การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นจากวัสดุท่อนาโนคาร์บอน สำหรับตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย

FABRICATION OF FLEXIBLE GAS SENSOR BASED ON CARBON NANOTUBES FOR VOLATILE ORGANIC COMPOUND DETECTION

ศศิประภา รอดบุญธรรม

SASIPHAPA RODBUNTUM

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION OF FLEXIBLE GAS SENSOR BASED ON CARBON NANOTUBES FOR VOLATILE ORGANIC COMPOUND DETECTION

SASIPHAPA RODBUNTUM

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIALS ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2017
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นจากวัสดุท่อนาโนคาร์บอน สำหรับการตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย
Special Project Title	Fabrication of Flexible Gas Sensor Based on Carbon Nanotubes for Volatile Organic Compound Detection
นักศึกษา	นางสาว ศศิประภา รอดบุญธรรม
รหัสประจำตัว	57110044
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	-

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. นงลักษณ์ หวงกำแหง	(signature)
ดร. มยุรี พลเยี่ยม	(signature)
ผศ.ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์	(signature)

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่.....15..... เดือน.........มิ.ย...........พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง	การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นจากวัสดุท่อนาโนคาร์บอนสำหรับตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย
นักศึกษา	นางสาวศศิประภา รอดบุญธรรม
รหัสประจำตัว	57110044
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นได้จากวัสดุนาโนคาร์บอนสำหรับตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวเป็นวัสดุตรวจจับไอระเหยบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (SWCNT/PDMS) การประดิษฐ์ SWCNT/PDMS ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการเตรียมฟิล์มบางของ SCWNT บนกระดาษกรองด้วยเทคนิคการกรองด้วยสุญญากาศ ขั้นตอนที่สองคือการวาง SWCNT บน PDMS ด้วยเทคนิคการลอกลาย ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือความเข้มข้นของ SWCNT โดยใช้สารละลาย SWCNT ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันได้แก่ 5 10 15 20 และ 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field emission scanning electron microscope : FESEM) ลักษณะการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิครามานสเปคโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) และสมบัติการนำไฟฟ้าด้วยการวัดความต้านทานของแผ่นฟิล์มบาง (Sheet resistance) หลังจากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายของ SWCNT/PDMS โดยการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าก่อนและหลังการสัมผัสกับไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายขณะทำการงอและไม่ได้งอ เวลาในการตอบสนอง และเวลาในการคืนตัว โดยไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่จะใช้ทดสอบได้แก่ เมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเบนซีน เป็นต้น นอกจากนั้นยังศึกษาผลของความสามารถในการพองตัวของ SWCNT/PDMS กับไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescence Spectroscopy) จากผลการทดลองพบว่าก๊าซเซนเซอร์ SWCNT/PDMS ที่ความเข้มข้น 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนได้ดีที่สุดซึ่งสอดคล้องกับการพองตัวของ SWCNT/PDMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Fabrication of flexible gas sensor based on carbon nanotubes for volatile organic compound detection
Student	Miss Sasiphapa Rodbuntum
Student ID	57110044
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterials Engineering
Year	2017
Special Project Advisor	Asst. Prof. Dr. Winadda Wongwiriyapan

Abstract

In this special project, fabrication of flexible gas sensor based on carbon nanomaterials for volatile organic compounds (VOCs) detection has been studied. Single-walled carbon nanotube (SWCNT) on polydimethylsiloxane (PDMS) substrate (SWCNT/PDMS) has been used as sensing material for a detection of VOC vapor. Fabrication of SWCNT/PDMS consists of two steps. The first step is preparing SWCNT thin film on cellulose paper via vacuum filtration method. The second step is transferring SWNT thin film from cellulose paper to PDMS substrate via transfer molding method. The effect of SWCNT density on sensor performance has been studied. The concentration of the SWCNT dispersion to form SWCNT thin film were varied at 5, 10, 15, 22 and 25 μg/ml. The morphology of SWCNT, distribution of SWCNT on PDMS substrate, and sheet resistance of the fabricated SWNT/PDMS were characterized by field emission scanning electron microscope, raman spectroscopy, and four-point probe, respectively. Next, the sensor performance of the SWNT/PDMS was evaluated by measuring the change of resistance before and after VOC vapor exposure, with and without bending. The sensor performance of the SWCNT/PDMS were characterized in terms of sensor response magnitude, response time, and recovery time. The VOC targets are methanol, ethanol, acetone, and benzene. Moreover, the swelling effect VOC vapor on SWCNT/PDMS were characterized fluorescence spectroscopy. The results showed that, the SWCNT/PDMS prepared by a 25 μg/ml of SWCNT solution has the maximum response magnitude to benzene vapor, the highest response to benzene can be explained by the highest solubility of benzene and SWCNT/PDMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางการทำงานที่ถูกต้อง ตลอดจนเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา รวมทั้งขอขอบคุณ ผศ.ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง และ ดร.มยุรี พลเยี่ยม สำหรับการเป็นประธานและกรรมการในการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและการตรวจสอบในโครงงานพิเศษนี้ และคณาจารย์วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาและสนับสนุนสถานที่และเครื่องมือสำหรับการทำงานวิจัยตลอดระยะเวลาของการศึกษาในสถาบันแห่งนี้ ขอขอบคุณ ดร.อรรณพ คล้ำชื่น นักวิจัยจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำหรับการขออนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ นางสาวชนกนันท์ รัตนบุษย์ นักศึกษาปริญญาโท สำหรับการตรวจวัดชิ้นงานด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโครปี รวมถึงให้คำแนะนำและคำปรึกษาต่างๆที่มีส่วนทำให้งานวิจัยนี้เป็นไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณนายชินธันย์ ปิ่นมิ่ง นักศึกษาปริญญาโท สำหรับคำปรึกษาในแนวทางการแก้ปัญหาต่างๆ รวมทั้งยังสอนใช้เครื่องมือต่างๆในงานวิจัยนี้ด้วย และขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุนาโนคาร์บอนสำหรับความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่ให้แรงสนับสนุนและกำลังใจแก่ผู้วิจัย ที่คอยส่งเสริมให้ผู้วิจัยสามารถก้าวผ่านปัญหาต่างๆไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกท่านที่คอยเป็นกำลังใจและให้ช่วยเหลือที่ดีมาตลอด รวมทั้งยังสร้างบรรยากาศที่ดีในเวลาเรียนและเวลาทำงานวิจัย

ศศิประภา รอดบุญธรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญภาพ	vi
สารบัญตาราง	viii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 แผนการดำเนินงานในงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	5
2.1 ชนิดและลักษณะโครงสร้างของคาร์บอน	5
2.2 ท่อนาโนคาร์บอน	8
2.3 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน	10
2.4 เทคนิคการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน	13
2.5 ส่วนประกอบและนิยามของเซนเซอร์	16
2.6 พารามิเตอร์ในการพิจารณาความสามารถในการพองตัวของพอลิเมอร์	21
2.7 วัสดุพอลิเมอร์	23
2.8 การนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย	24
2.9 เครื่องมือวิเคราะห์	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..42

3.1 การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (SWNT/PDMS) สำหรับตรวจจับสารอินทรีย์ระเหยง่าย(VOCs)... 42

3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอไดเมทิลไซลอกเซน.................................. 45

3.3 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน... 50

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล..51

4.1 ลักษณะทางกายภาพของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน.......51

4.2 ลักษณะการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน...53

4.3 สมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนบนพอลิไดเมทิลไซลอกเซน...........................55

4.4 ประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายของก๊าซ....................58

บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและแนวทางในการพัฒนา...79

5.1 สรุปผลการวิจัย...79

5.2 แนวทางในการพัฒนา..80

บรรณานุกรม..81

ประวัติผู้เขียน...82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 แสดงโครงสร้างผลึก FCC ของเพชร 5
2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของกราฟีน 6
2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ 6
2.4 แสดงโครงสร้างผลึกของท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes , CNTs) 7
2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของฟูลเลอรีน 7
2.6 แสดงลักษณะโครงสร้างของ CNTs ชนิดโครงสร้าง (a.) ผนังชั้นเดียว (SWCNTs) 8
2.7 แสดงลักษณะการม้วนของ CNTs ทั้งสามแบบ 9
2.8 แสดงระดับชั้นพลังงาน (E) เทียบกับความหนาแน่นของสถานะ (DOS) 12
2.9 แผนภาพแสดงการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จ 14
2.10 แผนภาพแสดงการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการระเหยด้วยเลเซอร์ 15
2.11 แผนภาพแสดงการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการตกเคลือบไอเคมี 16
2.12 แสดงกราฟการตอบสนอง (response) และการคืนตัว (recovery) 21
2.13 แผนภาพแสดงลักษณะของทรงกลม Hansen(Hansen sphere) 23
2.14 (a) แสดงการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นของ CO ที่แตกต่างกัน 28
2.15 แสดงการตอบสนองภายใต้บรรยากาศความชื้นประมาณ 65% 28
2.16 แสดงการตอบสนองของ SiO_2/Si substrate ต่อการตรวจวัดก๊าซ NO_2 29
2.17 แสดงการตอบสนองของ SiO_2/Si substrate ต่อการตรวจวัดก๊าซ NH_3 29
2.18 แสดงการตอบสนองของ SWNTs/PET (เส้นสีเทา) เทียบกับการตอบสนองของ 30
2.19 แสดงการตอบสนองขณะทำการงอ โดยการให้ acetone เป็นเวลา 5 นาที 31
2.20 (a) แสดงการกรองผ่านสุญญากาศ (b) แสดง SWNTs บนแผ่นพลาสติก 31
2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเทียบกับเวลาของ 32
2.22 แสดงการกรองสารละลาย SWNTs ผ่านการกรองด้วยสุญญากาศ 33
2.23 แสดงการลอก PDMS ออกจาก AAO filter membrane 34
2.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์การนำไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ SWNTs/PDMS 34
2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเทียบกับโวลต์ของ 35
2.29 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 37
2.30 ภาพแสดงหลักการทำงานของฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป 38
2.31 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง 39
2.32 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดรามานสเปกโทรสโกปี 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.33	แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดรามานสเปกโทรสโกปี	41
3.1	แผนภาพการเตรียมสารละลาย SWNT	42
3.2	แผนภาพการเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษกรองด้วยวิธีการกรอง	43
3.3	แผนภาพการเตรียม PDMS และการไล่ฟองอากาศ	44
3.4	แผนภาพการลอกท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษกรองลงบน PDMS	44
3.5	แผนภาพการสร้างขั้วไฟฟ้า โดยการใช้กาวเงิน	45
3.6	แสดงระบบตรวจวัดก๊าซ	46
3.7	แผนผังสรุปงาน	50
4.1	แสดงภาพ FESEM ของ SWCNT/PDMS โดย ใช้สารละลายที่ความเข้มข้น	52
4.2	แสดงรามานสเปกตรัมของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเทียบกับ SWCNT/PDMS	53
4.3	ภาพแสดง (a) พื้นผิวของ SWCNT(5)/PDMS จากเครื่อง Optical	55
4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของ	56
4.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของ SWCNT/PDMS	56
4.6	แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ (a) GS_5 (b) GS_10 (c) GS_15	59
4.7	แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ (a) GS_5 (b) GS_10 (c) GS_15	62
4.8	แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ (a) GS_5 (b) GS_10 (c) GS_15	65
4.9	แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ (a) GS_5 (b) GS_10 (c) GS_15	68
4.10	ภาพแสดงโมเลกุลของเมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเบนซีน ตามลำดับ	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 สรุปตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการนำ CNTs มาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ตรวจวัด................35
3.1 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษกรอง 43
3.2 แสดงการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิ...................50
4.1 แสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของ SWCNT/PDMS ที่เตรียมจากสารละลาย 57
4.2 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของเมทานอลที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์..........................58
4.3 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโน...............................60
4.4 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของเอทานอลที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ 61
4.5 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโน...............................63
4.6 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของอะซีโตนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ 64
4.7 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโน...............................66
4.8 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของเบนซีนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ 67
4.9 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโน...............................69
4.10 แสดงค่าความเข้มข้นของไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ในการ 72
4.11 แสดงขนาดโมเลกุลและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของไอระเหยของสารอินทรีย์...............................75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันนี้ประเทศไทยได้มีนโยบาย Thailand 4.0 มีการพัฒนาอุตสาหกรรมเพื่อก้าวเข้าสู่ยุค Industry 4.0 เพื่อที่จะเพิ่มขีดความสามารถด้านการแข่งขันในระดับสากล ซึ่งในการพัฒนาอุตสาหกรรมขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดปัญหากับมลพิษสิ่งแวดล้อมทางอากาศ อาหาร และแหล่งน้ำ เป็นต้น โดยที่อาจเกิดขึ้นเองหรือเกิดจากการที่มนุษย์สร้างขึ้น เนื่องมาจากในหลายๆโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาและวิจัยสิ่งใหม่ๆเพื่อให้โรงงานอุตสาหกรรมเกิดการขยายตัวในด้านต่างๆ อย่างรวดเร็วและกว้างขวาง จึงมีการนำสารเคมีต่างๆเข้ามาใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสารเคมีต่างๆที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่จะพบว่าเป็นสารเคมีจำพวกสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds , VOCs) โดยเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบหลักของไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะมีการจับกันระหว่างพันธะคาร์บอนกับคาร์บอน คาร์บอนกับไฮโดรเจน คาร์บอนกับไนโตรเจน และคาร์บอนกับซัลเฟอร์ เป็นต้น ตัวอย่างของสารอินทรีย์ระเหยง่ายเหล่านี้ อาทิเช่น เอทานอล อะซีโตน แอมโมเนีย และเบนซีน เป็นต้น

ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะมีสมบัติที่สำคัญ คือ ระเหยเป็นไอได้ง่ายและสามารถฟุ้งกระจายได้ที่อุณหภูมิห้องและความดันปกติทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอีกด้วย ซึ่งถ้าหากสารอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าสู่ร่างกายจะทำให้ระบบภูมิคุ้มกันบกพร่อง ระบบประสาทถูกทำลาย เกิดอาการวิงเวียนศีรษะหน้ามืด แสบตา หายใจลำบาก และหากได้รับในปริมาณมาก อาจทำให้เสียชีวิตได้ เช่น ได้รับไอระเหยของเบนซีนที่ความเข้มข้น 7,500 ppm ใน 1 ชั่วโมงครึ่ง หรือ มากกว่า 20,000 ppm ในเวลา 5-10 นาที[1] และจากการสำรวจพบว่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในพื้นที่อุตสาหกรรม เช่น มาบตาพุด กรุงเทพและปริมณฑลมีค่าเกินมาตรฐาน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ เพราะฉะนั้นจึงควรมีแนวทางในการเฝ้าระวัง และป้องกันอันตรายในพื้นที่เสี่ยงที่จะได้รับสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้อุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้อย่างทันท่วงที และพกติดตัวได้เพื่อใช้ในการเตือนภัยในกรณีที่บริเวณนั้นมีสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes , CNTs)[2] ซึ่งเป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอน โดย CNTs มีลักษณะคล้ายกับการม้วนตัวของแผ่นกราฟีนที่มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตรซึ่งเกิดจากการเชื่อมโยงอะตอมคาร์บอนกับคาร์บอนข้างเคียงสามอะตอม CNTs[3] เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกเนื่องมาจาก CNTs มีสมบัติที่พิเศษหลายประการ ได้แก่ สมบัติเชิงไฟฟ้า ควอนตัม ความร้อน เคมี แสง และเชิงกล เป็นต้น จากสมบัติดังกล่าวจึงได้มีการนำมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ชนิดอื่นมากมาย อาทิเช่น ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field-effect transistor) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) หัววัดสำหรับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy, AFM) และอีกทั้งยังนำ CNTs มาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางด้านเซนเซอร์ เช่น ก๊าซเซนเซอร์ เนื่องมาจาก CNTs ขนาดเล็ก มีลักษณะเป็นโพรงและมีรูพรุนจำนวนมากส่งผลให้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง สามารถดูดซับโมเลกุลของก๊าซ มีความไวและการตอบสนองทางไฟฟ้าที่ดี และยังสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิห้องและที่ช่วงอุณหภูมิสูงได้อีกด้วย

จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการนำ CNTs มาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจวัดไอระเหย VOCs ที่สร้างขึ้นบนพื้นผิวแผ่นซิลิกอน แก้ว เซรามิก เป็นต้น พบว่ามีความสามารถในการตรวจวัดที่ดีโดยสามารถตรวจวัดได้ในระดับหนึ่งในล้านส่วนถึงในพันล้านส่วน และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่เซนเซอร์ส่วนมากที่ทำขึ้นมีความไม่ยืดหยุ่น กำจัดยาก และราคาแพง ต่อมาจึงมีการนำเซนเซอร์มาสร้างบนกระดาษเซลลูโลสที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องมาจากกระบวนการสร้างสามารถทำได้ง่าย มีความยืดหยุ่นสูง สามารถกำจัดได้ง่าย และราคาถูก แต่ประสิทธิภาพตัวเซนเซอร์สามารถลดลงได้ เนื่องมาจากการหลุดออกของ CNTs บนพื้นผิวกระดาษเซลลูโลส ส่งผลทำให้กระแสที่เคลื่อนที่ผ่านตัวเซนเซอร์ลดลง และในปัจจุบันนี้ได้มีความสนใจเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่สามารถสวมใส่พกพาได้อย่างสะดวกสบายหรืออุปกรณ์สวมใส่ติดตัวกับร่างกาย (Wearable) ซึ่งจะทำให้สามารถตรวจวัดและแจ้งเตือนได้อย่างทันท่วงที ดังนั้นจึงได้มีการนำ CNTs มาสร้างบนแผ่นพลาสติก (Polyethylene terephthalate, PET) หรือบนพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS)[4] ซึ่งได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีกระบวนการผลิตค่อนข้างง่าย มีความสามารถในการยืดหยุ่นสูง เป็นวัสดุทางชีวภาพ (เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม) ราคาไม่แพงถ้าเทียบกับฐานรองรับที่ทำจากแผ่นซิลิกอน และแก้ว มีความสามารถในการส่งผ่านก๊าซได้ และโปร่งใส เมื่อเปรียบเทียบก๊าซเซนเซอร์บนแผ่น PET และ PDMS แล้ว PDMS มีความยืดหยุ่นมากกว่าและสามารถนำไปทำอุปกรณ์สวมใส่ได้มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับก๊าซเซนเซอร์บนฐานรองรับ PDMS ยังมีไม่มากและก๊าซที่ศึกษายังมีจำกัด เช่น ก๊าซไฮโดรเจน แอมโมเนีย ไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นต้น แต่ก็ยังไม่มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับเซนเซอร์บนฐานรองรับ PDMS สำหรับการตรวจวัดไอระเหย VOCs

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสร้างก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs ชนิดผนังเดี่ยวบนฐานรองรับ PDMS (SWNT/PDMS) เพื่อทำเป็นอุปกรณ์ที่ยืดหยุ่นและสามารถพกพาหรืออุปกรณ์สวมใส่ติดตัวกับร่างกายได้มาทำการตรวจวัดไอระเหย VOCs แต่ละชนิด อาทิเช่น เมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเบนซีน เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ยังแสดงถึงขั้นตอนการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จาก SWNT/PDMS และทำการศึกษาผลของปริมาณของ SWCNT/PDMS และศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหย VOCs ของ SWCNT/PDMS ต่อความสามารถในการตรวจวัดไอระเหย VOCs แต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อทำการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จาก SWCNT บนฐานรองรับ PDMS ด้วยเทคนิคการกรองด้วยสุญญากาศ (Vacuum filtration method) และการลอกลายโดยใช้วิธีการถ่ายโอน(Transfer molding)

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหย VOCs ของ SWCNT/PDMS

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 PDMS เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง และมีความเสถียรทางเคมี ดังนั้นการใช้ PDMS เป็นฐานรองรับของก๊าซเซนเซอร์ SWCNT จะทำให้ได้ก๊าซเซนเซอร์ที่ยืดหยุ่นได้

1.3.2 การใช้ปริมาตรสารละลาย SWCNT ที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของ SWCNT และพื้นที่ผิวทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจวัดระเหย VOCs ชนิดเดียวกันมีประสิทธิภาพแตกต่างกัน

1.3.3 กลไกการทำงานของก๊าซเซนเซอร์เป็นการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง SWCNT กับไอระเหย ดังนั้นขนาดโมเลกุล และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของไอระเหย VOCs จึงมีผลต่อประสิทธิภาพก๊าซเซนเซอร์ ชนิดของไอระเหยที่แตกต่างกันจะให้ประสิทธิภาพที่ต่างกันด้วย

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตการดำเนินการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.4.1 ทำการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์ SWCNT บนฐานรองรับ PDMS โดยใช้เทคนิคการกรองด้วยสุญญากาศ (Vacuum filtration method) และการลอกลายโดยใช้วิธีการถ่ายโอน (Transfer molding)

1.4.2 ทำการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของ SWCNT โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) วิเคราะห์การนำไฟฟ้าของ SWNT/PDMS เมื่อทำการงอด้วยเครื่องวัดการงอ (Bending) และวิเคราะห์ปริมาณการกระจายตัวของ SWNT/PDMS โดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (UV-visible spectrophotometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.3 ทำการศึกษาประสิทธิภาพของก๊าซเซนเซอร์ SWNT/PDMS ในการตรวจวัดไอระเหย VOCs โดยจะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า ศึกษาค่าการตอบสนอง (Sensor response) เวลาการตอบสนอง (Response time) และเวลาการคืนตัว (Recovery time) ภายใต้ไอระเหย VOCs ดังต่อไปนี้ เมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเบนซีน

1.4.4 ทำการเปรียบเทียบปริมาณของสารละลาย CNTs บนฐานรองรับ PDMS ว่ามีผลต่อความสามารถในการตรวจวัดไอระเหย VOCs แต่ละชนิด

1.5 แผนการดำเนินงานในงานวิจัย

ผู้วิจัยได้แบ่งการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์เป็น 4 ขั้นตอน แสดงดังตารางที่ 1.1

1.5.1 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 การสร้างก๊าซเซนเซอร์ SWNT/PDMS โดยใช้เทคนิคการการกรองด้วยสุญญากาศ (Vacuum filtration method) และการลอกลายโดยใช้วิธีการลอกลาย (Transfer molding)

1.5.3 การศึกษาปริมาณของ SWNT/PDMS ว่ามีผลต่อความสามารถในการตรวจวัดไอระเหย VOCs แต่ละชนิดอย่างไร

1.5.4 สรุปและอภิปรายผลการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาและการดำเนินงานในงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัย	ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย			
	สิงหาคม-กันยายน พ.ศ. 2560	ตุลาคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2560	ธันวาคม-กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560-2561	มีนาคม-พฤษภาคม พ.ศ. 2561
1	●	●		
2	●	●		
3		●	●	
4			●	●

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 ชนิดและลักษณะโครงสร้างของคาร์บอน

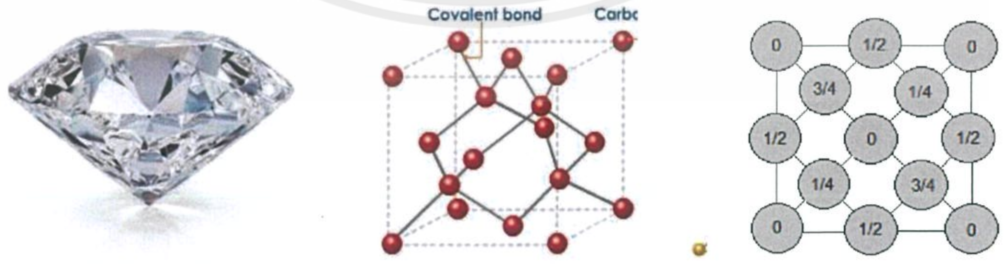
2.1.1 นิยามคาร์บอน [5]

คาร์บอนเป็นธาตุหมู่สี่ในตารางธาตุ ที่มีโครงสร้างหลายแบบโดยในแต่ละแบบจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน คาร์บอนมีสัญลักษณ์เป็นตัวอักษร " C " ดังที่ปรากฏในตารางธาตุจนถึงปัจจุบัน และคาร์บอนยังเป็นธาตุที่พบมากที่สุดในสิ่งมีชีวิต การที่คาร์บอนมีความพิเศษหลายอย่างเนื่องมาจากมันสามารถเกิดพันธะได้หลายแบบ อาทิเช่น พันธะเดี่ยว พันธะคู่ และพันธะสาม โดยที่คาร์บอนมีสี่โคออดิเนชัน กล่าวคือ มีอิเล็กตรอนวงนอก หรือวาเลนซ์อิเล็กตรอนอยู่สี่ตัว และคาร์บอนยังถูกนำมาใช้ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น ไส้ดินสอ วัสดุกรอง วัสดุแยกสารในคอลัมน์ของ สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความแข็ง และอีกมากมาย

2.1.2 ชนิดของคาร์บอนสามารถแบ่งตามโครงสร้างได้ 4 รูปแบบ

2.1.2.1 โครงสร้างแบบสามมิติ (Three-dimension structure)

โครงสร้างแบบนี้จะมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนไฮบริดออร์บิทอลแบบ sp^3 เนื่องจากอะตอมคาร์บอนเกิดพันธะโคเวเลนต์แบบพันธะเดี่ยวกับคาร์บอนตัวอื่นๆ อีกสี่ตัว จึงทำให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงที่สุด มักพบได้ในรูปของเพชร และมีโครงสร้างผลึกชนิดลูกบาศก์แบบ FCC (Face-centered cubic, FCC) แสดงดังภาพที่ 2.1 ดังนั้นเพชรจึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุขัด หรือวัสดุตัด เป็นต้น

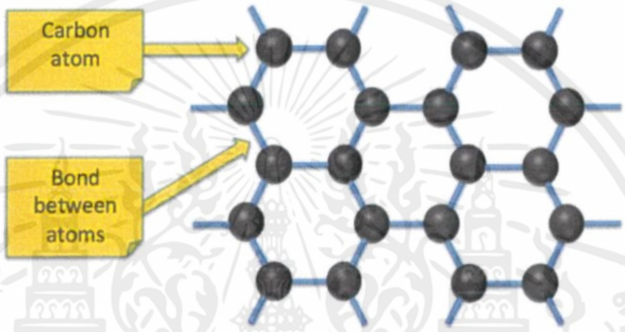


ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึก FCC ของเพชร [6]

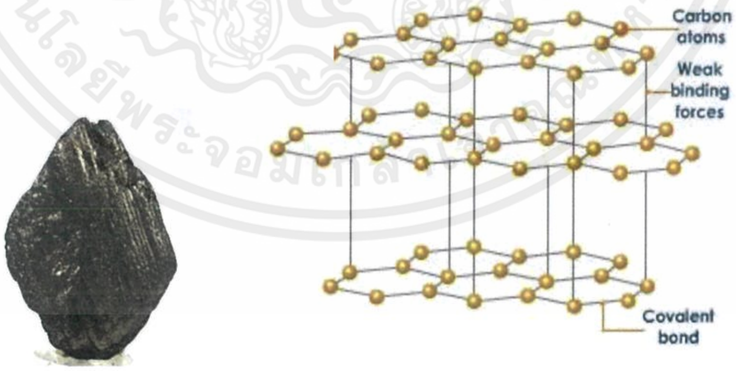
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 โครงสร้างแบบสองมิติ (Two-dimension structure)

โครงสร้างแบบนี้จะมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนไฮบริดออร์บิทอลแบบ sp^2 เนื่องจากอะตอมคาร์บอนเกิดพันธะโคเวเลนต์แบบพันธะเดี่ยว และคู่สลับกัน มักพบได้ในรูปของแกร์ไฟต์ ดังภาพที่ 2.3 แต่เมื่อเป็นวงแหวน 6 เหลี่ยม (Hexagon) พันธะที่เกิดจริงจะอยู่ระหว่างพันธะเดี่ยวกับพันธะคู่ แผ่นแกร์ไฟต์เกิดจากการซ้อนทับกันของแผ่นแกรฟีนดังภาพที่ 2.2 โดยมีแรงยึดระหว่างระนาบด้วยแรงแวนเดอร์วาลล์ ซึ่งแกรไฟต์เป็นวัสดุที่นำความร้อนในทิศทางระหว่างระนาบได้ไม่ดี แต่สามารถนำความร้อนและนำไฟฟ้าในระนาบเดียวกันได้ดี แกรไฟต์มีความทึบแสง มักใช้เป็นวัสดุหล่อลื่น มีความเปราะบาง และเป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรมากที่สุดของคาร์บอน



ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของกราฟีน [7]

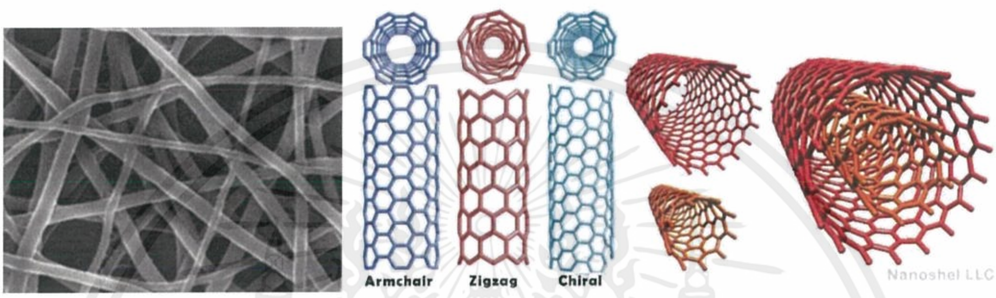


ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของแกร์ไฟต์ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3 โครงสร้างแบบหนึ่งมิติ (One-dimension structure)

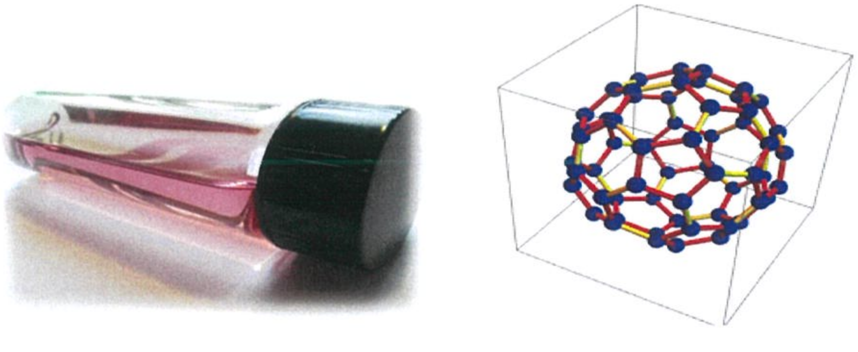
โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะคล้ายกับการนำแผ่นแกรฟีนมาม้วนให้มีรูปร่างเป็นท่อ โดยจะเรียกท่อนี้ว่าท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes , CNTs) ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงพันธะจากไฮบริดออร์บิทอลแบบ sp^2 ของแผ่นกราฟีนมาเป็นพันธะที่อยู่ระหว่าง sp^2 และ sp^3 ที่มีการโค้งงอ หรือการม้วนของท่อ ซึ่งจะทำให้เกิดความเครียดของพันธะ (Bond strain) มากขึ้น เพราะต้องมีการเหนี่ยวรั้งเพื่อให้มีการโค้งงอ โดยปริมาณของความเครียดพันธะจะขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของการม้วน



ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกของท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes , CNTs) [9]

2.1.2.4 โครงสร้างแบบศูนย์มิติ (Zero-dimension structure)

โครงสร้างแบบนี้มักพบในฟูลเลอรีน (Fullerene) ที่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นจำนวนคู่ตั้งแต่ 40 อะตอมขึ้นไป โดยฟูลเลอรีนที่เป็นที่รู้จักกันมากคือ ฟูลเลอรีนคาร์บอน 60 อะตอม (C_{60}) หรือบัคมินสเตอร์ฟูลเลอรี (Buckminsterfullerene) ดังภาพที่2.5 ที่มีโครงสร้างคล้ายลูกบอลประกอบด้วยวงแหวนหกเหลี่ยม 20 วง และ 5 เหลี่ยม (Pentagon) 12 วง ซึ่งฟูลเลอรีนประกอบด้วยวงแหวน 5 เหลี่ยม ซึ่งเป็นพันธะเดี่ยวทั้งสิ้น ดังนั้นการเกิดโครงสร้างเป็นลูกบอลของฟูลเลอรีนจึงมีความเครียดของพันธะ (Bondstrain) ในโครงสร้างมากกว่าแผ่นกราฟีนและแกรไฟต์ แต่ถ้าฟูลเลอรีนมีจำนวนอะตอมคาร์บอนมากจะทำให้ความเครียดพันธะภายในโครงสร้างจะลดลง เนื่องมาจากความเข้าใกล้การเป็นแผ่นกราฟีนมาก

