเป็นไปดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบแก๊สเซนเซอร์กราฟีน

ไอระเหย VOCs	ค่าความเข้มข้น (ppt)
เอทานอล	88.05
ไดคลอโรมีเทน	103.80
เบนซีน	295.16



ภาพที่ 4.8 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยตรวจสอบแบบเป็นวัฏจักร ได้แก่ เอทานอล (87.39 ppt), ไดคลอโรมีเทน (103.52 ppt) และเบนซีน (294.16 ppt) ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนการตรวจวัดไอระเหยแก๊สจะทำการปรับระบบการตรวจวัดด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที ก่อนทำการทดลองตรวจวัดแก๊สเพื่อให้เซนเซอร์ปรับสภาพให้อยู่ในระบบบรรยากาศไนโตรเจน โดยการตรวจวัดนี้จะใช้ระบบวัดที่ 1 ดังรูป 3.5(a) จะทำการตรวจวัดด้วยแก๊สไนโตรเจนเพื่อกำหนดเป็นค่าแก๊สอ้างอิงเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการพาไอระเหยตรวจสอบเข้าไปในระบบการตรวจวัดด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นตัวพาเป็นเวลา 5 นาที ต่อมาให้แก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเพื่อทำการไล่โมเลกุลไอระเหยตรวจสอบเป็นเวลา 20 นาที โดยทำเป็นลูป ทั้งหมด 3 ลูป พบว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีนสามารถตอบสนองต่อไอระเหยของเอทานอลและไดคลอโรมีเทนได้ โดยมีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยไดคลอโรมีเทนอย่างมีความเสถียรในแต่ละลูป และมีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลในแต่ละลูปเพิ่มขึ้น อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการสะสมของไอระเหยของเอทานอลที่สะสมอยู่ที่บริเวณแผ่นกราฟีนของแก๊สเซนเซอร์ ในขณะที่มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนในลูปแรกสูง และในลูปต่อๆ มา มีค่าการตอบสนองลดลงจากลูปแรกอย่างเห็นได้ชัด คาดว่ามีสาเหตุมากจากการเปลี่ยนแก๊สไนโตรเจนเป็นไอระเหยเบนซีน ซึ่งเป็นผลจากการปรับสภาพอากาศทำให้ค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนในลูปแรกสูงกว่าปกติ ดังนั้นการประเมินค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ควรเริ่มที่ลูปที่ 2 ซึ่งจากผลการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหยเบนซีนจะพบว่า การตอบสนองต่อเบนซีนตั้งแต่ลูป 2 ค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนมีค่าที่เสถียร

ดังนั้นจากผลวัดแก๊สเซนเซอร์กราฟีน แสดงให้เห็นว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีนสามารถตอบสนองต่อไอระเหยตรวจสอบทั้ง 3 ชนิดได้ โดยสามารถตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลได้ดีที่สุดเนื่องจากขนาดและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกไอระเหยตรวจสอบ

4.3 แก๊สเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA

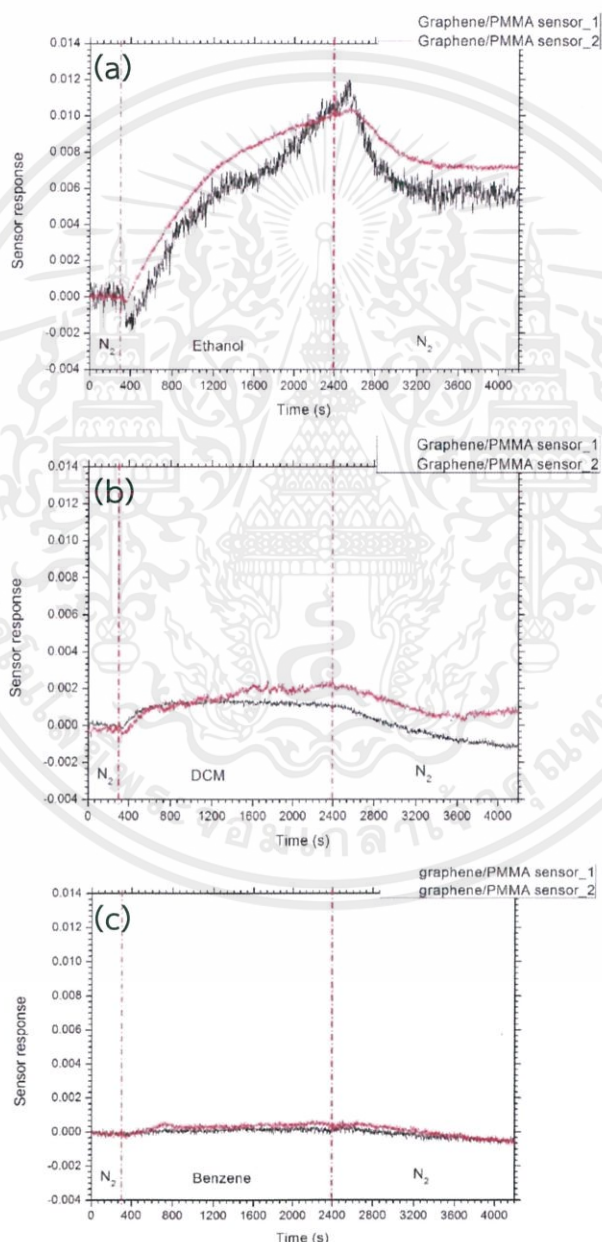
4.3.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนสภาพของแก๊สเซนเซอร์วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA ต่อไอระเหยเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน

จากภาพที่ 4.9 แสดงกราฟการตอบสนองและ Normalized sensor response ของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยทั้ง 3 ชนิดเป็นไปดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA

ไอระเหย VOCs	ค่าความเข้มข้น (ppt)
เอทานอล	38.75
ไดคลอโรมีเทน	35.40
เบนซีน	35.53

ก่อนการตรวจวัดไอระเหยของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA จะทำการทดสอบเช่นเดียวกับการตรวจวัดไอระเหยของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA กล่าวคือจะทำการปรับระบบการตรวจวัดด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที ก่อนทำการทดลองตรวจวัดแก๊สเพื่อให้เซนเซอร์ปรับสภาพให้อยู่ในระบบบรรยากาศไนโตรเจน โดยการตรวจวัดนี้จะใช้ระบบวัดที่ 2 ดังรูป 3.5(b) จะทำการตรวจวัดด้วยแก๊สไนโตรเจนเพื่อกำหนดเป็นค่าแก๊สอ้างอิงเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการสารถละลายตรวจสอบเข้าไปในระบบการตรวจวัดเป็นจำนวน 1 มิลลิลิตร แล้วปล่อยให้สารถละลายตรวจสอบระเหยเป็นเวลา 35 นาที ต่อมาให้แก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเพื่อทำการไล่มลพิษไอระเหยตรวจสอบเป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 4.9 ผลการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหย (a) เอทานอล, (b) ไดคลอโรมีเทน และ (c) เบนซีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

