



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์วัสดุผสมกราฟีนลามิเนตและการประยุกต์ใช้งานด้านเซนเซอร์แบบ
ยืดหยุ่นสำหรับตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

Fabrication of Graphene-Based Composite Laminates and its Flexible
Sensor Application for Volatile Organic Compounds Detection

นางสาววินิตดา วงศ์วิริยะพันธ์
นายวิน บรรจงปรุ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2560

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์วัสดุผสมกราฟีนลามิเนตและการประยุกต์ใช้งานด้านเซนเซอร์แบบ
ยืดหยุ่นสำหรับตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

Fabrication of Graphene-Based Composite Laminates and its Flexible
Sensor Application for Volatile Organic Compounds Detection

นางสาววินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

นายวิน บรจรังกู

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2560

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การประดิษฐ์วัสดุผสมกราฟีนลามิเนตและการประยุกต์ใช้งานด้านเซนเซอร์แบบ
ยืดหยุ่นสำหรับตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

แหล่งเงิน ทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2560 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 396,300.00 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560

หัวหน้าโครงการ

ชื่อ-สกุล นางสาววินัดตา วงศ์วิริยะพันธ์ สังกัด วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผู้ร่วมโครงการวิจัย นายวิน บรรจงปรุ สังกัด ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการประดิษฐ์วัสดุผสมกราฟีนลามิเนตและการประยุกต์ใช้งานด้านเซนเซอร์แบบ
ยืดหยุ่นสำหรับตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ขั้นตอนการประดิษฐ์เซนเซอร์ประกอบด้วย การสังเคราะห์
กราฟีนด้วยเทคนิคการตกตะกอนไฮโรเทอเพอไมบนแผ่นทองแดง และเคลือบทับกราฟีนด้วยพอลิเมอร์ หลังจากนั้น
กัดแผ่นทองแดงออก และวางวัสดุผสมกราฟีน-พอลิเมอร์ลามิเนตบนฐานรองรับก๊าซเซนเซอร์เช่นแผ่น
ซิลิกอนไดออกไซด์ และแผ่นพลาสติก ชนิดของพอลิเมอร์มีผลต่อประสิทธิภาพการตรวจวัดไฮโรเทอของ
สารอินทรีย์ระเหยง่าย และกลไกของการตอบสนองขึ้นกับความสามารถในการพองตัวของพอลิเมอร์กับไฮ
โรเทอเหล่านั้นๆ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและขนาดของไฮโรเทอ ในงานวิจัยนี้พอลิเมอร์ที่นำมาศึกษาได้แก่ พอลิเมทิลเม
ทาครีเลต (PMMA) เอทิลเซลลูโลส (EC) และไอโซพรีน พบว่าวัสดุผสมแต่ละชนิดสามารถตอบสนองต่อไฮ
โรเทอแตกต่างกันโดยวัดจากสมบัติการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป มีความจำเพาะในการตรวจวัด โดยกราฟีน-
PMMA สามารถตรวจวัดไฮโรเทออะซีโตน กราฟีน-EC สามารถตรวจวัดไฮโรเทอของคลอโรฟอร์ม กราฟีน-ไอ
โซพรีน สามารถตรวจวัดไฮโรเทอของเบนซีน และวัสดุกราฟีนสามารถตรวจวัดไฮโรเทอของไดคลอโรมีเทนได้ดี
ที่สุด นอกจากนี้เมื่อวัดความสามารถของเซนเซอร์บนแผ่นพลาสติกพบว่าขนาดการเปลี่ยนแปลงของค่าความ
ต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าเมื่อไม่โค้งงอประมาณ 2 เท่า ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในพัฒนา
ก๊าซเซนเซอร์เพื่อเฝ้าระวังสารอินทรีย์ระเหยง่ายในที่อยู่อาศัยและภาคอุตสาหกรรมต่อไป

คำสำคัญ : กราฟีน พอลิเมอร์ ก๊าซเซนเซอร์ สารอินทรีย์ระเหยง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Fabrication of Graphene-Based Composite Laminates and its Flexible Sensor Application for Volatile Organic Compounds Detection

Researcher: Miss Winadda Wongwiriyan, Mr. Win Bunjongpru

Faculty: College of Nanotechnology

ABSTRACT

In this research, fabrication of graphene-based composite laminates and its flexible sensor application for volatile organic compounds (VOC) detection have been studied. Graphene was synthesized on copper foil by chemical vapor deposition and was subsequently coated by polymer. After etching copper foil, the freestanding graphene-polymer laminates were transferred on SiO₂/Si or plastic substrates. The sensor performance of graphene-polymer laminates depends on the type of polymer, dielectric constant and size of VOCs. Sensing mechanism is based on polymer swelling upon exposure of VOC vapors. Poly(methyl methacrylate) (PMMA), ethylcellulose (EC) and isoprene were used in this study. Each graphene-polymer composite laminate shows different response magnitude corresponding to the change in its electrical properties upon exposure of VOC vapors. Graphene-PMMA, graphene-EC, graphene-isoprene and a pristine graphene show a highest response magnitude to vapor of acetone, chloroform, benzene and dichloromethane, respectively. These results implied the selectivity of graphene-polymer composite laminates towards VOC vapors. Moreover, the response of sensor on plastic substrate shows a 2-time response improvement when bending substrate. These results can be further used for the development of sensor to monitor VOC vapors in household and industry.

Keywords : graphene, polymer, gas sensor, volatile organic compounds

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินงบประมาณประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความร่วมมือของผู้ที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง Assoc. Prof. Young Jae Song (Sungkyunkwan University ประเทศเกาหลีใต้) ดร.วรวิทย์ เมืองรัตน์ (Shinshu University ประเทศญี่ปุ่น) ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะ และแก้ปัญหาเกี่ยวกับงานวิจัยทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ นางสาว ชนกนันท์ รัตนบุษย์ นักศึกษาปริญญาโท (วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง) ที่เป็นกำลังสำคัญในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณนักวิจัยทุกท่านของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการให้ความอนุเคราะห์ในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณนักศึกษาห้องปฏิบัติการ Carbon Nanomaterials Research Laboratory (วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง) คณาจารย์และเจ้าหน้าที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีทุกคน สำหรับความร่วมมือในงานวิจัยนี้

นางสาววินิตดา วงศ์วิริยะพันธ์ หัวหน้าโครงการ
นายวิน บรรจงปฎุ ผู้ร่วมโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	12
3.1 การโอนย้ายกราฟีน.....	12
3.2 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์.....	15
3.3 การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์.....	16
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	21
4.1 วัสดุกราฟีน วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ EC และ วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ isoprene ที่ถูกโอนย้ายลงบนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์.....	21
4.2 ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุกราฟีน บนแผ่น SiO ₂ /Si.....	25
4.3 ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA บนแผ่น SiO ₂ /Si.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุไฮบริด กราฟีนและพอลิเมอร์ EC บนแผ่น SiO_2/Si	36
4.5	ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุไฮบริด กราฟีนและพอลิเมอร์ isoprene บนแผ่น SiO_2/Si	40
4.6	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และ เบนซีน ระหว่างกราฟีนและไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์แต่ละชนิดบนแผ่น SiO_2/Si	43
4.7	ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นสำหรับตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และ เบนซีน ด้วยวัสดุกราฟีน บนแผ่น PET	45
4.8	ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นสำหรับตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และ เบนซีน ด้วยวัสดุกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA บนแผ่น PET	49
4.9	ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นสำหรับตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และ เบนซีน ด้วยวัสดุกราฟีนและพอลิเมอร์ EC บนแผ่น PET	54
4.10	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโคปี เพื่อตรวจสอบกลไกการการตอบสนอง ต่อไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ระหว่างกราฟีนและไฮบริดกราฟีน และพอลิเมอร์แต่ละชนิดบนแผ่น PET	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....		60
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง.....		61
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับจากการทำโครงการวิจัย.....		63
ภาคผนวก ข สรุปการใช้จ่ายเงิน.....		72
ประวัตินักวิจัย.....		73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2. 1 คอมโพสิตกราฟีนและการตรวจวัด VOCs.....	11
3.1 ลักษณะของแผ่น SiO ₂ /Si.....	12
3.2 เงื่อนไขการทำออกซิเจนพลาสมา.....	13
3.3 ลักษณะของแผ่น PET.....	13
3.4 เงื่อนไขออกซิเจนพลาสมาสำหรับกัฏกราฟีนบนแผ่นคอปเปอร์.....	14
3.5 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดสารอินทรีย์ไอระเหยง่าย.....	18
4.1 ค่า I2D/IG ของกราฟีน และไฮบริด Graphene/PMMA.....	25
4. 2 ค่า IG/ID ของกราฟีน และไฮบริด Graphene/PMMA	25
4.3 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์	27
4.4 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนต่อก๊าซชนิดต่างๆ.....	28
4.5 พารามิเตอร์สภาพผิวและขนาดของไอระเหยก๊าซแต่ละชนิด	29
4.6 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA...32	32
4. 7 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อก๊าซชนิดต่างๆ ...34	34
4. 8 ค่าพารามิเตอร์การละลายของแอนเซนของพอลิเมอร์ PMMA กับไอระเหยก๊าซชนิดต่างๆ	34
4. 9 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC.....37	37
4. 10 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อก๊าซชนิดต่างๆ	39
4. 11 ค่าพารามิเตอร์การละลายของแอนเซนของพอลิเมอร์ EC กับไอระเหยก๊าซชนิดต่างๆ	40
4. 12 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene	42
4. 13 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ	44
4. 14 แสดงค่าพารามิเตอร์การละลายของแอนเซนของพอลิเมอร์ isoprene (Pip) กับไอระเหยชนิดต่างๆ ...45	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4. 15 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ กราฟีนแบบ ยึดหยุ่น.....	48
4. 16 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนต่อก๊าซชนิดต่างๆ	49
4. 17 ค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์Graphene/PMMA	52
4. 18 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อก๊าซชนิดต่างๆ...54	54
4. 19 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC.....57	57
4. 20 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อก๊าซชนิดต่างๆ...58	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2. 1 ภาพการพองตัวของเซนเซอร์ไฮบริดวัสดุคาร์บอนและพอลิเมอร์.....	6
2. 2 ค่าตัวแปรและผลการตอบสนองของเซนเซอร์.....	7
2. 3 Hansen sphere	8
2. 4 ชั่วไฟฟ้าที่ทำจาก (Gr/PMMA) laminate.....	10
3.1 รูปถ่ายของแผ่น SiO ₂ /Si สำหรับโอนย้ายกราฟีน.....	12
3.2 ไดอะแกรมขั้นตอนการโอนย้ายกราฟีนเพื่อประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์กราฟีน และไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA	13
3.3 รูปภาพก๊าซเซนเซอร์ที่พร้อมใช้งาน	13
3.4 แผนผังแสดงระบบทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (a) ระบบวัดก๊าซสำหรับใช้วัดก๊าซ ความเข้มข้นสูง (b) ระบบวัดก๊าซสำหรับใช้วัดก๊าซความเข้มข้นต่ำ.....	14
3.5 รูปแบบกราฟการตอบสนองของประสิทธิภาพอุปกรณ์วัดก๊าซเซนเซอร์ในอุดมคติ.....	18
4.1 ค่า I _{2D} /I _G ของกราฟีน และไฮบริด Graphene/PMMA.....	24
4. 2 ค่า I _G /I _D ของกราฟีน และไฮบริด Graphene/PMMA.....	24
4.3 ค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์.....	26
4.4 ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนต่อก๊าซชนิดต่างๆ	27
4.5 พารามิเตอร์สภาพผิวและขนาดของไอระเหยก๊าซแต่ละชนิด.....	28
4.6 ค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA.....	31
4.7 ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ ...	33
4.8 ค่าพารามิเตอร์การละลายของแอสเซนของพอลิเมอร์ PMMA กับไอระเหยชนิดต่างๆ	33
4.9 ค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC.....	36
4.10 ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ.....	38
4. 11 ค่าพารามิเตอร์การละลายของแอสเซนของพอลิเมอร์ EC กับไอระเหยชนิดต่างๆ.....	41
4. 12 ค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene ...	41
4. 13 ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4. 14 ค่าพารามิเตอร์การละลายของแอสเซนของพอลิเมอร์ isoprene กับไอระเหยชนิดต่างๆ.....	44
4. 15 ค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์กราฟีนแบบยืดหยุ่น	47
4. 16 ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหยชนิดต่างๆ	48
4. 17 ค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA	51
4. 18 ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ	53
4. 19 ค่าความเข้มข้นไอระเหยของไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC.....	56
4. 20 ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ.....	57
4. 21 (a) การปลดปล่อยของเซนเซอร์ graphene/PMMA ในอากาศ (สีดำ) และหลังจากได้รับไอระเหยไดคลอโรมีเทน10 นาที (สีแดง) และ (b) การปลดปล่อยของเซนเซอร์ graphene/EC ในอากาศ (สีดำ) และ หลังจากได้รับไอระเหยคลอโรฟอร์ม10 นาที (สีแดง)	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

1.1.1 ปัญหาการสังเคราะห์กราฟีนและการนำกราฟีนมาใช้ประยุกต์ใช้งาน

วัสดุคาร์บอน เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจสำหรับเป็นวัสดุน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงสูง มีสามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกราฟีน นับเป็นหนึ่งในวัสดุคาร์บอนที่ได้นำสนใจสำหรับเป็นตัวเลือกในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

นับตั้งแต่การค้นพบกราฟีน โดย K. S. Novoselov *et al.* มีการทำการวิจัยมากมายทั้งการวิจัยพื้นฐานเพื่อศึกษาสมบัติของกราฟีน การสังเคราะห์กราฟีน และการนำกราฟีนไปประยุกต์ใช้งาน หนึ่งในเทคนิคการสังเคราะห์กราฟีน คือ เทคนิค Chemical vapor deposition (CVD) โดยเงื่อนไขที่ง่ายที่สุดคือ การสังเคราะห์กราฟีนบนแผ่นทองแดง ทำให้ได้กราฟีนในลักษณะเป็นแผ่น 2 มิติ ขนาดใหญ่ (Large lateral size) และได้กราฟีนที่จุดบกพร่อง (defect) น้อย เมื่อเทียบกับวิธีทางเคมี สามารถควบคุมสมบัติของกราฟีนให้มีความสม่ำเสมอได้ มีเครื่องมืออุปกรณ์ที่สามารถขยายสเกลขนาดใหญ่ได้

แต่อย่างไรก็ตาม กราฟีนที่สังเคราะห์บนแผ่นทองแดงไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้เลย จะต้องมีการย้าย (Transfer) กราฟีนที่อยู่บนแผ่นทองแดงนี้ ไปยังแผ่นรองที่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การย้ายกราฟีนไปบนแผ่นซิลิกอนสำหรับการใช้งานเป็นทรานซิสเตอร์ การย้ายกราฟีนไปบนกระจกนำไฟฟ้าสำหรับการใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การย้ายกราฟีน เป็นขั้นตอนที่ยุ่งยาก โดยปัญหาที่สำคัญคือ การตกค้างของพอลิเมอร์หรือสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการย้ายซึ่งสารตกค้างเหล่านี้ จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์จากกราฟีนด้อยลง หรือทำให้สมบัติของอุปกรณ์นั้นเกิดความไม่สม่ำเสมอและไม่เสถียร

ในปัจจุบัน จึงได้มีการพยายามศึกษาและพัฒนาเทคนิคที่สามารถ Transfer ซึ่งโดยไม่ให้มีสารตกค้าง เช่น การหาวิธีการย้ายโดยไม่ใช้พอลิเมอร์ การหาเทคนิคการกำจัดกราฟีนที่ตกค้างบนกราฟีน แต่ก็ยังไม่มีวิธีที่ทำได้สำเร็จและนำมาใช้งานได้ง่าย

สืบเนื่องจากปัญหาการตกค้างพอลิเมอร์บนกราฟีน จึงควรนำโครงสร้างพอลิเมอร์และกราฟีนนั้น มาศึกษาและหาการประยุกต์ใช้งานอื่นที่เหมาะสม แทนการกำจัดพอลิเมอร์ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.2 ปัญหาการด้านมลพิษทางอากาศ

มลพิษทางอากาศที่ซึ่งเกิดจากการปนเปื้อนในอากาศอันเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้สารเคมีและการเพิ่มขึ้นของการผลิตในภาคอุตสาหกรรมได้ทวีความรุนแรงมากขึ้น ดังจะเห็นจากข่าวตามสื่อต่างๆ ตัวอย่างเช่น ข่าวการรั่วของก๊าซ ณ โรงงานในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ในปลายปี พ.ศ. 2552 นอกจากนี้ จากข้อมูลสถิติปี พ.ศ. 2552 จากกรมควบคุมมลพิษ ยังพบว่าปัญหาด้านมลพิษที่ถูกร้องเรียนมายังกรมควบคุมมลพิษมากที่สุดคือ ปัญหากลิ่นเหม็น คิดเป็นร้อยละ 39.8 ของเรื่องร้องเรียนทั้งหมด โดยการดำเนินการที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษมากที่สุด คือ กิจการเกี่ยวกับปิโตรเลียม ถ่านหิน สารเคมี

ณ ปัจจุบัน ทางกรมควบคุมมลพิษ ได้เห็นความสำคัญของการแก้ไขปัญหามลพิษทางอากาศ มีการเฝ้าติดตามตรวจสอบปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds; VOCs) อย่างใกล้ชิด โดยเฉพาะในเขตกรุงเทพ และพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จากสถิติการควบคุมคุณภาพอากาศของนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ในเดือนมิถุนายน 2558 พบว่า มี VOCs ที่มีค่าความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐานเฉลี่ยรายปี ได้แก่ สาร 1,3- Butadiene, สาร Chloroform, สาร 1,2-Dichloroethane และสาร Benzene

เมื่อระดับความเข้มข้นของโอโรเอเธนหรือก๊าซอยู่ในระดับที่เกินมาตรฐานกำหนด จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของพนักงานและประชาชนที่อยู่อาศัยในละแวกนั้น หรืออาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อการค้าเนกิจการ ซึ่งจะนำไปสู่ความเสียหายทางเศรษฐกิจได้

นอกจากนี้ VOCs ไม่เพียงแต่พบในเขตโรงงานอุตสาหกรรมเท่านั้น บ้านเรือนที่อยู่อาศัยก็เป็นแหล่งกำเนิดของ VOCs เช่นเดียวกัน ปริมาณ VOCs ที่มากเกินไปในที่อยู่อาศัยเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะเจ็บป่วยจากมลภาวะภายในบ้าน (Sick House Syndrome) ได้ แหล่งกำเนิดหลักของ VOCs ในที่อยู่อาศัย คือ ทินเนอร์ ซึ่ง เป็นสารโทลูอีน หรือ ไซลีน เป็นต้น สาเหตุที่ส่วนประกอบหลักของ VOCs ในห้องคือทินเนอร์นั้น เนื่องมาจากในงานตกแต่งพื้นผิวขั้นสุดท้ายของวัสดุก่อสร้าง มีการทาสี การพิมพ์ หรือการใช้กาว ซึ่งส่วนใหญ่มีการใช้ทินเนอร์

ดังนั้น การควบคุมระดับก๊าซพิษจึงเป็นสิ่งสำคัญ ระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศเพื่อเฝ้าระวังควรได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ สามารถตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซได้อย่างถูกต้องแม่นยำ รวดเร็ว และสามารถแจ้งเตือนได้ทันท่วงที เมื่อมีความเข้มข้นของก๊าซถึงระดับที่เป็นอันตราย

1.1.3 การเฝ้าระวังมลพิษทางอากาศ

ในปัจจุบันการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซทำได้หลายวิธี เช่น วิธีโครมาโตกราฟี สเปกโตรกราฟี เป็นต้น แต่วิธีเหล่านี้ จะประกอบด้วยขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างก่อน แล้วจึงไปวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งเทคนิคเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลานาน และต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ วิธีก๊าซเซนเซอร์เคมี ก็ใช้ในระบบเฝ้าระวังมลพิษทางอากาศเช่นเดียวกัน เป็นระบบการตรวจวัดที่แตกต่างจากข้างต้น สามารถตรวจวัดได้ ณ สถานที่จริง แต่ก็ประสบกับปัญหาอีก นั่นคือ ออณหภูมิการทำงานที่สูง (โดยเฉพาะก๊าซเซนเซอร์จากโลหะออกไซด์) ขาดการประสิทธิภาพในการเลือกตรวจวัดชนิดก๊าซ การตอบสนองต่อก๊าซต่ำ (ไม่สามารถตรวจเมื่อก๊าซมีความเข้มข้นต่ำได้)

1.1.4 ก๊าซเซนเซอร์จากวัสดุนาโน

เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ วัสดุนาโนได้รับการพัฒนาให้เป็นเซนเซอร์ชนิดใหม่ เช่น อนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ ท่อนาโนคาร์บอน เป็นต้น แต่ถึงแม้เซนเซอร์จากวัสดุนาโนจะแสดงถึงศักยภาพในการตรวจวัดที่ละเอียด (high sensitivity) สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่ต้องให้ความร้อนสูง แต่สมบัติบางอย่าง เช่น ความสามารถในการเลือกตรวจวัดก๊าซ ก็ยังไม่สามารถระบุได้อย่างแน่ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำไปใช้ในการตรวจวัดก๊าซจริง และเซนเซอร์จากวัสดุนาโนมีการตอบสนองต่อ VOCs ค่อนข้างต่ำ ดังนั้น การศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัด VOCs ความสามารถในการเลือกตรวจวัดก๊าซ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ของก๊าซเซนเซอร์จากวัสดุนาโน เพื่อนำไปใช้งานจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนากราฟีนให้สามารถนำสมบัติดั้งเดิมของกราฟีนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุด
- 2) เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งานที่เป็นไปได้ของกราฟีนในด้านต่างๆ
- 3) เพื่อสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นได้จากวัสดุคอมโพสิตกราฟีนในลามิเนต ที่มีการตอบสนองต่อก๊าซสูง สามารถเลือกตรวจวัดก๊าซ และระบุชนิดก๊าซได้
- 4) เพื่อพัฒนา เสริมสร้าง และสะสมองค์ความรู้ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์จากวัสดุนาโนคาร์บอน เพื่อนำไปพัฒนาอุปกรณ์ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ และประยุกต์ในการใช้งานต่างๆได้
- 5) เพื่อพัฒนาสิ่งประดิษฐ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์จากวัสดุนาโนคาร์บอน และการถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านนี้ไปสู่การใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมและภาคเอกชน
- 6) เพื่อสร้างบุคลากรที่มีความสามารถในการวิจัย และพัฒนาสาขาวัสดุนาโน และนาโนอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเป็นกำลังสำคัญในการพัฒนานาโนเทคโนโลยีภายในประเทศและนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อสังคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาการสังเคราะห์กราฟีนด้วยเทคนิคไอระเหยทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD)
- 2) ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตกราฟีนลามิเนต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้
 - 2.1) ศึกษาการเคลือบพอลิเมอร์บนกราฟีนด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating)
 - 2.2) ศึกษาการกัด Etching คอมโพสิตพอลิเมอร์กราฟีนออกจากแผ่นรองทองแดง
- 3) ศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นที่ประดิษฐ์จากวัสดุคอมโพสิตกราฟีนลามิเนต โดยศึกษาในเรื่อง
 - 3.1) สมบัติในการตรวจวัดก๊าซชนิดต่างๆ
 - 3.2) ประสิทธิภาพในการตรวจเลือกตรวจวัดก๊าซ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

มีการแบ่งการวิจัยออกเป็นทั้งหมด 4 ขั้นตอน

- 1) การสังเคราะห์กราฟีนด้วยเทคนิคการตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition; CVD)
- 2) การสร้าง Freestand graphene-polymer ด้วยการเคลือบพอลิเมอร์บนกราฟีนด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) และการกัด (Etching) คอมโพสิตพอลิเมอร์กราฟีนออกจากแผ่นรองทองแดง
- 3) การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นจากวัสดุคอมโพสิตกราฟีนลามิเนต
- 4) การทดสอบประสิทธิภาพก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นจากวัสดุคอมโพสิตกราฟีนลามิเนต

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ด้านวิชาการ

- 1) ได้องค์ความรู้เรื่องการสังเคราะห์กราฟีนและการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตกราฟีนลามิเนต
- 2) ได้องค์ความรู้การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นได้จากวัสดุคอมโพสิตกราฟีนลามิเนต
- 3) การเสนอผลงานวิจัยในที่ประชุมระดับนานาชาติ 1 ผลงาน
- 4) ผลงานตีพิมพ์ 1 ฉบับ ในวารสารที่มีฐานข้อมูลใน Scopus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านนโยบาย

- 1) สนับสนุนยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติในกลยุทธ์พัฒนานวัตกรรมและองค์ความรู้ใหม่ทางวิทยาศาสตร์
- 2) สนับสนุนนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติในการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับนวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์และองค์ความรู้ใหม่ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- 3) สนับสนุนนโยบาย/เป้าหมายของรัฐบาลด้านการพัฒนาและส่งเสริมการใช้ประโยชน์ จากวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี การวิจัยและพัฒนา และนวัตกรรม

ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์ อุตสาหกรรม

- 1) ภาคอุตสาหกรรมผลิตก๊าซเซเนสเซอร์, กรมควบคุมมลพิษ โรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเสี่ยงในการปล่อยก๊าซพิษ องค์กรที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของอาคารที่อยู่อาศัย โดยสามารถนำเทคโนโลยีตั้งแต่การประดิษฐ์หัววัดก๊าซเซเนสเซอร์ และเทคโนโลยีการวัดและวิเคราะห์การตรวจวัดก๊าซไปประยุกต์ใช้เพื่อเฝ้าระวังมลพิษอากาศ

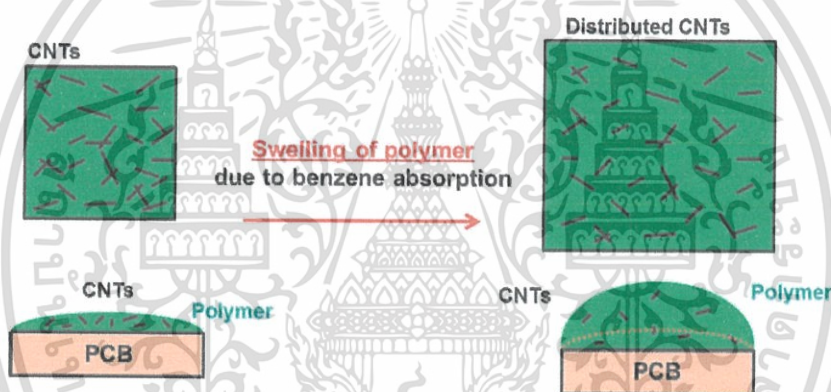


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วัสดุคอมโพสิตกราฟีนลามิเนต จะสามารถตอบสนองสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ โดยมีสมมติฐานของกลไกการตอบสนอง คือ “การพองตัวของพอลิเมอร์เมื่อสัมผัสกับตัวทำละลายอินทรีย์” เมื่อพอลิเมอร์อยู่ในบรรยากาศของตัวทำละลายอินทรีย์จะเกิดการพองตัว ทำให้มีปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ในกรณีของวัสดุคอมโพสิตกราฟีนลามิเนต ซึ่งกราฟีนมีการยึดติดที่แน่นกับพอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์พองตัว จะทำให้กราฟีนยืดออกได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า และความจุไฟฟ้า ตัวในภาพที่ 2. 1 เป็นภาพกรณีของท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์อยู่ภายใต้ไอ VOCs



