

ก๊าซเซนเซอร์สารอินทรีย์ระเหยง่ายจากท่อนาโนคาร์บอน
บนกระดาษเซลลูโลส

CARBON NANOTUBE-BASED VOLATILE ORGANIC COMPOUND SENSOR
ON CELLULOSE PAPER



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CARBON NANOTUBE-BASED VOLATILE ORGANIC COMPOUND SENSOR
ON CELLULOSE PAPER



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

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

โครงการพิเศษเรื่อง ก๊าซเซนเซอร์สารอินทรีย์ระเหยง่ายจาก
ท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส
Special Project Title Carbon Nanotube-based Volatile Organic
Compound Sensor on Cellulose Paper
นักศึกษา นางสาวพัชรา อางสมัย
รหัสนักศึกษา 55110034
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2558
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.มยุรี พลเยี่ยม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ณ iewicz ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง ดร.มยุรี พลเยี่ยม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูติไพจิตร)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่.....23.....เดือน.....มิถุนายน.....พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

ก๊าซเซนเซอร์สารอินทรีย์ระเหยง่ายจาก

ท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส

นักศึกษา

นางสาวพัชรา อาจสมัย

รหัสนักศึกษา

55110034

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุนาโน

พ.ศ.

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.มยุรี พลเยี่ยม

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์สารอินทรีย์ระเหยง่ายจากท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส เพื่อการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ที่ยืดหยุ่นได้ พกพาได้ และย่อยสลายได้ งานวิจัยประกอบด้วยสามขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรกการออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซให้สามารถตรวจสอบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อก๊าซที่ความเข้มข้นระดับส่วนในพันส่วนได้ ขั้นตอนที่สองการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส ท่อนาโนคาร์บอนที่นำมาศึกษามีทั้งท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้น ท่อนาโนคาร์บอนถูกทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาเป็นเวลา 30 นาที เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจน และเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร หลังจากนั้นเตรียมท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศโดยควบคุมปริมาณและความหนาของท่อนาโนคาร์บอนด้วยปริมาณของสารละลาย และขั้นตอนที่สามารถทดสอบการตอบสนองต่อไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส โดยอาศัยหลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนที่สานต่อกันเป็นร่างแหในโครงสร้างที่เส้นใยของกระดาษเซลลูโลส โดยอันดับแรกได้ศึกษาปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เหมาะสมต่อการตอบสนองต่อไอของเมทานอล พบว่าการใช้สารละลายท่อนาโนคาร์บอนปริมาณ 30 มิลลิกรัมให้การตอบสนองที่สูงสุดโดยมีค่าความต้านทานเพิ่มมากขึ้นที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการตรวจวัดก๊าซสูงและมีปริมาณไม่มากเกินไปจนบดบังรูพรุนของเส้นใยเซลลูโลส ต่อมาได้ศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยความสามารถในการตอบสนองเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ ไอเมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเบนซีน ตามลำดับ ความสามารถในการตอบสนองต่อไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและขนาดโมเลกุลของสารระเหยนั้นๆ เมทานอลซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด จะสามารถดึงการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลในท่อนาโนคาร์บอนชนิดพีทีทีที่รอยต่อได้มากที่สุด ชัดขวางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล ทำให้ค่าความต้านทานของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นสูงที่สุด นอกจากนี้เมทานอลซึ่งมีขนาดโมเลกุลที่เล็กที่สุด มีอัตราส่วนจำนวนโมเลกุลที่สามารถสัมผัสกับพื้นที่ผิวของท่อนาโนคาร์บอนได้มากที่สุด ส่งผลให้ประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Carbon Nanotube-based Volatile Organic Compound Sensor on Cellulose Paper
Student	Miss Patchara Artsamai
Student ID	55110034
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2015
Special Project Advisor	Dr. Mayuree Phonyiem
Special Project Co-Advisor	Assistant Prof. Dr. Winadda Wongwiriyan

ABSTRACT

This special project studies on carbon nanotube (CNT)-based volatile organic compound (VOC) sensor on cellulose paper. This paper-based device can be used for flexible, portable and biodegradable applications. The special project consists of three parts. The first part is the design of gas sensing measurement system for sensor response characterization down to concentration of parts per thousand (ppt) level. The second part is the fabrication of the CNT-based VOC sensor on cellulose paper. CNTs used in this studied were both single-walled CNT (SWNTs) and multi-walled CNT (MWNTs). CNTs were treated by oxygen plasma for 30 min to functionalize CNT walls with oxygen-containing function groups. The functionalized CNTs were dispersed in ethanol solution with a concentration of 0.01 mg/ml. Finally, the CNT-based sensor on cellulose paper was formed by vacuum filtration method. The amount of CNT and the thickness of CNT film on cellulose paper were controlled by the volume of the CNT solution. The last step is the VOC sensor response measurement of the CNT-based sensor on cellulose paper by measuring the resistance change of the entangled CNT network upon VOC exposure. It was found that CNT sensor on cellulose paper formed from CNT solution 30 ml exhibited the highest sensor response to methanol. This result is attributed to the highest specific surface area and the optimum porous structure of CNT network formed on cellulose paper. Moreover, the CNT-based sensor on cellulose paper highly responded to methanol, ethanol, acetone and benzene, respectively. The sensitivity to VOCs directly depends on the dielectric constant and the molecule size of VOCs. Methanol molecules with the highest dielectric constant induce and hole holes of CNTs at the interface of molecule and CNT, interrupting flowing of holes along CNT, resulted in an increase in resistance. Furthermore, the smallest molecules of methanol vapor

enhanced the ratio of a number of molecules to surface area, resulting in the higher sensor response.