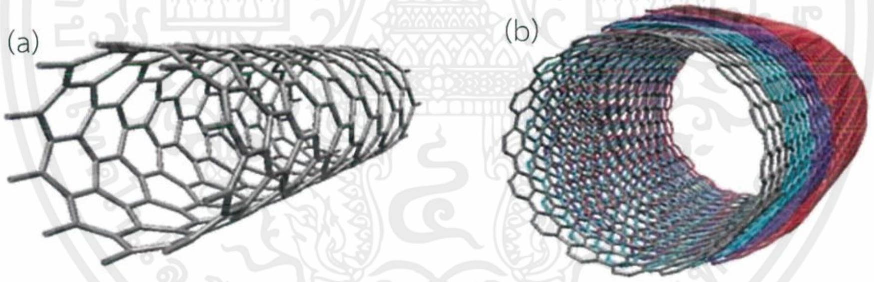


ภาพที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของฟูลเลอรีน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ท่อนาโนคาร์บอน [5]

เป็นวัสดุที่เกิดจากการนำแผ่นกราฟีนมาม้วนให้มีรูปร่างเป็นท่อ โดยจะเรียกท่อนี้ว่าท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes, CNTs) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงพันธะจากไฮบริดออร์บิทอลแบบ sp^2 ของแผ่นแกรฟีนมาเป็นพันธะที่อยู่ระหว่าง sp^2 และ sp^3 ที่มีการโค้งงอ หรือการม้วนของท่อ ซึ่งจะทำให้เกิดความเครียดของพันธะ (Bondstrain) มากขึ้น เพราะต้องมีการเหนี่ยวรั้งเพื่อให้มีการโค้งงอ โดยปริมาณของความเครียดพันธะจะขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของการม้วน ถ้าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากจะมีความเป็น sp^3 มากจึงมีความเครียดพันธะมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ เนื่องจากพันธะจะมีการผ่อนคลายมากขึ้นจึงมีความเครียดพันธะลดลง และมีลักษณะใกล้เคียงกับแผ่นกราฟีนมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะแสดงความเป็น sp^2 มากกว่าโดย CNTs เป็นท่อที่สังเคราะห์ขึ้นมาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ในช่วงระหว่าง 0.4-4.0 นาโนเมตรเท่านั้น และสามารถสังเคราะห์ได้โครงสร้างที่มีความยาวได้ถึง 10 ไมโครเมตร และ CNTs สามารถสังเคราะห์ได้โดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ แบบมีผนังชั้นเดียวหรือผนังเดี่ยว (Single-walled carbon nanotubes, SWCNTs) ดังภาพที่ 2.6 (a) และแบบที่เป็นผนังหลายชั้น (Multi-wall carbon nanotubes, MWCNTs) ดังภาพที่ 2.6 (b)



ภาพที่ 2.6 แสดงลักษณะโครงสร้างของ CNTs ชนิดโครงสร้าง (a) ผนังชั้นเดียว (SWCNTs) (b) ผนังหลายชั้น (MWCNTs) [11]

CNTs สามารถสังเคราะห์ได้โดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

2.2.1 แบบผนังชั้นเดียวหรือผนังเดี่ยว (Single-walled carbon nanotubes : SWCNTs) [12]

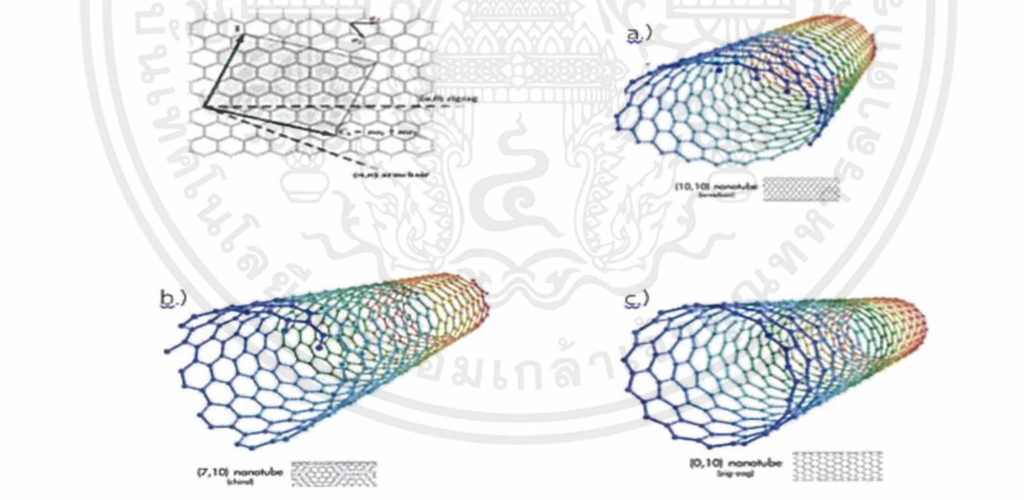
เป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว มีลักษณะคล้ายกับการม้วนตัวของแผ่นกราฟีนทำให้มีโครงสร้างเป็นแบบท่อทรงกระบอกและมีลักษณะกลวงภายในท่อ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ในระดับนาโนเมตรประมาณ 0.4-2 นาโนเมตร ดังภาพที่ 2.7 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 แบบผนังหลายชั้น (Multi-wall carbon nanotubes : MWCNTs) [12]

เป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น มีลักษณะคล้ายกับการม้วนตัวของแผ่นกราฟีนหลายๆ ชั้นซ้อนทับกันหรือมีลักษณะคล้ายกับการม้วนตัวของแผ่นแกร์ไฟต์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อประมาณ 1.5-15 นาโนเมตร ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อประมาณ 2.5-30 นาโนเมตร และมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.34 ถึง 0.36 นาโนเมตร ดังภาพที่ 2.7 (b)

CNTs[5] เป็นวัสดุระดับนาโนที่มีลักษณะโครงสร้างโดดเด่นในหนึ่งมิติ (1D nanomaterial) ซึ่งอะตอมในโครงสร้างอยู่ที่บริเวณผิวทั้งหมดส่งผลให้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูง เนื่องจากอะตอมที่ผิวสามารถสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวได้ทุกอะตอม และยังมีการจัดเรียงตัวหลายแบบขึ้นอยู่กับทิศทางของการม้วนของแผ่นแกรฟีนซึ่งสามารถอธิบายด้วยแฟกเตอร์ของการม้วนเป็นท่อ (Chiral factor, C_h) ได้ 3 แบบ คือ แบบอาร์มแชร์ (Armchair, (n,n)) แบบไครอล (Chiral, (n,m)) และแบบซิกแซก (Zigzag, (n,0)) ดังภาพที่ 2.7 ซึ่งพิกัด (n,m) เป็นค่าที่ใช้บอกลักษณะโครงสร้างของ CNTs ว่ามีรูปแบบการม้วนตัวแบบใด นอกจากนั้นยังสามารถบอกคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ CNTs ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำหรือโลหะได้จากสมการ $\frac{(n-m)}{3}$ ถ้าจากการคำนวณหารลงตัว CNTs จะแสดงคุณสมบัติเป็นโลหะ แต่ถ้าหากหารไม่ลงตัวจะแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ



ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะการม้วนของ CNTs ทั้งสามแบบ ดังนี้ (a) Armchair , (n,n) (b) Chiral , (n,m) และ (c) Zigzag , (n,0) [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน [5,13]

CNTs เป็นโครงสร้างที่อยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องมาจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติโดนเด่นหลายประการ อาทิเช่น มีค่าการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่ดี เป็นได้ทั้งวัสดุตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำ โดยคุณสมบัติของ CNTs มีดังนี้

2.3.1 สมบัติเชิงกล [14]

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นท่อที่มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กเกิน 60 เท่า เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนเชื่อมกันด้วยพันธะแบบ sp^2 โดยคาร์บอนหนึ่งอะตอมจะเชื่อมกับพันธะคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและมีอีกหนึ่งพันธะที่เชื่อมกับระนาบถัดไป จึงส่งผลให้มีความแข็งแรงมากกว่าเพชร และแกรไฟต์ ตามลำดับ ซึ่งเพชรจะมีโครงสร้างแบบโครงตาข่ายสามมิติและมีการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ ส่วนแกรไฟต์จะมีคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะเชื่อมกับระนาบถัดไป ซึ่งพันธะในระนาบเดียวกันของแกรไฟต์จะเชื่อมกันด้วยพันธะที่แข็งแรงกว่าเพชร แต่พันธะที่เชื่อมระหว่างระนาบไม่แข็งแรงเท่าท่อนาโนคาร์บอน จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร จึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงมากกว่าเพชร และแกรไฟต์ ตามลำดับ ท่อนาโนคาร์บอนยังมีน้ำหนักเบามาก มีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากมีค่ายังมอดูลัส (Young's modulus) สูงถึง 1.4 เทระปาสคาล (TPa) (โดย 1 TPa = 10^{12} N/m^2) จึงได้มีการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในผลิตภัณฑ์หลายชนิด อย่างเช่น อุปกรณ์กีฬากอล์ฟและเทนนิส เป็นต้น โดยวิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น Thermal vibration หรือใช้ Scanning force microscopy ในการงอท่อนาโนคาร์บอนโดยจะยึดปลายด้านหนึ่งไว้แล้ววัดการสั่นในสนามไฟฟ้า และจากการศึกษาพบว่าท่อนาโนคาร์บอนสามารถยืดตัว (Elongation at break) สูงสุดได้ประมาณ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ในแนวแกนของท่อประมาณ 100 จิกะปาสคาล (GPa) (โดย 1 GPa = 10^9 N/m^2) โดยวิธีการประเมินค่าความเค้นแรงดึงสามารถหาได้โดยการใช้ Atomic force microscropy (AFM) เพื่อจับท่อนาโนคาร์บอนทั้งสองข้างแล้วทำการดึงออกจากกัน ซึ่งการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของท่อนาโนคาร์บอนกับวัสดุชนิดอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติทางกลของท่อนาโนคาร์บอนกับวัสดุชนิดอื่นๆ

วัสดุ	ค่าโมดูลัสของยัง (GPa)	ค่าความต้านทานแรงดึง (GPa)	ค่าความหนาแน่น (GPa)
SWNTs	1054	150	1.33
MWNTs	1200	150	2.6
Steel	208	0.4	7.8
Epoxy	3.5	0.005	1.25
Wood	16	0.008	0.6

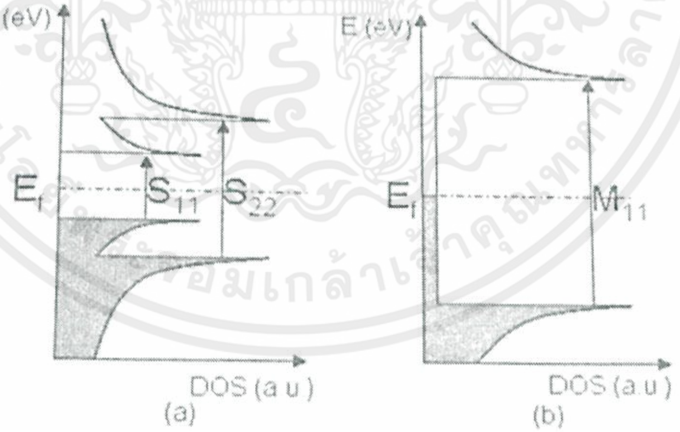
2.3.2 สมบัติเชิงไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

การนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนมีการนำไฟฟ้าที่มากกว่าฉนวน (Insulator) แต่น้อยกว่าสารตัวนำ (Metal) ซึ่งเป็นวัสดุที่น่าสนใจอย่างมาก และเนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตรจึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีคุณสมบัติทางควอนตัม (Quantum) คือ สามารถควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอาจจะสามารถควบคุมการไหลทีละกลุ่มของอิเล็กตรอน หรือควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทีละตัวได้ จากคุณสมบัตินี้จึงได้มีการนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ที่มีความเร็วสูงและมีความต้านทานที่ต่ำมาก และยังมีความสามารถในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนบริเวณปลายของท่อนาโนคาร์บอนในสภาวะสุญญากาศได้ โดยเมื่อนำท่อนาโนคาร์บอนไปวางในตำแหน่งที่มีสนามไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำ จะทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ด้วยคุณสมบัตินี้จึงทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าจำพวกประหยัดพลังงาน และต้องการอายุการใช้งานที่ยาวนาน นอกจากนั้นแล้วยังได้มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนเทียบกับทองแดง พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง โดยในหนึ่งมัดท่อของท่อนาโนคาร์บอนจะมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 10^9 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเทียบกับทองแดงพบว่ามีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพียง 10^6 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะมีค่ามากกว่าทองแดง 1000 เท่า และสมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้กล่าวไปข้างต้นยังสามารถกำหนดได้ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ โดยจะขึ้นอยู่กับทิศทางการม้วนตัวของแผ่นกราฟีน ตามพิกัด (n,m) (ที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 2.2.2) ซึ่งโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวแบบ Armchair จะแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าเหมือนเป็นโลหะ ส่วนโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวแบบ Zigzag และ Chiral จะแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าเหมือนสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจากภาพที่ 2.8 จะแสดงข้อมูลที่ได้จากกราฟความหนาแน่นของสถานะ (DOS) เทียบกับค่าพลังงานของทั้ง SWNTs ที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ดังภาพที่ 2.8 (a) และ SWNTs ที่มีสมบัติเป็นโลหะ ดังภาพที่ 2.8 (b) อันดับแรกจะอธิบายถึงปลายแหลมของกราฟจะแสดงถึง ลักษณะพิเศษของกราฟแบบ Van hove singularity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเริ่มจากชั้นระดับพลังงานเฟอมิ (E_F) ซึ่ง Van hove singularity คือ ตัวเลข ∈ = 1,2,3,..., และยอมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางแสงหรือสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ไปอีกฝั่งหนึ่งของระดับชั้น E_F โดยวิเคราะห์จากภาพด้านล่างพบว่า หนึ่งในความสามารถที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารกึ่งตัวนำคือ S_{11},S_{22} และการเปลี่ยนแปลงสถานะของโลหะคือ M_{11} โดยความแตกต่างของ SWNTs ที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำและ SWNTs ที่มีสมบัติเป็นโลหะจะเกี่ยวข้องกับแถบพลังงานการนำ (Conduction band) และแถบพลังงานวาเลนต์ (Valence band) ของวัสดุ สำหรับ SWNTs ที่มีสมบัติเป็นโลหะจะแสดงช่องว่าง (Band gap) ระหว่างแถบพลังงานการนำและแถบพลังงานวาเลนต์ที่ต่อเนื่องกัน ในทางตรงข้าม SWNTs ที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำจะแสดงการมีของช่องว่างระหว่างแถบพลังงานการนำและแถบพลังงานวาเลนต์

โดยท่อนาโนคาร์บอนที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ p-type และ n-type โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของพาหะ โดยทั่วไปท่อนาโนคาร์บอนที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขรอบๆข้าง จะแสดงลักษณะ p-type ซึ่งจะยอมให้การนำไฟฟ้าของโฮลถูกแทนที่ด้วยอิเล็กตรอน ซึ่งมีความเชื่อว่า p-type มีพฤติกรรมที่เกิดมาจากการดูดซับออกซิเจนไม่ที่พื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนก็พื้นผิวบริเวณขั้วของอุปกรณ์ ในทางตรงกันข้าม SWNTs สามารถแสดงลักษณะ n-type จะเกิดขึ้นเมื่อมีพาหะหลักคืออิเล็กตรอน ซึ่งเมื่อมีการให้สุญญากาศหรือมีการเจือท่อนาโนคาร์บอนชนิด p-type โดยจะมีการให้อิเล็กตรอนหรือโมเลกุลที่มีพลังงานไอออไนเซชั่น



ภาพที่ 2.8 แสดงระดับชั้นพลังงาน ∈ เทียบกับความหนาแน่นของสถานะ (DOS) (a) ท่อนาโนคาร์บอนที่มีสมบัติสารกึ่งตัวนำ (b) ท่อนาโนคาร์บอนที่มีสมบัติโลหะ โดยที่แถบพลังงานสีทึบจะแสดงแถบพลังงานวาเลนต์ (valence band) และแถบพลังงานสีขาวจะแสดงแถบพลังงานการนำไฟฟ้า (conduction band) [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 สมบัติทางกายภาพ

จากการศึกษาพบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ในระดับนาโนเมตร ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร (1 นาโนเมตรเท่ากับ 10^{-9} เมตร) และมีความยาวตั้งแต่ระดับนาโนเมตร จนถึงระดับไมโครเมตรประมาณ 10 ไมโครเมตร (1 ไมโครเมตรเท่ากับ 10^{-6} เมตร) และท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่า นอกจากนี้ยังมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากถึงประมาณ 1250 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งมากกว่าคาร์บอนทั่วๆไปส่งผลทำให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้มาก

2.3.4 สมบัติทางความร้อน

ความสามารถในการนำความร้อนของท่อนาโนคาร์บอนจะมีค่าการนำความร้อนที่ค่อนข้างสูง จากการศึกษาระหว่างท่อนาโนคาร์บอนเทียบกับเพชรพบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีความสามารถในการนำความร้อนสูงถึงประมาณ 6000 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ซึ่งมีค่าการนำความร้อนมากกว่าเพชรถึง 2 เท่า และท่อนาโนคาร์บอนยังสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึงประมาณ 2800 องศาเซลเซียส ที่อยู่ภายใต้สุญญากาศ และสามารถทนอุณหภูมิได้ถึงประมาณ 750 องศาเซลเซียส ในสภาวะปกติ

2.4 เทคนิคการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน [5,16,17]

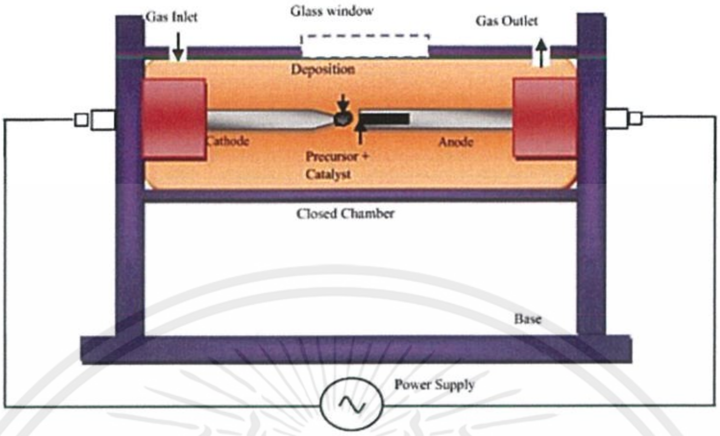
การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยทั่วไปสามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายเทคนิค ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์จะมีหลากหลายรูปแบบผสมกัน เช่น ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (Single wall nanotubes, SWNTs) และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multiwalls nanotubes, MWNTs) โดยเทคนิคในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกันทั้งด้านคุณสมบัติ ขนาด รูปทรง ความยาว และความบริสุทธ์ของท่อนาโนคาร์บอน ดังนั้นวิธีที่นิยมในการสังเคราะห์จะกล่าวถึงสามวิธีหลักๆ ดังนี้

2.4.1 วิธีการอาร์คดิสชาร์จ (Arc discharge)

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการอาร์คดิสชาร์จ (Arc discharge) แสดงดังภาพที่ 2.9 เป็นวิธีในการสังเคราะห์โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 100 แอมแปร์ โดยมีความต่างศักย์ระหว่างแท่งแกร์ไฟต์ประมาณ 20-40 โวลต์ และระยะห่างระหว่างแท่งแกร์ไฟต์ประมาณ 2-5 มิลลิเมตรที่อยู่ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม (He) หรืออาร์กอน (Ar) ที่มีความดันต่ำ และใช้อุณหภูมิประมาณ 2000 ถึง 3000 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้แท่งแกร์ไฟต์สามารถแตกตัวกลายเป็นพลาสมา โดยแท่งแกร์ไฟตี่แตกตัวจะเกิดการควบแน่นและทับถม (Deposite) กันบริเวณขั้วแคโทด ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้จะเป็นท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อประมาณ 2 ถึง 20 นาโนเมตร ถ้าต้องการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว สามารถทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และการเติมผงโลหะใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเร่งปฏิกิริยา ซึ่งข้อดี คือ การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีการที่ง่าย และเป็นวิธีที่ใช้ค่าใช้จ่ายไม่สูง ส่วนข้อด้อย คือ ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปน เช่น อสัณฐานของคาร์บอน และขี้เถ้าจำนวนมาก

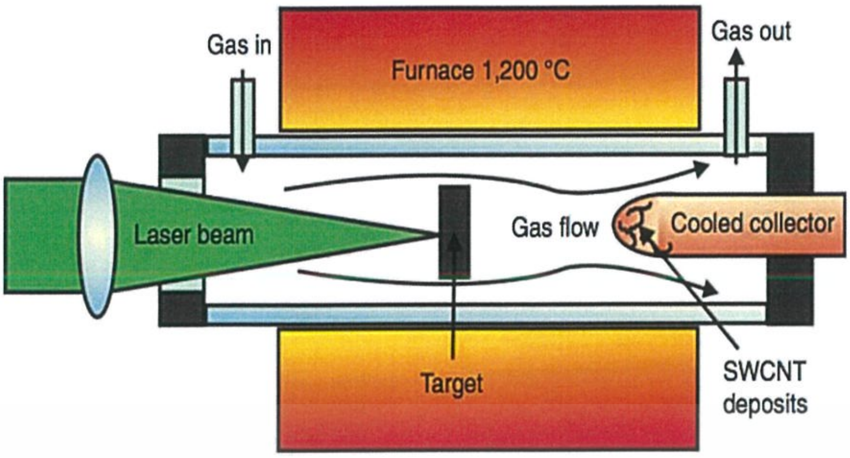


ภาพที่ 2.9 แผนภาพแสดงการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จ [17]

2.4.2 วิธีการใช้แสงเลเซอร์ (Laser abrasion) [18,19]

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการใช้แสงเลเซอร์ (Laser abrasion) แสดงดังภาพที่ 2.10 เป็นวิธีที่ยิงแสงเลเซอร์ที่มีพลังงานสูงเข้าไปทำให้คาร์บอนที่ผสมอยู่กับโลหะในเตาเผาอุณหภูมิสูงประมาณ 1200 ถึง 1400 องศาเซลเซียส และใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือไนโตรเจนในการนำเอาไอท่อนาโนคาร์บอนภายในเตาเผาไปทำให้เย็นตัวลง หรือนำไปหล่อเย็นที่ตัวกักเก็บ (Collector) ซึ่งข้อดี คือ การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีความเป็นระเบียบสูงเมื่อเทียบกับวิธีการสังเคราะห์แบบอื่นๆ ส่วนข้อด้อย คือ ต้นทุนในการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ค่อนข้างสูง เนื่องจากใช้แหล่งกำเนิดด้วยเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.10 แผนภาพแสดงการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการระเหยด้วยเลเซอร์ [20]

2.4.3 วิธีการตกเคลือบไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD)[21]

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการตกเคลือบไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) แสดงดังภาพที่ 2.11 เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ต้องอาศัยวัสดุรองรับ หรือฐานรองรับ (Substrate) เมื่อมีการให้ไปหรือก๊าซของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นแหล่งกำเนิดอะตอมคาร์บอนเข้าไปในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณตั้งแต่ 600 ถึง 1200 องศาเซลซียส เช่นมีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อะเซทิลีน (C_2H_2) และเอทานอล (C_2H_5OH) เป็นต้น สำหรับการผลิตท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นและแบบผนังชั้นเดียวจะมีการผลิตที่แตกต่างกันดังนี้

-การผลิตท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น จะใช้อุณหภูมิในการเผาประมาณตั้งแต่ 900 ถึง 1200 องศาเซลเซียส

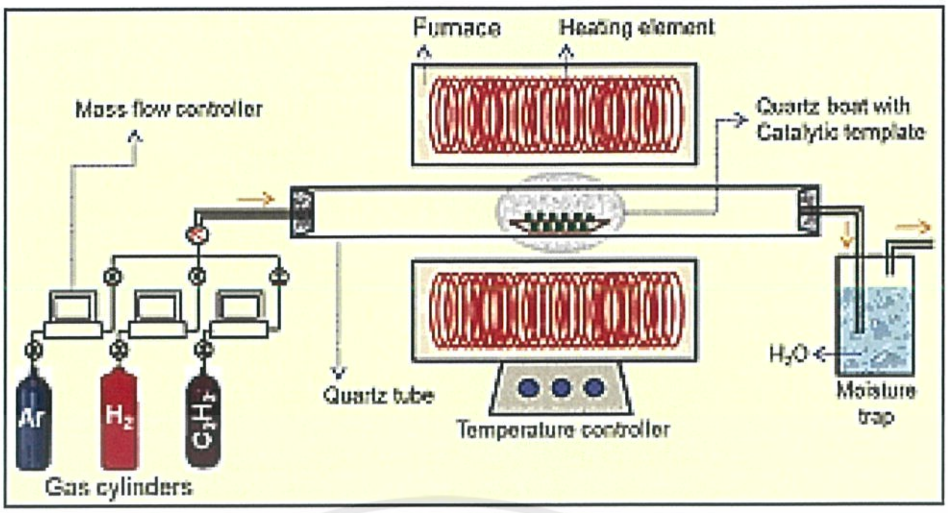
-การผลิตท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว จะต้องมีอนุภาคนาโนของโลหะคะตะลิสต์อยู่ในบรรยากาศปกติด้วย และทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดการแตกตัว (Decomposed) ออกเป็นอะตอมของคาร์บอน และการสามารถกำหนดขนาด ความยาว ทิศทางการเติบโต และตำแหน่งที่ต้องการปลูกท่อนาโนคาร์บอนได้โดยการความคุมอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของไหลก๊าซ สัดส่วนอะตอมของธาตุ C:O:H และระยะเวลาในการสังเคราะห์

ข้อดี - เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่มีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ

- เป็นวิธีที่สามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อได้

ข้อด้อย – โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จะมีการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบค่อนข้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 แผนภาพแสดงการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการตกเคลือบไอเคมี [21]

2.5 ส่วนประกอบและนิยามของเซนเซอร์ [22]

เซนเซอร์ เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีหน้าที่ตรวจจับเหตุการณ์หรือการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม จากนั้นจะให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันออกมา ตัวรับรู้เป็นตัวแปรสัญญาณ (Transducer) ชนิดหนึ่ง ซึ่งจะสามารถให้สัญญาณออกมาได้หลากหลายชนิด เช่น เซนเซอร์ทางด้านฟิสิกส์ (Physical sensors) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ เช่น แรง ความดัน อุณหภูมิ ความเร็ว เป็นต้น และเซนเซอร์ทางด้านเคมี (Chemical sensors) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการกำหนด หรือเก็บค่าในเวลานั้น (Real time) ออกมาในรูปของข้อมูลหรือสัญญาณ โดยข้อมูลทางเคมีที่ออกมานั้นจะทำให้เราสามารถรู้ความเข้มข้นของแต่ละสาร ว่าจะเป็นสารเคมีชนิดเดียว หรือหลายๆสารเคมีในเซนเซอร์ที่เราทำการตรวจวัด สารเคมีแต่ละชนิดโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของการวิเคราะห์ หรือการตรวจสอบ หลักการทำงานของเซนเซอร์ทางด้านเคมีจะประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนแรกจะทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้ (Recognition) และส่วนที่สองจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณ แสดงดังภาพที่ 2.12 ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่ามีความสามารถในการแยกความแตกต่างระหว่างก๊าซที่เราต้องการวัดกับตัวรับรู้ได้มากน้อยเพียงใด

2.5.1 วิธีการรับรู้ (Recognition Methods)

การดูดซับแก๊สและไอเหย (Gas and vapor sorption) การตรวจสอบก๊าซ และไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นในบริเวณที่เราต้องการจะตรวจวัด รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพอากาศ การควบคุมก๊าซที่อันตราย และไอระเหยในอุตสาหกรรมทางด้านสิ่งแวดล้อม และการตรวจสอบทางกายภาพ โดยทั่วไปแล้ววิธีการตรวจจับ หรือรับรู้ก๊าซและไอระเหยมีพื้นฐานมาจากการดูดซับ (Adsorption) ที่พื้นผิวหรือการดูดซึม (Absorption) ภายในวัสดุตรวจจับที่เป็นของแข็ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเคมีและวัสดุที่หลากหลายที่ถูกทำเป็นตัวตรวจจับ หรือตัวรับรู้ก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และไอระเหย รวมทั้งวัสดุโลหะ พอลิเมอร์ หรือวัสดุอนินทรีย์ การดูดซับนี้สามารถเกิดจากปรากฏการณ์ทางกายภาพ หรือสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมี นั่นคือ การปรับเปลี่ยนสถานะทางเคมีในการวิเคราะห์ของตัวตรวจวัด หรือตัวรับรู้

ซึ่งหลักการทั่วไปสามารถอธิบายดังสมการที่ (1) โดยกำหนดให้ A คือ สารที่ต้องการวิเคราะห์ , R คือ ตัวรับรู้การจดจำ และ P คือ ผลิตภัณฑ์ของอันตรกิริยาระหว่างตัวรับรู้กับสารที่ต้องการวิเคราะห์ จากสมการจะเห็นว่าลูกศรมีลักษณะที่ผันกลับได้ จึงแสดงถึงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้จนกระทั่งถึงจุดที่สมดุลกัน ซึ่งผลิตภัณฑ์ (P) ที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับพันธะไอออนิก พันธะไฮโดรเจน และพันธะที่เกิดจากแรงแวนเดอวาลล์

$$\underset{\text{(sample)}}{A} + \underset{\text{(sensing element)}}{R} \leftrightarrows \underset{\text{(product)}}{P} \qquad (1)$$

นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวยังสามารถอธิบายด้วยค่าคงที่ (K_A) หรือค่าความสามารถของตัวรับรู้การจดจำกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ ที่แสดงดังสมการที่ (2) โดยที่ค่า C คือ ค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นถ้าค่าคงที่มีค่าสูงจะแสดงถึงความสามารถในการรับรู้สารได้มาก

$$K_A = \frac{C_P}{C_A C_R} \qquad (2)$$

และอีกกระบวนการที่สำคัญต่อกระบวนการจดจำคือ ความสามารถในการจำแนกสารที่ต้องการวิเคราะห์ (Selectivity) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงการตอบสนองต่อสารที่ต้องการตรวจวัด แต่จะไม่ตอบสนองต่อสารที่ไม่ต้องการตรวจวัด โดยจะแสดงดังสมการที่ (3) กำหนดให้ B คือ สิ่งรบกวน , R คือ ตัวรับรู้การจำ และ Q คือ ผลิตภัณฑ์ จากที่กล่าวมาสามารถอธิบายด้วยค่าคงที่ต่อสิ่งรบกวน (B) ได้ดังสมการที่ (4) ดังนั้นความสามารถในการจำแนกสารของตัวตรวจจับต่อสารที่ต้องการวิเคราะห์สามารถคำนวณจากอัตราส่วนระหว่าง K_A กับ K_B โดยถ้าค่าความสามารถในการจำแนกสารได้ดีจะมีค่ามากกว่า 1 ($K_A / K_B > 1$)

$$B + R \leftrightarrows Q \qquad (3)$$

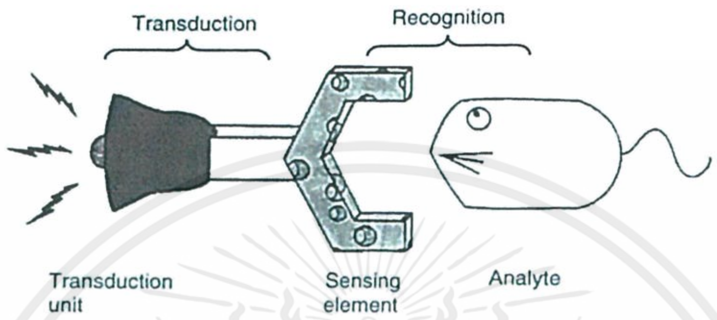
$$K_B = \frac{C_Q}{C_B C_R} \qquad (4)$$

2.5.2 วิธีการแปลงสัญญาณ (Transduction Methods)

การแปลงสัญญาณในรูปความต้านทาน และความจุไฟฟ้า (Resistive and capacitive transduction) เป็นการวิเคราะห์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่ามีความสามารถในการแยกความแตกต่างระหว่างก๊าซที่เราต้องการวัดกับตัวรับรู้ นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ในการตรวจวัดนั้นๆ ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างก๊าซกับออกไซด์ของสารกึ่งตัวนำโลหะ (Semiconductor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

metal oxide) เป็นสาเหตุที่ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นได้ และเนื่องจากสิ่งนี้เป็นหลักการพื้นฐานของตัวแปลงสัญญาณความต้านทาน สมบัติทางไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งนั่นคือ กระบวนการรับรู้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) โดยค่านี้สามารถประมาณได้จากตัวตรวจวัด หรือตัวรับรู้ เนื่องจาดค่าไดอิเล็กทริกในโครงสร้างของตัวเก็บประจุ และการวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุ ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ได้สัญญาณเป็นค่าความจุ



ภาพที่ 2.12 แผนภาพแสดงการส่วนประกอบของเซนเซอร์ทางด้านเคมี ซึ่งตัวเซนเซอร์จะประกอบด้วยตัว รับรู้ และตัวแปลงสัญญาณ [22]