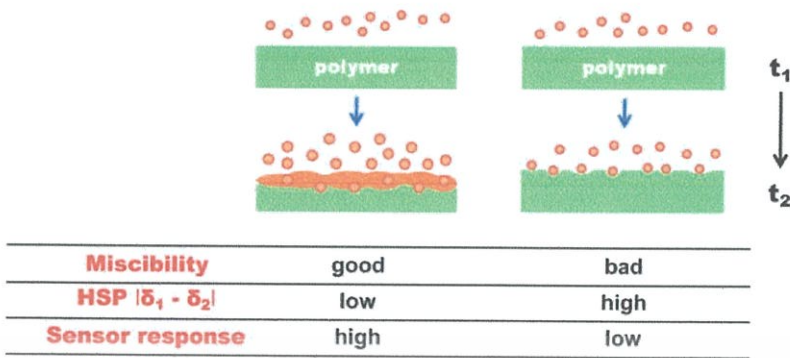
ภาพที่ 2. 1 ภาพการพองตัวของเซนเซอร์ไฮบริดวัสดุนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์

โดยปัจจัยที่จะพิจารณาว่าพอลิเมอร์จะสามารถพองตัวได้ดีหรือไม่ คาดว่าจะมี 2 พารามิเตอร์ได้แก่

1. พารามิเตอร์การละลายของ Hildebrand Solubility Parameter (HSP)

เป็นพารามิเตอร์สำหรับการทำนายการเข้ากันได้ระหว่างมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ กับ VOCs โดยพิจารณาจากค่าความแตกต่างของ solubility parameter (δ) ($\delta_1 - \delta_2$) หากค่าความแตกต่างน้อย แสดงว่าพอลิเมอร์และ VOCs สามารถละลายเข้าได้ดี พอลิเมอร์สามารถพองตัวได้มาก ค่าการตอบสนองน่าจะมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2. 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 ค่าตัวแปรและผลการตอบสนองของเซนเซอร์

2. พารามิเตอร์การละลายของเฮนเซน (Hansen solubility parameter, HSP)

เป็นหลักการที่ใช้ในการทำนายความสามารถของการละลายเข้ากันระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลาย โดยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์การละลายของ Hansen ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปร 3 ชนิด ได้แก่ แรงแพร่กระจาย (dispersion force; δ_d) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (intermolecular force; δ_p) และ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond; δ_h) โดยตัวที่ถูกทำละลายจะละลายเข้ากันได้ดีในตัวทำละลาย จะต้องมีความเป็นขั้วใกล้เคียงกับความเป็นขั้วของตัวทำละลาย สภาพการละลายเข้ากันได้ระหว่างตัวทำละลาย และตัวถูกละลายคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 โดยการพิจารณาค่าจากค่า Relative energy distance, RED แบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

- (1) กรณีค่า $RED < 1$ มีความหมายว่าตัวทำละลายและตัวถูกละลายสามารถที่จะละลายเข้ากันได้เป็นอย่างดี
- (2) กรณีค่า $RED = 1$ มีความหมายว่า ตัวทำละลายและตัวถูกละลายสามารถที่จะละลายเข้ากันได้เพียงบางส่วน
- (3) กรณีค่า $RED > 1$ มีความหมายว่า ตัวทำละลายและตัวถูกละลายไม่สามารถละลายเข้ากันได้เลย

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

R_a คือ พารามิเตอร์การละลายของเฮนเซนของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

δ_d คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงแพร่กระจายของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย

δ_p คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย

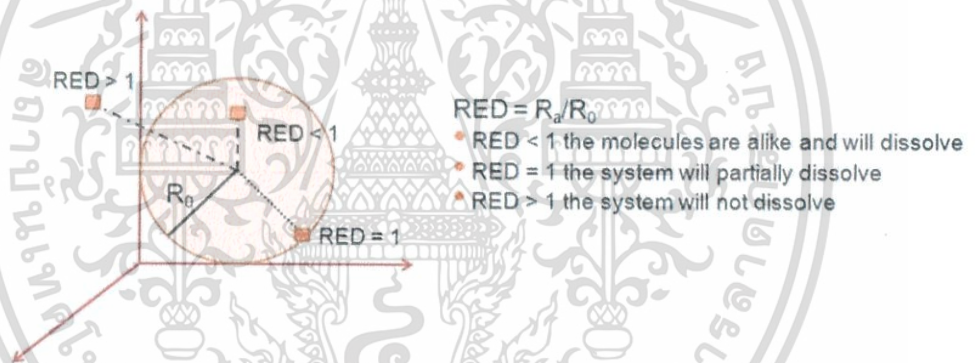
δ_h คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของพันธะไฮโดรเจนของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย

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

RED คือ ระยะทางพลังงานสัมพัทธ์ (Relative energy distance)

R_0 คือ รัศมีอันตรกิริยา (Interaction radius) ของพอลิเมอร์

จากภาพที่ 2. 3 แผนภาพแสดงลักษณะของทรงกลม Hansen (Hansen sphere) ทั้ง 3 กรณี



ภาพที่ 2. 3 Hansen sphere

หากค่า RED มีค่า RED < 1 แสดงว่าพอลิเมอร์และ VOCs สามารถละลายเข้ากันได้ดี พอลิเมอร์สามารถพองตัวได้มาก การตอบสนองน่าจะเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การสังเคราะห์กราฟีนและการย้ายกราฟีน

วัสดุคาร์บอน เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจสำหรับเป็นวัสดุน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงสูง สามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกราฟีน นับเป็นหนึ่งในวัสดุคาร์บอนที่น่าสนใจสำหรับเป็นตัวเลือกในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

นับตั้งแต่การค้นพบกราฟีน โดย K. S Novoselov et al. [1] มีการทำการวิจัยมากมายทั้งการวิจัยพื้นฐานเพื่อศึกษาสมบัติของกราฟีน การสังเคราะห์กราฟีน และการนำกราฟีนไปประยุกต์ใช้งาน

สำหรับการสังเคราะห์กราฟีน มีหลายวิธี โดยมีวิธีหลักๆ ได้แก่

1. Mechanical exfoliation [1]
2. Chemical exfoliation [2]
3. Chemical vapor deposition [3]

โดยเทคนิค Chemical vapor deposition (CVD) เป็นการสังเคราะห์กราฟีนบนแผ่นทองแดง มีข้อดีกว่าเทคนิคอื่นๆ คือ ได้กราฟีนในลักษณะเป็นแผ่น 2 มิติ ขนาดใหญ่ (Large lateral size) และได้กราฟีนที่จุดบกพร่อง (defect) น้อย เมื่อเทียบกับวิธีทางเคมี สามารถควบคุมสมบัติของกราฟีนให้มีความสม่ำเสมอได้ มีเครื่องมืออุปกรณ์ที่สามารถขยายสเกลขนาดใหญ่ได้

แต่อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถนำกราฟีนที่สังเคราะห์บนแผ่นทองแดงไปประยุกต์ใช้งานได้เลย จะต้องมีการย้ายกราฟีน (Transfer) กราฟีนที่อยู่บนแผ่นทองแดงนี้ ไปยังแผ่นรองที่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การย้ายกราฟีนไปบนแผ่นซิลิกอนสำหรับการใช้งานเป็นทรานซิสเตอร์ การย้ายกราฟีนไปบนกระจกนำไฟฟ้าสำหรับการใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง เป็นต้น

การย้ายกราฟีน (Transfer) โดยทั่วไปมีขั้นตอนโดยสังเขปดังต่อไปนี้ [3,4]

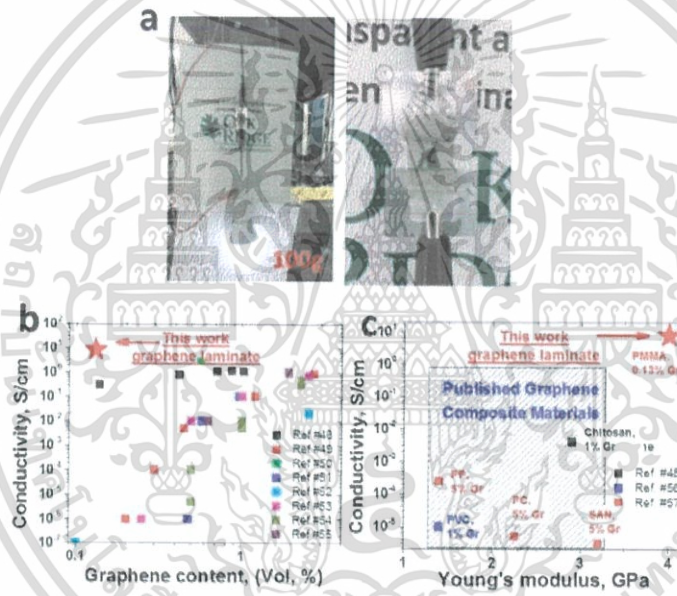
- (1) การเคลือบพอลิเมอร์บนชั้นกราฟีนเพื่อป้องกันชั้นกราฟีนระหว่างกระบวนการ Transfer
- (2) การกัดชั้นกราฟีนออกจากพอลิเมอร์ทองแดง เหลือแต่ชั้น polymer/graphene
- (3) การ Transfer polymer/graphene ลงบนฐานรองที่ต้องการใช้งาน
- (4) การกำจัด polymer ออก

ทั้งนี้ปัญหาสำคัญของ Graphene transfer คือ การกำจัดชั้น Polymer ออก ซึ่ง Polymer ที่ใช้ส่วนใหญ่คือ PMMA โดยพบว่า การกำจัด PMMA ออกหมด 100 เปอร์เซ็นต์นั้น ทำได้ยาก มักมี PMMA เหลือตกค้างอยู่บนกราฟีน ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของกราฟีนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบัน จึงได้มีการพยายามศึกษาและพัฒนาเทคนิคที่สามารถ Transfer ซึ่งโดยไม่มีสารตกค้าง เช่น การหาวิธีการ Transfer โดยไม่ใช้พอลิเมอร์ [5] การหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในระบบการ Transfer [6,7] เทคนิคการกำจัดกราฟีนที่ตกค้างบนกราฟีน แต่ก็ยังไม่มีวิธีที่ทำสำเร็จและนำมาใช้งานได้ง่าย

สืบเนื่องจากปัญหาการตกค้างพอลิเมอร์บนกราฟีน จึงมีการนำโครงสร้างพอลิเมอร์และกราฟีนนั้น มาศึกษาและหาการประยุกต์ใช้งานอื่นที่เหมาะสม แทนการกำจัดพอลิเมอร์ออก ตัวอย่างเช่น การนำ Graphene-Based Composite Fibers and Laminates มาใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีความแข็งแรงและนำไฟฟ้าได้ดี โดย I. Vlassiuk *et al.* [8] ภาพที่ 2. 4 แสดงภาพของขั้วไฟฟ้าที่ทำจาก (Gr/PMMA) laminates ที่สามารถแขวนหลอดไฟ LED ขนาด 100 g ได้ โดยมีค่า specific strength of > 10 GPa และค่า stiffness of 1 TPa และมีค่าความนำไฟฟ้า 5×10^3 S/cm



ภาพที่ 2. 4 ขั้วไฟฟ้าที่ทำจาก (Gr/PMMA) laminate

2.2.2 เทคโนโลยีก๊าซเซนเซอร์กราฟีน

มีงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการใช้งานเป็นเซนเซอร์ทางเคมีของกราฟีน โดยกราฟีนที่ใช้ในการศึกษามีหลายรูปแบบ เช่น กราฟีนจากการลอกออกจากกราฟไฟต์ (mechanical exfoliation graphene) [9] กราฟีนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD [10] กราฟีนโฟม [11] หรือจาก Reduced graphene oxide [12] โดยศึกษาการตอบสนองของกราฟีนต่อก๊าซพิษ เช่น แอมโมเนีย ไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นต้น โดยพบว่ากราฟีนสามารถตอบสนองต่อสารกระตุ้นได้ดี เช่น กราฟีนจาก CVD สามารถตอบสนองต่อ NO₂ ได้ในระดับ sub-parts-per-million (0.1 ppm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับก๊าซเซนเซอร์กราฟีนสำหรับตรวจวัด VOCs นั้น จะเป็นการใช้คอมโพสิตของกราฟีน ดังแสดงในตารางที่ 2. 1 คอมโพสิตกราฟีนและการตรวจวัด VOCs

ตารางที่ 2. 1 คอมโพสิตกราฟีนและการตรวจวัด VOCs

Materials	VOCs	REF.
ZnO/graphene composite	Formaldehyde	13
PEDOT-PSS/graphene	Methanol (35 ppm)	14
SnO ₂ /Graphene	Propanal	15
PDA/Graphene	tetrahydrofuran (THF), chloroform (CHCl ₃), methanol (CH ₃ OH), and dimethylformamide (DMF)	16
Graphene on polymer optical fiber	Acetone	17
CNT/Graphene	methanol, chloroform, tetrahydrofuran (THF), and benzene	18
Ag nanoparticles/Graphene	Methanol	19

จากตารางข้างต้น จะเห็นว่ากรนำกราฟีนไปตรวจสอบ VOCs นั้น กราฟีนจะถูกเตรียมในรูปแบบวัสดุคอมโพสิตก่อน ซึ่งวัสดุคอมโพสิตกราฟีนลามิเนต ที่ทางผู้วิจัยได้เสนอ ซึ่งเป็นวิธีที่เตรียมได้ง่าย ไม่มีวิธีการทางเคมีที่ซับซ้อน จะช่วยให้ได้ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัด VOCs ที่มีประสิทธิภาพสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การโอนย้ายกราฟีน

การโอนย้ายกราฟีนที่ถูกปลูกบนแผ่นทองแดงมายังแผ่นใช้งาน ได้แก่ แผ่นซิลิกอนที่เคลือบด้วยชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2/Si) และแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate: PET) สามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นใช้งาน

3.1.1.1 การเตรียมแผ่น SiO_2/Si

ในตารางที่ 3. 1 ลักษณะของแผ่น SiO_2/Si แสดงลักษณะของแผ่น SiO_2/Si ที่

ใช้ในงานวิจัยนี้

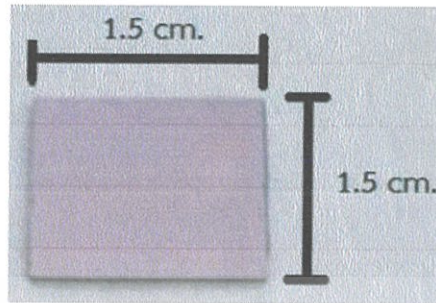
ตารางที่ 3. 1 ลักษณะของแผ่น SiO_2/Si

Thickness of SiO_2 layer	: 625 ± 25 μm
Type	: P-doped
Orientation	: 1-0-0

การเตรียมแผ่น SiO_2/Si มีทั้งหมด 6 ขั้นตอนต่อไปนี้

1. ตัดแผ่น SiO_2/Si ให้มีขนาด 1.5×1.5 ตารางเซนติเมตร ดัง
2. ภาพที่ 3. 1 รูปถ่ายของแผ่น SiO_2/Si สำหรับโอนย้ายกราฟีน
3. นำแผ่น SiO_2/Si ไปทำความสะอาดพื้นผิวด้วยอะซิโตน (Acetone) โดยใช้เครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ
4. แช่ด้วยไอโซโพรพานอล (Isopropanol: IPA) ด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ เป็นเวลา 10 นาที
5. แช่ด้วยน้ำกลั่นไร้ไอออน (DI water) ด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ เป็นเวลา 10 นาที
6. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
7. ทรีตเมนต์ผิวแผ่น SiO_2/Si ด้วยวิธีออกซิเจนพลาสมา ตามเงื่อนไขการทำออกซิเจนพลาสมา ดังตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทำออกซิเจนพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 รูปถ่ายของแผ่น SiO_2/Si สำหรับไอออนย้ายกราฟีน

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทำออกซิเจนพลาสมา

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

3.1.1.2 การเตรียมแผ่น PET

ในตารางที่ 3.3 แสดงลักษณะของแผ่น PET ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3.3 ลักษณะของแผ่น PET

Thickness of PET layer	: 500 μm
Type	: PP2900

ขั้นตอนการเตรียมแผ่น PET มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำแผ่น PET มาตัดให้ได้ขนาด 1.5 X 1 ตารางเซนติเมตร
2. นำไปทำความสะอาดพื้นผิวโดยการล้างด้วยเอทานอล (Ethanol) ด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ
3. ล้างด้วยน้ำกลั่นไร้ไอออน (DI water) ด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ เป็นเวลา 15 นาที
4. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทรีตเมนต์พื้นผิวแผ่น PET ด้วยวิธีออกซิเจนพลาสมา ตามเงื่อนไขการทำออกซิเจนพลาสมา ดังตารางที่ 3.2

3.1.2 ขั้นตอนการโอนย้ายกราฟีน

กราฟีนถูกปลูกด้วยเทคนิคการตกสะสมไอทางเคมี (Chemical vapor deposition; CVD) บนแผ่นทองแดง นำกราฟีนที่ได้รับมาตัดให้ได้ขนาด 7 X 7 ตารางมิลลิเมตร แล้วนำไปทำการโอนย้ายตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เคลือบสารละลาย PMMA ด้วยวิธีเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงลงบนกราฟีน ด้วยเงื่อนไข สเตปที่ 1 ใช้ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที (rounds per minute: rpm) เป็นเวลา 5 วินาที และสเตปที่ 2 ความเร็วรอบ 6000 rpm เป็นเวลา 5 นาที และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำแผ่นกราฟีนที่เคลือบด้วย PMMA แล้วไปทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา เพื่อกัด กราฟีน อีกด้านหนึ่งที่ไม่ได้เคลือบ PMMA ออก ในตารางที่ 3.4 แสดงเงื่อนไขของออกซิเจนพลาสมา

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขของออกซิเจนพลาสมาสำหรับกัดกราฟีนบนแผ่นคอปเปอร์

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

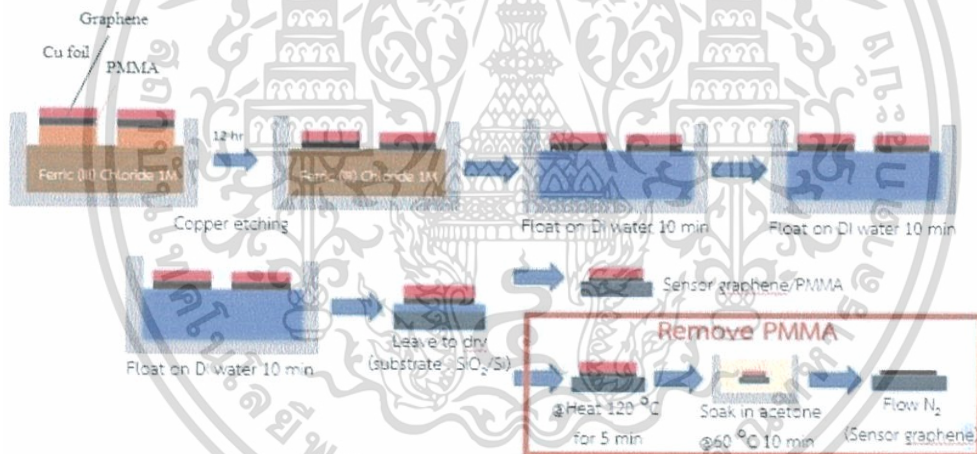
3. นำแผ่นทองแดงที่มีชั้นกราฟีนและ PMMA เคลือบอยู่จากข้อที่ 2 ไปแช่ในสารละลายเหล็กคลอไรด์ (Ferric (III) chloride) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยให้ด้านที่เป็นคอปเปอร์สัมผัสกับสารละลาย แช่เป็นเวลาอย่างต่ำ 1 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.2
4. ใช้แผ่นใช้งานดังข้อ 3.1.1 เช่น SiO₂/Si ซ้อนแผ่นกราฟีนขึ้นจากสารละลายกัดคอปเปอร์ไปแช่ในน้ำกลั่นไร้ไอออน เป็นเวลา 10 นาที เป็นจำนวน 3 ครั้ง
5. ซ้อนแผ่นกราฟีนขึ้นจากน้ำกลั่นไร้ไอออนด้วยแผ่นที่จะนำไปใช้งานต่อไป ปล่อยให้วางแห้งเป็นเวลา 1 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำกราฟีนบนแผ่นชิ้นงานในข้อ 5 ไปแช่อะซิโตนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำการกำจัดชั้นพอลิเมอร์ PMMA บนกราฟีนให้หลุดออกไป
7. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
8. นำกราฟีนที่ปราศจากพอลิเมอร์ PMMA ไปเคลือบสารละลายโพลีไอโซพรีน (polyisoprene: Plp) ด้วยวิธีเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 6000 rpm เป็นเวลา 5 นาที และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ในกรณีที่ เป็นไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA จะเตรียมถึงขั้นตอนที่ 5 และในกรณีที่ เป็นกราฟีน จะเตรียมถึงขั้นตอนที่ 7

ในกรณีที่ ต้องการทำไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ พอลิเมอร์เอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose: EC) จะมีขั้นตอนเหมือนกันกับการเตรียมไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA เพียงเปลี่ยนพอลิเมอร์ PMMA เป็นเอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose: EC) และไอโซพรีน



ภาพที่ 3.2 ไตอะแกรมขั้นตอนการโอนย้ายกราฟีนเพื่อประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์กราฟีน และไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA

3.2 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์

การวิเคราะห์โครงสร้าง สัณฐานวิทยา และสมบัติของกราฟีนสามารถตรวจสอบได้เมื่อกาฟีนถูกโอนย้ายจากจากแผ่นทองแดงมายังบนแผ่น SiO_2/Si เนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างและ สัณฐานวิทยาด้วยเครื่องมือบางชนิดไม่สามารถวิเคราะห์ได้เมื่อกาฟีนอยู่บนแผ่น PET เช่นการดูโครงสร้างสัณฐานวิทยาของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพื่อเป็นการยืนยันว่าสามารถโอนย้ายกราฟีนมาได้จริง จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือตรวจสอบที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ดังนี้

3.2.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

นำตัวอย่างที่ได้จากการโอนย้ายมายังแผ่นใช้งาน เช่น SiO_2/Si มาทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นด้วยเครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ (Multimeter)

3.2.2 การตรวจสอบพันธะทางเคมีของวัสดุ

นำตัวอย่างมาตรวจสอบพันธะของคาร์บอนด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี โดยเครื่องรามานสเปกโตรสโกปีที่ใช้คือ เครื่อง DXR™ Smart Raman spectrometer, Thermo Scientific ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ใช้คือ 532 นาโนเมตร

3.2.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิว

ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและความหนาของ กราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยการตรวจสอบกราฟีนบนแผ่น SiO_2/Si ด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสงนั้น เป็นการวิเคราะห์ที่ง่ายที่สุด โดยสังเกตจากความแตกต่างของคอนทราสต์บนแผ่น SiO_2/Si ซึ่งเกิดการหักเหของแสงที่ต่างกันระหว่างกราฟีนและแผ่น SiO_2/Si นอกจากนี้การตรวจสอบกราฟีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำให้ทราบความหนาของแผ่นกราฟีนที่เตรียมได้ โดยในงานวิจัยกล้องจุลทรรศน์ทางแสงที่ใช้คือ OLYMPUS EX51 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้คือรุ่น JEOL JSM-7800F และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่ใช้คือรุ่น Spi - spa400

3.3 การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์

ในงานวิจัยนี้ มีขั้นตอนในการเตรียมการเพื่อการประดิษฐ์อุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์และขั้นตอนการตรวจสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

3.3.1 การเตรียมอุปกรณ์วัดก๊าซเซนเซอร์ด้วยวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์

การเตรียมอุปกรณ์วัดก๊าซเซนเซอร์ นำกราฟีนที่โอนย้ายบนแผ่นใช้งานได้แก่ SiO_2/Si และ PET แล้วมาต่อขั้วไฟฟ้า ดังภาพที่ 3. 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อขั้วไฟฟ้าบนแผ่น SiO_2/Si มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำแผ่น SiO_2/Si ที่มีการถ่ายโอนแผ่นกราฟีนเรียบร้อยแล้ว มาตากาวบริเวณด้านหลังแผ่น SiO_2/Si แล้วนำไปติดบนแผ่น PCB ที่ออกแบบไว้ใช้เป็นฐาน
2. อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
3. ทากาวเงินบริเวณขอบกราฟีนเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วประมาณ 5 มิลลิเมตร
4. นำขาคั่วด้านทานมาตัดเป็นขั้วต่อ แล้วนำไปติดระหว่างขั้วกาวเงินและขั้วบนแผ่น PCB
5. อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

ในกรณีต่อขั้วไฟฟ้าบนแผ่น PET นำแผ่น PET ที่มีแผ่นกราฟีนเรียบร้อยแล้ว มาตากาวเงินบริเวณขอบ กราฟีนเพื่อทำเป็นขั้วทั้งสองข้าง โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วประมาณ 3 มิลลิเมตร และนำขาคั่วด้านทานมาต่อเป็นขั้ว จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 45 นาที

ภาพที่ 3. 3 รูปภาพก๊าซเซนเซอร์ที่พร้อมใช้งาน

3.3.2 การวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ต่อสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยมีระบบวัดก๊าซทั้งหมด 2 ระบบ ได้แก่ ระบบวัดก๊าซแบบที่ใช้การนำพาไอระเหยของก๊าซตรวจสอบเข้าสู่ระบบ ดังภาพที่ 3. 4(a) เป็นระบบวัดที่สามารถวัดได้ที่ความเข้มข้นสูง และแบบระบบวัดก๊าซที่ใช้การฉีดสารละลายตรวจสอบเข้าสู่ระบบ ดังภาพที่ 3. 4(b) ซึ่งเป็นระบบวัดที่สามารถวัดได้ที่ความเข้มข้นต่ำ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดสารอินทรีย์ไอระเหยง่าย แสดงใน

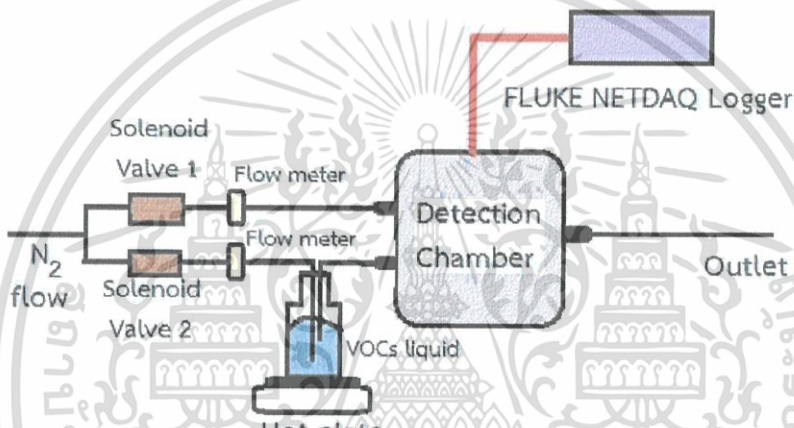
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดสารอินทรีย์ไอระเหยง่าย

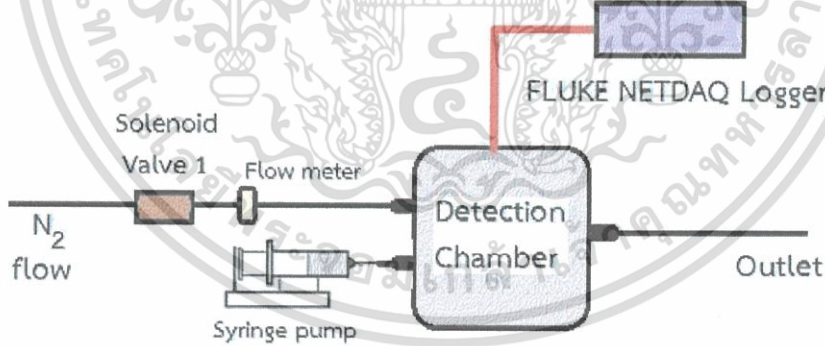
เงื่อนไข	รายละเอียด
ไอระเหย	: อะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน
ความเข้มข้น	: 5 ppt* – 500 ppt
อุณหภูมิในระบบวัด	: อุณหภูมิห้อง