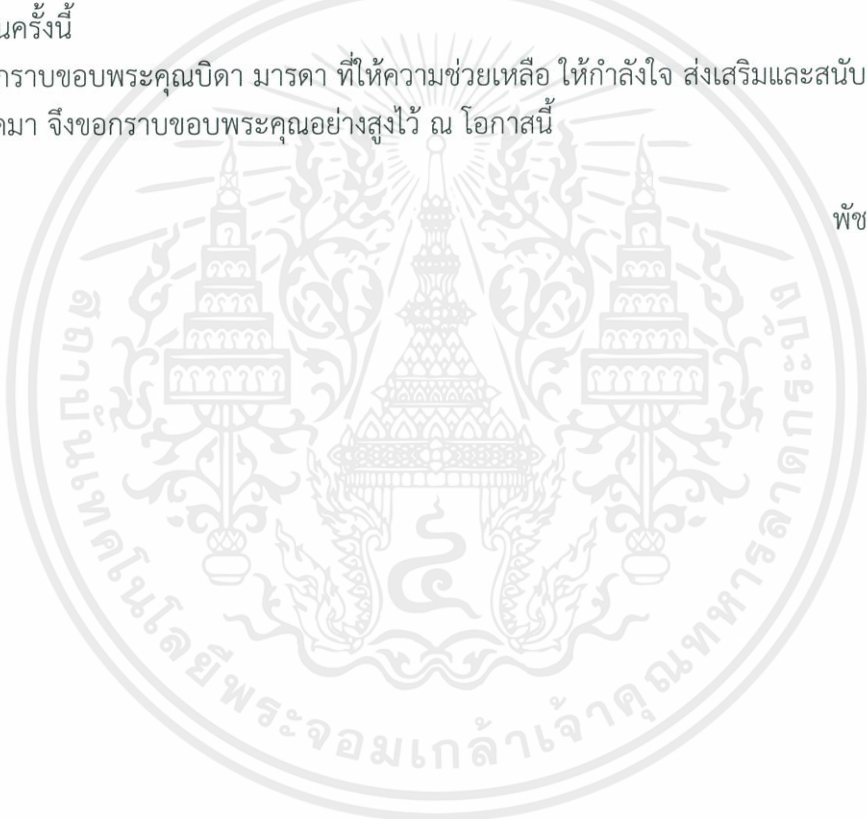
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร.มยุรี พลเยี่ยม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ และ ผศ.ดร.วินัดดา วงวิริยะพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณ ดร.วิน บรรงงปรุ และ นายวรวิทย์ เมืองรัตน์ ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี ขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ในการอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้องที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สำหรับความช่วยเหลือและความปรารถนาดีตลอดงานวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ส่งเสริมและสนับสนุนในทุกๆ ด้านตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

พัชรา อาจสมัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	2
1.4 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ชนิดและลักษณะโครงสร้างของคาร์บอน.....	4
2.2 ท่อนาโนคาร์บอน.....	6
2.3 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน.....	8
2.4 เทคนิคการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	10
2.5 กลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอน.....	12
2.6 นิยามและองค์ประกอบของก๊าซเซนเซอร์.....	13
2.7 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับก๊าซเซนเซอร์ไอระเหย สารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	15
2.8 เครื่องมือวิเคราะห์.....	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	24
3.1 การออกแบบระบบตรวจวัด.....	24
3.1.1 องค์ประกอบระบบตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	24
3.1.2 ขั้นตอนพื้นฐานสำหรับการวัดประสิทธิภาพการตรวจวัด ไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	25
3.1.3 การคำนวณค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	26
3.2 การสร้างก๊าซเซนเซอร์สารอินทรีย์ระเหยง่ายจากท่อนาโนคาร์บอน บนกระดาษเซลลูโลส.....	27
3.2.1 การปรับสภาพผิวท่อนาโนคาร์บอน.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเตรียมก๊าซเซนเซอร์ที่อานาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส.....	28
3.3 การทดสอบประสิทธิภาพก๊าซเซนเซอร์ที่อานาโนคาร์บอน บนกระดาษเซลลูโลส	30
3.4 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและพันธะเคมีของอานาโนคาร์บอน.....	30
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	31
4.1 ผลของปริมาณอานาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส ต่อความสามารถในการตรวจวัดก๊าซ.....	31
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดแบบฟิลด์อิมิสชัน.....	31
4.1.2 ผลของสมบัติทางไฟฟ้า.....	32
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี.....	33
4.1.4 ผลการตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอล	34
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ จากอานาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสต่อความสามารถในการตรวจวัด ไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ	37
4.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ จากอานาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	37
4.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ จากอานาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว.....	39
4.3 การศึกษาการเปรียบเทียบผลของจำนวนผนังอานาโนคาร์บอน บนกระดาษเซลลูโลสต่อความสามารถในการตรวจวัดก๊าซชนิดต่างๆ.....	42
บทที่ 5 สรุปผลและแนวทางการพัฒนา.....	44
5.1 สรุปผลการวิจัย	44
5.2 แนวทางการพัฒนา.....	45
บรรณานุกรม	45
ประวัติย่อของผู้วิจัย	48

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงกลุ่มสารอินทรีย์ระเหยง่าย แบ่งตามโครงสร้างโมเลกุล.....	16
3.1 เงื่อนไขการปรับสภาพผิวท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการทรีตเมนต์ออกซิเจนพลาสมา.....	28
3.2 เงื่อนไขการกรองสารละลายท่อนาโนคาร์บอน.....	29
3.3 ตารางแสดงการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและพันธะเคมีของท่อนาโนคาร์บอน โดยใช้เทคนิคต่างๆ.....	30
4.1 แสดงค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่างๆ.....	33
4.2 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยเมทานอลที่ใช้ในการตรวจวัดก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่างๆ.....	34
4.3 แสดงเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์.....	36
4.4 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดของ ก๊าซเซนเซอร์ S_{M30}	37
4.5 แสดงเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของ S_{M30} ต่อไอระเหยอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ...	39
4.6 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดของ ก๊าซเซนเซอร์ S_{S30}	39
4.7 แสดงเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของ S_{S30} ต่อไอระเหยอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ....	41
4.8 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและขนาดโมเลกุลของไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ.....	41
4.9 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนทั้ง 2 ชนิด.....	43

