การสังเคราะห์กราฟีน/โคบอลต์ออกไซด์ เพื่อตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง

SYNTHESIS OF GRAPHENE/Co_3O_4 FOR AMMONIA GAS SENSING AT AMBIENT TEMPERATURE

นิตยา สอาด

NITTAYA SA-ARD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-SC-M-012-025

การสังเคราะห์กราฟีน/โคบอลต์ออกไซด์
เพื่อตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง

SYNTHESIS OF GRAPHENE/Co_3O_4
FOR AMMONIA GAS SENSING AT AMBIENT TEMPERATURE

นิตยา สอาด

NITTAYA SA-ARD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2556

KMITL-2013-SC-M-012-025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF GRAPHENE/Co_3O_4
FOR AMMONIA GAS SENSING AT AMBIENT TEMPERATURE

NITTAYA SA-ARD

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN ANALYTICAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

KMITL-2013-SC-M-012-025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2013
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์ กราฟีน/โคบอลต์ออกไซด์เพื่อตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง
Synthesis of Graphene/Co_3O_4 for Ammonia Gas Sensing at Ambient Temperature

นักศึกษา นางสาวนิตยา สอาด
รหัสประจำตัว 53650908
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.ณัฐวุฒิ	เชิงชั้น	[signature]
ดร.วิบูลย์	ประดิษฐ์เวียงคำ	[signature]
ผศ.ดร.วินัย	นุตมากุล	[signature]
รศ.ดร.สุวรรณ	ไชยสิทธิ์	[signature]

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2556 เวลา 13.00 – 15.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 316 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว
[signature]
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุษฎี ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
วันที่ 28 **เดือน** มิ.ย. **พ.ศ.** 56

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์กราฟีน/โคบอลต์ออกไซด์ เพื่อการตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิห้อง
นักศึกษา	นางสาวนิตยา สอาด
รหัสประจำตัว	53650908
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีวิเคราะห์
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวัสดุเซนเซอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย โดยใช้วัสดุกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) กราฟีนและโคบอลต์ออกไซด์จะถูกเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันของกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) และโคบอลต์คลอไรด์ (Cobalt Chloride) ด้วยฟีนิลไฮดราซีน (Phenyl hydrazine) ซึ่งกราฟีนและโคบอลต์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ จะถูกตรวจสอบเอกลักษณ์และลักษณะทางโครงสร้างโดยใช้เทคนิค X-ray diffractometry (XRD) และ scanning electron microscopy (SEM) กราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์เซนเซอร์ใช้ในการตรวจวัดสารละลายแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง และทำการเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ที่ทำจากกราฟีน (Graphene) คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube; CNT) และคาร์บอนนาโนทิวบ์ผสมโคบอลต์ออกไซด์ (CNT/Co_3O_4) ผลการทดลองพบว่าเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด สำหรับตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย 25 เปอร์เซนต์ เรียงจากมากไปน้อย เป็นดังนี้ คาร์บอนนาโนทิวบ์ผสมโคบอลต์ออกไซด์, คาร์บอนนาโนทิวบ์, กราฟีน, และคาร์บอนนาโนทิวบ์ผสมโคบอลต์ออกไซด์ ตามลำดับ จากการศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงในการตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย โดยกราฟีนเซนเซอร์ (Graphene sensor) อยู่ในช่วง 1-50 ppm (r^2 = 0.9988) และกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์เซนเซอร์ (Graphene/Co_3O_4 sensor) อยู่ในช่วง 1-100 ppm (r^2 = 0.9988) และค่า LOD = 0.85 ppm และ 0.69 ppm ตามลำดับ ในขณะที่ ค่า LOQ = 2.83 ppm และ 2.30 ppm ตามลำดับ %RSD ที่ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนีย 50 ppm < 0.59 เปอร์เซนต์ และ < 1.40 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ โดยกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์เซนเซอร์ จะมีความว่องไวในการตรวจวัดสูง และตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียได้รวดเร็ว (50 วินาที) นอกจากนี้ยังสามารถตรวจวัดก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมโมเนียได้ที่อุณหภูมิห้อง ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานหรืออุณหภูมิสูงเพื่อกระตุ้นเซนเซอร์ให้ทำงาน จึงเป็นเซนเซอร์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย

คำสำคัญ: กราฟีน, โคบอลต์ออกไซด์, เซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซ, แอมโมเนีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Synthesis of Graphene/Co_3O_4 for Ammonia Gas Sensing at Ambient Temperature
Student	Nittaya Sa-ard
Student ID	53650908
Degree	Master of Science
Program	Analytical Chemistry
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Suwan Chaiyasith

ABSTRACT

We have developed a material for high performance gas sensor. In this study, Co_3O_4 and graphene materials were prepared by reducing $CoCl_2.6H_2O$ and graphene oxide with phenol hydrazine in water. The reduced materials were characterized by X-ray diffractometry (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). A mixture of graphene and Co_3O_4 material was used as a gas sensing active layer. Its sensing performance to NH_3 at room temperature was compared with three other materials: pure graphene, carbon nanotube (CNT), and CNT/Co_3O_4. Their order of increasing sensitivity was from CNT/Co_3O_4, CNT, graphene, to graphene/Co_3O_4. The resistance of both graphene and graphene/Co_3O_4 material increased linearly with increasing concentration of NH_3--in the range of 1–50 ppm for graphene and 1–100 ppm for graphene/Co_3O_4. For the standard solution of ammonia, graphene material and graphene/Co_3O_4 material yielded two different linear calibration curves that happend to have the same correlation coefficient (r^2) of 0.9988. The limit of detection (LOD) was 0.85 ppm for graphene and 0.69 ppm for graphene/Co_3O_4, while the limit of quantification (LOQ) was 2.83 ppm for graphene and 2.30 ppm for graphene/Co_3O_4. The intra-day precision was also examined, showing a relative standard deviation (%RSD) < 0.59 % for graphene and < 1.40 % for graphene/Co_3O_4. From the above preliminary data on sensing NH_3, graphene/Co_3O_4 can be used to detect NH_3 quantitatively. The advantages of graphene/Co_3O_4 sensor are fast response time and low power consumption. It is a good candidate for an NH_3 sensor.

Keywords: Graphene, Co_3O_4, Gas sensors, Ammonia

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ และคุณวรวุฒิ เมืองรัตน์ อาจารย์จากวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยให้ความรู้ คอยดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี และคอยให้คำปรึกษาแก่ผู้วิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาของการศึกษาในสถาบันแห่งนี้

ขอขอบคุณพี่ ๆ นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่คอยช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย รวมไปถึงให้คำปรึกษาดี ๆ แก่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่สนับสนุน พร้อมทั้งมอบทุนสนับสนุนการศึกษา ประเภททุนสนับสนุนการเสนอผลงานทางวิชาการ ประจำปีงบประมาณ 2556 และทุนสนับสนุนการศึกษา ประเภททุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2556

และสุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้กำลังใจส่งเสริมและสนับสนุนผู้วิจัยในทุก ๆ ด้าน รวมทั้งเพื่อน ๆ ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ รับฟังความทุกข์ความสุขของผู้วิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่ บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้ที่มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

นิตยา สอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ก๊าซแอมโมเนีย (Ammonia gas)	6
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแอมโมเนีย	6
2.1.2 คุณสมบัติทั่วไปของแอมโมเนีย	6
2.1.3 ข้อมูลความปลอดภัยสำหรับแอมโมเนีย	7
2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซโดยกราฟีน (Graphene)	8
2.2.1 โครงสร้างกราฟีน (The structure of graphene)	8
2.2.2 สมบัติบางประการของกราฟีน (Some properties of graphene)	10
2.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซโดยกราฟีน (Graphene)	11
2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซโดยคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube, CNT)	12
2.3.1 โครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube, CNT)	12
2.3.2 สมบัติบางประการของคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube, CNT)	13
2.3.3 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซโดยคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube, CNT)	14
2.4 การผสมโคบอลต์ออกไซด์ กับกราฟีนและคาร์บอนนาโนทิวบ์ เพื่อสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซ	16
2.4.1 โครงสร้างและคุณสมบัติทั่วไปของโคบอลต์ออกไซด์	16
2.4.2 สารโลหะออกไซด์ (Metal Oxide)	18
2.5 แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor)	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

2.5.1 หลักการทำงาน……………………………………………………………18
2.5.2 คุณสมบัติของแก๊สเซนเซอร์ที่สำคัญ……………………………………21
2.5.3 ประโยชน์ของการใช้แก๊สเซนเซอร์…………………………………………26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……………………………………………………………27
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย……………………………………………………………30
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย………………………………………………30
3.1.1 สารเคมี……………………………………………………………………30
3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย……………………………………31
3.2 การสังเคราะห์กราฟีน…………………………………………………………32
3.3 การสังเคราะห์โคบอล์ตออกไซด์………………………………………………33
3.4 พิสูจน์เอกลักษณ์ ลักษณะทางกายภาพของกราฟีน และโคบอลต์ออกไซด์……34
3.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Scanning Electron Microscope: SEM)……………………………………34
3.4.2 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-ray diffractrometer: XRD)…………34
3.5 การเตรียมสารละลายวัสดุเซนเซอร์……………………………………………35
3.6 การเตรียมแผ่นทดสอบ…………………………………………………………35
3.7 การดำเนินงานวิจัย………………………………………………………………37
3.7.1 การศึกษาความสามารถในการตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย
ของวัสดุเซนเซอร์แต่ละชนิด………………………………………………37
3.7.2 ขั้นตอนการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี……………………………………38
3.7.2.1 ศึกษา Working Range และ Linearity……………………………38
3.7.2.2 ศึกษา LOD และ LOQ……………………………………………39
3.7.2.3 ศึกษาอายุการใช้งานของเซนเซอร์…………………………………39
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล……………………………………………………40
4.1 การสังเคราะห์กราฟีนและโคบอลต์ออกไซด์……………………………………40
4.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของสารที่สังเคราะห์ได้……………………40
4.2.1 ผลจากการทดสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (XRD)……………40
4.2.1.1 โครงสร้างผลึกของกราฟีน (Graphene)……………………………40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

4.2.1.2 โครงสร้างผลึกของโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4)........................41
4.2.1.3 โครงสร้างผลึกของกราฟีน (Graphene), โคบอลต์ออกไซด์(Co_3O_4) และกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4)....................42
4.2.2 ผลจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด............43
4.2.2.1 ลักษณะรูปร่างของกราฟีน (Graphene)...............................43
4.2.2.2 ลักษณะรูปร่างของโคบอลต์ออกไซด์(Co_3O_4)........................44
4.2.2.3 ลักษณะรูปร่างของกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4)..45
4.3 การทดสอบแก๊สเซนเซอร์ (Gas Sensor)..49
4.3.1 การทดสอบแก๊สเซนเซอร์ (Gas Sensor) ที่สร้างจาก วัสดุเซนเซอร์ชนิดต่างๆ..49
4.3.1.1 ค่าการตอบสนอง (% Response)......................................52
4.3.1.2 เวลาที่ใช้ในการตอบสนอง (Response Time).........................56
4.3.1.3 เวลาที่ใช้ในการคืนกลับสู่สภาพเดิม (Recovery Time)..............57
4.4 ขั้นตอนการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี..58
4.4.1 Working Range และ Linearity...58
4.4.1.1 ตรวจวัดโดยใช้ Graphene sensor......................................58
4.4.1.2 ตรวจวัดโดยใช้ Graphene/Co_3O_4 sensor..............................60
4.5 LOD และ LOQ...62
4.6 ศึกษาอายุการใช้งานของเซนเซอร์ (Sensor).......................................64
4.6.1 ศึกษาอายุการใช้งานของ Graphene sensor.................................64
4.6.2 ศึกษาอายุการใช้งานของ Graphene/Co_3O_4 sensor..........................66
4.7 สรุป..69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ......................................70
เอกสารอ้างอิง..72
ภาคผนวก...75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 แสดงเทคโนโลยีของเซนเซอร์รับกลิ่นประเภทต่างๆ……………………………………………2
2.1 แสดงผลของจากการสัมผัสแอมโมเนียที่มีผลต่อมนุษย์
ที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียระดับต่างๆ……………………………………………………..7
2.2 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของโคบอลต์ออกไซด์……………………………………………...17
2.3 ตัวอย่างสารมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อม……………………………………..24
4.1 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของ Graphene sensor ในการตรวจวัดสารละลาย
แอมโมเนีย………………………………………………………………………………...59
4.2 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของ Graphene/Co3O4 sensor ในการตรวจวัด
สารละลายแอมโมเนีย……………………………………………………………………....61
4.3 แสดงผลการทดลองจากการทดสอบ sample blank (NH_3 0 ppm) …………………………..63
4.4 แสดงการศึกษาอายุการใช้งานของ Graphene sensor…………………………………………64
4.5 แสดงการศึกษาอายุการใช้งานของ Graphene/Co3O4 sensor……………………………….67
5.1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุเซนเซอร์แต่ละชนิด……………………………70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างกราฟีน	8
2.2	โครงสร้างกราฟีนในแนวระนาบ 2 มิติ (2 dimension; 2-D)	9
2.3	ท่อนาโนคาร์บอน และบักกี้บอล คาร์บอนที่โครงสร้างเป็นรูปลูกบอล	13
2.4	ส่วนประกอบหลัก Gas Sensor	19
2.5	แสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (Multi walled carbon nanotube; MWNT) เมื่อสัมผัสกับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 10-100 ppm	23
2.6	แสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของ polyaniline (PANI) เมื่อสัมผัสกับก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ที่ความเข้มข้น 250 ppm	23
3.1	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีน	32
3.2	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสังเคราะห์โคบอลต์ออกไซด์	34
3.3	แสดงลักษณะของแผ่น PCB และการบัดกรีแผ่น PCB กับขาเข้าด้วยกัน	36
3.4	แสดงลักษณะเซนเซอร์ที่บัดกรีเรียบร้อยแล้ว	36
3.5	แผนภาพแสดงระบบ และการทำงานของอุปกรณ์ทดสอบเซนเซอร์	38
4.1	แสดง XRD Pattern ของกราฟีน (Graphene) ที่สังเคราะห์ได้	40
4.2	แสดง XRD Pattern ของโคบอลต์ออกไซด์ (Co3O4) ที่สังเคราะห์ได้	41
4.3	แสดง XRD Pattern ของของกราฟีน (Graphene), โคบอลต์ออกไซด์ (Co3O4), และกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co3O4) ที่สังเคราะห์	42
4.4	แสดงลักษณะรูปร่างของกราฟีน (Graphene) จากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า	43
4.5	แสดงลักษณะรูปร่างของโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) จากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า	44
4.6	แสดงลักษณะรูปร่างของกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) จากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	45
4.7	แสดงลักษณะรูปร่างของกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) จากการทดสอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.8 แสดงลักษณะรูปร่างของกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) จากการทดสอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า......47

4.9 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างของโคบอลต์ออกไซด์ (a), กราฟีน (b), และกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (c) จากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)......48

4.10.a แสดงการทดสอบแก๊สเซนเซอร์ (Gas Sensor) ที่สร้างจากวัสดุเซนเซอร์ชนิด Graphene/Cobalt Oxide......50

4.10.b แสดงการทดสอบแก๊สเซนเซอร์ (Gas Sensor) ที่สร้างจากวัสดุเซนเซอร์ชนิด Graphene......51

4.10.c แสดงการทดสอบแก๊สเซนเซอร์ (Gas Sensor) ที่สร้างจากวัสดุเซนเซอร์ชนิด Carbon Nanotube......51

4.10.d แสดงการทดสอบแก๊สเซนเซอร์ (Gas Sensor) ที่สร้างจากวัสดุเซนเซอร์ชนิด Carbon Nanotube/Cobalt Oxide......52

4.11 แสดงการเปรียบเทียบวัสดุชนิดต่างๆ กับค่าการตอบสนอง (% Response)......53

4.12 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพ และพื้นที่ผิวสัมผัสของ (a) Graphene, และ (b)Graphene/Cobalt Oxide......54

4.13 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพ และพื้นที่ผิวสัมผัสของ Graphene, และ Carbon Nanotube......55

4.14 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพ และพื้นที่ผิวสัมผัสของ Carbon Nanotube, และ Carbon Nanotube/Co_3O_4......55

4.15 แสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า เทียบกับเวลาของเซนเซอร์ที่สร้างจากวัสดุเซนเซอร์ชนิด Carbon Nanotube/Cobalt Oxide......56

4.16 แสดงการเปรียบเทียบวัสดุชนิดต่างๆ กับเวลาที่ใช้ในการตอบสนอง (Response Time)......57

4.17 แสดงการเปรียบเทียบวัสดุชนิดต่างๆ กับเวลาที่ใช้ในการคืนกลับสู่สภาพเดิม (%Recovery of sensor)......58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.18 Working range และ Linearity ของสารละลายแอมโมเนีย ที่ความเข้มข้นต่างๆ ตรวจวัดโดยใช้ Graphene sensor.....60

4.19 Working range และ Linearity ของสารละลายแอมโมเนีย ความเข้มข้นต่างๆ ตรวจวัดโดยใช้ Graphene/Co_3O_4 sensor.....62

4.20 แสดงค่าความต้านทานเริ่มต้นของ Graphene sensor เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน.....65

4.21 แสดงค่า %Response ของ Graphene sensor เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน.....66

4.22 แสดงค่าความต้านทานเริ่มต้นของ Graphene/Co3O4 sensor เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน.....68

4.23 แสดงค่า %Response ของ Graphene/Co3O4 sensor เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน.....69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ในรอบ 1-2 ปีที่ผ่านมา ข่าวอุบัติเหตุการระเบิดในโรงงานอุตสาหกรรมมักจะเกี่ยวข้องกับสารแอมโมเนีย (Ammonia) ซึ่งแอมโมเนียเป็นก๊าซที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติตามวัฏจักรไนโตรเจน โดยแอมโมเนียมีทั้งสถานะก๊าซและของเหลว เบากว่าอากาศที่สถานะก๊าซ เป็นสารที่ไม่มีสี มีกลิ่นฉุนรุนแรง เป็นอันตรายเมื่อสัมผัสถูกหรือสูดดมโดยตรง แต่ไม่เป็นพิษสะสม ทั้งนี้เนื่องจากสารแอมโมเนียได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายทั้งทางด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรท ก๊าซแอมโมเนียสำหรับทำความเย็นของอุตสาหกรรมห้องเย็น โรงผลิตน้ำแข็ง ซึ่งเป็นโรงงานอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายจากสารเคมีดังกล่าวอย่างมาก อีกทั้งยังก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม สร้างความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สินและสุขภาพของประชาชน โดยก๊าซแอมโมเนียเป็นก๊าซพิษ กัดกร่อน เมื่อหายใจเข้าไปทำให้มีอาการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ หายใจไม่สะดวก ไอ เจ็บคอ น้ำท่วมปอด วิงเวียน ถ้าเข้าตาทำให้ตาบอดได้ ถ้าสัมผัสผิวหนังจะกัดกร่อนทำให้เป็นแผลจากความเย็น และหากมีการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำจะส่งผลให้ปลาและสัตว์น้ำตายได้ โดยการเกิดอุบัติเหตุดังกล่าวส่วนใหญ่จะเกิดจากความประมาทและความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ของผู้ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงมีสาเหตุมาจากปัญหาด้านเทคนิคและการจัดการอุบัติเหตุ ดังนั้น นักวิจัยหลายท่านจึงได้ให้ความสนใจในการคิดค้นอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซแอมโมเนีย โดยในระยะเริ่มต้น เครื่องมือที่ถูกนำมาใช้วิเคราะห์แยกก๊าซ คือ GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometer) แต่อย่างไรก็ดี วิธีการดังกล่าวก็มีความยุ่งยาก ราคาสูง อีกทั้งยังต้องอาศัยความชำนาญในการใช้เครื่องมืออีกด้วย ซึ่งทางออกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ คือการตรวจสอบชนิดและปริมาณของก๊าซต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเพื่อควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า “จมูกอิเล็กทรอนิกส์” [1] ที่อาศัยหลักการเดียวกันกับการรับกลิ่นของมนุษย์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นจากวัสดุหลายชนิด ปัจจุบันได้มีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเซนเซอร์รับกลิ่นประเภทต่างๆขึ้นมากมาย โดยเซนเซอร์รับกลิ่นแต่ละประเภทมีหลักการทำงานและข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงเทคโนโลยีของเซนเซอร์รับกลิ่นประเภทต่างๆ [2]

หลักการทำงาน	วัสดุเซนเซอร์	ระดับการพัฒนาในปัจจุบัน	ข้อดี	ข้อเสีย
วัดความต้านทาน	สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	ใช้เชิงพาณิชย์แล้ว	ราคาถูก	ใช้พลังงานเยอะ
วัดความต้านทาน	โพลิเมอร์นำไฟฟ้า	ใช้เชิงพาณิชย์แล้ว	ทำงานที่อุณหภูมิห้อง	มีปัญหาเรื่องความชื้น
วัดความจุไฟฟ้า	โพลิเมอร์	ยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องแต่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์	ทำเป็นชิพได้	มีปัญหาเรื่องความชื้น
วัดมวล	การสั่นของผลึกควอตซ์ (Quartz Crystal Microbalance)	ใช้เชิงพาณิชย์แล้ว	ความไวสูง	ราคายังสูงอยู่
วัดแสง	กำทอนของคลื่นพลาสมอน (Surface Plasmon Resonance)	ยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องแต่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์	ความไวสูง สัญญาณรบกวนต่ำ	ราคาสูง
วัดกระแส	สารผสมอนินทรีย์หรืออินทรีย์	ใช้เชิงพาณิชย์แล้ว	ราคาถูก	มีขนาดใหญ่

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของกราฟีน (Graphene) โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) และกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกราฟีน (Graphene) นั้น สามารถประยุกต์ใช้เป็นแก๊สเซนเซอร์ เนื่องจากมีพื้นผิวที่สูง สามารถดูดซับโมเลกุลของแก๊สได้มาก และมีความไวต่อการตอบสนองทางไฟฟ้าที่ดี สามารถทำงานที่อุณหภูมิห้อง จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นแก๊สเซนเซอร์ และการทดลองเบื้องต้นได้นำมาทดลองกับก๊าซแอมโมเนีย ทั้งนี้จะเปรียบเทียบความสามารถในตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียที่มีต่อวัสดุเซนเซอร์ทั้งหมด 4 ชนิด ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กราฟีน (Graphene)

2. กราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4)

3. คาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNT)

4. คาร์บอนนาโนทิวบ์ผสมโคบอลต์ออกไซด์ (CNT/Co_3O_4)

โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) ไม่ได้นำมาเปรียบเทียบ เนื่องมาจากเป็นสารกึ่งตัวนำทางไฟฟ้า ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิห้อง

โดยหลักการของการทดสอบจะทำการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเซนเซอร์ตรวจพบก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และนำมาคำนวณหาค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียที่มีต่อวัสดุเซนเซอร์แต่ละชนิด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของกราฟีน (Graphene) โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) และกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) ที่สังเคราะห์ขึ้น

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย ที่มีต่อวัสดุเซนเซอร์ทั้ง 4 ชนิด ดังนี้

1. กราฟีน (Graphene)

2. กราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4)

3. คาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNT)

4. คาร์บอนนาโนทิวบ์ผสมโคบอลต์ออกไซด์ (CNT/Co_3O_4)

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ พิสูจน์เอกลักษณ์ และเปรียบเทียบความสามารถในตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียที่มีต่อวัสดุเซนเซอร์แต่ละชนิดที่สังเคราะห์ขึ้น ดังต่อไปนี้

1.2.1 วัสดุเซนเซอร์ที่นำมาใช้ในการทดสอบแอมโมเนีย (NH_3 25 %w/w, 227460 ppm (วิธีการคำนวณแสดงใน ภาคผนวก ก)) มี 4 ชนิด คือ

1.3.1.1 กราฟีน (Graphene)

1.3.1.2 กราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4)

1.3.1.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNT)

1.3.1.4 คาร์บอนนาโนทิวบ์ผสมโคบอลต์ออกไซด์ (CNT/Co_3O_4)

1.2.2 ก๊าซตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (เลือกวัสดุเซนเซอร์ที่ให้ผลการทดลองดีที่สุด 2 ชนิด เพื่อทำการศึกษา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบระดับความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียแตกต่างกัน ดังนี้ 1 ppm, 10 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm ตามลำดับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสังเคราะห์วัสดุเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ดังนี้ กราฟีน (Graphene) โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) และกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) ได้

1.4.2 สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ดังนี้ กราฟีน (Graphene) โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) และกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) ได้

1.4.3 สามารถนำวัสดุเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น มาประยุกต์ใช้เป็นแก๊สเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของกราฟีน (Graphene) โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) และกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) และนำมาประยุกต์ใช้เป็นแก๊สเซนเซอร์ และการทดลองเบื้องต้นได้นำมาทดสอบกับก๊าซแอมโมเนีย โดยการทดสอบการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเซนเซอร์ตรวจพบก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พร้อมทั้งคำนวณหาค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียที่มีต่อวัสดุเซนเซอร์แต่ละชนิด พร้อมทั้งได้ดำเนินการวิจัยโดยมีหลักการทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1 ก๊าซแอมโมเนีย

2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซโดยกราฟีน (Graphene)

2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซโดยคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube, CNT)

2.4 การผสมโคบอลต์ออกไซด์กับกราฟีน (Graphene/Co_3O_4) และคาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNT/Co_3O_4) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นแก๊สเซนเซอร์

2.5 แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 ก๊าซแอมโมเนีย [3]

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแอมโนเนีย

แอมโมเนียเป็นก๊าซที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติตามวัฏจักรไนโตรเจน มนุษย์รู้จักแอมโมเนียมาตั้งแต่สมัยอียิปต์โบราณในชื่อ "SAL AMMONIAC" และสามารถเตรียมขึ้นได้จากกระบวนการทางเคมี ถูกเตรียมขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1774 โดย J.B. Preistley และมีการใช้อย่างแพร่หลายในเวลาต่อมา

- ปี ค.ศ. 1840 ใช้ในการผลิตปุ๋ย
- ปี ค.ศ. 1913 สังเคราะห์แอมโมเนียเชิงพาณิชย์
- ปี ค.ศ. 1931 ใช้แอมโมเนียมไนเตรตทำวัตถุระเบิด

2.1.2 คุณสมบัติทั่วไปของแอมโมเนียมีดังนี้

- มีทั้งสถานะก๊าซ และของเหลว เบากว่าอากาศที่สถานะก๊าซ
- ไม่มีสี มีกลิ่นฉุนรุนแรง
- เป็นสารอันตรายเมื่อสัมผัสถูก หรือสูดดมโดยตรง แต่ไม่เป็นสารพิษสะสม
- เป็นตัวทำละลายที่ดี มีสภาพเป็นด่าง
- ติดไฟได้ที่ความเข้มข้น 16-25% โดยปริมาตรและสามารถลุกติดไฟได้เองที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส
- เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 450-500 องศาเซลเซียส ให้ก๊าซ H_2 และ N_2 บริสุทธิ์

เนื่องจากปัจจุบันมีระบบอุตสาหกรรมความเย็นเพิ่มขึ้น และแอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมาเป็นเวลานาน ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีการใช้งานมากขึ้นในการทดแทนสารทำความเย็นอื่น ๆ เพราะแอมโมเนียยังคงเป็นสารทำความเย็นที่ดีที่สุดในขณะนี้ เนื่องจากราคาถูก มีประสิทธิภาพในเรื่องทำความเย็นที่ดี และไม่ทำลายชั้นโอโซนของโลก ดังนั้นเราควรศึกษาและทำความเข้าใจในคุณสมบัติต่างๆของสารทำความเย็นชนิดนี้เพื่อลดความเสี่ยงจากอันตราย และเพื่อความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ข้อมูลความปลอดภัยสำหรับแอมโมเนีย