*ppt: parts per thousand

(a)



(b)



ภาพที่ 3. 4 แผนผังแสดงระบบทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (a) ระบบวัดก๊าซสำหรับใช้วัดก๊าซความเข้มข้นสูง (b) ระบบวัดก๊าซสำหรับใช้วัดก๊าซความเข้มข้นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยรูปแบบการวัดก๊าซของระบบวัดนั้นใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซอ้างอิง แล้วใช้ไอระเหยของอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไคคลอโรมีเทน และเบนซีนเป็นไอระเหยตรวจสอบ โดยมีรูปแบบการวัดก๊าซ ดังภาพที่ 3. 5 โดยมีขั้นตอนการวัด 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ให้ก๊าซไนโตรเจนเข้าระบบเพื่อเป็นก๊าซอ้างอิง โดยให้อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
2. สำหรับระบบวัดก๊าซความเข้มข้นสูง (ภาพที่ 3. 4(a)) ทำการให้ไอระเหยอะซีโตนไหลเข้าไปในระบบวัด โดยให้อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที ส่วนสำหรับระบบวัดก๊าซสำหรับใช้วัดก๊าซความเข้มข้นต่ำ (ภาพที่ 3. 4(b)) จะทำการฉีดสารละลายอะซีโตนเข้าสู่ระบบด้วยความเข้มข้น 500-2000 ppm ทิ้งไว้ 5 นาทีเพื่อให้สารละลายระเหยเป็นไอระเหยทั้งหมด
3. ปล่อก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในระบบเป็น เวลา 30 นาทีสำหรับระบบวัดก๊าซความเข้มข้นสูง และ 10 นาที สำหรับระบบวัดก๊าซความเข้มข้นต่ำ เพื่อทำการไล่อิมัลชันตรวจสอบที่ติดอยู่ที่อุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์ออก พร้อมทั้งศึกษาเวลาการคืนตัว (Recovery time) ของก๊าซเซนเซอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้งานใหม่
4. ค่าการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าที่เกิดจากการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตน ถูกบันทึกด้วยเครื่อง 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 คือค่าความต้านทานเริ่มต้นของก๊าซเซนเซอร์

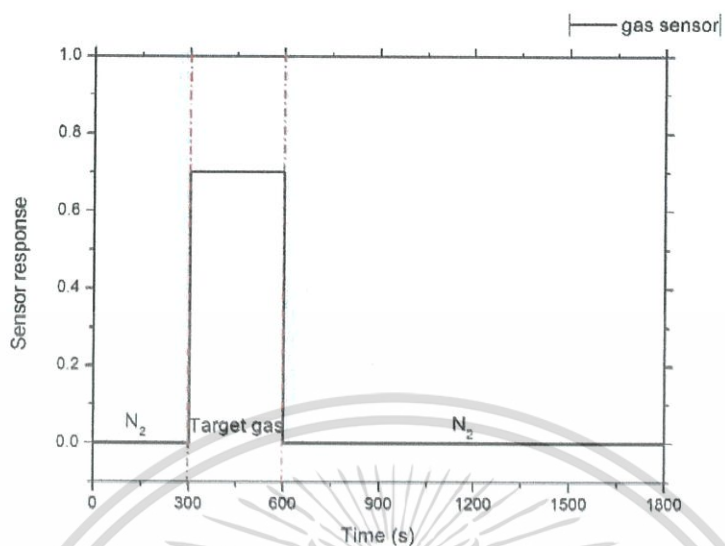
R คือค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์ภายใต้บรรยากาศไอระเหยของ VOCs

5. การคำนวณค่าการตอบสนองนอร์มัลไลซ์ (Normalized sensor response) โดยการนำค่าจากอัตราส่วนระหว่างค่า Sensor response ที่วินาทีที่ 1800 (SR_{1800}) กับค่าความเข้มข้นของไอระเหยของ VOCs (N) ที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละครั้งดังสมการ (4) เพื่อทำการเปรียบเทียบการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์

$$\text{Normalized sensor response} = \frac{SR_{1800}}{N} \quad (4)$$

6. ทำการทดลองวัดก๊าซเซนเซอร์ โดยทำการเปลี่ยนไอระเหยอะซีโตน เป็นคลอโรฟอร์ม ไคคลอโรมีเทน และเบนซีน ตามขั้นตอนข้อที่ 1-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 รูปแบบกราฟการตอบสนองของประสิทธิภาพอุปกรณ์วัดก๊าซเซนเซอร์ในอุดมคติ

ในการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั้น จะศึกษาในหัวข้อต่อไปนี้

1. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายระหว่างกราฟีนและไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์แต่ละชนิด
2. ศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการอ้อมตัวต่อไอระเหยตรวจสอบแต่ละชนิด และเวลาในการคืนสภาพของก๊าซเซนเซอร์กราฟีน และก๊าซเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์แต่ละชนิด
3. ศึกษาขีดจำกัดความสามารถในการตอบสนองต่อไอระเหยตรวจสอบแต่ละชนิด ของก๊าซเซนเซอร์กราฟีน และก๊าซเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์แต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

4.1 วัสดุกราฟีน วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ EC และวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ isoprene ที่ถูกโอนย้ายลงบนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

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



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

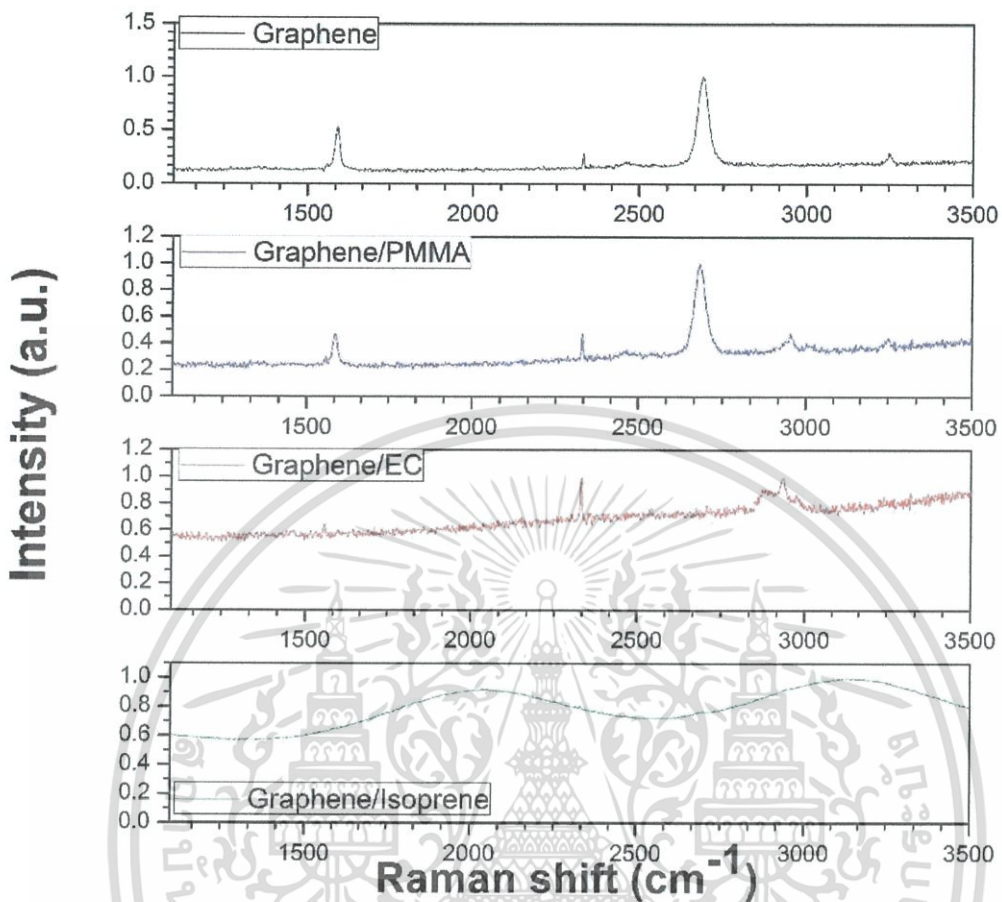
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพพบว่าไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ Graphene/PMMA Graphene/EC และ Graphene/isoprene ที่โอนย้ายลงบน SiO_2/Si นั้น จะมีสีที่แตกต่างกันตามชนิดของพอลิเมอร์นั้นๆ เช่น Graphene/PMMA มีลักษณะเป็นริ้วสีฟ้าเขียวคาดว่าเป็นสีของ PMMA (ภาพที่ 4.1(a)) Graphene/EC มีลักษณะเป็นริ้วสีใสมันตาลอยอย่างชัดเจนคาดว่าเป็นสีของ EC (ภาพที่ 4.1 (b)) และ Graphene/isoprene ที่มีลักษณะเป็นสีขาวซึ่งคาดว่าเป็นสีของ Plp (ภาพที่ 4.1 (c)) นอกจากนี้ริ้วที่เกิดขึ้นบนพอลิเมอร์คาดว่าเกิดจากวิธีการเคลือบพอลิเมอร์แบบหมุนเหวี่ยง ทำให้แผ่นทองแดงไม่สามารถแนบสนิทกับฐานรองเนื่องจากแผ่นทองแดงบางมากและมีน้ำหนักเบา ทำให้ไม่สามารถเคลือบพอลิเมอร์ลงบนแผ่นกราฟีนได้อย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจะพบว่าพอลิเมอร์ EC มีรอยริ้วมากที่สุดตามด้วยพอลิเมอร์ PMMA และ isoprene ตามลำดับ คาดว่าเกิดจากสารละลายพอลิเมอร์มีความหนืดที่ไม่เท่ากัน และความคลาดเคลื่อนในการยึดติดฐานรองของเครื่องกับแผ่นทองแดง และพบว่ากราฟีนบนแผ่น SiO_2/Si ที่ทำการล้างพอลิเมอร์ออกแล้วนั้น มีสีเป็นสีน้ำเงินอมม่วง (ภาพที่ 4.1 (d)) ในขณะที่แผ่น SiO_2/Si มีสีม่วง ทำให้สามารถสังเกตกราฟีนได้ง่ายโดยการใช้เพียงกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เนื่องจากความแตกต่างของสีนี้เกิดจากสมบัติการแทรกสอดของแสงระหว่างกราฟีนกับชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ และชั้นซิลิกอนไดออกไซด์กับซิลิกอนในกรณีของกราฟีน และการแทรกสอดของแสงระหว่างอากาศกับชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ และชั้นซิลิกอนไดออกไซด์กับซิลิกอนในกรณีของแผ่น SiO_2/Si เปล่า นอกจากนี้พบว่าผิวของกราฟีนมีรอยแตกและจุดบกพร่อง (Defect) บางจุดเมื่อส่องกล้องด้วยกำลังขยายสูง คาดว่าเกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD ที่มีข้อจำกัดในเรื่องขนาดเกรนของกราฟีน หรืออาจเกิดจากการฉีกขาดระหว่างการล้างพอลิเมอร์ออก เนื่องจากเกิดจากแรงปฏิกิริยาระหว่างกราฟีนและ PMMA (ภาพที่ 4.1 (d)) นอกจากนี้ยังพบตำแหน่งสีฟ้าเขียวที่เป็นสีของพอลิเมอร์ PMMA บางจุดบนกราฟีน แสดงให้เห็นว่าการล้างพอลิเมอร์ PMMA ไม่สามารถล้าง PMMA ออกได้ทั้งหมด ซึ่งถือเป็นข้อเสียของวิธี Wet transfer

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี

ภาพที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีของวัสดุกราฟีน วัสดุไฮบริด Graphene/PMMA วัสดุไฮบริด graphene/EC และวัสดุไฮบริด graphene/isoprene บนแผ่น SiO_2/Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 กราฟรามานสเปกตรัมของกราฟีน ไฮบริด Graphene/PMMA ไฮบริด Graphene/EC และไฮบริด Graphene/isoprene ที่ถูกโอนย้ายลงบน SiO_2/Si

จากกราฟพบว่า รามานสเปกตรัมของ Graphene/PMMA พบพีคหลัก 4 ตำแหน่งได้แก่ 1350 cm^{-1} ซึ่งตรงกับตำแหน่งของ D band ที่แสดงถึงความบกพร่องของแกรไฟต์และคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบเจือปนอยู่, 1580 cm^{-1} ตรงกับตำแหน่งของ G band แสดงถึงความสมบูรณ์แบบของแกรไฟต์, 2680 cm^{-1} ตรงกับตำแหน่งของ 2D band แสดงถึงคุณภาพของกราฟีน และ 2940 cm^{-1} แสดงถึงตำแหน่งของ PMMA ตามลำดับ ซึ่งผลของความสูงและลักษณะของพีค ตำแหน่ง 2D band สามารถอธิบายถึงจำนวนชั้นของกราฟีนได้ จากการวิเคราะห์ผลแสดงให้เห็นว่าการโอนย้าย Graphene/PMMA สามารถโอนย้ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนรามานสเปกตรัมของกราฟีนพบพีคหลัก 3 ตำแหน่งคือ คือ 1350 cm^{-1} ตำแหน่งของ D band, 1580 cm^{-1} ตำแหน่งของ G band, และ 2680 cm^{-1} ตำแหน่งของ 2D band โดยไม่ปรากฏพีคของ PMMA แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการล้าง PMMA สามารถล้างออกได้สำเร็จ ในส่วนของผลรามานสเปกตรัมของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Graphene/EC พบพีคหลัก 3 ตำแหน่ง โดยพีคทั้งสามตำแหน่งแสดงถึงลักษณะของพอลิเมอร์ EC ได้แก่ 2871, 2937 และ 2975 cm^{-1} โดยไม่ปรากฏพีคตำแหน่งของ D, G และ 2D band ที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นกราฟีนอย่างในผลรามานสเปกตรัมของ Graphene/PMMA ซึ่งสามารถเกิดได้จากหลายปัจจัยได้แก่ ชั้นของพอลิเมอร์มีความหนาแน่นมากจนทำให้พีคสเปกตรัมของกราฟีนไม่แสดงผล หรือเกิดจากบริเวณที่ทำการวิเคราะห์กราฟีนอาจมีการหลุดออกจากชั้นตอน etching แผ่นทองแดงจากขั้นตอนการถ่ายโอนกราฟีน และจากผลรามานสเปกตรัมของ graphene/isoprene พบว่ากราฟที่เกิดขึ้นมีลักษณะโค้งไม่มีพีคหลักเกิดขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากในวัสดุมีความชื้นมากเกินไป ทำให้ไม่สามารถแสดงผลรามานสเปกตรัมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปสามารถคำนวณหาจำนวนชั้นกราฟีนได้จากอัตราส่วนระหว่างความสูงของ 2D band ต่อ G band (I_{2D}/I_G) ค่า I_{2D}/I_G แสดงในตารางที่ 4.1

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

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ค่า I_{2D}/I_G ของกราฟีน และ Graphene/PMMA มีค่า มากกว่า 1 แสดงว่ากราฟีนมีจำนวนชั้นเดียว 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

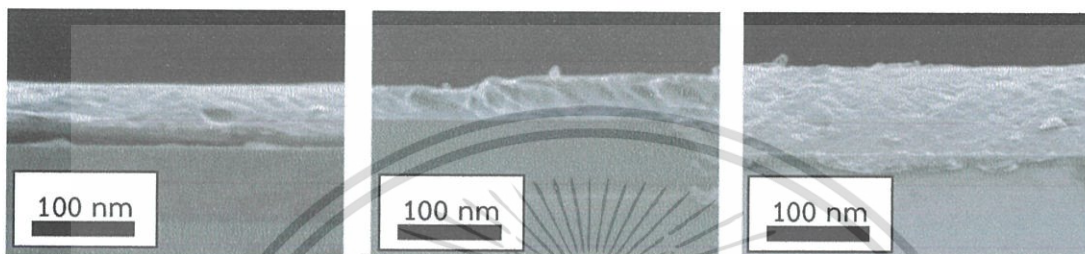
ตัวอย่าง	I_G/I_D
ไฮบริด Graphene/PMMA	6.49 ± 1.23
กราฟีน	3.27 ± 1.68

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ค่า I_G/I_D ของกราฟีน มีค่าน้อยกว่าค่า I_G/I_D ของ Graphene/PMMA แสดงว่าขั้นตอนการล้าง PMMA กราฟีนเกิดการเสียหาย มีโครงสร้าง Defect เกิดขึ้นมากขึ้นหลังจากการล้าง PMMA ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ภาพที่ 4.3 แสดงภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไฮบริด Graphene/PMMA (5 wt%) (a) ไฮบริด Graphene/EC (2.5 wt%) (b) และ ไฮบริด Graphene/isoprene (5 wt%) (c) ที่อยู่บนแผ่น SiO₂/Si ตามลำดับ สำหรับตรวจสอบหาความสูงของชั้นพอลิเมอร์ที่อยู่บนชั้นกราฟีน



ภาพที่ 4.3 ภาพSEM ของ (a) Graphene/PMMA (5 wt%), (b) Graphene/EC (2.5 wt%) และ (c) Graphene/isoprene (5 wt%)

จากภาพแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์แต่ละชนิดเคลือบที่บนกราฟีนจนไม่สามารถสังเกตเห็นชั้นของกราฟีนได้ เนื่องจากกราฟีนมีความหนาที่น้อยมาก เมื่อพิจารณาความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ พบว่า Graphene/PMMA (5 wt%), Graphene/EC (2.5 wt%) และ Graphene/isoprene (5 wt%) มีค่าเท่ากับ 1.20, 0.58 และ 1.51 μm ตามลำดับ เนื่องจากความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีความหนืดที่แตกต่างกัน เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ที่แตกต่างกัน ทำให้เมื่อทำการเคลือบลงบนชั้นกราฟีนด้วยวิธีแบบหมุนเหวี่ยง ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์จึงแตกต่างกันด้วย

4.2 ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไตคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุกราฟีน บนแผ่น SiO₂/Si

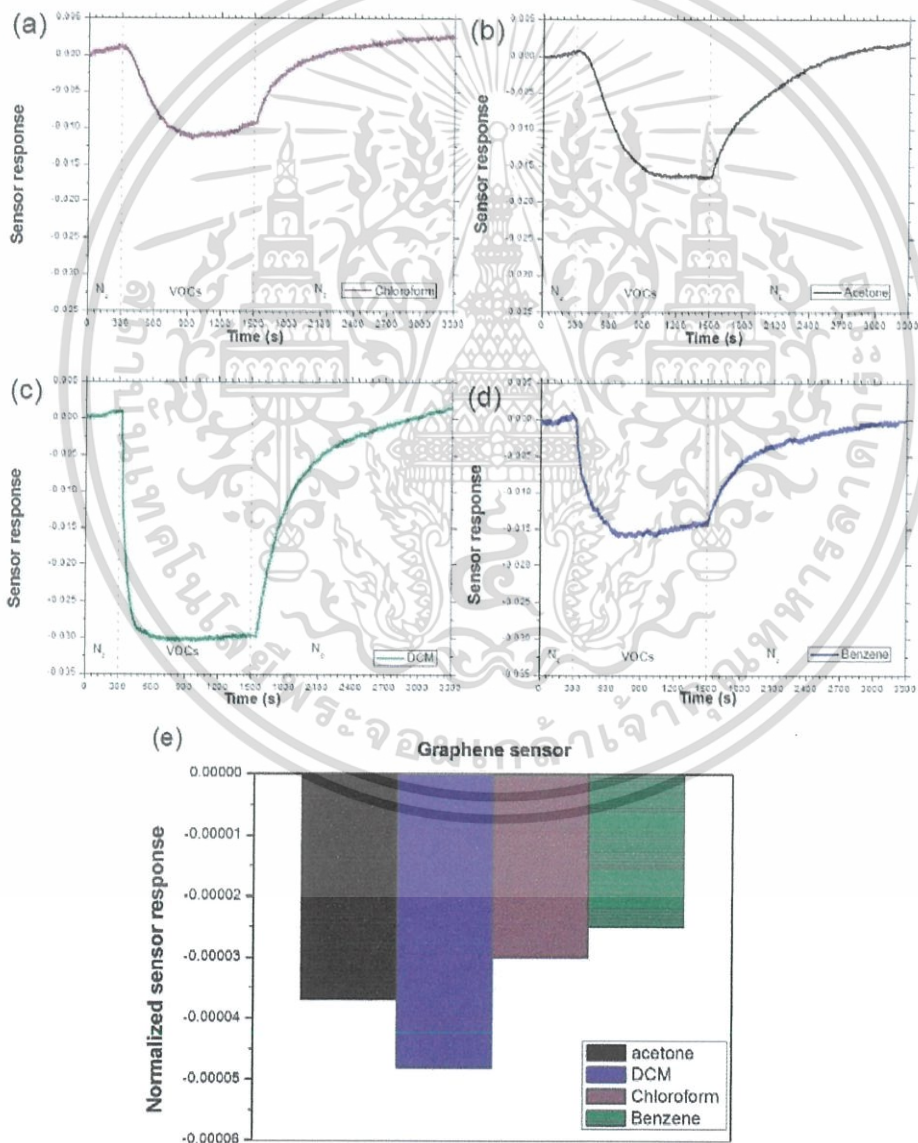
4.2.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนสภาพของก๊าซเซนเซอร์วัสดุกราฟีน ต่อไอระเหยก๊าซเอทานอล ไตคลอโรมีเทน และเบนซีน

จากภาพที่ 4.4 ผลการตอบสนองของเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหย (a) คลอโรฟอร์ม, (b) อะซีโตน, (c) ไตคลอโรมีเทน และ (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response โดยค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ คำนวณจากนำค่าการตอบสนองต่อก๊าซตรวจสอบหารด้วยค่าความเข้มข้นของไอระเหยก๊าซตรวจสอบ โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยทั้ง 4 ชนิดเป็นไปดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์

ไอระเหยก๊าซ	ค่าความเข้มข้น (parts per million; ppt)
อะซีโตน	445.67
คลอโรฟอร์ม	310.80
ไดคลอโรมีเทน	618.95
เบนซีน	560.83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.4 ผลการตอบสนองของเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหย (a) คลอโรฟอร์ม, (b) อะซีโตน, (c) ไดคลอโรมีเทน และ (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response ของเซนเซอร์

จากภาพที่ 4.4 ผลการตอบสนองของเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหย (a) คลอโรฟอร์ม, (b) อะซีโตน, (c) ไดคลอโรมีเทน และ (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response (a-d) แสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์กราฟีนมีค่าการตอบสนองเป็นลบมากขึ้นเมื่อไอระเหยของก๊าซมาสัมผัส โดยมีค่าการตอบสนองต่อก๊าซไคคลอโรมีเทนได้ดีที่สุด ตามด้วยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม และ เบนซีน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าก๊าซเซนเซอร์กราฟีนสามารถกลับคืนสู่ค่าการตอบสนองเริ่มต้นได้เมื่ออยู่ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนอีกครั้ง

ค่าเวลาการตอบสนอง (Response time) ของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหยก๊าซตรวจสอบสามารถคำนวณได้จากเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซที่ระดับ 90% เทียบกับค่าการตอบสนองอิมิตัว ในขณะที่ค่าเวลาการคืนตัว (Recovery time) ของก๊าซเซนเซอร์ คำนวณได้จากเวลาที่ก๊าซเซนเซอร์ใช้ในการคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ดังตารางที่ 4.4 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนต่อก๊าซแต่ละชนิด พบว่าก๊าซเซนเซอร์กราฟีนใช้เวลาในการตอบสนองต่อก๊าซไคคลอโรมีเทนเร็วที่สุด และใช้เวลาคืนตัวต่อก๊าซเบนซีนได้ไวที่สุด

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนต่อก๊าซชนิดต่างๆ

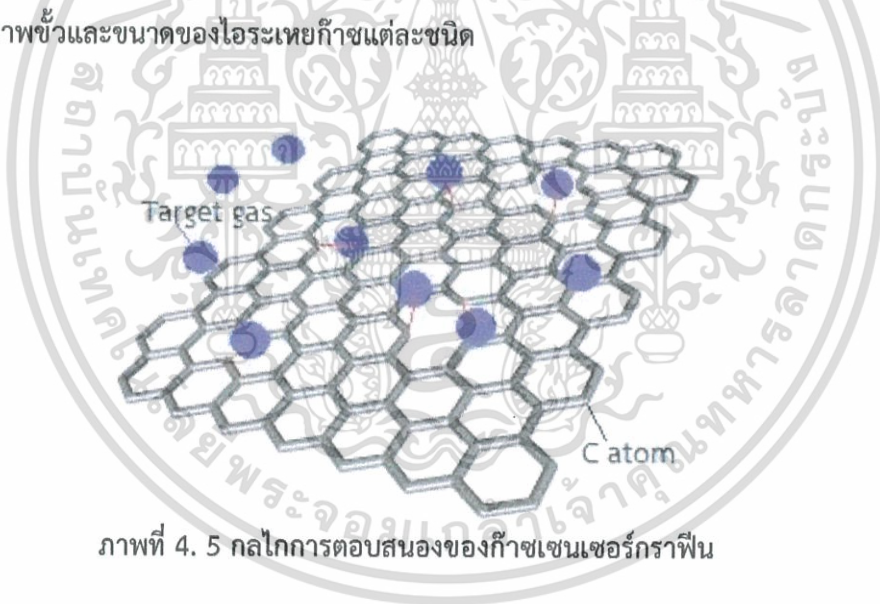
ไอระเหยก๊าซ	เวลาการตอบสนอง (s)	เวลาคืนตัว (s)
อะซีโตน	600	1530
คลอโรฟอร์ม	480	1380
ไคคลอโรมีเทน	135	998
เบนซีน	160	730

พบว่าค่า Normalized sensor response จากภาพที่ 4.4 ผลการตอบสนองของเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหย (a) คลอโรฟอร์ม, (b) อะซีโตน, (c) ไคคลอโรมีเทน และ (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response (e) แสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์กราฟีนมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อก๊าซไคคลอโรมีเทนได้ดีที่สุดเมื่อความเข้มข้นของไอระเหยก๊าซทั้ง 4 ชนิดเท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าการตอบสนอง คาดว่าเกิดจากการที่ก๊าซทั้ง 4 ชนิดมีสภาพขั้ว (Dielectric constant, ϵ_r) และขนาดของก๊าซที่ต่างกัน เป็นหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีส่วนในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการที่นำมาใช้ในการอธิบายการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหย นั้นสามารถอธิบายได้จากที่กราฟีนมีจุดบกพร่องที่ทำให้เกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งทำให้มีค่าความต้านทานที่บริเวณนี้สูงกว่าบริเวณอื่น เมื่อโมเลกุลไอระเหยตรวจสอบเข้ามาสัมผัสกับกราฟีน โมเลกุลไอระเหยจะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างโครงสร้างอะตอมคาร์บอนที่ขาดจากกัน ณ บริเวณจุดบกพร่อง เกิดเป็นปรากฏการณ์การกระโดดข้ามของอิเล็กตรอน (electron hopping) ระหว่างอะตอมคาร์บอน ณ บริเวณจุดบกพร่อง และเนื่องจากกราฟีนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของกราฟีนลดลงเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของก๊าซตรวจสอบ ดังภาพที่ 4. 5