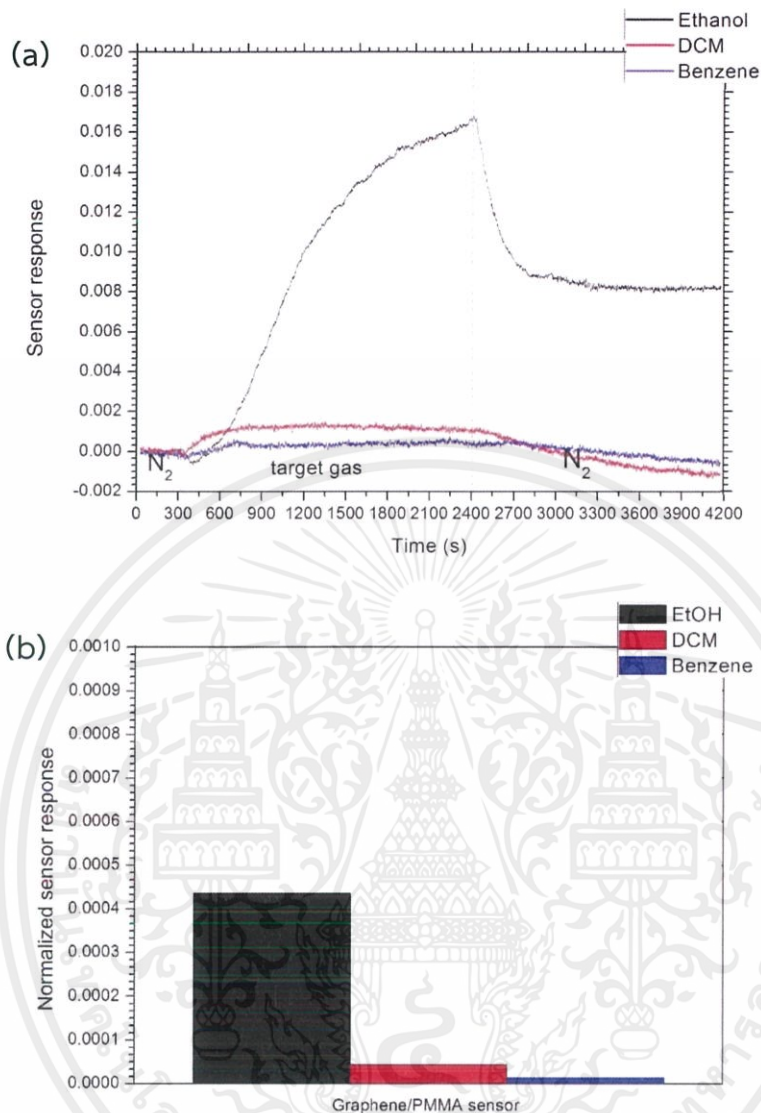
พบว่าแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA มีค่าความต้านทานสูงขึ้น เมื่อสัมผัสกับไอระเหยของแก๊ส จากนั้นแก๊สเซนเซอร์จะมีค่าความต้านทานลดลงเมื่อทำการไล่โมเลกุลของไอระเหยของตรวจสอบด้วยแก๊สไนโตรเจน พบว่าแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลได้ดีที่สุด ตามด้วยไดคลอโรมีเทน ตามมาด้วยแก๊สเบนซีน ตามลำดับ โดยการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนนั้นน้อยมากจนแทบจะไม่สามารถตรวจวัดได้ เมื่อเทียบกับการตอบสนองต่อไอระเหยอีกทั้ง 2 ตัว อีกทั้งยังพบว่าแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ไม่สามารถกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นได้ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อแก๊สชนิดต่างๆ พบว่าแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ใช้เวลาในการตอบสนองและใช้เวลาคืนตัวต่อไอระเหยเบนซีนได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ

ไอระเหย VOCs	เวลาการตอบสนอง (s)	เวลาคืนตัว (s)
เอทานอล	1550	-
ไดคลอโรมีเทน	300	1400
เบนซีน	336	1260

จากรูป 4.10 (a) แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อแก๊สแต่ละชนิด โดยเป็นผลการตอบสนองค่าเฉลี่ยแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน และรูป 4.10 (b) แสดงค่า Normalized sensor response ของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยตรวจสอบแต่ละชนิด



ภาพที่ 4.10 ผลการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอล (87.386 ppt), ไดโครโลมีเทน (103.52 ppt) และเบนซีน (294.16 ppt) ของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA (a) ผลการตอบสนอง และ (b) Normalized sensor response