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลักษณะและโครงสร้างทั่วไปของเพชร	4
2.2 ลักษณะและโครงสร้างทั่วไปของแกรไฟต์	5
2.3 ลักษณะและโครงสร้างทั่วไปของท่อนาโนคาร์บอน.....	5
2.4 ลักษณะและโครงสร้างทั่วไปของฟลูโอเรีน.....	6
2.5 ลักษณะท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว.....	7
2.6 ลักษณะท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (a) การม้วนตัวของแผ่นกราฟีนทั้งสองด้าน มาบรรจบกันตามทิศทางของ Chiral vector (Ch) (b) โครงสร้างลักษณะ Zig-zag (c) โครงสร้างลักษณะ Chiral (d) โครงสร้างลักษณะ Armchair	7
2.7 ลักษณะท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	8
2.8 แผนภาพแสดงการใช้ AFM ในการหาค่าความเค้นแรงดึง	10
2.9 แผนภาพสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จ.....	11
2.10 แผนภาพสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์	11
2.11 แผนภาพสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีเคลือบไอระเหยทางเคมี	12
2.12 แผนภาพจำลองการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนจากฐาน.....	13
2.13 แผนภาพจำลองการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนจากปลาย	13
2.14 แผนภาพแสดงผลการตรวจวัดก๊าซ (A) NO ₂ และ (B) NH ₃ ของเซนเซอร์ จากท่อนาโนคาร์บอน.....	17
2.15 แผนภาพแสดงผลการตรวจวัดก๊าซ NO ₂ ของเซนเซอร์	18
2.16 แผนภาพแสดงค่าการตอบสนองต่อก๊าซ NO ₂ ของเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอน บนฐานรองรับที่แตกต่างกัน	19
2.17 แผนภาพแสดงค่าการตอบสนองต่อก๊าซที่แตกต่างกันของเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอน บนฐานรองรับกระจก	19
2.18 แผนภาพแสดงระบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
2.19 แผนภาพแสดงระบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	21
2.20 แผนภาพแสดงระบบการทำงานของเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี.....	22
3.1 แผนภาพแสดงระบบตรวจวัดก๊าซ.....	25
3.2 แผนภาพการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ.....	28
3.3 แผนภาพการสร้างก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส.....	29
3.4 แสดงกระบวนการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์	30
4.1 แสดงภาพ FESEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสโดยใช้สารละลาย ท่อนาโนคาร์บอนปริมาณ (a) 20 (b) 25 (c) 30 (d) 35 และ (e) 40 มิลลิลิตร	32
4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ...	32
4.3 แสดงภาพรามานสเปกตรัมของ MWNTs และ MWNTs O ₂ plasma	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 แสดงผลตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอลของก๊าซเซนเซอร์ (a) S_{M20} (b) S_{M25} (c) S_{M30} (d) S_{M35} (e) S_{M40} และ (e) Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ...	34
4.5 แสดงตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ S_{M30} ต่อไอระเหยสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ (a) เมทานอล (b) แอทานอล (c) อะซีโตน (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ S_{M30} ต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ.....	38
4.6 แสดงผลตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ S_{S30} ต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ คือ (a) เมทานอล(b) แอทานอล (c) อะซีโตน (d) เบนซีนและ (e) Normalize sensor response ของไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ	40
4.7 กลไกการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างกัน.....	42
4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นและผนังชั้นเดียว ในการตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ.....	43



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการค้นพบท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes, CNTs) [1] จากในอดีตจนถึงปัจจุบันพบว่า CNTs มีลักษณะคล้ายกับการนำแผ่นโครงร่างตาข่ายของอะตอมคาร์บอนหรือเสมือนแผ่นกราฟีน (Graphene sheet) ม้วนเชื่อมติดกันเป็นท่อรูปทรงกระบอก ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออยู่ในระดับนาโนเมตร [2] CNTs นับว่าเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีสมบัติพิเศษต่างๆ มากมาย เช่น สมบัติทางความร้อน ไฟฟ้าเคมีแสงและเชิงกล เป็นต้น จากสมบัติดังกล่าว จึงได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์มากขึ้น โดยเฉพาะนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซเซนเซอร์ เนื่องจาก CNTs มีลักษณะโครงสร้างที่มีขนาดเล็กมีรูพรุนจำนวนมาก มีพื้นที่ผิวสูง มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลก๊าซชนิดต่างๆ มีความไวและการตอบสนองทางไฟฟ้าที่ดี สามารถทำงานที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงได้ ถือเป็นข้อได้เปรียบของก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs

CNTs แบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotubes, SWNTs) และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes, MWNTs) [3] ซึ่งการนำ CNTs มาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์นิยมใช้ CNTs ประเภท SWNTs มากกว่า CNTs ประเภท MWNTs เนื่องจากมีสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า และมีพื้นที่ผิวสูงกว่า

ในปัจจุบันพบว่า นิยมนำ CNTs มาใช้ในเป็นวัสดุสำหรับตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds, VOCs) [4] VOCs เป็นสารที่สามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยในชีวิตประจำวันเราได้รับ VOCs จากผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น ควันบุหรี่ สีทาบ้าน โรงงานอุตสาหกรรม สารที่เกิดจากเผาไหม้ปะปนในอากาศ น้ำดื่ม เครื่องดื่มและอาหาร เป็นต้น ซึ่ง VOCs มีผลกระทบต่อสุขภาพและเป็นอันตรายต่อสุขภาพหากได้รับ VOCs บางชนิดในปริมาณมาก จะทำให้เกิดการทำลายระบบประสาทส่วนกลาง เกิดอาการกดประสาทหรือหมดสติโดยทันที และในการได้รับปริมาณน้อยและนานจะมีปัญหาเรื้อรัง อาจทำให้เกิดมะเร็งและความเสื่อมสภาพของเนื้อเยื่ออวัยวะภายในได้ [5,6]

ผลจากการศึกษาวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาการนำ CNTs มาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัด VOCs ได้สร้างขึ้นบนพื้นผิวแผ่นซิลิกอน เซรามิก แก้ว เป็นต้น ซึ่งมีความสามารถในการตรวจวัดที่ดีเยี่ยม แต่ใช้อุณหภูมิสูงในกระบวนการผลิตและมีราคาแพง ดังนั้นในการสร้างเซนเซอร์บนพื้นผิวกระดาษเซลลูโลสจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะใช้อุณหภูมิต่ำในกระบวนการผลิตสามารถตรวจวัดได้ในอุณหภูมิห้อง มีราคาถูก มีความยืดหยุ่นสูงและย่อยสลายง่าย แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่ผ่านมา การศึกษาเกี่ยวกับเซนเซอร์กระดาษยังมีไม่มากนัก และเซนเซอร์ที่ศึกษาเป็นเซนเซอร์กระดาษสำหรับตรวจวัดแอมโมเนีย และความชื้น [7,8] ยังไม่มีงานวิจัยเกี่ยวกับเซนเซอร์กระดาษสำหรับตรวจวัด VOCs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการสร้างก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs บนพื้นผิวกระดาษเซลลูโลสสำหรับตรวจวัด VOCs ชนิดต่างๆ อาทิเช่น เมทานอล เอทานอล อะซีโตนและเบนซีน โดยทำการศึกษาวิธีการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs บนฐานรองรับที่เป็นกระดาษเซลลูโลส การศึกษาผลของปริมาณ CNTs ประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs และเปรียบเทียบผลของจำนวนแผ่น CNTs บนกระดาษเซลลูโลสต่อความสามารถในการตรวจวัด VOCs ชนิดต่างๆ เพื่อหาชนิดและปริมาณ CNTs ที่เหมาะสมในการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs บนกระดาษเซลลูโลสด้วยเทคนิคการกรองด้วยสุญญากาศ (Vacuum filtration)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของปริมาณ CNTs บนกระดาษเซลลูโลสต่อความสามารถในการตรวจวัด VOCs
- 1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs บนกระดาษเซลลูโลสต่อความสามารถในการตรวจวัด VOCs ชนิดต่างๆ
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการเปรียบเทียบผลของชนิด CNTs บนกระดาษเซลลูโลสต่อความสามารถในการตรวจวัด VOCs ชนิดต่างๆ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