นอกจากนี้ก๊าซเซนเซอร์กราฟีนมีการตอบสนองต่อไอระเหยของก๊าซแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน เป็นผลจากปัจจัยดังต่อไปนี้ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและขนาดของไอระเหยก๊าซ โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพันธ์กับอัตราการกระโดดข้ามของอิเล็กตรอน โดยยิ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ยิ่งเพิ่มค่าอัตราการกระโดดข้ามของอิเล็กตรอน ทำให้ค่าความต้านทานลดลง นอกจากนี้ขนาดของไอระเหยก็เป็นปัจจัยสำคัญ โดยไอระเหยที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้จำนวนโมเลกุลที่เข้าไปสัมผัสกับกราฟีนมีจำนวนมากขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานลดลง โดยสามารถเรียงลำดับได้ตามขนาดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและขนาดของไอระเหยของก๊าซ ดังในตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4. 5 กลไกการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์กราฟีน

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์สภาพผิวและขนาดของไอระเหยก๊าซแต่ละชนิด

ไอระเหยก๊าซ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant, ϵ_r)	ขนาดโมเลกุล (Molecule size: cm^3/mol)
อะซีโตน	20.0	74.0
คลอโรฟอร์ม	4.83	80.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดคลอโรมีเทน	$8.93E_0$	63.85
เบนซีน	$2.27E_0$	89.12

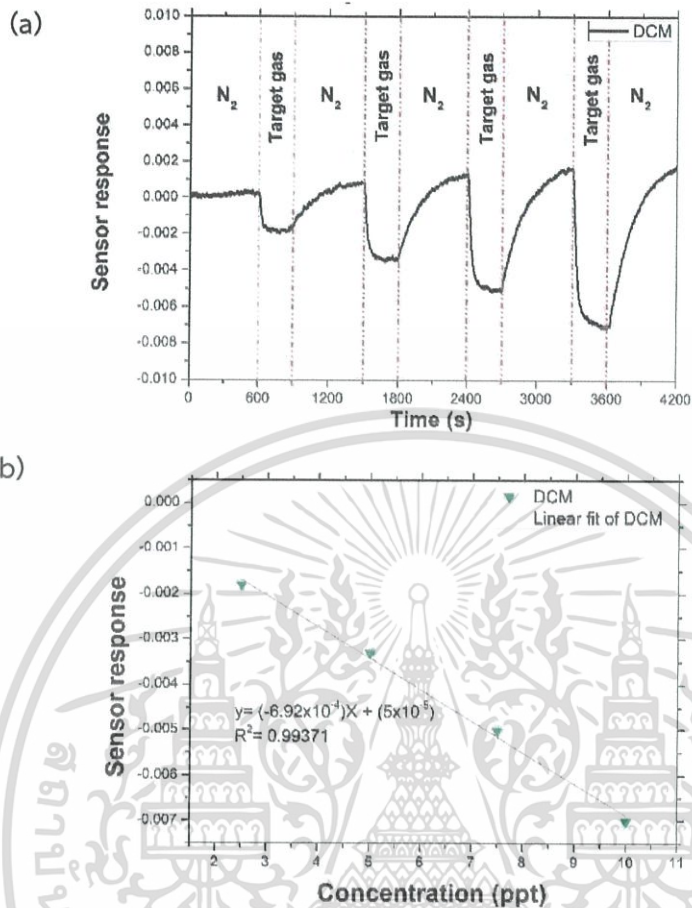
จากตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์สภาพขั้วและขนาดของไอระเหยก๊าซแต่ละชนิดพบว่าขนาดโมเลกุลของไอระเหยก๊าซมีแนวโน้มของขนาดเล็กลงไปใหญ่เป็นดังต่อไปนี้ ไดคลอโรมีเทน < อะซีโตน < คลอโรฟอร์ม < เบนซีน ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไอระเหยของก๊าซไดคลอโรมีเทนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กที่สุดทำให้สามารถสัมผัสกับพื้นผิวก๊าซเซนเซอร์ได้จำนวนมากกว่าโมเลกุลก๊าซขนาดใหญ่ ส่งผลให้เกิดอัตราการกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนที่ผิวของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนได้มากที่สุด อีกทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของไอระเหยก๊าซแต่ละชนิดสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ อะซีโตน > ไดคลอโรมีเทน > คลอโรฟอร์ม > เบนซีน ตามลำดับ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของไอระเหยของก๊าซอะซีโตน คลอโรฟอร์ม และเบนซีน สอดคล้องกับผลการตอบสนองก๊าซของเซนเซอร์กราฟีน ในขณะที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของไอระเหยของก๊าซไดคลอโรมีเทนไม่สอดคล้อง แสดงให้เห็นว่าปัจจัยในการตอบสนองต่อไอระเหยก๊าซของเซนเซอร์กราฟีน ขนาดโมเลกุลมีความสำคัญมากที่สุด จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ก๊าซเซนเซอร์ กราฟีนตอบสนองต่อไอระเหยของก๊าซไดคลอโรมีเทนได้มากที่สุด

4.2.1 การตอบสนองต่อไอระเหยของไดคลอโรมีเทนในช่วงระดับความเข้มข้นระดับหนึ่งในพื้น ส่วนของก๊าซเซนเซอร์กราฟีน

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 แสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์กราฟีนสามารถตอบสนองต่อไอระเหยก๊าซไดคลอโรมีเทนได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติม ในการนำมาตรวจวัดก๊าซไดคลอโรมีเทน ที่ความเข้มข้นในระดับพื้นส่วน จากภาพที่ 4. 6 แสดงกราฟการตอบสนองและ Normalized sensor response ต่อไอระเหยก๊าซไดคลอโรมีเทนในช่วงระดับ ppt ของก๊าซเซนเซอร์กราฟีน โดยความเข้มข้นที่ใช้อยู่ในช่วง 2.5 - 10 ppt

ภาพที่ 4. 6 (a) พบว่าเมื่อก๊าซเซนเซอร์กราฟีนมีการตอบสนองติดลบมากขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของไดคลอโรมีเทนที่ความเข้มข้นสูง และสามารถฟื้นฟูสภาพคืนได้เมื่ออยู่ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน และที่ระดับความเข้มข้นของไอระเหยไดคลอโรมีเทนที่ 2.5 ppt เซนเซอร์กราฟีนยังสามารถตอบสนองได้ดี และจากภาพที่ 4.6 (b) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นไอระเหยไดคลอโรมีเทนที่ตรวจวัดกับค่าการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ มีความสัมพันธ์แบบสมการเส้นตรง จากสมการเส้นตรงนี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าขีดจำกัดการตรวจวัดได้ (limit of detection) โดยก๊าซเซนเซอร์ กราฟีนมีค่าขีดจำกัดการตรวจวัดไอระเหย ไดคลอโรมีเทนอยู่ที่ 0.072 ppt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4. 6 แสดงค่าการตอบสนองไอระเหยไดคลอโรมีเทนช่วงระดับความเข้มข้น 2.5 - 10 ppt ของก๊าซเซนเซอร์กราฟีน (a) และกราฟแนวโน้มการตอบสนองไอระเหยก๊าซไดคลอโรมีเทนระดับความเข้มข้น 2.5, 5, 7.5 และ 10 ppt ของก๊าซเซนเซอร์กราฟีน (b)

4.3 ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA บนแผ่น SiO₂/Si

4.3.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนสภาพของก๊าซเซนเซอร์วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA ต่อไอระเหยก๊าซอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน

จากภาพที่ 4. 7 แสดงกราฟการเปรียบเทียบการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยอะซีโตน (a), คลอโรฟอร์ม (b), ไดคลอโรมีเทน (c), และเบนซีน (d) โดยเป็นผลการตอบสนองค่าเฉลี่ยแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน และภาพที่ 4. 7 (e) แสดงค่า Normalized sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

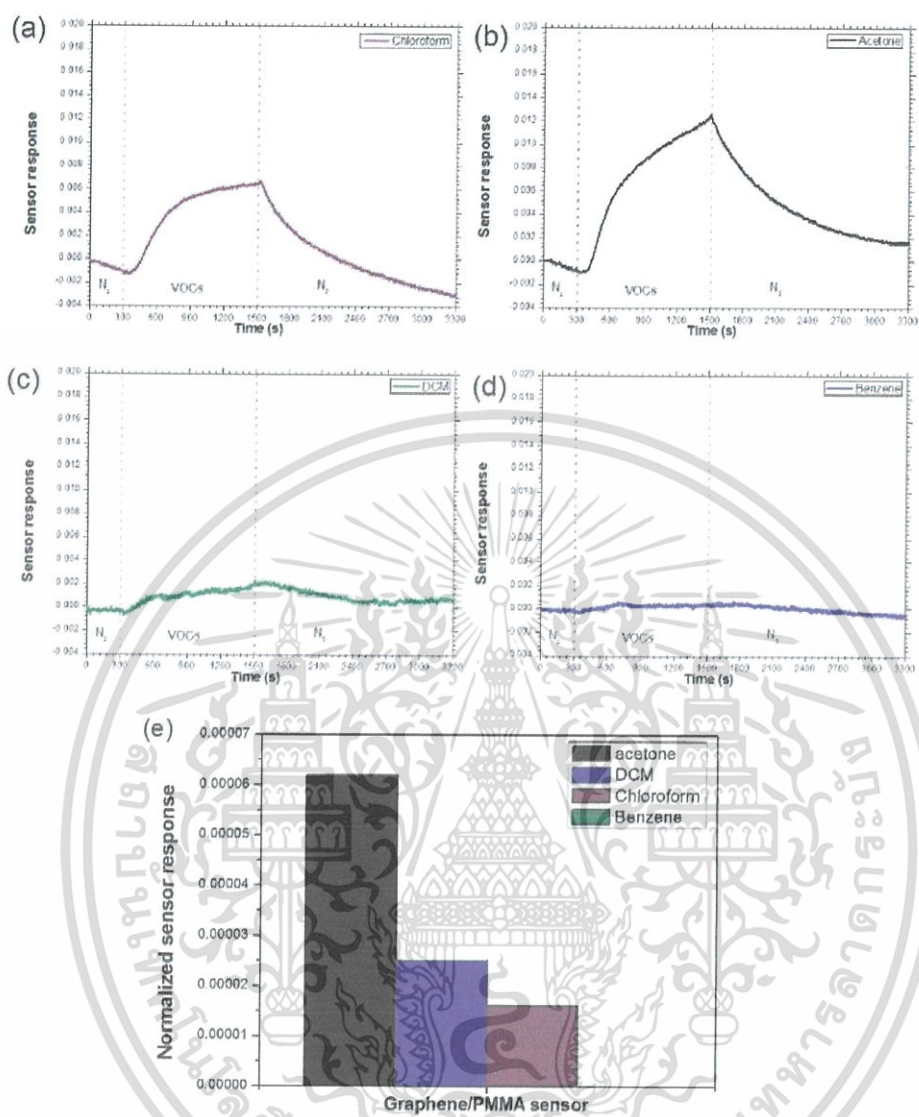
response ของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อก๊าซตรวจสอบแต่ละชนิด โดยการนำค่าการตอบสนองหารด้วยค่าความเข้มข้นของไอระเหยก๊าซตรวจสอบชนิดนั้นๆ โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยทั้ง 4 ชนิดเป็นไปดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA

ไอระเหยก๊าซ	ค่าความเข้มข้น (parts per million; ppt)
อะซีโตน	201.24
คลอโรฟอร์ม	403.93
ไดคลอโรมีเทน	75.21
เบนซีน	560.83

จากภาพที่ 4. 7 (a-d) พบว่าเมื่อไอระเหยของก๊าซตรวจสอบสัมผัสกับก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ส่งผลให้เซนเซอร์มีค่าความต้านทานสูงขึ้น โดยก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA มีค่าการตอบสนองต่อก๊าซอะซีโตนได้ดีที่สุด ตามด้วยไดคลอโรมีเทน คลอโรฟอร์ม และก๊าซเบนซีน ตามลำดับ โดยการตอบสนองต่อไอระเหยก๊าซเบนซีนนั้นน้อยมากจนแทบจะไม่สามารถตรวจวัดได้ เมื่อเทียบกับการตอบสนองต่อไอระเหยก๊าซอีกทั้ง 3 ตัว ภาพที่ 4. 7 (e) ไม่สามารถกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นได้ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังจากตรวจวัดก๊าซอะซีโตนและเบนซีน อีกทั้งยังพบว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ใช้เวลาในการตอบสนองต่อก๊าซไดคลอโรมีเทนเร็วที่สุด และใช้เวลาคืนตัวต่อก๊าซคลอโรฟอร์มได้ไวที่สุด ดัง

ตารางที่ 4. 7



ภาพที่ 4. 7 แสดงผลการตอบสนองเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อ ก๊าซ(a) คลอโรฟอร์ม, (b) อะซีโตน, (c) ไดคลอโรมีเทน และ (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response ของเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยก๊าซแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4. 7 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อก๊าซชนิดต่างๆ

ไอระเหยก๊าซ	เวลาการตอบสนอง (s)	เวลาคืนตัว (s)
อะซีโตน	1039	-
คลอโรฟอร์ม	750	716
ไดคลอโรมีเทน	300	1400
เบนซีน	-	-

หลักการการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยก๊าซตรวจสอบนั้น สามารถอธิบายได้ด้วย 2 หลักการ ได้แก่ 1. ค่าไดอิเล็กทริกของไอระเหย โดยสารที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงสามารถเหนี่ยวยิ่งพาหะโฮลของกราฟีนได้มากกว่าสารที่มีค่าไดอิเล็กทริกต่ำกว่า ทำให้พาหะโฮลถูกตรึงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์จึงสูงขึ้นเมื่อก๊าซตรวจสอบมาสัมผัส โดยพบว่าอะซีโตนมีค่าไดอิเล็กทริกสูงที่สุด (ตารางที่ 4.5) ซึ่งสอดคล้องกับผลการตอบสนองของเซนเซอร์ Graphene/PMMA ที่ตอบสนองต่อไอระเหยก๊าซอะซีโตนได้ดีที่สุด 2. การบวมตัวของพอลิเมอร์ (Polymer swelling) พอลิเมอร์ PMMA เกิดการพองตัวเนื่องจากไอระเหยก๊าซที่สามารถแทรกซึมเข้ากับพอลิเมอร์ได้ ทำให้ค่าความต้านทานของเซนเซอร์สูงขึ้นเนื่องจากกราฟีนเกิดการปิดกั้นตัว โดยความสามารถในการละลายเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์กับไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ คำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 โดยสรุปผลการคำนวณค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 4. 8

ตารางที่ 4. 8 ค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนของพอลิเมอร์ PMMA กับไอระเหยก๊าซชนิดต่างๆ

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	5.1	0.5
Acetone	15.5	10.4	7.0			
PMMA	17.9	10.1	5.4		7.0	0.6
Chloroform	17.8	3.1	5.7			
PMMA	17.9	10.1	5.4		3.9	0.3
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			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

δ_D คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงแพร่กระจายของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย (Hansen dispersion solubility parameter)

δ_P คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย (Hansen polar solubility parameter)

δ_H คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของพันธะไฮโดรเจนของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย (Hansen hydrogen bonding solubility parameter)

R_0 คือ รัศมีอันตรกิริยา (Interaction radius) ของพอลิเมอร์

R_a คือ พารามิเตอร์การละลายของแชนเซนของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย (HSP of two substances)

RED คือ ระยะทางพลังงานสัมพัทธ์ (Relative energy distance)

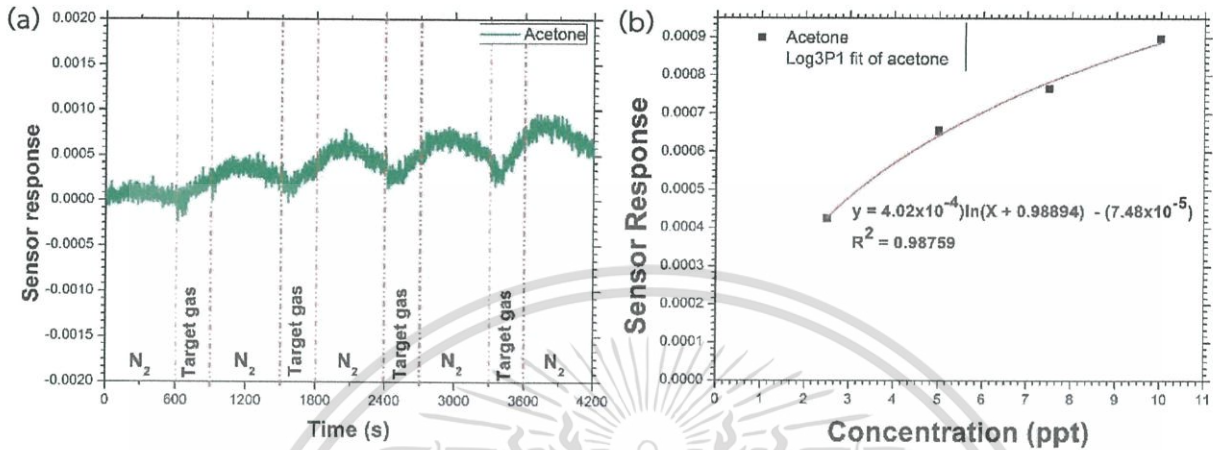
หลักการพารามิเตอร์การละลายของแชนเซน อธิบายว่าเมื่อค่า RED ของตัวที่ถูกละลายและตัวทำละลายมีค่าน้อยกว่า 1 ตัวที่ถูกละลายจะสามารถละลายเข้ากันได้กับตัวทำละลาย และยิ่งมีค่า RED น้อยยิ่งแสดงถึงความละลายเข้ากันได้ดีระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ดังนั้นความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของไอระเหยก๊าซชนิดต่างๆ dy[พอลิเมอร์ PMMA จะพิจารณาได้จากค่า RED โดยผลการคำนวณค่า RED ตามที่แสดงผลในตารางที่ 4. 8 พบว่าค่า RED มีแนวโน้มดังนี้ DCM < Acetone < Chloroform < Benzene ตามลำดับ แสดงว่าไอระเหยของก๊าซไดคลอโรมีเทนสามารถละลายเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ PMMA ได้ดีที่สุดในซึ่งไม่สอดคล้องกับผล Normalized sensor response แสดงให้เห็นว่าปัจจัยในเรื่องค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและขนาดโมเลกุลก๊าซที่เล็กนั้นมีอิทธิพลต่อการตอบสนองต่อก๊าซมาก แต่จากกราฟ Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA จะพบว่าเซนเซอร์แทบจะไม่ตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนเลยซึ่งสอดคล้องกับค่า RED ที่มีค่าเท่ากับ 1 แสดงให้เห็นว่า PMMA ทำหน้าที่คัดเลือกในการตอบสนองต่อก๊าซ โดยทำการบล็อกไม่ตอบสนองต่อก๊าซเบนซีน เนื่องจากเบนซีนไม่สามารถละลายเข้ากับพอลิเมอร์ PMMA ได้

4.3.2 การตอบสนองต่อไอระเหยของอะซีโตนในช่วงระดับความเข้มข้นระดับหนึ่งในพื้นที่ของก๊าซเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA สามารถตอบสนองต่อไอระเหยก๊าซอะซีโตนได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติม ในการนำมาตรวจวัดก๊าซอะซีโตนที่ความเข้มข้นในระดับพื้นที่ 4. 8 แสดงกราฟการตอบสนองและ Normalized sensor response ต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอระเหยก๊าซอะซิโตนที่ช่วงระดับ ppt ของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA โดยความเข้มข้นที่ใช้อยู่ในช่วง 2.5 - 10 ppt



ภาพที่ 4. 8 แสดงค่าการตอบสนองไอระเหยอะซิโตนช่วงระดับความเข้มข้น 2.5, 5, 7.5 และ 10 ppt ของ (a) ก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA (b) กราฟแนวโน้มการตอบสนองไอระเหยก๊าซอะซิโตนระดับความเข้มข้น 2.5, 5, 7.5 และ 10 ppt ของก๊าซเซนเซอร์ graphene/PMMA

ภาพที่ 4. 8 (a) แสดงผลการตรวจวัดไอระเหยอะซิโตนที่ระดับความเข้มข้น 2.5, 5, 7.5 และ 10 ppt พบว่าก๊าซเซนเซอร์มีค่าการตอบสนองสูงขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของอะซิโตนที่ความเข้มข้นมากขึ้น และมีความต้านทานเข้าสู่สภาวะเริ่มต้นเมื่อก๊าซเซนเซอร์กลับสู่ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน อีกทั้งเซนเซอร์ Graphene/PMMA ยังสามารถตอบสนองต่อไอระเหยอะซิโตนที่ระดับความเข้มข้น 2.5 ppt ได้ นอกจากนี้ ภาพที่ 4. 8 (b) พบว่าค่าความเข้มข้นไอระเหยอะซิโตนมีสัมพันธ์กับค่าการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แบบสมการลอการิทึม ซึ่งจากสมการนี้นำมาคำนวณหาค่าขีดจำกัดการตรวจวัดไอระเหยอะซิโตนของเซนเซอร์ Graphene/PMMA ได้อยู่ที่ 0.215 ppt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

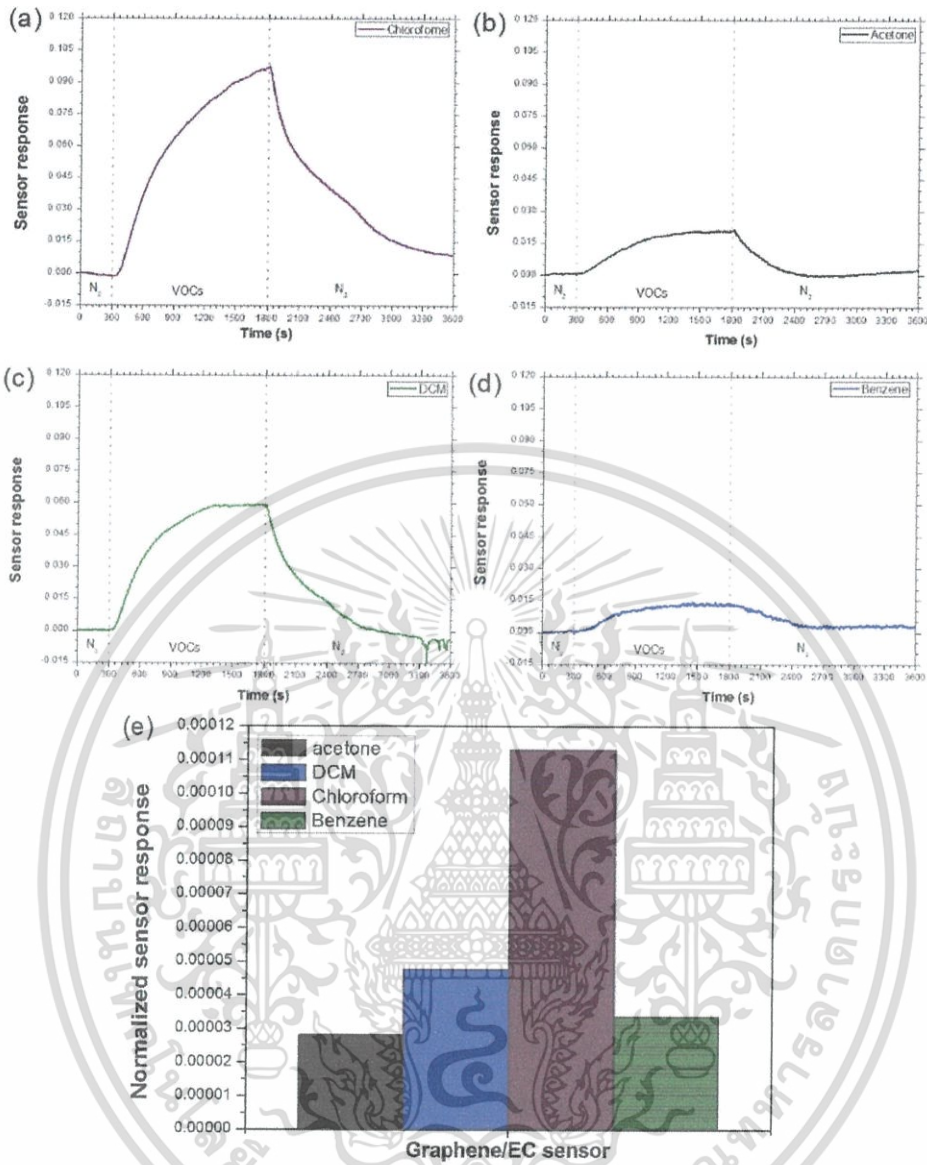
4.4 ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ EC บนแผ่น SiO_2/Si

4.4.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนสภาพของก๊าซเซนเซอร์วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ EC ต่อไอระเหยก๊าซอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน

ภาพที่ 4.9 (a) แสดงกราฟการเปรียบเทียบการตอบสนองเฉลี่ยของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อไอระเหยอะซีโตน (a), คลอโรฟอร์ม (b), ไดคลอโรมีเทน (c), และเบนซีน (d) และภาพที่ 4.9 (e) แสดงค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อก๊าซตรวจสอบแต่ละชนิด โดยการนำค่าการตอบสนองต่อก๊าซตรวจสอบหารด้วยค่าความเข้มข้นของไอระเหยก๊าซตรวจสอบ โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยทั้ง 4 ชนิดเป็นไปดังตารางที่ 4. 9

ตารางที่ 4. 9 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC

ไอระเหยก๊าซ	ค่าความเข้มข้น (parts per million; ppt)
อะซีโตน	740.71
คลอโรฟอร์ม	858.35
ไดคลอโรมีเทน	1240.19
เบนซีน	387.40



ภาพที่ 4. 9 แสดงผลการตอบสนองของเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อก๊าซ (a) คลอโรฟอร์ม, (b) อะซีโตน, (c) ไดคลอโรมีเทน และ (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response ของเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อไอระเหยก๊าซแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจวัดไอระเหยก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC จะทำเช่นเดียวกับการตรวจวัดไอระเหยก๊าซของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนและก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA จากภาพที่ 4.9 (a-d) พบว่าเมื่อก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC มีค่าการตอบสนองสูงขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของก๊าซ โดยมีค่าการตอบสนองต่อก๊าซคลอโรฟอร์มได้ดีที่สุด ตามด้วยไตรคลอโรมีเทน ก๊าซเบนซีน และอะซีโตน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผล Normalized sensor response ดังภาพที่ 4.9 (e) นอกจากนี้ยังพบว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ใช้เวลาในการตอบสนองต่อก๊าซไตรคลอโรมีเทนเร็วที่สุด และใช้เวลาคืนตัวต่อก๊าซอะซีโตนได้ไวที่สุด ดังตารางที่ 4. 10 และไม่สามารถกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นได้ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังจากตรวจวัดก๊าซคลอโรฟอร์ม

ตารางที่ 4. 10 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อก๊าซชนิดต่างๆ

ไอระเหยก๊าซ	เวลาการตอบสนอง (s)	เวลาคืนตัว (s)
อะซีโตน	803	600
คลอโรฟอร์ม	1116	-
ไตรคลอโรมีเทน	300	1400
เบนซีน	366	1260

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อไอระเหยก๊าซตรวจวัดชนิดต่าง ๆ นั้น สามารถอธิบายได้ด้วย หลักการบวมตัวของพอลิเมอร์ (Polymer swelling) เช่นเดียวกับหลักการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA โดยในตารางที่ 4. 11 แสดงค่าความสามารถในการละลายเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ EC กับไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ด้วยการคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2

ตารางที่ 4. 11 ค่าพารามิเตอร์การละลายของแอสเซนเซนของพอลิเมอร์ EC กับไอระเหยก๊าซชนิดต่างๆ

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			
EC	19.0	5.6	4.9	7.9	6.8	0.9
Acetone	15.5	10.4	7.0			
EC	19.0	5.6	4.9		2.9	0.3
Chloroform	17.8	3.1	5.7			
EC	19.0	5.6	4.9			
DCM	18.2	6.3	6.1	1.6	0.2	
EC	19.0	5.6	4.9	6.3	0.8	
Benzene	18.4	0.0	2.0			