จากรูป 4.10 (a) พบว่าแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA สามารถตอบสนองต่อไอระเหยของเอทานอลได้ดีที่สุด ตามด้วย ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่า Normalized sensor response (รูป 4.10 (b)) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก๊สเซนเซอร์มีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลได้ดีที่สุดเมื่อความเข้มข้นของไอระเหยทั้ง 3 ชนิดเท่ากัน โดย หลักการที่นำมาใช้ในการอธิบายการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยตรวจวัดได้แก่ เอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีนนั้น สามารถอธิบายได้ด้วย 2 หลักการ ได้แก่ 1. ขนาดและค่าไดอิเล็กทริกของไอระเหย โดยแก๊สที่มีขนาดเล็กจะสามารถแพร่ผ่านเข้ามาในชั้น พอลิเมอร์ได้ดีกว่า ซึ่งเมื่อตรวจสอบค่าขนาดโมเลกุลของไอระเหย สามารถเรียงขนาดของโมเลกุลแก๊สแต่ละชนิดเรียงจากเล็กไปใหญ่ได้ดังนี้ เอทานอล < ไดคลอโรมีเทน < เบนซีน ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวัดแก๊สนั้นคือ แก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA สามารถตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลได้ดีที่สุด เนื่องจากโมเลกุลเอทานอลมีขนาดเล็กที่สุด จึงมีความสามารถทะลุผ่านชั้นพอลิเมอร์เข้ามาสัมผัสชั้นกราฟีนได้ เมื่อไอระเหยของสารมาสัมผัสกับกราฟีนจะมีผลให้เกิดการตรึงพาหะโฮลไมให้เคลื่อนที่ ทำให้ค่าความต้านทานของแก๊สเซนเซอร์สูงขึ้น อีกทั้งเมื่อศึกษาถึงค่า ไดอิเล็กทริกของไอระเหยแต่ละชนิด พบว่าเอทานอลมีค่าไดอิเล็กทริกสูงที่สุด (ตารางที่ 4.7) ถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้แก๊สเซนเซอร์มีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลได้ดีที่สุด เนื่องจากสารที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงจะสามารถเหนี่ยวนำพาหะโฮลของวัสดุได้มากกว่า สารที่มีค่าไดอิเล็กทริก 2. การบวมตัวของพอลิเมอร์ (Polymer swelling) โดยพอลิเมอร์จะเกิดการพองตัวเนื่องไอระเหยที่สามารถละลายเข้ากันกับพอลิเมอร์ PMMA จึงทำให้กราฟีนเกิดการบิดงอตัวของ กราฟีน ส่งผลให้ค่าความต้านทานสูงขึ้น โดยความสามารถในการละลายเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์กับไอระเหยชนิดต่างๆ คำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 โดยสรุปผลการคำนวณค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนของพอลิเมอร์ PMMA กับไอระเหยชนิดต่างๆ

Polymer and solvent	Hansen solubility parameter, HSP (MPa ^{1/2}) [*]			R ₀	R _a	RED (R _a /R ₀)
	δ _D	δ _P	δ _H			
PMMA	17.9	10.1	5.4	11	14.7	1.3
Ethanol	15.8	8.8	19.4			
PMMA	17.9	10.1	5.4		3.9	0.4
DCM	18.2	6.3	6.1			
PMMA	17.9	10.1	5.4	10.7	1.0	
Benzene	18.4	0.0	2.0			

*(https://www.accudynetest.com/solubility_table.html)

δ_D คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงแพร่กระจายของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย (Hansen dispersion solubility parameter)

δ_P คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย (Hansen polar solubility parameter)

δ_H คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของพันธะไฮโดรเจนของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย (Hansen hydrogen bonding solubility parameter)

R₀ คือ รัศมีอันตรกิริยา (Interaction radius) ของพอลิเมอร์

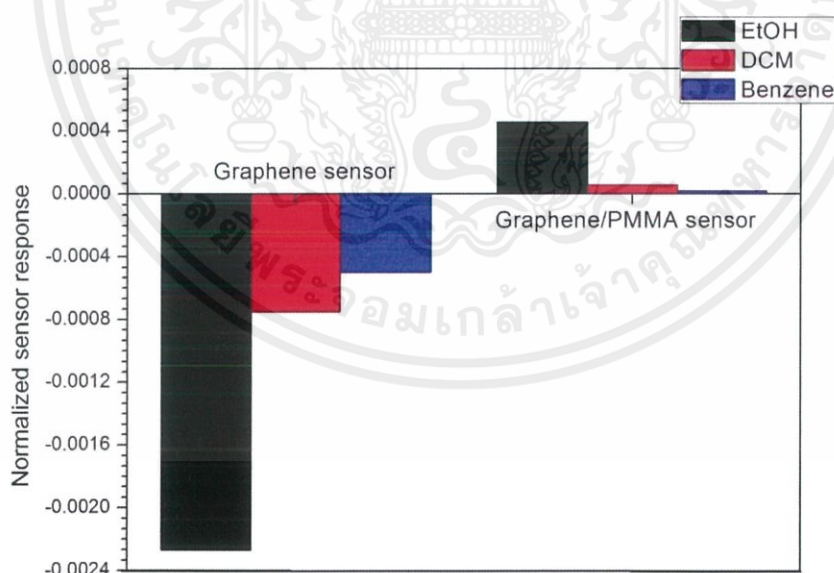
R_a คือ พารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย (HSP of two substances)

RED คือ ระยะทางพลังงานสัมพัทธ์ (Relative energy distance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการละลายเข้ากันของพอลิเมอร์ PMMA กับไอระเหยชนิดต่างๆ พิจารณาได้จากค่า RED ตามที่แสดงผลในตารางที่ 4.11 โดยหลักการพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนได้อธิบายว่าตัวที่ถูกทำละลายจะละลายเข้ากันได้ดีในตัวทำละลาย จะต้องมียค่า RED ของตัวที่ถูกทำละลายและตัวทำละลายมีค่าน้อย โดยผลการคำนวณค่า RED จากตารางที่ 4.10 พบว่าค่า RED มีแนวโน้มดังนี้ $DCM < Benzene < Ethanol$ ซึ่งหมายความว่าไอระเหยของไดคลอโรมีเทนสามารถละลายเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ PMMA ได้ดีที่สุด จากนั้นเป็น เบนซีน และเอทานอล ตามลำดับ ซึ่งผลค่า Normalized sensor response ของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA เปรียบเทียบระหว่างไอระเหยไดคลอโรมีเทน และเบนซีน พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับค่า RED คือแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA สามารถตอบสนองต่อไอระเหยไดคลอโรมีเทน ได้มากกว่าไอระเหยเบนซีน แต่อย่างไรก็ตามค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยแก๊สของเอทานอล นั้นไม่สอดคล้องต่อค่า RED เนื่องจากแก๊สเซนเซอร์สามารถตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีที่สุดในขณะที่ค่า RED ต่ำที่สุด เนื่องมาจากอิทธิพลของหลักการที่ 1 เรื่องขนาดโมเลกุลของไอระเหยที่มีขนาดเล็กมีผลมากกว่า ทำให้โมเลกุลของไอระเหยเอทานอลสามารถแพร่ผ่านชั้นพอลิเมอร์ได้มากกว่าไอระเหยชนิดอื่น ซึ่งส่งผลให้แก๊สเซนเซอร์ตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลได้ดี

สำหรับกลไกการตอบสนองต่อไอระเหยแต่ละชนิดสำหรับแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากค่าการตอบสนองต่อไอระเหยแต่ละชนิดของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนและแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ที่ต่างกัน ดังในภาพที่ 4.11 แสดงค่า Normalized sensor response ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนและแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA



ภาพที่ 4.11 แสดงค่า Normalized sensor response ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนและแก๊สเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA

จากรูปพบว่าความสามารถในการตอบสนองต่อไอระเหยแต่ละชนิดของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ลดลง คาดว่าเกิดมาจากการที่พอลิเมอร์ PMMA ทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นระหว่างไอระเหยไม่ให้เข้าไปสัมผัสกับชั้นกราฟีน โดยแก๊สเซนเซอร์กราฟีนตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอล, ไคคลอโรมีเทน และเบนซีน ได้ดีกว่าแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ถึง 5.62, 20.06 และ 35.09 เท่า ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการมีพอลิเมอร์ PMMA ที่เคลือบบนชั้นกราฟีนทำหน้าที่กั้นไอระเหยไม่ให้เข้ามาทำปฏิกิริยากับชั้นผิวกราฟีน ทำให้ประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อไอระเหยแต่ละชนิดต่ำลง นอกจากพอลิเมอร์ PMMA จะทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นไอระเหยแล้ว พอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นชั้นเมมเบรนคัดเลือกไอระเหย (selectivity) โดยไอระเหยที่มีขนาดเล็กจะสามารถแพร่ผ่านเข้ามาในชั้นพอลิเมอร์เข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวกราฟีนได้ ซึ่งเมื่อตรวจสอบค่าขนาดโมเลกุลของไอระเหย พบว่าขนาดของโมเลกุลแก๊สแต่ละชนิดสามารถเรียงขนาดจากเล็กไปใหญ่ได้ดังนี้ เอทานอล < ไคคลอโรมีเทน < เบนซีน ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวัดแก๊สนั้นคือ แก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ที่สามารถตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลได้ดีที่สุด เนื่องจากโมเลกุลเอทานอลมีขนาดเล็กที่สุด จึงมีความเป็นไปได้ว่าสามารถทะลุผ่านชั้นพอลิเมอร์เข้ามาสัมผัสชั้นกราฟีนได้ดีกว่าโมเลกุลไอระเหยชนิดอื่น อีกทั้งเมื่อศึกษาถึงสภาพความเป็นขั้วของไอระเหยแต่ละชนิด พบว่าเอทานอลมีค่าไดโพลโมเมนต์สูงที่สุด เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้แก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA มีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อเอทานอลได้ดีที่สุด

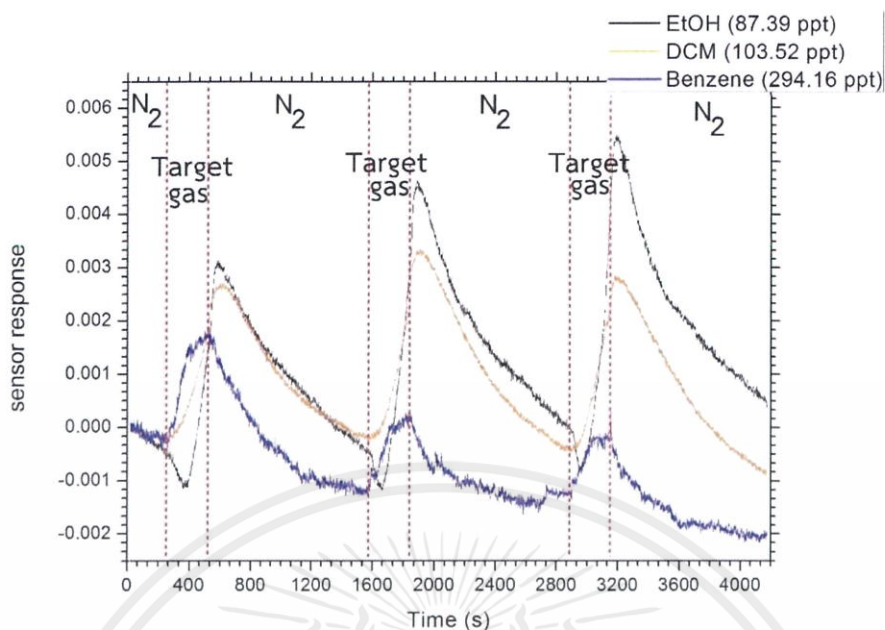
ดังนั้นการใช้พอลิเมอร์ PMMA ในการเคลือบชั้นกราฟีน มาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์วัดแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA จะทำให้แก๊สเซนเซอร์มีประสิทธิภาพในการคัดเลือกที่จะตอบสนองต่อแก๊สได้อย่างจำเพาะเจาะจง โดยผู้วิจัยตั้งสมมุติฐานว่าความหนาของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ และชนิดของพอลิเมอร์ มีผลต่อความสามารถในการเลือกตอบสนองต่อแก๊สได้ ซึ่งต้องทำการศึกษาในคราวต่อไปในอนาคต

4.3.2 ความเสถียรของแก๊สเซนเซอร์วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA ต่อไอระเหยเอทานอล ไคคลอโรมีเทน และเบนซีน

จากรูป 4.12 แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยแต่ละชนิด โดยเป็นผลการตอบสนองค่าเฉลี่ยแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน โดยวัดเป็น 3 รูป เพื่อศึกษาความเสถียรของแก๊สเซนเซอร์ โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยแก๊สทั้ง 3 ชนิดเป็นไปตามตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA

ไอระเหย VOCs	ค่าความเข้มข้น (ppt)
เอทานอล	88.05
ไคคลอโรมีเทน	103.80
เบนซีน	295.16