แอมโมเนียมีทั้งคุณและโทษ ดังนั้นในการใช้งานจึงจำเป็นต้องรู้ถึงอันตรายที่เกิดจากแอมโมเนียพร้อมทั้งวิธีการป้องกัน แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงผลของจากการสัมผัสแอมโมเนียที่มีผลต่อมนุษย์ที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียระดับต่าง ๆ [36]

ความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนีย (ppm โดยปริมาตร)	ผลที่เกิดขึ้นกับคนที่ไม่มีการป้องกัน	ระยะเวลาที่สัมผัส
5	ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส บางคนอาจได้กลิ่น	-
25	เริ่มได้รับกลิ่นของแอมโมเนีย	ไม่จำกัด
35	ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้	8 ชม./วัน
50	กลิ่นของแอมโมเนียจะรุนแรงมาก ผู้ที่คุ้นเคยกับแอมโมเนียจะเริ่มรู้สึกอึดอัด และต้องการจะหนีไปจากบริเวณนั้น	หากไม่มีความจำเป็นให้หนีไปจากบริเวณนั้น
100	ยังไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ แต่จะรู้สึกว่าทนไม่ได้	ให้หนีออกจากบริเวณนั้นโดยเร็ว
400-700	ตาและจมูกจะรู้สึกแสบ และระคายเคืองเป็นอย่างมาก	ให้หนีออกจากบริเวณนั้นภายใน 1 ชม. โดยปกติแล้ว ความเข้มข้นนี้ ยังไม่ทำให้มนุษย์ได้รับอันตรายรุนแรง
1700	ตา จมูก และการหายใจจะได้รับผลกระทบอย่างรุนแรง	เป็นอันตรายต่อมนุษย์อย่างรุนแรง หากอยู่นานเกินกว่า 30 นาที
2000-5000	ตา จมูก และการหายใจได้รับผลกระทบอย่างรุนแรง	มนุษย์อาจถึงแก่ความตายภายใน 30 นาที
5000	กล้ามเนื้อเกร็งและหายใจไม่ออก	มนุษย์อาจถึงแก่ความตายภายใน 2-3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมีระบบตรวจจับแอมโมเนียถือเป็นการป้องกันอุบัติเหตุอีกทางหนึ่งได้ การป้องกันตั้งแต่ต้นจะช่วยป้องกันการหยุดชะงักของการผลิต ช่วยในการอพยพคนได้ทันท่วงที และมีผลถึงภาพพจน์ของบริษัทด้วย อุปกรณ์ตรวจจับแอมโมเนียถือเป็นการป้องกันที่ดีอีกทางหนึ่ง โดยอุปกรณ์ตรวจจับแอมโมเนียที่ดีต้องสามารถตรวจแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 25 ppm ได้

2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซโดยกราฟีน (Graphene sensor)

2.2.1 โครงสร้างกราฟีน [4-6]

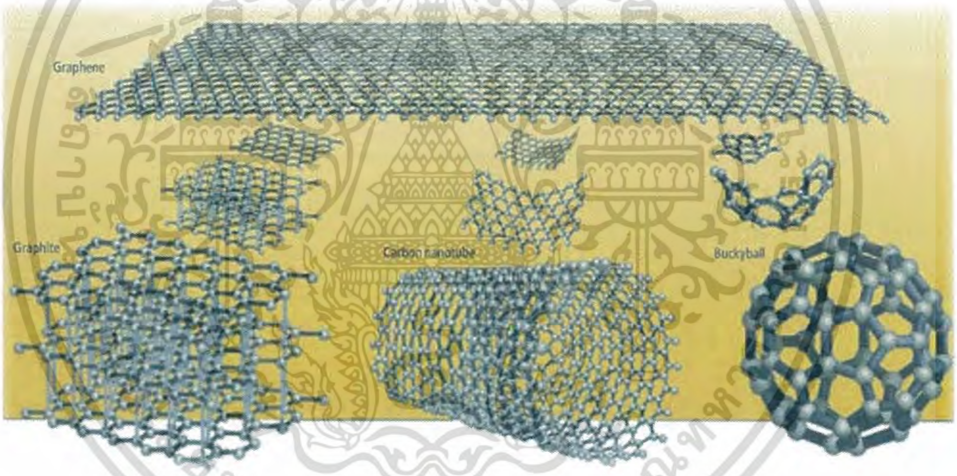
กราฟีน (Graphene) คือวัสดุที่มีโครงสร้างอันเกิดจากการจัดเรียงกันของคาร์บอนอะตอมแบบวงหกเหลี่ยม (Hexagonal configuration) ในแนวระนาบ 2 มิติ หลาย ๆ วงต่อกัน คล้ายกับตาข่ายกรงไข่เกิดเป็นแผ่นกราฟีนขนาดนาโน โดยมีระยะห่างระหว่างคาร์บอน 0.142 นาโนเมตร

รูปที่ 2.1 โครงสร้างกราฟีน [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้านำกราไฟต์ (Graphite) มาลอกออกเป็นชั้น ๆ จนเหลือความหนาเพียง 1 อะตอมเราจะได้กราฟีน นอกนั้นจะค้นพบว่าโครงสร้างทางคาร์บอนที่ได้มีการค้นพบก่อนหน้านี้ ล้วนมีพื้นฐานมาจาก กราฟีนทั้งนั้น ไม่ว่าจะเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carnon nanotube, CNT) หรือบักกี้บอล (Bucky ball)

- ถ้าเราเอากราฟีนมาห่อให้เป็นลูกกลม ๆ เราจะได้บักกี้บอล (Bucky ball)
- ถ้าเราเอากราฟีนมาม้วนเป็นแท่งกลม ๆ เราจะได้ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube, CNT)
- ถ้าเราเอากราฟีนมาซ้อนกันเป็นชั้น ๆ เราจะได้กราไฟท์ (Graphite) ซึ่งเป็นวัสดุในถ่านหรือไส้ดินสอ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างกราฟีนในแนวระนาบ 2 มิติ (2 dimension; 2-D) [4]

ปัจจุบันได้มีการนำกราฟีนมาใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางเพราะความสามารถทางการนำไฟฟ้า (เนื่องจากโครงสร้างมีอิเล็กตรอนบนพื้นผิวมาก โดยคาร์บอนที่ต่อระหว่างวงจับกับคาร์บอนอะตอมอื่น แค่ 3 แขนเท่านั้น จึงทำให้เหลือ Valent Electron อีกหนึ่งตัว ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปมาได้) ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าหลอดคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบวงเดี่ยวมากกว่าสองเท่า ดังนั้นจึงมีการนำกราฟีนมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์หลายด้าน อาทิเช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์บันทึกความจำ (Memory device) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical sensor) เป็นต้น

2.2.2 สมบัติบางประการของกราฟีน

1. เป็นวัสดุที่บางที่สุดเท่าที่มีการค้นพบ ถึงในทางทฤษฎี เราจะไม่สามารถวัดความหนาของอะตอมได้ แต่เราสามารถวัดระยะห่างระหว่างอะตอมได้ ทำให้สามารถประเมินคร่าวๆ ได้ว่าแผ่นกราฟีนหนาประมาณ 0.335 นาโนเมตร

2. กราฟีนชั้นเดียวสามารถมองทะลุได้โดยมีค่าการดูดซับแสงอยู่ที่ 2.3%

3. ความต้านทานไฟฟ้าต่ำมาก สามารถเป็นตัวนำที่นำไฟฟ้าได้ดีเกือบเท่า Superconductor (มากกว่าทองแดงหลายล้านเท่า) แต่กราฟีนนำไฟฟ้าได้ดีมากที่อุณหภูมิห้อง (เนื่องจากโครงสร้างมีอิเล็กตรอนบนพื้นผิวมาก) ซึ่งต่างจาก Superconductor ที่ต้องลดอุณหภูมิจนติดลบกว่าร้อยองศาเซียลเซียส ถึงจะแสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าแบบนั้นได้

4. ในทางควอนตัมวัสดุที่มีขนาดเล็กจะมีคุณสมบัติพิเศษ ไม่เหมือนวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ สำหรับกราฟีนที่มีความหนาเพียงอะตอมเดียว ในด้านความหนาจึงแสดงคุณสมบัติในทางควอนตั้มออกมา แต่ในทางกว้างและยาวมีคุณสมบัติตามวัสดุปรกติ กราฟีนจึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนทั้งวัตถุธรรมดา และอนุภาคควอนตัมพร้อมๆ กัน

5. กราฟีนมีค่าระดับความแข็งแกร่ง (Stiffness) สูงกว่าเหล็กถึง 5 เท่า (เทียบเท่าหรือมากกว่าเพชร) แต่แม้จะแข็ง (ฉีกขาดได้ยาก) แต่แผ่นกราฟีนกลับสามารถบิดงอ ม้วน หรือพับ ได้อย่างง่ายดายโดยไม่ทำให้โมเลกุลเสียหาย

6. Thermal conductivity หรือความสามารถในการนำความร้อนจำเพาะ ซึ่งเราวัดค่าความนำความร้อนจำเพาะของกราฟีนได้สูงกว่าวัสดุประเภทอื่นๆ และยังนำความร้อนได้ดีกว่าเพชรที่ครองแชมป์มาตลอด ด้วยคุณสมบัตินี้เอง เราจึงสามารถนำกราฟีนไปช่วยในระบบระบายความร้อนใน CPU

7. Electronic: กราฟีนมีค่า Mobility หรือ ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสูงมาก ทำให้เราสามารถสร้างทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเร็วมากๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซโดยกราฟีน

กราฟีนหนึ่งในวัสดุมหัศจรรย์ ที่เป็นอัญรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน ซึ่งถูกค้นพบล่าสุดเมื่อ ค.ศ. 2004 หลังจากการค้นพบท่อคาร์บอนนาโน (Carbon Nanotube, CNT) ปี 1991 และลูกบอลนาโน (Fullerene) เมื่อปี 1985 เป็นวัสดุ 2 มิติที่บางและแข็งแรงที่สุดในจักรวาล นำไฟฟ้าได้ดี และยังมีความมหัศจรรย์อีกมากมายที่รอการค้นพบ หนึ่งในการใช้งานที่คาดว่าจะสามารถนำกราฟีนมาใช้งานได้จริง ได้แก่ วงการอิเล็กทรอนิกส์ ไม่ว่าจะนำมาทดแทนขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ไปจนถึงการสร้างทรานซิสเตอร์ที่เร็วสุดในโลก

นอกจากวงการชิพคอมพิวเตอร์ที่ตื่นเต้นกับวัสดุกราฟีนแล้ว ในวงการเทคโนโลยีเซนเซอร์ (Sensor Technology) ก็ตื่นเต้นกับกราฟีน ไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีเซนเซอร์ทางเคมี เซนเซอร์ชีวภาพ และแก๊สเซนเซอร์ เนื่องจากคุณสมบัติมหัศจรรย์ของกราฟีนหนึ่งที่สำคัญ คือ การนำไฟฟ้าที่ดีและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ยอดเยี่ยมบนโครงสร้างสองมิติ ทั้งยังมีสัญญาณไฟฟ้ารบกวน (Johnson noise) ที่มาจากอุณหภูมิห้องน้อยมาก เนื่องจากในโครงสร้างของกราฟีน มีจุดบกพร่อง (Defect) น้อยมาก ซึ่งคุณสมบัตินี้เองทำให้เซนเซอร์สามารถทำงานด้วยความไวที่สูงมาก และสามารถตรวจวัดได้ละเอียดมาก เหตุผลเนื่องจากกราฟีนสามารถถ่ายเทและแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน (Electron) และโฮล (Hole) บนผิวกราฟีนกับสารตรวจวัดได้อย่างดี เช่น เมื่อนำมาสร้างเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซ ก็สามารถตรวจวัดได้น้อยมากถึงระดับหนึ่งในพันล้านหน่วยได้อย่างสบายๆ หรือถ้าเป็นเซนเซอร์ทางชีวภาพ ก็สามารถตรวจวัดได้ในระดับโมเลกุลได้อย่างสบายๆ เช่นกัน

ในปัจจุบัน พบว่ามีนักวิจัยด้านเซนเซอร์หลายกลุ่มทั่วโลกได้นำกราฟีนไปใช้ในเซนเซอร์ต่างๆ ในหลากหลากรูปแบบ ตัวอย่างเช่น การนำกราฟีนไปสร้างเป็นขั้วอิเล็คโทรด ในเซนเซอร์แบบเซลล์ไฟฟ้าเคมี เพื่อสร้างเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดน้ำตาลกลูโคสในเลือด ค้นพบว่าสามารถตรวจวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพและดีกว่าการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube, CNT) หนึ่งในสาเหตุที่ดีกว่า เพราะว่ากราฟีนมีพื้นที่ผิวที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารตรวจวัดได้มากกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ถึงสองเท่า ลองมองภาพดูง่ายๆ กราฟีนก็คือการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ผ่าตามแนวยาว แล้วแผ่ออกเป็นผืนนั่นเอง ดังนั้นมันจึงมีพื้นผิวให้ทำปฏิกิริยาได้ทั้งสองด้าน ดังนั้นกราฟีนจึงเป็นความตื่นเต้นครั้งใหม่ ที่สามารถใช้ในวงการวิจัยเซนเซอร์ เพื่อทำให้เซนเซอร์ทั้งไว ทั้งถูกและใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซโดยคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube, CNT sensor)

2.3.1 โครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ [7]

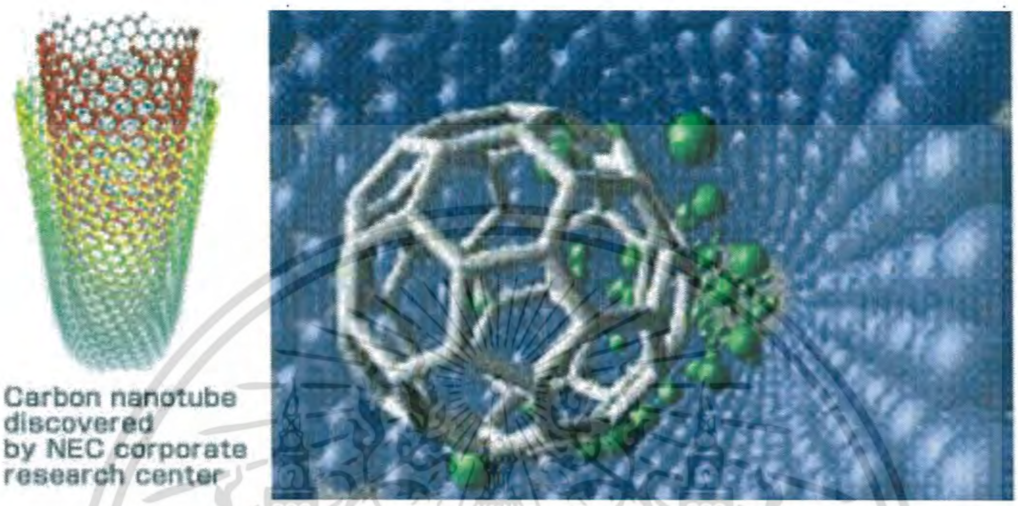
เป็นที่ทราบกันดีว่าอะตอมของคาร์บอนสามารถเรียงร้อยต่อกันได้หลายรูปแบบ ซึ่งการร้อยต่อกันในแต่ละรูปแบบจะส่งผลทำให้เกิดวัสดุที่แตกต่างกัน เช่น หากอะตอมของคาร์บอนมาร้อยต่อกันเป็นตาข่าย 3 มิติ แบบเททระฮีดรัล (Tetrahedral) ก็จะทำให้ได้วัสดุที่มีคุณค่าและความแข็งสูงที่เรารู้จักกันดี ก็คือ "เพชร (Diamond)" แต่ถ้าอะตอมของคาร์บอนมาเรียงต่อกันในแนวระนาบเป็นรูปวงแหวน 6 เหลี่ยม (Hexagonal) โดยแต่ละอะตอมของคาร์บอน จะยึดเกาะอยู่กับอะตอมของคาร์บอนอื่นอีก 3 อะตอม เราจะเรียกระนาบนี้ว่า "กราฟีน (Graphene)" ซึ่งระนาบของคาร์บอนหรือกราฟีนนี้จะไม่อยู่เดี่ยว ๆ ถ้าหากกราฟีนมาอยู่รวมกัน เป็นชั้น ๆ เราก็จะได้วัสดุที่เรียกว่า "กราไฟต์ (Graphite)" นอกจากเพชรและแกรไฟต์แล้ว อะตอมของคาร์บอนยังสามารถมาอยู่รวมกันได้อย่างไม่เป็นระเบียบ หรือไม่มีผลึกในโครงสร้างเกิดเป็นวัสดุที่เรียกว่า "ถ่าน (Charcoal)" แต่ถ้าอะตอมของคาร์บอนมาร้อยต่อกันเป็นรูปทรงกลมคล้ายลูกฟุตบอล เราจะเรียกโครงสร้างนี้ว่า "ฟูลเลอรีน (Fullerene)"

นอกจากวัสดุต่าง ๆ ข้างต้นแล้ว อะตอมของคาร์บอนยังสามารถรวมตัวกันเกิดเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก เรียกวัสดุชนิดใหม่นี้ว่า "คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube; CNT)" คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนมาเรียงต่อกันเป็นรูปท่อทรงกระบอกปลายปิดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ในขณะที่ความยาวของท่ออาจสูงถึงในระดับไมโครเมตรหรือมากกว่านั้นด้วยเหตุนี้วัสดุชนิดนี้จึงมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) ที่สูงกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ ค่อนข้างมาก

คาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดย Dr. Sumio Iijima ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ค้นพบในช่วงแรกนั้น มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อหลายชั้นวางซ้อนกัน (มีท่อเล็กวางซ้อนอยู่ภายในช่องว่างของท่อใหญ่) เรียกคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดนี้ว่า "คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotube; MWNT)" อีก2 ปี ต่อมาก็ได้มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotube; SWNT) ขึ้น แม้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้ นักวิทยาศาสตร์ยังคงมีความเข้าใจเกี่ยวกับวัสดุชนิดนี้น้อยมาก แต่เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นนี้สามารถผลิตได้ง่าย และมีราคาถูกกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว ดังนั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นจึงมีความสำคัญในเชิงการค้าสูงกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว ปัจจุบันคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายชั้นที่ผลิตจำหน่ายส่วนใหญ่จะเป็นแบบที่มีจำนวนผนัง 2 ชั้น (เรียกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนัง 2 ชั้น (Double-walled carbon nanotube; DWNT)



รูปที่ 2.3 ท่อนาโนคาร์บอน และบักกี้บอล คาร์บอนที่โครงสร้างเป็นรูปลูกบอล [7]

2.3.2 สมบัติบางประการของคาร์บอนนาโนทิวบ์ [8]

นักวัสดุศาสตร์ได้ให้ความสนใจศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาคุณสมบัติของฟูลเลอรีน (Fullerene) โมเลกุลที่มีโครงสร้างประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบและมีโครงสร้างอยู่ระหว่างโครงสร้างของเพชรและแกรไฟต์ในตระกูลของคาร์บอน และเมื่อไม่นานมานี้มีการค้นพบโครงสร้างใหม่ของฟูลเลอรีน มีลักษณะเป็นลูกบอลที่มีโครงสร้างเหมือนกรงปิดที่เป็นรูปทรงกลมซึ่งประกอบไปด้วย 60 อะตอมของคาร์บอนที่มีลักษณะสมมาตร (C60) ซึ่งเป็นการค้นพบการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมแบบใหม่ที่ไม่เคยพบมาก่อน นอกจากนั้นนักวิจัยได้ทำการดัดแปลงโมเลกุลที่ค้นพบนั้นให้ขยายยาวออกไปเป็นโครงสร้างที่เป็นท่อเรียวเล็กได้สำเร็จและเรียกโครงสร้างนั้นว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes ; C1,000,000)

คาร์บอนนาโนทิวบ์มีรูปร่างเป็นโครงตาข่ายของคาร์บอน ม้วนเชื่อมติดกันเป็นรูปทรงกระบอก และมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงไม่กี่นาโนเมตร คาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติที่แข็งแรงและเหนียวกว่าเหล็กกล้า สามารถนำไฟฟ้า หรือกลายเป็นฉนวน (ไม่นำไฟฟ้า) ได้ ขึ้นอยู่กับทิศทางของแนวการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนผนังคาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสายไฟจิ๋ว ในเครื่องใช้ไฟฟ้า (Nano electronics) ใช้ทอเป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูงและทนทานกว่าไทเทเนียม หรือผลิตเป็นแบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานนานนับสิบปี นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา เป็นต้น

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีโครงสร้างเป็นแบบโมเลกุลเดี่ยวที่มีลักษณะเป็นแถวยาวของคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นแนวยาวนับล้าน ๆเท่าของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์จะโค้งตัวม้วนเป็นแกนจากด้านหนึ่งไปบรรจบอีกด้านหนึ่ง ซึ่งนักเคมีมีแนวความคิดว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์นี้มีลักษณะเป็น Monoelemental polymer (โพลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยธาตุเพียงชนิดเดียว ซึ่งแตกต่างจากโพลิเมอร์ที่พบโดยทั่วไปที่จะพบอะตอมของธาตุอื่นด้วย

จากการทดลองและการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ท่อกลวงนี้มีความสามารถในการยืดหยุ่นเป็นพิเศษ มีความแข็งและมีคุณสมบัติที่ไม่ธรรมดาอีกหลายประการ ตัวอย่างเช่น สามารถหดกลับจากรูปหนึ่งไปสู่อีกรูปหนึ่งอย่างฉับพลันและสามารถสร้างเป็นเชือกที่มีความแข็งแรงมากเป็นพิเศษ นอกจากนั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า จึงทำให้มีการทดลองสร้างเป็นสายโลหะนาโน (Nanowires) และตัวนำไฟฟ้าในขนาดนาโนสเกล (Nanoscale transistors) และในปัจจุบันคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงและประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก

2.3.3 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซโดยคาร์บอนนาโนทิวบ์

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ (Sensors) เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ ทั้งในการตรวจและวัดปริมาณต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ ทางเคมีหรือทางชีวภาพ เซนเซอร์ถูกใช้ในสิ่งต่าง ๆ รอบตัวเรา เช่น ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ เครื่องตรวจวัดก๊าซรั่วหรือไฟไหม้ และในระบบควบคุมการผลิตทางอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภท แก๊สเซ็นเซอร์ (Gas Sensors) เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญมากตัวหนึ่ง ถูกใช้มากในงานหลายแขนง เช่น ระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมรม ทางการแพทย์ และทางเกษตร เครื่องตรวจวัดก๊าซรั่ว และเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ต่าง ๆ ตัวอย่างการใช้แก๊สเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดออกซิเจน ใช้ในการตรวจสอบการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ และเพื่อลดมลภาวะที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ การตรวจวัดระดับของแอมโมเนียนั้นสำคัญ เนื่องจากถูกใช้ในงานสาขาต่าง ๆ เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตสารเคมี งานเกี่ยวข้องต่อสุขภาพของมนุษย์และงานมลภาวะ

เซนเซอร์ของก๊าซพิษอย่างเช่น NOx, SOx, CO ก็มีความสำคัญในการเตือนระวังการรั่วไหลและตรวจวัดมลพิษภาวะที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ เซนเซอร์ตรวจวัด CO_2 ถูกใช้มากในการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขบวนการต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม การตรวจสอบสภาพของอากาศ และใช้กันอย่างกว้างขวางในการบรรจุหีบห่อผลผลิตทางการเกษตรและเวชภัณฑ์ เพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพของสินค้า หลักการพื้นฐานของแก๊สเซนเซอร์ คือ การวัดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น คุณสมบัติทางแสงหรือทางไฟฟ้าของวัสดุที่เปลี่ยนไปเมื่ออยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซที่ต้องการตรวจวัด อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิดคือ เซนเซอร์ชนิด Semi-conducting metal oxides (MOS) เซนเซอร์ชนิด Silicon เซนเซอร์ชนิด Polymer และเซนเซอร์ชนิด Organic ในจำนวนเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับก๊าซที่ระดับความเข็มข้นต่ำ เช่น ในเครื่องยนต์ หรือก๊าซพิษนั้นเซนเซอร์ชนิด Semi-conducting metal oxides เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่สลับซับซ้อนและมีราคาถูก อย่างไรก็ตามข้อเสียของเซนเซอร์ชนิดนี้ก็คือไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิห้องได้ ต้องทำงานที่อุณหภูมิสูง (700 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ย) ซึ่งทำให้จำกัดการใช้งาน และทำให้กินไฟมาก กรณีของ Semi-conducting metal oxides (MOS) เซนเซอร์นั้น ส่วนใหญ่สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด n ซึ่งความต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในบรรยากาศของออกไซด์ก๊าซ เช่น O_3 จึงทำให้การเพิ่มความไวของเซนเซอร์ชนิดนี้เป็นไปได้โดยยาก ในขณะที่เซนเซอร์ชนิดอื่น ๆ ที่สร้างจากโพลิเมอร์นำไฟฟ้า ก็มีปัญหาทางด้านความไวที่จำกัด หรือชนิดที่ทำจาก Organic CuPCs ก็มีค่าความต้านทานที่มากเกินไป (R > 10 G-Ohm) ดังจะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีปัจจุบันของแก๊สเซนเซอร์นั้นไม่สามารถสนองความต้องการที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้ อันได้แก่ เซนเซอร์ที่กินไฟน้อย มีขนาดเล็ก สามารถที่จะพกพาหรือติดกับอวัยวะของคนได้ สามารถทำงานที่อุณหภูมิห้อง มีประสิทธิภาพสูง (ช่วงพิกัดการตรวจวัดกว้าง มีความไวสูง ให้ค่าที่แน่นอน) สามารถใช้ได้ในสภาวะที่อันตราย มีอายุการใช้งานนาน และมีราคาถูก

ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร และมีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับโมเลกุลของก๊าซได้เป็นอย่างดี มาประยุกต์เป็นแก๊สเซนเซอร์ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การผสมโคบอลต์ออกไซด์ กับกราฟีนและคาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซ

2.4.1 โครงสร้างและคุณสมบัติทั่วไปของโคบอลต์ออกไซด์

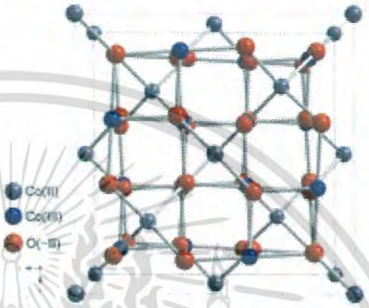
โคบอลต์ออกไซด์ คือ สารประกอบอนินทรีย์ที่มีโดยทั่วไปจะมีหลายสูตรโมเลกุลแต่สูตรโมเลกุลที่มีความเสถียรคือ Co_3O_4 สามารถสังเคราะห์ได้จาก CoO ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 ถึง 900 องศาเซลเซียส ดังสมการ

$$Co_3O_4 \rightleftharpoons 3\ CoO + 1/2\ O_2$$

นาโนโคบอลต์ออกไซด์เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์ ที่มีการนำมาใช้งานในรูปแบบของวัสดุนาโน ตัวอย่างการใช้โคบอลต์ออกไซด์ คือ การนำโคบอลต์ออกไซด์มาเป็นสารให้สีในเซรามิกส์และแก้วเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 850 ถึง 900 องศาเซลเซียส จะให้สีน้ำตาลเทา สลายตัวที่ 1,935 องศาเซลเซียสและไม่ละลายน้ำ คุณสมบัติทั่วไปของโคบอลต์ออกไซด์แสดงดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของโคบอลต์ออกไซด์