2.5.3 นิยามของก๊าซเซนเซอร์

เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดก๊าซในพื้นที่ที่ต้องการตรวจวัด บ่อยครั้งมักพบในระบบรักษาความปลอดภัย ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกใช้ในการตรวจสอบการรั่วไหลของก๊าซ หรือการปล่อยก๊าซอื่นๆ ออกมา โดยก๊าซเซนเซอร์นี้จะส่งเสียงเตือนเมื่อสามารถตรวจจับก๊าซที่รั่วไหลได้ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น สถานที่ขุดเจาะน้ำมัน กระบวนการผลิตเทคโนโลยีพวกเซลล์แสงอาทิตย์ และอื่นๆ โดยก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor) จะทำหน้าที่ในการตรวจจับ หรือรับรู้โมเลกุลของก๊าซที่เข้ามากระตุ้น และตอบสนองกลับออกมาในรูปของสัญญาณค่าหนึ่ง หลังจากนั้นจึงนำไปประมวลผลเพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณนั้นๆ ซึ่งก๊าซเซนเซอร์สามารถแบ่งตามปฏิกิริยาการเกิดได้ดังนี้ คือ (1) Physical gas sensor และ (2) Chemical gas sensor

2.5.4 กลไกการตรวจวัดก๊าซ [23]

เป็นกระบวนการที่สำคัญที่เกิดการแลกเปลี่ยนปฏิกิริยาระหว่างกันบริเวณพื้นผิว ซึ่งอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติบริเวณพื้นผิวและทำให้มีผลต่อการวัดความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย ถ้ากระแสมีการไหลผ่านอุปกรณ์เซนเซอร์จะแสดงว่าพื้นผิวของตัวตรวจวัดอยู่ไกลจากก๊าซที่เราต้องการตรวจวัด ซึ่งจะทำให้การวัดไม่สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซนั้นได้ส่งผลให้ไม่สามารถวัดความต้านทานได้ ดังนั้นจากที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้วเมื่อมีกระแสไหลผ่านพื้นผิวในการตรวจวัดที่ถูกรบกวนโดยพื้นผิวที่ทำปฏิกิริยาระหว่างกัน ในส่วนนี้จะอธิบายเกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแข็งกับก๊าซ โดยตัวแปรที่อาจเกี่ยวข้องหรือสัมพันธ์กันระหว่างการเกิดปฏิกิริยา เช่น อุณหภูมิ และความดัน ที่จะส่งผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านบริเวณตรวจวัดก๊าซ ซึ่งโมเลกุลของก๊าซจะต้องทำปฏิกิริยากับบริเวณพื้นผิวนั้น โดยปกติแล้วกระบวนการจะเริ่มจากการดูดซับ (Adsorption) ก่อนแล้วจึงเกิดกระบวนการคายการดูดซับ (Desorption) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันนี้จะมีอัตราการเกิดการดูดซับ และคายการดูดซับที่แตกต่างกันเนื่องจากมีการตอบสนองต่อสารประกอบนั้นๆ แตกต่างกัน

2.5.4.1 การดูดซับและการคายการดูดซับ (Adsorption and desorption)

วัสดุที่เป็นของแข็งที่มีก๊าซหรือไอระเหยต่างๆกระจายตัวอยู่บนพื้นผิว โดยของแข็งจะเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลของก๊าซ หรือไอระเหย จะเป็นสารหรือตัวถูกดูดซับ (Adsorptive) ซึ่งปริมาณของสารถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับความดันของสารถูกดูดซับ อุณหภูมิ และสมบัติของสารดูดซับ ปรากฏการณ์ของการดูดซับจะแสดงบทบาทสำคัญในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาของสารต่างชนิดกันในการดูดซับ ชนิดของกระบวนการดูดซับมีอยู่ 2 แบบ ดังนี้

(1) การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)

เป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลที่เชื่อมกันด้วยแรงแวนเดอวาลล์ (Vander waals force) โดยมีการเหนี่ยวนำขั้ว และทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างขั้วกับขั้ว และพลังงานการดูดซับปกติจะมีค่าไม่เกิน 80 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งการดูดซับแบบนี้จะมีการใช้พลังงานน้อยมาก การดูดซับแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายกับการรวมตัวหรือควบแน่นของไอระเหยมากกว่าการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี การดูดซับทางกายภาพเป็นปรากฏการณที่สำคัญในกระบวนการแยกการดูดซับ (Adsorptive separation processes) นอกจากนี้การดูดซับทางกายภาพยังถูกใช้ในการตรวจสอบพื้นที่ผิวที่จำเพาะเช่นเดียวกับขนาดของรูพรุน และการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ

(2) การดูดซับทางเคมี (Chemisoption)

เป็นการดูดซับโมเลกุลก๊าซที่เข้ามากระตุ้น โดยโมเลกุลของก๊าซที่เข้ามากระตุ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Oxidation-reaction) เกิดขึ้นโดยจะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับตัวตรวจวัด ทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างพันธะแบบโควาเลนต์ (Covalent force) เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของก๊าซเซนเซอร์ที่ทำการตรวจจับโมเลกุลก๊าซ

2.5.5 สมบัติของก๊าซเซนเซอร์ [13]

2.5.5.1 ความไวในการวัด (Sensitivity)

ความสามารถในการวัดของก๊าซเซนเซอร์ที่บอกถึงความแตกต่างของปริมาณก๊าซที่ต้องการวัด ซึ่งถ้าเซนเซอร์บางชนิดไม่สามารถที่จะบอกถึงความแตกต่างของก๊าซในปริมาณน้อยๆได้ ดังนั้นเมื่อนำก๊าซเซนเซอร์ไปวัดบริเวณที่มีก๊าซแตกต่างกันเล็กน้อยทั้งสองบริเวณ จะทำให้เกิดความไม่ถูกต้องในการตรวจวัดก๊าซทั้งสองบริเวณที่อาจคิดว่าก๊าซทั้งสองบริเวณมีปริมาณเท่ากัน เพราะฉะนั้นคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไวในการวัดของก๊าซเซนเซอร์จึงมีผลในกรณีที่ต้องการวัดก๊าซในปริมาณที่น้อย เพื่อทำให้เกิดความถูกต้องในการวัดก๊าซมากที่สุด

2.5.5.2 เวลาในการตอบสนอง (Response Time)

ความสามารถในการตอบสนองต่อก๊าซได้อย่างรวดเร็ว คือก๊าซเซนเซอร์ต้องมีการตอบสนองทันทีเมื่อมีก๊าซที่ต้องการวัดเข้ามาสัมผัส ซึ่งคุณสมบัติของก๊าซเซนเซอร์ข้อนี้สำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะในบริเวณที่ต้องการวัดก๊าซที่เป็นก๊าซพิษ หรือก๊าซไวไฟ เพื่อที่จะได้ป้องกันหรือหลีกเลี่ยงบริเวณนั้นและสามารถแก้ไขได้อย่างทันท่วงทีก่อนที่จะได้รับอันตรายจากก๊าซพิษต่างๆ หรือเกิดเหตุการณ์ร้ายแรงในบริเวณนั้นๆ หากเกิดการรั่วไหลของก๊าซออกมา ซึ่งภาพที่ 2.1 จะแสดงค่าการตอบสนองเทียบกับเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะเริ่มต้นหรือเวลาเริ่มต้นไปยัง 90% ของสถานะสุดท้ายหรือคำนวณเวลาการตอนสนองจาก 90% ของการอิ่มตัวของก๊าซ [24]

2.5.5.3 ความจำเพาะ (Selectivity)

ความสามารถในการแยกความแตกต่างระหว่างก๊าซที่เราต้องการที่จะวัดกับก๊าซที่ไม่ต้องการวัด เช่น ก๊าซเซนเซอร์ชนิดหนึ่งควรมีความสามารถในการวัดและตอบสนองต่อก๊าซที่ต้องการวัด ไม่ควรที่จะตอบสนองต่อก๊าซชนิดอื่นๆ เพราะจะทำให้การวัดเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ขณะทำการทดลอง ดังนั้นจำเป็นต้องหาวัสดุที่เหมาะสมและมีการตอบสนองที่ไวต่อก๊าซชนิดนั้นๆมาทำเป็นเมมเบรน ของก๊าซเซนเซอร์ หรืออาจทำการเคลือบสารบางตัวลงไปเพื่อให้ก๊าซเซนเซอร์มีความไวต่อการตอบสนองต่อก๊าซที่ต้องการวัดเพิ่มขึ้น

2.5.5.4 ความมีเสถียรภาพ (Stability)

มีการวัดค่าการตอบสนองต่อก๊าซนั้นๆ ที่คงที่และสามารถใช้วัดได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เสื่อมสภาพเร็วในการใช้งาน

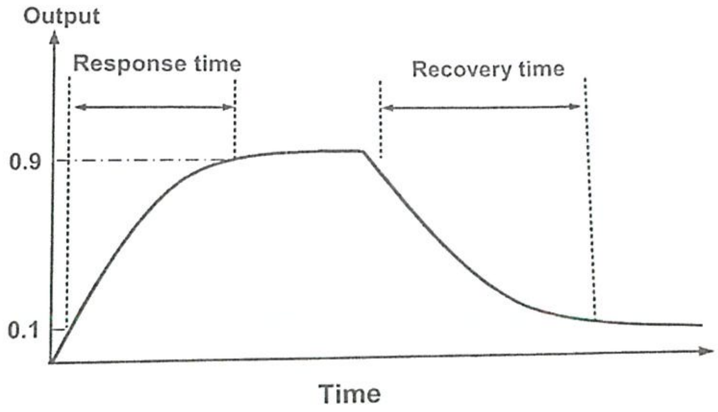
2.5.5.5 พิสัยการวัด (Dynamic Range)

ก๊าซเซนเซอร์ควรมีความสามารถในการวัดปริมาณก๊าซได้ในช่วงกว้าง ตั้งแต่ 100-10,000 ppm และอาจถึงในระดับ ppb เลยก็เป็นได้

2.5.5.6 การคืนตัว (Recovery time)

ความสามารถของก๊าซเซนเซอร์ในการตรวจวัดก๊าซแต่ละครั้ง ควรมีค่าการตอบสนองที่เท่าเดิมกับการตรวจวัดก๊าซในครั้งแรก ซึ่งเซนเซอร์ที่มีค่าการคืนตัวที่ดีควรมีลักษณะนี้ จึงเหมาะที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเวลาในการคำนวณการคืนตัว[24] สามารถคำนวณได้จาก 10% ของการตอบสนองที่ลดลงจากค่าการตอบสนองสูงสุด ที่แสดงดังภาพที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

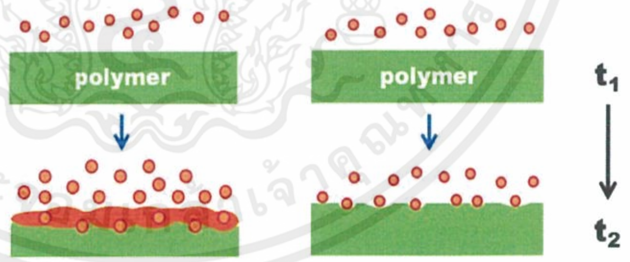


ภาพที่ 2.13 แสดงกราฟการตอบสนอง (Response) และการคืนตัว (Recovery) เทียบกับเวลา [15]

2.6 พารามิเตอร์ในการพิจารณาความสามารถในการพองตัวของพอลิเมอร์ [25]

2.6.1 พารามิเตอร์ในการละลายของ Hildebrand Solubility Parameter (HSP)

เป็นค่าสำหรับทำนายการเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์กับสาร VOCs ซึ่งจะพิจารณาจากค่าความแตกต่างของ Solubility parameter ($\boldsymbol{\delta}_1 - \boldsymbol{\delta}_2$) โดยถ้าค่าความแตกต่างมีค่าน้อยแสดงว่าพอลิเมอร์และสาร VOCs สามารถละลายเข้ากันได้ดี เนื่องจากค่าพอลิเมอร์สามารถพองตัวได้มากจึงทำให้ค่าการตอบสนองของก๊าซน่าจะมากขึ้นตามไปด้วย ที่แสดงดังภาพที่ 2.14



Miscibility	good	bad
HSP $\lvert\delta_1 - \delta_2\rvert$	low	high
Sensor response	high	low

ภาพที่ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบค่า solubility parameter และค่าการตอบสนอง [25]

2.6.2 พารามิเตอร์การละลายของเฮนเซน (Hansen solubility parameter, HSP) [26]

เป็นพารามิเตอร์ในการทำนายค่าความสามารถในการละลายเข้ากันระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องมี 3 อย่าง ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Intermolecular force, δ_p) , แรงแพร่กระจาย (Dispersion force; δ_d) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond; δ_h) ซึ่งตัวที่ถูกทำละลายจะละลายเข้ากันได้ดีในตัวทำละลาย จะมีค่าความเป็นขั้วใกล้เคียงกัน โดยค่าสภาพการละลายเข้ากันได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ จากนั้นนำมาพิจารณากับค่า Relative energy distance (RED) โดยจะแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้ และแสดงดังภาพที่ 2.15

(1) ค่า RED < 1 คือ ตัวทำละลายและตัวถูกละลายสามารถละลายเข้ากันได้เป็นอย่างดี

(2) ค่า RED > 1 คือ ตัวทำละลายและตัวถูกละลายไม่สามารถละลายเข้ากันได้

(3) ค่า RED = 1 คือ ตัวทำละลายและตัวถูกละลายสามารถละลายเข้ากันได้เพียงบางส่วน

ดังนั้น หากค่า RED มีค่า RED < 1 แสดงว่าพอลิเมอร์และสาร VOCs สามารถละลายเข้ากันได้ดี และทำให้พอลิเมอร์สามารถพองตัวได้มากส่งผลให้ค่าการตอบสนองน่าจะเพิ่มมากขึ้น

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

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

โดยกำหนดให้

R_a คือ พารามิเตอร์การละลายของเฮนเซนของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย

δ_d คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงแพร่กระจายของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย

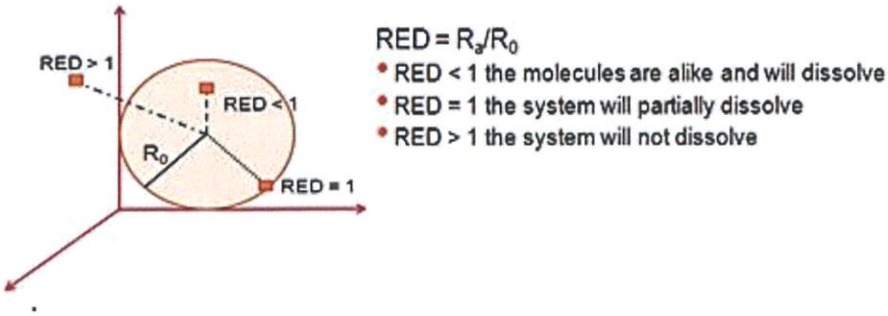
δ_p คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย

δ_h คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของพันธะไฮโดรเจนของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย

RED คือ ระยะทางพลังงานสัมพัทธ์ (Relative energy distance)

R_0 คือ รัศมีอันตรกิริยา (Interaction radius) ของพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 แผนภาพแสดงลักษณะของทรงกลม Hansen (Hansen sphere) [25]

2.7 วัสดุพอลิเมอร์ [27]

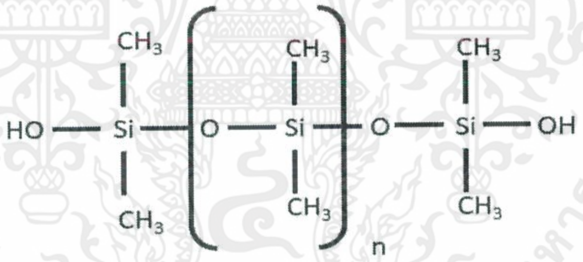
วัสดุพอลิเมอร์ที่ถูกนำมาใช้เป็นฐานรองรับในการตรวจวัดก๊าซจะมีสมบัติที่สำคัญดังนี้ คือ เป็นพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพที่เสถียรทางกายภาพ และทางเคมี อุณหภูมิที่เปลี่ยนจากสถานะจากคล้ายแก้ว (Glassy state) ไปเป็นสถานะคล้ายยาง (Rubberry state) หรือค่า Tg (Glass transition temperature) ในการทำงานควรจะใช้อุณหภูมิที่มีค่าต่ำกว่า Tg ของวัสดุพอลิเมอร์นั้น ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่แพร่กระจายอย่างรวดเร็วถูกดูดซับด้วยพอลิเมอร์เนื่องมาจากการเคลื่อนที่อย่างอิสระของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยปกติแล้วพอลิเมอร์ควรมีค่าอิลาสโตเมอร์ (Elastomer) ที่เหมาะสมในการทำอุปกรณ์ในการตรวจวัด เนื่องมาจากพฤติกรรมที่แสดงสมบัติของแข็งที่ยืดหยุ่น (Elastic) และของเหลวหนืด (Viscous) หรือเรียกว่า Visco-elastic behavior ซึ่งเป็นผลทำให้สัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับจำนวนโมเลกุลที่ถูกดูดซับเข้าไป และทำให้อุปกรณ์มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วๆไปแล้วการดูดซับในพอลิเมอร์ที่เป็น อสัณฐาน เช่น พอลิเมอร์อิลาสโตเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่เป็นผลึกทั่วๆไป คือพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายแก้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ในสายโซ่พอลิเมอร์ อีกทั้งยังแสดงการเวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนตัวที่ช้ากว่า ถึงแม้กระนั้นก็ยังมีการนำวัสดุพอลิเมอร์มาใช้ในการทำเป็นฐานรองรับในอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์อยู่

2.7.1 พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS)

พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) เป็นสารหรือโมเลกุลในกลุ่มของสารประกอบพอลิเมอร์ Organosilicone หรือที่มักเรียกกันว่า ซิลิโคน โดยทั่วไปสูตรโครงสร้างทางเคมีของ PDMS คือ $(C_2H_6OSi)_n$ (โดยค่า n คือ ค่าสำหรับการเกิดซ้ำๆกันของหน่วยมอนอเมอร์ของ (C_2H_6OSi)) ที่แสดงดังภาพที่2.16 ซึ่งได้มีการพิสูจน์ว่าเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการทำเป็นอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ หรือสารอินทรีย์ระเหยง่ายในธรรมชาติ เนื่องจาก PDMS มีความเสถียรภาพทางความร้อน และยังแสดงพฤติกรรม Visco-elastic behavior อีกด้วย โดยทั่วไปแล้ว PDMS จะประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองสารผสมกัน คือ Silicone elastomer ผสมเข้ากับ Curing agent โดยจะผสมในอัตราส่วน 10:1 โดยน้ำหนัก หลังจากผสมกันเสร็จแล้วจะเชื่อมพันธะกันโดยสามารถวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง และจะเชื่อมพันธะได้เร็วขึ้นเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น โดย PDMS มีสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ที่ค่อนข้างอ่อน นั่นคือสามารถฉีกขาดได้ง่ายภายใต้ความเครียด และถูกนำมาใช้เป็นตัวในการกั้นของเหลวในการไหลผ่านและยอมให้ก๊าซหรือองค์ประกอบของธาตุต่างๆสามารถซึมผ่านได้ โดยทั่วไปจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในห้องแลป และเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับทางการแพทย์ เช่น ท่อหรือสายยางที่สอดเข้าไปในร่างกาย (Catheters) และแผ่นฟิล์มซิลิโคนบางๆ เป็นต้น ซึ่งความพิเศษของ PDMS membrane สามารถทำให้อยู่ในรูปแบบแผ่น และสามารถตัดเป็นแผ่น หรือทำการโค้งงอได้ง่าย และ PDMS เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถทำงานได้ในอุณหภูมิช่วงกว้างตั้งแต่ -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส และมีความสามารถในการทนต่อสารเคมีได้ดี เช่น สารละลายที่เป็นกรด และสารละลายทั่วไป จากการศึกษาพบว่าพื้นผิวของ PDMS ที่มีลักษณะพื้นผิวที่แข็งและจะไม่ยอมรวมตัวกับสารละลายที่แทรกซึมเข้าไปในพื้นผิวของ PDMS แล้วไม่ทำให้ PDMS บวม เช่น น้ำ เอ-ทานอล เมทานอล และ กลีเซอรอล แต่ก็มีสารระเหยอินทรีย์บางชนิดที่แพร่เข้าไปใน PDMS อาจทำให้ PDMS สามารถบวมหรือขยายตัวได้เล็กน้อย เช่น อะซีโตน 1-โพรพานอล และ ไพริดีน แต่สารละลายที่ทำให้ PDMS บวมมาก เช่น คลอโรฟอร์ม อีเทอร์ และ เตตระไฮโดรฟูแรน เป็นต้น



ภาพที่ 2.16 แสดงสูตรโครงสร้างของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) [28]

2.8 การนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

2.8.1 สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds, VOCS) [29]

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย เป็นกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอได้ง่าย สามารถกระจายตัวไปในอากาศได้ในอุณหภูมิและความดันที่ปกติ ซึ่งองค์ประกอบหลักของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ อะตอมของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และอะตอมของธาตุองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ออกซิเจน ฟลูออไรด์ คลอไรด์ โบรไมด์ ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน เป็นต้น โดยทั่วไปสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศจัดเป็นอากาศพิษ (Toxic Air) ซึ่งสารพวกนี้เราสามารถรับได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิจกรรมที่ใช้ในชีวิตประจำวันโดยเราจะรับสารเหล่านี้จากผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น ควันบุหรี่ สีทาบ้าน น้ำยาฟอกสี น้ำยาซักแห้ง น้ำยาสำหรับย้อมผมและดัดผม สารกำจัดศัตรูพืช สารที่เกิดจากการเผาไหม้ สารที่เกิดจากการปนเปื้อนในอากาศ น้ำดื่ม อาหาร และโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น และเมื่อเรารับไอระเหย VOCs เข้าไปในปริมาณมากอาจทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย เช่น ทำให้เกิดการทำลายระบบประสาทส่วนกลาง คือไปกดประสาทส่วนกลางโดยอาจจะเกิดอาการทันที ทำให้หมดสติได้ และในกรณีที่ได้รับไอระเหย VOCs ปริมาณน้อย เป็นเวลานานก็จะทำให้เกิดปัญหาเรื้อรัง อาจทำให้เกิดมะเร็ง และเกิดการเสื่อมของเนื้อเยื่ออวัยวะภายในได้ด้วย ซึ่งกลไกการเกิดพิษของไอระเหย VOCs มาจากคุณสมบัติทางเคมีของสารที่มีความทนต่อการสลายตัวทางชีวภาพ และสามารถรวมตัวกับสารชีวโมเลกุลภายในร่างกาย เช่น ดีเอ็นเอ โปรตีน ไขมัน ซึ่งจะทำให้เซลล์ภายในร่างกายถูกรบกวน และอาจส่งผลต่อการเกษตรที่ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรตกต่ำ เนื่องมาจากสาร (VOCs) มีผลกระทบต่อชั้นโอโซนของโลก ซึ่งปกติโอโซนจะอยู่ในชั้นบรรยากาศสูง ซึ่งทำหน้าที่ในการกรองแสงอุตราไวโอเลต (UV) แต่ไอระเหย VOCs ไปมีผลทำให้โอโซนบนชั้นบรรยากาศสูงเข้ามาอยู่ในชั้นบรรยากาศใกล้โลก และโอโซนนี้จะทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น การแบ่งกลุ่มสาร VOCs สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะของโมเลกุลของสาร ดังนี้

2.8.1.1 กลุ่ม Non-chlorinated VOCs หรือ Non-halogenated Hydrocarbons

กลุ่ม Non-chlorinated VOCs หรือ Non-halogenated Hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีอะตอมของธาตุคลอรีนอยู่ในโมเลกุล ซึ่งสารกลุ่มนี้อาจมาจากสิ่งแวดล้อม การเผาไหม้กองขยะ พลาสติก สารทำละลาย เป็นต้น ซึ่งอาจทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพร่างกายของผู้ได้รับสารได้ เช่น ทำให้ผู้ป่วยเป็นโรคทางเดินหายใจ โดยสารกลุ่มนี้ได้แก่

- กลุ่มสาร Aliphatic Hydrocarbons เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง สารละลายในโรงงานอุตสาหกรรม โพรเพน 1,3-บิวทาไดอีน แก๊สโซลีน และเฮกเซน
- กลุ่มสาร Alcohols, Aldehyde, Ketone เช่น เอทานอล เมทานอล และฟอร์มาลดีไฮด์
- กลุ่มสาร Aromatic Hydrocarbons เช่น โทลูอีน ไซลีน เบนซีน แนฟทาลีน สไตรีน และฟีนอล

2.8.1.2 กลุ่ม Chlorinated VOCs หรือ Halogenated Hydrocarbons

กลุ่ม Chlorinated VOCs หรือ Halogenated hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีอะตอมของคลอรีนในโมเลกุล ได้แก่ สารเคมีที่ใช้สังเคราะห์ในอุตสาหกรรมซึ่งสารกลุ่มนี้มีความเป็นพิษมากกว่า และมีความเสถียรในสิ่งแวดล้อมมากกว่าในกลุ่มสาร Non-chlorinated VOCs กล่าวคือสารกลุ่มนี้จะสลายตัวได้ยากในธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดการรบกวนการทำงานของสารพันธุกรรม และยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีภายในเซลล์ และสารกลุ่มนี้สามารถกระตุ้นให้เกิดโรคมะเร็งได้ โดยสารกลุ่มนี้ได้แก่ 1,1,1,2- เตตระคลอโรเอทิลีน 1,1,1-ไตรคลอโรเอทิลีน 1,1,2,2,- เตตระคลอโร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอทิลีน 1,1,2,2,- เตตระคลอโรเอทิลีน 1,1,2- เตตระคลอโรเอทิลีน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน และไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น

2.8.2 ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอน [24]

โครงสร้างบริเวณพื้นผิวในการตรวจวัดส่วนมากจะทำการปลูกหรือถูกเคลือบด้วยวัสดุโครงสร้างในระดับนาโน เช่น วัสดุนาโนทิวป์ โดยจะช่วยเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของตัวเซนเซอร์ให้มากขึ้นซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในการออกแบบตัวอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์ เนื่องจากการที่อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของตัวเซนเซอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพกลไกการตอบสนองที่ทำให้เกิดปฏิกิริยากันมากขึ้น และด้วยเหตุนี้จะช่วยเพิ่มความไวของก๊าซเซนเซอร์ให้มีการตรวจจับก๊าซได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพูดถึงวัสดุคาร์บอนที่มีการนำเอาท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซซึ่งค่อนข้างที่จะประสบความสำเร็จเนื่องจากสามารถออกแบบให้ทำงานได้ที่อุณหภูมิห้องและมีความไวในการตรวจจับก๊าซ เช่น งานวิจัยของ Penza et al. (2004) ได้แสดงการทำงานของ CNTs-based SAW sensors ซึ่งในงานวิจัยได้กล่าวถึงความสามารถในการตรวจจับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) เช่น เอทานอล (Ethanol) หรือทูโลอีน (Toluene) ที่ระดับความเข้มข้น 1 ppm โดยกลไกที่ CNTs สามารถเลือกจับไอระเหย VOCs ได้นั่นคือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของ CNTs กับไอระเหย VOCs จะเกิดการเชื่อมกันของพันธะไฮโดรเจน สำหรับเอทานอล แต่ก็อาจเกิดการดูดซับทางเคมีของออกซิเจน กับพื้นผิวของ CNTs ซึ่งนั่นคือการตรวจจับก๊าซของ CNTs จะขึ้นอยู่กับการเชื่อมกันทางพันธะที่แข็งแรงกับไอระเหย VOCs งานวิจัยของ Valentini et al. (2003, 2004) ที่ได้นำ CNTs มาใช้ในอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซ NO_2 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ลดลง เนื่องจากเป็นก๊าซที่ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (สารที่รับอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นสารที่ทำให้อะตอมอื่นมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น) แต่เมื่อทำการวัดก๊าซ NH_3 , H_2O , C_6H_6 และเอทานอลจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นก๊าซที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (สารที่ให้อิเล็กตรอน ซึ่งเป็นสารที่ทำให้อะตอมอื่นมีเลขออกซิเดชันลดลง) และเมื่อทำการวัดก๊าซ CO จะไม่ส่งผลต่อการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งพฤติกรรมของท่อนาโนคาร์บอนจะมีการถ่ายโอนประจุเนื่องจากการมีปฏิกิริยาต่อกันของท่อนาโนคาร์บอนกับสารที่ถูกดูดซับคือกลไกสำคัญในการแลกเปลี่ยนการนำไฟฟ้าในท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับก๊าซแอมโมเนีย เบนซีน เอทานอล และไอน้ำ เป็นต้น และอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซโดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนยังแสดงการตอบสนองที่เร็ว และความไวต่อการตรวจจับก๊าซที่เร็วภายใต้อุณหภูมิห้อง และในงานวิจัยนี้ยังบอกอีกว่าความสามารถในการคืนตัวของก๊าซได้เร็วที่อุณหภูมิสูงประมาณ 165 องศาเซลเซียส

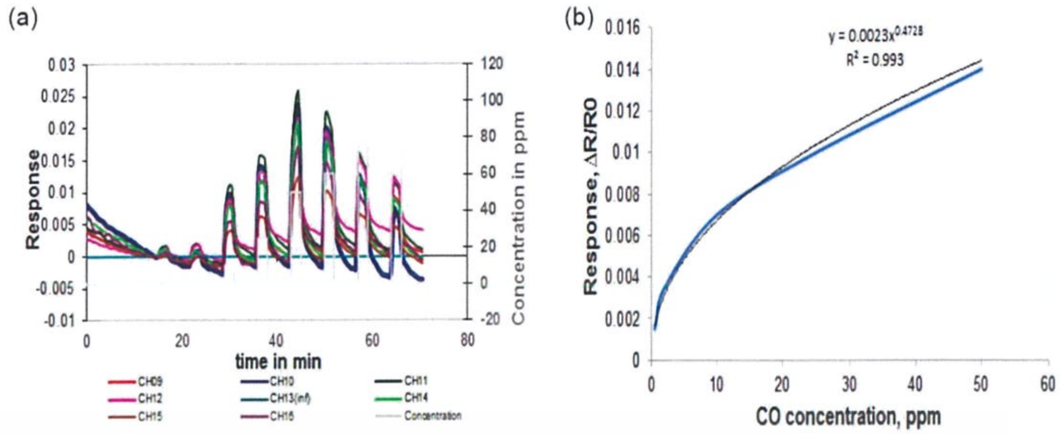
2.8.3 ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาคาร์บอนบนฐานรองรับชนิดต่าง

การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์ในการตรวจวัดไอระเหย VOCs จากท่อนาโนคาร์บอนมีด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น ในงานวิจัยของ A. Hannon และคณะ[30] ซึ่งในงานวิจัยได้พูดถึงการเตรียม SWNTs/PCB ในการตรวจสอบก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยในงานวิจัยนี้ได้พูดถึงวิธีการเตรียม SWNTs บน