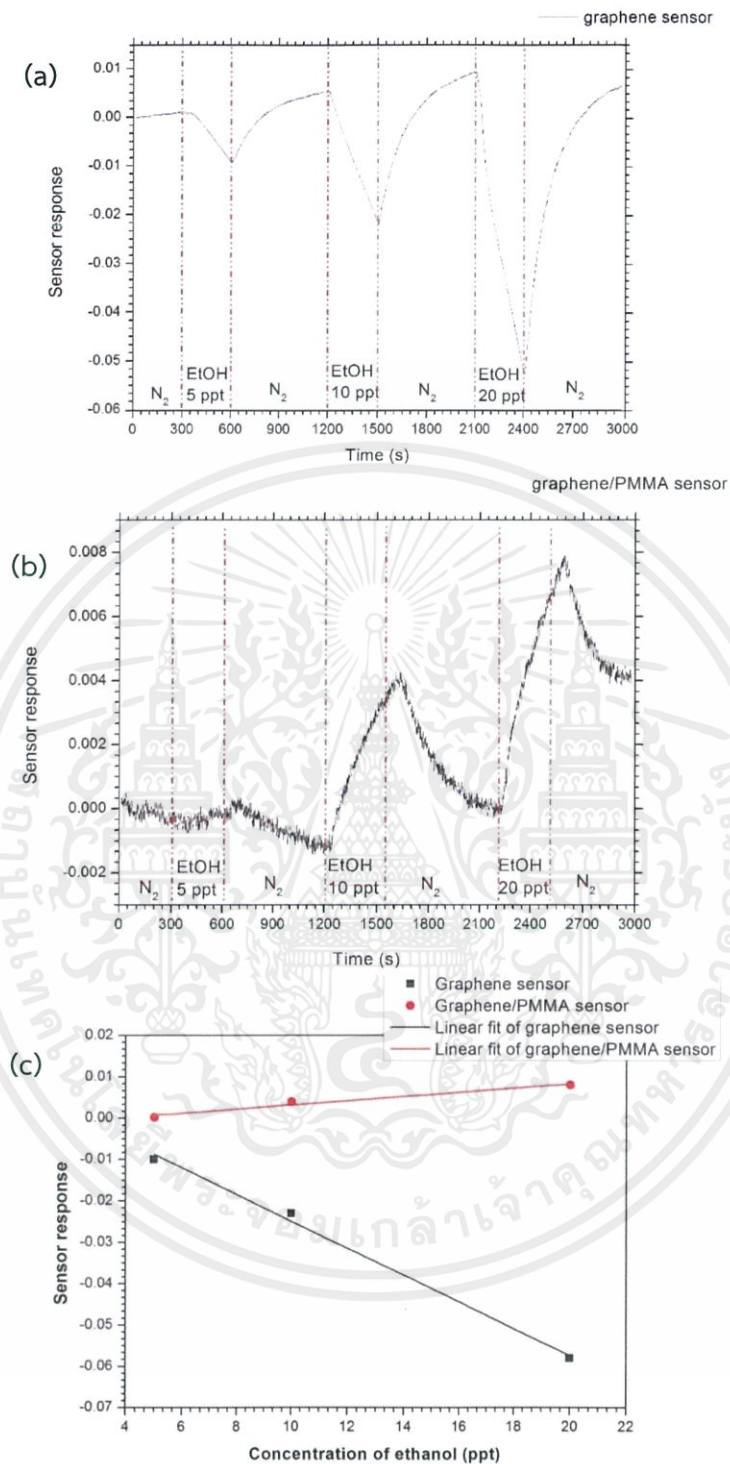
ภาพที่ 4.12 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยตรวจสอบเป็น 3 วัฏจักร ได้แก่ เอทานอล (87.386 ppt), ไตคลอโรมีเทน (103.52 ppt) และเบนซีน (294.16 ppt) ของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA

ก่อนการตรวจวัดไอระเหยจะทำการปรับระบบการตรวจวัดด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที ก่อนทำการทดลองตรวจวัดแก๊สเพื่อให้เซนเซอร์ปรับสภาพให้อยู่ในระบบบรรยากาศไนโตรเจน โดยการตรวจวัดนี้จะใช้ระบบวัดที่ 1 ดังรูป 3.5(a) จะทำการตรวจวัดด้วยแก๊สไนโตรเจนเพื่อกำหนดเป็นค่าแก๊สอ้างอิงเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการพาไอระเหยแก๊สตรวจสอบเข้าไปในระบบการตรวจวัดด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นตัวพาเป็นเวลา 5 นาที ต่อมาให้แก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเพื่อทำการไลโมเลกุลไอระเหยตรวจสอบเป็นเวลา 30 นาที โดยทำเป็นลูป ทั้งหมด 3 ลูป พบว่าแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยไตคลอโรมีเทนอย่างมีความเสถียรในแต่ละลูป และมีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลในแต่ละลูปเพิ่มขึ้นและยังไม่สามารถไล่เอทานอลได้หมด อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการสะสมของไอระเหยของเอทานอลที่สะสมอยู่ที่บริเวณชั้นพอลิเมอร์ PMMA ของแก๊สเซนเซอร์ ในขณะที่มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนในลูปแรกสูง และในลูปต่อๆ มา มีค่าการตอบสนองลดลง ซึ่งมีลักษณะลูปคล้ายกับแก๊สเซนเซอร์กราฟีนที่ตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนเช่นเดียวกัน

ดังนั้นปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA และแก๊สเซนเซอร์กราฟีน คือสภาพผิวและขนาดของไอระเหยตรวจสอบเป็นหลัก จึงทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงประสิทธิภาพการวัดแก๊สของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA และแก๊สเซนเซอร์กราฟีน ต่อไอระเหยแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

4.4 การตอบสนองต่อไอระเหยของเอทานอลที่ช่วงระดับความเข้มข้นระดับหนึ่งในพื้น ส่วนของแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA และแก๊สเซนเซอร์กราฟีน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA สามารถตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติม ในการนำมาตรวจวัดเอทานอลที่ความเข้มข้นในระดับพื้นส่วน โดยเริ่มจากการที่ให้แก๊สเซนเซอร์อยู่ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 20 นาทีเพื่อปรับสภาพของแก๊สเซนเซอร์ก่อนการตรวจวัด ในการตรวจวัดเริ่มจากการให้แก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 5 นาที เพื่อเป็นค่าความต้านทานอ้างอิงของแก๊สเซนเซอร์ จากนั้นทำการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่ความเข้มข้น 5 ppt เข้าสู่ระบบเป็นเวลา 5 นาที และทำการไลโมเลกุลเอทานอลออกจากระบบด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่ความเข้มข้น 10 ppt เข้าสู่ระบบเป็นเวลา 5 นาที และทำการไลโมเลกุลเอทานอลออกจากระบบด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่ความเข้มข้น 20 ppt เข้าสู่ระบบเป็นเวลา 5 นาที และทำการไลโมเลกุลเอทานอลออกจากระบบด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที โดยการวัดไอระเหยทั้งหมดจะทำการวัด 3 รอบ โดยที่ผู้จัดทำทำการวัดไอระเหยของเอทานอลต่ำสุดที่ 5 ppt เนื่องจากระบบวัดของผู้จัดทำสามารถวัดค่าความเข้มข้นของไอระเหยได้ต่ำสุดที่ 5 ppt จากภาพที่ 4.13 แสดงกราฟการตอบสนองและ Normalized sensor response ต่อไอระเหยแก๊สเอทานอลที่ช่วงระดับ ppt ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA โดยความเข้มข้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 5-20 ppt