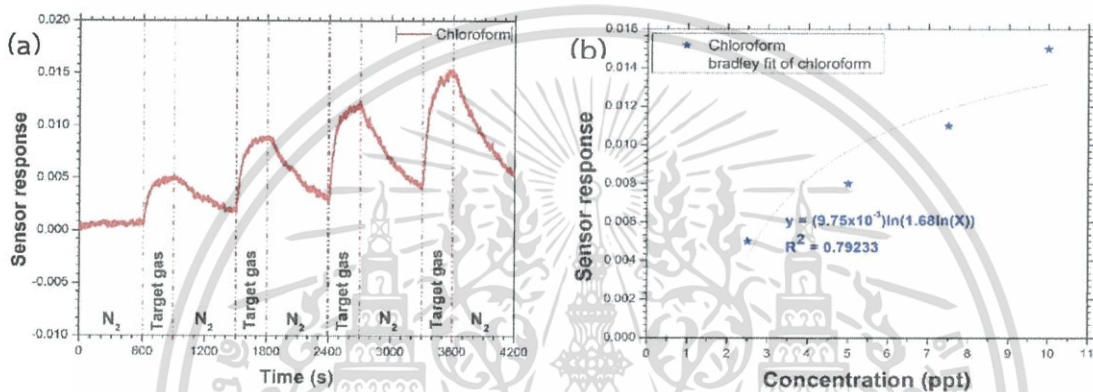
*(https://www.accudynetest.com/solubility_table.html)

จากตารางที่ 4. 11 พบว่าค่า RED มีแนวโน้มดังต่อไปนี้ DCM < Chloroform < Benzene < Acetone โดยค่า RED ของไอระเหยก๊าซทั้ง 4 ชนิด มีค่าน้อยกว่า 1 ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าไอระเหยก๊าซทั้ง 4 ชนิดนี้สามารถละลายเข้ากับพอลิเมอร์ EC ได้ โดยก๊าซไดคลอโรมีเทนละลายได้ดีที่สุด และอะซิโตนละลายได้แย่มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผล Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ยกเว้นก๊าซคลอโรฟอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การตอบสนองต่อไอระเหยของคลอโรฟอร์มในช่วงระดับความเข้มข้นระดับหนึ่งในพื้น ส่วนของก๊าซเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ EC

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC สามารถตอบสนองต่อไอระเหยก๊าซคลอโรฟอร์มได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติม ในการนำมาตรวจวัดก๊าซคลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้นในระดับพื้นส่วน จากภาพที่ 4.10 แสดงกราฟการตอบสนองและ Normalized sensor response ต่อไอระเหยก๊าซคลอโรฟอร์มในช่วงระดับ ppt ของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC โดยความเข้มข้นที่ใช้อยู่ในช่วง 2.5 - 10 ppt



ภาพที่ 4. 10 แสดงค่าการตอบสนองไอระเหยคลอโรฟอร์มช่วงระดับความเข้มข้น 2.5, 5, 7.5 และ 10 ppt ของ (a) ก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC (b) กราฟแนวโน้มการตอบสนองไอระเหยก๊าซคลอโรฟอร์มระดับความเข้มข้น 2.5, 5, 7.5 และ 10 ppt ของก๊าซเซนเซอร์ graphene/EC

ภาพที่ 4.10 (a) แสดงผลการตรวจวัดไอระเหยคลอโรฟอร์มที่ระดับความเข้มข้น 2.5, 5, 7.5 และ 10 ppt พบว่าเมื่อก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC มีค่าการตอบสนองสูงขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของคลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้นมากขึ้น และมีค่าความต้านทานเข้าสู่สภาวะเริ่มต้นเมื่ออยู่ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน และสามารถตอบสนองต่อไอระเหยคลอโรฟอร์มที่ระดับความเข้มข้น 2.5 ppt ได้ดี นอกจากนี้จากภาพที่ 4.10 (b) พบว่าสามารถสร้างเป็นสมการเชิงเส้นได้ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองต่อไอระเหยที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยสมการนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าขีดจำกัดการตรวจวัดไอระเหยคลอโรฟอร์มของเซนเซอร์ Graphene/EC ได้อยู่ที่ 1.81 ppt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

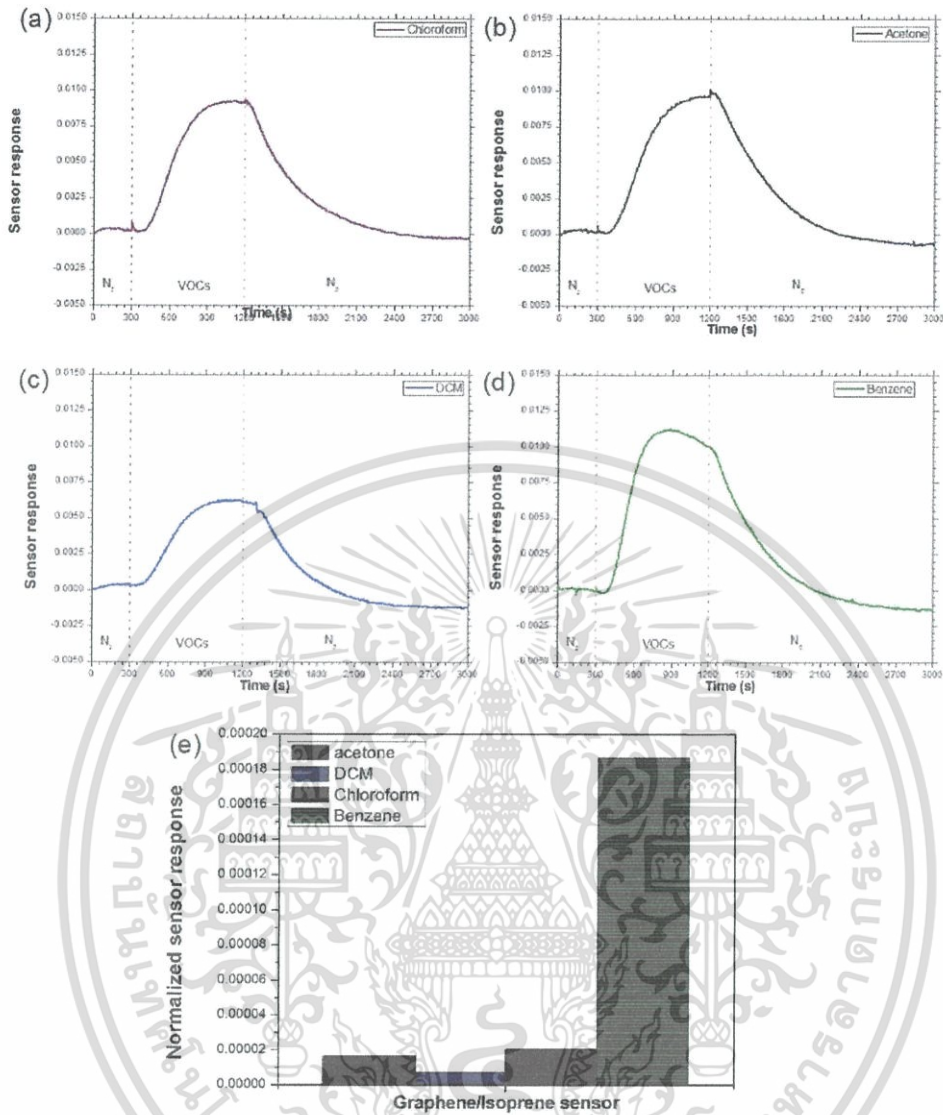
4.5 ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ isoprene บนแผ่น SiO_2/Si

4.5.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนสภาพของก๊าซเซนเซอร์วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PIP ต่อไอระเหยก๊าซอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน

จากภาพที่ 4.11 แสดงกราฟการเปรียบเทียบการตอบสนองเฉลี่ยของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PIP ต่อไอระเหยอะซีโตน (a), คลอโรฟอร์ม (b), ไดคลอโรมีเทน (c), และเบนซีน (d) และภาพที่ 4.11 (e) แสดงค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene ต่อก๊าซตรวจสอบแต่ละชนิด โดยการนำค่าการตอบสนองต่อก๊าซตรวจสอบหารด้วยค่าความเข้มข้นของไอระเหยก๊าซตรวจสอบ โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยทั้ง 4 ชนิดเป็นไปดังตารางที่ 4. 12

ตารางที่ 4. 12 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene

ไอระเหยก๊าซ	ค่าความเข้มข้น (parts per million; ppt)
อะซีโตน	579.63
คลอโรฟอร์ม	448.99
ไดคลอโรมีเทน	851.94
เบนซีน	259.42



ภาพที่ 4. 11 แสดงผลการตอบสนองของเซนเซอร์ Graphene/PIIP ต่อก๊าซ (a) คลอโรฟอร์ม, (b) อะซีโตน, (c) ไตคลอโรมีเทน และ (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response ของเซนเซอร์ Graphene/PIIP ต่อไอระเหยก๊าซแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.11 พบว่าเมื่อก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene มีค่าความต้านทานสูงขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหย และสามารถกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นได้เมื่อทำการไล่ไอระเหยด้วยก๊าซ โดยมีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนได้ดีที่สุด ตามด้วยคลอโรฟอร์ม อะซีโตน และไดคลอโรมีเทน ตามลำดับไนโตรเจน ซึ่งสอดคล้องกับผล Normalized sensor response ดังภาพที่ 4.11(b) นอกจากนี้ยังพบว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene ใช้เวลาในการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนเร็วที่สุด และใช้เวลาคืนตัวต่อไดคลอโรมีเทนได้ไวที่สุด ดังตารางที่ 4. 13

ตารางที่ 4. 13 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ

ไอระเหยก๊าซ	เวลาการตอบสนอง (s)	เวลาคืนตัว (s)
อะซีโตน	551	1041
คลอโรฟอร์ม	511	1219
ไดคลอโรมีเทน	511	725
เบนซีน	384	851

โดยหลักการการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ นั้นสามารถอธิบายได้ด้วย 2 หลักการ ได้แก่ 1 หลักการบวมตัวของพอลิเมอร์ (Polymer swelling) โดยในตารางที่ 4.14 แสดงค่าความสามารถในการละลายเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ isoprene กับไอระเหยก๊าซชนิดต่างๆ ด้วยการคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2

ตารางที่ 4. 14 แสดงค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนของพอลิเมอร์ isoprene (Pip) กับไอระเหยชนิดต่างๆ [19]

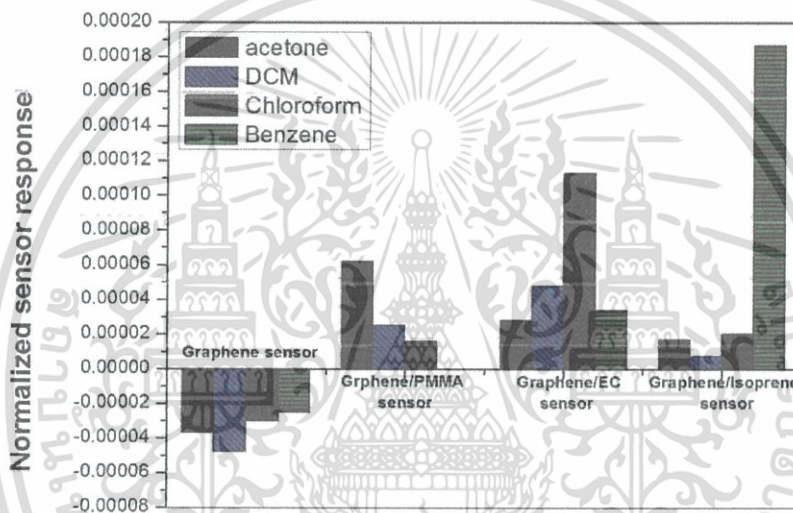
Polymer and solvent	Hansen solubility parameter, HSP (MPa ^{1/2})*			R ₀	R _a	RED (R _a /R ₀)	
	δ _D	δ _P	δ _H				
Pip	16.6	1.4	-0.8	9.6	11.9	1.2	
Acetone	15.5	10.4	7.0				
Pip	16.6	1.4	-0.8		9.6	6.8	0.7
Chloroform	17.8	3.1	5.7				
Pip	16.6	1.4	-0.8			8.6	0.9
DCM	18.2	6.3	6.1				
Pip	16.6	1.4	-0.8	3.6	0.3		
Benzene	18.4	0.0	2.0				

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

โดยในตารางที่ 4.14 พบว่าค่า RED ของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene มีแนวโน้มดังต่อไปนี้ Benzene < Chloroform < DCM < Acetone ซึ่งสอดคล้องกับค่าการตอบสนองต่อไอระเหยทั้ง 4 ชนิดของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene หลักการที่ 2 คือค่าไดอิเล็กทริกของไอระเหย กล่าวคือ ยิ่งสารไอระเหยมีค่าไดอิเล็กทริกมาก ยิ่งทำให้มีการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อก๊าซชนิดนั้นมากขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อตรวจสอบค่าไดอิเล็กทริกของไอระเหยแต่ละชนิด พบว่าอะซิโตนมีค่าไดอิเล็กทริกสูงที่สุด ดังตารางที่ 4.5 จึงเหตุผลทำให้เซนเซอร์ Graphene/isoprene ยังสามารถตอบสนองต่ออะซิโตนได้อยู่ในขณะที่ค่า RED ของไอระเหยอะซิโตนมีค่ามากกว่า 1

4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ระหว่างกราฟีนและไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์แต่ละชนิดบนแผ่น SiO_2/Si

สำหรับกลไกการตอบสนองต่อไอระเหยแต่ละชนิดสำหรับก๊าซเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์แต่ละชนิด สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากค่าการตอบสนองต่อไอระเหยแต่ละชนิดของก๊าซเซนเซอร์กราฟีน, ก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA, ก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC และ ก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene ที่ต่างกัน ดังในภาพที่ 4. 12 แสดงค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิด



ภาพที่ 4. 12 แสดงค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์กราฟีน, ก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA, ก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC และก๊าซเซนเซอร์ Graphene/Pip

จากภาพพบว่า ความสามารถในการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA เพิ่มมากขึ้น 67.56 % ในขณะที่ความสามารถในการตอบสนองต่อ คลอโรฟอร์ม, ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน นั้นต่ำลงถึง 46.67, 47.92 และ 99.97 % ตามลำดับเมื่อเทียบกับก๊าซเซนเซอร์กราฟีน ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการมีพอลิเมอร์ PMMA ที่เคลือบบนชั้นกราฟีนทำหน้าที่กั้นไอระเหยคลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีนไม่ให้เข้ามาทำปฏิกิริยากับชั้นผิวกราฟีน ทำให้ประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อไอระเหยชนิดดังกล่าวต่ำลง แต่ช่วยในการคัดเลือกให้อะซีโตนซึมผ่านได้ ทำให้ประสิทธิภาพในการตอบสนองต่ออะซีโตนสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC พบว่ามีการตอบสนองต่อไอระเหยคลอโรฟอร์ม เพิ่มมากขึ้นถึง 276.76 % ในขณะที่ความสามารถในการตอบสนองต่อ อะซีโตน, ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน นั้นต่ำลง 24.32, 0.625 และ 25.31 % ตามลำดับเมื่อเทียบกับก๊าซเซนเซอร์กราฟีน ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการมีพอลิเมอร์ EC ที่เคลือบบนชั้นกราฟีนทำหน้าที่กั้นไอระเหยอะซีโตน, ไดคลอโรมีเทน และเบนซีนไม่ให้เข้ามาทำปฏิกิริยากับชั้นผิวกราฟีน ทำให้ประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อไอระเหยชนิดดังกล่าวต่ำลง แต่ทำการคัดเลือกให้คลอโรฟอร์มซึมผ่านได้ ทำให้ประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อก๊าซคลอโรฟอร์มสูงขึ้น

ส่วนประสิทธิภาพในการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/isoprene พบว่ามีการตอบสนองต่อไอระเหยก๊าซเบนซีน เพิ่มมากขึ้นถึง 647.2 % ในขณะที่ความสามารถในการตอบสนองต่ออะซีโตน, ไดคลอโรมีเทน และคลอโรฟอร์ม นั้นต่ำลง 55.13, 85 และ 32.33 % ตามลำดับเมื่อเทียบกับก๊าซเซนเซอร์กราฟีน ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการมีพอลิเมอร์ isoprene ที่เคลือบบนชั้นกราฟีนทำหน้าที่กั้นไอระเหยอะซีโตน, ไดคลอโรมีเทน และคลอโรฟอร์มไม่ให้เข้ามาทำปฏิกิริยากับชั้นผิวกราฟีน ทำให้ประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อไอระเหยชนิดดังกล่าวต่ำลง แต่ทำการคัดเลือกให้เบนซีนซึมผ่านได้ ทำให้ประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อเบนซีนสูงขึ้น

ดังนั้นการใช้พอลิเมอร์แต่ละชนิดในการเคลือบชั้นกราฟีน มาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์วัดก๊าซเซนเซอร์ ส่งผลให้ก๊าซเซนเซอร์มีประสิทธิภาพในการคัดเลือกที่จะตอบสนองต่อไอระเหยได้อย่างจำเพาะเจาะจง (Selectivity) โดยผู้วิจัยตั้งสมมุติฐานว่าความหนาและชนิดฟิล์มพอลิเมอร์ มีผลต่อความสามารถในการเลือกตอบสนองต่อก๊าซได้ ซึ่งต้องทำการศึกษาในคราวต่อไปในอนาคตในเรื่องของความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์

4.7 ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นสำหรับตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุกราฟีน บนแผ่น PET

4.7.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนสภาพของก๊าซเซนเซอร์วัสดุ

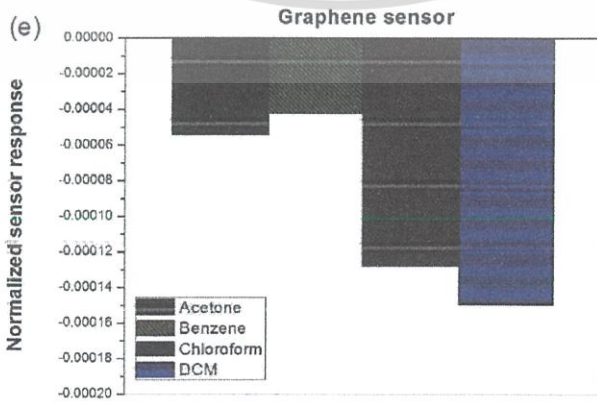
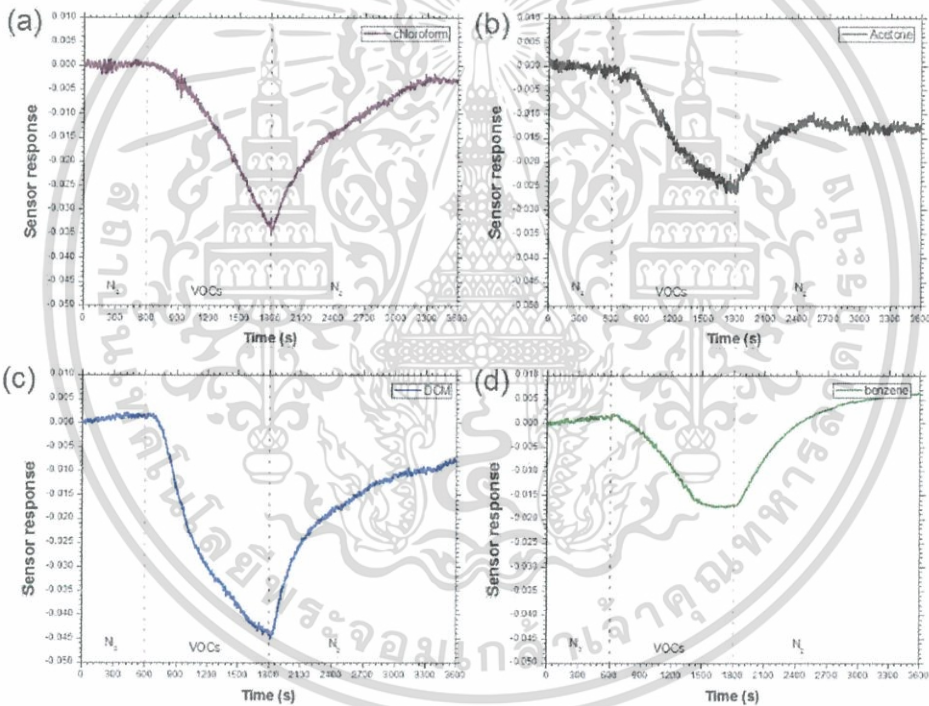
กราฟีนแบบยืดหยุ่น ต่อไอระเหยก๊าซเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน

จากภาพที่ 4. 13(a) แสดงกราฟการเปรียบเทียบการตอบสนองเฉลี่ยของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนแบบยืดหยุ่น ที่อยู่บนแผ่น PET ต่อไอระเหยอะซีโตน (a), คลอโรฟอร์ม (b), ไดคลอโรมีเทน (c), และเบนซีน (d) และภาพที่ 4. 13 (e) แสดงค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหยตรวจสอบแต่ละชนิด โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยทั้ง 4 ชนิดเป็นไปดังตารางที่ 4. 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4. 15 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ กราฟีนแบบยืดหยุ่น

ไอระเหยก๊าซ	ค่าความเข้มข้น (parts per million; ppt)
อะซีโตน	459.99
คลอโรฟอร์ม	300.96
ไดคลอโรมีเทน	253.97
เบนซีน	295.90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4. 13 แสดงผลการตอบสนองของเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหย (a) คลอโรฟอร์ม, (b) อะซีโตน, (c) ไดคลอโรมีเทน และ (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response ของเซนเซอร์กราฟีนต่อไอระเหยก๊าซแต่ละชนิด

จากภาพที่ 4. 13 (a-d) พบว่าก๊าซเซนเซอร์มีค่าการตอบสนองติดลบเพิ่มมากขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหย โดยมีการตอบสนองต่อไอดีคลอโรมีเทนมากที่สุด ตามมาด้วย คลอโรฟอร์ม อะซีโตน และ เบนซีน ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าก๊าซเซนเซอร์กราฟีนไม่สามารถกลับคืนสู่ค่าเริ่มต้นได้ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังทำการวัดไอระเหย ยกเว้นเบนซีน

จากตารางที่ 4. 16 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาฟื้นตัวของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนแบบยัดหยุ่นต่อก๊าซชนิดต่างๆ พบว่าก๊าซเซนเซอร์กราฟีนแบบยัดหยุ่นใช้เวลาในการตอบสนองต่อและใช้เวลาคืนตัวต่อเบนซีนน้อยที่สุด

ตารางที่ 4. 16 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนต่อก๊าซชนิดต่างๆ

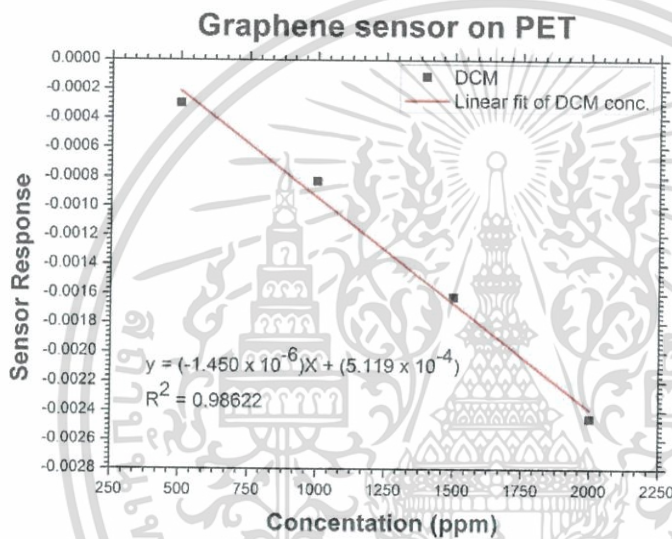
ไอระเหยก๊าซ	เวลาการตอบสนอง (s)	เวลาคืนตัว (s)
อะซีโตน	1008	-
คลอโรฟอร์ม	1096	-
ไอดีคลอโรมีเทน	962	-
เบนซีน	809	643

ซึ่งเมื่อตรวจสอบค่า Normalized sensor response พบว่ามีแนวโน้มค่าสอดคล้องกัน (ภาพที่ 4. 13(e)) แสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์กราฟีนมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อไอดีคลอโรมีเทนได้ดีที่สุดเมื่อความเข้มข้นของไอระเหยก๊าซทั้ง 4 ชนิดเท่ากัน โดยกลไกการตอบสนองของเซนเซอร์กราฟีนแบบยัดหยุ่นมีกลไกการตอบสนองเหมือนกับก๊าซเซนเซอร์กราฟีนบนแผ่น SiO_2/Si กล่าวคือ เกิดจากปรากฏการณ์การกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมคาร์บอน ที่บริเวณจุดบกพร่อง ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของกราฟีนเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของก๊าซตรวจสอบมีค่าลดลง ดังตารางที่ 4.5 ภาพที่ 4. 5 กลไกการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนและเกิดจากไอระเหยทั้ง 4 ชนิดมีสภาพขั้ว (Dielectric constant, ϵ_r) และขนาดของโมเลกุลที่ต่างกัน ทำให้เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีส่วนในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 การตอบสนองต่อไอระเหยของไดคลอโรมีเทนช่วงระดับความเข้มข้นระดับหนึ่งในล้าน ส่วนของก๊าซเซนเซอร์กราฟีน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์กราฟีนแบบยืดหยุ่น สามารถตอบสนองต่อไอระเหยไดคลอโรมีเทนได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติม ในการนำมาตรวจวัดไอระเหยไดคลอโรมีเทน ที่ความเข้มข้นในระดับล้านส่วน จากภาพที่ 4. 14 แสดงกราฟแนวโน้มความสัมพันธ์การตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนแบบยืดหยุ่นต่อไอระเหยไดคลอโรมีเทนในช่วงระดับ ppm โดยความเข้มข้นที่ใช้อยู่ในช่วง 500-2000 ppm

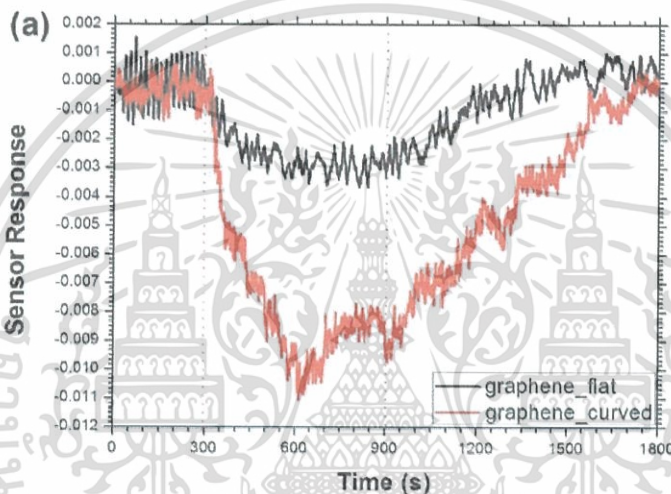


ภาพที่ 4. 14 กราฟแนวโน้มการตอบสนองไอระเหยก๊าซไดคลอโรมีเทนระดับความเข้มข้น 500, 1000, 1500 และ 2000 ppm ของก๊าซเซนเซอร์กราฟีน

จากภาพที่ 4. 14 พบว่าก๊าซเซนเซอร์มีค่าการตอบสนองแบบติดลบมากขึ้นเมื่อไอระเหยของไดคลอโรมีเทนที่ความเข้มข้นมากขึ้น นอกจากนี้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์กับค่าความเข้มข้นไอระเหยไดคลอโรมีเทนตรวจวัดออกมาเป็นสมการเส้นตรงได้ ซึ่งจากสมการนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าขีดจำกัดการตรวจวัดไอระเหยไดคลอโรมีเทนของเซนเซอร์กราฟีนได้อยู่ที่ 175.27 ppm

4.7.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อไอระเหยของไดคลอโรมีเทนของก๊าซ เซนเซอร์กราฟีนระหว่างแบบตรงและแบบโค้ง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์กราฟีนแบบยึดหยุ่น สามารถตอบสนองต่อไอระเหยไดคลอโรมีเทนได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติม ในการนำมาเซนเซอร์กราฟีนแบบยึดหยุ่น ลักษณะตรง กับลักษณะโค้งที่มีรัศมีความโค้ง 5 มม. มาตรวจวัดไอระเหยไดคลอโรมีเทนความเข้มข้น 10 ppt ภาพที่ 4. 15 แสดงกราฟการเปรียบเทียบการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์กราฟีนแบบยึดหยุ่น ที่อยู่บนแผ่น PET ระหว่างลักษณะตรง และลักษณะโค้ง ที่มีรัศมีความโค้ง 5 มม. ต่อไอระเหยไดคลอโรมีเทน



ภาพที่ 4. 15 แสดงผลการตอบสนองต่อก๊าซไดคลอโรมีเทนของเซนเซอร์กราฟีนแบบยึดหยุ่นลักษณะตรง และลักษณะโค้งงอ ที่มีรัศมีความโค้ง 5 มม.