- 1.3.1 ถ้าความเป็นรูปพรุนของโครงข่ายท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสแตกต่างกัน เกิดจากการใช้ปริมาณสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการตรวจวัด VOCs ชนิดเดียวกัน
- 1.3.2 ความสามารถในการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs บนกระดาษเซลลูโลสต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่างกัน จะสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและขนาดโมเลกุลของไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด จะสามารถตรึงการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลในท่อนาโนคาร์บอนชนิดพีที่รอยต่อได้มากที่สุด ชัดขวางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นสูงที่สุด
- 1.3.3 ถ้าชนิด CNTs แตกต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจวัด VOCs ที่ต่างกัน ซึ่งคาดว่า SWNTs จะแสดงค่าการตอบสนองต่อ VOCs มากกว่า เนื่องจาก SWNTs มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูงและคุณสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำ มากกว่า MWNTs

1.4 กรอบแนวคิดในการวิจัย

ผู้วิจัยได้แบ่งการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์เป็น 4 ขั้นตอนคือ

1.4.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนด้วยการออกซิเจนพลาสมาที่รีดเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.3 การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์กระดาษ CNTs โดยใช้เทคนิคการกรองด้วยสุญญากาศ
- 1.4.4 การศึกษาผลของปริมาณ CNTs บนกระดาษเซลลูโลส ประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ และเปรียบเทียบผลของชนิด CNTs ต่อความสามารถในการตรวจวัด VOCs ชนิดต่างๆ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการดำเนินการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1.5.1 การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์กระดาษ CNTs โดยใช้เทคนิคการกรองสุญญากาศ และเพิ่มหมู่ฟังก์ชันด้วยการออกซิเจนพลาสมาที่เริ่มต้นเป็นเวลา 30 นาที
- 1.5.2 วิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว CNTs โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และวิเคราะห์สมบัติความสมบูรณ์เชิงผลึกของ CNTs ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)
- 1.5.3 การศึกษาผลของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสต่อความสามารถในการตรวจวัดก๊าซภายใต้บรรยากาศของไอระเหย VOCs
- 1.5.4 การศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัด VOCs ของก๊าซเซนเซอร์กระดาษ CNTs โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ภายใต้บรรยากาศของไอระเหย VOCs ดังต่อไปนี้ เมทานอล เอทานอล อะซีโตนและเบนซีน
- 1.5.5 เปรียบเทียบผลของชนิด CNTs บนกระดาษเซลลูโลสต่อความสามารถในการตรวจวัด VOCs ชนิดต่างๆ

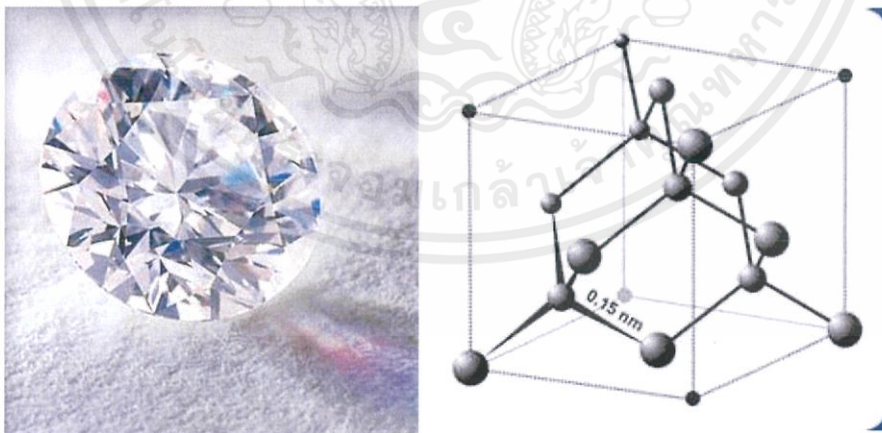
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดและลักษณะโครงสร้างของคาร์บอน [2-10]

คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน คือธาตุที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตบนโลก ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าสารอินทรีย์ทุกชนิดนั้นมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบทั้งสิ้น คาร์บอนเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เช่นใช้เป็นเชื้อเพลิงซึ่งเป็นแหล่งพลังงานของมนุษย์ ก่อให้เกิดการขับเคลื่อนกลไกการพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมากมายควบคู่กับการดำเนินชีวิตของมนุษย์ที่เปลี่ยนแปลงพร้อมๆ สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไป คาร์บอน [9] เป็นธาตุที่อยู่หมู่ 4 ในลำดับที่ 6 ตามตารางธาตุ อิเล็กตรอนในคาร์บอนจัดเรียงตัวรอบนิวเคลียสตามระดับชั้นพลังงานที่แตกต่างกัน เป็นผลให้คาร์บอนมีรูปแบบโครงสร้างที่แตกต่างกัน สามารถใช้มิติเข้ามาอธิบายจะแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบดังต่อไปนี้

2.1.1 โครงสร้างแบบสามมิติ

โครงสร้างแบบสามมิติ พบได้ในรูปของเพชรแสดงดังภาพที่ 2.1 [2] โดยอะตอมคาร์บอนจะสร้างพันธะกับคาร์บอนอะตอมอื่นด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) และจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ sp^3 ทำให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงสูงมาก จากโครงสร้างดังกล่าวจึงทำให้เพชรเป็นวัสดุที่มีความแข็งมากที่สุด ดังนั้นเพชรจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่นอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเครื่องประดับ เป็นต้น



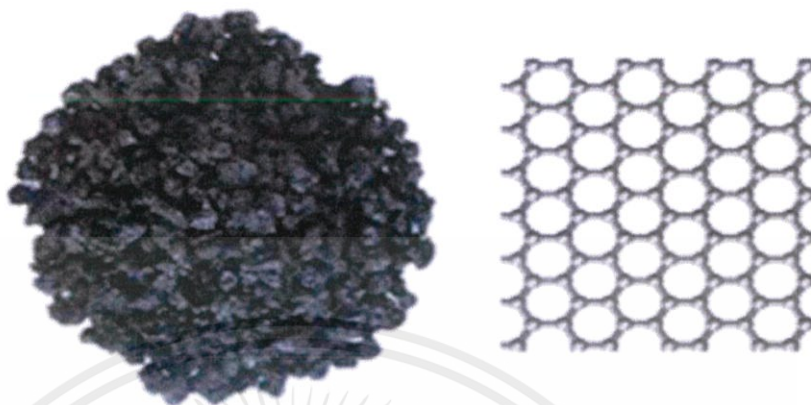
ภาพที่ 2.1 ลักษณะและโครงสร้างทั่วไปของเพชร [2]

2.1.2 โครงสร้างแบบสองมิติ

โครงสร้างแบบสองมิติ พบได้ในแกรไฟต์แสดงดังภาพที่ 2.2 [2] โดยอะตอมคาร์บอนเรียงตัวกันในรูปแบบหกเหลี่ยม ลักษณะเป็นแผ่นวางซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ จะยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