ภาพที่ 4.13 แสดงค่าการตอบสนองไธระเหยเอทานอลช่วงระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 20 ppt ของ (a) แก๊สเซนเซอร์กราฟีน (b) แก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA (c) กราฟแนวโน้ม การตอบสนองไธระเหยเอทานอลระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 20 ppt ของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.13 (a) แสดงผลการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 20 ppt แก๊สเซนเซอร์กราฟีน พบว่าเมื่อแก๊สเซนเซอร์กราฟีนสัมผัสกับไอระเหยของเอทานอลที่ความเข้มข้นต่ำ แก๊สเซนเซอร์มีค่าความต้านทานต่ำลง และค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อแก๊สเซนเซอร์อยู่ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ในขณะที่ภาพที่ 4.13(b) พบว่าแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA สามารถที่จะตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอล โดยเมื่อแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA สัมผัสกับไอระเหยของเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ แก๊สเซนเซอร์มีค่าความต้านทานสูงขึ้น และค่าความต้านทานลดลงเมื่อแก๊สเซนเซอร์อยู่ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

โดยจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแก๊สเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิดยังสามารถตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าวได้ และแก๊สเซนเซอร์กราฟีน ยังสามารถตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลที่ระดับความเข้มข้น 5 ppt ได้อย่างดี ดังนั้นการตรวจวัดที่ระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่านี้อาจจะยังสามารถตรวจวัดได้ เพียงแต่ระบบวัดแก๊สของผู้จัดทำมีข้อจำกัดในการวัดไอระเหยเอทานอลได้ต่ำที่สุดที่ 5 ppt ในขณะที่แก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลที่ระดับความเข้มข้น 5 ppt ได้ไม่ดีนัก ดังนั้นการตรวจวัดที่ระดับความเข้มข้นต่ำกว่านี้อาจไม่เหมาะสมกับแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ภาพที่ 4.13(c) แสดงกราฟแนวโน้มค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ที่ระดับความเข้มข้นในช่วง 5-20 ppt พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์กับค่าความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลที่ตรวจวัด มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรง กล่าวคือเมื่อค่าความเข้มข้นไอระเหยของเอทานอลที่ใช้ตรวจวัดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนและแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลในช่วงระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 20 ppt ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการตรวจวัดที่ระดับความเข้มข้น 20 แก๊สเซนเซอร์มีค่าเวลาการตอบสนองดีที่สุด และในส่วนของเวลาคืนกลับสู่สภาพเดิมพบว่าที่ระดับความเข้มข้น 5 ppt มีใช้เวลาน้อยที่สุดสำหรับแก๊สเซนเซอร์กราฟีน

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของแก๊สเซนเซอร์กราฟีนและแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลในช่วงระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 20 ppt

แก๊สเซนเซอร์	ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล (ppt)	เวลาในการตอบสนอง (s)	เวลาในการกลับสู่สภาพเดิม (s)
แก๊สเซนเซอร์กราฟีน	5	295	405
	10	170	415
	20	170	430
แก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA	5	430	520
	10	415	600
	20	300	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลดั่งข้างต้นแสดงให้เห็นว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีนและแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA มีความสามารถในการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนที่ช่วงระดับความเข้มข้น ppt อีกทั้งยังสามารถกลับสู่สภาพเดิมที่ค่าความต้านทานเริ่มต้นภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยจากผลพบว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีนมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลดีกว่าแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA 6.38 เท่า (ที่ระดับความเข้มข้น 20 ppt) แสดงให้เห็นว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีน มีความสามารถในการนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ในขณะที่แก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA เมื่อความเข้มข้นของไอระเหยสูงขึ้นจะเริ่มต้องใช้เวลาในการไล่ไอระเหยตรวจสอบนานขึ้น และบางครั้งก็ไม่สามารถไล่ไอระเหยออกจากเซนเซอร์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์แก๊สเซนเซอร์กราฟีน และแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA โดยทำการโอนย้ายกราฟีนจากแผ่นคอปเปอร์ (Copper foil: Cu foil) ที่ได้รับความอนุเคราะห์จาก Atomic Research of Nano-Materials Research Laboratory Sungkunkwan University โดยทำการโอนย้ายด้วยวิธีการเปียก (Wet processes) โดยก่อนทำการโอนย้ายทำการเคลือบพอลิเมอร์ PMMA ลงบนชั้นกราฟีน ด้วยวิธีการเคลือบปั่นเหวี่ยง การโอนย้ายกราฟีนนั้นทำการแช่แผ่นกราฟีนที่อยู่บนคอปเปอร์ลงในสารละลายเหล็กคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยให้ฝั่งคอปเปอร์สัมผัสสารละลายเพื่อทำการกำจัดคอปเปอร์ออกจากกราฟีน ก่อนทำการทำความสะอาดแผ่นกราฟีนด้วยน้ำกลั่นไร้ไอออน พบว่าการโอนย้ายกราฟีนด้วยกระบวนการ wet processes สามารถโอนย้ายกราฟีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความคงทน กราฟีนสามารถเกาะติดกับแผ่น SiO_2/Si ที่ใช้เป็นฐานรองรับได้อย่างแน่นอน ส่วนการกำจัดพอลิเมอร์ PMMA นั้นใช้การนำไปแช่ในสารละลายอะซิโตนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พบว่าสามารถกำจัด PMMA ออกจากชั้นกราฟีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม พบว่า กราฟีนที่โอนย้ายได้ มีความสูงเพียง 1.45 นาโนเมตร และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามาน แสดงให้เห็นตำแหน่ง G-band, 2D-band และพีคของพอลิเมอร์ PMMA ที่ตำแหน่งที่ 1580, 2680 และ 2940 cm^{-1} ตามลำดับ พบว่าวัสดุ Graphene/PMMA มีค่าอัตราส่วนระหว่างความสูงของ 2D-band ต่อ G-band (I_{2D}/I_G) เท่ากับ 1.25 ± 0.08 แสดงให้เห็นว่า กราฟีนของวัสดุ Graphene/PMMA มีคุณภาพความสมบูรณ์ที่สูง ในขณะที่ผลการวิเคราะห์วัสดุกราฟีน จะไม่พบพีคของพอลิเมอร์ PMMA หลงเหลืออยู่ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการกำจัดพอลิเมอร์สามารถกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในส่วนที่สอง เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่างแก๊สเซนเซอร์กราฟีนและแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน พบว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีน มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลได้ดีที่สุด ตามด้วย ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ตามลำดับ ในขณะที่แก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลได้ดีที่สุด โดยแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA แทบไม่ตอบสนองต่อไคคลอโรมีเทนและเบนซีน ซึ่งพอลิเมอร์ PMMA จะทำหน้าที่เป็นกำแพงกั้นแก๊สโดยเลือกให้แก๊สที่มีขนาดและมีสภาพขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมจึงสามารถที่จะผ่านได้ ผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของขนาดโมเลกุลและสภาพขั้วของไอระเหย ซึ่งพบว่าเอทานอลมีขนาดโมเลกุลที่เล็กที่สุดและมีสภาพความขั้วไฟฟ้าสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ตรวจวัดได้จริง