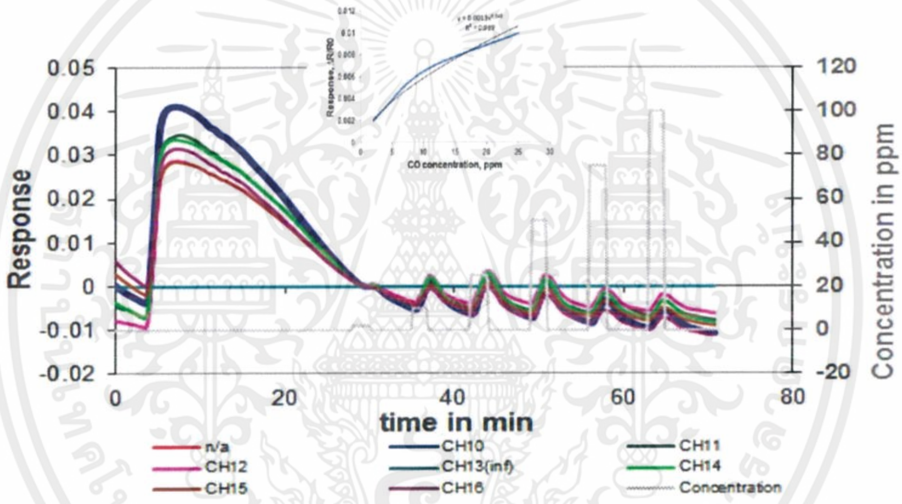
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานรองรับ PCB โดยการนำ SWNTs ไปละลายในกรดซัลโฟเนตและตัวทำละลาย และต่อมาใช้ปิเปต ในการหยดสารละลายที่เตรียมลงบนแผ่น PCB ซึ่งในงานวิจัยใช้ประมาณ 0.3 ไมโครลิตร หลังจากนั้น นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อที่จะให้ตัวทำละลายออกไป แล้วจะได้ฟิล์มบาง SWNTs บนแผ่น PCB และนำไปตรวจวัดก๊าซ CO โดยความเข้มข้นที่ใช้ในการทดสอบคือ 0.5, 2, 10, 25, 50, 60, 75 และ 100 ppm .ในระยะเวลาดังภาพที่ 2.17 โดยใช้ Dry air ที่อัตรา Flow rate 400 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที .ในการปรับเบสไลน์เป็นเวลา 10 นาที ก่อนที่จะทำการให้ก๊าซ CO เข้าไป โดยผลการตอบสนองพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของก๊าซเซนเซอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้ก๊าซ CO เข้าไป ซึ่งการนำไฟฟ้าของเซนเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของก๊าซ CO และจากกราฟไม่แสดงการตอบสนองของ SWNTs/PCB (ไม่ได้แสดงในกราฟ) แต่ Sulfonate/SWNTs/PCB จะแสดงการตอบสนองต่อก๊าซ CO อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนและกรดซัลโฟเนตที่แสดงที่ปลายของ SWNTs ที่ง่ายต่อการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ส่งผลทำให้การตอบสนองต่อก๊าซมากขึ้น ปกติแล้ว SWNTs จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน –COOH ในการตรวจจับก๊าซแต่ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำกรดซัลโฟเนตที่มีฤทธิ์เป็นกรดมากมาใช้จึงทำให้สายโซ่ของ SWNTs เกิดความบกพร่องทางโครงสร้าง (Defect site) ซึ่งการเกิดแบบนี้จะทำให้มีค่าพลังงานการดูดซับที่ต่ำ และทำให้เกิดบริเวณที่โมเลกุลมารวมตัว (Nucleation site) กันบนพื้นผิวของ SWNTs และทำให้หมู่ฟังก์ชันของกรดซัลโฟเนต(-SO_3H) ที่มีหมู่ที่ดึงอิเล็กตรอนเหมือนกับ (-COOH) ดังนั้นจึงทำให้บนพื้นผิวของ SWNTs มีความหนาแน่นในการดึงประจุมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่าง SWNTs ที่มีหมู่ฟังก์ชันของกรดซัลโฟเนตกับโมเลกุลของ CO มากขึ้น นั่นคือจะทำให้พาหะโฮลของ SWNT มีหมู่ฟังก์ชันของกรดซัลโฟเนตมีค่ามากขึ้น และภาพที่ 2.18 แสดงการตรวจวัดก๊าซ CO ภายใต้สภาวะความชื้นประมาณ 65% แต่พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 20 นาทีหลังจากให้ก๊าซ CO เข้าไปพบว่าค่าการตอบสนองและค่าความไวต่อก๊าซลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากการคงค้างของโมเลกุล CO ในมัดท่อของ SWNTs ซึ่งจะไม่สามารถที่จะเอาก๊าซออกได้หมด หรืออาจเกิดจากการขาดความสามารถในการกระตุ้นการดูดซับบนบริเวณพื้นผิวของ SWNTs และในการงานวิจัยนี้ยังได้รายงานผลเกี่ยวกับเวลาในการตอบสนองและการคืนตัวประมาณ 5 ถึง 10 วินาที แต่เนื่องด้วยในงานวิจัยนี้มีวิธีการเตรียมและการออกแบบก๊าซเซนเซอร์ค่อนข้างที่จะทำได้ยาก และออกแบบค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากต้องมีการสร้างลวดลายของวงจรลงบนแผ่นที่ทำให้เป็นแผ่น PCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.17 (a) แสดงการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นของ CO ที่แตกต่างกัน (b) แสดง Calibration curve ของเซนเซอร์ [30]

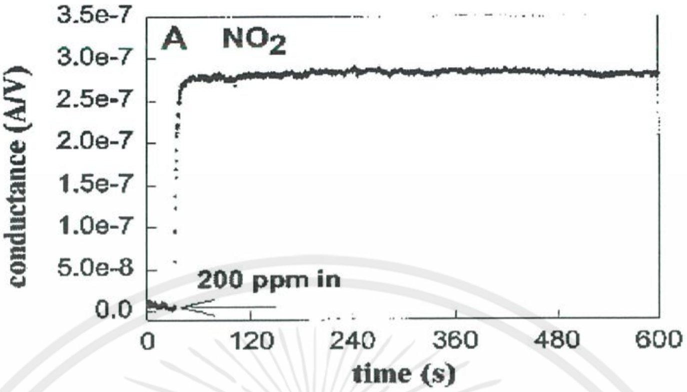


ภาพที่ 2.18 แสดงการตอบสนองภายใต้บรรยากาศความชื้นประมาณ 65% [30]

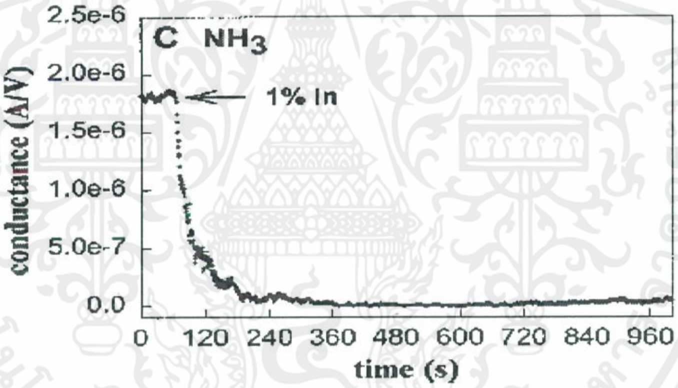
และในงานวิจัยของ Jing Kong และคณะ[31] โดยในงายวิจัยได้พูดถึงการปลูก SWNTs บนฐานรองรับ SiO_2/Si substrate ด้วยการสังเคราะห์ SWNTs ผ่านกระบวนการ CVD ลงบน SiO_2/Si substrate ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำ SWNTs/Si substrate ไปตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ที่แสดงดังภาพที่2.19 พบว่าการนำไฟฟ้าของ SWNTs เพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้ NO_2 ในระดับความเข้มข้น 200 ppm ในช่วงเวลาการตอบสนองประมาณ 2 ถึง 10 วินาที และหลังจากนั้นทำการให้ก๊าซอาร์กอน (Ar) เข้าไป จะทำให้โมเลกุลก๊าซเกิดการคลายตัวออกจาก SWNTs แต่เวลาในการคืนตัวค่อนข้างที่จะช้ามาก ซึ่งอาจจะต้องใช้ความร้อนในการไล่เพื่อเอาก๊าซออก เมื่อเทียบกับพวกโลหะออกไซด์ แต่ในงานวิจัยที่เลือกใช้ SWNTs เนื่องจากสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้องสำหรับการตรวจวัดก๊าซ และภาพที่ 2.20 แสดงการตรวจวัดก๊าซ NH_3 จะพบว่าค่าการนำไฟฟ้าลดลงหลังจากการให้ก๊าซ NH_3 1% เข้าไป และเวลาในการตอบสนองประมาณ 1 ถึง 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากงานวิจัยนี้พบว่าการนำ SWNTs มาใช้ในการตรวจวัดก๊าซที่อุณหภูมิห้องสามารถทำได้ดีเมื่อเทียบกับพวกโลหะออกไซด์ แต่วิธีการเตรียม SWNTs บน SiO_2/Si substrate ก็ยังเป็นกระบวนการเตรียมที่ค่อนข้างยุ่งยากและใช้เวลาในการปลูกนาน



ภาพที่ 2.19 แสดงการตอบสนองของ SiO_2/Si substrate ต่อการตรวจวัดก๊าซ NO_2 [31]

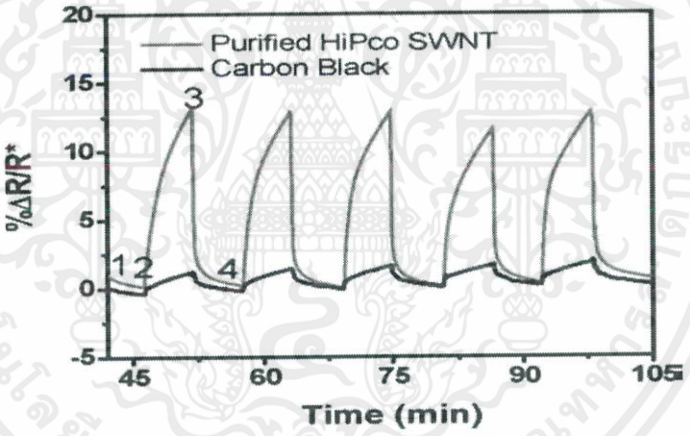


ภาพที่ 2.20 แสดงการตอบสนองของ SiO_2/Si substrate ต่อการตรวจวัดก๊าซ NH_3 [31]

และในงานวิจัยที่ได้กล่าวไปข้างต้นเป็นการเตรียม SWNTs บนฐานรองรับที่ไม่สามารถยืดหยุ่นและออกแบบได้ยาก จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับฐานรองรับที่สามารถยืดหยุ่นได้อย่างเช่น บนแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ซึ่งในงานวิจัยของ Kunjal Parikh และคณะ[32] จากงานวิจัยได้ทำการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จาก SWNTs บนแผ่น PET โดยวิธีการ Dip-coating และจะทำการเตรียมสาระลาย SWNTs ในขั้นตอนแรกได้มีการนำแผ่น PET ไปจุ่มในสารละลาย SWNTs เป็นเวลา 15 นาที แล้วเอาขึ้นหลังจากนั้นทำการจุ่มแบบนี้อีกทั้งหมด 4 ครั้ง ซึ่งสมบัติการนำไฟฟ้าของ SWNTs ด้วยวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของ SWNTs ในสารละลาย SDS และเวลาในการสั่น (Sonicate) หลังจากนั้นนำไปตากที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที และนำไปตรวจวัดไอระเหยทูโลอีน (Toluene) ดังภาพที่ 2.21 พบว่าการตอบสนองของ SWNTs/PET และ Carbon black/PET ต่อไอระเหย Toluene จากภาพ (จุดที่1) เป็นจุดเริ่มต้นในการปรับเบสไลน์ (จุด

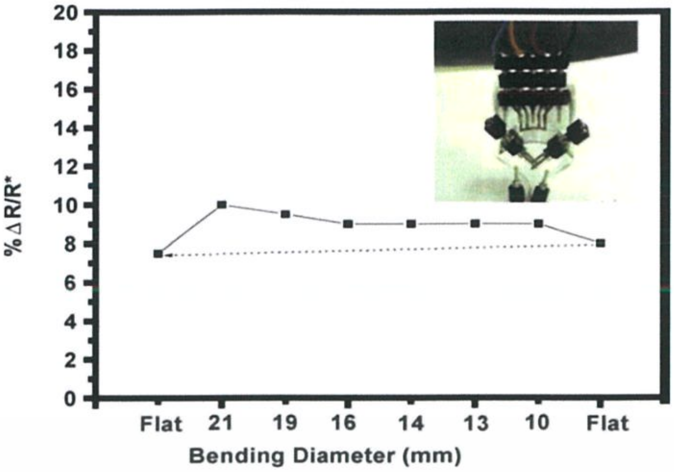
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่2) หลังจากให้ไอระเหยเข้าไป (จุดที่3) หลังจากนั้น 5 นาที ให้อยู่ในอากาศปกติจะแสดงการคืนตัวของไอระเหย (จุดที่4) และหลังจากนั้น 10 นาทีทำการให้ไอระเหยเข้าไปใหม่ และทำแบบนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ ซึ่งจะพบว่า SWNTs/PET มีการตอบสนองมากกว่า Carbon black เนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่า และในงานวิจัยนี้ยังแสดงผลของ SWNTs/PET ขณะทำการงอ ต่อการตอบสนองของอะซิโตน (Acetone) ดังภาพที่ 2.22 โดยขณะทำการงอจะให้ Acetone เข้าไปประมาณ 2 นาที และไล่ Acetone ออกประมาณ 5 นาที พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าก่อนและหลังงอมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไปเล็กน้อย โดยจะสังเกตว่าค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการงอมากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ก็ยังไม่เป็นที่แน่ชัดถึงผลของการงอว่าทำไมขณะงอ SWNTs/PET การเชื่อมกันของมัดท่อไม่เกิดการขาดหรือการนำกระแสของมัดท่อยังคงอยู่ แต่ก็อาจเกิดจากการกระจายตัวของท่อขนาดเล็กๆที่กระจายอย่างเป็นระเบียบ หรืออาจเกิดจากภายใต้ชั้นของแต่ละมัดท่อช่วยในการรักษาการเชื่อมกันของกระแสไฟฟ้าเมื่อแผ่น PET ถูกงอ ซึ่งในงานวิจัยนี้ก็แสดงได้ถึงวิธีการเตรียม SWNTs บนแผ่น PET เป็นวิธีการเตรียมค่อนข้างง่าย แต่ก็ยังเป็นวิธีที่ทำให้ SWNTs บน PET ที่ได้มีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ และเป็นวิธีที่ค่อนข้างเปลืองสารถ้าใช้สารเยอะ



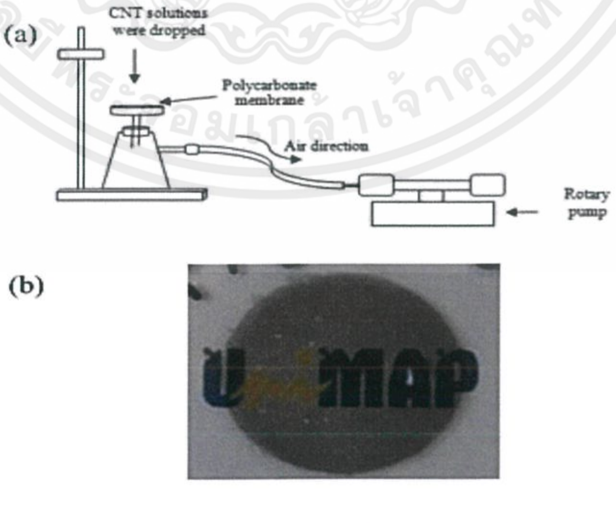
ภาพที่ 2.21 แสดงการตอบสนองของ SWNTs/PET (เส้นสีเทา) เทียบกับการตอบสนองของ Carbon black/PET (เส้นสีดำ) ต่อไอระเหย Toluene [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



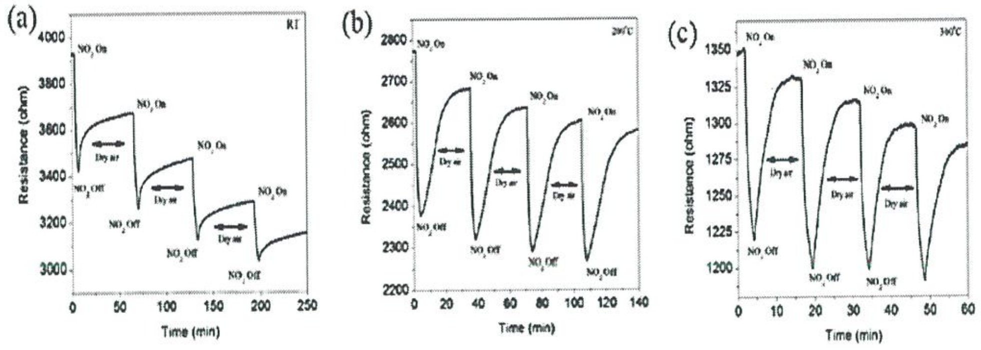
ภาพที่ 2.22 แสดงการตอบสนองขณะทำการงอ โดยการให้ Acetone เป็นเวลา 5 นาที [32]

และจากงานวิจัยของ Muhammad M.Ramli และคณะ[33] ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการนำ SWNTs มาทำเป็นวัสดุในการตรวจวัดบนฐานรองรับที่สามารถโค้งงอได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำแผ่นพลาสติกมาทำเป็นฐานรองรับ โดยนำ SWNTs ปริมาณ 0.005 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรมากรองผ่านสุญญากาศ (Vacuum filtration method) ดังภาพที่ 2.23 และแสดงการตรวจวัดหรือนำมาทดสอบกับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) แสดงดังภาพที่ 2.24 ซึ่งจากกราฟแสดงการตรวจวัดก๊าซ NO_2 ที่ความเข้มข้น 50 ppm ที่อุณหภูมิแตกต่างกันโดยเริ่มจากให้อากาศเข้าไปประมาณ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ ก๊าซ NO_2 เข้าไปประมาณ 2 นาที พบว่าอุปกรณ์เซนเซอร์ตัวนี้สามารถตรวจวัดได้ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิที่สูงกว่านั้นได้ (งานวิจัยได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 200 และ 300 องศาเซลเซียส) :ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวิธีการเตรียม SWNTs บนแผ่นพลาสติกค่อนข้างง่าย และทำให้ SWNTs ที่ได้มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ และไม่เปลืองสาร



ภาพที่ 2.23 (a) แสดงการกรองผ่านสุญญากาศ (b) แสดง SWNTs บนแผ่นพลาสติก [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเทียบกับเวลาของ SWNTs/Plastic ซึ่งอุปกรณ์จะดำเนินงานที่อุณหภูมิต่างกัน (a) อุณหภูมิห้อง (b) อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (c) อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส [33]

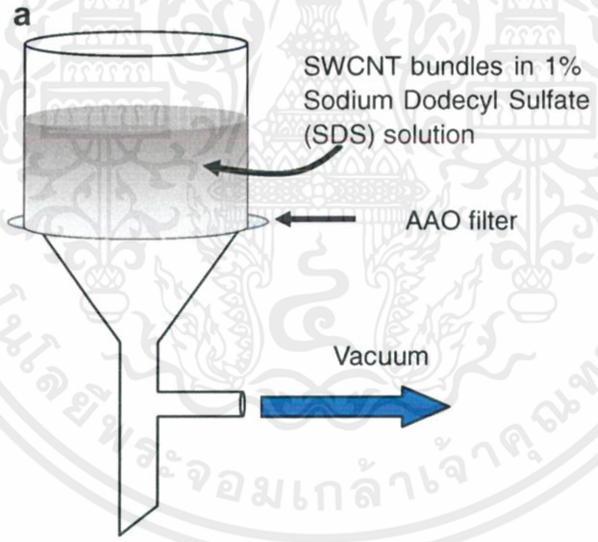
แต่ทั้งนี้เนื่องจากความจำเป็นในการเฝ้าระวังปริมาณไอระเหย VOCs ที่พบได้ทั่วไปอย่างเช่น ในบ้านจึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้ก๊าซเซนเซอร์ที่มีความสามารถในการยืดหยุ่น ถึงแม้จะมีการทำบนแผ่น PET แต่ก็ยังมีความสามารถในการยืดหยุ่นไม่พอ เพราะฉะนั้นจึงต้องการหาฐานรองรับที่มีความยืดหยุ่นสูงและสามารถนำมาติดกับเสื้อผ้าได้ จึงมีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาปลูกบนพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น และทนความร้อนได้สูง อย่างเช่น พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS)

2.8.4 ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS)[27]

ซึ่งในหลายๆงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการทำอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์บนฐานรองรับจากแผ่นซิลิกอน แก้ว เซรามิก เป็นต้น พบว่ามีความสามารถในการตรวจวัดหรือตอบสนอง และการคืนตัวต่อก๊าซได้ดี สามารถทนต่ออุณหภูมิได้สูง มีความแข็งแรง และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่การสร้างอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์บนฐานรองรับเหล่านี้มีข้อเสียหลายอย่างนั้นคือ วิธีในการสร้างขึ้นค่อนข้างที่จะซับซ้อน ต้องใช้ความร้อนสูงหรือพลังงานสูงในกระบวนการผลิตสูง การออกแบบตัวเซนเซอร์ทำได้ยาก ไม่ยืดหยุ่น กำจัดยาก และราคาแพง ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีความสนใจในการที่จะเปลี่ยนฐานรองรับเหล่านี้ให้มีความสามารถยืดหยุ่น หรือโค้งงอได้ สามารถย่อยสลายได้ง่าย และสามารถพกพาได้สะดวก หรือเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาติดกับเสื้อผ้าได้ ซึ่งสมบัติเหล่านี้ของอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซเซนเซอร์ในยุคนี้กำลังเป็นที่ต้องการซึ่งจากในงานวิจัยที่ผ่านมาก็ได้มีการศึกษาเรื่องนี้มาเป็นระยะเวลานานแล้ว โดยที่จะกล่าวถึงงานวิจัยของ Chang-Seung Woo และคณะ[34] ได้ทำการสร้างเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) โดยในงานวิจัยนี้ได้นำอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์มาตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) แสดงดังภาพที่ 2.27 ซึ่งวิธีการเตรียมเริ่มจากการนำ SWNTs มาละลายเข้ากับ SDS 1%wt และเติมน้ำไร้ประจุ (DI water)ประมาณ 100 ml แล้วหลังจากนั้นผสมให้เข้ากันด้วยการ Sonicate เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารละลาย SWNTs ไปกรองบนแผ่น

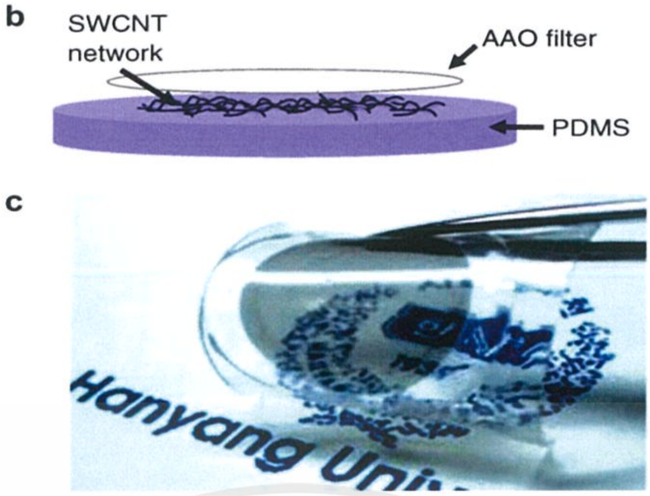
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AAO filter membrane (ที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 20 นาโนเมตร) โดยใช้วิธีการกรองด้วยสุญญากาศ (Vacuum filtration method) แสดงดังภาพที่2.25 และหลังจากนั้นนำ PDMS ที่เตรียมไว้ไปเทลงบน AAO filter membrane ที่มีฟิล์มบาง SWNTs อยู่ด้านบนและนำไปให้ความร้อนประมาณ 100 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมิห้องและทำการลอกออกจะได้ดังภาพที่2.26 และหลังจากนั้นนำไปตรวจวัดก๊าซ แอมโมเนีย (NH_3) โดยจากกราฟพบว่าทำการให้ก๊าซไนโตรเจน (N_2) เข้าไปในระบบก่อนเพื่อปรับเบสไลน์ให้กับ SWNTs/PDMS หลังจากนั้นให้ก๊าซ NH_3 พบว่ามีการตอบสนองต่อก๊าซที่ให้เข้าไปและให้ก๊าซไนโตรเจนเข้าไปอีกครั้งเพื่อทำการไล่ก๊าซ NH_3 ออก โดยจากกราฟแสดงค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้น (การนำไฟฟ้าลดลง) เนื่องมาจาก SWNTs ที่ใช้เป็นตัวในการตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย พบว่า SWNTs เป็นสารกึ่งตัวนำ p-type เมื่อทำการให้ก๊าซแอมโมเนียเข้าไปทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากแอมโมเนียไปยังSWNTs เป็นผลทำให้ความต้านทานไฟฟ้าภายในท่อนาโนคาร์บอนลดลง (การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น) และได้แสดงประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าที่เกือบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการโค้งงอที่แสดงดังภาพที่2.28 จากในงานวิจัยของ Chang-Seung Woo ได้พบว่าวิธีการเตรียม SWNTs บนฐานรองรับ PDMS ค่อนข้างง่าย และมีการจัดเรียงของ SWNTs เป็นระเบียบแต่ตัวกรองที่ใช้ คือ AAO filter membrane ซึ่งมีราคาแพง

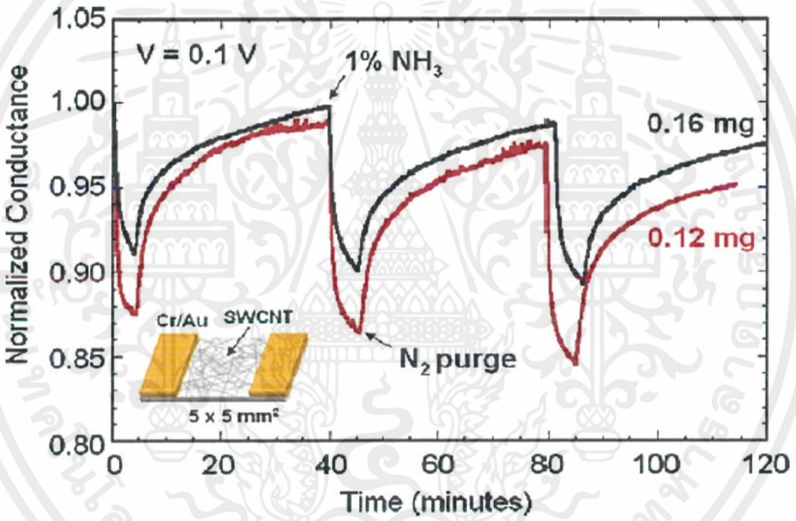


ภาพที่ 2.25 แสดงการกรองสารละลาย SWNTs ผ่านการกรองด้วยสุญญากาศ (Vacuum-filtration method) [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

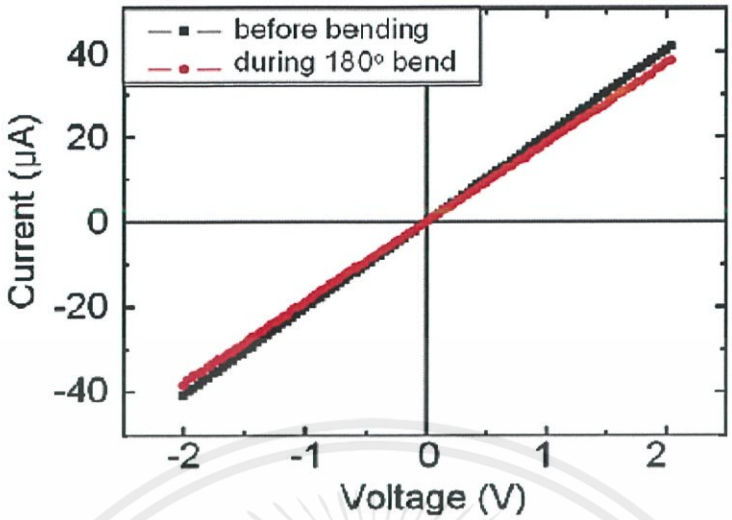


ภาพที่ 2.26 แสดงการลอก PDMS ออกจาก AAO filter membrane ที่มี SWNTs วางอยู่ด้านบน [34]



ภาพที่ 2.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์การนำไฟฟ้าเทียบกับเวลาของ SWNTs/PDMS เมื่อมีการให้ก๊าซแอมโมเนียเข้าไปในระบบ โดยแสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของ SWNTs ที่มีปริมาณ 0.12 กับ 0.16 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเทียบกับโวลต์ของSWNTs/PDMS ก่อนการงอและหลังการงอจนทำมุม 180° [34]

ตารางที่ 2.1 สรุปตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการนำ CNTs มาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซ

งานวิจัยอ้างอิง	วัสดุก๊าซเซนเซอร์	วิธีการเตรียม	ก๊าซที่ตรวจวัด	หมายเหตุ
Hannon และคณะ	SWNTs/PCB	Drop solution	CO	วิธีการเตรียมที่ง่ายแต่การจัดเรียงของ SWNTs บน PCB ไม่เป็นระเบียบ
Jing Kong และคณะ	SWNTs/Si wafer	CVD	NO_2, NH_3	เป็นกระบวนการเตรียมที่ค่อนข้างยุ่งยากและใช้เวลาในการปลูกนาน
Kunjal Parikh และคณะ	SWNTs/PET	Dip-coating	Toluene, Acetone	เป็นวิธีการเตรียมที่ง่ายแต่ทำให้เปลืองสารและ SWNTs ที่ได้จะมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

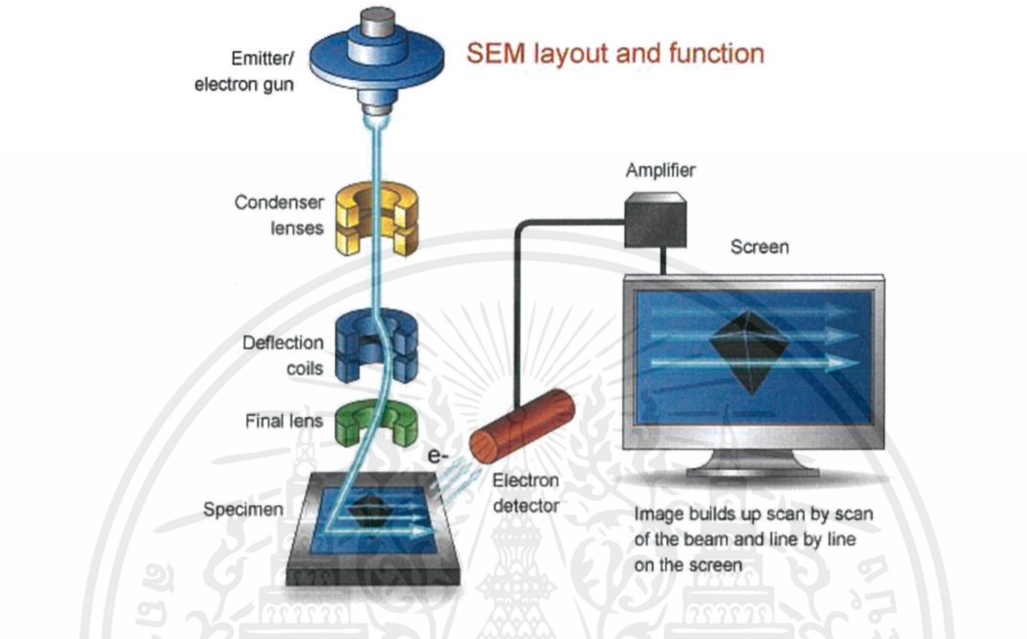
งานวิจัยอ้างอิง	วัสดุก๊าซเซนเซอร์	วิธีการเตรียม	ก๊าซที่ตรวจวัด	หมายเหตุ
Muhammad M.Ramli และคณะ	SWNTs/PET	Vacuum filtration	NO_2	เป็นวิธีการเตรียมที่ทำให้ SWNTs มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ และง่าย
Chang-Seung Woo	SWNTs/PDMS	Vacuum filtration	NO_2	เป็นวิธีการเตรียมที่ทำให้ SWNTs มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ และง่ายแต่ในงานวิจัยได้มีการนำ AAO filter membrane เป็นตัวกรอง ซึ่งค่อนข้างแพง

และในงานวิจัยนี้จึงได้ประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์ SWNTs/PDMS โดยการเปลี่ยนตัวกรองจาก AAO filter membrane เป็นกระดาษกรองเทฟรอน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ซึ่งจะลดต้นทุนในวิธีการเตรียมได้มากกว่า และจากหลายๆงานวิจัยที่ได้ศึกษามา พบว่ามักไม่ค่อยนำก๊าซเซนเซอร์ไปตรวจวัดไอระเหย VOCs ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาหาค่าการตอบสนอง เวลาการตอบสนอง และเวลาการคืนตัว ต่อไอระเหย VOCs ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของไอระเหยของเมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเบนซีน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 เครื่องมือวิเคราะห์

2.9.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy , SEM) [35]



ภาพที่ 2.29 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [36]

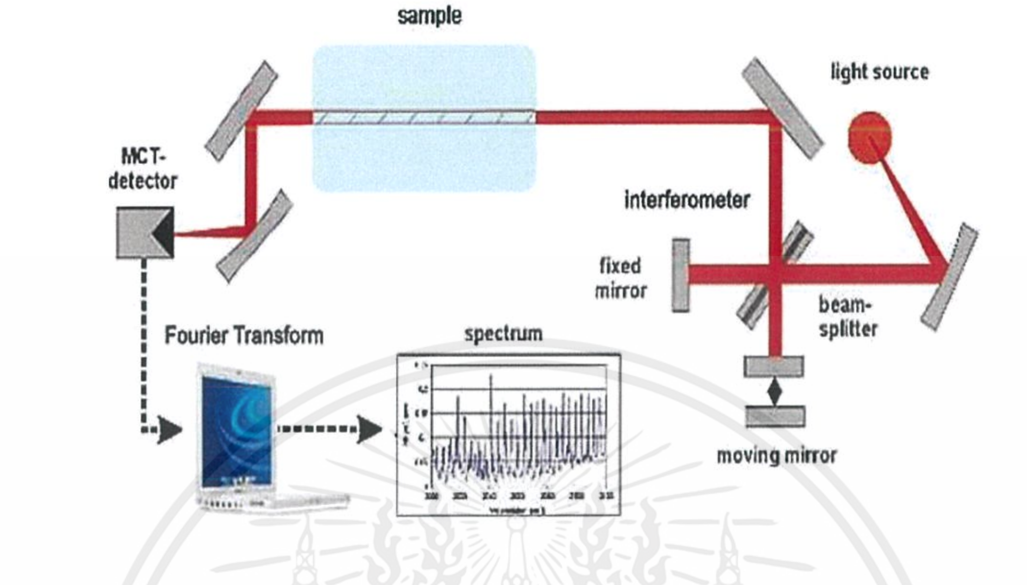
<u>หลักการทำงาน</u> จากภาพที่ 2.29 เครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งจะทำหน้าที่ในการผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ โดยถ้าหากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงาน ต่อมาลำอิเล็กตรอนจะถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพ

ตัวอย่างชิ้นงาน : ชิ้นงานที่เตรียมต้องเป็นชิ้นงานที่แห้ง, ชิ้นงานจะต้องนำไฟฟ้า (นำไปเคลือบด้วยโลหะหนัก เช่น ทองคำบริสุทธิ์ โดยวิธีสปัตเตอร์ริง), ชิ้นงานทางชีวภาพ หรือชิ้นงานที่ต้องการนำไปวิเคราะห์ EDS