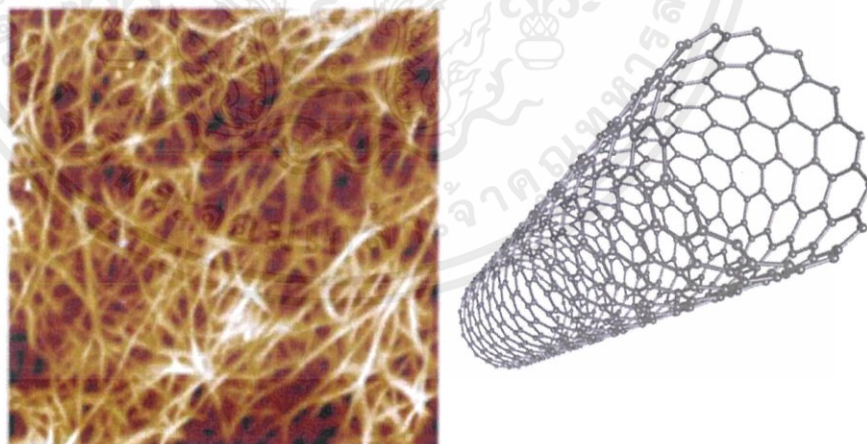
ระหว่างอะตอมคาร์บอนในแนวราบ และยึดเหนี่ยวกันระหว่างชั้นด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force)



ภาพที่ 2.2 ลักษณะและโครงสร้างทั่วไปของแกรไฟต์ [2]

2.1.3 โครงสร้างแบบหนึ่งมิติ

โครงสร้างแบบหนึ่งมิติ พบได้ในท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube, CNTs) [2] แสดงดังภาพที่ 2.3 มีลักษณะคล้ายท่อเกิดจากการม้วนตัวของแผ่นกราฟีน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตรและมีขนาดความยาวอยู่ในระดับไมโครเมตรซึ่งมีค่าความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ทำให้ดูเหมือนเป็นเส้นยาวในแนว 1 มิติ



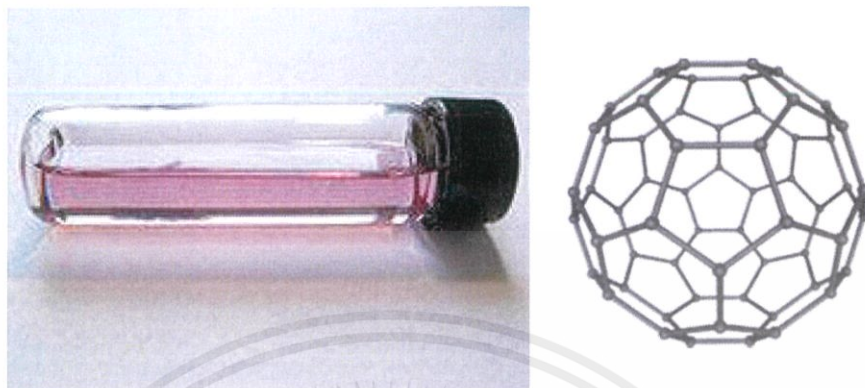
ภาพที่ 2.3 ลักษณะและโครงสร้างทั่วไปของท่อนาโนคาร์บอน [2]

2.1.4 โครงสร้างแบบศูนย์มิติ

โครงสร้างแบบศูนย์มิติ พบได้ใน buckminsterfullerene (Buckminsterfullerene) [10] แสดงดังภาพที่ 2.4 มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเล็กมากๆ จึงสามารถพิจารณาเป็นจุดหรือศูนย์มิติได้ buckmin-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเต็มฟลูเลอรีนที่เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางได้แก่ C60 หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าบั๊กกีบอล (Buckyballs)



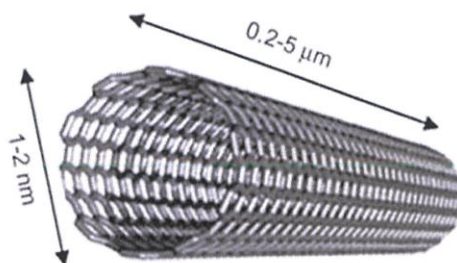
ภาพที่ 2.4 ลักษณะและโครงสร้างทั่วไปของบัคมินสเต็มฟลูเลอรีน [10]

2.2 ท่อนาโนคาร์บอน [11-12]

CNTs ถูกค้นพบครั้งแรกในปีค.ศ. 1991 โดยศาสตราจารย์สุมิโอะอิจิม่า (Sumioliijima) ในห้องทดลองที่เมืองสึคุบา (Tsukuba) ประเทศญี่ปุ่น ขณะทำการสังเคราะห์ฟลูเลอรีนด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc discharge) ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบครั้งแรกนั้นคือท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น จากนั้นในปี ค.ศ. 1993 ศาสตราจารย์อิจิม่าและดอนเบทูน (Don Bethune) นักวิจัยของบริษัทไอบีเอ็ม (IBM) ได้นำเสนอรายงานวิจัยว่าสามารถสร้างท่อนาโนคาร์บอนแบบชั้นเดียวได้โดยการเติมโลหะเร่งปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อย ในระหว่างการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อป้องกันการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟต์ และป้องกันการเกิดเป็นฟลูเลอรีนขนาดเล็ก ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะทางโครงสร้างคล้ายแผ่นแกรไฟต์ที่ม้วนเป็นรูปทรงกระบอก โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดโดยพิจารณาตามจำนวนชั้นของผนังท่อ ดังนี้

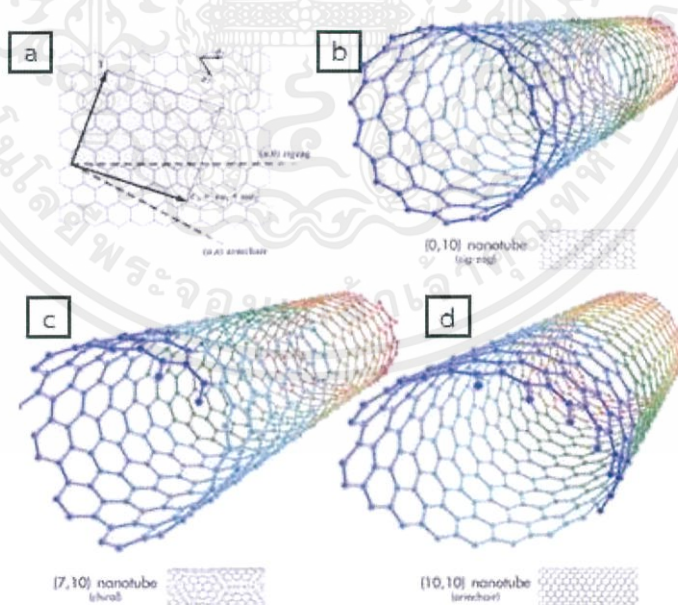
2.2.1 ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (Single-Walled Nanotubes, SWNTs)

ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว [11] เกิดจากการม้วนเข้าด้วยกันของแผ่นแกรไฟต์ทำให้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.4-2 นาโนเมตร และมีความเป็นผลึกสูงหรือมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบแสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ลักษณะท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว [11]

โดยโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน สามารถแบ่งออกได้อีก 3 ชนิดหลักๆ คือ (1) Zig-zag (2) Chiral และ (3) Armchair โดยแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนตามผนังท่อซึ่งเกิดจากรูปแบบของการม้วนตัวของแผ่นกราฟีนทั้งสองด้านมาบรรจบกันตามทิศทางของ Chiral vector (Ch) หรือเวกเตอร์ที่มีทิศทางเส้นรอบวงของท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของคู่อันดับ (n, m) ถ้า $m = 0$ การจัดเรียงอะตอมคาร์บอนเป็นแบบ Zig-zag และ $m = n$ การจัดเรียงอะตอมคาร์บอนเป็นแบบ Armchair แต่ถ้า $m \neq n$ การจัดเรียงอะตอมคาร์บอนเป็นแบบ Chiral แสดงดังภาพที่ 2.6

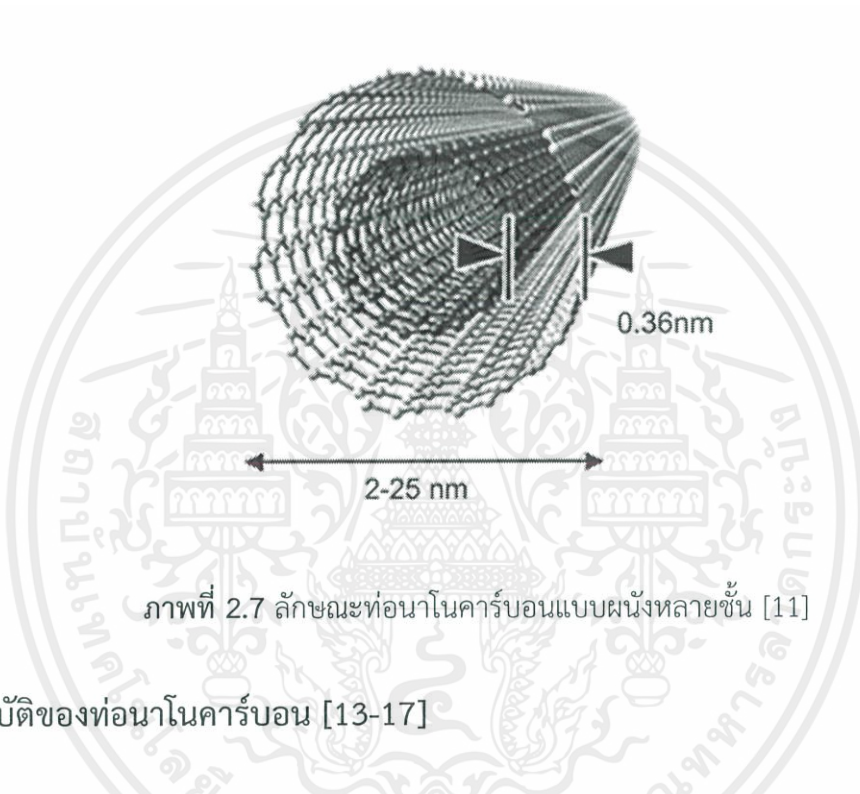


ภาพที่ 2.6 ลักษณะท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (a) การม้วนตัวของแผ่นกราฟีนทั้งสองด้านมาบรรจบกันตามทิศทางของ Chiral vector (Ch), (b) โครงสร้างลักษณะ Zig-zag (c) โครงสร้างลักษณะ Chiral, (d) โครงสร้างลักษณะ Armchair [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multiple-Walled Nanotubes, MWNTs)

ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น [11] เกิดจากท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังซ้อนกันอยู่หลายชั้น ซึ่งผนังท่อที่มีลักษณะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกันพบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นมีขนาดประมาณ 1.5 ถึง 15 นาโนเมตร ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมีขนาดประมาณ 2.5 ถึง 30 นาโนเมตร และระยะระหว่างชั้นมีขนาดประมาณ 0.34 ถึง 0.36 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับระยะห่างระหว่างชั้นในแกรไฟต์แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น [11]

2.3 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน [13-17]

2.3.1 สมบัติทางกายภาพ

ท่อนาโนคาร์บอนมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรประมาณ 1-15 นาโนเมตร (10^{-9} เมตรเท่ากับ 1 นาโนเมตร) และมีความยาวอยู่ในระดับไมโครเมตรประมาณ 10 ไมโครเมตร (10^{-6} เมตรเท่ากับ 1 ไมโครเมตร) ท่อนาโนคาร์บอนจึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่าซึ่งท่อนาโนคาร์บอนยังเป็นโมเลกุลของคาร์บอน ที่มีพื้นที่ผิวมากถึง 1,250 ตารางเซนติเมตร/กรัม มากกว่าคาร์บอนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาถึงสองเท่า ซึ่งถือว่าเป็นสมบัติที่พิเศษของท่อนาโนคาร์บอน

2.3.2 สมบัติทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

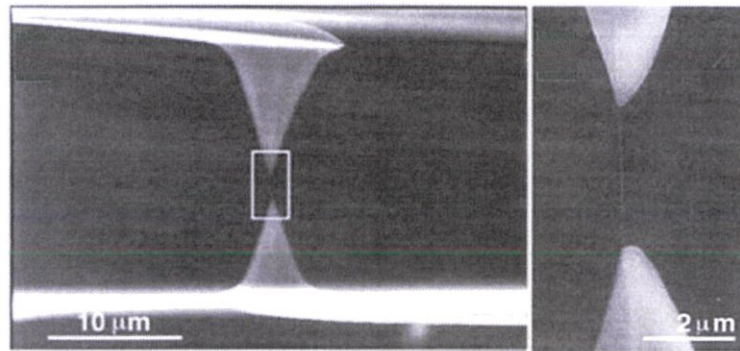
ท่อนาโนคาร์บอนมีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่าฉนวนและต่ำกว่าตัวนำ [13] ทำให้มีการศึกษาวิจัยเพื่อนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร เช่น ไดโอดทรานซิสเตอร์ เป็นต้น จากสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน ที่เป็นได้ทั้งโลหะ (Metal) และสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) โดยสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนสมบัติเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน จะขึ้นอยู่กับความยาวของท่อของแผ่นกราฟีน ตามฟังก์ชัน (n,m) ที่ค่าแตกต่างกันหากค่าฟังก์ชันด้วยสามมีค่าลงตัวท่อนาโนคาร์บอนจะมีสมบัติความเป็นโลหะ แต่ถ้ามีค่าไม่ลงตัวท่อนาโนคาร์บอนจะมีสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำ [14] ซึ่งจากวิธีการดังกล่าวมีข้อยกเว้นในบางกรณี เนื่องจากความขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเล็ก ส่งผลให้สมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนเปรียบเทียบกับทองแดง พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10^9 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ขณะที่ทองแดงมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10^6 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าทองแดง 1000 เท่า [15] และสมบัติทางไฟฟ้าอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของท่อนาโนคาร์บอน คือมีคุณสมบัติควอนตัม (Quantum) ที่สามารถควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอาจเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนที่ละตัวได้ และสามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของท่อนาโนที่วางอยู่ในสนามไฟฟ้า ภายใต้สภาวะสุญญากาศได้ โดยที่ศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนนั้นมีค่าต่ำกว่าขั้วที่ทำจากวัสดุอื่น การจ่ายอิเล็กตรอน ด้วยสนามไฟฟ้านี้สามารถประยุกต์ใช้ในการทำอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ประหยัดพลังงานและมีอายุการใช้งานที่นาน