พบว่าเมื่อนำก๊าซเซนเซอร์กราฟีนแบบยึดหยุ่นมาทำการตอบสนองต่อไอระเหยของไดคลอโรมีเทนมากขึ้นเมื่อลักษณะเซนเซอร์มีลักษณะโค้งงอ ที่มีรัศมีความโค้ง 5 มม. เมื่อเทียบกับแบบลักษณะตรง โดยสามารถตอบสนองได้ดีกว่าถึง 2.97 เท่า และยังสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อทำการไล่ไอระเหยไดคลอโรมีเทนด้วยไนโตรเจน แต่อย่างไรก็ตาม การนำเซนเซอร์แบบยึดหยุ่นไปใช้งานนั้น เซนเซอร์ในสภาพตรงและสภาพโค้งงอควรให้พบการตอบสนองที่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามต้องศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นนี้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

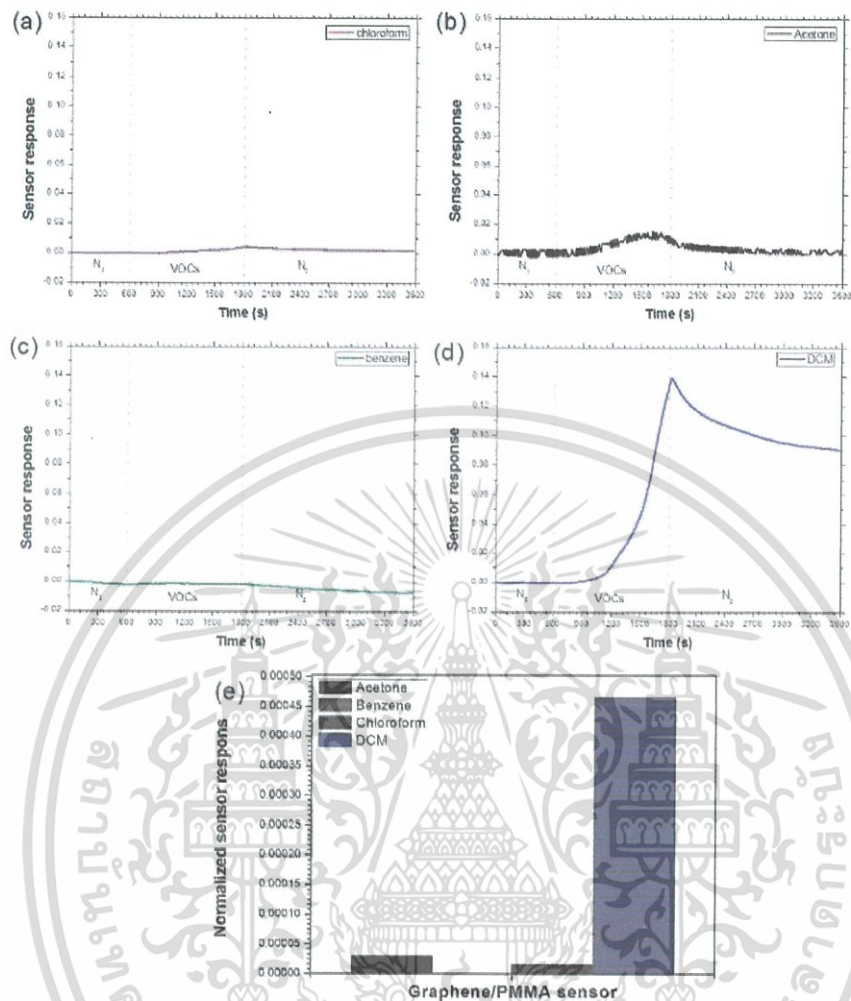
4.8 ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA บนแผ่น PET

4.8.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนสภาพของก๊าซเซนเซอร์วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA แบบยืดหยุ่น ต่อไอระเหยก๊าซอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน

ภาพที่ 4. 16 (a) แสดงกราฟการเปรียบเทียบการตอบสนองเฉลี่ยของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยอะซีโตน (a), คลอโรฟอร์ม (b), ไดคลอโรมีเทน (c), และเบนซีน (d) และภาพที่ 4. 16 (e) แสดงค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อก๊าซตรวจสอบแต่ละชนิด โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยทั้ง 4 ชนิดเป็นไปดังตารางที่ 4. 17

ตารางที่ 4. 17 ค่าความเข้มข้นไอระเหยชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA

ไอระเหยก๊าซ	ค่าความเข้มข้น (parts per million; ppt)
อะซีโตน	459.99
คลอโรฟอร์ม	253.97
ไดคลอโรมีเทน	300.96
เบนซีน	295.90



ภาพที่ 4. 16 แสดงผลการตอบสนองของเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อก๊าซ (a) คลอโรฟอร์ม, (b) อะซีโตน, (c) ไดคลอโรมีเทน และ (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response ของ Graphene/PMMA ต่อไอระเหยแต่ละชนิด

จากภาพที่ 4. 16 (a-d) พบว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA แบบยืดหยุ่นเมื่อสัมผัสกับไอระเหย ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์มีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าการตอบสนองต่อไอดีคลอโรมีเทน ได้ดีที่สุดในด้วย อะซีโตน คลอโรฟอร์ม และก๊าซเบนซีน ตามลำดับ โดยการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนนั้นน้อยมากจนแทบจะไม่สามารถตรวจวัดได้ เมื่อเทียบกับการตอบสนองต่อไอระเหยอีกทั้ง 3 ตัว ดังภาพที่ 4. 16 (e) นอกจากนี้พบว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ไม่สามารถกลับคืนสู่ค่าเริ่มต้นได้ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังจากตรวจวัดไอดีคลอโรมีเทน อีกทั้งยังพบว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ใช้เวลาในการตอบสนองและใช้เวลาคืนตัวต่อก๊าซอะซีโตนได้ดีที่สุด ดังตารางที่ 4. 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4. 18 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA ต่อก๊าซชนิดต่างๆ

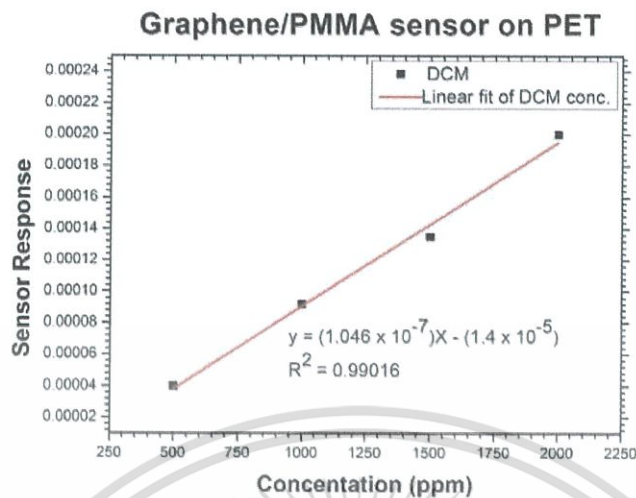
ไอระเหยก๊าซ	เวลาการตอบสนอง (s)	เวลาคืนตัว (s)
อะซีโตน	561	561
คลอโรฟอร์ม	1087	600
ไดคลอโรมีเทน	1149	-
เบนซีน	-	-

โดยหลักการการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA แบบยืดหยุ่นต่อการตรวจวัดไอระเหยสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการเดียวกันกับก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA บน SiO₂/Si คือ 1. การบวมตัวของพอลิเมอร์ (Polymer swelling) เนื่องจากไอระเหยก๊าซบางชนิดที่สามารถแทรกซึมเข้ากับพอลิเมอร์ PMMA โดยพบว่าค่า RED ของไอระเหยไดคลอโรมีเทนมีค่าน้อยที่สุด สอดคล้องกับผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ (ตารางที่ 4. 8) 2. ขนาดโมเลกุลของไอระเหย พบว่าไดคลอโรมีเทนมีขนาดโมเลกุลที่เล็กที่สุด (ตารางที่ 4.5) แสดงให้เห็นว่าขนาดโมเลกุลที่เล็กทำให้มาสารรถแทรกผ่านชั้นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นตาข่ายได้ ทำให้ก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA แบบยืดหยุ่นตอบสนองต่อไดคลอโรมีเทนได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่า RED น้อยที่สุดและมีขนาดโมเลกุลเล็กที่สุดด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าเซนเซอร์แทบจะไม่ตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนเลยเนื่องจากค่า RED ที่มีค่า เท่ากับ 1 อีกทั้งยังมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ที่สุด แสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์ PMMA ทำหน้าที่คัดเลือกระเหยในการตอบสนองโดยตอบสนองต่อไดคลอโรมีเทนดีที่สุด และทำการกั้นเบนซีน ทำให้เซนเซอร์ไม่ตอบสนองต่อเบนซีน

4.8.2 การตอบสนองต่อไอระเหยของอะซีโตนในช่วงระดับความเข้มข้นระดับหนึ่งในล้านส่วนของก๊าซเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA แบบยืดหยุ่นสามารถตอบสนองต่อไอระเหยไดคลอโรมีเทนได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติม ในการนำมาตรวจวัดไดคลอโรมีเทนที่ความเข้มข้นในระดับล้านส่วน จากภาพที่ 4. 17 แสดงกราฟความสัมพันธ์การตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA แบบยืดหยุ่น ต่อไอระเหยไดคลอโรมีเทนในช่วงระดับ ppm โดยความเข้มข้นที่ใช้อยู่ในช่วง 500-2000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



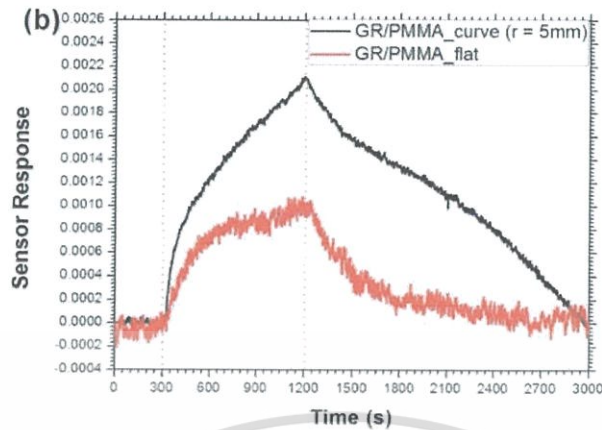
ภาพที่ 4. 17 กราฟแนวโน้มการตอบสนองไอระเหยไดคลอโรมีเทนระดับความเข้มข้น 500, 1000, 1500 และ 2000 ppm ของก๊าซเซนเซอร์ graphene/PMMA

จากภาพที่ 4. 17 พบว่าเมื่อนำก๊าซเซนเซอร์มีค่าการตอบสนองสูงขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของไดคลอโรมีเทนที่ความเข้มข้นมากขึ้น และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์กับค่าความเข้มข้นไอระเหยไดคลอโรมีเทนตรวจวัดออกมาเป็นสมการเส้นตรงได้ ซึ่งจากสมการนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าขีดจำกัดการตรวจวัดไอระเหยไดคลอโรมีเทนของเซนเซอร์ Graphene/PMMA ได้อยู่ที่ 72.46 ppm

4.8.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อไอระเหยของไดคลอโรมีเทนของก๊าซเซนเซอร์ไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ PMMA ระหว่างแบบตรงและแบบโค้ง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์ graphene/PMMA แบบยืดหยุ่นสามารถตอบสนองต่อไอระเหยก๊าซไดคลอโรมีเทนได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติม ในการนำมาเซนเซอร์ graphene/PMMA แบบยืดหยุ่นลักษณะตรง กับลักษณะโค้งที่มีรัศมีความโค้ง 5 มม. มาตรวจวัดก๊าซไดคลอโรมีเทน จากภาพที่ 4. 18 แสดงกราฟการเปรียบเทียบการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ graphene/PMMA แบบยืดหยุ่น ที่อยู่บนแผ่น PET ระหว่างลักษณะตรง และลักษณะโค้ง ที่มีรัศมีความโค้ง 5 มม. ต่อไอระเหยไดคลอโรมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4. 18 แสดงผลการตอบสนองต่อก๊าซไดคลอโรมีเทนของเซนเซอร์ graphene/PMMA แบบยืดหยุ่น ลักษณะตรง และลักษณะโค้งงอ ที่มีรัศมีความโค้ง 5 มม.

เมื่อนำก๊าซเซนเซอร์ graphene/PMMA แบบยืดหยุ่นมีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของไดคลอโรมีเทนมากขึ้นเมื่อลักษณะเซนเซอร์มีลักษณะโค้งงอ ที่มีรัศมีความโค้ง 5 มม. เมื่อเทียบกับแบบลักษณะตรง โดยสามารถตอบสนองได้ดีกว่าถึง 2.51 เท่า และยังสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อทำการไล่ไอระเหยไดคลอโรมีเทนด้วยไนโตรเจน แต่อย่างไรก็ตาม การนำเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นไปใช้งานนั้น เซนเซอร์ในสภาพตรงและสภาพโค้งงอควรให้พบการตอบสนองที่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามต้องศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นนี้ต่อไป

4.9 ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน ด้วยวัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ EC บนแผ่น PET

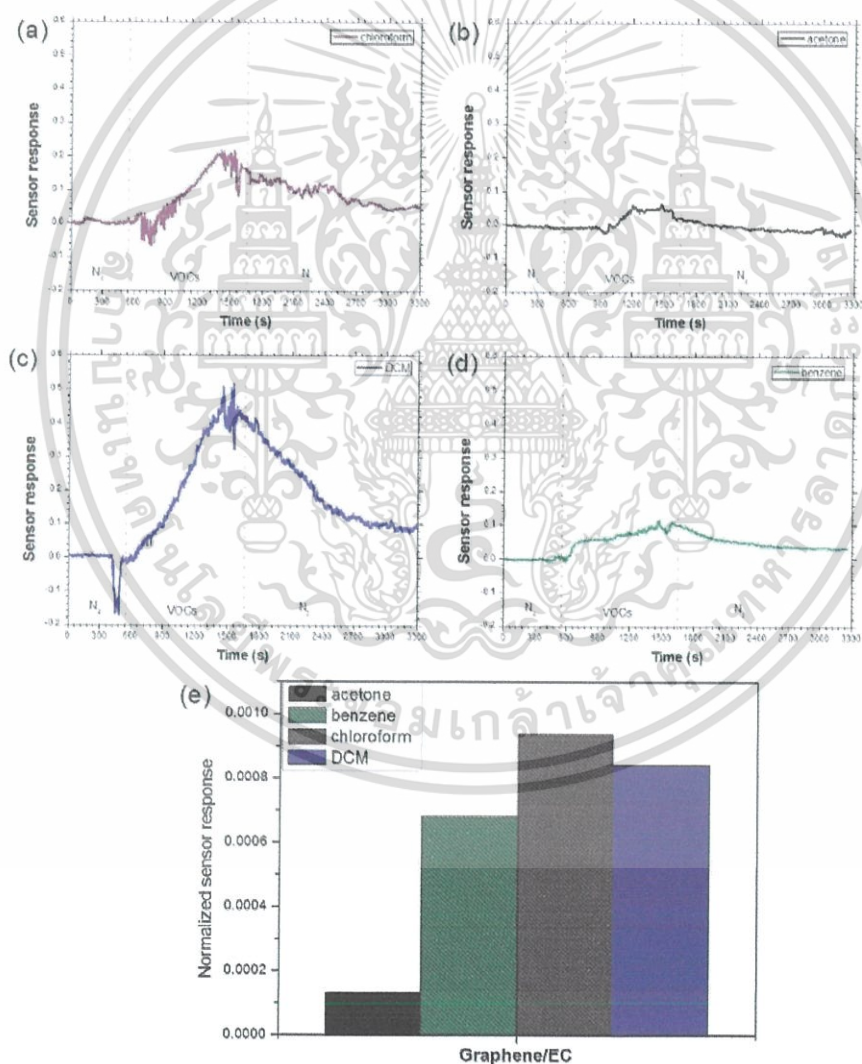
4.9.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนสภาพของก๊าซเซนเซอร์วัสดุไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์ EC แบบยืดหยุ่น ต่อไอระเหยก๊าซอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และเบนซีน

ภาพที่ 4. 19(a) แสดงกราฟการเปรียบเทียบการตอบสนองเฉลี่ยของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อไอระเหยอะซีโตน (a), คลอโรฟอร์ม (b), ไดคลอโรมีเทน (c), และเบนซีน (d) และภาพที่ 4. 19 (e) แสดงค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยทั้ง 4 ชนิดเป็นไปดังตารางที่ 4. 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4. 19 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC

ไอระเหยก๊าซ	ค่าความเข้มข้น (parts per million; ppt)
อะซีโตน	360.32
คลอโรฟอร์ม	145.64
ไดคลอโรมีเทน	514.61
เบนซีน	206.93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4. 19 แสดงผลการตอบสนองของเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อก๊าซ (a) คลอโรฟอร์ม, (b) อะซีโตน, (c) ไดคลอโรมีเทน และ (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response ของ Graphene/EC ต่อไอระเหยแต่ละชนิด

จากภาพที่ 4. 19 (a-d) พบว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC แบบยืดหยุ่นเมื่อสัมผัสกับไอระเหย ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์มีค่าสูงขึ้น โดยการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนนั้นน้อยมากจนแทบจะไม่สามารถตรวจวัดได้เมื่อเทียบกับการตอบสนองต่อไอระเหยอีกทั้ง 3 ตัว นอกจากนี้พบว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ไม่สามารถกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นได้ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังจกตรวจวัดคลอโรฟอร์ม แต่เมื่อนำมาคำนวณหาค่า Normalized sensor response ต่อไอระเหยตรวจสอบแต่ละชนิด พบว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC แบบยืดหยุ่นสามารถตอบสนองต่อไอระเหยทั้ง 4 ชนิดได้ โดยสามารถเรียงลำดับความสามารถในการตอบสนองจากมากไปน้อยได้ดังนี้ คลอโรฟอร์ม > ไดคลอโรมีเทน > เบนซีน > อะซีโตน ดังภาพที่ 4. 19 (e) แสดงว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC แบบยืดหยุ่นมีการตอบสนองต่อคลอโรฟอร์มได้ดีที่สุด ตามด้วย คลอโรมีเทน เบนซีน และอะซีโตน ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ใช้เวลาในการตอบสนองต่อคลอโรมีเทนได้ดีที่สุด ในขณะที่ใช้เวลากินตัวต่อเบนซีนได้ดีที่สุด ดังตารางที่ 4. 20

ตารางที่ 4. 20 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลากินตัวของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ

ไอระเหย	เวลาการตอบสนอง (s)	เวลากินตัว (s)
อะซีโตน	205	414
คลอโรฟอร์ม	164	-
ไไดคลอโรมีเทน	51	710
เบนซีน	82	343

โดยหลักการการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC แบบยืดหยุ่น ต่อไอระเหยก๊าซตรวจวัดสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการเดียวกันกับก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC บน SiO_2/Si คือ การบวมตัวของพอลิเมอร์ (Polymer swelling) เนื่องจากไอระเหยก๊าซบางชนิดที่สามารถละลายเข้ากันกับพอลิเมอร์ EC จากค่า RED โดยสามารถเรียงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ ไดคลอโรมีเทน > คลอโรฟอร์ม > เบนซีน > อะซีโตน (ตารางที่ 4. 11) แสดงให้เห็นว่าค่า RED ของก๊าซคลอโรฟอร์ม อะซีโตน และเบนซีน สอดคล้องกับผลการตอบสนอง แต่ไม่สอดคล้องกับผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ Graphene/EC ระหว่างก๊าซไไดคลอโรมีเทน

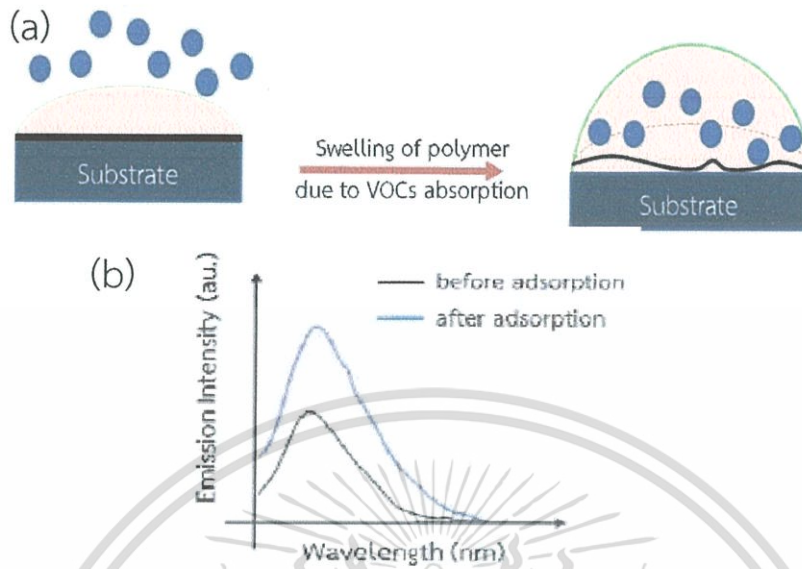
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับก๊าซคลอโรฟอร์ม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์ EC ทำหน้าที่คัดเลือกก๊าซในการตอบสนองได้ โดยตอบสนองต่อคลอโรฟอร์มดีที่สุด และทำการกั้นอะซีโตน ทำให้เซนเซอร์ไม่ตอบสนองต่ออะซีโตน

4.10 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโคปี เพื่อตรวจสอบกลไกการการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตน คลอโรฟอร์ม ไตคลอโรมีเทน และเบนซีน ระหว่างกราฟีนและไฮบริดกราฟีนและพอลิเมอร์แต่ละชนิดบนแผ่น PET

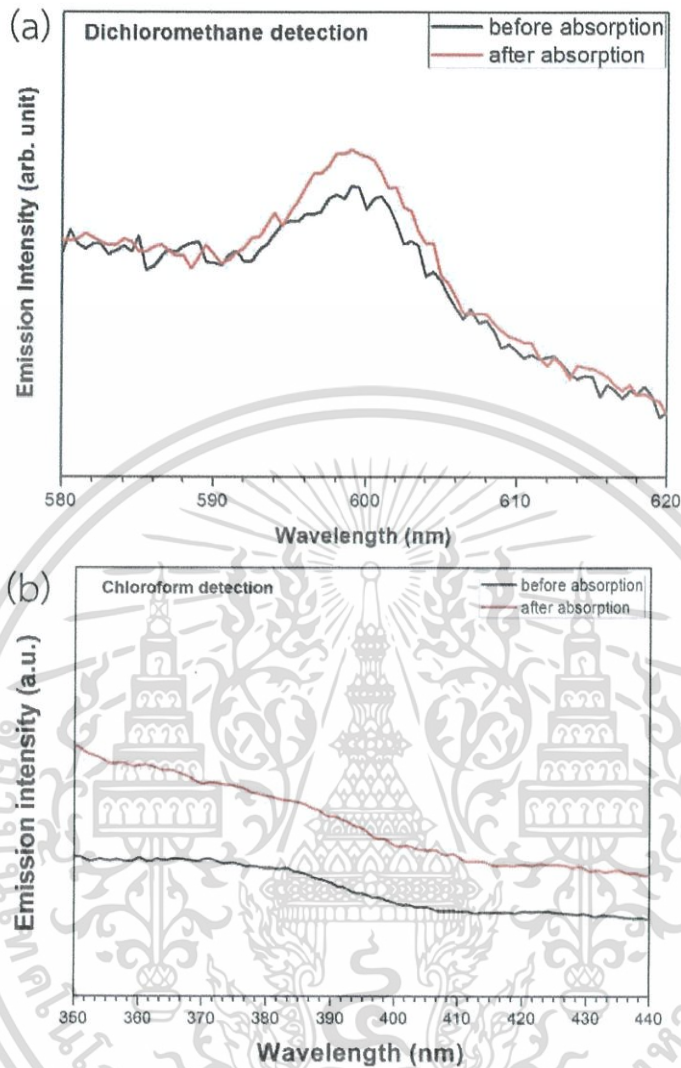
จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.7.1, 4.8.1 และหัวข้อ 4.9.1 แสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA และ Graphene/EC แบบยึดหยุ่น สามารถตอบสนองต่อไอระเหยไตคลอโรมีเทน และคลอโรฟอร์มได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติม ในการนำก๊าซเซนเซอร์ Graphene/PMMA และ Graphene/EC แบบยึดหยุ่น มาตรวจวัดไอระเหยด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโคปี เพื่อพิสูจน์กลไกการตอบสนองของกราฟีนที่ถูกเคลือบด้วยโพลีเมอร์ เป็นผลมาจากการบวมของพอลิเมอร์ อิเล็กตรอนในโมเลกุลของตัวอย่างถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต แสงที่ปล่อยออกมาจากตัวอย่างจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับพลังงานที่คืนคืนซึ่งมีพลังงานจำเพาะ โดยกระบวนการบวมของการดูดซับ VOC สู่อิเล็กตรอน ดังที่แสดงในภาพที่ 4. 20(a) ส่วนภาพที่ 4. 20(b) แสดงกราฟสเปกตรัมตัวอย่างที่ได้รับการวิเคราะห์ก่อนและหลังการสัมผัสสาร VOC ที่อิ่มตัวเป็นเวลา 10 นาที เนื่องจากหลังจากการดูดซับ VOC ชั้นพอลิเมอร์ถูกทำให้บวมและเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้สเปกตรัมความเข้มการปลดปล่อยเปลี่ยนแปลงไป [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4. 20 (a) แบบจำลองกระบวนการบวมของการดูดซับ VOC สู่พอลิเมอร์ และ (b) สเปกตรัมการปลดปล่อยก่อนและหลังการดูดซับ VOC

โดยภาพที่ 4. 21 แสดงการเปลี่ยนแปลงการเรืองแสงในแง่ของความเข้มในการปล่อยก๊าซของ (a) Graphene/PMMA ในการตอบสนองต่อไดคลอโรมีเทนที่อิ่มตัวโดยกระบวนการและ (b) Graphene/EC แบบยืดหยุ่นในการตอบสนองต่อคลอโรฟอร์มที่อิ่มตัวโดยกระบวนการ



ภาพที่ 4. 21 (a) การปลดปล่อยของเซนเซอร์ graphene/PMMA ในอากาศ (สีดำ) และหลังจากได้รับไอระเหยไดคลอโรมีเทน 10 นาที (สีแดง) และ (b) การปลดปล่อยของเซนเซอร์ graphene/EC ในอากาศ (สีดำ) และหลังจากได้รับไอระเหยคลอโรฟอร์ม 10 นาที (สีแดง)