โคบอลต์ออกไซด์	
ลักษณะทางกายภาพ	โคบอลต์ (II) ไดโคบอลต์ (III) ออกไซด์
โครงผลึก	
ชื่อตามระบบไอยูแพค (IUPAC name)	(cobalt (II) dicobalt (III) oxide)
ชื่อสามัญ	โคบอลต์ออกไซด์
สูตรโมเลกุล	Co_3O_4 $CoO.Co_2O_3$
น้ำหนักโมเลกุล	240.80 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	6.11 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	895 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่สลายตัว	900 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลายในน้ำ	ไม่ละลาย
ความสามารถในการละลายในกรดและเบส	ละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 สารโลหะออกไซด์ (Metal Oxide)

สารโลหะออกไซด์ (Metal Oxide) เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า เช่น โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) ทินออกไซด์ (SnO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO_2) ฯลฯ การทำงานของเซนเซอร์อาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้าของสารโลหะออกไซด์ (Metal Oxide) เมื่อจับกับโมเลกุลกลิ่นหรือก๊าซ ลักษณะพิเศษของหัวเซนเซอร์ประเภทนี้คือมีการติดอุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อกระตุ้นให้เซนเซอร์ทำงาน เนื่องจากสารโลหะออกไซด์นั้นไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ในอุณหภูมิห้อง

จุดเด่นคือ เซนเซอร์มีราคาถูก มีอายุการใช้งานยาว สามารถใช้ในที่มีความชื้นได้ และมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไม่ซับซ้อน

จุดด้อยคือ ตัวเซนเซอร์มีความไวปานกลางสามารถตรวจวัดกลิ่นหรือก๊าซที่มีความเข้มข้นระดับ 5-500 ppm จำเป็นต้องใช้ในสภาวะอุณหภูมิสูง สามารถตรวจจับกลิ่นหรือก๊าซบางชนิด กินไฟมาก

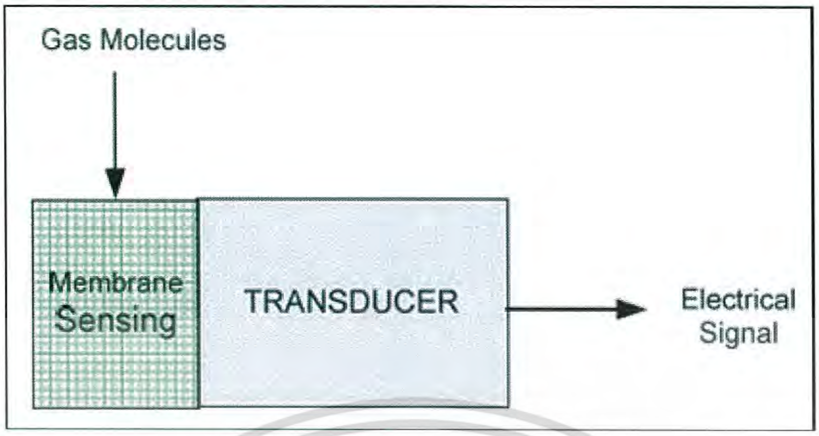
เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ที่สร้างโดยกราฟีน (Grephene) และคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube) เซนเซอร์มีข้อเสียในเรื่องของต้องใช้อุณหภูมิสูง เพื่อทำให้ออกซิเจน (Co_3O_4) เกิดเป็นออกซิเจนไอออน (O^-) บริเวณพื้นผิวของเซนเซอร์ก่อน จึงจะสามารถตรวจวัดก๊าซได้ แต่มีข้อดีดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ มีการนำโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) ที่สังเคราะห์ขึ้นมาผสมกับกราฟีน (Grephene) และคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube, CNT) เพื่อศึกษาว่าเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตรวจวัดก๊าซได้หรือไม่ และสามารถตรวจวัดได้ที่อุณหภูมิห้องหรือไม่ โดยในขั้นต้นจะใช้ทดสอบกับก๊าซแอมโมเนีย (NH_3)

2.5 แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor) [9-11]

2.5.1 หลักการทำงาน

แก๊สเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์จำพวกทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่ง ใช้สำหรับตรวจจับก๊าซพิษ และการตรวจจับก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ในยานยนต์ โรงงงานอุตสาหกรรม บ้านเรือน ตลอดจนที่ต่าง ๆ แล้วทำการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า ตามคุณสมบัติที่ต้องการตรวจสอบ อุปกรณ์ชิ้นนี้มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ แผ่นตรวจจับ (Membrane Sensing) ทำหน้าที่ตรวจจับหรือทำปฏิกิริยาทางเคมีกับก๊าซที่ต้องการวัด ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้นกับส่วนตรวจจับเป็นสัญญาณไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4 ทั้งสองส่วนอาจรวมเข้าเป็นตัวเดียวกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบหลัก Gas Sensor [8]

หลักการพื้นฐานของแก๊สเซนเซอร์ คือ การวัดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น คุณสมบัติทางแสงหรือทางไฟฟ้าของวัสดุที่เปลี่ยนไป เมื่ออยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซที่ต้องการตรวจวัด ความเข้มข้นของแก๊สที่ต้องการตรวจวัด และชนิดของเซนเซอร์ เช่น

-สารโลหะออกไซด์ (Metal Oxide) เช่น ทินออกไซด์ (SnO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO_2) เป็นต้น การทำงานของเซนเซอร์อาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้าของสาร เมื่อจับกับโมเลกุลกลิ่นหรือก๊าซ ซึ่งเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปลักษณะใดนั้นจะขึ้นอยู่กับวัสดุเซนเซอร์ที่ใช้และสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุด้วย

จุดเด่นคือ เซนเซอร์มีราคาถูก มีอายุการใช้งานยาว สามารถใช้ในที่มีความชื้นได้ และมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไม่ซับซ้อน

จุดด้อยคือ ตัวเซนเซอร์มีความไวปานกลางสามารถตรวจวัดกลิ่นหรือก๊าซที่มีความเข้มข้นระดับ 5-500 ppm จำเป็นต้องใช้ในสภาวะอุณหภูมิสูง สามารถตรวจจับกลิ่นหรือก๊าซบางชนิด กินไฟมาก

-โพลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conducting Polymer) เช่น โพลิไพร์โรล (Polypyrrole) โพลิอะนิลีน (Polyanilene) เป็นต้น เซนเซอร์ใช้ฟิล์มโพลิเมอร์กึ่งนำไฟฟ้า (Semiconductor polymer) ที่ดูดซับโมเลกุลเฉพาะอย่างได้ เมื่อฟิล์มโพลิเมอร์ดูดซับโมเลกุลกลิ่นหรือก๊าซเข้าไปจะบวมหรือพอง ทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลงและมีผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนด้วย ซึ่งสามารถวัดความเปลี่ยนแปลงได้ โดยทั่วไปรูปร่างแผ่นฟิล์มสามารถเปลี่ยนแปลงย้อนกลับได้ อย่างไรก็ตามเนื้อฟิล์มอาจเกิดความเสียหาย หากใช้ในสภาพแวดล้อมที่โมเลกุลกลิ่นหรือก๊าซเข้มข้นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเด่นของเซนเซอร์ชนิดนี้คือ สามารถใช้งานที่อุณหภูมิห้อง ใช้งานได้หลากหลาย ตัวเซนเซอร์มีความไวสูงสามารถตรวจวัดโมเลกุลที่มีความเข้มข้นระดับ 0.1-100 ppm ได้ มีความเสถียร

จุดด้อยคือ ไม่เหมาะกับการใช้ในที่มีความชื้นสูงเพราะฟิล์มโพลิเมอร์ดูดซับไอน้ำได้ดี และหากไม่สามารถขจัดโมเลกุลกลิ่นหรือก๊าซออกจากฟิล์มหมด จะมีผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนไปจุดอ้างอิงเดิม

-แมสเซนซิทีฟเพียโซอิเล็กทริก (Mass Sensitive Piezoelectric) เซนเซอร์ชนิดนี้ทำจากผลึกควอตซ์ (quartz) หรือวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (เป็นวัสดุที่มีสมบัติพิเศษ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวแล้ววัสดุจะเกิดการสั่น) เคลือบทับด้วยแผ่นเมมเบรน (membrane) ที่เลือกจับเพียงไอระเหยสารบางชนิด การทำงานของเซนเซอร์อาศัยการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance) ของผลึกควอตซ์เมื่อมวลเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อโมเลกุลก๊าซหรือกลิ่นลอยมากระทบแผ่นเมมเบรน มันจะถูกดูดซับเข้าไปทำให้มวลวัสดุ (ผลึกควอตซ์กับเมมเบรน) เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance frequency) เปลี่ยนไปจากเดิมซึ่งตรวจวัดได้

จุดเด่นคือ เซนเซอร์มีความไว และมีความสามารถในการคัดแยก (Selectivity) สูง สามารถใช้ในที่มีความชื้นสูงได้

จุดด้อยคือ อุปกรณ์ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

-แมสซีเล็คตีฟเซนเซอร์ (Mass Selective Sensor) เป็นเซนเซอร์ที่ใช้เทคโนโลยีแบบเดียวกับเครื่องมือวิเคราะห์ชื่อ แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Mass spectrometer)

จุดเด่นคือ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งปริมาณและชนิดขององค์ประกอบ เหมาะสำหรับงานวิจัย

จุดด้อยคือ เครื่องมือมีราคาแพง ผู้ใช้งานต้องมีความรู้และความชำนาญในการใช้เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 คุณสมบัติของแก๊สเซนเซอร์ที่สำคัญ

1. ความไวในการตอบสนอง: ตอบสนองอย่างรวดเร็วในทันทีเมื่อก๊าซที่ทำการวัดมาสัมผัสกับเซนเซอร์
2. ความไวในการวัด: ความแตกต่างของปริมาณก๊าซ คุณสมบัติข้อนี้จะสำคัญเฉพาะกรณีก๊าซที่เราวัดมีปริมาณน้อย ๆ หรือต้องการความถูกต้องในการวัดสูงเท่านั้น
3. ความจำเพาะ: สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างก๊าซที่ต้องการวัดกับก๊าซที่ไม่ต้องการวัด เช่นเซนเซอร์สำหรับวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะจำเพาะเฉพาะคาร์บอนมอนอกไซด์เท่านั้น
4. ความเสถียร: ผลในการวัดก๊าซคงที่ไม่เสื่อมสภาพเร็ว เพื่อให้เซนเซอร์สามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่อง
5. พิสัยการวัด: ช่วงกว้างของการวัดของเซนเซอร์บางตัวสามารถวัดก๊าซปริมาณตั้งแต่ 100 – 1,000 ppm แต่บางตัวใช้วัดใน Range 10 - 50 ppm

เช่น Electrochemical gas sensor เหมาะสำหรับใช้ตรวจจับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ การจะตรวจวัดก๊าซใด ๆ ก็ตามจะต้องทราบถึงลักษณะและคุณสมบัติของก๊าซที่ต้องตรวจวัด เพื่อเลือกใช้หัววัดได้อย่างถูกต้อง และจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติดังได้กล่าวข้างต้นนี้ หรือพิจารณาเลือกใช้ตามเกณฑ์ทั่วไป คือ มีความจำเพาะต่อก๊าซ ผ่านการปรับเทียบมาตรฐานเครื่องวัด (Calibration) ตอบสนองต่อก๊าซได้ทันที เคลื่อนย้ายง่ายและขนาดของเซนเซอร์ แต่ก๊าซระเหยบางชนิดที่อาจจะรับเข้ามาจากภายนอกห้อง (Out door air) หรือจากน้ำยาเวชภัณฑ์ต่างๆ ในโรงพยาบาล (Indoor air) ที่มีความเจือจางมาก สะสมในห้องผ่าตัด ห้องศัลยกรรม ห้องคลอด ฯลฯ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพผู้ป่วยและเจ้าหน้าที่ จึงต้องเลือกใช้แก๊สเซนเซอร์ที่มีความไว (Sensitivity) และพิสัยการวัด หรือความละเอียด (Resolution) อย่างเหมาะสมให้มากกว่านี้

จึงเห็นได้แก๊สเซนเซอร์มีหลากหลายประเภท ซึ่งแบ่งตามลักษณะการทำงานออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1. Adsorption Gas Sensor ในกลุ่มนี้ทำงานโดยวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อมีโมเลกุลของก๊าซถูกดูดซับเข้าไปบนผิวของวัสดุที่ใช้ทำเซนเซอร์ ซึ่งเมื่อผิววัสดุที่ใช้ทำดูดซับโมเลกุลของก๊าซเข้าไปที่ผิวสัมผัสก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยทำให้ surface potential เกิดการนำไฟฟ้ามากขึ้นหรือลดลง และอิเล็คโทรดจะทำหน้าที่วัดความต้านทานไฟฟ้า หรือค่าการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นไปตามปริมาณความเข้มข้นของก๊าซที่เข้ามาสัมผัส โดย Adsorption Gas Sensor นี้จะแบ่งเป็นอีก 2 ชนิด (ขึ้นอยู่กับก๊าซตัวอย่างแต่ละชนิด ที่เข้ามาสัมผัสกับวัสดุเซนเซอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 n-type gas sensor เซนเซอร์ชนิดนี้เมื่อมีก๊าซตัวอย่างเข้ามาสัมผัส จะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (หรือค่าความต้านทานลดลง) เนื่องจากก๊าซตัวอย่างให้อิเล็กตรอนกับวัสดุเซนเซอร์ ทำให้ที่พื้นผิวของวัสดุเซนเซอร์มีอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้นไปอีก ดังสมการต่อไปนี้

ให้ electron

$$CO_{(g)} + O^{-}_{(ad)} \rightarrow CO_{2(g)} + e^{-} \quad (1)$$

$$CO + 2O^{-} \rightarrow CO_3^{2-} \rightarrow CO_2 + \tfrac{1}{2}O_2 + 2e^{-} \quad (2)$$

⇨ n-type

ทำให้ได้ผลการทดลองในลักษณะค่าความต้านทานทางไฟฟ้าลดลง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5

1.2 p-type gas sensor เซนเซอร์ชนิดนี้เมื่อมีก๊าซตัวอย่างเข้ามาสัมผัส จะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่ลดลง (หรือค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น) เนื่องจากก๊าซตัวอย่างรับอิเล็กตรอนจากวัสดุเซนเซอร์ ทำให้ที่พื้นผิวของวัสดุเซนเซอร์มีอิเล็กตรอนลดลงไปอีก ดังสมการต่อไปนี้

รับ electron

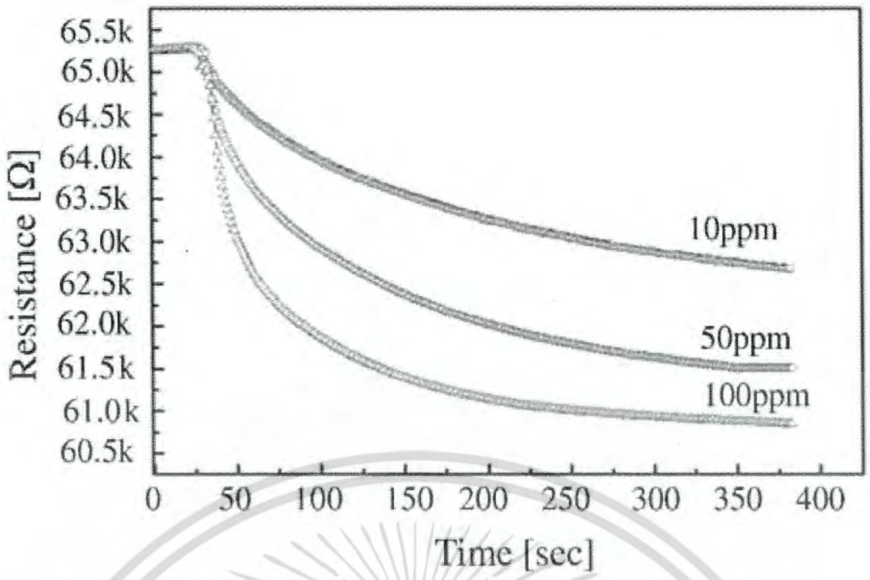
$$NO_2 + e^{-} \rightarrow NO_2^{-} \quad (3)$$

⇨ p-type

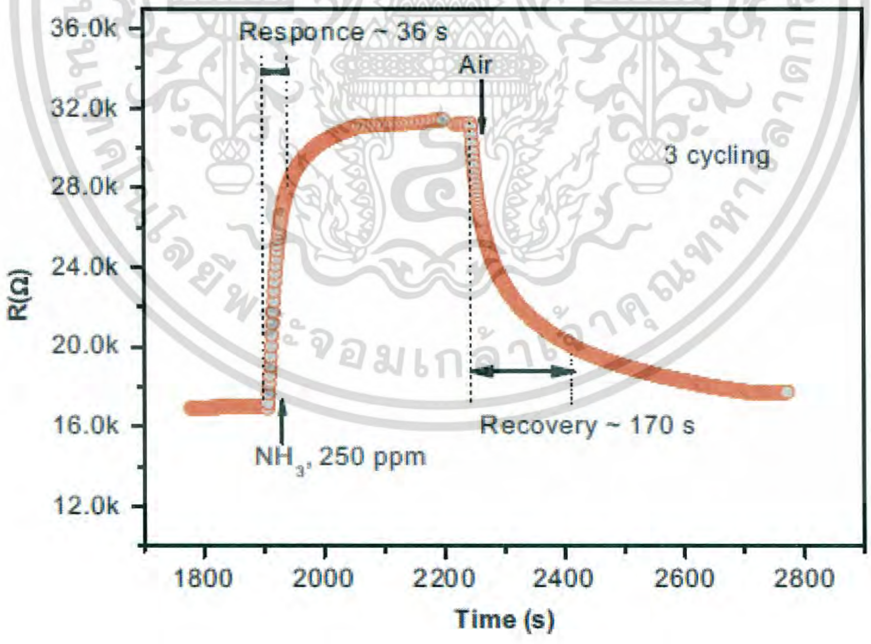
ทำให้ได้ผลการทดลองในลักษณะค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6

ในงานวิจัยนี้เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น เป็นเซนเซอร์ในกลุ่ม Adsorption Gas Sensor ชนิด p-type gas sensor โดยมีหลักการดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotube; MWNT) เมื่อสัมผัสกับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 10-100 ppm [37]



รูปที่ 2.6 แสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของ polyaniline (PANI) เมื่อสัมผัสกับก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ที่ความเข้มข้น 250 ppm [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Reaction Gas Sensor ทำการวัดผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อก๊าซที่ต้องการวัดเกิดปฏิกิริยา เช่น เซนเซอร์ที่มีคะละลิสต์จะใช้หลักการของกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของออกซิเจนกับความร้อน จึงมีการประยุกต์ใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิเพื่อตรวจวัดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยใช้ออกซิเจนเป็นคะละลิสต์กระบวนการคือ เมื่อมีก๊าซ CO เข้ามาสัมผัสกับเซนเซอร์จนเกิดความร้อน จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นขึ้น เมื่อความร้อนเพิ่มขึ้นการตรวจจับจะเร็วยิ่งขึ้น การตรวจวัดปริมาณของก๊าซวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงความร้อน

3. Selective Membrane Gas Sensor ทำงานโดยใช้ประโยชน์ของ Sensing membrane ที่ยอมให้ก๊าซบางชนิดเท่านั้นผ่านเข้าไปได้ เช่น เซนเซอร์ที่ใช้วัดออกซิเจนจะมี แผ่นเมมเบรนแบบ solid electrolyte ที่ทำมาจาก Yttria-doped zirconia (Y_2O_3 dope ZrO_2) เมื่อมีออกซิเจนซึมผ่านก็จะทำให้วัสดุดังกล่าวเปลี่ยนแปลง จากนั้นจึงวัดการเปลี่ยนแปลงเป็นปริมาณของก๊าซ ส่วนก๊าซชนิดอื่นๆ ก็จะใช้วัสดุที่ต่างกันออกไป

การนำเซนเซอร์ไปใช้งานขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้ เช่น ใช้ประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสุขอนามัยของโรงงานอุตสาหกรรม ควบคุมคุณภาพของสินค้า ควบคุมการปล่อยมลพิษจากแหล่งต่าง ๆ เช่น ยานยนต์ ระบบแจ้งเตือนภายในบ้าน และอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลพวงจากการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสารมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อม

Market/Application	Examples of detected chemical compound and classes
Automotive	O_2, H_2, CO, NO_x, HCs
IAQ	CO, CH_4, Humidity, CO_2, VOCs
Food	Bacterial, biological, chemicals, fungal toxins, humidity, pH, CO_2
Agricultural	NH_3, amine, humidity, CO_2, pesticides, Herbicides
Medical	O_2, glucose, urea, pH, CO_2 Na^+, K^+, Ca^+, Cl^-, bio-molecules, H_2S
	Infection disease , ketones, anesthesia gase
Water treatment	pH, CO_2, H_2S, O_2, O_3
Environmental	CO, NO_x, HCs, CH_4, CO_2, VOCs, pH, SO_x, heavy metal ions
Industrial safety	Indoor air quality, toxic gases, combustible gas, O_2
Utilize [gases electric]	CO, NO_x, HC, CO_2, SO_x
Petrochemical	HCs, conventional pollutant
Steel	O_2, H_2, conventional pollutant
Military	Agent, explosive, propellant
Aerospace	O_2, H_2, CO_2, humidity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดขึ้นของสารมลพิษทางอากาศ การคงอยู่ และลักษณะการเปลี่ยนไปของสารมลพิษ ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดคือ สภาพแวดล้อม เช่น ลักษณะพื้นที่ อุณหภูมิ ความเร็วลม ทิศทางลม ดังนั้นการที่จะตรวจวัดและควบคุมมลพิษดังกล่าวให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน จึงมีการนำเทคโนโลยีอื่นๆ เข้ามาร่วมด้วย เพื่อเป้าหมายใหญ่ 2 ข้อ คือ

1. การประเมิน ทำนายสภาพอากาศ และอุณหพลศาสตร์ได้อย่างเที่ยงตรง รวดเร็ว
2. ตรวจจับและวิเคราะห์หาแหล่งกำเนิดของสารมลพิษได้อย่างแม่นยำ

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 ข้อนี้มาวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องก็จะสามารถวินิจฉัยชนิดของมลพิษ วิเคราะห์หาสาเหตุ และทำนายลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่อจากนั้นได้ เริ่มจากนำแก๊สเซนเซอร์และเซนเซอร์ชนิดอื่น ๆ ไปติดตั้งบนเรดาร์ ดาวเทียม เครื่องรับคลื่นสัญญาณไมโครเวฟ (อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์) เครื่องวัดความเร็วลม และตามสถานที่สำคัญที่มีความอ่อนไหวต่อมลพิษ เช่น โรงพยาบาล ฯลฯ ซึ่งเรียกว่า เซนเซอร์เน็ตเวิร์ค จากนี้จะเรียกแก๊สเซนเซอร์ว่าโหนด แต่ละโหนดจะทำงานร่วมกันเป็นเครือข่าย โดยใช้การส่งสัญญาณผ่านสายสัญญาณทั้งแบบมีสายและไร้สาย เข้ามาที่คอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมแปลงสัญญาณที่รับเข้ามาอีกทีและรายงานผลทันที การออกแบบเซนเซอร์เน็ตเวิร์คอย่างเหมาะสมจะช่วยให้การตอบสนองและการตัดสินใจต่อข้อมูลที่ต้องการ เช่น มลพิษ และเหตุการณ์ต่าง ๆ ได้ทันทีและถูกต้อง ซึ่งวิทยาการนี้จะช่วยป้องกันอันตรายจากมลพิษทางอากาศได้ทั้งก่อนเกิดและหลังเกิดสารมลพิษได้ เช่น เมื่อโรงงานพลังงานไฟฟ้า ถนน โรงงานอุตสาหกรรม และโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ ที่มีโหนดนี้ติดตั้งจะช่วยให้การตอบสนองและการตัดสินใจต่อเหตุการณ์ต่าง ๆ ผิดพลาดได้น้อยลง และลดความเสี่ยงต่ออันตรายต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นได้

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้แก๊สเซนเซอร์ตรวจวัดมลพิษทางอากาศแบบเครือข่ายของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นประเทศที่ให้ความสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีควบคู่ไปกับความเป็นหนึ่งเดียวกับธรรมชาติ มลพิษทางอากาศในโตเกียวนั้นต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานมาก แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเฝ้าระวังมลพิษยังเป็นสิ่งที่ต้องทำต่อไป เพราะถึงแม้ว่าข้อมูลจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศจะเชื่อถือได้ แต่การดำเนินงานของสถานีฯ ต้องใช้งบประมาณสูง พื้นที่ที่ใช้ติดตั้งสถานีมีจำกัด และที่ดินมีราคาแพง นอกจากนี้มลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นตามท้องถนนที่มีอาคารสูงล้อมรอบ อาคารเหล่านี้จึงทำหน้าที่เป็นโล่ป้องกันลม ก๊าซเสียที่ปล่อยออกมาจากยานยนต์จึงสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สถานีฯ จึงตรวจวัดก๊าซได้เฉพาะบางพื้นที่เท่านั้น แต่ไม่ครอบคลุมถึงการแพร่กระจายของมลพิษทางอากาศแบบเชิงพื้นที่ที่มีความอ่อนไหวต่อมลพิษ เช่น โรงพยาบาล ฯลฯ

นักวิจัยญี่ปุ่นจึงคิดสร้างระบบการวิเคราะห์การแพร่กระจายของก๊าซ เพื่อใช้ในการตรวจวัดมลพิษอากาศ และศึกษาการแพร่กระจายของก๊าซเชิงพื้นที่ Wataru Tsujita (2005) เชื่อว่าวิธีการนำเซนเซอร์มารวมกัน และมีกระบวนการส่งสัญญาณอย่างเหมาะสม จะช่วยส่งข้อมูลจากพื้นที่ที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหามลพิษทางอากาศได้เป็นอย่างดี เขาได้ทดลองนำแก๊สเซนเซอร์รุ่น TGS2106 (NO_2 gas sensor) และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับความชื้นสัมพัทธ์ไปติดตั้งตามสถานที่ต่าง ๆ รอบมหาวิทยาลัยโตเกียว เมื่อแก๊สเซนเซอร์ตรวจจับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ได้ ก็จะส่งข้อมูลมาที่คอมพิวเตอร์ของมหาวิทยาลัย และรายงานผลการตรวจวัดในแต่ละพื้นที่ผ่านเว็บไซต์ ขณะเดียวกันก็ใช้เครื่อง NOx analyzer ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เช่นเดียวกับสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศเป็นเครื่องอ้างอิงผลการทดลอง จากนั้นนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกัน หากพบว่าข้อมูลจากแก๊สเซนเซอร์ตัวใดที่ต่างกันกับเครื่องอ้างอิง แก๊สเซนเซอร์ตัวนั้นก็จะถูกคาริเบรทโดยอัตโนมัติทันทีด้วยข้อมูลจากเครื่องอ้างอิง ถ้าความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่วัดได้ตรงกันกับเครื่องอ้างอิงก็แสดงว่าเซนเซอร์ได้รับการคาริเบรทแล้ว ดังนั้นวิธีการคาริเบรทแบบอัตโนมัติจึงเป็นวิธีใหม่ของการวิจัย การเชื่อมต่อเข้าระบบเครือข่ายจึงไม่เพียงแต่ใช้เก็บข้อมูลจากเซนเซอร์เท่านั้นแต่ยังเป็นการวินิจฉัยสารมลพิษที่ได้จากการตรวจวัดและเป็นการคาริเบรทเซนเซอร์ไปพร้อมกันด้วย วิธีนี้จึงช่วยให้เราสามารถตรวจวัดมลพิษทางอากาศในแต่ละพื้นที่ที่ห่างกันได้ และเมื่อนำข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาและพารามิเตอร์อื่นๆ มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมพิเศษ เช่น GIS ก็จะสามารถคาดการณ์ ทำนายถึงระดับความรุนแรง การเปลี่ยนแปลงของมลพิษที่เกิดขึ้นแล้วได้