ข้อมูลที่ได้ : ภาพที่ได้จาก SEM จะเป็นภาพแบบสามมิติ และภาพที่ได้จะมีความละเอียดค่อนข้างสูงแต่น้อยกว่า TEM , วิธีใช้งานค่อนข้างง่ายกว่า TEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy , FTIR) [37]



ภาพที่ 2.30 ภาพแสดงหลักการทำงานของฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป[38]

<u>หลักการทำงาน</u> จากภาพที่2.30 เครื่อง FTIR Spectroscopy จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดคลื่นรังสีอิมฟราเรด โดยเมื่อรังสีอิมฟราเรดที่มีหลายความยาวคลื่นผ่านเข้าไปยังอินเทอร์โฟโลมิเตอร์ (Interferometer) โดยลำแสงจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ เมื่อรังสีอิมฟราเรดเข้าไปในส่วน Beamsplitter ลำแสงจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ (Fixed mirror) และสะท้อนกลับมาที่กระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Mobile mirror) ซึ่งรังสีที่สะท้อนมาจากมาจากทั้ง Fixed Mirror และ Mobile Mirror จะรวมกันและเกิดการแทรกสอดหรือหักล้างกันขึ้น โดยการที่ Mobile mirror สามารถเคลื่อนที่ได้ จึงทำให้การสะท้อนกลับรังสีอิมฟราเรดของ Fixed Mirror และ Mobile Mirror ไม่เท่ากันซึ่งจะส่งผลให้ความยาวคลื่นของรังสีเปลี่ยนแปลงไปอันเกิดจากการแรกสอดแบบเสริมกันหรือหักล้างกัน หลังจากนั้นจะสะท้อนผ่านไปที่ Sample ซึ่งบางส่วนจะถูกดูดกลืนและบางส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืนจะผ่านเข้าไปยัง MCT-Detector และสัญญาณที่ได้รับจากตัววัดสัญญาณที่อ่านได้จะอยู่ในรูปอินเทอร์โฟโรแกรมและถูกแปลงไปยังคอมพิวเตอร์ ด้วยสมการ Fourier Transform ผลที่แสดงออกมาจะเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอิมฟราเรดของสารที่ความยาวคลื่นต่างๆ

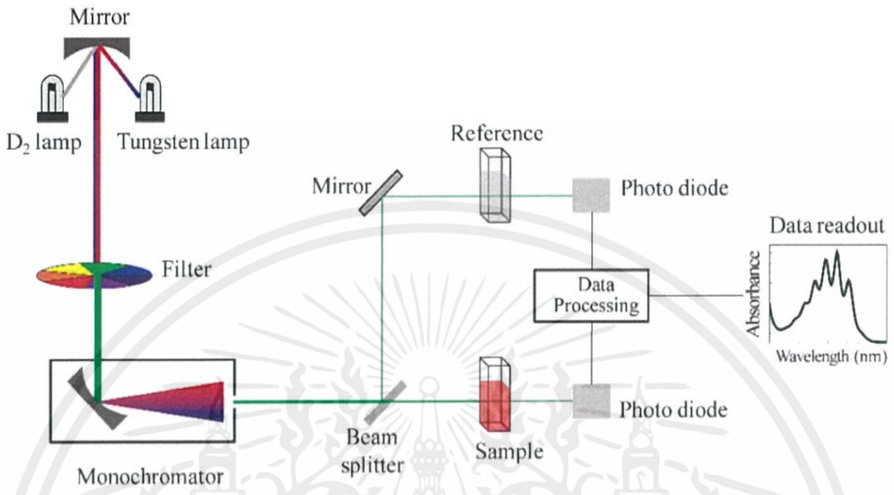
ตัวอย่างชิ้นงาน : ชิ้นงานที่เป็นของแข็ง จำเป็นจะต้องทำให้สารตัวอย่างมีลักษณะบางมาก ๆ เพื่อให้แสงผ่าน , ชิ้นงานที่เป็นของเหลว สามารถนำมาใส่เซลล์สำหรับของเหลวได้

ข้อมูลที่ได้ : สามารถหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านของแสง (% Transmittance) กับเลขคลื่น (Wave numbers), สามารถหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับเลขคลื่น (Wave numbers), สามารถใช้วิเคราะห์สารทางคุณภาพ (Qualitative Analysis) ใช้หาหรือพิสูจน์เกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น หาหมู่ฟังก์ชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Functional group) ต่างๆซึ่งจะปรากฏออกมาที่ความถี่ต่างๆกัน และใช้วิเคราะห์หาปริมาณสาร (Qualitative Analysis) *ช่วงค่า Wave number: 4000-600 cm^{-1}

2.9.3 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)[39]



ภาพที่ 2.31 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง [40]

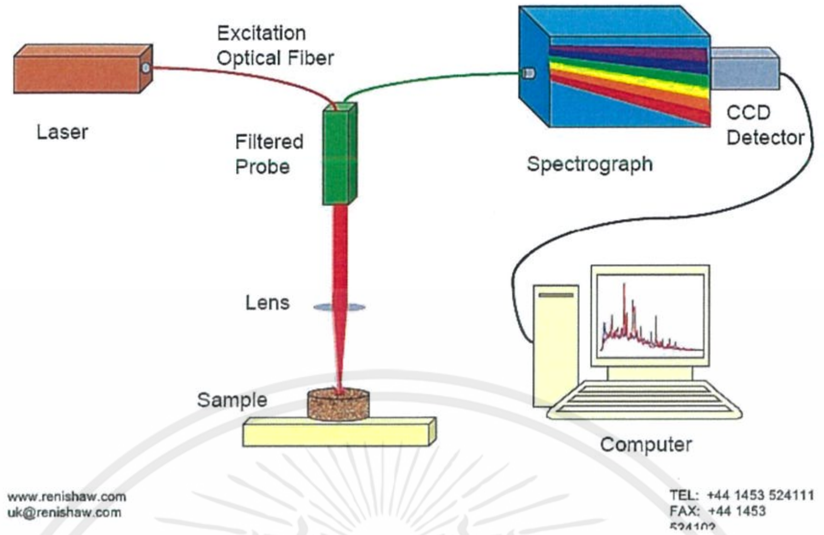
<u>หลักการทำงาน</u> จากภาพที่2.31 เป็นเทคนิคในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ถูกดูดกลืนหรือทะลุผ่านชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ใช้ทำการวิเคราะห์จะมีค่าความยาวคลื่นแสงค่าหนึ่งซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในชิ้นงาน ซึ่งหลักในการดูดกลืนแสงเกิดจากเมื่อโมเลกุลของสารในชิ้นงานถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีถึงแสงขาวที่มีค่าพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนจากสถานะพื้นไปสถานะกระตุ้นหรือที่มีระดับพลังงานสูงกว่า หลังจากนั้นทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากชิ้นงานเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีค่าความยาวคลื่นต่างๆ ตามหลักของ Beer-Lambert โดยค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผันตามจำนวนโมเลกุลของสารที่มีการดูดกลืน ดังนั้นจึงใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารที่อยู่ในชิ้นงาน

ตัวอย่างชิ้นงาน : การวัดการดูดกลืนและการทะลุผ่านของคลื่นแสง เช่น ชิ้นตัวอย่างกระจกแก้ว กระจก เคลือบด้วยฟิล์มบาง หมึกพิมพ์ เครื่องสำอาง ตัวอย่างทางด้านชีวภาพ เป็นต้น การหาค่าการสะท้อนของแสงในชิ้นตัวอย่างฟิล์มและการเคลือบบนพื้นผิว ผ้า ผงโลหะ ผง ออกไซด์ของโลหะ ผงสี พลาสติก และเซรามิก เป็นต้น

ข้อมูลที่ได้ : สามารถหาค่าร้อยละของการทะลุผ่านของแสง (% Transmittance) , ร้อยละของกาสะท้อนของแสง (% Reflectance) และร้อยละของการสะท้อนแสงรวม (Total %R)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.4 เครื่องวัดรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)



ภาพที่ 2.32 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดรามานสเปกโทรสโกปี

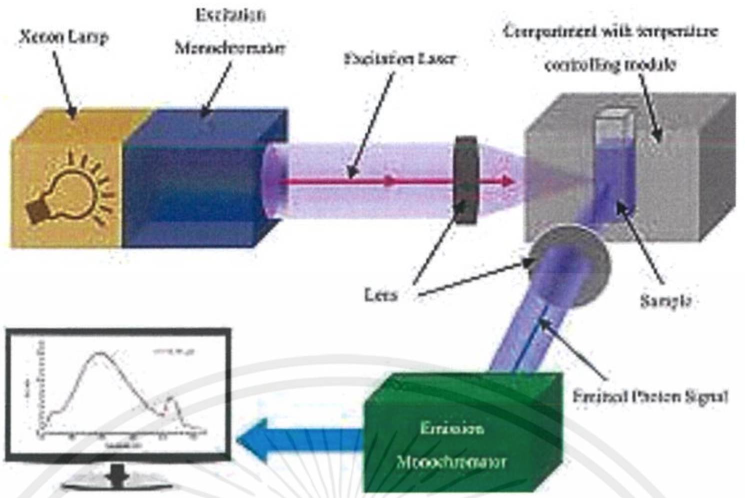
หลักการทำงาน จากภาพที่2.32 เป็นเทคนิคในการวัดโดยการยิงแสงเลเซอร์ (Laser) ที่มีความเข้มสูงเข้าสู่วัสดุ ซึ่งโมเลกุลในวัสดุจะถูกกระตุ้นและทำให้เกิดการกระเจิงแสงออกมา โดยแสงที่กระเจิงออกมานั้นจะมีความยาวคลื่นเดียวกันกับลำแสงของเลเซอร์ที่มากระตุ้น และเราจะเรียกการกระเจิงของแสงนี้ว่า แสงเลย์เร (Rayleigh scatter) ส่วนลำแสงอีกส่วนที่มีปริมาณน้อยมาก จะมีการกระเจิงแสงกลับที่ความยาวคลื่นต่างๆ ออกไป ซึ่งจะเรียกลำแสงนี้ว่า รามาน (Raman scatter) หลังจากนั้นใช้หลักการโฟกัสสัญญาณแสงรามานที่เกิดบนเกรตติ้ง (อุปกรณ์แยกลำแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ) ต่อมาลำแสงเหล่านี้จะถูกส่งไปยังตัวตรวจวัดแถบพลังงานที่กระเจิงกลับที่เรียกว่า CCD (Charge coupled device) และการสะท้อนกลับนั้นจะถูกนำมายืนยันได้ว่าวัตถุที่ถูกฉายแสงลงไปนั้น จะประกอบด้วยการยึดกันด้วยพันธะแบบใดที่ มีองค์ประกอบอะไรบ้าง และประกอบกันอย่างไร แล้วส่งข้อมูลไปแสดงผลทางคอมพิวเตอร์

ตัวอย่างชิ้นงาน : ชิ้นงานที่วัดสามารถเป็นได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และผง

ข้อมูลที่ได้ : สามารถหาองค์ประกอบของวัสดุว่ามีการยึดด้วยพันธะแบบใด มีองค์ประกอบอะไรบ้างในวัสดุ โดยเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารมาตรฐานที่ได้บันทึกไว้หรือที่มีอยู่แล้วใน Library ของฐานข้อมูล และสามารถดูการกระจายตัวของสารที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในวัสดุนั้นๆได้ โดยการแสดงผลออกมาในรูปแบบ Mapping

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.5 เครื่องวัดฟลูออเรสเซนต์สเปคโตรสโคปี (Fluorescence spectroscopy)



ภาพที่ 2.33 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดรามานสเปกโทรสโกปี[41]

หลักการทำงาน จากภาพที่2.33 เป็นเทคนิคในการตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุหรือสาร โดยใช้หลักการการดูดกลืนรังสียูวีของโมเลกุลในวัสดุ ซึ่งโมเลกุลภายในวัสดุจะถูกกระตุ้นและทำให้เกิดการสั่นขึ้นภายในโมเลกุลจากระดับพลังงานสถานะพื้น (Ground state) ไปยังระดับพลังงานสถานะกระตุ้นหรือระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น (Excited state) โดยเรียกการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานนี้ว่า การดูดพลังงาน (Excite energy) และโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นไปยังระดับพลังงานที่สูงขึ้นจะมีความไม่เสถียรของโมเลกุล จึงทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมา แล้วตกกลับมายังระดับพลังงานที่ต่ำกว่า โดยโมเลกุลที่มีการปลดปล่อยพลังงานจากระดับชั้นพลังงานกระตุ้นที่หนึ่งตกกลับไปยังระดับพลังงานสถานะพื้น จะทำให้เกิดการคายโฟตอน (Emissioon of photon) ออกมา และทำให้เกิดสเปกตรัมของแสงในช่วงฟลูออเรนเซนต์ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นที่จำเพาะของวัสดุหรือสารนั้นๆ

ตัวอย่างชิ้นงาน : ตัวอย่างชิ้นงานที่วิเคราะห์สามารถอยู่ในรูปของเหลวและของแข็งได้

ข้อมูลที่ได้ : สามารถวิเคราะห์หาค่า Excitation, Emission ในรูป 3 มิติได้ และสามารถดูการเปลี่ยนแปลง หรือดูลักษณะการคายโฟตอนที่แตกต่างกันเมื่อมีการปรับปรุงลักษณะพื้นผิวของวัสดุหรือสารที่เราต้องการจะศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

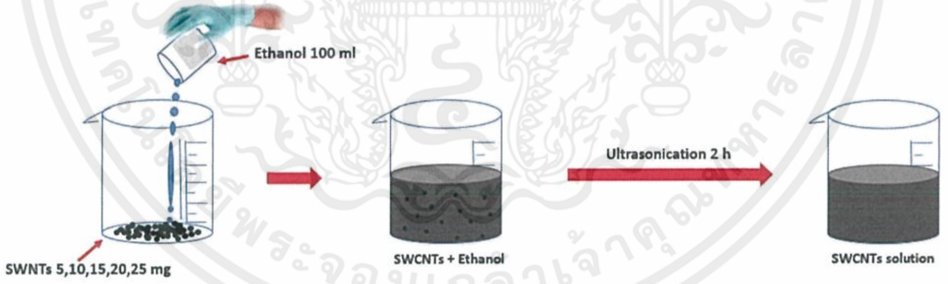
ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ และวัสดุต่างๆที่ใช้ในการทดลอง วิธีการเตรียมและขั้นตอนการทดลองต่างๆในงานวิจัย ซึ่งจะประกอบไปด้วยการสร้างก๊าซเซนเซอร์ SWNT/PDMS สำหรับตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) การทดสอบระบบวัดก๊าซของตัวก๊าซเซนเซอร์ รวมถึงการตรวจวัดสมบัติเฉพาะด้านต่างๆของ SWNTs

3.1 การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (SWNT/PDMS) สำหรับตรวจจับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs)

3.1.1 การเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว

(1) นำ SWNT มาผสมกับเอทานอลความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

(2) นำสารละลายที่ได้จากข้อ 1 ไปสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้สารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่มีการกระจายตัวค่อนข้างดีดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพการเตรียมสารละลาย SWCNT

3.1.2 การเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ (Vacuum filtration method)

การเตรียมฟิล์มบางของท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ

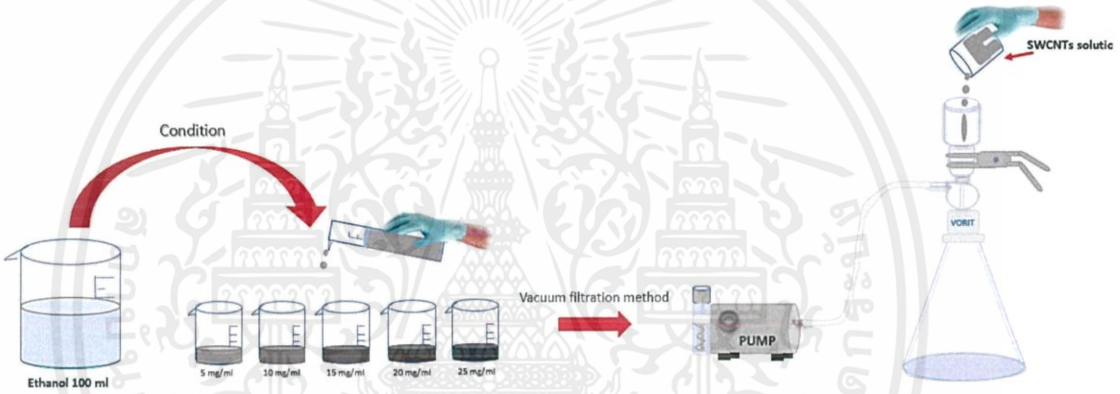
(1) กรองสารละลาย SWNT ที่ได้จาก ข้อ 3.1.1 โดยใช้เงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 3 และทำการปั๊มอากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศดังภาพที่3.2

(2) นำกระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จากข้อ (1) ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเพื่อเตรียมนำไปลอกบน PDMS ด้วยวิธีการลอกแบบ (Transfer method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษกรอง

ตัวอย่างที่	ปริมาณความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนต่อแผ่น (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)	ความเร็วการกรอง (มิลลิลิตรต่อนาที)	จำนวนกระดาษท่อนาโนคาร์บอน (แผ่น)
1	5	10	3
2	10	10	3
3	15	10	3
4	20	10	3
5	25	10	3



ภาพที่ 3.2 แผนภาพการเตรียมฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษกรองด้วยวิธีการการกรองด้วยสุญญากาศ

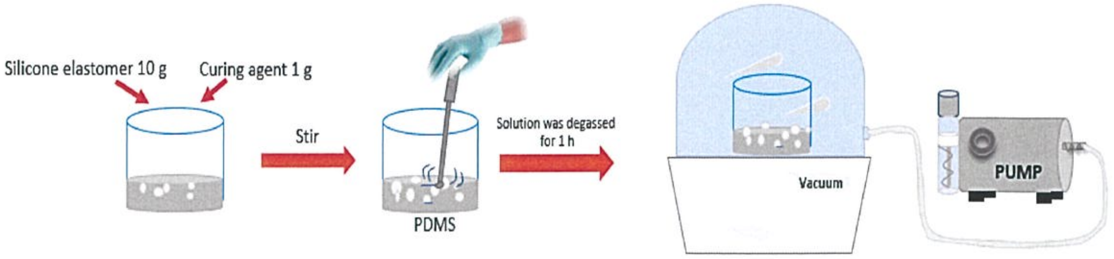
3.1.3 การลอกแบบฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนจากแผ่นกระดาษกรองลงบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS)

ลอกท่อนาโนคาร์บอนออกจากแผ่นกระดาษกรองลงบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ด้วยการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ในการถ่ายโอน (Transfer molding) ตามขั้นตอนต่อไปนี้

(1) ทำการเตรียม PDMS ในอัตราส่วน 10:1 โดยใช้ Silicone elastomer จำนวน 10 กรัม และผสมเข้ากับ Curing agent จำนวน 1 กรัม หลังจากนั้นคนให้เข้ากัน

(2) นำ PDMS ที่เตรียมได้จากข้อ (1) มาไล่ฟองอากาศออก (เพื่อไม่ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นขณะทำการหล่อแบบ) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

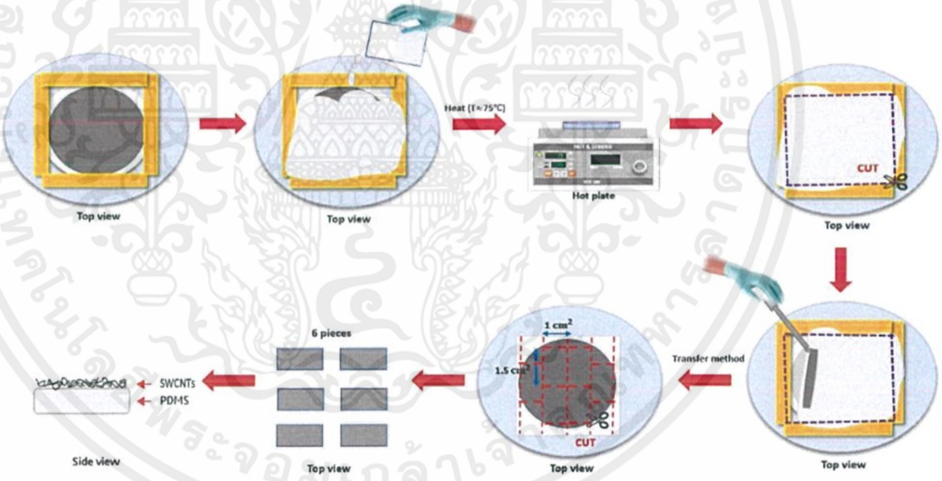


ภาพที่ 3.3 แผนภาพการเตรียม PDMS และการไล่ฟองอากาศ

(3) เตรียมท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษกรองมากำหนดขนาดสำหรับลอกแบบโดยใช้เทปแคปตอนกำหนดความหนา โดยใช้ความหนาของเทปแคปตอนประมาณ 10 ชั้น (ประมาณ 3 มิลลิเมตร)

(4) นำ PDMS ที่เตรียมในขั้นตอนที่ (2) มาเทลงบนแผ่นกระดาษกรองที่เตรียมในขั้นตอนที่ (3) และหลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำมาพักที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที จะได้ท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับ PDMS (SWCNT/PDMS)

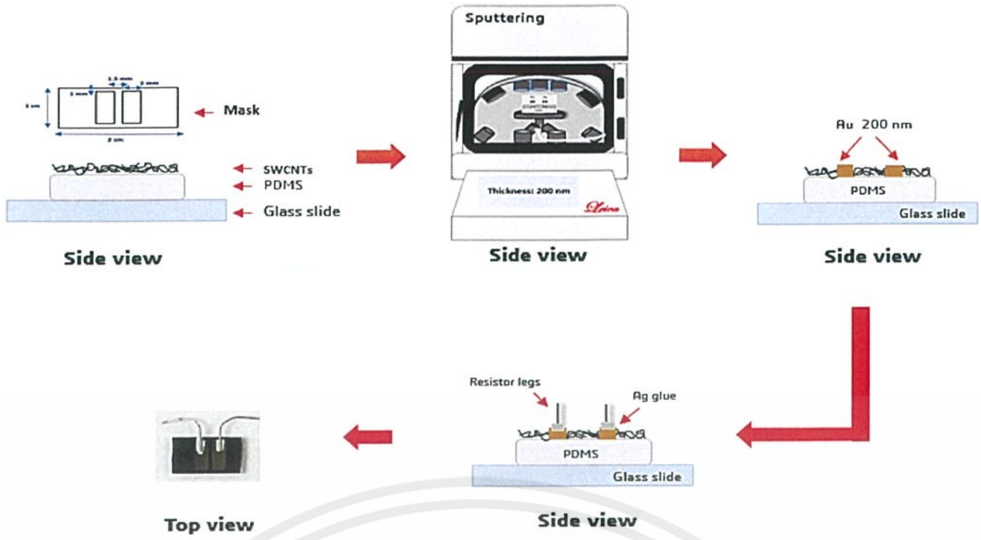
(5) ทำการลอก PDMS ออกจากแผ่นกระดาษกรอง และตัด SWCNT/PDMS ให้มีขนาด 1x5 ตารางเซนติเมตรเพื่อใช้เป็นก๊าซเซนเซอร์ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แผนภาพการลอกท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษกรองลงบน PDMS

(6) การสร้างขั้วไฟฟ้า โดยนำไปสปัตเตอริงด้วยขั้วทองเพื่อสร้างขั้ว โดยจะทำการสร้างแผ่นมาร์คให้มีขนาดความกว้างของขั้ว 0.15 x 0.1 ตารางเซนติเมตร และระยะห่างระหว่างขั้ว 1.5 มิลลิเมตร และทำการสร้างขั้วทองให้มีความหนา 200 นาโนเมตร หลังจากนั้นนำขา R ของตัวต้านทานมาต่อโดยใช้กาวเงินเป็นตัวเชื่อมกับขั้วทอง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ดังภาพที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 แผนภาพการสร้างขั้วไฟฟ้า โดยการใช้กาวเงิน

3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอไดเมทิลไซลอกเซน

นำก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน ไปตรวจวัดประสิทธิภาพต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยระบบตรวจวัดก๊าซเซนเซอร์

3.2.1 ส่วนประกอบของระบบตรวจวัดแก๊ส

ระบบตรวจวัดแก๊สจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้

3.2.1.1 ส่วนเตรียมก๊าซสำหรับทดสอบ ประกอบด้วย

(1) ขวดแก้วสำหรับใส่สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ทดสอบ

(2) ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.5 %

(3) เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)

(4) เครื่องควบคุมอัตราการไหล (อัตราการไหลสูงสุด 5 ลิตร/นาที)

3.2.1.2 ส่วนในการตรวจวัดก๊าซเซนเซอร์ ประกอบด้วย

(1) แชมเบอร์สำหรับใส่ก๊าซเซนเซอร์ในการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแชมเบอร์ 25 เซนติเมตร สูง 22 เซนติเมตร และมีปริมาตร 10.79 ลิตร

(2) ปั๊มสุญญากาศแบบโรตารี (Rotary pump)

(3) พัดลมติดตั้งภายในแชมเบอร์ตรวจวัดก๊าซ

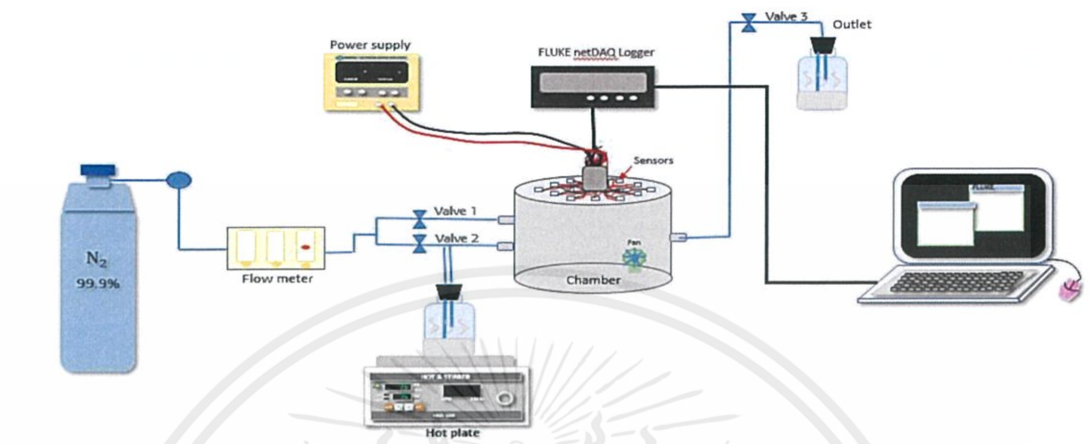
3.2.1.3 ส่วนในการบันทึกข้อมูล

(1) แหล่งจ่ายไฟ (Power supply)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า (FLUKE NetDAQ NETWORKED DATA ACQUISTIONUNIT)

(3) คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล (32 bits)



ภาพที่ 3.6 แสดงระบบตรวจวัดก๊าซ

3.2.2 ขั้นตอนพื้นฐานสำหรับการวัดประสิทธิภาพการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

สำหรับขั้นตอนการเปิด และปิดวาล์วในระบบ เพื่อปล่อยก๊าซเข้าไปในระบบทำตามขั้นตอนต่อไปนี้ ดังภาพที่ 3.6

(1) ก่อนทำการวัดก๊าซต้องเตรียมสารอินทรีย์ระเหยง่ายก่อน โดยในงานวิจัยได้ทำการชั่งน้ำหนักสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

(2) ทำการปรับเบสไลน์ (Base line) ในระบบก่อน ซึ่งต้อองปรับให้บรรยากาศในระบบวัดโดยการปล่อยก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที แล้วหยุดการปล่อยก๊าซไนโตรเจน

(3) ทำการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เราต้องการวัด โดยการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ต้องการวัดเข้าสู่ระบบที่มีการปรับเบสไลน์ด้วยก๊าซไนโตรเจนแล้ว โดยใช้เทคนิคบับบลิง (Bubbling) ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วหยุดการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย

(4) ทำการไล่สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ติดอยู่กับก๊าซเซนเซอร์ออก โดยการปล่อยก๊าซไนโตรเจนให้ไหลเข้าสู่ระบบเป็นเวลา 10 นาที พร้อมทั้งทำการศึกษาเวลาในการคืนตัว (Recovery time) ของก๊าซเซนเซอร์

(5) หลังจากทำการตรวจวัดเสร็จแล้ว ต้องนำไปชั่งน้ำหนักของสารอินทรีย์ระเหยง่ายอีกครั้งเพื่อดูการระเหยออกของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6) การคำนวณค่าการตอบสนองต่อสารอินทรีย์ระเหยง่าย จะถูกบันทึกในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากเครื่อง FLUKE NetDAQ NETWORKED DATA ACQUISTIONUNIT ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าการตอบสนอง (Sensor response ,SR) ได้ดังสมการ (1)

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

โดยที่ R คือ ค่าความต้านทานที่วัดได้

R_0 คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของก๊าซเซนเซอร์ภายใต้บรรยากาศสารอินทรีย์ระเหยง่าย

3.2.3 การคำนวณค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds concentation)

การคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2) และ (3)

$$PV = n_{chamber}RT \quad (2)$$

$$\rho_{VOC} = \frac{M_{VOC}}{V_{VOC}} \quad (3)$$

โดยที่ค่า P คือ ความดัน 1 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.013105 นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2))

V คือ ปริมาตรภายในแชมเบอร์ (กำหนดให้มีปริมาตรเท่ากับ 10.79 ลิตร (L))

R คือ ค่าคงตัวของโบลซ์แมนน์ (กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 8.314472 จูลต่อเคลวินคูณโมล (J / K•mol หรือ นิวตันคูณเมตรต่อเคลวินคูณโมล (N•m / K•mol))

T คือ อุณหภูมิขณะทำการวัดก๊าซในแชมเบอร์ (องศาเคลวิน (K))

$n_{chamber}$ คือ จำนวนโมลของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้เป็นเบสไลน์ภายในแชมเบอร์ (โมล (mol))

ρ_{VOC} คือ ความหนาแน่นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3))

M_{VOC} คือ น้ำหนักของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (กรัม (g))

V_{VOC} คือ ปริมาตรของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3))

ซึ่งในการทดลองจริง เมื่อทราบผลต่างปริมาตรของสารอินทรีย์ระเหยง่าย จะสามารถหาจำนวนโมลของสารอินทรีย์ระเหยง่าย และคำนวณหาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย จากสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_{VOC} = \frac{\rho_{VOC} \times V_{VOC}}{MW_{VOC}} \tag{4}$$

$$C = \frac{n_{VOC}}{n_{chamber}} \tag{5}$$

โดยที่ค่า n_{VOC} คือ จำนวนโมลของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (โมล (mol))

MW_{VOC} คือ มวลโมเลกุลของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (กรัมต่อโมล (g/mol))

C คือ ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

จากสมการข้างบนจะแสดงตัวอย่างการคำนวณ หาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ยกตัวอย่างสารเอทานอล ซึ่งหาได้จากผลต่างของน้ำหนักสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้สำหรับการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง (โดยกำหนดให้อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส)

(1) คำนวณหาค่าจำนวนโมลของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้เป็นเบสไลน์ภายในแชมเบอร์ ($n_{chamber}$)ที่ภายในแชมเบอร์มีปริมาตรเท่ากับ 10.79 ลิตร (L) หรือ 10.79 ลูกบาศก์เดซิเมตร (dm^3) หรือ 10.79 x 10^{-3} ลูกบาศก์เมตร (m^3) จะสามารถคำนวณได้ดังสมการด้านล่าง

จากสมการ (2)

$$PV = n_{chamber}RT$$ ย้ายข้างเพื่อหาจำนวนโมล จะได้

$$n_{chamber} = \frac{PV}{RT} \tag{6}$$

แทนค่าลงในสมการที่ (6) จะได้

$$n_{chamber} = \frac{1.01315 \times 10^5 \left(\frac{N}{m^2}\right) \times 10.79 \times 10^{-3} (m^3)}{8.314472 \left(\frac{N \cdot m}{K \cdot mol}\right) \times (25 + 273)(K)}$$

$$n_{chamber} = 0.441 \text{ mol}$$

(2) คำนวณหาจำนวนโมลของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (n_{VOC}) ซึ่งหาได้จากผลต่างปริมาตรของเมทานอลที่ถูกใช้ในการตรวจวัด

2.1 คำนวณหาผลต่างปริมาตรของเมทานอล (V_{VOC}) จะได้ดังนี้

กำหนดให้ก่อนการตรวจวัดก๊าซเมทานอลมีน้ำหนัก 74.570 g หลังการตรวจวัดก๊าซเมทานอลมีน้ำหนัก 72.368 g ดังนั้นค่าผลต่างของเมทานอลมีค่าเท่ากับ 2.202 g

หาค่าปริมาตรของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากสมการที่ (3)

$$\rho_{VOC} = \frac{M_{VOC}}{V_{VOC}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{voc} = \frac{M_{voc}}{\rho_{voc}} \quad (7)$$