จากภาพที่ 4. 21 (a) พบว่าเมื่อ graphene/PMMA เมื่อสัมผัสกับไอระเหยไดคลอโรมีเทนที่อุณหภูมิห้อง ความเข้มการปล่อยของกราฟีน ที่ 598 nm จะเพิ่มขึ้น 22.94% ส่วนภาพที่ 4. 21 (b) พบว่าเมื่อ graphene/EC เมื่อสัมผัสกับไอระเหยคลอโรฟอร์มที่อุณหภูมิห้อง ความเข้มการปล่อยของกราฟีน ที่ 374 nm จะเพิ่มขึ้น 46.63% การเพิ่มขึ้นของความเข้มของการปลดปล่อยแสงบ่งชี้ว่า VOC ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีเมอร์ที่ทำให้เกิดการบวมตัว ซึ่งทำให้เกิดการบิดตัวของกราฟีน เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างโพลีเมอร์และ VOC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยการประดิษฐ์วัสดุผสมกราฟีนลามิเนตและการประยุกต์ใช้งานด้านเซนเซอร์แบบยืดหยุ่น สำหรับตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย สรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. สามารถประดิษฐ์วัสดุผสมกราฟีนและพอลิเมอร์ลามิเนตบนแผ่น SiO_2/Si และ แผ่น PET ได้
2. ก๊าซเซนเซอร์บนแผ่นพลาสติกสามารถโค้งงอได้ แต่มีขนาดการตอบสนองเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า
3. ชนิดของพอลิเมอร์ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและขนาดของไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีผลต่อประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย
4. กลไกของการตอบสนองขึ้นกับความสามารถในการพองตัวของพอลิเมอร์กับไอระเหยนั้นๆ
5. ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายของวัสดุผสมกราฟีนและพอลิเมอร์สามารถสรุปได้ดังนี้

วัสดุเซนเซอร์	ไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่สามารถตอบสนองได้สูงสุด
กราฟีน	คลอโรมีเทน
กราฟีน-PMMA	อะซีโตน
กราฟีน-EC	คลอโรฟอร์ม
กราฟีน-isoprene	เบนซีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง

- 1) Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, *et al.*, Electric field effect in atomically thin carbon films, *SCIENCE*, 306, 666-669, 2004
- 2) Hernandez Y, Nicolosi V, Lotya M, *et al.*, High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite, *Nature Nanotechnology* 3, 563, 2008
- 3) Li X, Cai W, An J, *et al.*, Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils, *SCIENCE*, 324, 1312, 2009
- 4) Kim KS, Zhao Y, Jang H, *et al.*, Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes, *Nature*, 457, 706, 2009
- 5) Lin WH, Chen TH, Chang JK, *et al.*, A Direct and Polymer-Free Method for Transferring Graphene Grown by Chemical Vapor Deposition to Any Substrate, *ACS Nano*, 8, 1784, 2014
- 6) Barin GB, Song Y, Gimenez ID, *et al.*, Optimized graphene transfer: Influence of polymethylmethacrylate (PMMA) layer concentration and baking time on graphene final performance, *Carbon*, 84, 82, 2015
- 7) Wood JD, Doidge GP, Carrion EA, *et al.*, Annealing free, clean graphene transfer using alternative polymer scaffolds, *Nanotechnology*, 26, 055302, 2015
- 8) Vlassiok I, Polizos G, Cooper R, *et al.*, Strong and Electrically Conductive Graphene-Based Composite Fibers and Laminates, *ACS Applied Materials Interfaces*, 7, 10702, 2015
- 9) Schedin F, Geim AK, Morozov SV, *et al.*, Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene, *Nature*, 6, 652, 2007
- 10) Yavari F, Castillo E, Gullapalli H, *et al.*, High sensitivity detection of NO₂ and NH₃ in air using chemical vapor deposition grown graphene, *Applied Physics Letter*, 100, 203120, 2012
- 11) Yavari F, Chen Z, Thomas A V, *et al.*, High sensitivity gas detection using a macroscopic three-dimensional graphene foam network, *Scientific Reports*, 1, 166, 2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 12) Lu G, Ocola LE and Chen J, Reduced graphene oxide for room-temperature gas sensors *Nanotechnology*, 20, 445502, 2009
- 13) Huang QW, Zeng DW, Li HY, Room temperature formaldehyde sensors with enhanced performance, fast response and recovery based on zinc oxide quantum dots/graphene nanocomposites, *NANOSCALE*, 4, 5651, 2012
- 14) Hasani A, Dehsari HS, Gavvani, JN, Sensor for volatile organic compounds using an interdigitated gold electrode modified with a nanocomposite made from poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) and ultra-large graphene oxide, *MICROCHIMICA ACTA*, 182, 1551, 2015
- 15) Song HJ, Zhang LC, He CL, *et al.* Graphene sheets decorated with SnO₂ nanoparticles: in situ synthesis and highly efficient materials for cataluminescence gas sensors, *JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY*, 21, 5972, 2011
- 16) Wang XN, Sun XL, Hu PA, *et al.*, Colorimetric Sensor Based on Self-Assembled Polydiacetylene/Graphene-Stacked Composite Film for Vapor-Phase Volatile Organic Compounds, *ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS*, 23, 6044, 2013
- 17) Zhang H, Kulkarni A, KIM H, *et al.*, Detection of Acetone Vapor Using Graphene on Polymer Optical Fiber, *JOURNAL OF NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY*, 11, 5939, 2011
- 18) Tung TT, Cuong PH, Janowska I, *et al.*, Hybrid Films of Graphene and Carbon Nanotubes for High Performance Chemical and Temperature Sensing Applications, *SMALL*, 11, 3485, 2015
- 19) Tran TT, Castro M, Kim TY, *et al.*, High stability silver nanoparticles-graphene/poly(ionic liquid)-based chemoresistive sensors for volatile organic compounds' detection, *ANALYTICAL AND BIOANALYTICAL CHEMISTRY*, 406, 3995, 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับจากการทำโครงการวิจัย

การนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Chanoknan Rattanabut, Worawut Muangrat, Win Bungjongpru, Mayuree Phonyiem, Winadda Wongwiriyan, Young Jae Song, Graphene and Poly(Methyl Methacrylate) Composite Laminates on Flexible Substrates for Volatile Organic Compounds Detection, 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), September 19 -22, 2017, Sendai, Japan (Poster presentation)

บทความวิจัย ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

(1) C. Rattanabut, W. Wongwiriyan, W. Muangrat, W. Bungjongpru, M. Phonyiem, and Y. J. Song: "Graphene and poly(methyl methacrylate) composite laminates on flexible substrates for volatile organic compounds detection" *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 04FP10 (2018).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Graphene and Poly(Methyl Methacrylate) Composite Laminates on Flexible Substrates for Volatile Organic Compounds Detection

Chanoknan Rattanabut¹, Worawut Muangrat², Win Bungjongpru³, Mayuree Phonyiem¹,
Winadda Wongwiriyanon^{1*} and Young Jae Song³

¹ College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
Phone: +81-2-329-8000 ext 3074 E-mail: winadda.wo@kmitl.ac.th

² Inst. Carbon Sci. Tech., Shinshu Univ.
Wakasato, Nagano 380-8553, Japan

³ Thai Microelectronics Center, National Electronics and Computer Technology Center
Suwinthawong Rd., Chachoengsao 24000, Thailand

⁴ SKKU Advanced Inst. Nanotech. (SAINT), Sungkyunkwan Univ.
Suwon 440-746, Korea

Abstract

In this study, graphene and poly(methyl methacrylate) (GR/PMMA) composite laminates on flexible substrates were fabricated for the use in volatile organic compounds detection. The CVD-grown graphene on Cu foil was transferred on polyethylene terephthalate (PET) substrate by PMMA-assisted wet transfer process. Without PMMA removal, the GR/PMMA composite laminates on PET were obtained. Graphene and GR/PMMA sensors show completely different sensor response to VOC vapors. The resistance of graphene sensor decreases, while that of GR/PMMA increases upon VOC exposure. The graphene and GR/PMMA sensors show the highest magnitude of sensor response to dichloromethane. The sensor response of the GR/PMMA to acetone, chloroform and benzene are greatly suppressed, resulting in the selectivity improvement. The sensor response of graphene can be explained in terms of the dielectric constant of VOCs and electron hopping effects on defect graphene, while that of the GR/PMMA would be attributed to swelling mechanism.

1. Introduction

Recently, graphene, a perfect two-dimensional structure with a one layer of carbon atoms, have been interesting materials for gas sensor applications, due to its high charge mobility and thermal conductivity, high degree of transparency, as well as mechanical flexibility [1-2]. To use the chemical vapor deposition (CVD)-grown graphene on Cu foil for the device application, the polymer-assisted wet transfer process is employed to transfer graphene onto arbitrary substrate. However, graphene was degraded according to wrinkles, cracks and the residues of the metal and the supporting polymers during transfer process [3]. To overcome this problem, utilization of the graphene and supporting polymer composite and maximizing their property is a challenge [4-5].

In this research, to overcome the transfer issues and exploring the use of graphene and polymer composites to flexible device fabrication, graphene and poly(methyl methacrylate) composite laminates on polyethylene terephthalate (PET) substrates was fabricated for volatile organic compounds (VOC) detection.

2. Experimental method

The CVD-growth procedure of graphene on Cu foil was described elsewhere [6]. In preparing sensor on flexible substrate, graphene was transferred to PET by conventional PMMA-assisted wet transfer process. Briefly, PMMA (Mitsubishi Chemical, 950PMMA A6) was spin-coated onto the graphene as a supporting layer with a spin speed of 6000 rpm for 300 s. The sample was then cured by heating on a hot plate at 100 °C for 24 hr. The Cu foil was etched away using a 1 M ferric (III) chloride solution. The sample was rinsed in deionized water for 10 min. Finally, the sample was transferred onto the PET substrate and dried at room temperature, resulting in transferred graphene and PMMA composite laminates on PET (hereafter referred to as GR/PMMA). Regarding sensor based on graphene, PMMA was removed by soaking in acetone at 150 °C for 5 min, followed by N₂ drying. The Ag paste with Cu wires were used as the contact electrodes for the sensing characterization with the sensing of 1x0.5 cm².

The sensor responses to VOCs (acetone, benzene, chloroform and dichloromethane (DCM)) were investigated at room temperature by recording the electrical resistance during cycles of alternating supply of dry N₂ gas and VOC vapor. The concentration of VOCs was in a range of 50 to 50 parts per thousand (ppt). The sensor response (SR) was defined as $SR = (R_{VOC} - R_0) / R_0$, where R_{VOC} and R_0 are the resistances of the sensor after and before VOC exposure, respectively. To compare the responses of all sensors, the sensor responses were normalized by the VOC concentration. The normalized sensor response (NSR) was defined as the ratio between the sensor response at a time of 540 s (SR_{540}) and the VOC concentration (C_{VOC}) as $NSR = SR_{540} \cdot C_{VOC}$.

3. Results and Discussion

Fig. 1a-1b show sensor responses as a function of time of the graphene and GR/PMMA sensors under alternating supply of N₂ gas and VOC vapor, respectively. The results show that the resistance of graphene sensor decreased upon VOCs

exposure and increased after recovery with N_2 gas. Meanwhile, the resistance of the GR/PMMA increased and decreased upon VOC exposure and after replacing VOC with N_2 gas, respectively. Fig. 1c shows the normalized sensor response of graphene and GR/PMMA sensor to VOC vapors. The order of the sensor response magnitude of graphene sensors is in the following order: DCM > chloroform > acetone > benzene, while that of the GR/PMMA is in the following order: DCM >> acetone > chloroform > benzene. Interestingly, the sensor response of the GR/PMMA sensors to DCM significantly increased, while those to acetone, chloroform and benzene were mostly suppressed. These results imply that the PMMA layer acts as a membrane to select VOC molecules, resulting in the selectivity improvement [7].

The sensing mechanism of the graphene to VOCs is attributed to the adsorption of VOC molecule on the defect site. Charge transfer on graphene by electron hopping effects on graphene sheet results in a decrease in electrical resistance of graphene [8]. For the GR/PMMA, the sensing mechanism can be ascribed to polymer swelling due to VOC adsorption and Hansen solubility parameter (HSP). A hypothesis based on polymer swelling can be described as follows. After VOC adsorption, polymer coatings on graphene is swollen, thus possibly increasing the polymer volume and bending of graphene sheet, resulting in an increase in electrical resistance [9]. The higher solubility, the larger magnitude of sensor response. The solubility of the vapors in PMMA is in the following order: DCM >> acetone > chloroform > benzene [10], which coincides with the sensor response. Moreover, the difficulty of the GR/PMMA to recover to baseline after DCM exposure indicates the high solubility of DCM.

3. Conclusions

In summary, we successfully fabricated graphene and PMMA composite laminates on PET substrate for the use in VOC detection. The graphene and GR/PMMA sensors show the highest magnitude of sensor response to dichloromethane in the opposite signal. The sensor response of the GR/PMMA to acetone, chloroform and benzene are greatly suppressed, resulting in the selectivity improvement. These preliminary results show the potential use of the graphene and GR/PMMA array for VOC discrimination.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge fundings from the National Research Council of Thailand Grant A118-0260-083.

References

- [1] S. M. Kanan, O. M. El-Kadri, I. A. Abu-Yousef, and M. C. Kanan, *Sensors* **9** (2009) 8158–8196.
- [2] A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, and C. N. Lau, *Nano Lett.* **8** (2008) 902–907.
- [3] G. B. Barin, Y. Song, I. F. Gimenez, A. G. S. Filho, L. S. Barreto, J. Kong, *Carbon* **84** (2015) 82–90.
- [4] P. Y. Teng, C. C. Lu, K. Akiyama-Hasegawa, Y. C. Lin, C. H. Yeh, K. Suenaga, and P. W. Chin, *Nano Lett.* **12** (2012) 1379–1384.

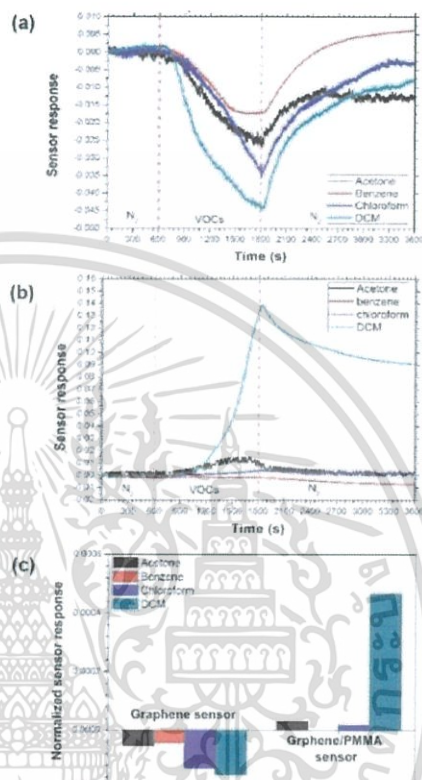


Fig. 1 Sensor responses to acetone (477.55 ppt), chloroform (253.97 ppt), dichloromethane (300.96 ppt) and benzene (295.90 ppt) as functions of time (a) graphene and (b) GR/PMMA. (c) Normalized sensor response of graphene and GR/PMMA sensor to VOC vapors

- [5] I. Vlassioutk, G. Polizo, R. Cooper, I. Ivanov, J. K. Keum, F. Paulauskas, P. Datskos, and S. Smirnov, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7** (2015) 10702–10709.
- [6] Q. Wu, S. J. Jung, S. K. Jang, J. Lee, J. Jeon, H. Suh, Y. H. Kim, Y. H. Lee, S. Lee, Y. J. Song, *Nanoscale*, **7** (2015) 10357–10361.
- [7] J. Hong, S. Lee, J. Seo, S. Pyo, J. Kim, and T. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7** (2015) 3554–3561.
- [8] G. Lee, G. Yang, A. Cho, J. W. Han, J. Kim, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18** (2016) 14198–14204.
- [9] W. Muangrat, T. Chodjarusawad, R. Maolanon, S. Pratontep, S. Ponthearaphat, W. Wongwinyapan, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55** (2016) 02BD04.
- [10] C. M. Hansen, *The three dimensional solubility parameter and solvent diffusion coefficient: Their importance in surface coating formulation*, Danish Technical Press, (1967).

REGULAR PAPERS

Graphene and poly(methyl methacrylate) composite laminates on
flexible substrates for volatile organic compound detectionTo cite this article: Chanoknan Rattanabut et al 2018 *Jpn. J. Appl. Phys.* 57 04FP10View the [article online](#) for updates and enhancements.

This content was downloaded from IP address 161.246.144.181 on 18/03/2018 at 11:34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Graphene and poly(methyl methacrylate) composite laminates on flexible substrates for volatile organic compound detection

Chanoknan Rattanabuti¹, Winadda Wongwiriyapan^{1*}, Worawut Muangrat², Win Bunjongpru³, Mayuree Phonyiem¹, and Young Jae Song⁴

¹College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Institute of Carbon Science and Technology, Shinshu University, Nagano 380-8553, Japan

³Thai Microelectronics Center, National Electronics and Computer Technology Center, Chachoengsao 24000, Thailand

⁴SKKU Advanced Institute of Nanotechnology (SAINT), Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Republic of Korea

*E-mail: winadda.wo@kmitl.ac.th

Received October 10, 2017; accepted January 10, 2018; published online March 15, 2018

In this paper, we present a gas sensor for volatile organic compound (VOC) detection based on graphene and poly(methyl methacrylate) (GR/PMMA) composite laminates fabricated using CVD-grown graphene. Graphene was transferred to a poly(ethylene terephthalate) (PET) substrate by PMMA-supported wet transfer process without PMMA removal in order to achieve the deposition of GR/PMMA composite laminates on PET. The GR/PMMA and graphene sensors show completely different sensitivities to VOC vapors. The GR/PMMA and graphene sensors showed the highest sensitivities to dichloromethane (DCM). The response of the GR/PMMA sensor to DCM was 3 times higher than that of the graphene sensor but the GR/PMMA sensor hardly responded to acetone, chloroform, or benzene. The sensing mechanism of the graphene sensor can be based on the dielectric constant of VOCs, the size of VOC molecule, and electron hopping effects on defect graphene, while that of the GR/PMMA sensor can be explained in terms of the polymer swelling owing to the Hansen solubility parameter. © 2018 The Japan Society of Applied Physics

1. Introduction

Volatile organic compounds (VOCs) are organic chemicals that have a high vapor pressure at room temperature, and they are found in many industrial and commercial processes.¹⁾ In addition, VOCs are the main causes of air pollution and are harmful to our health causing disorders, such as eye, nose, and throat irritations, dizziness, vomiting, and unconsciousness; they can also damage the liver and central nervous system, and present a risk of cancer.²⁻⁵⁾ From the report of the Pollution Control Department, Thailand in 2015, there were various VOCs whose concentrations were higher than the standard concentrations such as benzene, chloroform, 1,3-butadiene, and 1,2-dichloroethane. The gas sensor technology for VOC detection has gained more attention, because of its applicability to real-time monitoring, device portability, and low cost. Commercial VOC gas sensors fabricated using metal oxide materials have detection limits down to the parts per million (ppm) level, but the disadvantages are their slow response, nonselectivity, and high operating temperature (>200 °C).⁶⁾

Graphene has a perfect two-dimensional structure with a one layer of carbon atoms. The main synthesis method for graphene is chemical vapor deposition (CVD) due to the controllable quality of graphene (monolayer graphene coverage, >95%), large growth area (>30 in.²), and ease to scale-up for industrial production. In the typical CVD growth of graphene, metals such as Cu, Ni, Pt, and Ir are used as the growth substrate, and methane and ethylene as carbon sources. The application of graphene requires graphene transfer onto arbitrary substrates using a polymer-assisted wet transfer process. For example, graphene was transferred onto SiO₂/Si for transistor devices, GaN for light-emitting diodes (LED), conducting glass for dye-sensitized solar cells, and flexible substrates for flexible devices.⁷⁻¹¹⁾ However, the transfer process has many drawbacks including the requirement of the polymer coating in the beginning of the process and the removal of polymer

residues in the final process, which as a time-consuming process, especially in wrinkled and cracked graphene.¹²⁾ Therefore, the utilization of graphene and its supporting polymer composite and maximizing their properties are challenges that should be.¹³⁾

Recently, graphene has been regarded as an interesting material for gas sensor applications owing to its unique characteristics, such as its high charge mobility and thermal conductivity, high transparency, as well as mechanical flexibility.^{14,15)} Gas sensors based on graphene have been demonstrated to be sensitive to oxidizing gases on the order of parts per billion (ppb) at room temperature.^{16,17)} In addition, Hong et al.¹⁸⁾ demonstrated the fabrication of a gas sensor by the functionalization of poly(methyl methacrylate) (PMMA) and palladium nanoparticles (Pd NPs) with single-layer graphene (SLG) for selectivity to hydrogen gas. Their results showed that the PMMA layer acts as a gas-selective filtration layer. Moreover, the flexible sensor was applicable to a broad range of systems with demanding mechanical flexibility and durability. For example, Chung et al.¹⁹⁾ demonstrated the fabrication of flexible hydrogen sensors using graphene with palladium nanoparticle.

To overcome the transfer issues and exploring the use of graphene and polymer composite laminates for flexible device fabrication, graphene and poly(methyl methacrylate) (GR/PMMA) composite laminates on poly(ethylene terephthalate) (PET) substrates for volatile organic compound (VOC) detection have been proposed.²⁰⁾ The GR/PMMA sensor showed a high sensitivity to dichloromethane (DCM), a low sensitivity to acetone, and chloroform, and non-response to benzene, implying that the PMMA layer acts as a membrane that is selective to DCM molecules. In addition to our previous work, the relationships between the response of the sensors and DCM concentration were studied. Moreover, to understand the sensing mechanism based on the swelling phenomenon, the emission properties of the GR/PMMA and graphene sensors in response to VOC exposure were characterized by fluorescence spectroscopy.

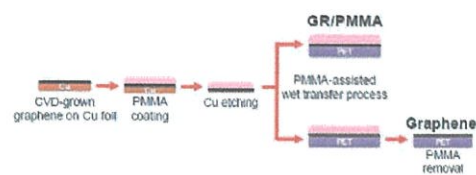


Fig. 1. (Color online) Schematic diagram of sensor fabrication process for the GR/PMMA and graphene sensors.

2. Experimental methods

2.1 Fabrication of GR/PMMA and graphene on PET substrate

Graphene was grown on Cu foil by the CVD method using methane (CH_4) as a carbon source. The process of the CVD growth of graphene was described in detail elsewhere.²¹⁾ For the fabrication of the sensor on a PET substrate, the graphene layer was transferred to PET by a conventional PMMA-assisted wet transfer process. PMMA (Microchem 950PMMA A6) was coated onto the graphene layer as supporting layer by spin coating at a spin speed of 6000 rpm for 300 s. Then, the sample was heated at 100 °C for 24 h on a hot plate. To remove Cu, the Cu foil was etched away using 1 M ferric (III) chloride solution. Then, the sample was rinsed three times in deionized water for 10 min. Finally, the sample was transferred to the PET substrate and dried at room temperature, resulting in transferred graphene and PMMA composite laminates on PET (hereafter referred to as GR/PMMA). The adhesion between the sample and the PET substrate was improved by heating on a hot plate at 85 °C for 30 min. Regarding the sensor based on graphene, PMMA was removed by soaking in acetone at 150 °C for 5 min, followed by N_2 drying. The contact electrodes were formed using Ag paste with Cu wires for sensing characterization at the sensing of $1 \times 0.5 \text{ cm}^2$. Figure 1 shows a schematic diagram of fabrication process of the GR/PMMA and graphene-based sensors. Since graphene can moderate the color contrast on SiO_2 caused by light interference,²²⁾ the graphene and GR/PMMA layers were also transferred on a SiO_2/Si substrate for graphene identification.

2.2 Characterization of GR/PMMA and graphene

The transferred graphene and GR/PMMA layers were characterized by optical microscopy (Olympus EX51). The carbon structure and thickness of graphene and GR/PMMA were characterized by Raman spectroscopy (Thermo SCIENTIFIC DXR) at an Ar ion laser wavelength of 532 nm (2.33 eV). The emission property of the GR/PMMA layer due to VOC exposure was characterized by fluorescence spectroscopy (Perkin Elmer LS55).

2.3 Gas sensor measurement

The sensor response to acetone, benzene, chloroform, and DCM were investigated at room temperature by recording electrical resistance using a FLUKE NetDAQ logger during cycles of alternating supply of dry N_2 gas and VOC vapor. The concentrations of VOCs were in the range from 500 parts per million (ppm) to 160 parts per thousand (ppt). N_2 gas was introduced into the chamber at a flow rate of 3.0 lpm for 10 min as the baseline. Then, N_2 was released with VOC by bubbling liquid VOC with N_2 carrier gas at a flow rate of

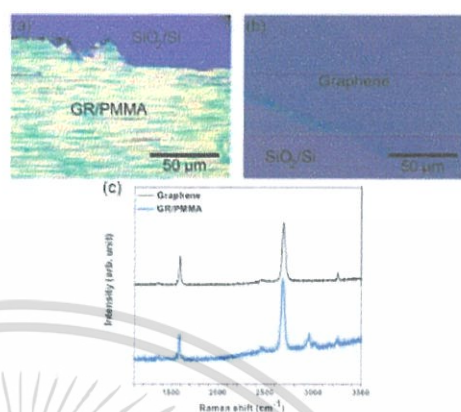


Fig. 2. (Color online) Optical microscopy images of (a) GR/PMMA and (b) graphene layers on SiO_2/Si . (c) Raman spectra of the GR/PMMA and graphene layers.

1.5 lpm for 20 min. Finally, the sensors were recovered under N_2 for 30 min. Sensor response (SR) was defined as

$$SR = \frac{R_{VOC} - R_0}{R_0} \quad (1)$$

where R_0 and R_{VOC} are the sensor resistance before and after VOC exposure, respectively. To compare the responses of all sensors, the sensor responses were normalized by VOC concentration. The normalized sensor response (NSR) was defined as the ratio of the sensor response at 1200 s (SR_{1200}) to VOC concentration (C_{VOC}):

$$NSR = \frac{SR_{1200}}{C_{VOC}} \quad (2)$$

3. Results and discussion

3.1 Characterization of GR/PMMA and graphene

The surface morphologies of the GR/PMMA and graphene layers on SiO_2/Si are characterized on the basis of optical microscopy images shown in Figs. 2(a) and 2(b), respectively. Two different areas of GR/PMMA and SiO_2/Si (the light green and violet areas, respectively) are clearly observed in Fig. 2(a). On the other hand, the dark and bright violet areas in Fig. 2(b) correspond to graphene and SiO_2/Si , respectively. These results show that the GR/PMMA and graphene layers were successfully transferred by the wet transfer process. The carbon structure, purity, and crystallinity of the GR/PMMA and graphene layers were analyzed by Raman spectroscopy. Figure 2(c) shows the Raman spectra obtained from the GR/PMMA and graphene layers. The graphene layer clearly shows G and 2D peaks at approximately 1590 and 2682 cm^{-1} , respectively. The G peak arises from primary sp^2 hybridized carbon bonds in graphene and the 2D peak arises from the second order of the D band, which is related to zone boundary defects.^{23,24)} In addition to the G and the 2D peaks, the GR/PMMA layer shows the PMMA peak at a Raman shift of 2954 cm^{-1} due to the PMMA coating.²⁵⁾ The D band arising from defects is very small in both samples. The number of graphene layers can be

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

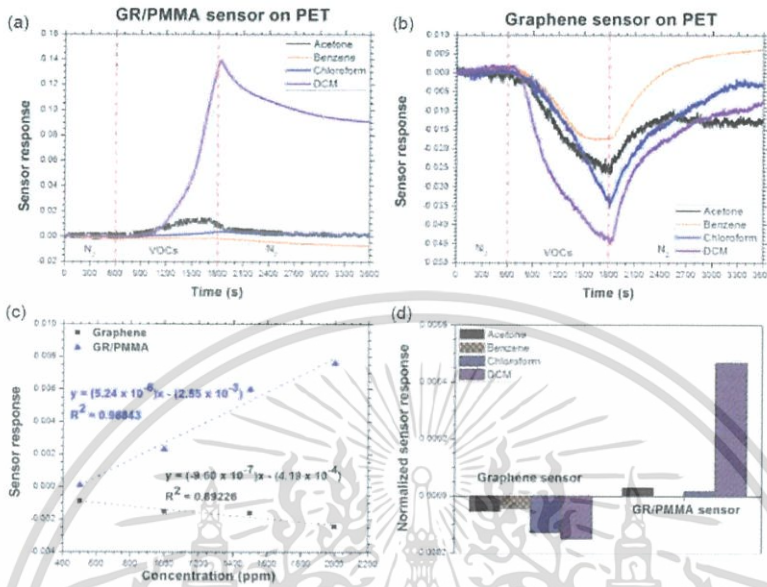


Fig. 3. (Color online) Sensor responses of (a) GR/PMMA and (b) graphene sensors to acetone (160 ppt), benzene (100 ppt), chloroform (85 ppt), and dichloromethane (100 ppt) as functions of exposure duration. (c) Normalized sensor response of each sensor. (d) Sensor responses of the GR/PMMA and graphene sensors as a function of DCM concentration.

inferred from the ratio of I_{D} to I_{G} .^{26–29)} The I_{D}/I_{G} ratio of the GR/PMMA and graphene layers were 2.14 and 2, respectively. These results imply that graphene is a single layer.