2.5.3 ประโยชน์ของการใช้แก๊สเซนเซอร์

1. เพื่อควบคุมโรงงาน เครื่องจักรกล และรถยนต์ ไม่ให้ปล่อยก๊าซเสียและฝุ่นละอองออกมาปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม จนเป็นอันตรายต่อมนุษย์
2. เพื่อควบคุมการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์เกิดได้สมบูรณ์ที่สุด ช่วยประหยัดน้ำมันและทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพสูง
3. เพื่อทำหน้าที่เป็นจมูกอิเล็กทรอนิกส์ช่วยในการวิเคราะห์ก๊าซชนิดต่าง ๆ หรือควันบุหรี่ให้อยู่

ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์

จากข้อมูลเกี่ยวกับเซนเซอร์การตรวจอากาศดังที่ยกตัวอย่างข้างต้นนี้ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเซนเซอร์มีข้อได้เปรียบ คือ มีความรวดเร็วในการตรวจวัด มีอายุการใช้งานยาวนาน มีความจำเพาะต่อก๊าซ สามารถปรับเทียบ (Calibrate) ได้ วิเคราะห์ผลได้ทันที และด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเซนเซอร์จึงได้มีการนำแก๊สเซนเซอร์ฝังตัว (Embedded Sensor) ลงในเครื่องมือตรวจวัดก๊าซแบบพกพา (Portable unit) ที่มีขนาดเล็ก ใช้งานง่าย และสามารถเปลี่ยนเซนเซอร์ทดแทนได้ถ้าเกิดการชำรุดเสียหาย หรือหมดอายุการใช้งาน แต่การใช้แก๊สเซนเซอร์ก็มีข้อจำกัดที่เซนเซอร์บางชนิดขาดความจำเพาะต่อก๊าซ เมื่อเกิดอุบัติการณ์และกิจกรรมต่าง ๆ เช่น ไฟไหม้หรือมีการรั่วไหลของก๊าซออกจากขั้นตอนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้ก๊าซหลายชนิดแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกสู่บรรยากาศ การวิเคราะห์ชนิดของก๊าซจึงอาจจะผิดพลาดได้ ส่งผลให้ไม่สามารถวิเคราะห์กลับไปหาต้นเหตุได้ ดังนั้นเซนเซอร์ที่จะนำมาใช้จึงต้องได้รับการรับรองว่าปรับเทียบมาตรฐานแล้ว หากประเทศไทยเรามีการพัฒนาการใช้แก๊สเซนเซอร์และแก๊สเซนเซอร์เน็ตเวิร์คอย่างเป็นระบบ และมีประสิทธิภาพ จะสามารถควบคุมคุณภาพอากาศและสิ่งแวดล้อมได้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ. 2012 H. Chen และคณะ [12] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีเอทานอลและฟอลมัลดีไฮด์ดูดซับบนเซนเซอร์ โดยใช้วัสดุคือ TiO_2 และ ZnO เคลือบลงบนอะลูมิเนียมซับสเตรท โดยใช้เทคนิค screen printing ในขั้นตอนของการทดสอบเซนเซอร์ เซนเซอร์ที่สร้างขึ้นจะถูกกระตุ้นโดยแสง UV และสามารถทำการทดลองได้ที่อุณหภูมิห้อง

ปี ค.ศ. 2010 C.T. Wang และคณะ [13] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีคาร์บอนมอนอกไซด์ดูดซับบนเซนเซอร์ โดยใช้วัสดุคือ vanadium-tin oxide nanopaticles หยดลงบนอะลูมิเนียมซับสเตรท ที่มีทองคำเคลือบอยู่ทำหน้าที่เป็นอิเล็คโทรด ส่วนด้านหลังเคลือบด้วย RuO_2 heater เพื่อให้เซนเซอร์สามารถทดสอบได้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมีการตอบสนองที่ดี มีความเสถียร มีค่า reproducibility สำหรับตรวจวัด CO ที่ดี และสามารถตรวจวัด CO ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (175 องศาเซลเซียส)

ปี ค.ศ. 2012 L. O. Peres และคณะ [14] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีเอทานอลดูดซับบนเซนเซอร์ โดยใช้วัสดุคือ polymer (poly, (2, dodacanoylsulfanyl-p-phenylenevinylene)) เคลือบลงบน fibreglass substrate ซึ่งเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมีราคาถูก มีความจำเพาะเจาะจงกับการวิเคราะห์เอทานอล และสามารถทำการทดลองได้ที่อุณหภูมิห้อง

ปี ค.ศ. 2012 K. Y. Dong และคณะ [15] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมี NO_2 และ NH_3 ดูดซับบนเซนเซอร์ โดยใช้วัสดุคือ single-walled carbon nanotube เคลือบลงบนซิลิกอนซับสเตรท โดยใช้ทองคำเป็นอิเล็คโทรด และสามารถทำการทดลองได้ที่อุณหภูมิห้อง

ปี ค.ศ. 2012 G. Lu และคณะ [16] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ดูดซับบนเซนเซอร์ โดยใช้วัสดุคือ ZnO/SnO_2 materials ในขั้นตอนของการทดสอบเซนเซอร์ เซนเซอร์ที่สร้างขึ้นจะถูกกระตุ้นโดย UV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

light และสามารถทำการทดลองได้ที่อุณหภูมิห้อง อีกทั้งยังสามารถตรวจจับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในระดับต่ำ (ppb)

ปี ค.ศ. 2012 P. Gao และคณะ [17] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีอะซิโตนดูดซับบนเซนเซอร์ ใช้วัสดุคือ WO_3–Cr_2O_3 thin films เตรียมโดยใช้เทคนิคโซล เจล (sol–gel method) จากนั้นเคลือบทับลงบนซับสเตรท ที่มีทองคำเคลือบอยู่ทำหน้าที่เป็นอิเล็คโทรด เซนเซอร์สามารถทดสอบได้ดีที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ซึ่งเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมีการตอบสนองที่ดี มีความเสถียร

ปี ค.ศ. 2011 H. J. Yoon และคณะ [18] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดูดซับบนเซนเซอร์ โดยใช้วัสดุคือ graphene sheet จากนั้นเคลือบทับลงบนซิลิคอนซับสเตรท ที่มีทองคำเคลือบอยู่ทำหน้าที่เป็นอิเล็คโทรด เซนเซอร์สามารถทดสอบได้ที่อุณหภูมิห้อง มีความว่องไวในการตรวจวัดสูง และมีความเสถียร

ปี ค.ศ. 2012 E. Massura และคณะ [19] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีไนโตรเจนไดออกไซด์ดูดซับบนเซนเซอร์ ใช้วัสดุคือ graphene sheet และสังเคราะห์โดยวิธีสก๊อตเทปลอก graphene sheet ออกมา จากนั้นเคลือบทับลงบนแพททินัมซับสเตรท ที่มีทองคำเคลือบอยู่ทำหน้าที่เป็นอิเล็คโทรด เซนเซอร์สามารถทดสอบได้ที่อุณหภูมิห้อง มีการตอบสนองที่ดี มีความเสถียร

ปี ค.ศ. 2012 M. A. Andio และคณะ [20] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีคาร์บอนมอนออกไซด์ดูดซับบนเซนเซอร์ ใช้วัสดุคือ SnO_2 nanoparticles จากนั้นเคลือบทับลงบนซับสเตรทโดยวิธี Ink-jet printing ที่มีทองคำเคลือบอยู่ทำหน้าที่เป็นอิเล็คโทรด เซนเซอร์มีการตอบสนองที่ดี และมีประสิทธิภาพสูงในการตรวจวัดก๊าซ

ปี ค.ศ. 2012 C. V. Tuan และคณะ [21] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมี NH_3 ดูดซับบนเซนเซอร์ ใช้วัสดุคือ polyaniline nanowires จากนั้นเคลือบทับลงบนซับสเตรท ที่มีแพททินัมเคลือบอยู่ทำหน้าที่เป็นไมโครอิเล็คโทรด เซนเซอร์มีการตอบสนองที่ดี สามารถตรวจจับก๊าซได้ที่อุณหภูมิห้อง และมีประสิทธิภาพสูงในการตรวจวัดก๊าซ NH_3

ปี ค.ศ. 2000 J.R. Brown และคณะ [22] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมี H_2S, CH_4 และ NO_2 ดูดซับบนเซนเซอร์ ใช้วัสดุคือ tin oxide thin film ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้เทคนิค metal- vapour deposition (MOCVD) เซนเซอร์สามารถตรวจจับก๊าซได้ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และ organic chemical อิทธิพลจากความชื้นก็ไม่มีผลต่อการตรวจวัด H_2S, CH_4 และ NO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี ค.ศ. 1999 H. Gong และคณะ [23] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมี methanol, ethanol, isopropanol, acetone และ acetic acid ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (10, 10^2, 10^3 ppm ในอากาศ) ดูดซับบนเซนเซอร์ ใช้วัสดุคือ tin oxide thin film ซึ่งเซนเซอร์สามารถตรวจจับก๊าซได้ดีที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

ปี ค.ศ. 2012 P. Rai และคณะ [24] ได้ทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ในการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อ CO, ethanol และ acetaldehyde ดูดซับบนเซนเซอร์ ใช้วัสดุคือ single crystalline ZnO nanorods สังเคราะห์โดยวิธี Microwave-assisted hydrothermal synthesis ซึ่งเซนเซอร์สามารถตรวจจับก๊าซได้ดีที่อุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส และตรวจวัด CO ได้ในช่วงความเข้มข้น 200–1000 ppm ในขณะที่สามารถตรวจวัด ethanol และ acetaldehyde ในช่วงความเข้มข้น 50 –250 ppm ตามลำดับ

ปี ค.ศ. 2006-2007 [25-26] ได้มีผู้นำโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ เช่น Polypyrrole (PPy), Polyaniline (PANI), และ Metaphthalocyanines เป็นต้น มาทำการวิจัยและสร้างเซนเซอร์ และพบว่าเซนเซอร์ดังกล่าว สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ยังมีข้อเสียในเรื่องของความชื้น และการกลับคืนสู่สภาพเดิมของเซนเซอร์นั้นเกิดขึ้นได้ช้า

ปี ค.ศ. 2000-2005 [27-33] ได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่นำคาร์บอนด์นาโนทิวบ์ (CNT) มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยเซนเซอร์ โดยเซนเซอร์ดังกล่าวสามารถนำมาตรวจวัดก๊าซชนิดต่าง ๆ มากมาย เช่น NH_3, NO_2, H_2, O_2, CO, and CO_2 และพบว่าเซนเซอร์ดังกล่าวสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน แต่หลังจากนั้นก็ได้มีการค้นพบวัสดุเซอร์ชนิดใหม่ เรียกว่า กราฟีน (Graphene) ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่าและมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่า จึงถูกนำมาประยุกต์ทำเป็นแก๊สเซนเซอร์ในเวลาต่อมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 สารเคมี

3.1.1.1 สารละลายแอมโมเนีย; Ammonia Solution (NH_3) 25%w/w (บริษัท RFCL limited, India)

3.1.1.2 กราฟีนออกไซด์; Graphene Oxide dry platelets (บริษัท Graphene laboratories Inc, U.S.A.)

3.1.1.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น; Multiwall carbon nanotube (บริษัท Sigma-Aldrich, U.S.A.)

3.1.1.4 โคบอลต์คลอไรด์; Cobalt (II) chloride hexahydrate ($CoCl_2.6H_2O$) 98%w/w (บริษัท RFCL limited, India)

3.1.1.5 1, 10 ฟีแนนโทรลีน; 1, 10-phenanthroline monohydrate (บริษัท Merck, Germany)

3.1.1.6 ไดเมทิลฟอร์มาไมด์; N,N-dimethylformamide (DMF) (บริษัท APS Ajax Finechem, Australia)

3.1.1.7 ก๊าซไนโตรเจน; N_2 99.999% v/v (TIG, Thailand)

3.1.1.8 ฟีนิลไฮดราซีน; Phenyl hydrazine ($C_6H_8N_2$) (บริษัท Fluka)

3.1.1.9 เอทิลแอลกอฮอล์; Ethyl alcohol (C_2H_5OH 99.8% v/v) (บริษัท Carlo Erba Reagents)

3.1.1.10 อะซิโตน; Acetone (บริษัท P. Wai. Co., LTD, Thailand)

3.1.1.11 โซเดียมคลอไรด์; Sodium chloride ความบริสุทธิ์ 99.9% (NaCl, AR grade, บริษัท LAB-SCAN, Thailand)

3.1.1.12 โพแทสเซียมคลอไรด์; Potassium chloride ความบริสุทธิ์ >90% (KCl, AR grade, บริษัท UNIVAG, Australia)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.2.1 เครื่องล้างความถี่สูง (Utrasonic bath) รุ่น Tramsonic 570/H ของบริษัท ELMA

3.1.2.2 ตู้อบสารเคมี (Oven) ของบริษัท Lab Companion

3.1.2.3 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytied balance): PRECISA Models 404 MSCS

3.1.2.4 เครื่องทำน้ำปราศไอออน รุ่น Milli-Q (Milford, MA, USA)

3.1.2.5 เครื่องกวนแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน รุ่น 728 Stirrer (Metrohm)

3.1.2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) รุ่น JSM6400 บริษัท JEOL

3.1.2.7 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-raydiffractrometer: XRD) รุ่น D8-Discover บริษัท Bruker

3.1.2.8 เครื่องวัดพีเอช Methrohm รุ่น 716 DMS Titrino ของบริษัท Ecochemie ประเทศไทย

3.1.2.9 ไมโครปิเปต (Micropipette) ของบริษัท Vipro

3.1.2.10 อุปกรณ์สำหรับรีฟลักซ์

3.1.2.10 เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า (Multimeters)

3.1.2.11 อุปกรณ์บัดกรี

3.1.2.12 บีกเกอร์

3.1.2.13 กระดาษกรอง whatman No.2

3.1.2.14 ปิเปต ขนาด 1, 10, และ 25 มิลลิลิตร

3.1.2.15 ขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร

3.1.2.16 ขวดรูปชมพู ขนาด 100 มิลลิลิตร

3.1.2.17 แผ่นกระจกนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสังเคราะห์กราฟีน [34]

3.2.1 ชั่งกราฟีน ออกไซด์ (Graphene oxide) จำนวน 40 มิลลิกรัม

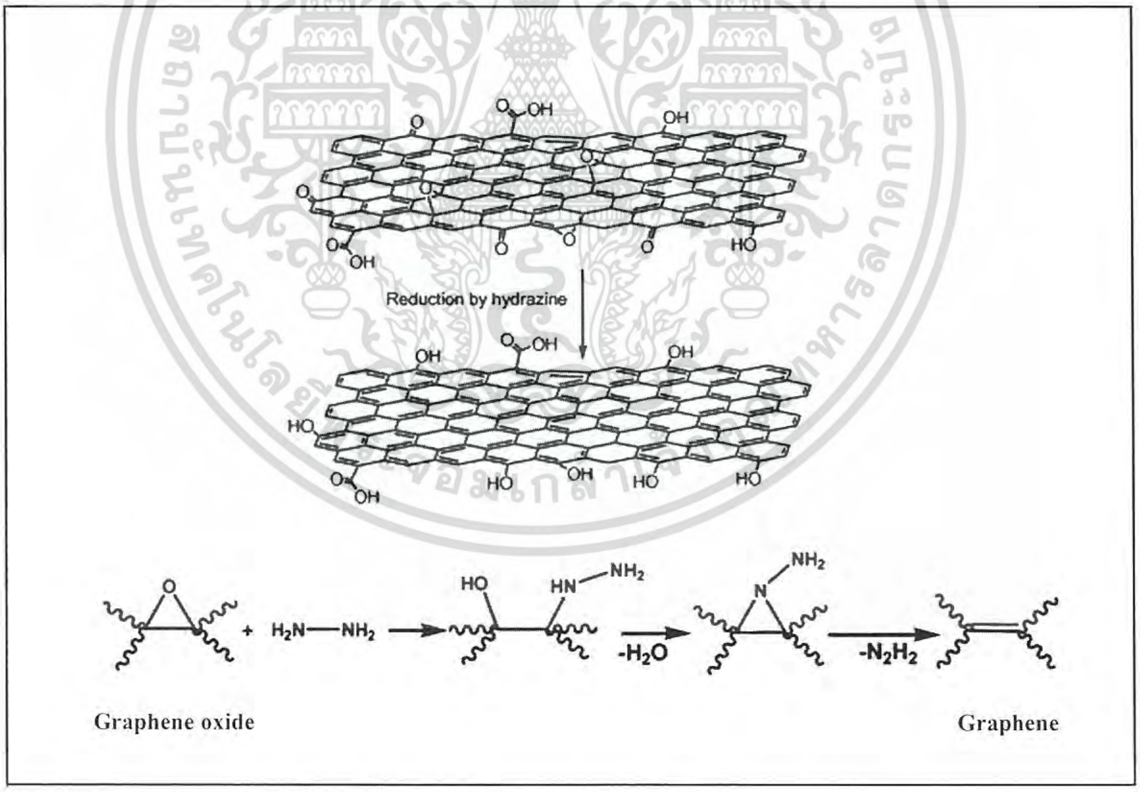
3.2.2 ละลายกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) ที่ชั่งมาข้างต้น ด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร

3.2.3 ปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 30 นาที

3.2.4 เติมน้ำปราศจากไอออน (DI water) ปริมาตร 60 มิลลิลิตร

3.2.5 หลังจากนั้น เติมฟีนิลไฮดราซีน (Phenyl hydrazine) ปริมาตร 20 มิลลิลิตรอย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งปั่นกวนตลอดเวลา (ฟีนิลไฮดราซีน (Phenyl hydrazine) เติมเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ออกซิเจนในโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ ถูก remove ออกจากโครงสร้าง ก็จะได้สารใหม่ คือ กราฟีน)

3.2.6 นำสารละลายข้างต้นมาทำการรีฟลั๊กซ์ (Refluxed) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดแสดงได้ดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสังเคราะห์กราฟีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 จากนั้นกรองตะกอน (สีดำ) และล้างตะกอนด้วยน้ำและเอทานอลจำนวน 5 ครั้ง ครั้งละ 5 มิลลิลิตร

3.2.8 นำตะกอนที่กรองและล้างเรียบร้อยแล้วมาอบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง

3.3 การสังเคราะห์โคบอล์ตออกไซด์ [35]

3.3.1 ชั่งโคบอลต์ คลอไรด์ ($CoCl_2.6H_2O$) 100 มิลลิกรัม

3.3.2 ชั่ง 1, 10 ฟีแนนโทรลีน (1, 10-phenanthroline monohydrate) 0.2 กรัม

3.3.3 นำโคบอลต์ คลอไรด์ ($CoCl_2.6H_2O$) 200 มิลลิกรัม และ1, 10 ฟีแนนโทรลีน (1, 10-phenanthroline monohydrate) 0.2 กรัม มาผสมกัน แล้วเติมน้ำปราศจากไอออน (DI water) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร (จะเกิดเป็นสารประกอบ phen (Co^{2+}))

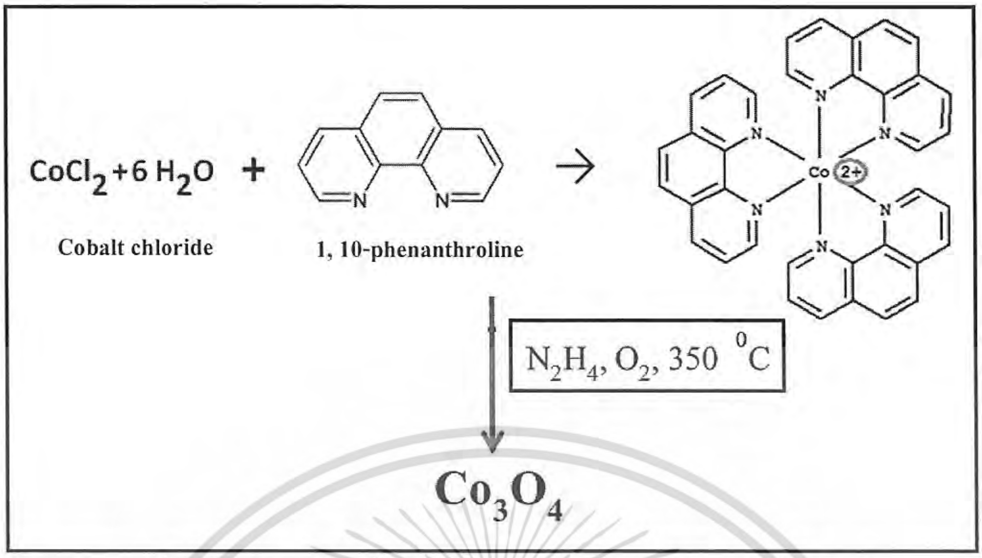
3.3.4 ปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 30 นาที

3.3.5 หลังจากนั้น เติมฟีนิล ไฮดราซีน (Phenyl hydrazine) ปริมาตร 20 มิลลิลิตรอย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งปั่นกวนตลอดเวลาพร้อมทั้งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ฟีนิล ไฮดราซีน (Phenyl hydrazine) เป็นสารรีดิวซ์ซิ่ง เอเจนท์ (Reducing Agent) ในขั้นตอนนี้ Co^{2+} จะถูกรีดิวซ์ไปเป็น Co)

3.3.6 แยกตะกอน และนำตะกอนที่ได้ผสมกับโซเดียม คลอไรด์ (NaCl) 2 กรัม และโพแทสเซียม คลอไรด์ (KCl) 3 กรัม ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำให้เกิดเป็น Co_3O_4

3.3.7 จากนั้นกรองตะกอน (สีดำ) และล้างตะกอนด้วยน้ำและเอทานอลจำนวนหลายๆ ครั้ง (จำนวน 5 ครั้ง ครั้งละ 5 ml) เพื่อกำจัดโซเดียม คลอไรด์ (NaCl) และโพแทสเซียม คลอไรด์ (KCl) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดแสดงได้ดังรูป 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสังเคราะห์โคบอลต์ออกไซด์

3.3.8 นำตะกอนที่กรองและล้างเรียบร้อยแล้วมาอบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง

3.4 พิสูจน์เอกลักษณ์ ลักษณะทางกายภาพของกราฟีน และโคบอลต์ออกไซด์

3.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

นำกราฟีน โคบอลต์ออกไซด์ และกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น มาศึกษารูปร่างลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อเปรียบเทียบขนาดรูปร่างของผลึกของสารแต่ละชนิดว่ามีลักษณะต่างกันอย่างไรบ้าง

3.4.2 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-ray diffractrometer: XRD)

นำกราฟีน โคบอลต์ออกไซด์ และกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น มาพิสูจน์เอกลักษณ์ว่าสิ่งที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นเป็นสารที่เราต้องการหรือไม่ โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ โดยการเทียบจาก JCPDs card (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ซึ่งเป็นข้อมูลของพีคเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์สำหรับวัสดุแต่ละตัว ถ้าเป็นวัสดุชนิดเดียวกันก็จะมีโครงสร้างผลึกเหมือนกัน จึงมีการเลี้ยวเบนของ X-ray ที่เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การเตรียมสารละลายวัสดุเซนเซอร์

3.5.1 นำสารวัสดุเซนเซอร์ (เป็นผง) ที่ต้องการทดสอบ (Graphene, CNT, Co_3O_4, Graphene/ Co_3O_4, CNT/ Co_3O_4) มาชั่งอย่างละ 10 มิลลิกรัมกรัม (ในกรณีที่ผสมสาร 2 ชนิดเข้าด้วยกัน ให้ชั่งมาอย่างละ 5 มิลลิกรัม แล้วบดสารให้ละเอียด)

3.5.2 เติมสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) ลงไป 20 มิลลิลิตร

3.5.3 จากนั้นนำสารละลายมา sonicated เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้สารละลาย ละลายเป็นเนื้อเดียวกันมากยิ่งขึ้น

3.6 การเตรียมแผ่นทดสอบ

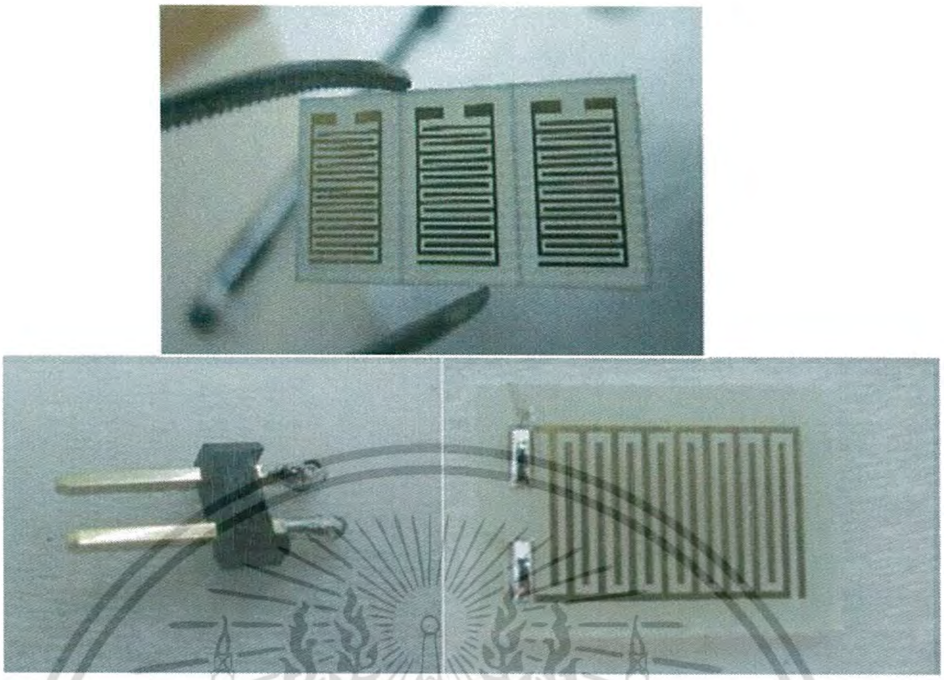
3.6.1 นำแผ่น PCB (Printed Circuit Board) มาทำความสะอาดโดยปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กในเอทิล แอลกอฮอล์และอะซิโตน อย่างละ 5 นาที หลังจากนั้นเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2) โดยแผ่น PCB อิเล็กโทรดทำจากทองแดง (Interdigitated copper electrode-patterned substrate)

3.6.2 บัดกรีแผ่น PCB กับขาเข้าด้วยกัน พร้อมทั้งวัดค่าการนำไฟฟ้า โดยจะต้องมีค่าการนำไฟฟ้าเป็นศูนย์ (ต้องให้แน่ใจว่า อิเล็กโทรดไม่มีการเชื่อมต่อกัน)

3.6.3 เมื่อบัดกรีเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้นำสารละลายวัสดุเซนเซอร์ที่เตรียมไว้ (Graphene, CNT, Co_3O_4, Graphene/ Co_3O_4, CNT/ Co_3O_4) มาหยดลงบนแผ่น PCB โดยให้หยดพร้อมทั้งวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของแต่ละเซนเซอร์ไปด้วย และต้องพยายามควบคุมให้แต่ละเซนเซอร์มีค่าความต้านทางไฟฟ้าประมาณ 100 กิโลโอมห์

3.6.4. ให้ความร้อนแก่แผ่นเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยตัวทำละลาย (ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของแผ่น PCB และการบัดกรีแผ่น PCB กับขาเข้าด้วยกัน

รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะเซนเซอร์ที่บัดกรีเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การดำเนินงานวิจัย

3.7.1 การศึกษาความสามารถในการตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียของวัสดุเซนเซอร์แต่ละชนิด

ในการทดลองนี้จะทำการทดสอบเซนเซอร์แต่ละชนิด ที่ทำจากวัสดุเซนเซอร์ต่างชนิดกัน ที่สภาวะ และอุณหภูมิห้อง ในเบื้องต้นได้นำมาตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ที่ความเข้มข้น 25% w/w แล้วศึกษาค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีขั้นตอนในการทดสอบ ดังนี้