หลังจากนั้นนำค่าที่ได้จากการหาผลต่างของน้ำหนักเมทานอล มาแทนค่าในสมการที่ (7) จะได้

$$V_{voc} = \frac{2.202 \ (g)}{792 \times 10^{3} \ (\frac{g}{m^{3}})}$$

(กำหนดให้ความหนาแน่นของเมทานอลเท่ากับ 792 kg/m³)

$$V_{voc} = 2.780 \times 10^{-6} \ m^{3} = 2.780 \times 10^{-3} \ dm^{3} = 2.780 \times 10^{-3} \ L$$

2.2 คำนวณหาจำนวนโมลของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (n_{VOC}) จะได้ดังนี้

หาค่า n_{VOC} โดยแทนค่า v_{VOC} ที่ได้จากการคำนวณข้อ 2.1 ลงในสมการที่ (4)

จากสมการ

$$n_{voc} = \frac{\rho_{voc} \ x \ V_{voc}}{MW_{voc}}$$

$$n_{voc} = \frac{792 \times 10^{3} \ (\frac{g}{m^{3}}) \ x \ 2.780 \times 10^{-6} \ (m^{3})}{32.04 \ (\frac{g}{mol})}$$

(กำหนดให้มวลโมเลกุลของเมทานอลมีค่าเท่ากับ 32.04 g/mol)

$$n_{voc} = 0.069 \ mol$$

2.3 คำนวณหาค่าความเข้มข้นของเมทานอลที่ปริมาตร 2.780×10^{-3} L

แทนค่า n_{VOC} จากข้อ 2.2 ลงในสมการที่ (5)

จากสมการ

$$C = \frac{n_{voc}}{n_{chamber}}$$

นำค่า n_{VOC} ที่หาได้จากข้อ 2.2 และ $n_{chamber}$ ที่หาได้จากข้อ 2.1 มาแทนลงในสมการที่(5)

จะได้

$$C = \frac{0.069 \ (mol)}{0.441 \ (mol)}$$

$$C = 0.156 = 156 \ ppt$$

ดังนั้น ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่อยู่ภายในแชมเบอร์มีค่าเท่ากับ 0.156 ppt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

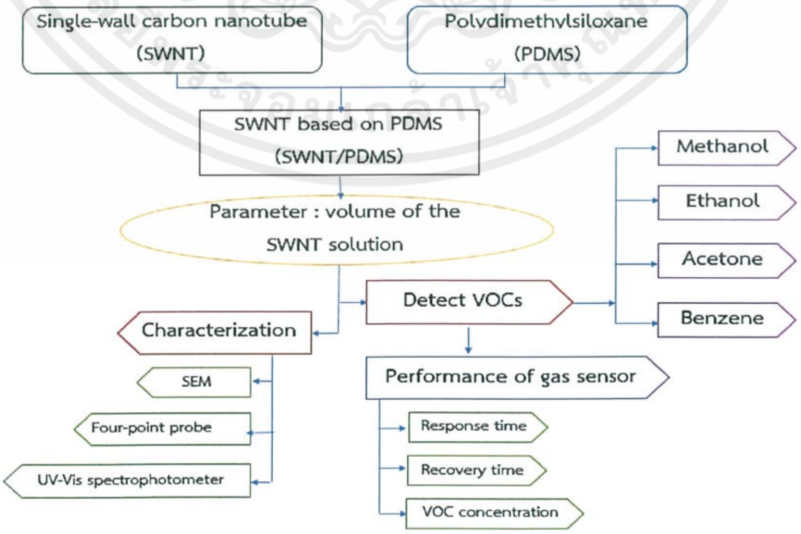
3.3 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

นำท่อนาโนคาร์บอนที่อยู่บนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมาตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ และทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากทำการไฮบริดด้วยพอลิ-เมอร์ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนโดยใช้เทคนิค ดังต่อไปนี้

สมบัติที่ศึกษา	เทคนิควิเคราะห์
สัณฐานวิทยาในการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy , SEM)
ปริมาณความหนาแน่นการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนบน PDMS	เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer)
การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนบน PDMS	เครื่องวัดรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)
ลักษณะโครงสร้างหรือการพองตัวของ ของท่อนาโนคาร์บอนบน PDMS	เครื่องวัดฟลูออเรสเซนต์สเปคโตรสโคปี (Fluorescence spectroscopy)

ขั้นตอนการดำเนินการในโครงงานพิเศษ ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 แผนผังสรุปงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

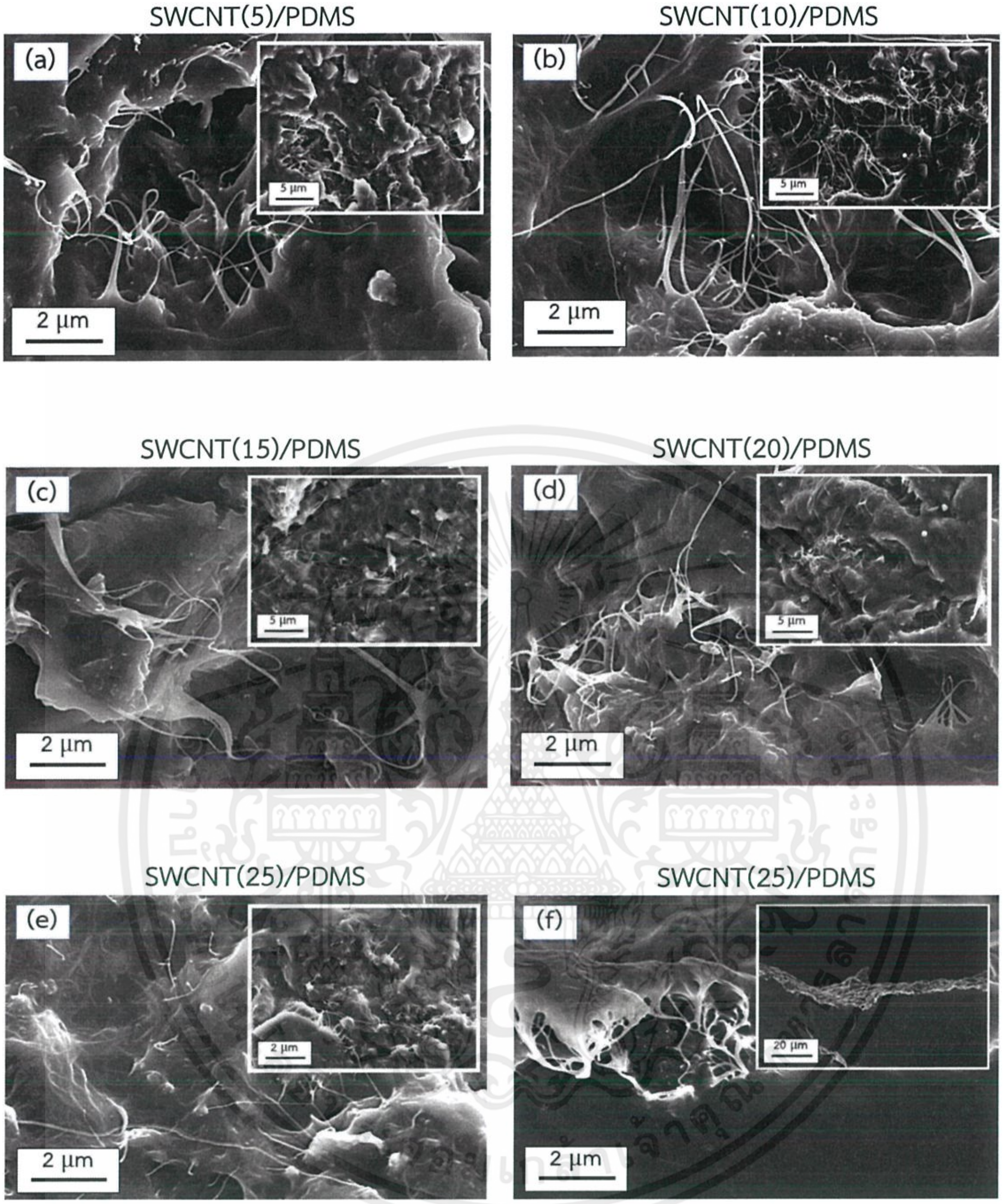
4.1 ลักษณะทางกายภาพของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field emission scanning electron microscope : FESEM)

ในการทดลองได้ประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (SWCNT/PDMS) ด้วยเทคนิคการกรองด้วยสุญญากาศและการลอกลายโดยใช้วิธีการถ่ายโอน ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNT dispersion) ที่ความเข้มข้น 5 10 15 20 และ 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (SWCNT(5)/PDMS SWCNT(10)/PDMS SWCNT(15)/PDMS SWCNT(20)/PDMS และ SWCNT(25)/PDMS ตามลำดับ) ภาพที่ 4.1 (a)-(e) แสดงภาพ FESEM ของ SWCNT/PDMS ที่เตรียมจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวที่ความเข้มข้น 5 10 15 20 และ 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ และภาพที่ 4.1 (f) แสดงภาพตัดขวาง FESEM ของ SWCNT/PDMS ที่ความเข้มข้น 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

จากภาพ FESEM ที่แสดงดังภาพที่ 4.1 พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะพันกันเป็นโครงร่างตาข่ายแบบร่างแห โดยในกรณี SWCNT(5)/PDMS และ SWCNT(10)/PDMS พบโครงข่ายของท่อนาโนคาร์บอนที่ชี้โผล่ขึ้นมาบนพื้นผิวและฝังตัวอยู่ในพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และเมื่อความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น พบโครงข่ายของท่อนาโนคาร์บอนบนที่ฝังตัวในพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในขณะที่กรองสารละลายท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษกรองเซลลูโลส เมื่อความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนต่ำ ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนปกคลุมไม่ทั่วกระดาษกรอง ยังมีส่วนที่เป็นช่องว่างบนกระดาษกรอง หลังจากนั้นเมื่อเทพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเพื่อทำการลอกลาย พอลิไดเมทิลไซลอกเซนซึ่งเป็นของไหลมีบางส่วนไหลซึมเข้าไปในส่วนที่เป็นช่องว่าง บางส่วนไหลเข้าไปบริเวณที่มีท่อนาโนคาร์บอน และเมื่อลอกแบบออกมา จึงทำให้มีทั้งส่วนที่ไม่มีท่อนาโนคาร์บอน ส่วนที่ท่อนาโนคาร์บอนฝังตัวในพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และส่วนที่ท่อนาโนคาร์บอนเป็นเส้นโผล่ขึ้นมาบนผิวพอลิไดเมทิลไซลอกเซนซึ่งอาจเกิดจากท่อนาโนคาร์บอนที่เรียงตัวกันที่ไม่ต่อเนื่องนั้นเกิดการขาดกลางขณะลอกแบบดังแสดงในภาพที่ 4.1(a) และ (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.1 แสดงภาพ FESEM ของ SWCNT/PDMS โดย ใช้สารละลายที่ความเข้มข้น (a) 5 (b) 10 (c) 15 (d) 20 (e) 25 และ (f) ภาพตัดขวาง FESEM ที่ปริมาณความเข้มข้น 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

สำหรับ SWCNT(15)/PDMS SWCNT(20)/PDMS และ SWCNT(25)/PDMS พบโครงข่ายของท่อนาโนคาร์บอนที่ชี้โผล่ขึ้นมาบนพื้นผิวพอลิไดเมทิลไซลอกเซนน้อยลงเรื่อยๆตามลำดับ และเส้นโครงข่ายของท่อนาโนคาร์บอนที่ฝังตัวอยู่ในพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆตามลำดับ ความไม่สม่ำเสมอของท่อนาโนคาร์บอนบนพอลิไดเมทิลไซลอกเซนอาจเป็นผลมาจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษกรอง นอกจากนี้พบว่ายิ่งความเข้มข้น

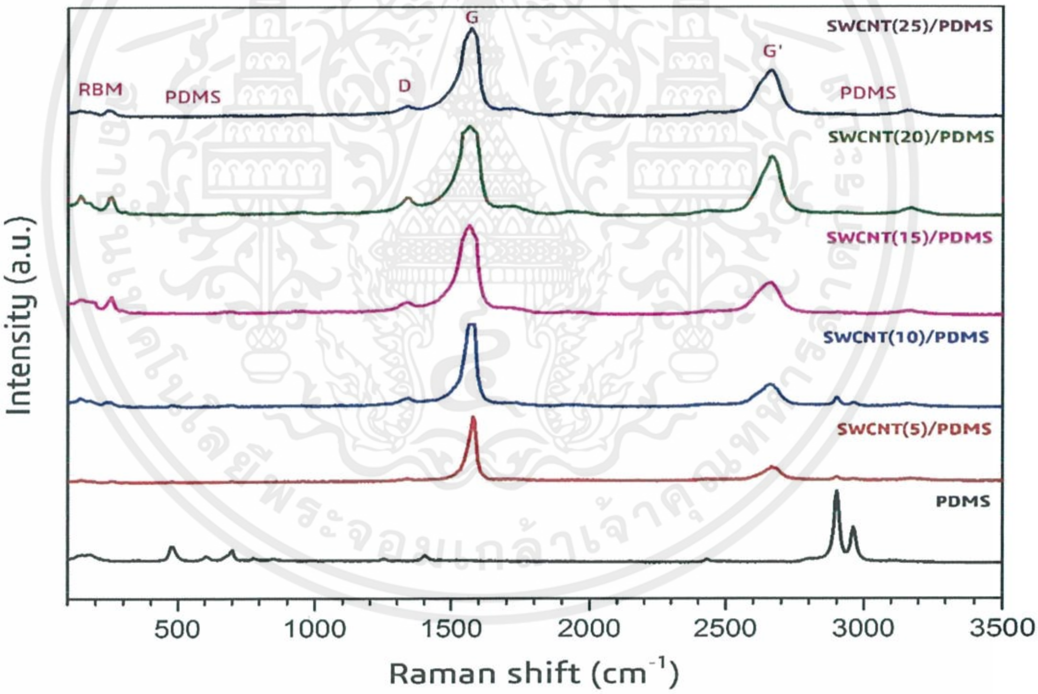
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ลักษณะท่อนาโนคาร์บอนที่ยื่นโผล่ขึ้นมาบนพื้นผิวมีปริมาณน้อยลง ลักษณะเช่นนี้อธิบายได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเป็นโครงข่ายที่ต่อเนื่อง และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนไม่ขาดจากกันขณะทำการลอกแบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.1(c) (d) และ (e) ตามลำดับ ส่วนภาพตัดขวางของ SWCNT(25)/PDMS แสดงให้เห็นว่าท่อนาโนคาร์บอนบนพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเกิดการฝังตัวที่ชั้นของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ดังแสดงในภาพที่ 4.1(f)

4.2 ลักษณะการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปคโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

ภาพที่ 4.2 (a) แสดงสเปคตรัมเปรียบเทียบรามานสเปคตรัมของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน SWCNT(5)/PDMS SWCNT(10)/PDMS SWCNT(15)/PDMS SWCNT(20)/PDMS และ SWCNT(25)/PDMS ตามลำดับ



ภาพที่ 4.2 แสดงรามานสเปกตรัมของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเทียบกับ SWCNT/PDMS ที่ความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนที่แตกต่างกัน

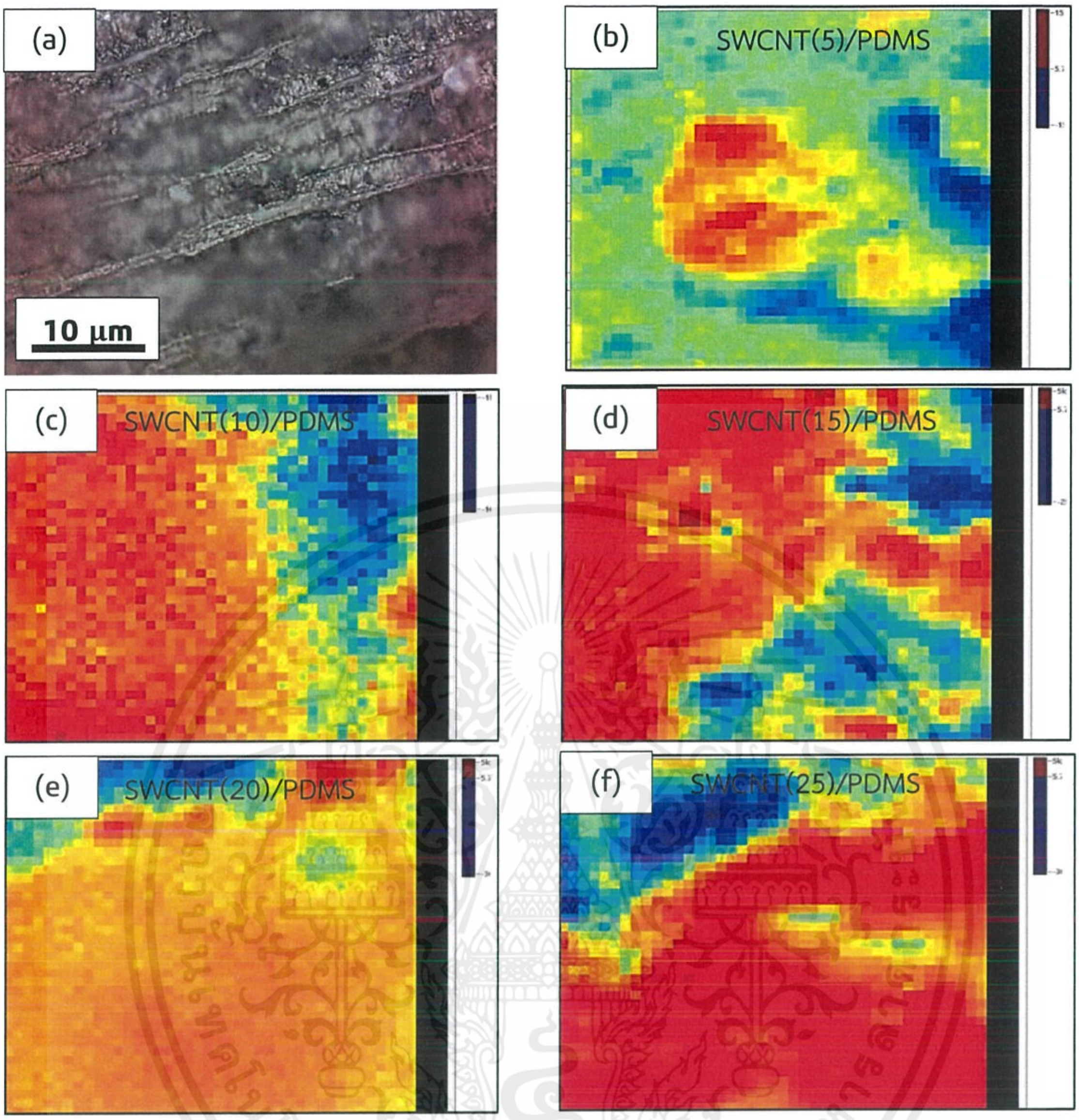
จากภาพที่ 4.2 พบว่ารามานสเปกตรัมของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีพีคหลักแสดงขึ้นมา 5 ช่วง คือที่ตำแหน่งพีค 496 cm^{-1} ที่แสดงลักษณะการสั่นของพันธะ Si-O-Si แบบ symmetric stretching ตำแหน่งพีค 687 cm^{-1} แสดงพันธะ Si-CH_3 แบบ symmetric rocking ตำแหน่งพีค 715 cm^{-1} แสดงพันธะ Si-C แบบ symmetric stretching ตำแหน่งพีค ~707 cm^{-1} แสดงความไม่สมบูรณ์หรือการผิดรูปของพอลิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมอร์ ตำแหน่งพีค~2905 cm^{-1} และ ~2970 cm^{-1} แสดงพันธะของ CH_3 แบบ symmetric และ asymmetric stretching ตามลำดับ ส่วนรามานสเปกตรัมของ SWCNT/PDMS พบว่ามีพีคหลัก 3 ตำแหน่งที่แสดงขึ้นมาของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวคือ ตำแหน่งประมาณ 100-350 cm^{-1} 1350 cm^{-1} 1590 cm^{-1} และ 2700 cm^{-1} โดยแต่ละพีคแสดงถึงตำแหน่งของ RBM, D, G และ G′ band ตามลำดับ โดย RBM หรือ Radial breathing mode เป็นลักษณะการสั่นเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว คือเป็นลักษณะการสั่นของโฟนอน (การสั่นสะเทือนของแลตทิซ) ทำให้แสดงสมบัติเฉพาะต่างๆ เมื่อวัสดุนั้นถูกจำกัดขนาดมิติทางกายภาพ D band หรือ Disorder แสดงความไม่สมบูรณ์หรือไม่เป็นระเบียบของท่อนาโนคาร์บอน G band แสดงความสมบูรณ์หรือความเป็นระเบียบของท่อนาโนคาร์บอน และ G′ สัมพันธ์กับ double resonance Raman ของพันธะ sp^2 และสามารถศึกษาความสมบูรณ์และความบริสุทธิ์ของผลึกโดยการคำนวณหาค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มของพีค G และความเข้มของพีค D หรือ (I_G/I_D) ซึ่งถ้ามีค่ามากจะแสดงถึงความบริสุทธิ์หรือความเป็นผลึกที่สูงของท่อนาโนคาร์บอน และจากการคำนวณค่า I_G/I_D สามารถคำนวณได้ 10.37 จากผลการคำนวณพบว่ามีค่า I_G/I_D สูงมากแสดงว่าท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวที่นำมาใช้มีความบริสุทธิ์หรือความเป็นผลึกที่ดีมาก

ภาพที่ 4.3(a) แสดงภาพถ่าย SWCNT(5)/PDMS จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) แสดงให้เห็นว่าลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานไม่เรียบหรือมีลักษณะขรุขระ ภาพที่ 4.3 (b)-(f) แสดงภาพ Raman mapping ของ SWCNT/PDMS แสดงความเข้มของพีค G band โดยบริเวณที่มีสีแดงและสีฟ้าจะระบุถึงปริมาณการมีอยู่ของท่อนาโนคาร์บอนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ตามลำดับ โดยถ้ามีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนอยู่จำนวนมากหรือมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอจะแสดงสีแดงเข้ม แต่ถ้ามีสีที่อ่อนลงหรือสีส้มอาจแสดงถึงปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ลดลงและสีฟ้าแสดงบริเวณของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน จากผลการทดลองพบว่า SWCNT(5)/PDMS มีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนน้อยที่สุดและมีการกระจายตัวที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอ และเมื่อความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นความสม่ำเสมอของการกระจายตัวบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

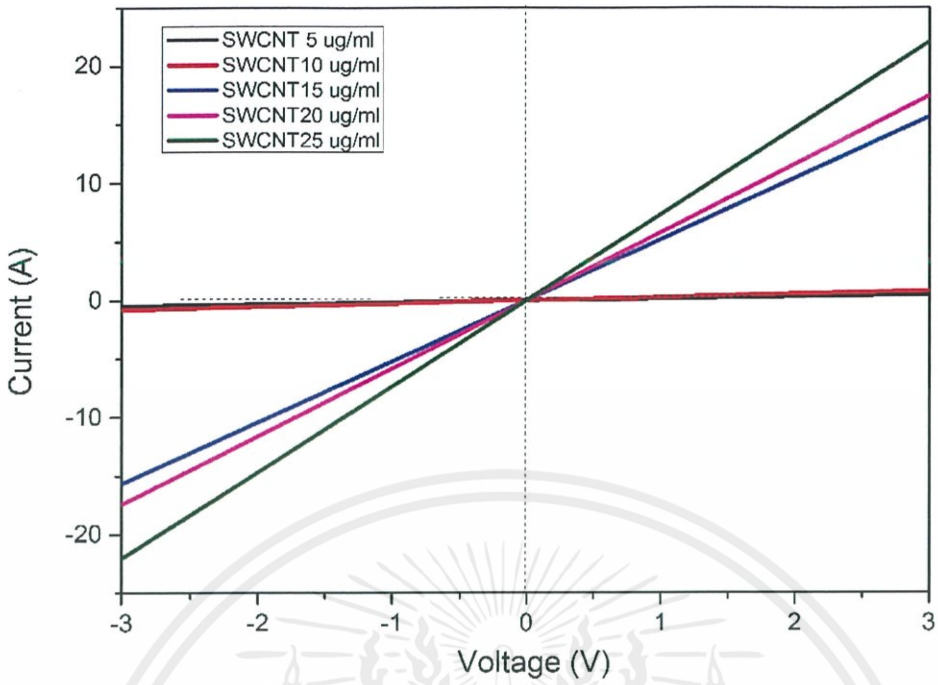


ภาพที่ 4.3 ภาพแสดง (a) พื้นผิวของ SWCNT(5)/PDMS จากเครื่อง Optical microscrope (b) แผนภาพแสดง Raman mapping โดยแสดงพีคที่ตำแหน่ง G mode (1590 cm^{-1}) ของ SWCNT(5)/PDMS (c) SWCNT(10)/PDMS (d) SWCNT(15)/PDMS (e) SWCNT(20)/PDMS และ (f) SWCNT(25)/PDMS

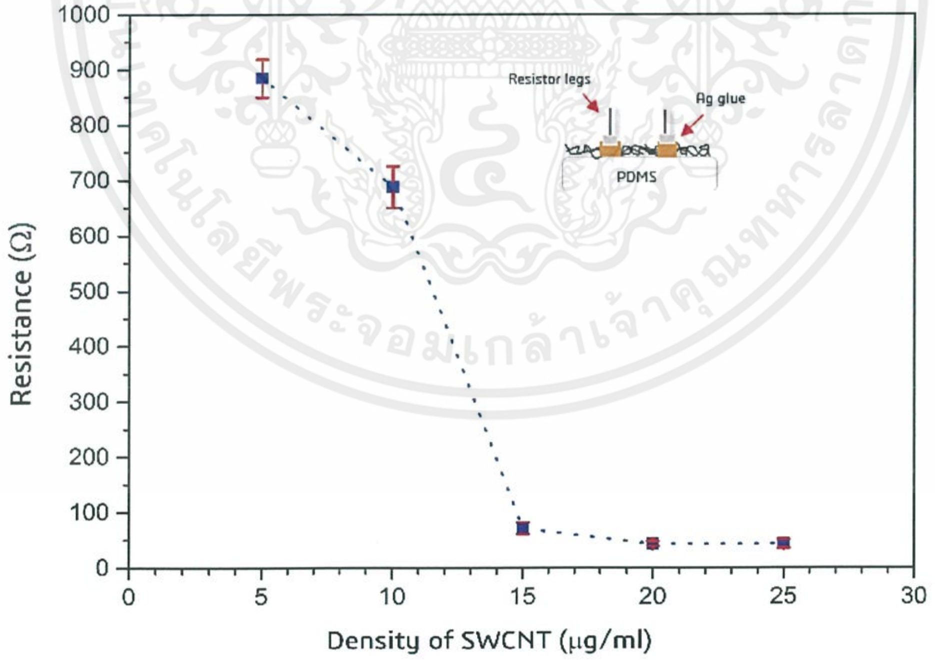
4.3 สมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนบนพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

ในการทดลองได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนบนพอลิไดเมทิลไซลอกเซนโดยใช้ทองเป็นขั้วไฟฟ้า ภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า และภาพที่ 4.5 แสดงค่าความต้านทานของ SWCNT/PDMS ที่เตรียมจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของ SWCNT/PDMS ที่เตรียมจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของ SWCNT/PDMS ที่เตรียมจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของ SWCNT/PDMS ที่เตรียมจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนความเข้มข้นต่างๆ

SWCNT/PDMS	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ω)
SWCNT(5)/PDMS	884.67±34.82
SWCNT(10)/PDMS	687.83±37.20
SWCNT(15)/PDMS	71.39 ±10.46
SWCNT(20)/PDMS	43.38±4.31
SWCNT(25)/PDMS	43.16±7.56

จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (Current) เทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ของ SWCNT/PDMS ในช่วงแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -3 ถึง 3 โวลต์ ในภาพที่ 4.4 พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงถึงรอยต่อแบบ Ohmic และเมื่อคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าภาพที่ 4.5 และตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่อความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น โดย SWCNT(5)/PDMS มีค่าความต้านทานสูงที่สุด โดยมีค่า 884.67± 34.82 Ω และ SWCNT(25)/PDMS มีค่าความต้านทานต่ำที่สุด โดยมีค่า 43.16± 7.56 Ω นอกจากนี้ ยังพบว่าระหว่าง SWCNT(10)/PDMS และ SWCNT(15)/PDMS ค่าความต้านทานลดลงอย่างรวดเร็ว และค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงแทบจะคงที่ใน SWCNT(20)/PDMS และ SWCNT(25)/PDMS ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานนี้ สัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพของ SWCNT ที่ถ่ายโอนย้ายไปยัง PDMS ดังที่แสดงในภาพ FESEM ในภาพที่4.1 โดยในกรณี SWCNT(5)/PDMS และ SWCNT(10)/PDMS มีท่อนาโนคาร์บอนบางส่วนที่โผล่ชี้ขึ้นจากผิวของ PDMS ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในโครงร่างตาข่ายของท่อนาโนคาร์บอน จึงทำให้มีความต้านทานค่อนข้างสูง แต่เมื่อความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นในกรณีของ SWCNT(15)/PDMS โครงร่างตาข่ายของท่อนาโนคาร์บอนมีความต่อเนื่องและฝังตัวที่ผิวของ PDMS ทำให้ค่าความต้านทานลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับ SWCNT(10)/PDMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

4.4.1 ผลของการตอบสนองต่อไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

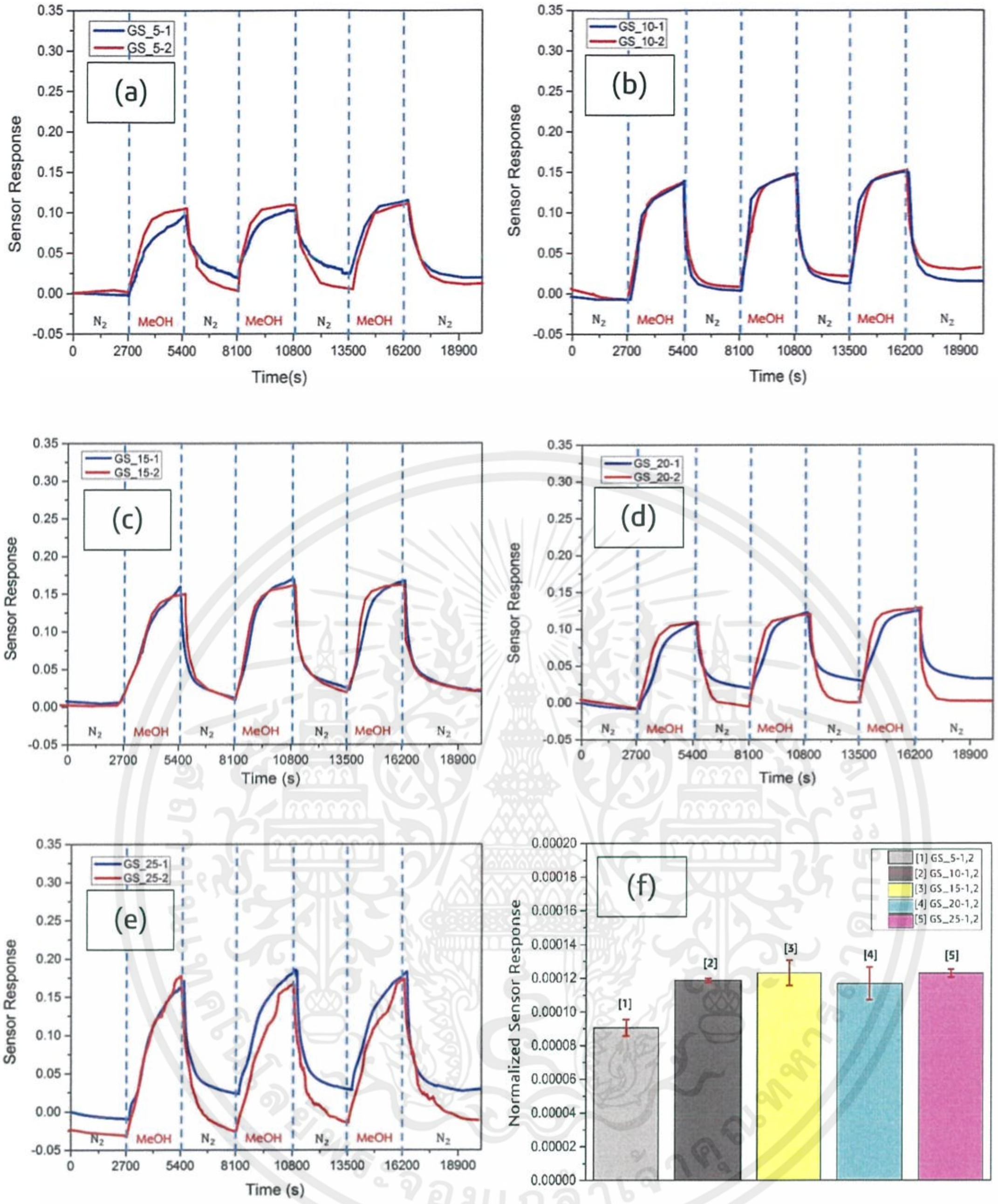
ในการทดลองได้นำ SWCNT/PDMS ที่เตรียมจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ความเข้มข้นต่างๆ มาทำการศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยไอระเหยที่ทำการศึกษา ได้แก่ เมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเบนซีน ในขั้นตอนการตรวจวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อไอระเหยนั้น ได้ปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในระบบทดสอบก่อนเป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำการปรับเบสไลน์ของก๊าซเซนเซอร์ให้มีค่าคงที่ จากนั้นปล่อยไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าไปสู่ระบบด้วยเทคนิคบับบลิง (Bubbling) เป็นเวลา 45 60 30 และ 45 นาทีสำหรับไอระเหยของเมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเบนซีน ตามลำดับ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อไอระเหยของก๊าซเซนเซอร์แต่ละประเภท โดยนำก๊าซเซนเซอร์มาศึกษาการตอบสนองต่อไอระเหยนั้นๆประเภทละจำนวน 2 ตัว โดยกำหนดสัญลักษณ์ ก๊าซเซนเซอร์ GS_5 GS_10 GS_15 GS_20 และ GS_25 โดยให้ GS คือก๊าซเซนเซอร์ หมายเลข _5 _10 _15 _20 และ _25 แสดงถึงความเข้มข้นของสารละลายท่อนาโนคาร์บอน 5 10 15 20 และ 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และหมายเลข -1 และ -2 คือลำดับอุปกรณ์ของก๊าซเซนเซอร์ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของเมทานอลที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ และภาพที่ 4.6 แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ต่อไอระเหยเมทานอล