3.2 Gas sensing properties

Figures 3(a) and 3(b) show sensor responses as a function of duration of exposure of the GR/PMMA and graphene sensors to each of the VOCs of different concentrations [acetone (160 ppt), benzene (100 ppt), chloroform (85 ppt), and DCM (100 ppt)]. The initial resistances of the GR/PMMA and graphene sensors between electrodes are approximately 1.10 and 10.75 k Ω , respectively. The increase in the initial resistance of the graphene sensor may be due to the degradation during polymer removal, which caused the wrinkling or cracking of the graphene sheet. After VOC exposure, the resistances of the GR/PMMA and graphene sensors changed in the opposite direction, namely, the resistance of the GR/PMMA sensor increased, while that of the graphene sensor decreased. For example, in the case of DCM exposure, the resistance of the GR/PMMA sensor increased to 1.25 k Ω while that of the graphene sensor decreased to 10.30 k Ω . Figure 3(a) shows that the resistance of the GR/PMMA gas sensors increases upon exposure to VOC vapors for 20 min at room temperature and then slowly decreases after restoration of N₂ gas for 30 min. On the other hand, the electrical resistance of the graphene sensor decreases upon VOC exposure and increased after recovery with N₂ gas for 30 min [Fig. 3(b)]. It is seen the GR/PMMA sensor exhibits the highest response to DCM at room temperature but cannot recover owing to DCM absorption in the PMMA layer. Figure 3(c) show the normalized sensor

response of the GR/PMMA and graphene sensors. The normalized sensor response of both GR/PMMA and graphene sensors was highest for DCM. The response of the GR/PMMA sensor to DCM was three-times higher than that of the graphene sensor. In addition, the GR/PMMA sensor showed low responses to acetone, and chloroform, and hardly any response to benzene. On the other hand, the graphene sensor responded to all VOC vapors, including DCM, acetone, chloroform, and benzene. The order of the sensor response magnitudes of graphene sensors is: DCM > chloroform > acetone > benzene, while that of the GR/PMMA sensor is: DCM \gg acetone > chloroform > benzene. These results imply that the GR/PMMA sensor was highly sensitive to DCM and the PMMA layer acts as a membrane selective to VOCs, implying high DCM selectivity against these gases.¹⁸⁾

Figure 3(d) shows the responses of the GR/PMMA and graphene sensors as a function of four different concentrations of DCM at room temperature. The sensing characteristic was recorded at concentrations of 500, 1000, 1500, and 2000 ppm. The sensor responses at various DCM concentrations showed a linear relationship. The sensor response of the graphene sensor increased with increasing concentration. Conversely, the sensor response of the GR/PMMA sensor decreased with increasing concentration.

The lowest detectable concentration was limited by the existing experimental setup. However, the limit of detection (LOD) can be derived from the signals of sensor performance.³⁰⁾ According to the IUPAC definition, when the signal-to-noise ratio is equal to 3, the signal is considered to be a true signal. Therefore, the LOD can be evaluated from the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

linear calibration curve when the signal is equal to 3 times noise level. The calculation of LOD is as follows; the sensor noise is derived using the variation in the sensor response at the baseline before vapor exposure and the root-mean-square deviation (rms). 300 data points at the baseline before vapor exposure were plotted and fitted by a fifth-order polynomial. The deviation is calculated as

$$V_{x^2} = \sum (y_i - y)^2, \quad (3)$$

where y_i is the measured value of the sensor response baseline and y is the corresponding value calculated from the fifth-order polynomial fit. Then, rms noise is obtained as

$$\text{rms}_{\text{noise}} = \sqrt{\frac{V_{x^2}}{N}}, \quad (4)$$

where N is the number of data points used for curve fitting ($N = 300$). Finally, the LOD can be calculated as

$$\text{LOD} = 3 \frac{\text{rms}_{\text{noise}}}{\text{slope}}, \quad (5)$$

where slope is the slope of the linear regression fit on the plot between the sensor response and vapor concentration, i.e., the sensitivity of the sensor [as shown in Fig. 3(d)]. Using the above signal process, the LOD of the GR/PMMA and graphene sensors are calculated to be 72.46 and 175.27 ppm, respectively.

3.3 Sensing mechanism of graphene and GR/PMMA sensor

The VOC sensing mechanism of the graphene sensor at room temperature can be attributed to the adsorption of VOC molecules on defect sites. Electrons can more easily transfer charges on graphene layer by electron hopping when VOC molecules are adsorbed at the defect sites, resulting in the decrease in the electrical resistance of graphene sensor.^{31,32} For the GR/PMMA sensor, the main sensing mechanism can be described in terms of polymer swelling due to VOC adsorption and the Hansen solubility parameter (HSP) similarly to polymer-coated carbon nanotubes.^{33,34} A hypothesis based on polymer swelling can be described as follows. After VOC adsorption, PMMA on graphene layer becomes swollen, resulting in an increase in electrical resistance due to the increase in polymer volume and graphene sheet bending. For the hypothesis based on HSP, HSP is the relative energy difference (RED) used to predict the solubility of a solvent with a polymer. The RED is defined as

$$\text{RED} = \frac{R_a}{R_0}, \quad (6)$$

$$(R_a)^2 = 4(\delta_{d,\text{polymer}} - \delta_{d,\text{solvent}})^2 + (\delta_{p,\text{polymer}} - \delta_{p,\text{solvent}})^2 + (\delta_{h,\text{polymer}} - \delta_{h,\text{solvent}})^2, \quad (7)$$

where R_a , R_0 , δ_d , δ_p , and δ_h are the distance between Hansen parameters in the Hansen space, interaction radius, dispersion force, intermolecular force, and hydrogen bond, respectively.³⁵ Table I shows HSP and RED between PMMA and various VOCs. A RED of less than 1 means a high miscibility of a VOC in a polymer. Moreover, a small RED implies a high miscibility. The REDs of the GR/PMMA sensor are in the following order as defined in Table I: DCM < acetone <

Table I. HSP and RED between PMMA and various VOCs.³⁵

Polymer and solvent	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	II	5.1	0.5
Acetone	15.5	10.4	7.0			
PMMA	17.9	10.1	5.4	II	10.7	1.0
Benzene	18.4	0.0	2.0			
PMMA	17.9	10.1	5.4	II	7.0	0.6
Chloroform	17.8	3.1	5.7			
PMMA	17.9	10.1	5.4	II	3.9	0.3
DCM	18.2	6.3	6.1			

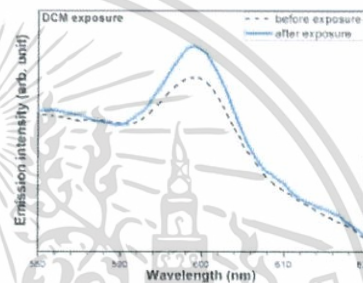


Fig. 4. (Color online) Fluorescence spectra of the GR/PMMA sensor before (black) and 10 min after DCM exposure (red).

chloroform < benzene. Hence, the GR/PMMA sensor responds more sensitively to DCM than to other VOCs. In addition, the order of the HSP values of the GR/PMMA sensor conformed to that of sensor response to VOCs. To prove this mechanism, the swelling of the polymer was analyzed by a fluorescence spectroscopy technique with the change in fluorescence intensity in response to VOC.³⁶ The GR/PMMA sensor was analyzed before and after DCM exposure for 10 min to obtain the spectra. The polymer layer was swollen and the structure of the backbone of the polymer changed after VOC adsorption, resulting in an increased in emission spectral peaks. This change in the polymer gives different information of emitted light. Figure 4 shows the change in the fluorescence intensity in terms of the emission intensity of the GR/PMMA sensor in response to DCM vapor. Upon DCM exposure, the emission intensity of the GR/PMMA sensor at 598 nm increased by 22.94%. These results prove that the increase in emission intensity coincided to the VOC-induced change in the shape of the polymer backbone.

However, there are other factors for the sensing mechanisms of the GR/PMMA and graphene sensors such as the molecular size and dielectric constant of VOC. In the case of molecular size,³⁷ DCM molecules (63.8 cm³/mol) are smaller than acetone (74.0 cm³/mol), chloroform (80.7 cm³/mol), and benzene (89.1 cm³/mol) molecules; thus DCM molecules can more likely penetrate the PMMA membrane than other gases for the GR/PMMA sensor. In the case of the graphene sensor, many DCM molecules come in contact onto the surface because they are the smallest, so the change in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

sensor resistance was larger than those for other VOC vapors. Furthermore, the sensing mechanisms can be described in terms of dielectric constant, which involves the solvent polarity of VOCs. The solvent polarities are in the order of: benzene < chloroform < dichloromethane < acetone.³⁸⁾ Molecules with higher polarity can hold the holes moving along graphene layer, resulting in a large increase in electrical resistance and a high sensor response. However, the sensor responses of the GR/PMMA and graphene sensors did not conform to the dielectric constant in the case of acetone detection, owing to the fact that the other factors mentioned above have greater effects. Thus, this work demonstrates the GR/PMMA composite laminate on flexible substrate can have practical applications as VOC sensors with high selectivity to DCM at room temperature. The sensor performance could be improved by optimizing specimen preparation, such as thickness control and the type of polymer on graphene layer, is expected to yield significant performance improvement, especially in terms of response time and selectivity to VOCs.

4. Conclusions

We successfully fabricated a VOC sensor using graphene and PMMA composite laminates on a PET substrate. The GR/PMMA and graphene sensors show the highest magnitude of sensor response to DCM showing in opposite signals. The sensor response of the GR/PMMA sensor to DCM is 3 time higher than that graphene sensor. The GR/PMMA sensor shows low responses to acetone and chloroform, and no response to benzene, owing to the PMMA layer acting as a membrane selective to VOC molecules, resulting in the selectivity improvement of VOCs. These results show the potential use of the GR/PMMA and graphene array for VOC discrimination. In addition, the GR/PMMA and graphene sensors have limits of detection at 72.46 and 175.27 ppm, respectively. The sensing mechanism of the graphene sensor was attributed to electron hopping on the defect sites of graphene layer during VOC adsorption, while the sensing mechanism of the GR/PMMA sensor would be ascribed to the polymer swelling and HSP.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the funding from the National Research Council of Thailand Grant A118-0260-083. This work was partially supported by the National Nanotechnology Center (NANOTEC), NSTDA, Ministry of Science and Technology, Thailand, through its program of the Center of Excellence Network.

1) J. G. Watson, J. C. Chow, and E. M. Fujita, *Atmos. Environ.* **35**, 1567 (2001).
 2) F. J. Ibañez and F. P. Zamborini, *ACS Nano* **2**, 1543 (2008).
 3) B. Huang, C. Lei, C. Wei, and G. Zeng, *Environ. Int.* **71**, 118 (2014).
 4) V. H. Vu, J. Belkouch, A. Ould-Dris, and B. Taouk, *J. Hazardous Mater.* **169**, 758 (2009).

5) Q.-Y. Chen, N. Li, M.-F. Luo, and J.-Q. Lu, *Appl. Catal. B* **127**, 159 (2012).
 6) M. S. Kanan, M. O. El-Kadri, A. I. Abu-Yousef, and C. M. Kanan, *Sensors* **9**, 8158 (2009).
 7) A. Reina, X. Jia, J. Ho, D. Nezich, H. Son, V. Bulovic, M. S. Dresselhaus, and J. Kong, *Nano Lett.* **9**, 30 (2009).
 8) T. H. Seo, T. S. Oh, S. J. Chae, A. H. Park, K. J. Lee, Y. H. Lee, and E.-K. Suh, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 125103 (2011).
 9) D. Dodoo-Ahmin, M. Fabiane, A. Bello, and N. Manyala, *Ind. Eng. Chem. Res.* **52**, 14160 (2013).
 10) H. Park, S. Chang, J. Jean, J. J. Cheng, P. T. Araujo, M. Wang, M. G. Bawendi, M. S. Dresselhaus, V. Bulovic, J. Kong, and S. Gradecak, *Nano Lett.* **13**, 233 (2013).
 11) L. G. P. Martins, Y. Song, T. Zeng, M. S. Dresselhaus, J. Kong, and P. T. Araujo, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **110**, 17762 (2013).
 12) G. Born Barrin, Y. Song, I. de Fátima Gímez, A. G. Souza Filho, L. S. Barroo, and J. Kong, *Carbon* **84**, 82 (2015).
 13) I. Vlassiouk, G. Polyzos, R. Cooper, I. Ivanov, J. K. Keum, F. Paulauskas, P. Datskos, and S. Smirnov, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7**, 10702 (2015).
 14) K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Science* **306**, 666 (2004).
 15) A. A. Balandina, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miau, and C. N. Lau, *Nano Lett.* **8**, 902 (2008).
 16) H. Yang, L. Huang, Q. H. Chang, Z. J. Ma, S. H. Xu, Q. Chen, and W. Z. Shi, *J. Phys. D* **47**, 345101 (2014).
 17) Y. Ren, C. Zhu, W. Cai, H. Li, H. Ji, L. Kholmanov, Y. Wu, R. D. Piner, and R. S. Ruoff, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 163114 (2012).
 18) J. Hong, S. Lee, J. Seo, S. Pyo, J. Kim, and T. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7**, 3554 (2015).
 19) M. G. Chung, D.-H. Kim, D. K. Seo, T. Kim, H. U. Jui, H. M. Lee, J.-B. Yoo, S.-H. Hong, T. J. Kang, and Y. H. Kim, *Sens. Actuators B* **169**, 387 (2012).
 20) C. Rattanabut, W. Muangrat, W. Bungjongsri, M. Phonyciem, W. Wongwinyapan, and Y. J. Song, *Proc. Int. Conf. Solid State Devices and Materials*, 2017, p. 1051.
 21) Q. Wu, S. J. Jung, S. K. Jang, J. Lee, I. Jeon, H. Suh, Y. H. Kim, Y. H. Lee, S. Lee, and Y. J. Song, *Nanoscale* **7**, 10357 (2015).
 22) P. Blake, E. W. Hill, A. H. Castro Neto, K. S. Novoselov, D. Jiang, R. Yang, T. J. Booth, and A. K. Geim, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 063124 (2007).
 23) A. C. Ferrari, J. C. Meyer, V. Scardaci, C. Casiraghi, M. Lazzeri, F. Mauri, S. Piscanec, D. Jiang, K. S. Novoselov, S. Roth, and A. K. Geim, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 187401 (2006).
 24) A. C. Ferrari, *Solid State Commun.* **143**, 47 (2007).
 25) M. Xie, Z. Su, and S. Zhang, *AIP Adv.* **2**, 032122 (2012).
 26) Z. Ni, Y. Wang, T. Yu, and Z. Shen, *Nano Res.* **1**, 273 (2008).
 27) Z. H. Ni, H. M. Wang, J. Kasim, H. M. Fan, T. Yu, Y. H. Wu, Y. P. Feng, and Z. X. Shen, *Nano Lett.* **7**, 2758 (2007).
 28) Y. Wang, Z. Ni, T. Yu, Z. X. Shen, H. Wang, Y. Wu, W. Chen, and A. T. S. Wee, *J. Phys. Chem. C* **112**, 10637 (2008).
 29) Z. H. Ni, H. M. Wang, Y. Ma, J. Kasim, Y. H. Wu, and Z. X. Shen, *ACS Nano* **2**, 1033 (2008).
 30) J. Li, Y. Li, M. Cinke, J. Han, and M. Meysappan, *Nano Lett.* **3**, 929 (2003).
 31) G. Lee, G. Yang, A. Cho, J. W. Han, and J. Kim, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 14198 (2016).
 32) W. Chen, F. Li, P. C. Ooi, Y. Ye, T. W. Kim, and T. Guo, *Sens. Actuators B* **222**, 763 (2016).
 33) W. Muangrat, T. Chodjansawad, R. Maelanon, S. Pratontep, S. Porntheeraphat, and W. Wongwinyapan, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 02BD04 (2016).
 34) W. Muangrat, V. Yonsri, R. Maelanon, S. Pratontep, S. Porntheeraphat, and W. Wongwinyapan, *Diamond Relat. Mater.* **65**, 183 (2016).
 35) C. M. Hansen, *Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook* (CRC Press, Boca Raton, FL, 2007) 2nd ed., p. 4.
 36) F. Wang, H. Gu, and T. M. Swager, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 5392 (2008).
 37) N. M. Li, *Dielectric Constant and Molecule Size: Studies with Rubber Compounds* (University of Wisconsin—Madison, Madison, WI, 1956) p. 65.
 38) G. Wypych, *Handbook of Solvents* (ChemTec Publishing, Toronto, 2001) p. 591.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
สรุปการใช้จ่ายเงิน

รายการ	จำนวนเงินที่ตั้งไว้ (บาท)	จำนวนเงินที่ใช้จ่าย (บาท)
1. งบบุคลากร ค่าจ้างชั่วคราว ปริญญาตรี จำนวน 1 คน อัตรา 13,300 บาท 11 เดือน	146,300	146,300
2. งบดำเนินการ		
2.1 ค่าตอบแทน วัสดุและวัสดุ		
2.1.1 ค่าจ้างเหมาบริการ	40,000	61,149.60
2.1.2 ค่าวัสดุ	210,000	188,984.91
2.1.2.1 ค่าวัสดุอุปกรณ์ทดลอง		
2.1.2.2 ค่าวัสดุก๊าซสารเคมี		
2.1.2.3 ค่าวัสดุสำนักงาน		
2.1.2.4 ค่าวัสดุเชื้อเพลิง		
รวมงบประมาณที่เสนอขอ	396,300	396,434.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นางสาว วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
Bachelor of Engineering	Electronic Engineering	Osaka University, ประเทศญี่ปุ่น	2546
Master of Engineering	Electronic Engineering	Osaka University, ประเทศญี่ปุ่น	2548
Doctor of Philosophy in Engineering	Electronic Engineering	Osaka University, ประเทศญี่ปุ่น	2551

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

Carbon nanomaterials, Thin Film Process, Surface Science, Transmission Electron Microscopy, Nanoelectronics, Chemical Sensors, Energy Storage Devices, Energy Harvesting Devices

ผลงานตีพิมพ์ในช่วง 3 ปีที่ผ่านมา

- 1) P. Ukahapanyakul, N. Gridsadanurak, C. Sapcharoenkun, A. Treetong, P. Kasamechonchung, P. Khemthong, M. Horprathum, S. Porntheeraphat, W. Wongwiriyan, J. Nukeaw, A. Klamchuen: "Texture orientation of silver thin films grown via gas-timing radio frequency magnetron sputtering and their SERS activity", RSC ADVANCES 6, 7661-7667 (2016)
- 2) Q. Wu, J. H. Park, S. W. Park, S. J. Jung, H. S. Suh, N. J. Park, W. Wongwiriyan, S. J. Lee, Y. H. Lee, Y. J. Song: "Single Crystalline Film of Hexagonal Boron Nitride Atomic Monolayer by Controlling Nucleation Seeds and Domains", SCIENTIFIC REPORTS, 5, 16159 (2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) W. Muangrat, T. Chodjarusawad, R. Maolanon, S. Pratontep, S. Porntheeraphat, W. Wongwiriyanan: “Poly(methyl methacrylate) and thiophene-coated single-walled carbon nanotubes for volatile organic compound discrimination” Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 02BD04 (2016)
- 4) P. Dulyaseree, V. Yordsri, W. Wongwiriyanan: “Effects of microwave and oxygen plasma treatments on capacitive characteristics of supercapacitor based on multiwalled carbon nanotubes” Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 02BD05 (2016)
- 5) W. Muangrat, V. Yordsri, R. Maolanon, S. Pratontep, S. Porntheeraphat, W. Wongwiriyanan: “Hybrid gas sensor based on platinum nanoparticles/poly(methyl methacrylate)-coated single-walled carbon nanotubes for dichloromethane detection with a high response magnitude” Diamond & Related Materials **65**, 183–190 (2016)
- 6) Q. Wu, W. Wongwiriyanan, J.-H. Park, S.W. Park, S. J. Jung, T. Jeong, S. Lee, Y. H. Lee, Y. J. Song: “In situ chemical vapor deposition of graphene and hexagonal boron nitride heterostructures”, Curr. Appl. Phys. **16**, 1175-1191, (2016)
- 7) K. Kerdnawee, C. Termvidchakorn, P. Yaisanga, J. Pakchamsai, C. Chookiat, A. Eiad-Ua, W. Wongwiriyanan, W. Chaiwat, S. Ratchahat, K. Faunghawakij, K. Suttiponparmit and T. Charinpanitkul: “Present advancement in production of carbon nanotubes and their derivatives from industrial waste with promising applications (Review)”, KONA Powder and Particle Journal **34**, 24-43 (2017)
- 8) M. Fujishige, I. Yoshida, Y. Toya, Y. Baba, K. Oshida, Y. Tanaka, P. Dulyaseree, W. Wongwiriyanan and K. Takeuchi: “Preparation of activated carbon from bamboo-cellulose fiber and its use for EDLC electrode material” Journal of Environmental Chemical Engineering **5**, 1801- 1808 (2017)
- 9) P. Dulyaseree, M. Fujishige, I. Yoshida, Y. Toya, Y. Banba, Y. Tanaka, T. Aoyama, M. Phonyiem, W. Wongwiriyanan, K. Takeuchi and M. Endo: “Nitrogen-rich green leaves of papaya and *Coccinia grandis* as precursors of activated carbon and their electrochemical properties” RSC Advances **7**, 42064-42072 (2017)
- 10) R. Maolanon, W. Wongwiriyanan and S. Pratontep: “TiO₂/Pt/TiO₂ Sandwich Nanostructures: Towards Alcohol Sensing and UV Irradiation-Assisted Recovery” Journal of Chemistry **8545690** (2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 11) M. Fujishige, W. Wongwiryapan, H. Muramatsu, K. Takeuchi, S. Arai: “**Field emission properties of a DWCNT bundle and a single MWCNT**” *Journal of Physics and Chemistry of Solids* **113**, 229-234 (2018)
- 12) C. Jirayupat, W. Wongwiryapan, P. Kasamechonchung, T. Wutikhun, K. Tantisantisom, Y. Rayanasukha, T. Jiemsakul, C. Tansarawiput, M. Liangruksa, P. Khanchaitit, M. Horprathum, S. Porntheeraphat, and A. Klamchuen: “**Piezoelectric-Induced Triboelectric Hybrid Nanogenerators Based on the ZnO Nanowire Layer Decorated on the Au/polydimethylsiloxane–Al Structure for Enhanced Triboelectric Performance**” *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10**, 6433–6440 (2018)
- 13) T. Chobsilp , W. Muangrat, C. Issro, W. Chaiwat, A. Eiad-ua, K. Suttiponpanit, W. Wongwiryapan and T. Charinpanitkul: “**Sensitivity Enhancement of Benzene Sensor Using Ethyl Cellulose-Coated Surface-Functionalized Carbon Nanotubes**” *Journal of Sensor* (accepted)
- 14) C. Rattanabut, W. Wongwiryapan, W. Muangrat, W. Bungjongpru, M. Phonyiem, and Y. J. Song: “**Graphene and poly(methyl methacrylate) composite laminates on flexible substrates for volatile organic compounds detection**” *Jpn. J. Appl. Phys.* (accepted) **57**, 04FP10 (2018).
- 15) W. Muangrat, W. Wongwiryapan, V. Yordsri, T. Chobsilp, S. Inpaeng, C. Issro, O. Domanov, P. Ayala, T. Pichler, and L. Shi : “**Unravel the Active Site in Nitrogen-Doped Double-Walled Carbon Nanotubes for Nitrogen Dioxide Gas Sensor**” *Adv. Elec. Mater.* (accepted)

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายวิน บรรจงปรุ

ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิจัย

ประวัติการศึกษา

ชื่อปริญญา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
B.Sc. (Department of Applied Physics)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	1999
M.Sc. (Department of Applied Physics)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2003
Ph.D. (College of Nanotechnology)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2013

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

1. Fabrication process development for micro sensor based on Si technology.
2. Bioelectronics device and system— Biosensors Development based on electrochemical, ion-sensitive field effect transistor (ISFET).

ผลงานตีพิมพ์ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา

- 1) W. Bunjongpru, A. Sungthong, S. Porntheeraphat, Y. Rayanasukha, A. Pankiew, W. Jeamsaksiri, A. Srisuwan, W. Chaisriratanakul, E. Chaowicharat, N. Klunngien, C. Hruanun, A. Poyai, J. Nukeaw. Very low drift and high sensitivity of nanocrystal-TiO₂ sensing membrane on pH-ISFET fabricated by CMOS compatible process. *Applied Surface Science, Volume 267, 15 February 2013, Pages 206-211*
- 2) Pawasuth Saengdee, Woraphan Chaisriratanakul, Win Bunjongpru, Witsaroot Sripumkhai, Awirut Srisuwan, Wutthinan Jeamsaksiri, Charndet Hruanun, Amporn Poyai, Chamras Promptmas. Surface modification of silicon dioxide, silicon nitride and titanium oxynitride for lactate dehydrogenase immobilization. *Biosensors and Bioelectronics, Volume 67, 15 May 2015, Pages 134-138*
- 3) W. Chaisriratanakul, W. Bunjongpru, W. Jeamsaksiri, A. Srisuwan, S. Porntheeraphat, E.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chaowicharat, C. Hruanun, A. Poyai, D. Phomyothin, J. Nukeaw. Durable nitrate sensor by surface modification. *Surface and Coatings Technology*, Volume 306, Part A, 25 November 2016, Pages 58-62

- 4) Y. Rayanasukha, S. Pratontep, S. Porntheeraphat, W. Bunjongpru, J. Nukeaw. Non-enzymatic urea sensor using molecularly imprinted polymers surface modified based-on ion-sensitive field effect transistor (ISFET). *Surface and Coatings Technology*, Volume 306, Part A, 25 November 2016, Pages 147-150
- 5) Wannaporn Muangsuwan, Chamras Promptmas, Wutthinan Jeamsaksiri, Win Bunjongpru, Awirut Srisuwan, Charndet Hruanun, Amporn Poyai, Prapimpun Wongchitrat, Montri Yasawong. Development of an immunofET biosensor for the detection of biotinylated PCR product. *Heliyon*, Volume 2, Issue 10, October 2016, Article e00188



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้