1. นำก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ที่ความเข้มข้น 25% w/w ใส่ลงใน Stainless chamber
2. จากนั้นปิดฝา Stainless chamber ให้เรียบร้อย และทำการคีร์ย์ข้อมูลลงในระบบคอมพิวเตอร์เพื่อสั่งให้ระบบทำงาน เช่น
   -จำนวนซ้ำที่ต้องการวัด (ในการทดลองใช้ 3 ซ้ำ)
   -อัตราการไหลของก๊าซแอมโมเนีย (ในการทดลองใช้ 1.5 ลิตรต่อนาที)
   -อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (ในการทดลองใช้ 2.5 ลิตรต่อนาที)
   -ระยะเวลาในการไหลของก๊าซเข้าสู่ระบบ (ในการทดลองใช้ 1 นาทีสำหรับก๊าซแอมโมเนีย และ 5 นาทีสำหรับก๊าซไนโตรเจน)
3. นำเซนเซอร์เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบ และสั่งให้ระบบเริ่มทำงาน โดยระบบแสดงรูปที่ 3.5

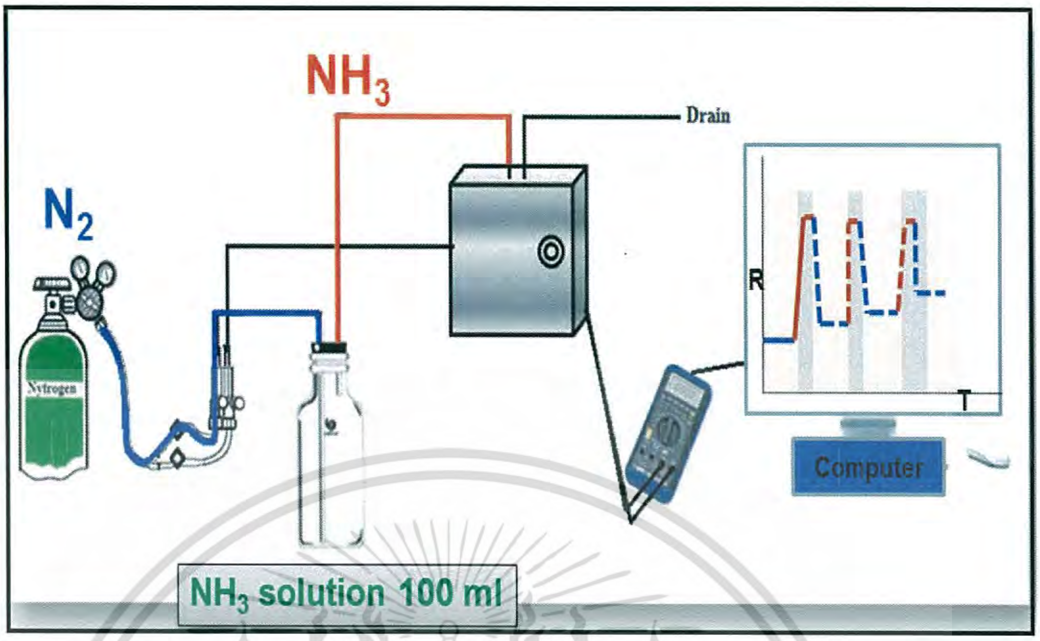
3.1 หลังจากนำเซนเซอร์เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบแล้ว จะทำการตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย โดยการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเป็นลำดับแรก และบันทึกค่าความต้านทานเริ่มต้น

3.2 จากนั้นปล่อยก๊าซไนโตรเจนลงไปใน Stainless chamber ของสารละลายแอมโมเนีย ก๊าซไนโตรเจนจะทำหน้าที่เป็นก๊าซพา พาโมเลกุลของก๊าซแอมโมเนียเข้าสู่ระบบ จากนั้นบันทึกค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป

3.3 นำค่าที่ได้มาทำการคำนวณค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป

<u>หมายเหตุ</u> เมื่อเราทราบว่าเซนเซอร์ชนิดไหนมีประสิทธิภาพสูงสุด เราจะเลือกไปทำการศึกษาถึงความใช้ได้ของวิธีต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงระบบ และการทำงานของอุปกรณ์ทดสอบเซนเซอร์

3.7.2 ขั้นตอนการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี

ทดสอบ performance characteristics ต่างๆ ได้แก่ Range, Linearity, %RSD, LOD, LOQ และอายุการใช้งานของเซนเซอร์ โดยใช้ตัวอย่างสารละลายแอมโมเนีย

3.7.2.1 ศึกษา Working Range และ Linearity

บันทึกค่าความต้านทานของเซนเซอร์เริ่มต้น (R_o) ของเซนเซอร์ทั้งสองชนิด จากนั้นทำตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียที่แตกต่างกันคือ 1, 10, 25, 50, และ 100 ppm (วิธีการเตรียมสารละลาย แสดงในภาคผนวก ก) ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ นำมาความคำนวณค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป ในทุก ๆ ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนีย จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน สภาวะที่ใช้เป็นดังนี้

-จำนวนซ้ำที่ต้องการวัด (ในการทดลองใช้ 3 ซ้ำ)

-อัตราการไหลของก๊าซแอมโมเนีย (ในการทดลองใช้ 1.5 ลิตรต่อนาที)

-อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (ในการทดลองใช้ 2.5 ลิตรต่อนาที)

-ระยะเวลาในการไหลของก๊าซเข้าสู่ระบบ (ในการทดลองใช้ 1 นาทีสำหรับก๊าซแอมโมเนีย และ 5 นาทีสำหรับก๊าซไนโตรเจน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2.2 ศึกษา LOD และ LOQ

ทดสอบ sample blank (NH_3 0 ppm) 10 ซ้ำ โดยบันทึกความต้านทานของเซนเซอร์เริ่มต้น (kΩ) และค่าความต้านทาน (kΩ) หลังการทดสอบกับ sample blank (NH_3 0 ppm) นำค่าที่ได้มาคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD), LOD, และ LOQ ตามลำดับ สภาวะที่ใช้เป็นดังนี้

-จำนวนซ้ำที่ต้องการวัด (ในการทดลองใช้ 10 ซ้ำ)

-อัตราการไหลของก๊าซแอมโมเนีย (ในการทดลองใช้ 1.5 ลิตรต่อนาที)

-อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (ในการทดลองใช้ 2.5 ลิตรต่อนาที)

-ระยะเวลาในการไหลของก๊าซเข้าสู่ระบบ (ในการทดลองใช้ 1 นาทีสำหรับก๊าซแอมโมเนีย และ 5 นาทีสำหรับก๊าซไนโตรเจน)

3.7.2.3 ศึกษาอายุการใช้งานของเซนเซอร์

โดยขั้นแรกนั้น จะเริ่มทำการตรวจวัดค่าความต้านทานเริ่มต้น (kΩ) ของเซนเซอร์ทั้งสองชนิดก่อนการนำไปทดสอบ (ตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย 10 ppm) จากนั้น นำเซนเซอร์ไปตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย 10 ppm คำนวณค่าความต้านทาน (kΩ) ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยทำการศึกษาทุก ๆ 7 วัน เป็นระยะเวลา 1 เดือนสภาวะที่ใช้เป็นดังนี้

-จำนวนซ้ำที่ต้องการวัด (ในการทดลองใช้ 3 ซ้ำ)

-อัตราการไหลของก๊าซแอมโมเนีย (ในการทดลองใช้ 1.5 ลิตรต่อนาที)

-อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (ในการทดลองใช้ 2.5 ลิตรต่อนาที)

-ระยะเวลาในการไหลของก๊าซเข้าสู่ระบบ (ในการทดลองใช้ 1 นาทีสำหรับก๊าซแอมโมเนีย และ 5 นาทีสำหรับก๊าซไนโตรเจน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัย และอภิปรายผล

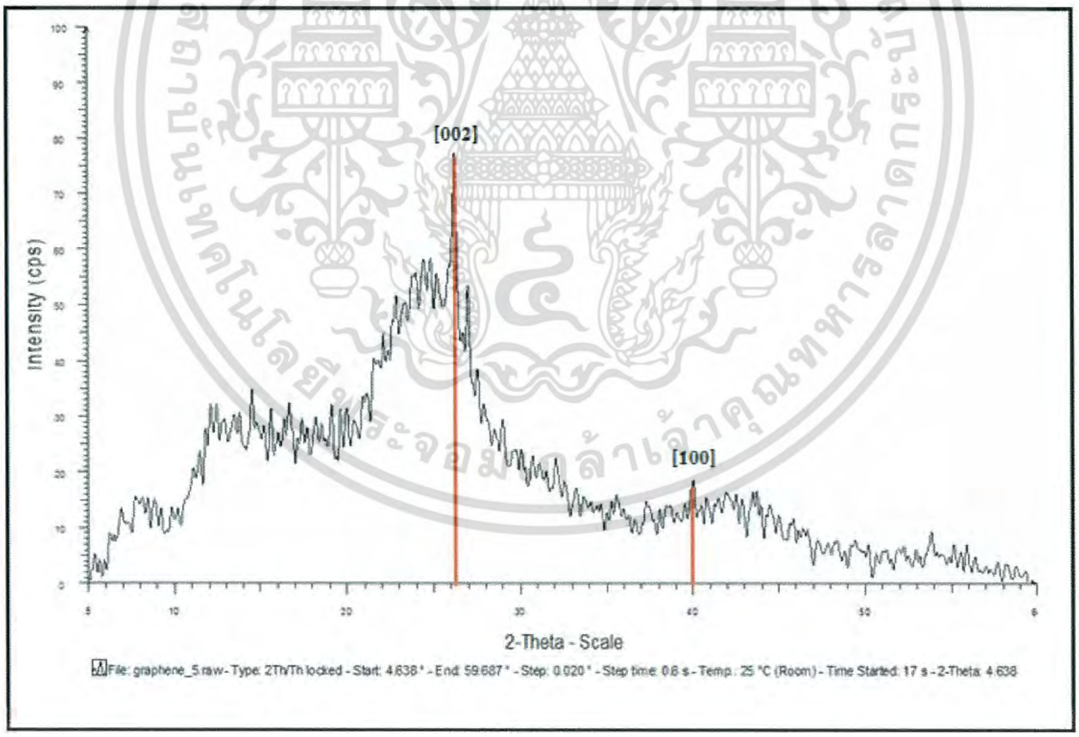
4.1 การสังเคราะห์กราฟีนและโคบอลต์ออกไซด์

กราฟีนและโคบอลต์ออกไซด์สังเคราะห์ได้จาก ปฏิกิริยาที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ โดยสารที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็กและมีสีดำ

4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์และลักษณะทางโครงสร้างของสารที่สังเคราะห์ได้

4.2.1 ผลจากการทดสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (XRD) [38]

4.2.1.1 โครงสร้างผลึกของกราฟีน (Graphene)

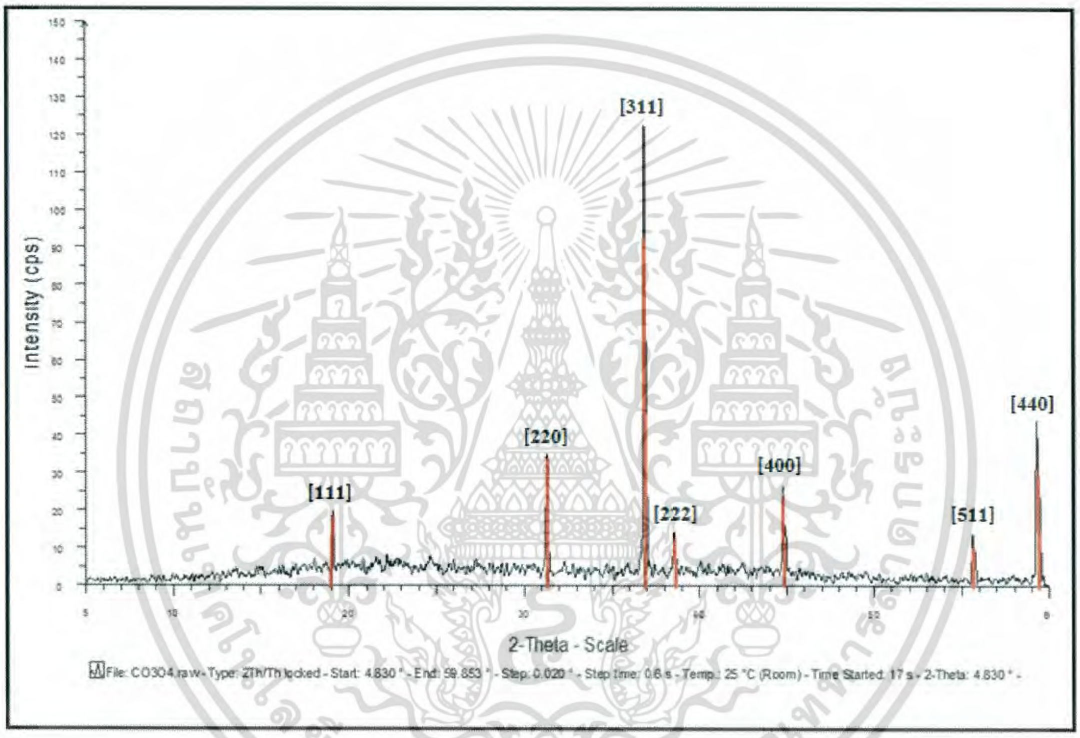


รูปที่ 4.1 แสดง XRD Pattern ของกราฟีน (Graphene)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.1 แสดงผลจากศึกษาโครงสร้างผลึกของกราฟีน (Graphene) ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์-ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (XRD) โดยอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [34] จะเห็นว่าเกิดพีคกราฟีน ที่ตำแหน่ง 2 Theta มีค่าประมาณ 27° [002], และ 42° [100] สรุปได้ว่ากราฟีนนั้นมีความเป็นผลึกต่ำ จะเห็นได้จากพีค 27° [002] เป็นพีคที่กว้าง และพีค 42° [100] จะมี intensity ที่ต่ำ

4.2.1.2 โครงสร้างผลึกของโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4)



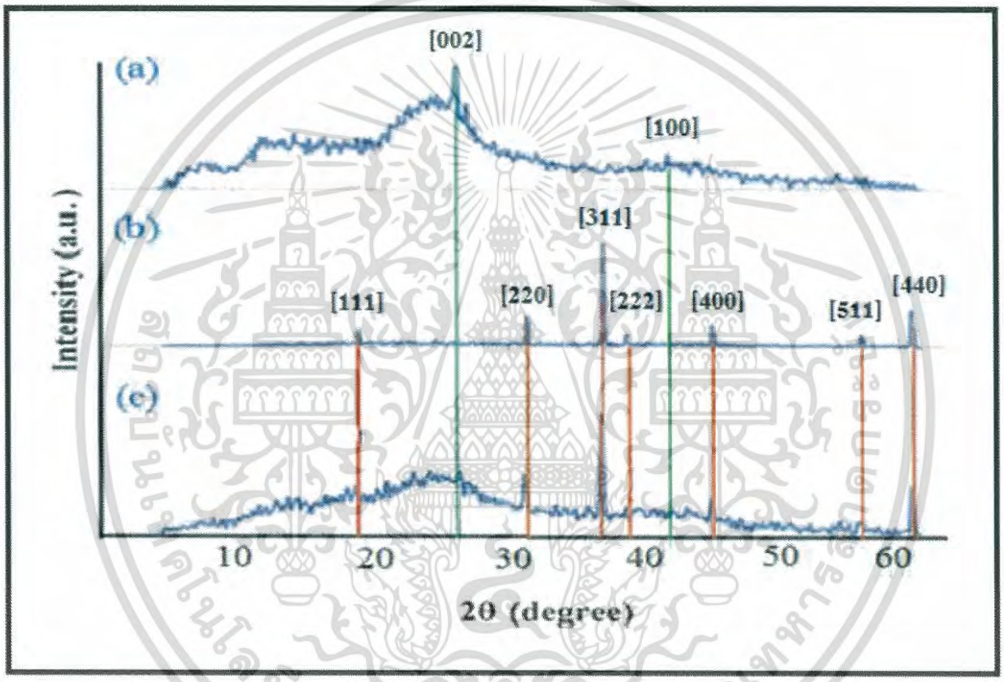
รูปที่ 4.2 แสดง XRD Pattern ของโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4)

จากรูป 4.2 แสดงผลจากศึกษาโครงสร้างผลึกของโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทรมิเตอร์ (XRD) โดยทำการเทียบกับสารโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) มาตรฐาน (Joint Committee on Power Diffraction Standards (JCPDS) card 76-1802) จะเห็นว่าเกิดพีคโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) ที่ตำแหน่ง 2 Theta มีค่าประมาณ 19° [111], 31° [220], 37° [311], 39° [222], 45° [400], 56° [511], และ 60° [440] จึงสามารถสรุปได้ว่าสารโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) มีโครงสร้างเป็น Face Centered Cubic (FCC) Planes ที่เกิดการเลี้ยวเบนซึ่งมีค่า Miller indices เป็นเลขคู่ หรือเลขคี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมด (ถ้าเป็นศูนย์ให้ถือว่าเป็นเลขคู่) ลักษณะโครงสร้างของหน่วยเซลล์จะประกอบด้วยอะตอม อยู่ตรงมุมของหน่วยเซลล์ในลักษณะที่ใช้ร่วมกับหน่วยเซลล์อื่น และอีก 6 อะตอม จะอยู่กึ่งกลางของผิวทั้งหกด้านของหน่วยเซลล์ ในลักษณะที่จะร่วมใช้กับอีก 1 หน่วยเซลล์ที่วางอยู่ติดกัน ในโครงสร้างแบบ FCC จะมีพันธะการเกิดแรงโดยรวมเท่ากับ 4 อะตอม

4.2.1.3 โครงสร้างผลึกของกราฟีน (Graphene), โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4), และกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4)



รูปที่ 4.3 แสดง XRD Pattern ของ (a) กราฟีน (Graphene), (b) โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4), และ (c) กราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

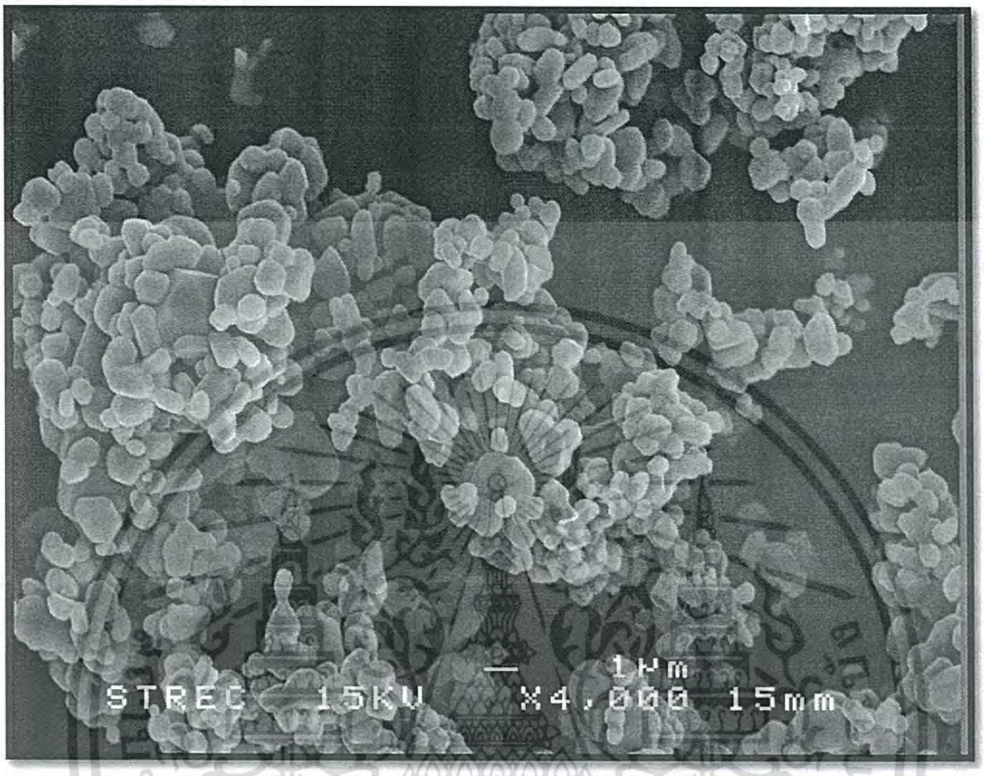
4.2.2 ผลจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.2.2.1 ลักษณะพื้นที่ผิวของกราฟีน (Graphene)

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะพื้นที่ผิวของกราฟีน (Graphene) ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

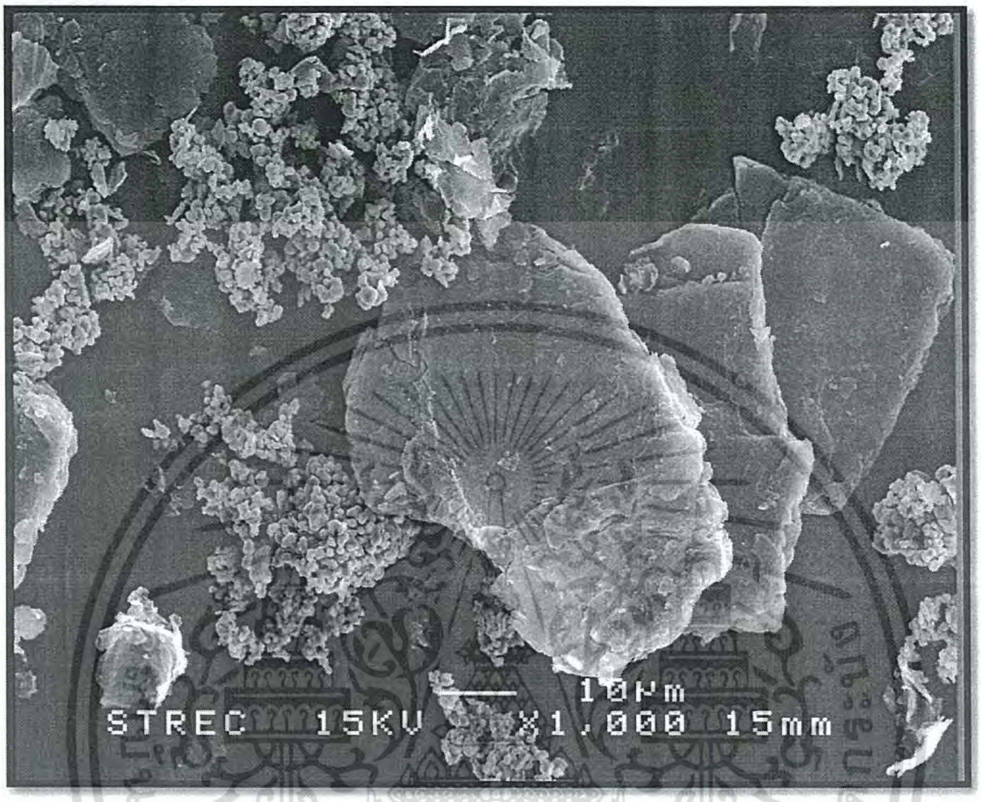
4.2.2.2 ลักษณะพื้นที่ผิวของโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4)



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะพื้นที่ผิวของ โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า

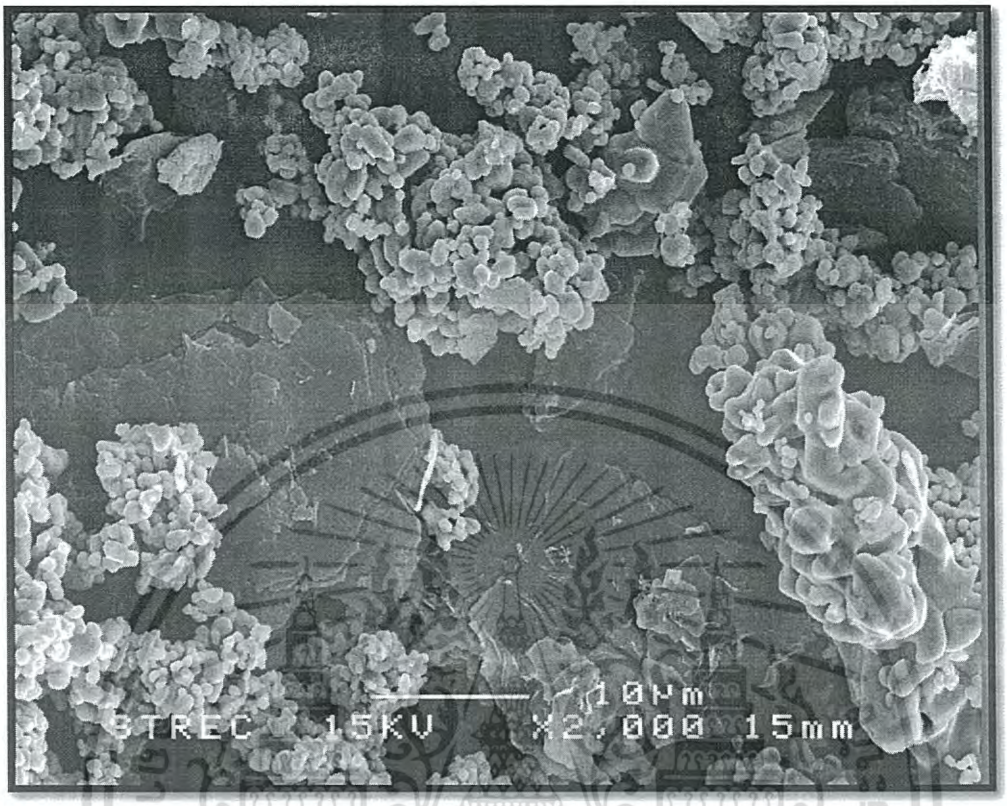
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.3 ลักษณะพื้นที่ผิวของกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4)



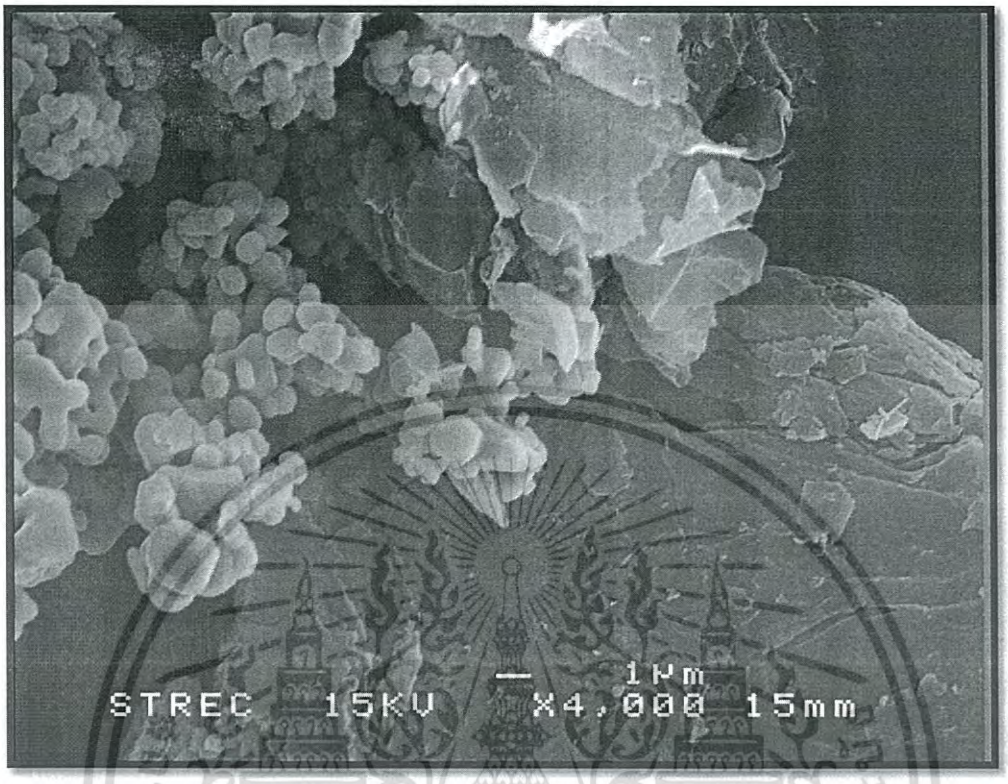
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะพื้นที่ผิวของกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