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของเมทานอลที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ที่เงื่อนไขต่างๆ

ก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor)	ความเข้มข้นของไอระเหยเมทานอล (Parts per thousand, ppt)
GS_5	1123.42
GS_10	1204.01
GS_15	1204.01
GS_20	991.10
GS_25	991.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ (a) GS_5 (b) GS_10 (c) GS_15 (d) GS_20 (e) GS_25 ต่อไอระเหยของเมทานอล และ (f) Normalized Response Sensor ของไอระเหยเมทานอล

จากภาพที่ 4.6 (a)-(e) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าหลังจากการปรับเบสไลน์ด้วยก๊าซไนโตรเจนให้นิ่งแล้วจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าคงที่ และค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของเมทานอล และค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงเมื่อทำการไล่โมเลกุลของไอระเหยเมทานอลด้วยก๊าซไนโตรเจน และจากผลการทดลองพบว่าก๊าซเซนเซอร์ที่ตอบสนองต่อไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเหยของเมทานอลดีที่สุดคือ GS_15, GS_25, GS_10, GS_20 และ GS_5 ตามลำดับ ซึ่งผลการตอบสนองมีความสอดคล้องกับค่า Normalized Sensor Response แสดงดังภาพที่ 4.6(f)

การคำนวณค่าเวลาการตอบสนอง (Response time) ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนแต่ละเงื่อนไขสามารถคำนวณได้จากเวลาที่ใช้ในการตอบสนองที่ 90% เทียบกับค่าการตอบสนองสูงสุดต่อไอระเหยนั้นๆ และในขณะที่เวลาการคืนตัว (Recovery time) ของก๊าซเซนเซอร์สามารถคำนวณได้จาก 10% จากจุดที่เซนเซอร์ใช้ในการกลับคืนตัวสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นภายใต้บรรยากาศที่มีก๊าซไนโตรเจน แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยจะพบว่าเวลาในการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์มีเวลาการตอบสนองไม่แตกต่างกันมาก แต่ที่ก๊าซเซนเซอร์ GS_10 ใช้เวลาในการตอบสนองน้อยที่สุดอาจเป็นผลมากจากลักษณะพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนอยู่บนพื้นผิวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนจำนวนมากเมื่อเทียบกับลักษณะพื้นผิวที่เงื่อนไขอื่นๆ และก๊าซเซนเซอร์ GS_15 ใช้เวลาในการตอบสนองมากที่สุดอาจเป็นผลมากจากพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนที่มีการสัมผัสกับไอระเหยเมทานอลมีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกฝังตัวในพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมากกว่าบริเวณที่มีท่อนาโนคาร์บอนอยู่บนพอลิไดเมทิลไซลอกเซนจากภาพที่ 4.1(c) เป็นผลทำให้ดูดซับไอระเหยของเมทานอลได้น้อยกว่าเงื่อนไขอื่นๆจึงใช้เวลานานกว่าในการตอบสนอง และก๊าซเซนเซอร์ GS_20 ใช้เวลาในการคืนตัวน้อยที่สุดอาจเป็นผลมาจากไอระเหยที่เข้าไปสัมผัสกับบริเวณพื้นผิวที่ทำหน้าที่การสัมผัสกับไอระเหยมีการดูดซับกันแบบอ่อนๆเกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่นๆจึงทำให้สามารถไล่โมเลกุลของไอระเหยได้ง่ายกว่าเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีก๊าซไนโตรเจนเหมือนกัน และเมื่อเปรียบเทียบก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 5 เงื่อนไขพบว่า GS_25 มีบางตัวที่ไม่เสถียรขณะทำการวัดไอระเหยเมทานอลอาจเป็นผลมากจากขั้วไฟฟ้าที่ทำการติดอยู่กับชิ้นงานเองหรืออาจเกิดจากขั้วไฟฟ้าที่อยู่ในระบบวัดก๊าซ ดังภาพที่ 4.6(e)

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนต่อไอระเหยเมทานอล

ก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor)	เวลาการตอบสนอง (Response time ; sec)	เวลาการคืนตัว (Recovery time ; sec)
GS_5	2516	3492
GS_10	2444	3101
GS_15	2588	3427
GS_20	2506	2883
GS_25	2481	3369

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของเอทานอลที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ และภาพที่ 4.7 แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ต่อไอระเหยเอทานอล

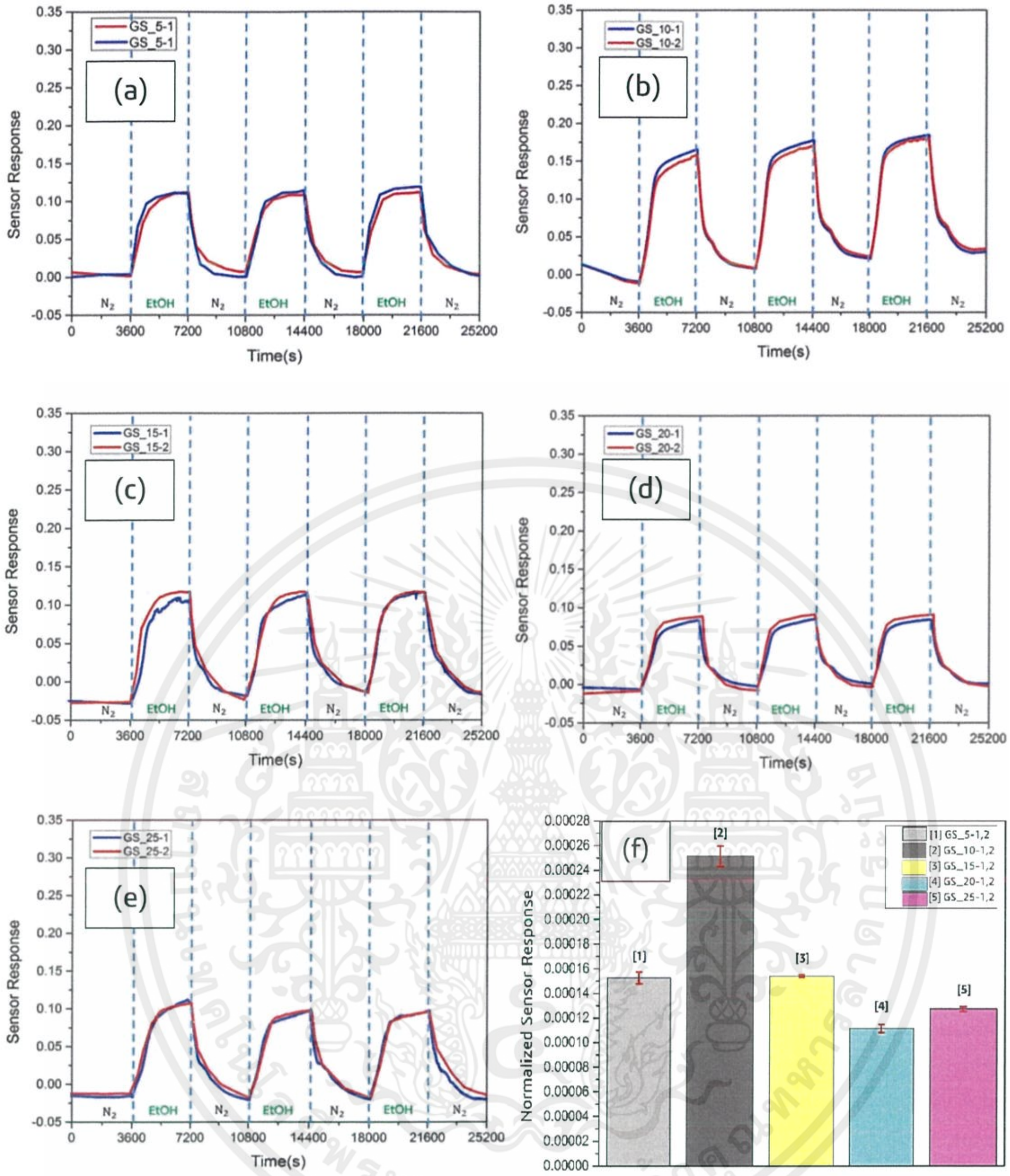
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.7 (a)-(e) จะมีลักษณะการตอบสนองคล้ายกับที่กล่าวไปข้างต้น และจากผลการทดลองพบว่าก๊าซเซนเซอร์ที่ตอบสนองต่อไอระเหยของเอทานอลดีที่สุดคือ GS_10, GS_15, GS_5, GS_25 และ GS_20 ตามลำดับ ซึ่งผลการตอบสนองมีความสอดคล้องกับค่า Normalized Sensor Response แสดงดังภาพที่ 4.7(f) และเมื่อศึกษาผลของเวลาในการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลพบว่าก๊าซเซนเซอร์ GS_10 มีเวลาการตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลเร็วที่สุดหรือใช้เวลาน้อยที่สุดแต่ก๊าซเซนเซอร์ GS_20 ใช้เวลาในการตอบสนองมากที่สุด อาจเป็นไปตามเหตุผลที่ได้กล่าวไปข้างต้น และเวลาในการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ที่ดีที่สุดคือ GS_5 ดังแสดงตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของเอทานอลที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ที่เงื่อนไขต่างๆ

ก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor)	ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล (Parts per thousand, ppt)
GS_5	710.31
GS_10	687.35
GS_15	687.35
GS_20	740.20
GS_25	687.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ (a) GS_5 (b) GS_10 (c) GS_15 (d) GS_20 (e) GS_25 ต่อไอระเหยของเอทานอล และ (f) Normalized Response Sensor ของไอระเหยเอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนต่อไอระเหยเอทานอล

ก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor)	เวลาการตอบสนอง (Response time ; sec)	เวลาการคืนตัว (Recovery time ; sec)
GS_5	3233	3836
GS_10	3223	3999
GS_15	3282	4206
GS_20	3316	3882
GS_25	3272	4172

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของอะซีโตนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ และภาพที่ 4.8 แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ต่อไอระเหยอะซีโตน

จากผลการทดลองภาพที่ 4.8 (a)-(e) พบว่าก๊าซเซนเซอร์ที่ตอบสนองต่อไอระเหยของอะซีโตนดีที่สุดคือ GS_15, GS_25, GS_10, GS_20 และ GS_5 ตามลำดับ ซึ่งผลการตอบสนองมีความสอดคล้องกับค่า Normalized Sensor Response แสดงดังภาพที่ 4.8(f) จากการศึกษาลักษณะการพองตัวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนกับสารละลายอะซีโตนพบว่าเมื่อสารทั้งสองชนิดนี้เกิดการสัมผัสกันจะเกิดการพองตัวขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าการตอบสนองของไอระเหยอะซีโตนของตัวเซนเซอร์เพิ่มมากขึ้นดังจะกล่าวในหัวข้อ 4.1.5 และเมื่อทำการศึกษาร่วมกับลักษณะพื้นผิวที่วิเคราะห์ด้วยภาพ FESEM พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่มากจะเกิดการฝังตัวในพอลิไดเมทิลไซลอกเซนค่อนข้างมากกว่าที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า จึงอาจส่งผลให้ในกรณีของ GS_15 เมื่อสัมผัสกับไอระเหยของอะซีโตนจึงเกิดการพองตัวและเกิดการเพิ่มระยะทางระหว่างท่อนาโนคาร์บอนขึ้นและส่งผลให้ค่าความต้านมานไฟฟ้าของก๊าซเซนเซอร์เพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้ค่าการตอบสนองเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อศึกษาเวลาในการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์พบว่า GS_25 มีการตอบสนองที่เร็วที่สุด และ GS_5 มีการตอบสนองที่ช้าที่สุด เมื่อท่อนาโนคาร์บอนมีความเข้มข้นต่ำ ท่อนาโนคาร์บอนอาจมีการฝังตัวในพอลิไดเมทิลน้อยจึงเป็นผลให้การตอบสนองต่อไอระเหยนั้นช้ากว่าดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น และที่เวลาการคืนตัวเร็วที่สุดคือ GS_5 อาจเป็นผลมาจากว่าโมเลกุลไอระเหยของอะซีโตนมีการดูดซับบนพื้นผิวน้อยกว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนมากๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

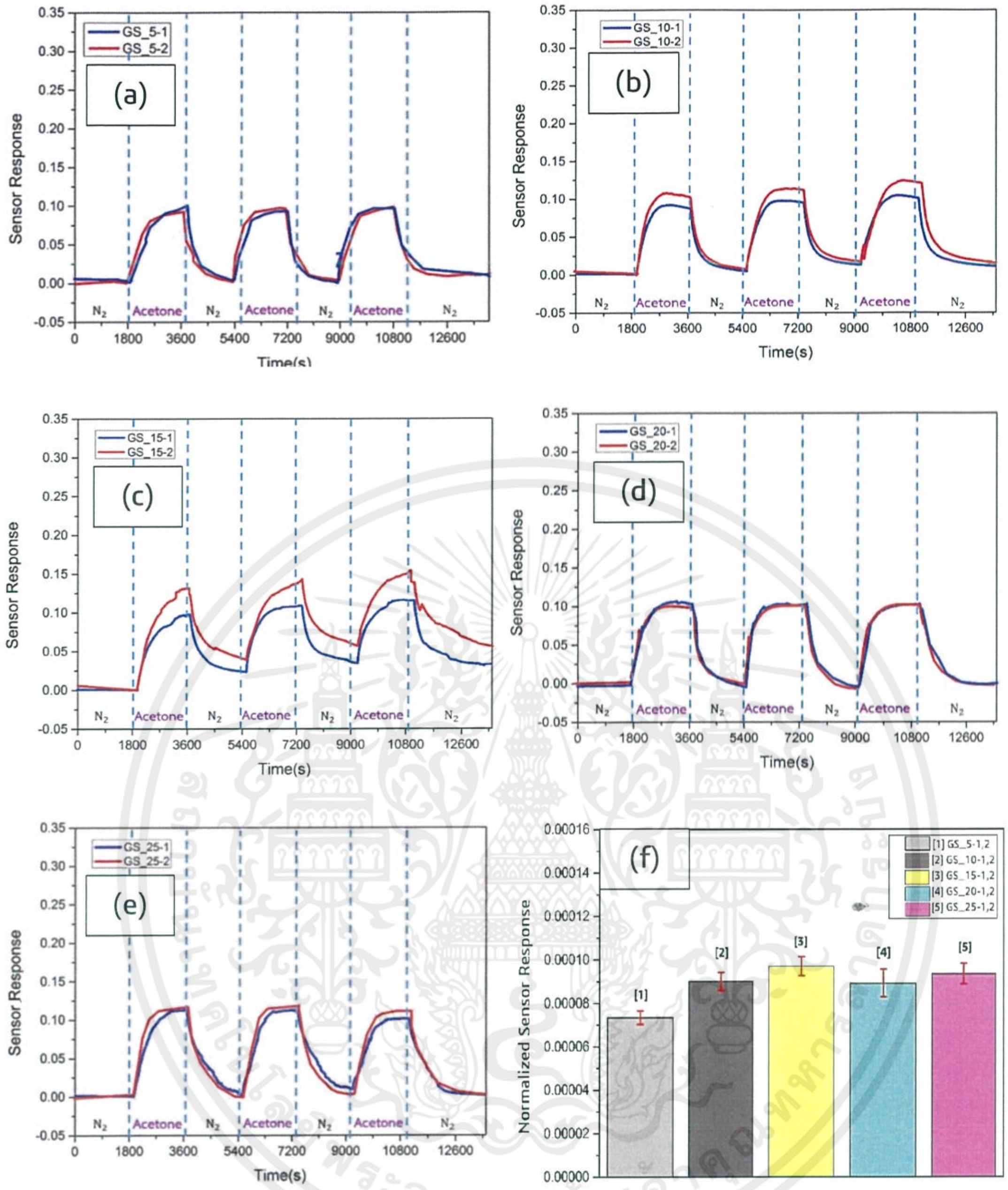
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของอะซีโตนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ และภาพที่ 4.8 แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ต่อไอระเหยอะซีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของอะซีโตนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ที่เงื่อนไขต่างๆ

ก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor)	ความเข้มข้นของไอระเหยอะซีโตน (Part per thousand, ppt)
GS_5	1230.12
GS_10	1132.05
GS_15	1132.05
GS_20	1132.05
GS_25	1132.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ (a) GS_5 (b) GS_10 (c) GS_15 (d) GS_20 (e) GS_25 ต่อไอระเหยของอะซีโตน และ (f) Normalized Response Sensor ของไอระเหยอะซีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนต่อไอระเหยอะซีโตน

ก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor)	เวลาการตอบสนอง (Response time ; sec)	เวลาการคืนตัว (Recovery time ; sec)
GS_5	1668	2024
GS_10	1003	2349
GS_15	1262	2222
GS_20	1075	2615
GS_25	990	2716

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของเบนซีนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ และภาพที่ 4.9 แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ต่อไอระเหยเบนซีน

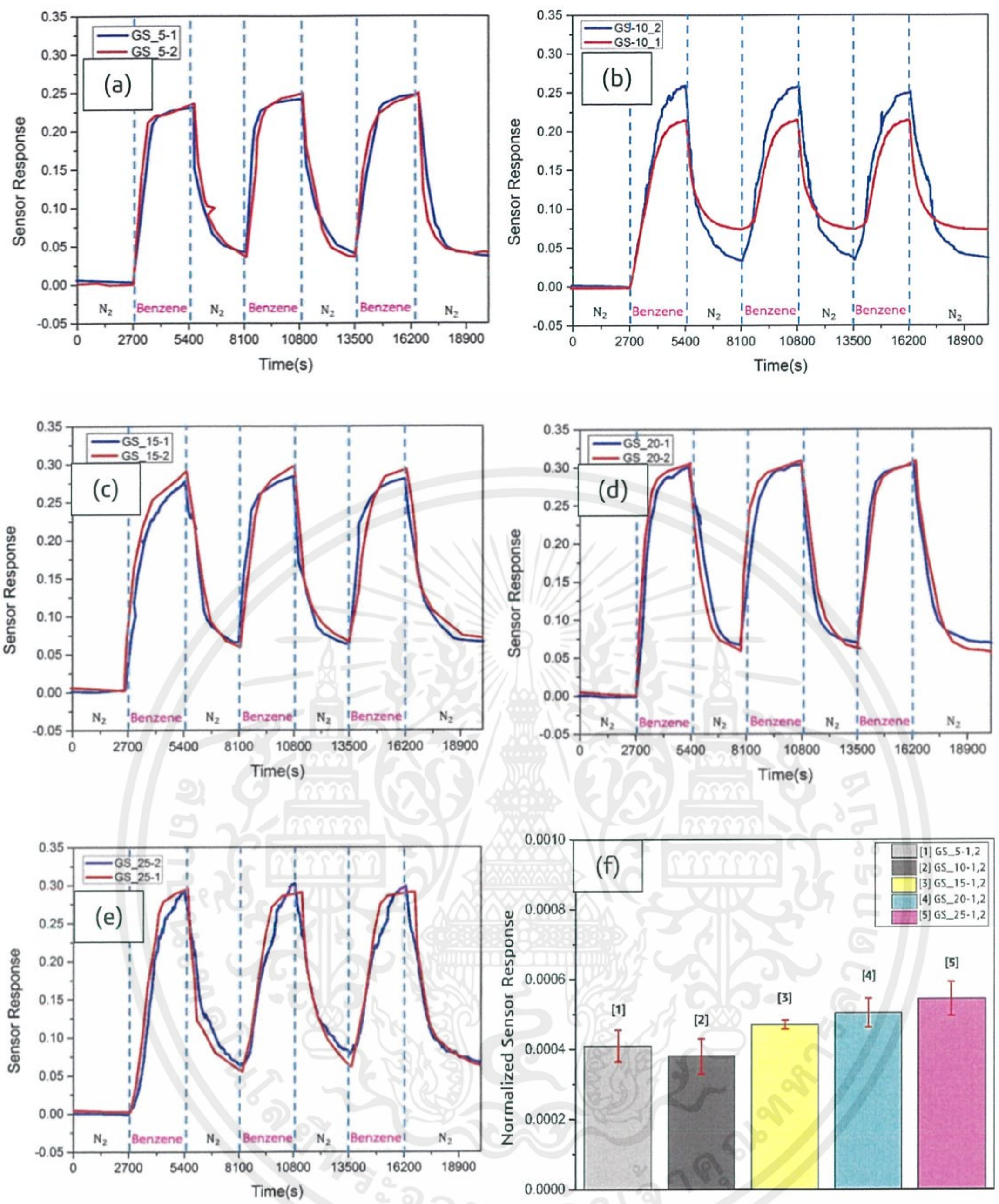
จากผลการทดลองภาพที่ 4.9 (a)-(e) พบว่าก๊าซเซนเซอร์ที่ตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนดีที่สุดคือ GS_25, GS_20, GS_15, GS_5 และ GS_10 ตามลำดับ ซึ่งผลการตอบสนองมีความสอดคล้องกับค่า Normalized Sensor Response แสดงดังภาพที่ 4.9(f) จากการศึกษาลักษณะการพองตัวของพอลิไดเมทิลกับสารละลายเบนซีนพบว่าทั้งคู่สามารถละลายเข้ากันได้จึงทำให้เกิดการพองตัวซึ่งสามารถอธิบายได้ตามการตอบสนองของเบนซีนที่ได้กล่าวไปข้างต้น และจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 4.4.2 ในการทดลองพบว่าก๊าซเซนเซอร์ GS_10 มีการตอบสนองได้ช้าเมื่อเทียบกับก๊าซเซนเซอร์ GS_5 ซึ่งไม่เป็นไปตามที่ได้กล่าวไปข้างต้นว่า ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ฝังเข้าไปในพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมากกว่าเมื่อสัมผัสกับไอระเหยที่สามารถละลายเข้ากันได้กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนจะทำให้เกิดการตอบสนองดีกว่า อาจเป็นผลมาจากเกิดความผิดพลาดขณะทำการวัดหรือถ้าดูจากภาพที่ 4.9(b) จะเห็นได้ว่าค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ทั้ง 2 ตัว มีการตอบสนองที่ไม่ใกล้เคียงกันเมื่อนำทั้ง 2 ตัวมาหาค่าเฉลี่ยจึงทำให้ค่าการตอบสนองของตัวเซนเซอร์มีค่าไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปข้างต้น และเมื่อศึกษาเวลาในการตอบสนองพบว่า GS_5 ใช้เวลาในการตอบสนองเร็วที่สุด ส่วน GS_15 ใช้เวลาในการตอบสนองมากที่สุด และเวลาในการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ GS_20 สามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยของเบนซีนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ที่เงื่อนไขต่างๆ

ก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor)	ความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีน (Parts per thousand, ppt)
GS_5	489.02
GS_10	463.15
GS_15	463.15
GS_20	463.15
GS_25	410.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 แสดงผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ (a) GS_5 (b) GS_10 (c) GS_15 (d) GS_20 (e) GS_25 ต่อไอระเหยของเบนซีน และ (f) Normalized Response Sensor ของไอระเหยเบนซีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

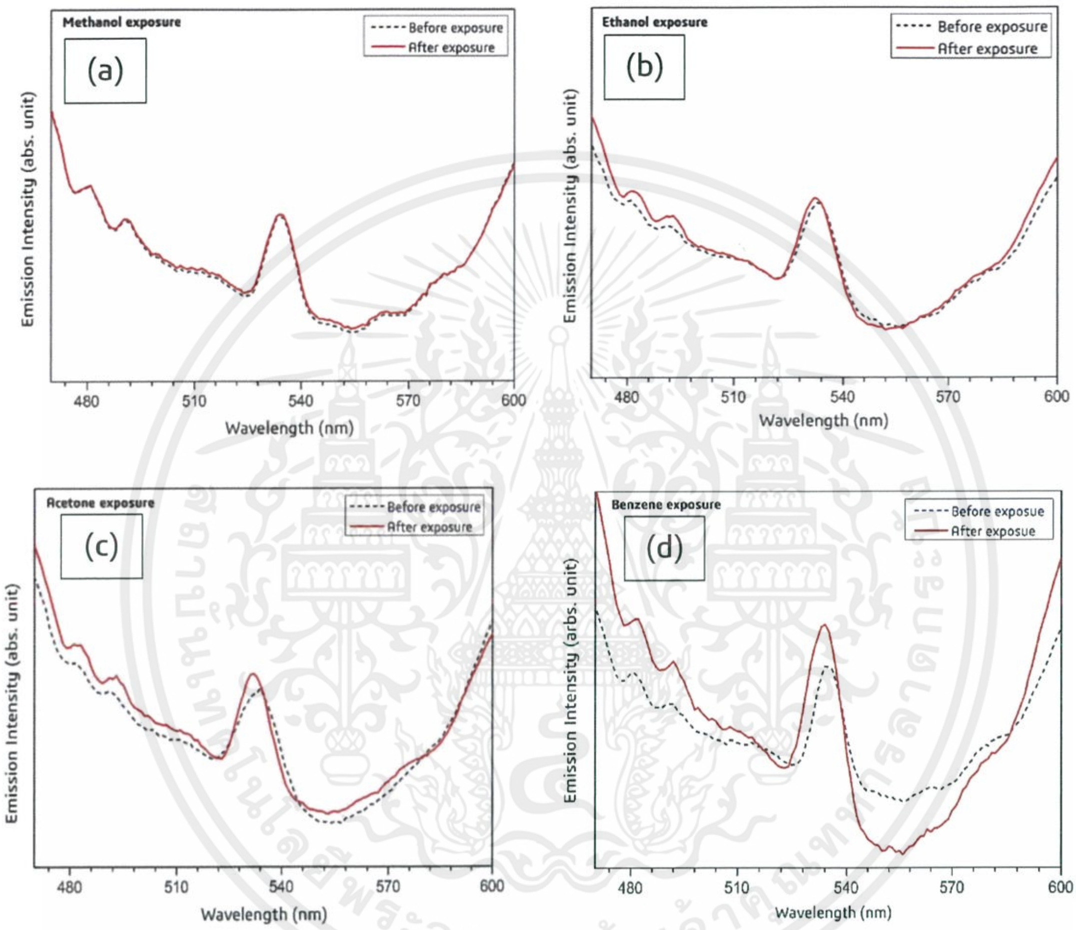
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนต่อไอระเหยเบนซีน

ก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor)	เวลาการตอบสนอง (Response time ; sec)	เวลาการคืนตัว (Recovery time ; sec)
GS_5	1913	3868
GS_10	1968	3746
GS_15	2456	3618
GS_20	2325	3574
GS_25	2303	3830

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescence Spectroscopy)

จากภาพที่ 4.10 เป็นการแสดงการวิเคราะห์ก๊าซเซนเซอร์ SWCNT/PDMS ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนต์สเปคโตรสโคปี เพื่อศึกษาการพองตัวของพอลิเมอร์โดยดูจากค่าความเข้มของแสงในการปลดปล่อยพลังงานออกมาของก๊าซเซนเซอร์เมื่อสัมผัสกับไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.10 แสดงผลฟลูออเรนเซนต์สเปกตรัมของก๊าซเซนเซอร์ SWCNT/PDMS โดยจะแสดงก่อน (เส้นสีดำ) และหลัง (เส้นสีแดง) การสัมผัสไอระเหยของสารอินทรย์ระเหยง่าย (a) เมทานอล (b) เอทานอล (c) อะซีโตน และ (d) เบนซีน เป็นเวลาอย่างละ 60 นาที

จากภาพที่ 4.10 แสดงฟลูออเรสเซนต์สเปกตรัมของก๊าซเซนเซอร์ SWCNT/PDMS ด้วยเทคนิคการวัดฟลูออเรสเซนต์ โดยใช้พลังงานในการกระตุ้นซึ่งความยาวที่ถูกกระตุ้นได้คือที่ความยาวคลื่น 325 นาโนเมตร และเกิดการปลดปล่อยพลังงานฟลูออเรสเซนต์ออกมาจากที่ความยาวคลื่นประมาณ 512 นาโนเมตร ถูกเลื่อนเป็นความยาวคลื่นที่ 528 นาโนเมตร ที่เกิดการเลื่อนไปทางด้านที่มีระดับพลังงานต่ำกว่า (Red shift) อาจเป็นผลมาจากเกิดการฝังตัวของท่อนาโนคาร์บอนภายในพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.10(a) เป็นการวิเคราะห์ก๊าซเซนเซอร์ก่อนและหลังทำการสัมผัสไอระเหยของเมทานอลเป็นเวลา 60 นาที พบว่าเส้นสเปกตรัมของฟลูออเรสเซนต์แทบจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มในการปลดปล่อยพลังงานในรูปฟลูออเรนเซนต์เลย แสดงให้เห็นว่าพอลิไดเมทิลไซลอกเซนไม่เกิดการพองตัวเมื่อมีไอระเหยเมทานอลมาสัมผัส ภาพที่ 4.10(b) เป็นการสัมผัสกับไอระเหยของเอทานอล พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับในกรณีของไอระเหยของเมทานอล และจากภาพที่ 4.10(c) และภาพที่ 4.10(d) เป็นการสัมผัสไอระเหยของอะซีโตน และเบนซีน ตามลำดับ พบว่าค่าความเข้มของแสงที่ถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อก๊าซเซนเซอร์สัมผัสกับไอระเหยเบนซีนมีค่ามากขึ้น

ตารางที่ 4.10 แสดงความสามารถในการละลายของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนกับไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ [42]

Table 1. Solubility Parameters, Swelling Ratios, and Dipole Moments of Various Solvents Used in Organic Synthesis

solvent	δ^a	S^b	μ (D)	ref^c	rank^d
poly(dimethylsiloxane)	7.3	∞	0.6−0.9	8, 14	
benzene	9.2	1.28	0.0	10	14
acetone	9.9	1.06	2.9	8,12	22
ethyl alcohol	12.7	1.04	1.7	8,12	24
methanol	14.5	1.02	1.7	8,12	28

ความเข้มในการปลดปล่อยพลังงานของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนต่อไอระเหยแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความแตกต่างกันของความสามารถในการละลายของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนกับไอระเหยชนิดต่างๆดังตารางที่ 4.10 แสดงความสามารถในการละลาย (δ^a) ของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่มีค่า 7.3 และเมื่อเทียบกับเมทานอลที่มีค่าความสามารถในการละลาย 14.5 จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการละลายมีค่าที่ห่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการละลายของเบนซีนที่มีค่า 9.2 อะซีโตนมีค่า 9.9 และเอทานอลมีค่า 12.7 กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนตามลำดับ จึงทำให้ความสามารถในการพองตัวของพอลิไดเมทิลกับไอระเหยเมทานอลไม่เกิดการพองตัว

นอกจากนี้ค่าความสามารถในการละลายของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีค่าใกล้เคียงกับการละลายของไอระเหยเบนซีนซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้สามารถละลายเข้ากันได้จึงทำให้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนเกิดการพองตัวและอาจส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการขยายตัวหรือเกิดการเพิ่มระยะทางระหว่างท่อนาโนคาร์บอนในพอลิไดเมทิลไซลอกเซนส่งผลทำให้ค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์ขณะทำการวัดไอระเหยเบนซีนมีการตอบสนองดีขึ้น และรองลงมาคืออะซีโตน เอทานอล และเมทานอล ตามลำดับ แต่ในกรณีของอะซีโตนพบว่ามีการตอบสนองน้อยที่สุด ก็อาจเป็นผลมาจากปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