ในส่วนที่สามได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ระหว่างแก๊สเซนเซอร์กราฟีนและแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA พบว่าแก๊สเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนเซอร์ Graphene/PMMA ตรวจวัดต่อไอระเหยเอทานอลมีประสิทธิภาพลดลง 6.38 เท่า เมื่อเทียบกับแก๊สเซนเซอร์กราฟีน แสดงให้เห็นว่าชั้นพอลิเมอร์ PMMA ทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นแก๊ส

ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าแก๊สเซนเซอร์กราฟีนมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลมากที่สุด ตามด้วย ไคคลอโรมีเทน และเบนซีน ตามลำดับ ในขณะที่แก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ตอบสนองได้ดีต่อเอทานอล ในขณะที่แทบไม่ตอบสนองต่อไอระเหยไคคลอโรมีเทนและเบนซีน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA แสดงความสามารถในการคัดเลือกที่จะตอบสนองต่อไอระเหยได้

5.2 แนวทางการพัฒนา

สำหรับงานวิจัยนี้ต้องพัฒนาต่อไป เพื่อพัฒนาแก๊สเซนเซอร์ Graphene/PMMA ให้มีประสิทธิภาพ โดยจะทำการศึกษาเงื่อนไขของความหนาของชั้นพอลิเมอร์ที่มีผลต่อการคัดเลือกไอระเหยและประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อไอระเหย และทำการศึกษาเงื่อนไขของชนิดพอลิเมอร์ที่มีผลต่อการคัดเลือกไอระเหยได้อย่างมีประสิทธิภาพในการตอบสนองมากขึ้น เพื่อไปเสริมปัจจัยที่ 2 ของกลไกการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ โดยเมื่อเลือกพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการละลายเข้ากันกับไอระเหยตรวจสอบมากกว่าไอระเหยตัวอื่นๆ จะช่วยให้แก๊สเซนเซอร์มีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อแก๊สได้อย่างจำเพาะเจาะจงมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถทำให้แก๊สเซนเซอร์ตอบสนองต่อไอระเหยตรวจสอบเพียงชนิดเดียวได้ เนื่องจากความหนาของชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบ

บรรณานุกรม

- [1] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., et al., “Electric field effect in atomically thin carbon films”, *Science.*, vol. 306, pp. 666–669, (2004).
- [2] อติสร เตือนตรานนท์. กราฟีนวัสดุมหัศจรรย์ที่ทั่วโลกตื่นตะลึง (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/201412101013531.pdf>.
- [3] สิริพัฒน์ ประโทนเทพ. ควอนตัมและนาโนเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี พระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พิมพ์ครั้งที่ 1, (2558).
- [4] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กราฟีน (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.nstda.or.th/nstda-knowledge/3895-graphene>.
- [5] Li, X., Cai, W., An, J., et al., “Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils,” *Science.*, vol. 324, pp. 1312–1314, (2009).
- [6] Deokar, G., Avila b, J., Razado-Colambo, I., et al., “Towards high quality CVD graphene growth and transfer”, *Carbon*, vol. 89, pp. 82–92, (2015).
- [7] Bajpai, R., Roy, S., Jain, L., et al., “Facile one-step transfer process of graphene”, *Nanotechnology*, vol. 22, p. 225606, (2011).
- [8] Li, X., Zhu, Y., Cai, W., et al., “Transfer of large-area graphene films for high-performance transparent conductive electrodes”, *Nano Lett.*, vol. 9, pp. 4359–4363, (2009).
- [9] Teng, P. Y., Lu, C. C., Hasegawa, K. A., et al., “Remote catalyzation for direct formation of graphene layers on oxides”, *Nano Lett.*, vol. 12, pp. 1379–1384, (2012).
- [10] Kim, H., Song, I., Park, C., et al., “Copper Vapor-Assisted Chemical Vapor Deposition for High Quality and Metal-Free Single Layer Graphene on Amorphous SiO₂ Substrate”, *ASCNano*, vol. 7, pp. 6575–6582, (2013).
- [11] Yang, H., Huang, L., Chang, Q. H., et al., “Direct growth of large-area graphene films onto oxygen plasma-etched quartz for nitrogen dioxide gas detection”, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 47, p. 315101, (2014).
- [12] Kim, Y. S., Joo, K., Jerng, S. K., et al., “Direct integration of polycrystalline graphene into light emitting diodes by plasma-assisted metal-catalyst-free synthesis”, *ACS Nano*, vol. 8, pp. 2230–2236, (2014).
- [13] Vlassiounk, I., Polizos, G., Cooper, R., et al., “Strong and Electrically Conductive Graphene Based Composite Fibers and Laminates”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, pp. 10702–10709, (2015).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Khan, F.I., Ghoshal, A. Kr., “Removal of Volatile Organic Compounds from polluted air”, *J. Loss. Prevent. Proc.*, vol. 13, pp. 527–545 (2000).
- [15] OSH. Information sheet (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤศจิกายน 2558. เข้าถึงได้จาก http://www.oshthai.org/upload/file_linkitem/20100126090841_2.pdf.
- [16] Heineman, E. F., Cocco, P., Gómez, M. R., et al., “Occupational exposure to chlorinated aliphatic hydrocarbons and risk of astrocytic brain cancer”, *Am. J. Ind. Med.*, vol. 26, pp. 55–169 (1994).
- [17] บริษัท TOA. ภัยร้ายในบ้านที่มองไม่เห็น VOCs. เข้าถึงเมื่อ พฤศจิกายน 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.toaoxygenplus.com/voc.html>.
- [18] กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. มาตรฐานคุณภาพเสียงและอากาศ (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤศจิกายน 2558. เข้าถึงได้จาก http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd01.html.
- [19] Qi, P., Vermesh, O., Grecu, M., et al., “Toward large arrays of multiplex functionalized carbon nanotube sensors for highly sensitive and selective molecular detection”, *Nano Lett.*, vol. 3, pp. 347–351, (2003).
- [20] Star, A., Joshi, V., Skarupo, S., et al., “Gas sensor array based on metal-decorated carbon nanotubes”, *J. Phys. Chem. B*, vol. 110, pp. 21014–21020, (2006).
- [21] Wongwiriyan, W., Honda, S.-i., Konishi, H., et al., “Single-Walled Carbon Nanotube Thin-Film Sensor for Ultrasensitive Gas Detection”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, pp. 16-19 (2005).
- [22] Muangrat, W., Chodjarusawad, T., Maolanon, R., et al., “Poly(methyl methacrylate) and thiophene-coated single-walled carbon nanotubes for volatile organic compound discrimination”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, pp. 02BD04 (2016).
- [23] ธวัชชัย ดุลยสุจริต. แกรฟีนอีกหนึ่งแง่มุมมหัศจรรย์แห่งคาร์บอน. *UPDATE*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 288, หน้า 29-33. (2554).
- [24] ปุณทริกา ปัญญาวสิน. ถ้ามือถือ Nokia ในอนาคตจะทำมาจากกราฟีน (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://y34.wikidot.com/it-report01-041>.
- [25] อรุณกิจ สิทธิไชย. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 2558. เข้าถึงได้จาก http://www.industry.in.th/uploadedimages/knowledge/files/File35317_20120818162818_24e83a742517b82c67747280d2d92aee.pdf.
- [26] Hu, N., Wang, Y., Chai, J., et al., “Gas sensor based on p-phenylenediamine reduced graphene oxide”, *Sensors Actuat. B Chem.*, vol. 163, pp. 107–114 (2012).