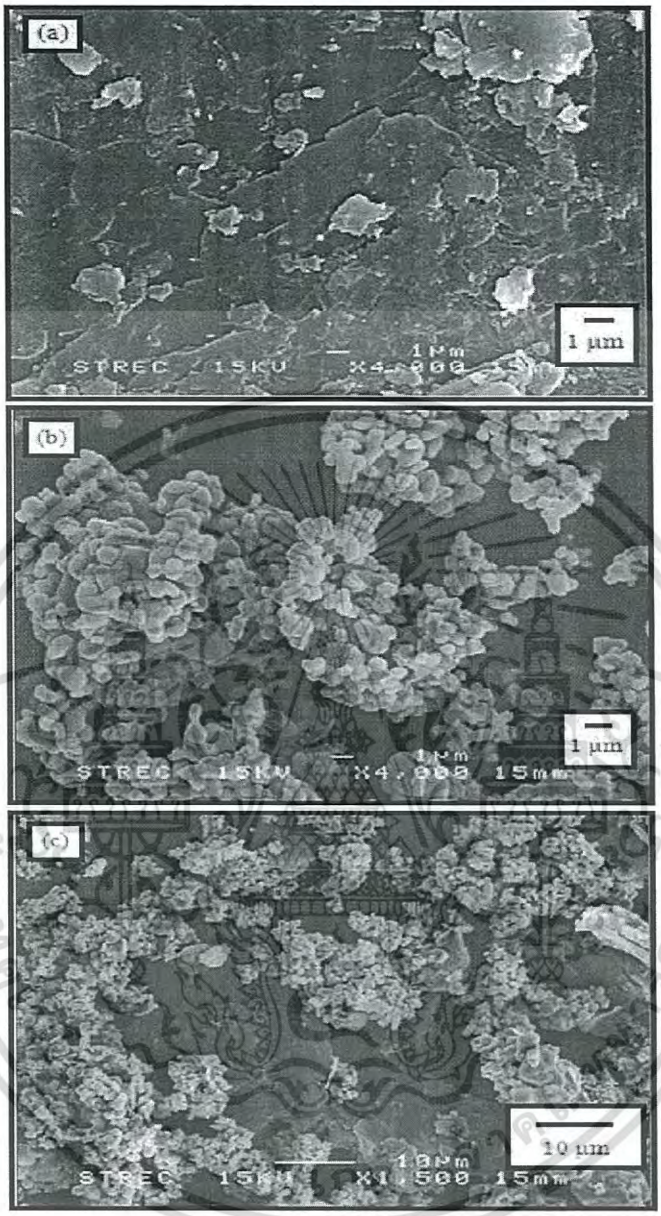
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะพื้นที่ผิวของกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะพื้นที่ผิวของกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของ (a) กราฟีน, (b) โคบอลต์ออกไซด์, และ (c) กราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ ด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

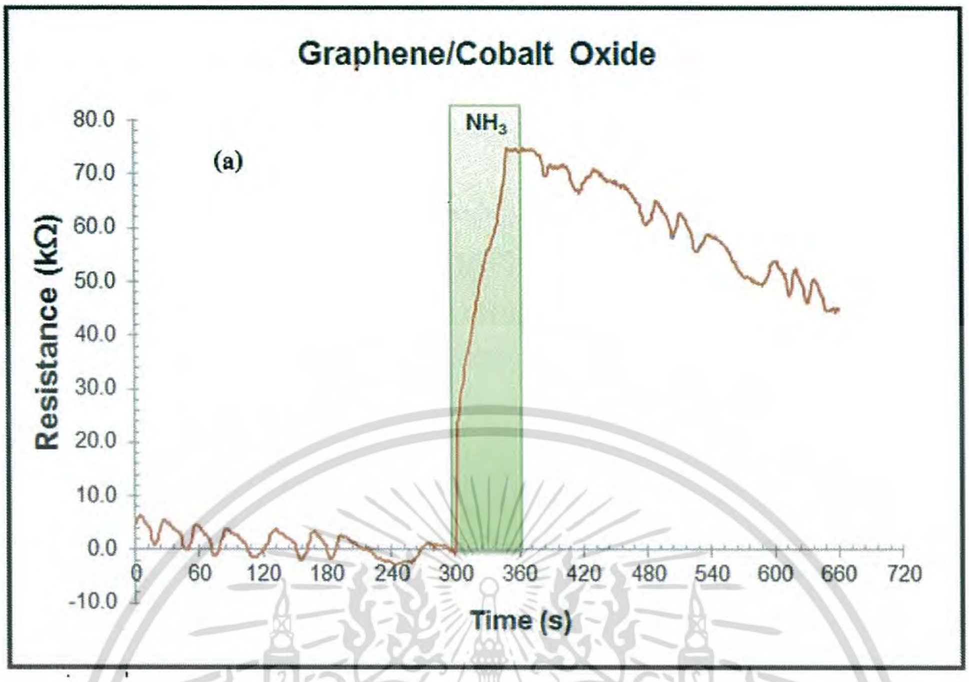
ผลจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สามารถสรุปได้ว่า กราฟีน (Graphene) นั้นมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ ๆ สามารถสังเคราะห์ได้ขนาดประมาณ 1 μm ในขณะที่โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) นั้น มีลีกษณะเป็นเม็ดกลมๆ ขนาดเล็ก สามารถสังเคราะห์ได้ขนาดประมาณ 1 μm เช่นเดียวกัน ซึ่งจากรูป 4.4-4.8 นั้นเป็นเป็นสารชนิดเดียวกัน คือ กราฟีนและโคบอลต์ออกไซด์ แต่ต่างกันที่การใช้กำลังขยายของเทคนิค SEM แตกต่างกัน (กำลังขยายจะไม่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคของสาร) การใช้กำลังขยายที่มากขึ้นจะทำให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคชัดเจนขึ้น แต่จะไม่เห็นภาพรวมของสารว่ามีลักษณะการกระจายตัวอย่างไร ดังนั้นจึงมีการแสดงผลการทดลองทั้งกำลังขยายต่ำๆ จนกระทั่งถึงกำลังขยายสูงๆ และเมื่อทำการผสมกราฟีนและโคบอลต์ออกไซด์เข้าด้วยกันแล้ว พบว่าโคบอลต์ออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดีบนกราฟีน

4.3 ผลการตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย

4.3.1 การทดสอบแก๊สเซนเซอร์ (Gas Sensor) ที่สร้างจากวัสดุเซนเซอร์ชนิดต่างๆ

ในการทดลองจะทดสอบกับสารละลายแอมโมเนีย 25 เปอร์เซนต์ ปริมาตร 100 ml ทำการตรวจวัดที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้เครื่องปรับอากาศ) โดยจะทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงการทดสอบแก๊สเซนเซอร์ (Gas Sensor) ที่สร้างจากวัสดุเซนเซอร์

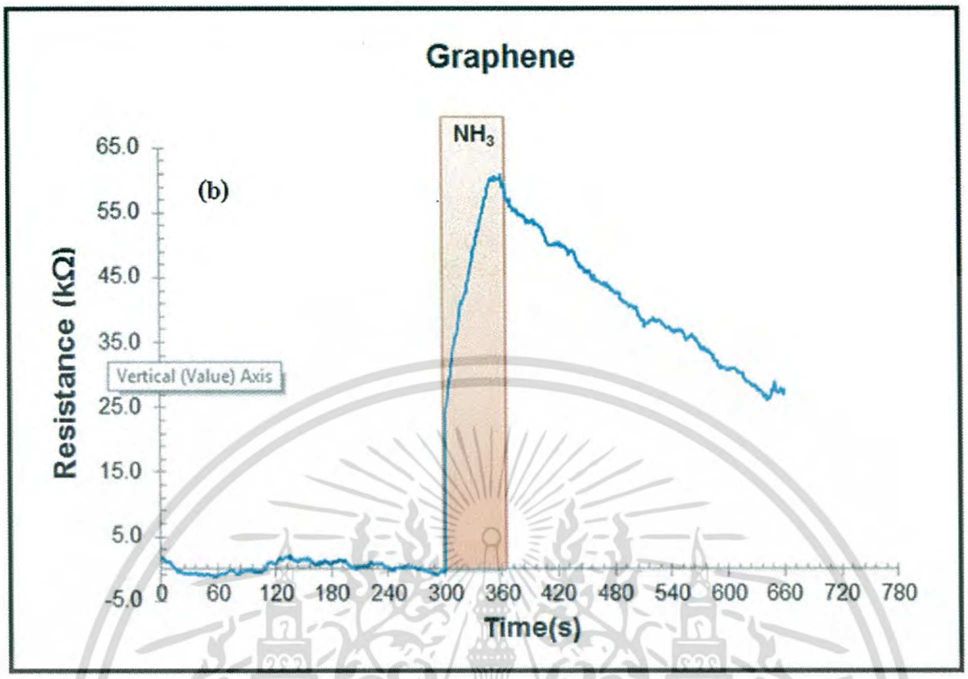
(a) Graphene/Cobalt Oxide

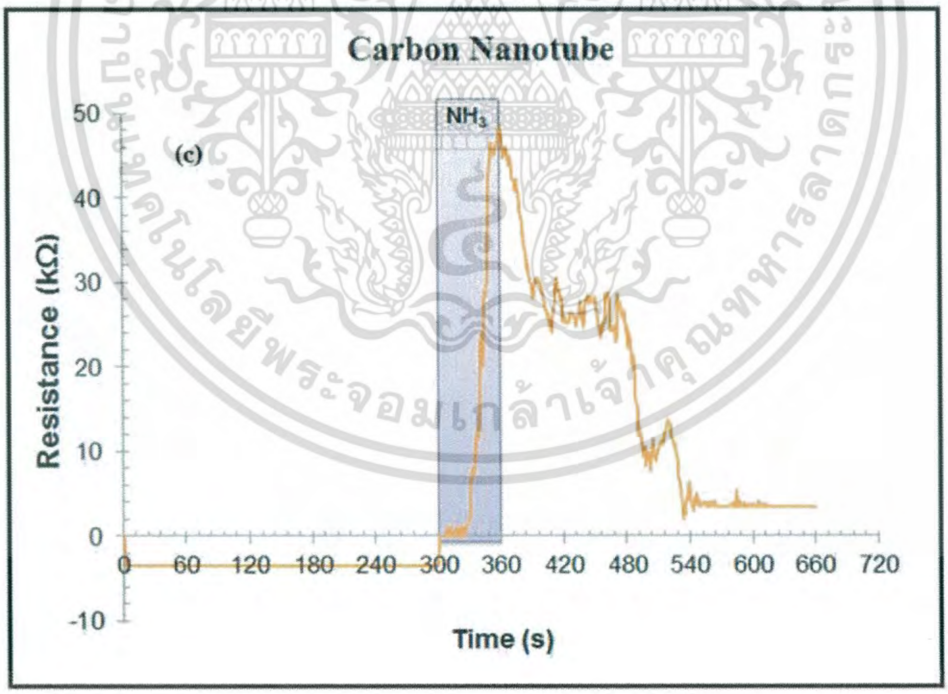
(b) Graphene

(c) Carbon Nanotube

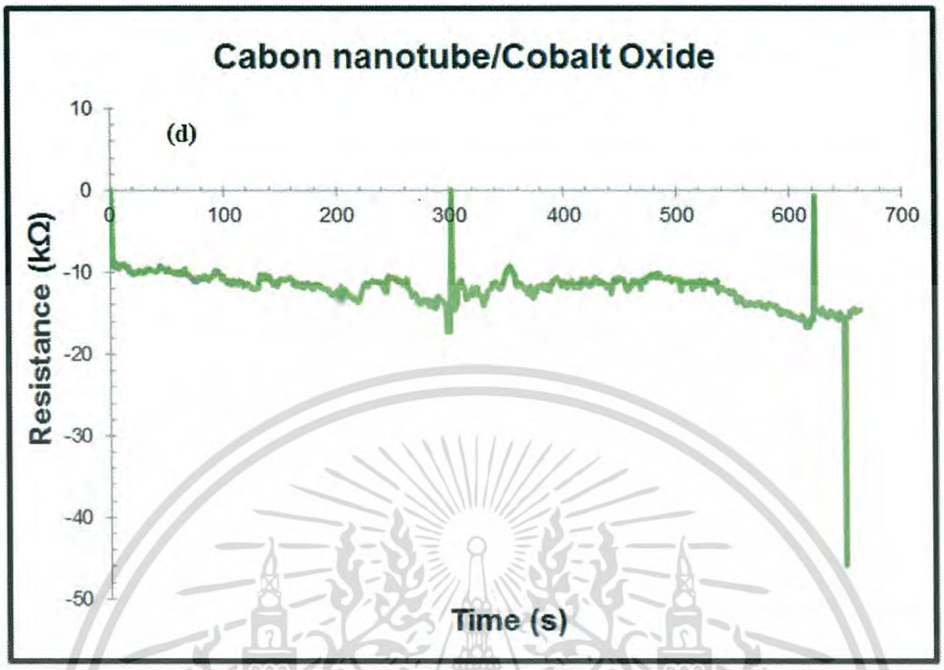
(d) Carbon Nanotube/Cobalt Oxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดยเราจะทำการเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของแต่ละวัสดุเซนเซอร์ทั้งหมด จากค่าต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

4.3.1.1 ค่าการตอบสนอง (% Response)

การรายงานการตอบสนองของขั้ว คำนวณได้ดังนี้ (ภาคผนวก ง.1)

$$\%Response = [\frac{Rg-Ro}{Ro}] * 100 \quad (4.1)$$

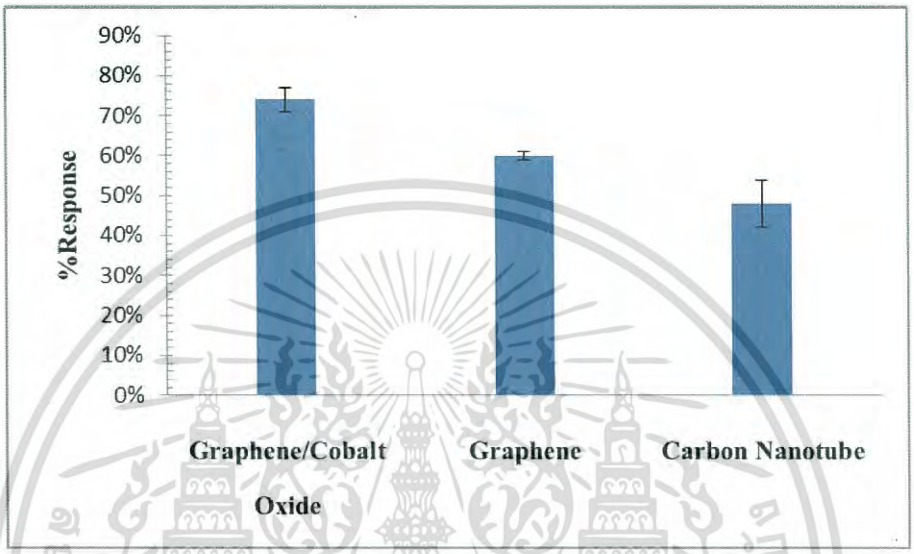
กำหนดให้

Rg คือ ความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์ ขณะปล่อยก๊าซแอมโมเนีย

Ro คือ ความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์เริ่มต้น ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ก่อนการปล่อยก๊าซแอมโมเนีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำมาพลอต %Response จะได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจะเห็นว่าการตอบสนอง (% Response) ของ Graphene/Cobalt Oxide sensor > Graphene sensor > Carbon Nanotube sensor > Carbon Nanotube/Cobalt Oxide sensor



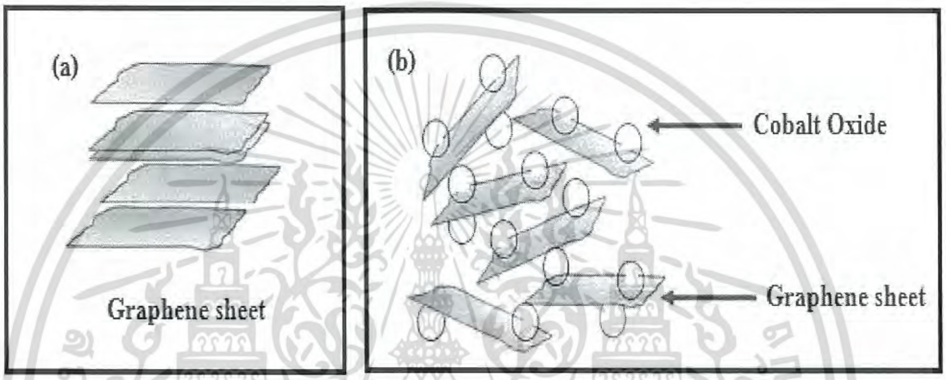
รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบเซนเซอร์ชนิดต่างๆ กับค่าการตอบสนอง (% Response)

ทั้งนี้ อาจเป็นผลเนื่องมาจาก

1. Cobalt Oxide เป็นโลหะออกไซด์ชนิดหนึ่งซึ่งมีความเสถียรสูงมาก และไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) จึงสรุปว่า แม้ว่าจะมีการผสมกับ Graphene หรือ Carbon Nanotube ก็ไม่ได้มีผลทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด
2. สืบเนื่องมาจากข้อ 1 เพื่อเป็นการยืนยันว่า Cobalt Oxide นั้นไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) จึงได้ทำการทดลองสร้างเซนเซอร์ โดยใช้ Cobalt Oxide เพียงชนิดเดียว ปรากฏว่าแม้ว่าจะมีการเพิ่มความเข้มข้นของ Cobalt Oxide เท่าใดก็ตาม ความต้านทานก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลง
3. ผลการทดลองพบว่าค่าการตอบสนอง (% Response) Graphene/Cobalt Oxide sensor > Graphene sensor > Carbon Nanotube sensor > Carbon Nanotube/Cobalt Oxide sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

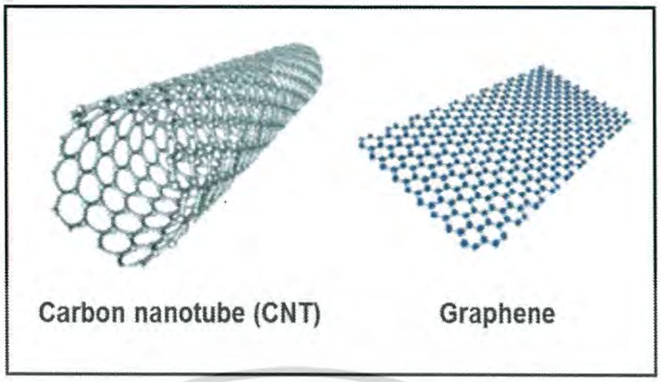
4. ถ้าเปรียบเทียบระหว่าง Graphene/Cobalt Oxide sensor และ Graphene sensor จะพบว่า โครงสร้างของ Graphene นั้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบๆ ในขณะที่ Cobalt Oxide เป็นเม็ดกลมๆ เพราะฉะนั้น Cobalt Oxide จะแทรกอยู่ระหว่างชั้นของ Graphene ได้ ลักษณะเช่นนี้จึงทำให้เกิดช่องว่าง ที่แอมโมเนียจะเข้าไปถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของวัสดุเซนเซอร์ได้มากขึ้นนั่นเอง ดังนั้นค่าการตอบสนอง (% Response) Graphene/Cobalt Oxide sensor > Graphene sensor ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพ และพื้นที่ผิวสัมผัสของ (a) Graphene, และ (b) Graphene/Cobalt Oxide

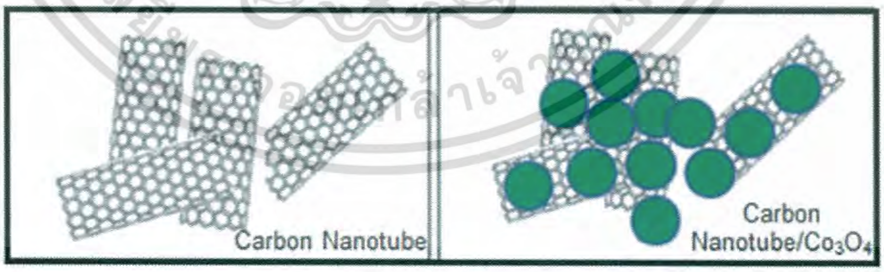
5. ถ้าเปรียบเทียบระหว่าง Graphene sensor และ Carbon Nanotube sensor พบว่า ค่าการตอบสนอง (% Response) Graphene sensor > Carbon Nanotube sensor เนื่องมาจาก Graphene มีพื้นที่ผิวที่มากกว่า Carbon Nanotube ดังแสดงในรูปที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



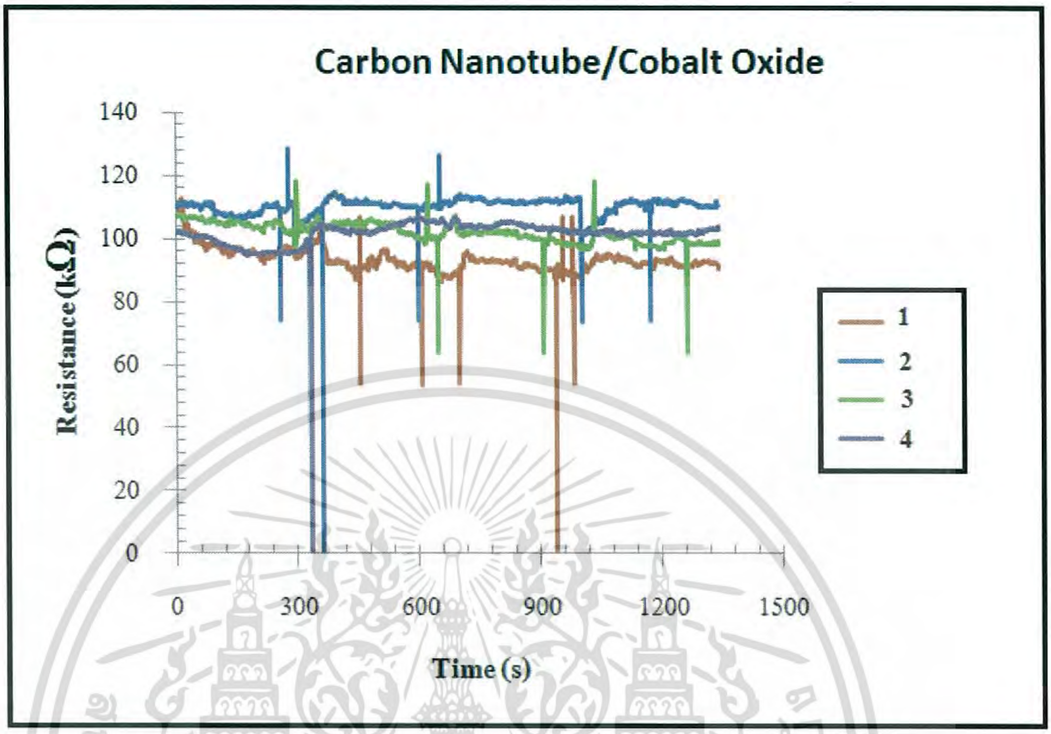
รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพ และพื้นที่ผิวสัมผัสของ Graphene, และ Carbon Nanotube

6. แต่ในกรณีของ Carbon Nanotube/Cobalt Oxide sensor นั้นพบว่า ไม่สามารถตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียได้ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน) ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก Cobalt Oxide นั้นไปบดบังพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซแอมโมเนีย และ Carbon Nanotube ทำให้ค่าความต้านทานนั้นไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูป 4.14 แต่เพื่อเป็นการยืนยัน ในงานวิจัยนี้จึงได้สร้าง Carbon Nanotube/Cobalt Oxide sensor ขึ้นมาอีก 3 ขั้ว ภายใต้สภาวะเดียวกัน และได้ทำการตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย 25 เปอร์เซนต์ (ทำการวัดซ้ำแต่ละชิ้น ชิ้นละ 3 ซ้ำ) ผลการทดลองที่ได้ก็ยังคงแสดงผลการทดลองในลักษณะเช่นเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพ และพื้นที่ผิวสัมผัสของ Carbon Nanotube, และ Carbon Nanotube/Co_3O_4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



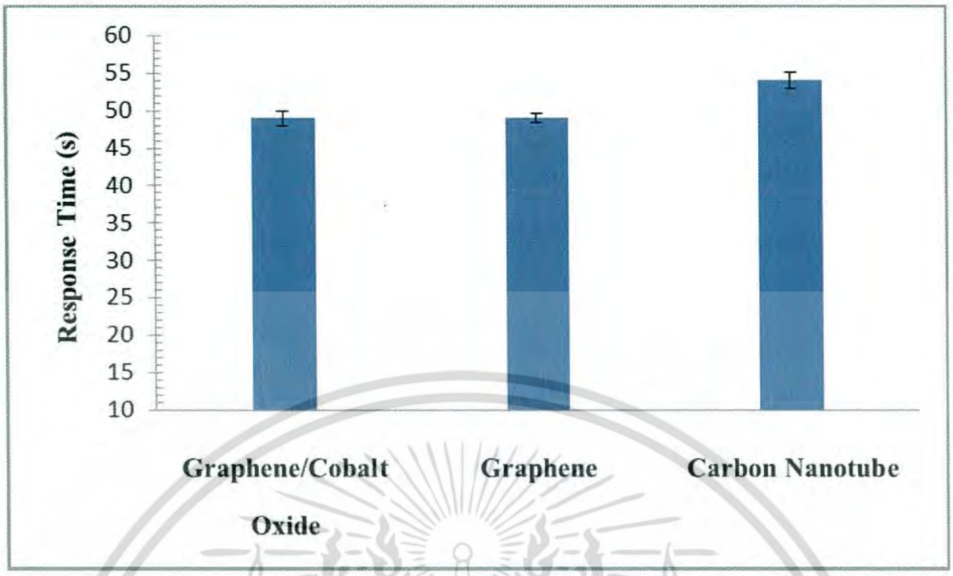
รูปที่ 4.15 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ Carbon Nanotube/Cobalt Oxide 4 ขั้ว

4.3.1.2 เวลาที่ใช้ในการตอบสนอง (Response Time)

ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16 ซึ่งจะเห็นว่า เวลาที่ใช้ในการตอบสนอง (Response Time) ของ Graphene/Cobalt Oxide sensor = Graphene sensor < Carbon Nanotube sensor (ภาคผนวก ง.2) เวลาที่ใช้ในการตอบสนองจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือ

1. ความมาก ความน้อยของพื้นที่สัมผัสของเซนเซอร์ ถ้ามีปริมาณมากและลักษณะโครงสร้างเอื้ออำนวยต่อการให้อิเล็กตรอนแก่แอมโมเนีย จะทำให้มีเวลาในการตอบสนองน้อย
2. ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ถ้าแอมโมเนียมีความเข้มข้นสูง ๆ จะทำให้มีเวลาในการตอบสนองมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