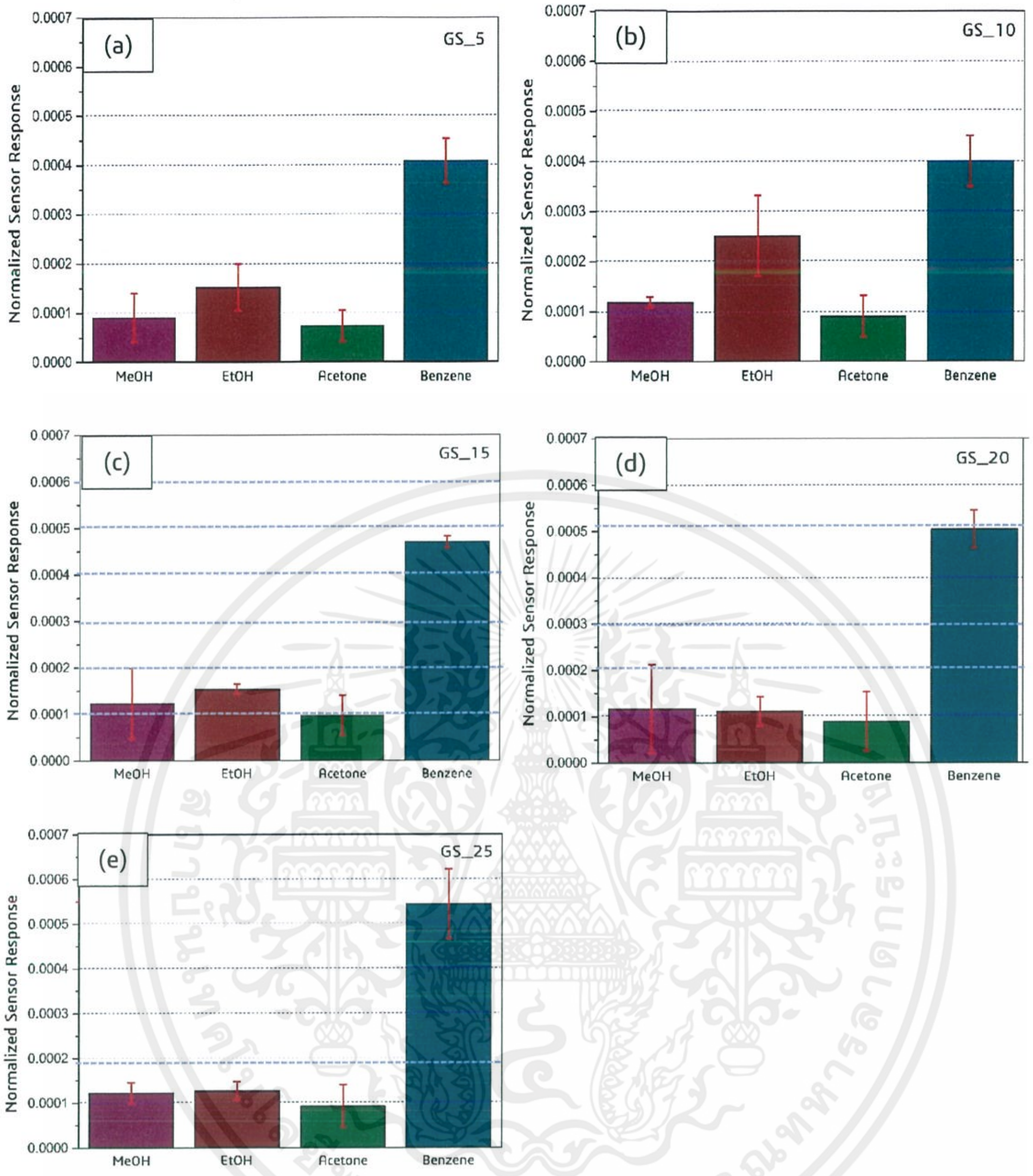
อื่นๆประกอบกันด้วยดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้วในหัวข้อ 4.4.1 ถ้ากรณีที่ไอระเหยของสารอินทรีย์มีค่าความสามารถในการละลายมีค่าเท่ากัน สามารถที่จะยืนยันหรือพิจารณาด้วยค่าอื่น ดังเช่นค่าความมีขั้วของสารตัวทำละลาย (μ) จากตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าค่าความความมีขั้วของเบนซีนมีค่าใกล้เคียงพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าความมีขั้วของอะซีโตน และเอทานอลกับเมทานอลที่มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าพอลิไดเมทิลไซลอกเซนสามารถละลายเข้ากันได้ดีกับเบนซีน มากกว่าอะซีโตน เอทานอลและเมทานอล จึงทำให้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนเกิดการพองตัวมากที่สุดและถ้าสังเกตจากภาพที่ 4.10(d) จะมีพีคที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากอาจเป็นผลมาจากพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือเกิดการทำลายโครงสร้างขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของเบนซีน และจากผลการทดสอบในการวัดไอระเหยของเบนซีนพบว่ามีการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ดีขึ้นแต่เมื่อสัมผัสกับไอระเหยเป็นระยะเวลานานหรือจะกลับนำไปใช้วัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดอื่นกลับพบว่าไม่สามารถนำกลับมาวัดใหม่ได้อาจเป็นผลมาจากท่อนาโนคาร์บอนบนพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือถูกทำลายโครงสร้าง

4.4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิดในกรณี

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความเข้มข้นของไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ในการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่างๆ

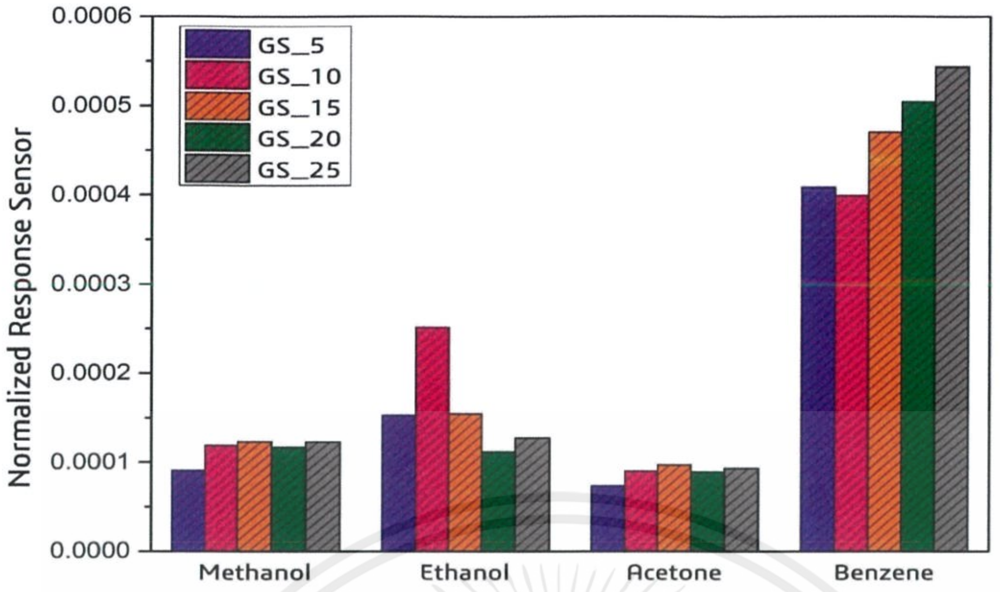
ไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย	ความเข้มข้น (ppt)
เมทานอล	1204
เอทานอล	687
อะซีโตน	1132
เบนซีน	463

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 แสดงกราฟ Normalized Sensor Response ของก๊าซเซนเซอร์ (a) GS_5 (b)GS_10 (c) GS_15 (d) GS_20 (e) GS_25 ต่อไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ

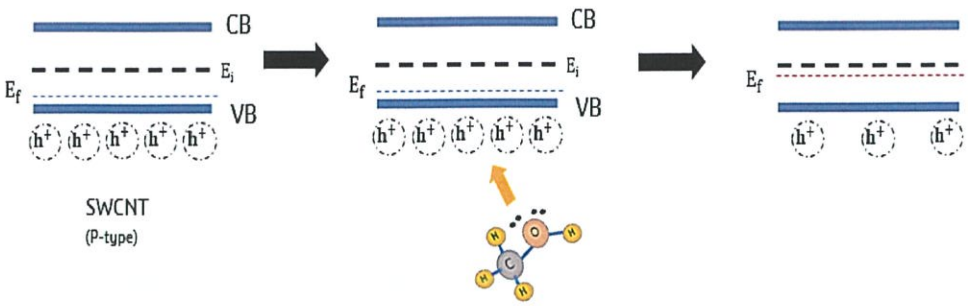
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิดต่อการตรวจวัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ซึ่งกลไกในการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ในงานวิจัยนี้ขึ้นอยู่กับสองกลไกหลักๆคือ กลไกการถ่ายโอนประจุ (Charge transfer) และกลไกการพองตัวของพอลิเมอร์ (Swelling) โดยกลไกการถ่ายโอนประจุเกิดจากความเป็นสารกึ่งตัวนำของท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ซึ่งเมื่อมีไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายเข้ามากระตุ้นส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและจากภาพที่ 4.13 การที่ไอระเหยเมทานอลสัมผัสกับก๊าซเซนเซอร์ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นเนื่องจากพาหะหลักของท่อนาโนคาร์บอนคือ พาหะโฮล (Hole carrier) ส่วนไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เข้ามาสัมผัสจะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (Electron lone pair) ที่มีลักษณะให้อิเล็กตรอนได้ง่ายเพื่อสร้างความเสถียร ดังนั้นอิเล็กตรอนของไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะเข้าไปจับคู่กับพาหะโฮลภายในท่อนาโนคาร์บอนส่งผลทำให้จำนวนพาหะโฮล ซึ่งเป็นพาหะหลักในท่อนาโนคาร์บอนมีค่าลดลง ส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของเมทานอลมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



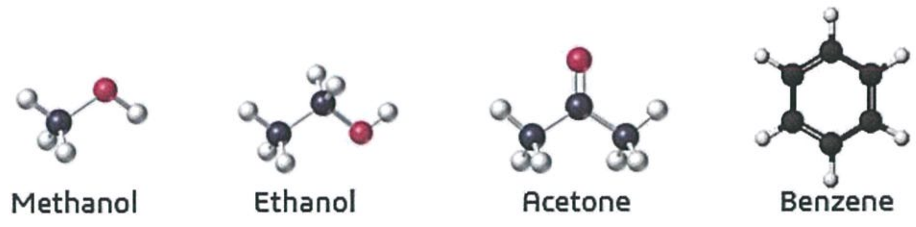
ภาพที่ 4.13 แสดงกลไกการตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลก่อนและหลังการถ่ายโอนประจุของเอทานอลไปยังท่อนาโนคาร์บอน หลังจากการถ่ายโอนประจุจะทำให้ระดับชั้นพลังงานเฟอมิของท่อนาโนคาร์บอนประเภทสารกึ่งตัวนำที่ เปลี่ยนแปลง

และค่าการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ดังตารางที่ 4.11 ที่แสดงขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ระเหยง่ายพบว่าเมทานอลมีขนาดโมเลกุลเล็กที่สุดหรือมีความเกะกะของโมเลกุลน้อยเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดอื่นๆ ดังภาพที่ 4.14 จึงส่งผลให้จำนวนโมเลกุลของเมทานอลสามารถเข้าไปสัมผัสกับพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนที่ทำหน้าหน้าที่ในการตรวจวัดก๊าซได้มากที่สุด และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารอินทรีย์ระเหยง่ายเมทานอลพบว่ามีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดอื่นๆ การที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง คือโมเลกุลมีความเป็นขั้วที่สูงจึงทำให้โมเลกุลสามารถตรึงการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลในท่อนาโนคาร์บอนจึงส่งผลให้พาหะโฮล หรือพาหะหลักลดลงและทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลมีค่ามากที่สุดลองลงมาเอทานอล อะซีโตน และเบนซีนตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 แสดงขนาดโมเลกุลและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย	ขนาดโมเลกุล (Molecular size; cm^3/mol)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant, ε)
เมทานอล	42.5	33.6
เอทานอล	59.1	24.3
อะซีโตน	74.0	20.7
เบนซีน	89.1	2.3

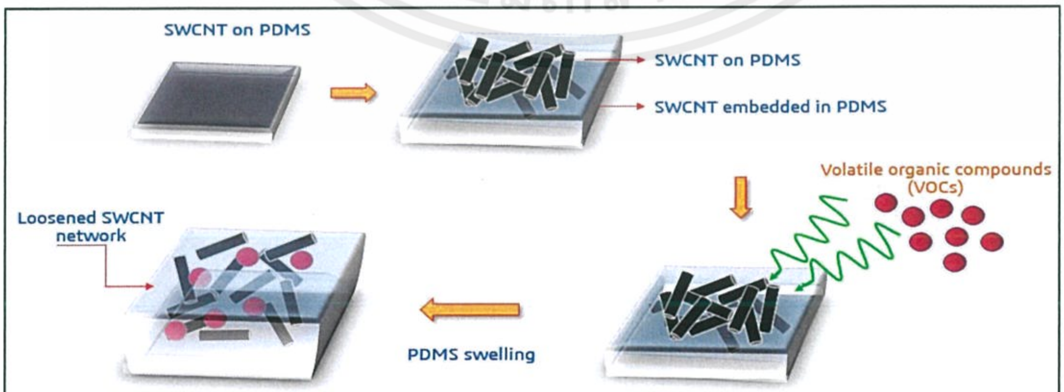
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.14 ภาพแสดงโมเลกุลของเมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเบนซีน ตามลำดับ

ส่วนอีกกลไกคือ การพองตัวของพอลิเมอร์ดังแสดงในภาพที่ 4.15 โดยดูจากความสามารถในการละลายเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์กับไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยเมื่อมีไอระเหยเข้ามาสัมผัสก๊าซเซนเซอร์ SWCNT/PDMS จะส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการขยายตัวหรือเกิดการเพิ่มระยะทางระหว่างท่อนาโนคาร์บอนในพอลิไดเมทิลไซลอกเซนจึงทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นส่งผลให้การตอบสนองต่อไอระเหยได้มากขึ้น จากตารางที่ 4.10 เมื่อทำการศึกษาความสามารถในการละลายพบว่าก๊าซเซนเซอร์ SWCNT/PDMS สามารถตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนได้ดีที่สุด รองลงมาคือ อะซีโตน เอทานอล และเมทานอล ตามลำดับ

จากการศึกษาการเปรียบเทียบที่แสดงดังภาพที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าแสดงกราฟก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 5 เงื่อนไขมีการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนดีที่สุด รองลงมาเอทานอล เมทานอล และอะซีโตน ตามลำดับ ในกรณีการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนที่มากที่สุดอาจเป็นผลมาจากการพองตัวพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเมื่อมีไอระเหยเบนซีนมาสัมผัส รองลงมาควรจะเป็นไอระเหยของอะซีโตน แต่กลับเป็นไอระเหยของเอทานอล และเมทานอลที่มีการตอบสนองต่อก๊าซเซนเซอร์ดีกว่า ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีของ GS_5 และ GS_10 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากกลไกการถ่ายโอนประจุของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากลักษณะท่อนาโนคาร์บอนที่มีลักษณะยืนออกจากพื้นผิวของ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน

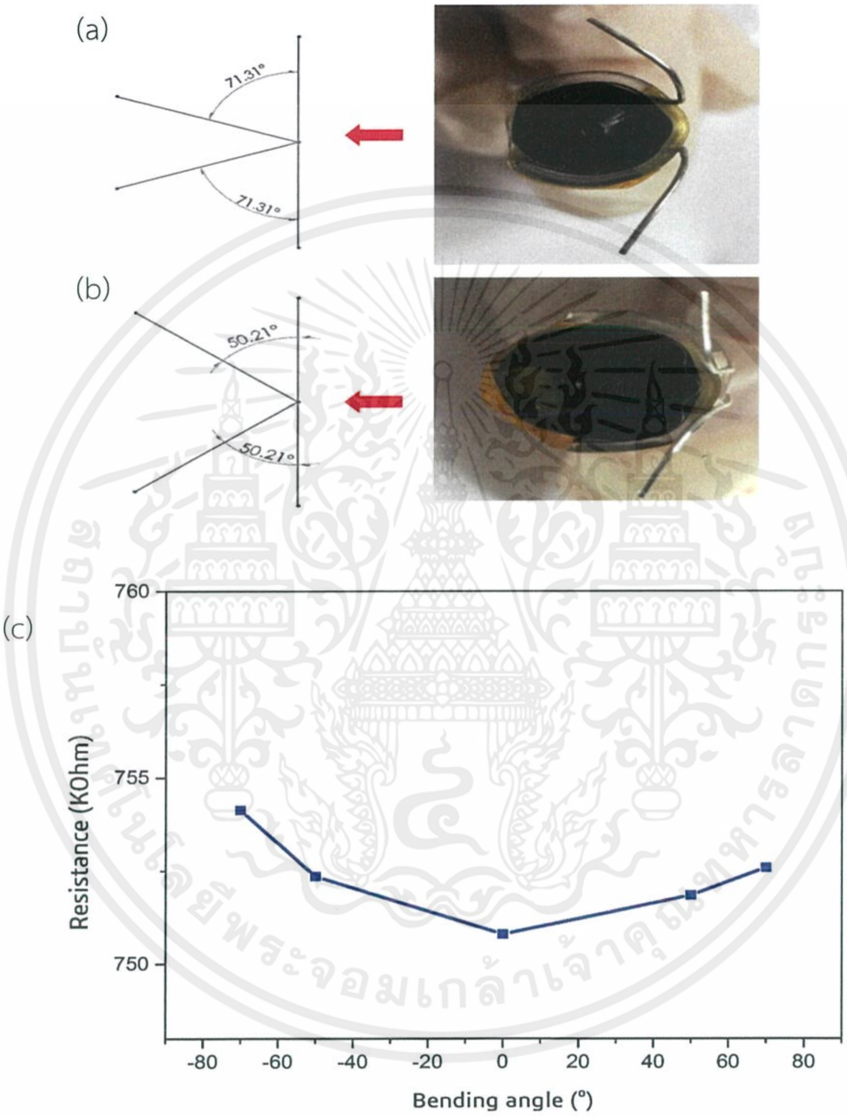


ภาพที่ 4.15 แสดงกลไกการพองตัวของพอลิเมอร์เมื่อสัมผัสไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

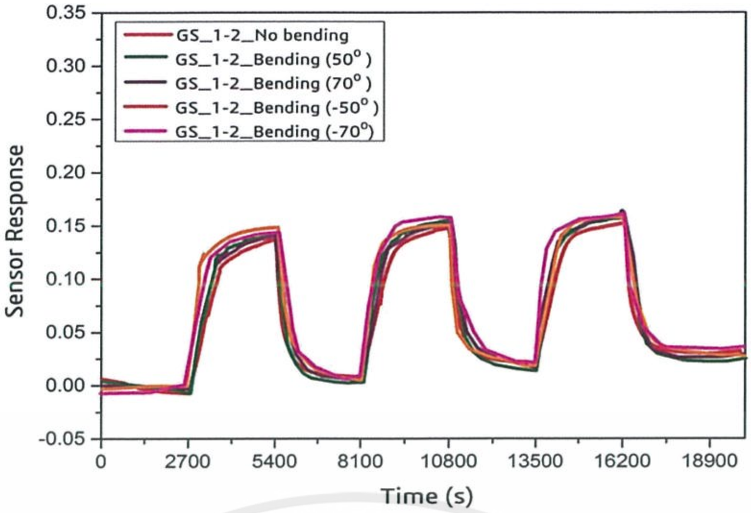
4.4.4 ผลของการวัดสมบัติการงอ

จากภาพที่ 4.14 แสดงประสิทธิภาพการยืดหยุ่นของก๊าซเซนเซอร์ โดยนำก๊าซเซนเซอร์ไปงอ งอด้วยหลอดฉีดยา 3 มิลลิลิตรที่มีรัศมี 4.02 เซนติเมตร (โดยทำมุม 70°) ดังภาพที่ 4.14(a) และหลอดฉีดยา 5 มิลลิลิตรที่มีรัศมี 6.10 เซนติเมตร (โดยทำมุม 50°) ดังภาพที่ 4.14(b) เทียบกับก๊าซเซนเซอร์ที่ไม่ได้ทำการงอ



ภาพที่ 4.14 แสดงก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน โดยใช้มุมในการงอ (a) 70° และ -70° (b) 50° และ -50° (c) ค่าความต้านทานไฟฟ้าของก๊าซเซนเซอร์ภายใต้บรรยากาศปกติเมื่อทำการงอก๊าซเซนเซอร์ที่มุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.15 แสดงการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ที่ความเข้มข้นของสารละลายท่อนาโนคาร์บอน 1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ภายใต้ก๊าซเมทานอลที่ความเข้มข้น 1204 ppt ขณะทำการงอที่มุมต่างๆ จำนวน 3 ลูป

จากภาพที่ 4.14(c) พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าแทบจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการงอก๊าซเซนเซอร์ที่มุมต่างๆ (-70° -50° 0° 50° และ 70°) ซึ่งในภาพเป็นการแสดงการงอของก๊าซเซนเซอร์ GS_10 จากภาพที่ 4.14(d) แสดงประสิทธิภาพการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ต่อความเข้มข้นของไอระเหยเมทานอลที่ 1204 ppt ขณะทำการงอก๊าซเซนเซอร์ในมุมต่างๆ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเนื่องจากอยู่ภายใต้ไอระเหยเมทานอล และเมื่อทำการเปรียบเทียบขณะทำการงอด้วยมุมต่างๆเทียบกับไม่ได้งอจากภาพจะแสดงให้เห็นว่าแทบจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากต่อการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ ซึ่งแสดงว่าก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นที่ทำการงอยังคงมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ดีนี้มีสมบัติความเสถียรเชิงกลที่ดีเมื่อทำการงอในมุมต่างๆกัน อีกทั้งยังแสดงความสามารถในการคืนตัวและสามารถนำกลับมาใช้วัดในครั้งต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลวิจัยและแนวทางในการพัฒนา

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ด้วยเทคนิคการกรองด้วยสุญญากาศ (Vacuum filtration method) และการลอกลายด้วยเทคนิคการถ่ายโอน (Transfer molding) โดยนำท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวมาเป็นวัสดุในการตรวจวัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งในขั้นตอนการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน ได้ศึกษาเงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายท่อนาโนคาร์บอน คือ 5, 10, 15, 20 และ 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ในขั้นตอนการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์ ใช้ขั้วทองในการสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับการตรวจวัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยไอระเหยที่นำมาศึกษาได้แก่ ไอระเหยของเมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเบนซีน และศึกษาสมบัติการยืดหยุ่นของก๊าซเซนเซอร์โดยนำไปวัดการงอ (Bending measurement) ที่มุมในการงอต่างๆ

การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนนั้นพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นั้น เมื่อลอกลายออกมาแล้ว ท่อนาโนคาร์บอนมีความไม่ต่อเนื่อง มีทั้งส่วนที่โผล่บนและส่วนที่ฝังตัวในพอลิไดเมทิลไซลอกเซน แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็น 15 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เป็นต้นไป ท่อนาโนคาร์บอนมีการเรียงตัวค่อนข้างต่อเนื่องในพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และมีค่าความต้านทานประมาณ $43.16 \pm 7.56\ \Omega$

ในส่วนของผลการตรวจวัดไอระเหยต่อระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่างๆพบว่า ท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน สามารถตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนได้มากที่สุด และตอบสนองต่อไอระเหยของเมทานอล เอทานอล และอะซีโตน ได้ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งกลไลการตอบสนองต่อไอระเหยของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนอธิบายด้วยสองกลไกหลัก คือ การพองตัวของพอลิเมอร์ และการแลกเปลี่ยนประจุ จากการทดลองพบว่าการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนที่มากที่สุดนั้นอธิบายด้วยกลไกการพองตัวของพอลิเมอร์เนื่องจากพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีค่าความสามารถในการละลายในเบนซีนมากที่สุด รองลงมาควรจะเป็นไอระเหยของอะซีโตน แต่กลับเป็นไอระเหยของเอทานอล และเมทานอลที่มีการตอบสนองต่อก๊าซเซนเซอร์ดีกว่า ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีที่ความเข้มข้นของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งอาจเป็นผลมาจากกลไกการถ่ายโอนประจุของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากลักษณะท่อนาโนคาร์บอนที่มีลักษณะยื่นออกจากพื้นผิวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังพบว่าท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน สามารถสาธิตการใช้งานเป็นก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นได้ โดยแสดงค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของเมทานอลได้เสถียรที่มุมโค้งงอ $\pm$ 50° และ $\pm$70°

5.2 แนวทางในการพัฒนา

สำหรับในงานวิจัยนี้ควรมีการนำไปพัฒนาต่อ โดยมีแนวทางในการศึกษาและพัฒนาดังต่อไปนี้ คือ

5.2.1 การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนควรมีการศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนระหว่างท่อนาโนคาร์บอนที่อยู่บนพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนและบริเวณที่ฝังตัวในพอลิไดเมทิลไซลอกเซนว่ามีผลต่อโครงสร้างของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนอย่างไร

5.2.2 ในการศึกษาถึงประสิทธิภาพการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ อาจมีการศึกษาพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการละลายเข้ากันกับไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย เพื่อให้ก๊าซเซนเซอร์มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยที่มีความจำเพาะนั้นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5.2.3 ในขั้นตอนการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนสำหรับตรวจวัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายควรศึกษาฐานรองรับแบบยืดหยุ่นชนิดอื่นๆ เพื่อนำมาศึกษาความสามารถในดก๊าซนั้นๆ

5.2.4 การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์แบบยืดหยุ่นสำหรับตรวจวัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายควรมีการนำไปต่อยอดในการนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ที่สามารถพกพาได้อย่างเช่นพวก Internet of things (IOTs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. เบนซีน (Benzene) ประโยชน์ และพิษเบนซีน (Online). Available at: http://www.siamchemi.com/เบนซีน/. (Accessed: 10th September 2017)

2. วิทยา เรืองพรวิสุทธิ์. เคมีวัสดุ เคมีพื้นผิว และปฏิกิริยาเร่ง. คลังเทพ: สำหนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. (2015).

3. ท่อนาโนคาร์บอน (Online). Available at: http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/index_pages.html. (Accessed: 10th September 2017)

4. ผิวไม่เปียกน้ำและน้ำมัน (Online) Available at: https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/1473. (Accessed: 11th September 2017)

5 Lindsay, S. (2010). *Introduction to nanoscience*. Oxford: Oxford University Press.

6 Tuomisto, F. and Makkonen, I. Defect identification in semiconductors with positron annihilation: Experiment and theory. *Reviews of Modern Physics*, **vol. 85(4)**, pp.1583-1631. (2013).

7. Understanding Graphene (Online). Available at: https://investorintel.com/sectors/technology-metals/technology-metals-intel/understanding-graphene-part-1-graphene-and-graphite/. (Accessed: 7th September 2017)

8. What are the physical and chemical properties of diamond and graphite? (Online). Available at: https://www.quora.com/What-are-the-physical-and-chemical-properties-of-diamond-and-graphite. (Accessed: 5th September 2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. Carbon Allotropes (Online). Available at: https://www.nanoshel.com/carbon-allotropes/. (Accessed: 5th September 2017)

10. C60-Fulleren (Online). Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:C60_Fullerene_solution_(1).jpg. (Accessed: 5th September 2017)

11. O'Connell, M. (2007). *Carbon nanotubes*. 2nd ed. London: CRC Press.

12. Resasco, D. D., Bourne Chair, H., Cross, G. L. & Silvy, R. Structure and Applications of Single-Walled Carbon Nanotubes (SWCNTs) Synthesized Using the CoMoCAT ® Method Structure and Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes (SWNTs). 1–6

13. ระบบตรวจจับก๊าซอันตราย (Online). Available at: https://www.thailandindustry.com. (Accessed: 17th October 2017)

14 Khan, W., Sharma, R. and Saini, P. Carbon Nanotube-Based Polymer Composites: Synthesis, Properties and Applications. *Carbon Nanotubes - Current Progress of their Polymer Composites.* (2016).

15 Korotchenkov, G. (2010). *Chemical sensors*. 2nd ed. [New York, N.Y.] (222 East 46th Street, New York, NY 10017): Momentum Press.

16 อักษรกิตติ์, ส. (2005). ท่อนาโนคาร์บอน. *Electricity & Industry Magazine,* (Online) (12), p.4. Available at: http://www.technologymedia.co.th/articledetail.asp?arid=2484&pid=257 (Accessed 14th October 2017).

17 Arora, N. and Sharma, N. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review. *Diamond and Related Materials,* **vol. 50**, pp.135-150. (2014).

18 Thess, A., Lee, R., Nikolaev, P., Dai, H., Petit, P., Robert, J., Xu, C., Lee, Y., Kim, S., Rinzler, A., Colbert, D., Scuseria, G., Tomanek, D., Fischer, J. and Smalley, R. Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes. Science, **vol. 273(5274)**,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pp.483-487. (1996).

19 Rinzler, A., Liu, J., Dai, H., Nikolaev, P., Huffman, C., Rodríguez-Macías, F., Boul, P., Lu, A., Heymann, D., Colbert, D., Lee, R., Fischer, J., Rao, A., Eklund, P. and Smalley, R. Large-scale purification of single-wall carbon nanotubes: process, product, and characterization. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, **vol. 67(1)**, pp.29-37. (1998).

20 Xia, K., Zhan, H. and Gu, Y. Graphene and Carbon Nanotube Hybrid Structure: A Review. *Procedia IUTAM,* **vol. 21**, pp.94-101. (2017).

21 Ren, Z. Synthesis of Large Arrays of Well-Aligned Carbon Nanotubes on Glass. *Science*, **vol. 282(5391)**, pp.1105-1107. (1998).

22 Lalauze, R. *Chemical sensors and biosensors*. London: ISTE. (2012).

23 Capone, S., Forleo, A., Francioso, L., Rella, R., Siciliano, P., Spadavecchia, J., Presicce, D. and Taurino, A. Solid State Gas Sensors: State of the Art and Future Activities. *ChemInform*, **vol. 35(29)**. (2004).

24 Korotchenkov, G. (2011). *Chemical Sensors Comprehensive Sensor Technologies.* Highland Park: Momentum Press.

25 Hansen, C. *Hansen solubility parameters*. Boca Raton: CRC Press. (2007).

26 ชอบศิลป์, ธ. *การพัฒนาตัวตรวจวัดไอระเหยเบนซีนด้วยวัสดุนาโนไฮบริดของท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์.* 1. มหาวิทยาลัยบูรพา. (2015).

27. STAGINUS, J. & Master. Polydimethylsiloxane-coated interdigitated electrodes for capacitive detection of organic pollutant in water. (België geboren te Düsseldorf, 2015).

28 Seethapathy, S. and Górecki, T. Applications of polydimethylsiloxane in analytical chemistry: A review. *Analytica Chimica Acta*, **vol. 750**, pp.48-62. (2012).

29. สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Online). Available at: http://www.oshthai.org/index.php?option=com_content&view=article&id=532:-volatile-organic-compounds&catid=11:chemical&Itemid=202.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Accessed: 30th October 2017)

30 Hannon, A., Lu, Y., Li, J. and Meyyappan, M. Room temperature carbon nanotube based sensor for carbon monoxide detection. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, **vol. 3(2)**, pp.349-354. (2014).

31 Kong, J. Nanotube Molecular Wires as Chemical Sensors. *Science*, **vol. 287(5453)**, pp.622-625. (2000).

32. Parikh, K. *et al.* Flexible vapour sensors using single walled carbon nanotubes. *Sensors Actuators B Chem.* **vol. 113**, 55–63 (2006).

33 Ramli, M., Isa, S., Hasan, A. and Adnan, J. Wearable gas sensor utilising dye-functionalized single-walled carbon nanotubes. *2014 2nd International Conference on Electronic Design (ICED)*. (2014).

34 Woo, C., Lim, C., Cho, C., Park, B., Ju, H., Min, D., Lee, C. and Lee, S. Fabrication of flexible and transparent single-wall carbon nanotube gas sensors by vacuum filtration and poly(dimethyl siloxane) mold transfer. *Microelectronic Engineering*, **vol. 84(5-8)**, pp.1610-1613. (2007).

35 อมรสิทธิ์, แม้น. *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*. 3rd ed. คลังเทพ: กรุงเทพฯ : บริษัท ชวนพิมพ์ 50 จำกัด, pp.58-70. (1991).

36. Diagram of SEM (Online). Available at: http://www.ammrf.org.au/myscope/sem/practice/principles/layout.php. (Accessed: 15th November 2017)

37 อมรสิทธิ์, แม้น. *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*. 1st ed. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, pp.22-40. (1996).

38. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Online). Available at: https://www.slideserve.com/romney/fourier-transform-infrared-spectroscopy. (Accessed: 15th November 2017)

39. Thesis, A. STANDARD PROCEDURE TO DETERMINE THE PERCENTAGE OF CAFFEINE IN COFFEE SEEDS BY UV/VIS SPECTROPHOTOMETER. (Addis Ababa University, 2005).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40. UV- visible spectrophotometer (Online). Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_of_UV_visible_spectro photometer.png.
(Accessed: 17th November 2017)

41 Li, C. and Yue, Y. Fluorescence spectroscopy of graphene quantum dots: temperature effect at different excitation wavelengths. *Nanotechnology*, **vol. 25(43)**, p.435703. (2014).

42 Lee, J., Park, C. and Whitesides, G. Solvent Compatibility of Poly(dimethylsiloxane)-Based Microfluidic Devices. *Analytical Chemistry,* **vol. 75(23)**, pp.6544-6554. (2003)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย)	นางสาวศศิประภา รอดบุญธรรม
ชื่อ-นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)	Miss Sasiphapa Rodbuntum
วันเดือนปีเกิด	10 พฤษภาคม 2539
ที่อยู่	75/256 หมู่ที่ 3 ต.บางตลาด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2557 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนชลประทานวิทยา พ.ศ. 2561 วิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2560 ฝึกงานในหัวเรื่อง Perovskite QOLED Yamagata University ประเทศญี่ปุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้