- [27] Shirsat, M. D., Sarkar, T., Kakoullis, J., et al, “Porphyrin-Functionalized Single-Walled Carbon Nanotube Chemiresistive Sensor Arrays for VOCs” *J. Phys. Chem. C*, vol. 116, pp. 3845–3850 (2012).
- [28] Zhang, Z., Zou, R., Song, G., et al., “Highly aligned SnO₂ nanorods on graphene sheets for gas sensors”, *J. Mater. Chem.*, vol. 21, pp. 17360 (2011).
- [29] Chung, M. G., Kim, D. H., Lee, H. M., et al., “Highly sensitive NO₂ gas sensor based on ozone treated graphene”, *Sensors Actuat. B Chem.*, vol. 166, pp. 172–176 (2012).
- [30] Phan, D.T., Chung, G. S., “Effects of rapid thermal annealing on humidity sensor based on graphene oxide thin films” *Sens. Actuators, B*, vol. 220, pp. 1050–1055 (2015).
- [31] McCreery. R. L., *Raman Spectroscopy for Chemical Analysis*. New York: John Wiley & Sons, vol. 157 (2005).
- [32] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. Raman Spectroscopy (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 2558. เข้าถึงได้จาก https://en.wikipedia.org/wiki/Raman_spectroscopy.
- [33] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. การวิเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี (ออนไลน์). เข้าถึงได้เมื่อ เมษายน 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/MTT656Chapter%20%20Polymer%20Spectroscopy.pdf>.
- [34] วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. Atomic Force Microscope (AFM) (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤษภาคม 2559. เข้าถึงได้จาก <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/219-atomic-force-microscope-afm-.html>.
- [35] Blake, P., Hill, E.W., Castro Neto, et al., “Making graphene visible” *Appl. Phys. Lett.* Vol. 91, pp. 063124 (2007).
- [36] Ni, Z.H., Wang, H.M., Kasim, J., et al., “Graphene Thickness Determination Using Reflection and Contrast Spectroscopy”, *Nano Lett.*, Vol. 7, pp.2758-2763, (2007).
- [37] Quantum Frontiers. Graphene gets serious (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤษภาคม 2559. เข้าถึงได้จาก <https://quantumfrontiers.com/2013/09/06/graphene-gets-serious/>.
- [38] Wang, T., Huang, D., Yang, Z., et al., “A Review on Graphene-Based Gas/Vapor Sensors with Unique Properties and Potential Applications” *Nano-Micro Lett.*, Vol. 8, pp. 95-119 (2015).
- [39] Gautam, M. and Jayatissa, A. H., “Detection of organic vapors by graphene films functionalized with metallic nanoparticles” *J. Appl. Phys.*, Vol. 112, pp.114326 (2012).
- [40] Varghese, S. S., Lonkar, S., Singh, K.K., et al., “Recent advances in graphene based gas sensors” *Sens. Actuators, B*, Vol. 218, pp. 160–183 (2015).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [41] Charlesworth, J. M., Partridge, Ashton C., Garrard, Neil., “ Mechanistic studies on the interactions between poly(pyrrole) and organic vapors”, *J. Phys. Chem.*, Vol. 97, pp 5418–5423 (1993).
- [42] Persaud, K. C., “Polymers for chemical sensing”, *Materialtoday*, Vol. 8, pp. 38–44 (2005).
- [43] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. Ethanol (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤษภาคม 2559. เข้าถึงได้จาก <https://en.wikipedia.org/wiki/Ethanol>.
- [44] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. Dichloromethane (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤษภาคม 2559. เข้าถึงได้จาก <https://en.wikipedia.org/wiki/Dichloromethane>.
- [45] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. Benzene (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤษภาคม 2559. เข้าถึงได้จาก <https://en.wikipedia.org/wiki/Benzene>.
- [46] Hong, J., Lee, S., Seo, J., et al., “A Highly Sensitive Hydrogen Sensor with Gas Selectivity Using a PMMA Membrane-Coated Pd Nanoparticle/Single-Layer Graphene Hybrid” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol.7, pp. 3554–3561 (2015).



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย)

นางสาวชนกนันท์ รัตนบุษย์

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)

Miss Chanoknan Rattanabut

วัน เดือน ปีเกิด

14 มกราคม 2537

ที่อยู่

618 หมู่ 1 ถ.พหลดารีห์ ต.กำแพงแสน อ.กำแพงแสน นครปฐม 73140

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน ศูนย์วิจัยและพัฒนาการศึกษา

พ.ศ. 2559 วิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุโนโสถานเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้