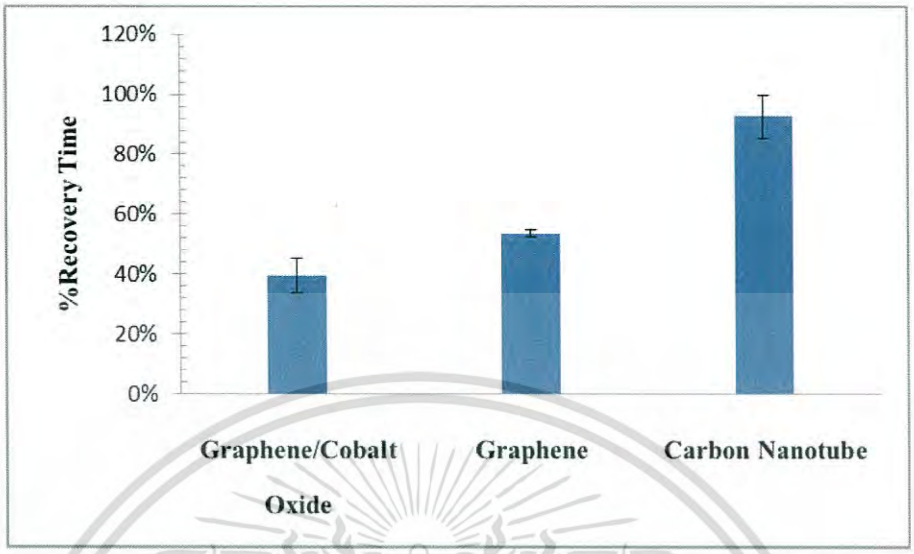


รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อแอมโมเนีย

4.3.1.3 เวลาที่ใช้ในการคืนกลับสู่สภาพเดิม (Recovery Time)

จากการเปรียบเทียบเซนเซอร์ทั้ง 4 ชนิด พบว่าภายในเวลา 5 นาที เซนเซอร์ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ อย่างไรก็ตามเซนเซอร์สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ระดับหนึ่ง ซึ่งสรุปได้ว่า Graphene/Cobalt Oxide sensor < Graphene sensor < Carbon Nanotube sensor ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูป 4.17 (ภาคผนวก ง.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบเซนเซอร์ชนิดต่างๆ กับความสามารถในการกลับคืนสู่สภาพเดิมภายในเวลา 5 นาที

4.4 ขั้นตอนการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์

จากการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารละลายแอมโมเนีย 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ทำการทดสอบค่าต่าง ๆ ดังนี้

-Range

-Linearity

-%RSD

-LOD, และ LOQ

-ความเสถียรของเซนเซอร์

4.4.1 Working Range และ Linearity

4.4.1.1 ตรวจวัดโดยใช้ Graphene sensor

ทดสอบสารละลายแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยค่าความต้านทานของเซนเซอร์เริ่มต้น (R_0) เท่ากับ 100.02 kΩ ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนีย 1, 10, 25, 50, และ 100 ppm ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ ผลการทดสอบเป็นดังตารางที่ 4.1 (ภาคผนวก ก)

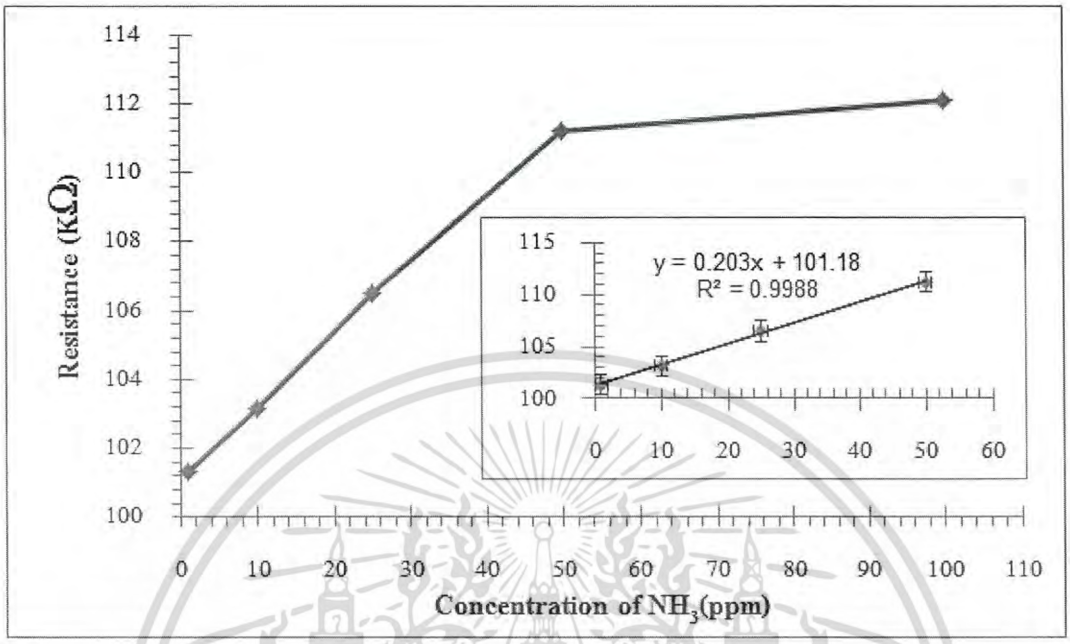
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของ Graphene sensor ในการตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย

	ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป (kΩ)				
การวัดครั้งที่	**NH_3 1ppm**	**NH_3 10ppm**	**NH_3 25ppm**	**NH_3 50ppm**	**NH_3 100ppm**
ครั้งที่ 1	101.85	103.29	106.89	111.80	112.12
ครั้งที่ 2	101.50	103.08	106.45	111.05	112.11
ครั้งที่ 3	100.68	103.03	106.11	110.86	112.04
ค่าเฉลี่ย	**101.34**	**103.13**	**106.48**	**111.24**	**112.09**
SD	**0.60**	**0.13**	**0.39**	**0.49**	**0.04**
%RSD	**0.59**	**0.13**	**0.37**	**0.44**	**0.04**

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป (แกน y) กับความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนีย (แกน x) โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ผลเป็นดังรูปที่ 4.18 ค่า R^2 เท่ากับ 0.9988 ซึ่งสูงกว่า 0.9950 แสดงว่าค่าความต้านทาน กับความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมีความสัมพันธ์เป็นสมการเชิงเส้น นั่นคือ Linearity มีค่าอยู่ในช่วง 1-50 ppm, SD มีค่าน้อยกว่า 0.60, และ %RSD อยู่ในช่วง 0.04-0.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 Working range และ Linearity ของสารละลายแอมโมเนีย ที่ความเข้มข้นต่างๆ ตรวจวัดโดยใช้ Graphene sensor

4.4.1.2 ตรวจวัดโดยใช้ Graphene/Co_3O_4 sensor

ทดสอบสารละลายแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยค่าความต้านทานของเซนเซอร์เริ่มต้น (R_o) เท่ากับ 100.36 kΩ ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนีย 1, 10, 25, 50, 100, และ 500 ppm ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ ผลการทดสอบเป็นดังตารางที่ 4.2 (ภาคผนวก ก)

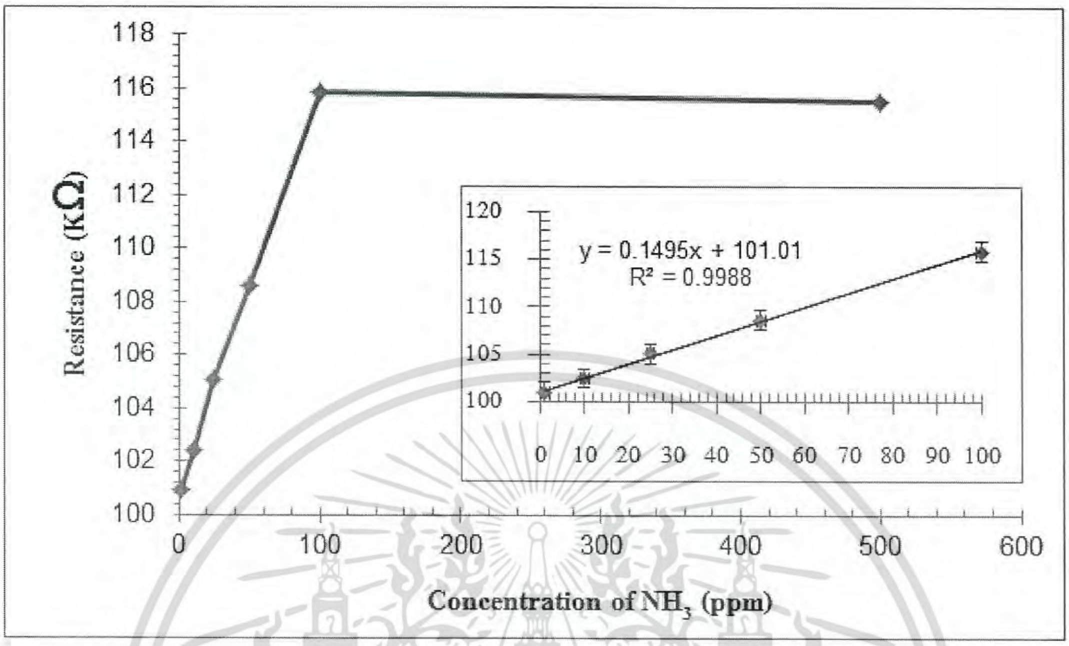
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของ Graphene/Co_3O_4 sensor ในการตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย

	ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป (kΩ)					
การวัดครั้งที่	**NH_3 1ppm**	**NH_3 10ppm**	**NH_3 25ppm**	**NH_3 50ppm**	**NH_3 100ppm**	**NH_3 500ppm**
ครั้งที่ 1	99.82	102.28	104.27	107.00	116.14	116.3
ครั้งที่ 2	101.67	102.78	106.49	110.02	115.61	115.92
ครั้งที่ 3	101.39	102.17	104.40	108.75	115.79	115.29
ค่าเฉลี่ย	**100.96**	**102.41**	**105.05**	**108.59**	**115.85**	**115.84**
SD	**0.99**	**0.33**	**1.25**	**1.52**	**0.27**	**0.51**
%RSD	**0.99**	**0.32**	**1.19**	**1.40**	**0.23**	**0.44**

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป (แกน y) กับความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนีย (แกน x) โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ผลเป็นดังรูปที่ 4.19 ค่า R^2 เท่ากับ 0.9988 ซึ่งสูงกว่า 0.995 แสดงว่าค่าความต้านทาน กับความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมีความสัมพันธ์เป็นสมการเชิงเส้น นั่นคือ Linearity มีค่าอยู่ในช่วง 1-100 ppm, S.D. มีค่าน้อยกว่า 1.52, และ %RSD อยู่ในช่วง 0.23-1.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 Working range และ Linearity ของสารละลายแอมโมเนีย ความเข้มข้นต่างๆ ตรวจวัดโดยใช้ Graphene/Co_3O_4 sensor

4.5 LOD และ LOQ

ทดสอบ sample blank (NH_3 0 ppm) 10 ซ้ำ โดยค่าความต้านทานของเซนเซอร์เริ่มต้น (R_o) เท่ากับ 98.49 kΩ สำหรับ Graphene sensor, และ 94.09 kΩ สำหรับ Graphene/Co_3O_4 sensor จากนั้นคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD), LOD, และ LOQ ตามลำดับ ซึ่งผลเป็นดังแสดงในตารางที่ 4.3

โดยสามารถคำนวณ LOD และ LOQ จาก

LOD ของแอมโมเนีย = 3 S.D.

LOQ ของแอมโมเนีย = 10 S.D.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองจากการทดสอบ sample blank (NH_3 0 ppm) 10 ซ้ำ

ครั้งที่	ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป (kΩ) Graphene sensor	ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป (kΩ) Graphene/Co_3O_4 sensor
1	99.62	94.65
2	99.36	94.51
3	99.00	94.13
4	99.32	94.19
5	99.22	94.77
6	99.56	94.76
7	99.10	94.41
8	99.82	94.64
9	99.32	94.63
10	99.82	94.73
ค่าเฉลี่ย	**99.41**	**94.54**
SD	**0.28**	**0.2300**
LOD	**0.85**	**0.69**
LOQ	**2.83**	**2.30**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ศึกษาอายุการใช้งานของเซนเซอร์ (Sensor)

4.6.1 ศึกษาอายุการใช้งานของ Graphene sensor (ทำการศึกษาทุก ๆ 7 วัน เป็นระยะเวลา 1 เดือน)

-โดยขั้นแรกนั้น จะเริ่มทำการตรวจวัดค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซนเซอร์ก่อนการนำไปทดสอบ (ตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย 10 ppm)

-จากนั้น นำเซนเซอร์ไปตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย 10 ppm โดยผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

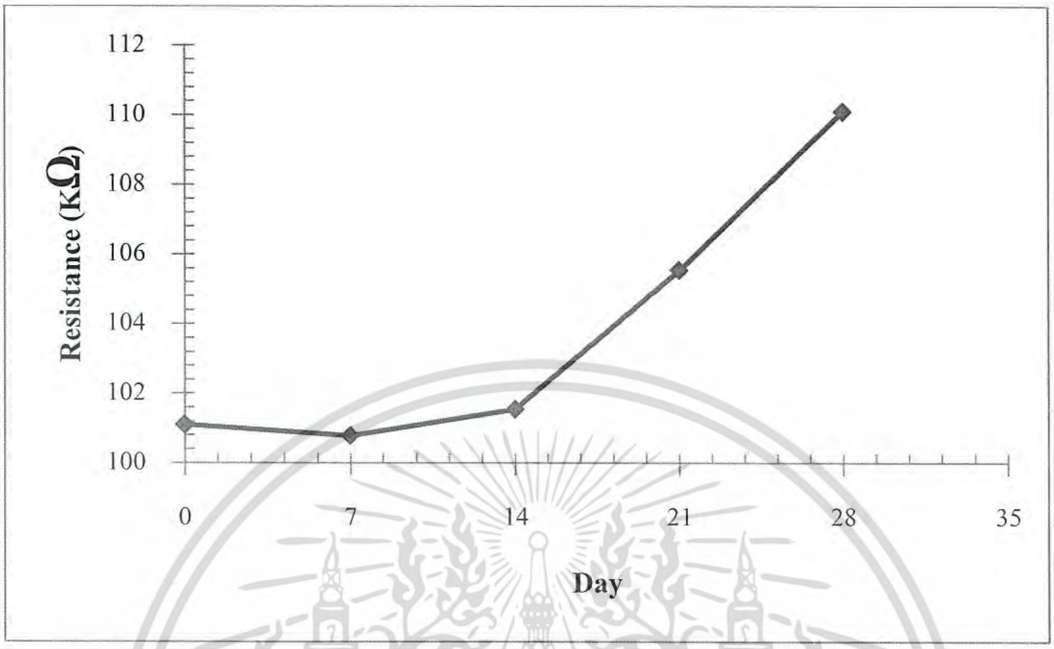
ตารางที่ 4.4 แสดงการศึกษาอายุการใช้งานของ **Graphene sensor**

	ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป (kΩ)				
ค่าความต้านทานเมื่อ	**0 วัน**	**7 วัน**	**14 วัน**	**21 วัน**	**28 วัน**
เริ่มต้น (kΩ)	101.10	100.78	101.54	105.54	110.10
เปลี่ยนแปลง (kΩ) (ครั้งที่ 1)	103.29	102.97	103.73	107.73	110.85
เปลี่ยนแปลง (kΩ) (ครั้งที่ 2)	103.08	102.76	103.52	107.52	110.51
เปลี่ยนแปลง (kΩ) (ครั้งที่ 3)	103.03	102.71	103.47	107.47	109.68
ค่าเฉลี่ย	**103.13**	**102.81**	**103.57**	**107.57**	**110.35**
SD	**0.14**	**0.14**	**0.14**	**0.14**	**0.60**
%RSD	**0.13**	**0.13**	**0.13**	**0.13**	**0.54**
%Response	**2.01**	**2.02**	**2.00**	**1.93**	**0.22**

จากตารางสามารถ สรุปได้ว่า

1. ค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซนเซอร์นั้น มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป สามารถดังแสดงได้ในรูปที่ รูปที่ 4.20 ซึ่งสันนิษฐานว่าน่าจะเป็นผลเนื่องมาจากวัสดุเซนเซอร์ที่ติดอยู่บนซับสเตรท เกิดการหลุดออกมา ทำให้อิเล็กตรอนนั้นมีจำนวนน้อยลง จึงทำให้ค่าความต้านทานเริ่มต้นที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น

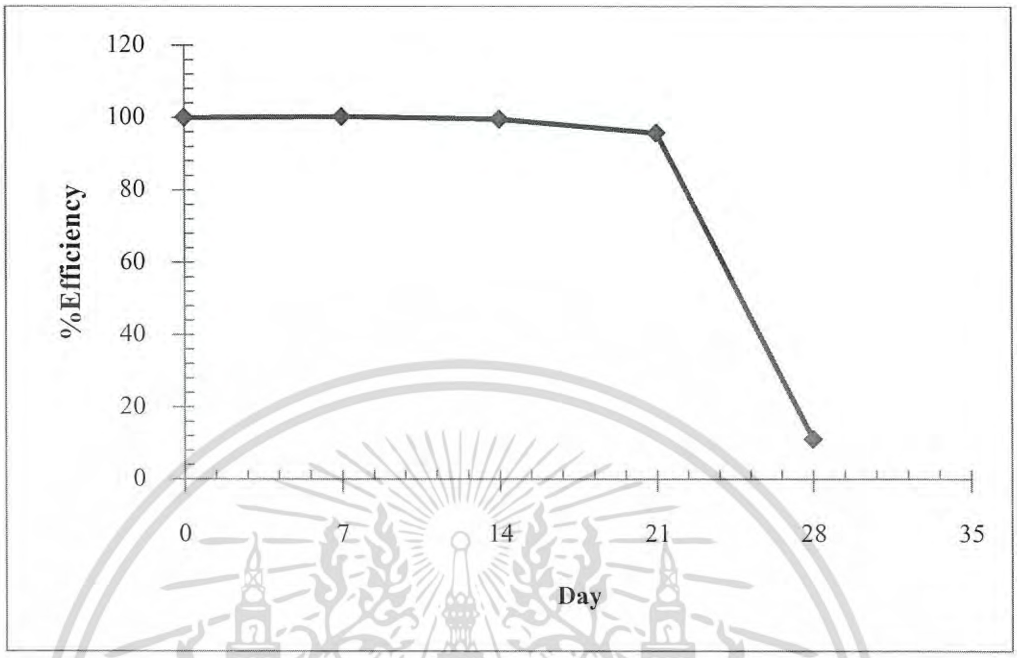
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงค่าความต้านทานเริ่มต้นของ Graphene sensor เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน

2. เมื่อนำเซนเซอร์ไปตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย 10 ppm และนำค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป (ค่าเฉลี่ยจากจำนวนซ้ำ 3 ซ้ำ) มาคำนวณ %Response พบว่าประสิทธิภาพของเซนเซอร์ มีค่าลดลงเรื่อยๆ มากขึ้นตามจำนวนเวลาที่ผ่านไป เมื่อเทียบกับเซนเซอร์ที่วัดหลังจากที่เตรียมเสร็จ ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ **4.21** แสดงประสิทธิภาพของ Graphene sensor เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน

4.6.2 ศึกษาอายุการใช้งานของ Graphene/Co_3O_4 sensor (ทำการศึกษาทุกๆ 7 วัน เป็นระยะเวลา 1 เดือน)

-โดยขั้นแรกนั้น จะเริ่มทำการตรวจวัดค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซนเซอร์ก่อนการนำไปทดสอบ (ตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย 10 ppm)

-จากนั้น นำเซนเซอร์ไปตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย 10 ppm โดยผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

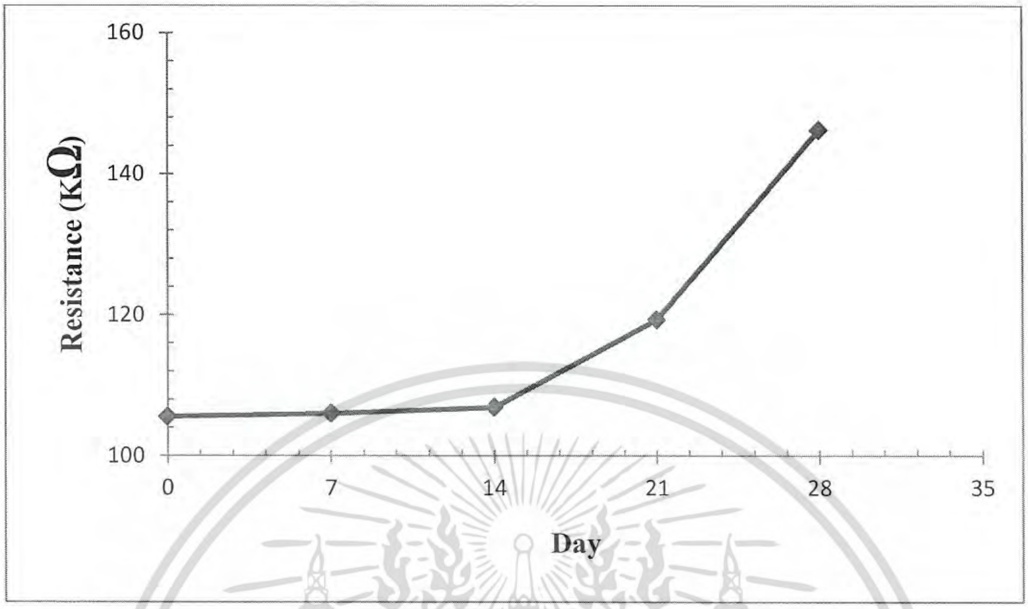
ตารางที่ 4.5 แสดงการศึกษาอายุการใช้งานของ Graphene/Co_3O_4 sensor

	ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป (kΩ)				
ค่าความต้านทานเมื่อ	**0 วัน**	**7 วัน**	**14 วัน**	**21 วัน**	**28 วัน**
เริ่มต้น (kΩ)	105.56	106	106.86	119.33	146.22
เปลี่ยนแปลง (kΩ) (ครั้งที่ 1)	109.3	108.3	109.3	119.3	145
เปลี่ยนแปลง (kΩ) (ครั้งที่ 2)	107.97	108.78	108.78	119.78	148.02
เปลี่ยนแปลง (kΩ) (ครั้งที่ 3)	108.29	108.2	109.2	119.2	146.75
ค่าเฉลี่ย	**108.52**	**108.43**	**109.09**	**119.43**	**146.59**
S.D.	**0.69**	**0.31**	**0.27**	**0.31**	**1.52**
%RSD	**0.64**	**0.29**	**0.25**	**0.26**	**1.03**
%Response	**2.80**	**2.29**	**2.09**	**0.08**	**0.25**

จากตารางสามารถ สรุปได้ว่า

1. ค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซนเซอร์นั้น มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป สามารถดังแสดงได้ในรูปที่ 4.22 ซึ่งสันนิษฐานว่าน่าจะเป็นผลเนื่องมาจากวัสดุเซนเซอร์ที่ติดอยู่บนซับสเตรทเกิดการหลุดออกมา ทำให้อิเล็กตรอนนั้นมีจำนวนน้อยลง จึงทำให้ค่าความต้านทานเริ่มที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น

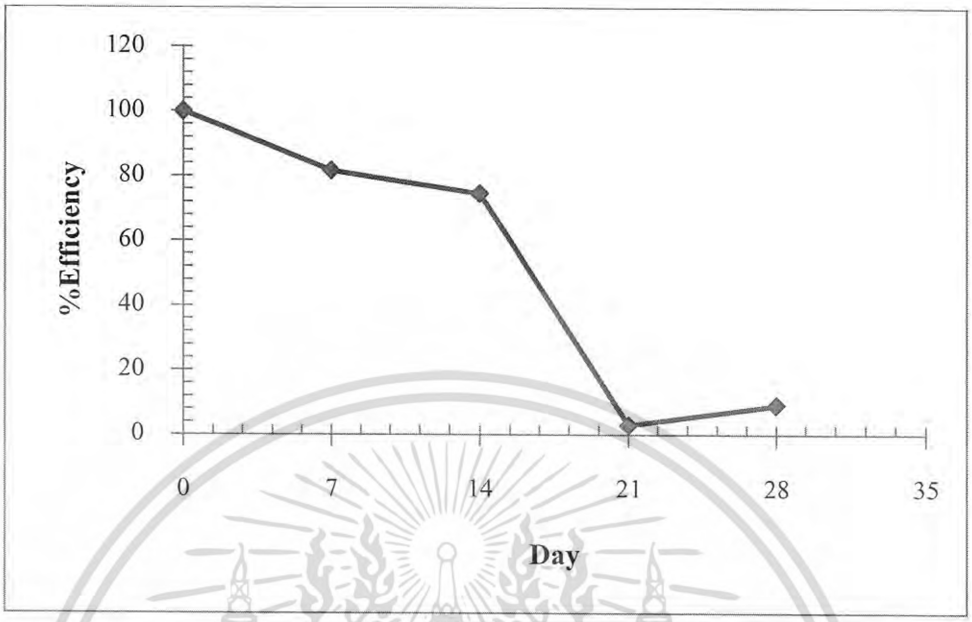
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดงค่าความต้านทานเริ่มต้นของ Graphene/Co_3O_4 sensor เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน

2. เมื่อนำเซนเซอร์ไปตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย 10 ppm และนำค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป (ค่าเฉลี่ยจากจำนวนซ้ำ 3 ซ้ำ) มาคำนวณ %Response พบว่าประสิทธิภาพของเซนเซอร์มีค่าลดลงเรื่อยๆ มากขึ้นตามจำนวนเวลาที่ผ่านไป เมื่อเทียบกับเซนเซอร์ที่วัดหลังจากที่เตรียมเสร็จ ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงประสิทธิภาพของ Graphene/Co_3O_4 sensor เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน

4.7 สรุป

วิธีการทดสอบนี้มีความถูกต้องและแม่นยำ Linearity มีค่าอยู่ในช่วง 1-50 ppm, SD มีค่าน้อยกว่า 0.60, และ %RSD อยู่ในช่วง 0.04-0.59 สำหรับการตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย ด้วย Graphene sensor ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส โดยควบคุมโดยใช้เครื่องปรับอากาศ) ในขณะที่การตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส โดยควบคุมโดยใช้เครื่องปรับอากาศ) ด้วย Graphene/Co_3O_4 sensor มี Linearity มีค่าอยู่ในช่วง 1-100 ppm, SD มีค่าน้อยกว่า 1.52, และ %RSD อยู่ในช่วง 0.23-1.40

วิธีการทดสอบนี้ จึงมีแนวโน้มที่เหมาะสมที่จะใช้ในการนำไปสร้างเป็นวัสดุตรวจวัดการรั่วไหลของแอมโมเนีย เนื่องจากมีความว่องไวในการตรวจวัดสูง การตอบสนองต่อก๊าซได้รวดเร็ว ภายในไม่เกิน 50 วินาทีที่ทุก ๆ ความเข้มข้น นอกจากนี้ยังสามารถตรวจวัดก๊าซได้ที่อุณหภูมิห้อง ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานหรืออุณหภูมิสูงเพื่อกระตุ้นเซนเซอร์ให้ทำงาน จึงเป็นเซนเซอร์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวัสดุเซนเซอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซ (Gas sensors) โดยใช้วัสดุเซนเซอร์คือ กราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ (Graphene/Co_3O_4) กราฟีนและโคบอลต์ออกไซด์จะถูกเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันด้วยฟีนิลไฮดราซีน ซึ่งกราฟีนและโคบอลต์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จะถูกตรวจสอบเอกลักษณ์และลักษณะทางโครงสร้างโดยใช้เทคนิคต่างๆ ดังนี้ X-ray diffractometry (XRD) และ scanning electron microscopy (SEM) จากนั้นจะนำกราฟีนผสมโคบอลต์ออกไซด์ข้างต้น มาสร้างเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ในสภาวะและที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้ยังมีการเปรียบเทียบกับวัสดุเซนเซอร์อีก 3 ชนิดคือ กราฟีน คาร์บอนนาโนทิวบ์ และคาร์บอนนาโนทิวบ์ผสมโคบอลต์ออกไซด์

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุเซนเซอร์แต่ละชนิดแล้วพบว่า Graphene/Co_3O_4 sensor และ Graphene sensor มีประสิทธิภาพดี ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 จึงเลือกนำมาทำการศึกษาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีต่อไป

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุเซนเซอร์แต่ละชนิด

ชนิดของวัสดุเซนเซอร์	%Response	Response Time (s)
Graphene/Cobalt Oxide	74%	49
Graphene	60%	49
Cabon Nanotube	48%	54
Cabon Nanotube/Cobalt Oxide	No	No

ซึ่งเมื่อนำ Graphene/Co_3O_4 sensor และ Graphene sensor นำมาทำการศึกษาต่อ จะพบว่า ช่วงความเป็นเส้นตรงของสารละลายแอมโมเนีย ตรวจวัดโดย Graphene/Co_3O_4 sensor อยู่ในช่วง 1-50 ppm (r^2 = 0.9988) และ Graphene/Co_3O_4 sensor อยู่ในช่วง 1-100 ppm (r^2 = 0.9988) ค่า LOD = 0.85 ppm (สำหรับ Graphene sensor) และ 0.69 ppm (สำหรับ Graphene/Co_3O_4 sensor) ในขณะที่ ค่า LOQ = 2.83 ppm (สำหรับ Graphene sensor) และ 2.30 ppm (สำหรับ Graphene/Co_3O_4 sensor) %RSD < 0.59 % (สำหรับ Graphene sensor) และ < 1.40 % (สำหรับ Graphene/Co_3O_4 sensor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดสอบนี้จึงมีแนวโน้มที่เหมาะสมที่จะใช้ในการนำไปสร้างเป็นวัสดุตรวจวัดการรั่วไหลของแอมโมเนีย เนื่องจากมีความว่องไวในการตรวจวัดสูง การตอบสนองต่อก๊าซได้รวดเร็ว (ภายในไม่เกิน 50 วินาทีที่ทุก ๆ ความเข้มข้น) นอกจากนี้ยังสามารถตรวจวัดก๊าซได้ที่อุณหภูมิห้อง ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานหรืออุณหภูมิสูงเพื่อกระตุ้นเซนเซอร์ให้ทำงาน จึงเป็นเซนเซอร์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย

ข้อเสนอแนะ

1. ก่อนที่จะเตรียมแผ่นเซนเซอร์ (หยดวัสดุเซนเซอร์ลงบนแผ่น PCB) ควรทำความสะอาดแผ่น PCB ทุกครั้ง โดยการ sonicate ในน้ำและเอทานอลเป็นเวลาอย่างละ 5 นาที จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
2. ก่อนที่จะเตรียมแผ่นเซนเซอร์ (หยดวัสดุเซนเซอร์ลงบนแผ่น PCB) ต้องตรวจสอบค่าความต้านทานทางไฟฟ้าก่อนทุกครั้ง ซึ่งค่าที่ได้ต้องไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากลายวงจรนั้น ไม่ได้เชื่อมต่อกัน เป็นการยืนยันว่าค่าความต้านทานทั้งเริ่มต้นและที่เปลี่ยนแปลงไป ไม่ได้เป็นผลมาจากลายวงจรดังกล่าว
3. ห้ามใช้มือเปล่าจับแผ่น PCB ควรสวมถุงมือ และใช้คีมคีบ (Forceps) จับด้านข้างของแผ่น เนื่องจากจะทำให้ลายวงจรไฟฟ้าหลุดหรือสกปรกได้
4. ในขั้นตอนการเตรียมแผ่นเซนเซอร์ (หยดวัสดุเซนเซอร์ลงบนแผ่น PCB) ต้องปรับให้มีค่าความต้านทานที่เท่ากัน โดยไม่ได้สนใจจำนวนหรือปริมาณของวัสดุเซนเซอร์ที่หยดลงไป (เนื่องด้วยวัสดุเซนเซอร์แต่ละชนิดมีค่าความต้านทานที่แตกต่างกันออกไป) เพื่อปรับให้ทุกเซนเซอร์นั้นมีค่าความต้านทานเริ่มต้นที่เท่ากัน ทำให้ง่ายต่อการนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซนเซอร์ที่สร้างจากวัสดุเซนเซอร์ที่ต่างกัน
5. การเก็บเซนเซอร์ควรเก็บลงในกล่องพลาสติกที่มีฝาปิดให้เรียบร้อย เพื่อป้องกันฝุ่นละอองเกาะบนแผ่นเซนเซอร์ ซึ่งอาจเป็นผลทำให้เซนเซอร์สกปรกหรือเสียสภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ธีรเกียรติ์ เกิดเจริญ. " จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (ตอนที่ 1): นาโนศาสตร์ของการรับรู้กลิ่น " [Online]. Available : http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/nano/nose-1.pdf. 2005.

[2] ธีรเกียรติ์ เกิดเจริญ. " จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (ตอนที่ 2): เซนเซอร์รับกลิ่น " [Online]. Available : http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/nano/nose-2.pdf.

[3] ยุทธศรี หล้ามณี. " คุณสมบัติของแอมโมเนีย...และการรั่วซึม " [Online]. Available : http://www.thairefrig.or.th/download/thairefrig_or_th/ammonia.pdf.

[4] สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. " กราฟีน (Graphene) " [Online]. Available : http://www.nstda.or.th/nstda-knowledge/3895-graphene. 2011.

[5] A. K. Geim and A. H., "Graphene: Exploring carbon flatland.", **MacDonald in Physics Today**., **60**, 2007, 35–41.

[6] A. K. Geim and K. S., "The rise of graphene.", **Novoselov in Nature Materials**., **6**, 2007, 183–191.

[7] ดร.พงษ์ธร แซ่อุย และ ภุชงค์ ทับทอง. " คาร์บอนนาโนทิวบ์: วัสดุแห่งอนาคตสำหรับอุตสาหกรรมยาง " **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง วารสารเพื่อการพัฒนาของอุตสาหกรรมยางไทย.** ปีที่ 4, ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน 2553.

[8] ไม่ระบุชื่อผู้เขียน **"ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี"** [Online]. Available : www.mwit.ac.th/~ponchai/Nano/basicnano.doc.

[9] "Electronic nose" [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_nose.

[10] "What is electronic nose?" [Online]. Available : http://ezinearticles.com/?What-is-Electronic-Nose?&id=1037705.

[11] S. Ampuero, J.O. Bosset., "The electronic nose applied to dairy products: a review.", **Sensors and Actuators B**., **94**, 2003, 1–12.

[12] H. Chen, Y. Liu, C. Xie , Jun Wu, D. Zeng, Y. Liao., "A comparative study on UV light activated porous TiO_2 and ZnO film sensors for gas sensing at room temperature." **Ceramics International**., **38**, 2012, 503–509.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] C. T. Wang, M. T. Chen., "Vanadium-promoted tin oxide semiconductor carbon monoxide gas sensors.", **Sensors and Actuators B.**, **150,** 2010, 360–366.

[14] L. O. Pres, W.C. Li, E. Y. Yamauchi, R. Lippi, J. Gruber., "Conductive polymer gas sensor for quantitative detection of methanol in Brazilian sugar-cane spirit.", **Food Chemistry.**, **130**, 2012, 1105–1107.

[15] K. Y. Dong, D. J. Ham, B. H. Kang, K. Lee, J. Choi, J. W. Lee, H. H. Choi, B. K. Ju., "Effect of plasma treatment on the gas sensor with single-walled carbon nanotube paste.", **Talanta**., **89,** 2012, 33– 37.

[16] G. Lu, J. Xu, J. Sun, Y. Yu, Y. Zhang, F. Liu., "UV-enhanced room temperature NO_2 sensor using ZnO nanorods modified with SnO_2 nanoparticles.", **Sensors and Actuators B., 162,** 2012, 82– 88.

[17] P. Gao, H. Ji, Y. Zhou, X. Li., "Selective acetone gas sensors using porous WO_3–Cr_2O_3 thin films prepared by sol–gel method.", **Thin Solid Films., 520,** 2012, 3100–3106.

[18] H. J. Yoon, D. H. Jun, J. H. Yang, Z. Zhou, S. S. Yang, M. C. Cheng., "Carbon dioxide gas sensor using a graphene sheet.", **Sensors and Actuators B**., **157,** 2011, 310– 313

[19] E. Massera, "Italian National Agency for new technologies.", **Energy and sustainable economic development – ENEA UTTP-MDB p.le E. Fermi 1**, Portici (Naples), I-80055. **Italy.**

[20] M. A. Andio, P. N. Browning, P. A. Morris, S. A. Akbar., "Comparison of gas sensor performance of SnO_2 nano-structures on microhotplate platforms.", **Sensors and Actuators B., 165**, 2012, 13– 18.

[21] C. V. Tuan, M. A. Tuan, N. V. Hieu, T. Trung., "Electrochemical synthesis of polyaniline nanowires on Pt interdigitated microelectrode for room temperature NH_3 gas sensor application.", **Current Applied Physics., 12**, 2012, 1011-1016.

[22] J.R. Brown, P.W. Haycock, L.M. Smith, A.C. Jones, E.W. Williams., "Response behaviour of tin oxide thin film gas sensors grown by MOCVD.", **Sensors and Actuators B., 63**, 2000, 109–114.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[23] H. Gong , Y.J. Wang, S.C. Teo, L. Huang., "Interaction between thin-film tin oxide gas sensor and five organic vapors.", **Sensors and Actuators B., 54**, 1999, 232–235.

[24] P. Rai, H. M. Song, Y. S. Kim, M. K. Song, P. R. Oh, J. M. Yoon, Y. T. Yu., "Microwave assisted hydrothermal synthesis of single crystalline ZnO nanorods for gas sensor application.", **Materials Letters., 68**, 2012, 90–93.

[25] A.Z. Sadek, W. Wlodarski, K. Shin, R. Bkaner and K.K. Zadeh., "Preparation, characterization and comparative NH_3-sensing characteristic studies of PANI/inorganic oxides nanocomposite thin films.", **Nanotechnology**. **17** (2006) 4488.

[26] S.S. Joshi, C.D. Lokhande and S.H. Han., "A room temperature liquefied petroleum gas sensor based on all-electrodeposited n-CdSe/p-polyaniline junction.", **Sens. Actuators B., 123,** 2007, 240-245

[27] P.G. Collins, K. Bradley, M. Ishigami, A. Zettl., "Extreme Oxygen Sensitivity of Electronic Properties of Carbon Nanotubes.", **Science., 287,** 2000, 1801–1804.

[28] J. Kong, M.G. Chapline, H. Dai., "Functionalized Carbon Nanotubes for Molecular Hydrogen Sensors.", **Adv. Mater., 13,** 2001, 1384–1386.

[29] K.G. Ong, K.Zeng, C.A.Grimes., "A wireless, passive carbon nanotube-based gas sensor.", **IEEE Sens. J., 2,** 2002, 82–88.

[30] C. Cantalini, L. Valentini, L. Lozzi, I. Armentano, J.M. Kenny, S. Santucci., "NO_2 gas sensitivity of carbon nanotubes obtained by plasma enhanced chemical vapor deposition.", **Sens. Actuators B., 93**, 2003, 333–337.

[31] S. Chopra, K. McGuire, N. Gothard, A.M. Rao., "Selective gas detection using a carbon nanotube sensor.", **Appl. Phys. Lett., 83,** 2003, 2280–2282.

[32] S.G. Wang, Q.Z. Zhang, D.J. Yang, P.J. Sellin, G.F. Zhong, ***Mater.*13 (2004)** 1327–1332.

[33] J. Suehiro, G. Zhou, H. Imakiire, W. Ding, M. Hara., "Controlled fabrication of carbon nanotube NO_2 gas sensor using dielectrophoretic impedance measurement.", **Sens. Actuators B., 108**, 2005, 398–403.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[34] B. Wang, Y. Wang, J.Park, H. Ahn, G. Wang., "*In situ* synthesis of Co_3O_4/graphene nanocomposite material for lithium-ion batteries and supercapacitors with high capacity and supercapacitance.", **Journal of Alloys and Compounds., 509**, 2011, 7778-7783

[35] X. Ke, J. Cao , M. Zheng, Y. Chen, J. Liu, G. Ji., "Molten salt synthesis of single-crystal Co_3O_4 nanorods.", **Materials Letters.**, **61**, 2007, 3901–3903

[36] "การใช้งานระบบแอมโมเนียอย่างปลอดภัย". **วารสารสมาคมเครื่องทำความเย็นไทย Keep Kool.** ฉบับที่ 8, เดือน พฤษภาคม 2546, หน้า 20-22

[37] C. W. et al, *Sens. Actuators B Chem.* **119** (2006) 180-185

[38] จักรกฤษณ์ พลรักษ์, สมหวัง เหมสุขเจริญกุล "การหาโครงสร้างผลึก โดยใช้เทคนิค X-Ray diffraction" [Online]. Available : http://elec.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/termwork/xrd2/Page7.html

[39] อุดมศักดิ์ ภู่พิมล, นิพล แสงหล้า "สเปซแลททิซ (Stace lattice)" [Online]. Available : http://www.rmutphysics.com/CHARUD/oldnews/48/crystal/A05.htm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การเตรียมแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ

จาก $M = (10\%D)/M_w$ ....(1)

$M = (10x25x0.91)/17$

$M = 13.38$ mol/L

จาก $M = g/M_w$ ....(2)

$13.38 = g/17$

$g = 227.46$ g/L

$= 227,460$ mg/L

$= 227,460$ ppm

ดังนั้น NH_3 25% = 13.38 mol/L = 227,460 ppm

จากนั้น เตรียมแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1,000 ppm จาก 227,460 ppm และใช้เป็น stock เพื่อเตรียม 500 ppm, 100 ppm , 50 ppm, 25 ppm, 10 ppm, และ 1 ppm โดยคำนวณจาก

$M_1V_1 = M_2V_2$ ....(3)

$13.38 (V_1) = 0.05882 (250)$

หรือ $227,460 (V_1) = 1,000 (250)$

$V_1 = 1$ ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสรุป การเตรียมสารดังตารางต่อไปนี้

ความเข้มข้น (ppm)	**ความเข้มข้น (mol/L)**	**ปริมาตร(mL)**	**ปรับปริมาตร**
1000* **	**0.05882**	**1**	**250**
500(1)	0.02941	50	100
100(2)	0.00588	10	100
50(3)	0.00294	5	100
25(4)	0.00147	2.5	100
10(5)	0.00059	1	100
1(6)	0.00006	0.1	100

***ใช้เป็น stock เตรียมจาก NH_3 25% 1 ml แล้วปรับให้เป็น 250 ml ด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนีย (ppm) จากระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนีย (ppm) จากระบบ

จากระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนีย ซึ่งเจือจางด้วยก๊าซไนโตรเจน สามารถนำมาคำนวณความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนีย (ppm) ได้ดังสมการ

$$C_{ppm} = ((22.4\times10^{6} x W_t)/(q_D+q_V)M_w \quad (4)$$

และ

$$q_V = (22.4 x W_t)/ M_w \quad (5)$$

โดยที่ C_{ppm} คือ ความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนีย (ppm)

W_t คือ มวลของสารละลายแอมโมเนียที่ระเหยเป็นไอ (กรัมต่อนาที)

q_D คือ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้เจือจางแอมโมเนีย (ลิตรต่อนาที)

q_V คือ อัตราการไหลของก๊าซแอมโมเนีย (ลิตรต่อนาที)

M_w คือ มวลโมเลกุลของแอมโมเนีย

<u>หมายเหตุ</u> สมการข้างต้นใช้คำนวณเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดันคงที่

<u>ตัวอย่างวิธีการคำนวณ</u> ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ซึ่งเจือจางด้วยก๊าซไนโตรเจนเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดันคงที่

จาก $C_{ppm} = ((22.4\times10^{6} x W_t)/(q_D+q_V)M_w$

$C_{ppm} = ((22.4\times10^{6} x 0.08)/(1+0.1153)17$

$C_{ppm} = 103{,}374.98$ ppm

***โดยมวลของสารละลายแอมโมเนียที่ระเหยเป็นไอ (กรัมต่อนาที) (W_t) สามารถหาได้จากภาคผนวก ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การทดลองหามวลสารแอมโมเนียที่ระเหยเป็นไอ (W_t)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลองเพื่อหามวลสารแอมโมเนียที่ระเหยเป็นไอ (W_t)

1. นำแอมโมเนียไปชั่ง (ทั้งขวด และสารละลายแอมโมเนีย 100 ml) จดค่าที่อ่านได้ไว้
2. จากนั้นทำการทดลองโดยการปล่อยก๊าซไนโตรเจน เพื่อพาโมเลกุลของแอมโมเนียให้เคลื่อนที่เข้าสู่ระบบ โดยอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ใช้คือ 1 ลิตรต่อนาที ทำการทดลองเป็นเวลา 1 นาที
3. จากนั้นนำแอมโมเนียไปชั่ง (ทั้งขวด และสารละลายแอมโมเนีย 100 ml) จดค่าที่อ่านได้ไว้
4. เราจะทราบน้ำหนักของสารละลายแอมโมเนียที่หายไป
5. นำไปคำนวณหาอัตราการไหลของก๊าซแอมโมเนีย (ลิตรต่อนาที) หรือ q_v
6. นำไปคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนีย (ppm)

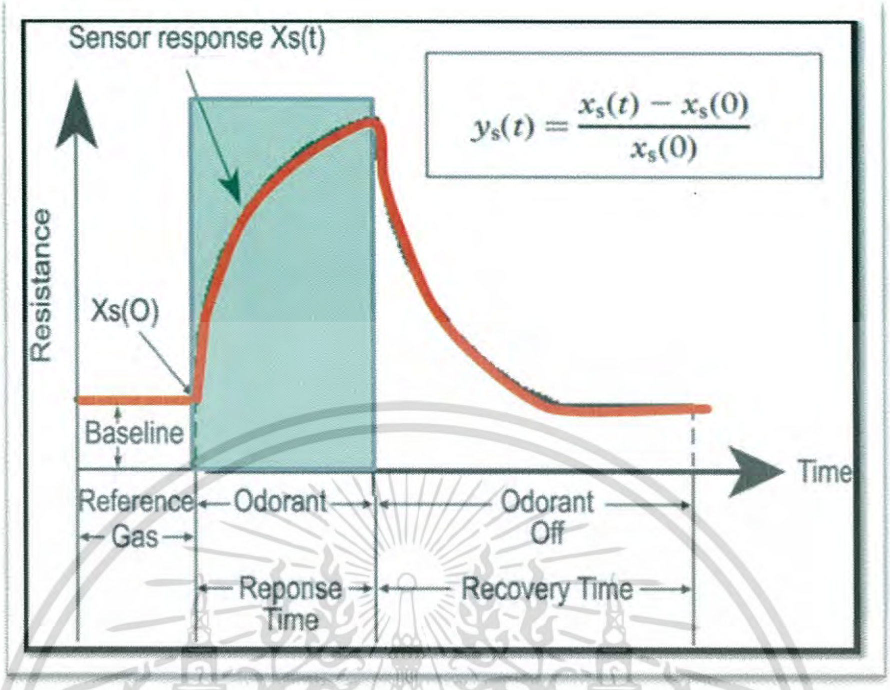
<u>หมายเหตุ</u> ทำเช่นเดียวกันในทุกๆ ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

วิธีการคำนวณหาค่าการตอบสนอง (% Response), เวลาที่ใช้ในการตอบสนอง (Response Time), และเวลาที่ใช้ในการคืนกลับสู่สภาพเดิม (Recovery Time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากภาพ สามารถนำมาคำนวณหาทปัจจัยต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. **ค่าการตอบสนอง (% Response) (ภาคผนวก ง.1)** คำนวณได้จาก

$$\%\boldsymbol{Response} = [\frac{\boldsymbol{Rg - Ro}}{\boldsymbol{Ro}}] * \mathbf{100}$$

เช่น Graphene sensor มีค่าความต้านทานเริ่มต้นเท่ากับ 100 kΩ และเมื่อนำไปตรวจวัดสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 10 ppm ทำให้มีค่าความต้านทานเท่ากับ 102 kΩ จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\%Response = [\frac{102 - 100}{100}] * 100$$

$$\%Response = 2$$

กำหนดให้

Rg คือ ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ขณะปล่อยก๊าซแอมโมเนีย และ

Ro คือ ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเซนเซอร์ชนิดต่างๆ เริ่มต้น ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ก่อนการปล่อยก๊าซแอมโมเนีย

2. เวลาที่ใช้ในการตอบสนอง (Response Time) (ภาคผนวก ง.2)

สามารถหาค่าได้จากเวลาเริ่มต้น ณ จุดที่มีการปล่อยก๊าซแอมโมเนีย หักลบด้วยเวลา ณ จุดที่ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานสูงสุด

3. เวลาที่ใช้ในการคืนกลับสู่สภาพเดิม (Recovery Time) (ภาคผนวก ง.3)

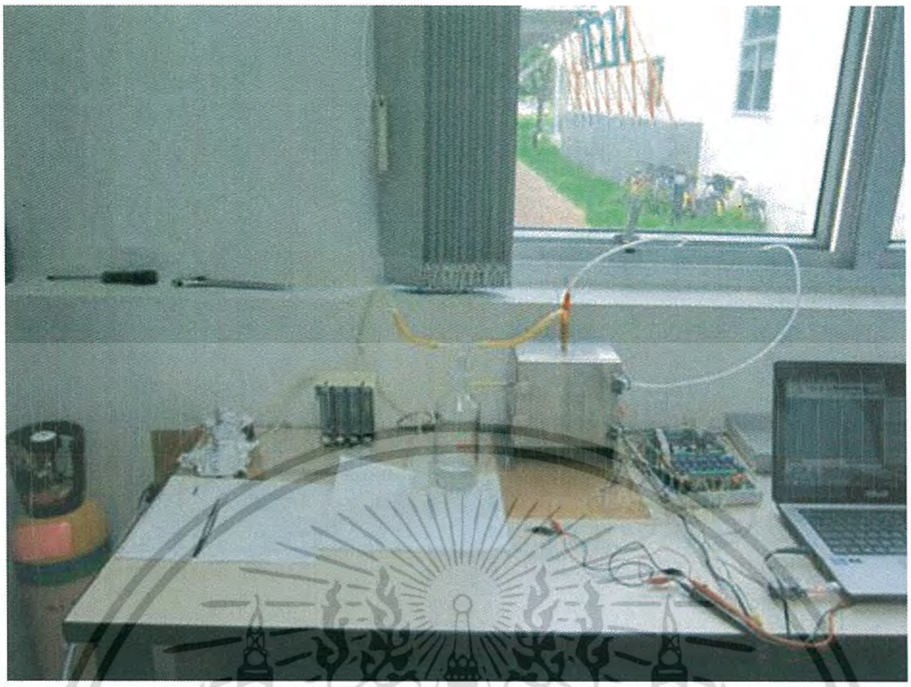
สามารถหาค่าได้จากเวลา ณ ที่มีการหยุดปล่อยก๊าซแอมโมเนีย จนกระทั่งเซนเซอร์มีค่าความต้านทานไปสู่จุดเริ่มต้น ภายใต้สภาวะที่มีการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเพื่อไล่ก๊าซแอมโมเนียออกจากระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการตรวจวัดแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



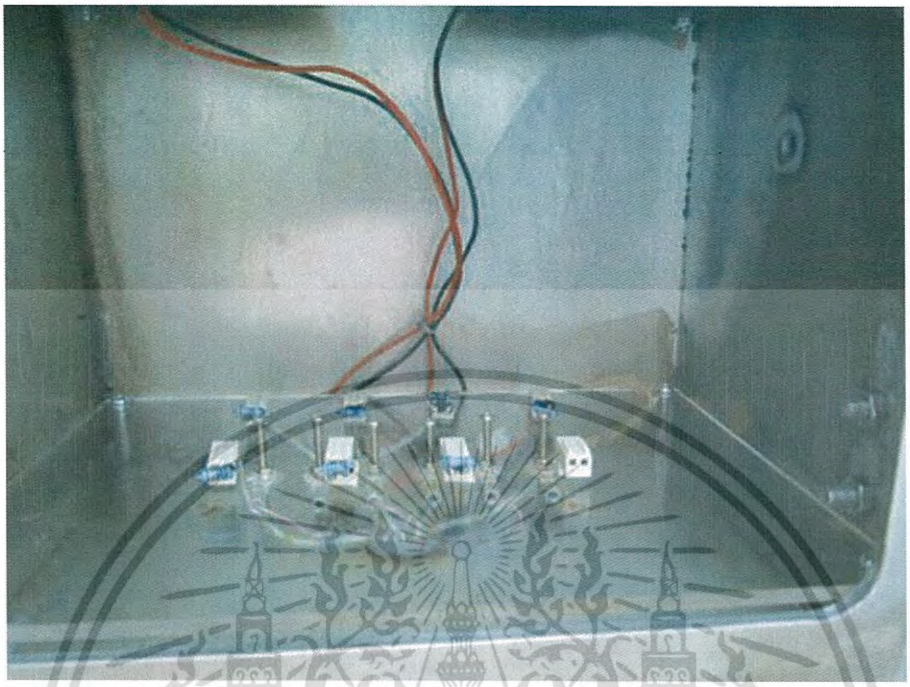
ระบบที่ใช้ในการตรวจวัดสารละลายแอมโมเนีย ที่สภาวะและอุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

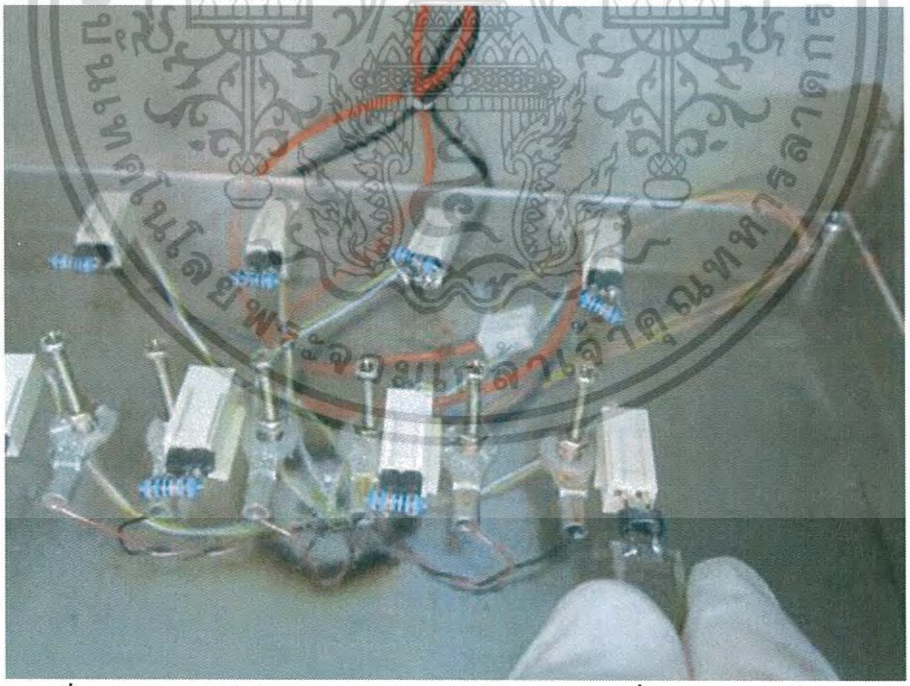
การควบคุมการไหลของก๊าซแอมโมเนียและไนโตรเจน

การปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ chamber ของสารละลายแอมโมเนีย เพื่อพาโมเลกุลของแอมโมเนียเคลื่อนที่เข้าสู่ระบบตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภายในระบบปิดของอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย



การเชื่อมต่อเซนเซอร์เข้ากับระบบตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย ที่สภาวะและอุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวนิตยา สอาด
วัน เดือน ปีเกิด	31 พ.ค. 2530
ที่อยู่	16 ม.2 ตำบลแม่เปิน อำเภอแม่เปิน จังหวัดนครสวรรค์ โทร 089-0132747
ประวัติการศึกษา	2552 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยนเรศวร

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2556 นำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการ paccon 2013 ในหัวข้อ "SYNTHESIS OF GRAPHENE/Co_3O_4 FOR AMMONIA GAS SENSING AT ROOM TEMPERATURE"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้