2.3.3 สมบัติทางกล

ท่อนาโนคาร์บอนถือว่าเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างมีความแข็งแรงสูง เนื่องจากการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแบบ sp^2 คาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของแกรไฟต์ มีความแข็งแรงมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนดังกล่าว รวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร จึงทำให้คาร์บอนแข็งแรงกว่าแกรไฟต์ [16] และยังพบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีความยืดหยุ่นสูงโดยมีค่ามอดูลัส (Young's modulus) สูงถึง 1.4 TPa (Tera Pascal; 10^{12}N/m^2) [14] มีค่าการยืดตัวสูงสุด (Elongation at break) ประมาณ 20-30% และมีค่าความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ในแนวแกนของท่อประมาณ 100 GPa (Giga Pascal; 10^9N/m^2) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุตัวอย่างเช่น เหล็กกล้า พบว่ามีค่าความเค้นแรงดึงสูงกว่าถึง 100 เท่าแต่น้ำหนักเบากว่าประมาณ 6 เท่า ซึ่งท่อนาโนคาร์บอน มีสมบัติในการนำความร้อนที่ดี อีกทั้งยังทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ยาก (Chemically inert) ดังนั้นจึงมีการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์เป็นวัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนอีกด้วย

วิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นนี้ทำได้หลายวิธีเช่น โดยอาศัย Thermal vibration หรือใช้ Scanning force microscopy ไปงอท่อนาโนคาร์บอนโดยยึดปลายหนึ่งไว้แล้ววัดการสั่นสะเทือนในสนามไฟฟ้า และมีการใช้ Atomic force microscopy (AFM) เพื่อจับท่อนาโนคาร์บอนทั้งสองข้างแล้วดึงจนขาดออกจากกัน เพื่อหาค่าความเค้นแรงดึง (Tensile strength) [13,17] แสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แผนภาพแสดงการใช้ AFM ในการหาค่าความเค้นแรงดึง [13]

2.3.4 สมบัติทางความร้อน

ท่อานาโนคาร์บอนมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดีมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเพชรพบว่าท่อานาโนคาร์บอนมีความสามารถในการนำความร้อนมากกว่าเพชรอย่างน้อย 2 เท่า และจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำความร้อนระหว่างท่อานาโนคาร์บอนกับทองแดง พบว่าการนำความร้อนตามแนวแกนท่อของท่อานาโนคาร์บอนมีค่ามากกว่า 3000 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน [9,14] ขณะที่ทองแดงมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 385 วัตต์ต่อเมตรเคลวินเห็นได้ว่าท่อานาโนคาร์บอนมีค่าสภาพการนำความร้อนได้ดีกว่าทองแดงถึง 9 เท่า

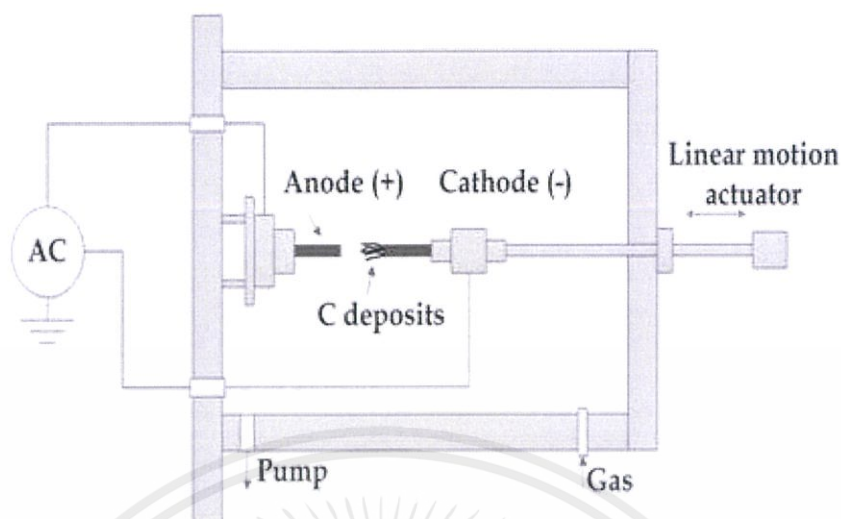
2.4 เทคนิคการสังเคราะห์ท่อานาโนคาร์บอน [15-22]

การสังเคราะห์ท่อานาโนคาร์บอนสามารถทำได้หลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีมีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันสามารถแบ่งวิธีการสังเคราะห์ออกเป็น 3 วิธีหลักๆ ได้ดังนี้

2.4.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc discharge)

การสังเคราะห์ท่อานาโนคาร์บอนด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จ [15,16] แสดงดังภาพที่ 2.9 สามารถทำได้โดยใช้แท่งแกรไฟต์ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีระยะห่างระหว่างแท่งแกรไฟต์ประมาณ 1 มิลลิเมตร ภายใต้ความดันต่ำและก๊าซเฉื่อย แล้วทำการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงที่ช่วงสูง และป้อนศักย์ไฟฟ้าที่ช่วงต่ำ ส่งผลให้เกิดความร้อนสูงจึงทำให้คาร์บอนเกิดการแตกตัวกลายเป็นสถานะพลาสมา จากนั้นคาร์บอนที่แตกตัวจะควบแน่นและก่อตัวเกิดเป็นท่อานาโนคาร์บอนที่ขั้วแคโทด (ขั้วลบ) หรือบริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่า ในการควบคุมขนาด ความยาวหรือจำนวนชั้นของท่อานาโนคาร์บอนสามารถทำได้โดยการควบคุมความดัน อุณหภูมิและความสม่ำเสมอของสถานะพลาสมาโดยท่อานาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นี้ อาจเป็นท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวหรือท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าถ้าใช้โลหะคะตะลิสต์จะได้ท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว โดยวิธีการสังเคราะห์ท่อานาโนคาร์บอนวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายถูก แต่ท่อานาโนคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก

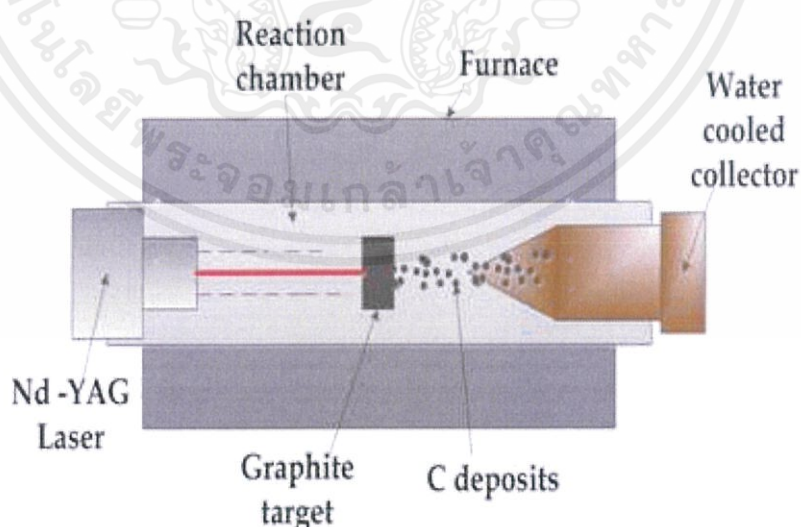
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 แผนภาพสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จ [18]

2.4.2 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Vaporization)

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ [19,20] แสดงดังภาพที่ 2.10 สามารถทำได้โดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูง ยิ่งไปยิ่งเป้าซึ่งเป็นคาร์บอนอยู่ในเตาที่มีอุณหภูมิสูง จนทำให้กลายเป็นไอระเหย โดยที่ไอระเหยของคาร์บอนถูกทำให้เย็นตัวลงทันทีภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียมหรืออาร์กอน ส่งผลให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนที่มีความเป็นระเบียบสูงเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ แต่มีค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ค่อนข้างสูง

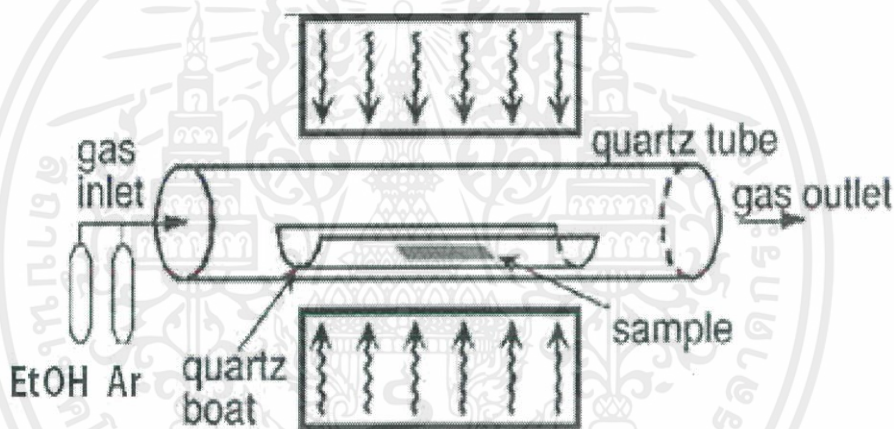


ภาพที่ 2.10 แผนภาพสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 วิธีการเคลือบไอระเหยทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD)

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธีการเคลือบไอระเหยทางเคมี [19,21] แสดงดังภาพที่ 2.11 เป็นกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ด้วยหลักการของการทำให้สารไอของสารตั้งต้นเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนและตกสะสมบนฐานรองรับ โดยใช้ก๊าซไฮโดรคาร์บอน เป็นไอของสารตั้งต้น ในการเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ มีเทน อะเซทีลีน คาร์บอนไดออกไซด์และเอทานอล เป็นต้น เมื่อไอสารตั้งต้นไหลผ่านเข้าไปในท่อที่มีความร้อนสูง ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยที่อุณหภูมิหนึ่งจะทำให้ไอของสารตั้งต้นเกิดการแตกตัวและตกสะสมลงบนฐานรองรับเพื่อสร้างท่อนาโนคาร์บอนวิธีนี้สามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้ โดยการควบคุมขนาดของโลหะคตะลิสต์ (Metal catalyst) และอัตราการไหลของแก๊ส ตามลำดับ ซึ่งโลหะคตะลิสต์เป็นตัวช่วยให้เกิดการสร้างท่อนาโนคาร์บอนซึ่งวิธีการนี้สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ในปริมาณมากและมีความบริสุทธิ์สูง อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัสดุที่สนใจได้



ภาพที่ 2.11 แผนภาพสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีเคลือบไอระเหยทางเคมี [22]

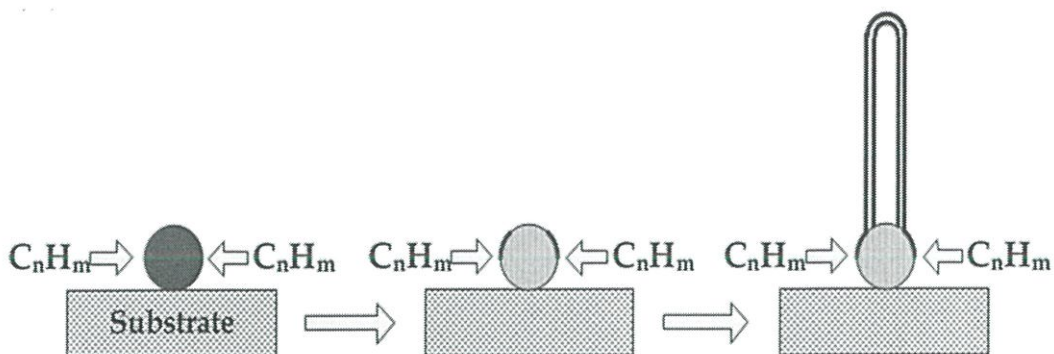
2.5 กลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอน [18-20]

ในปัจจุบันแนวคิดที่ใช้ในการอธิบายกลไกการเกิดของท่อนาโนคาร์บอน เป็นสิ่งที่ยังไม่รู้กันอย่างแน่ชัด แต่มีแนวคิดหนึ่งที่ได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลาย คือแนวคิดแบบ Vapor-Liquid-Solid (VLS) เมื่อพิจารณาจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโลหะคตะลิสต์กับกลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอน สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ [19,20] ได้แก่

2.5.1 การเกิดท่อนาโนคาร์บอนจากฐาน (Base-growth)

เกิดในกรณีที่อันตรกิริยาระหว่างแผ่นรองรับกับโลหะคตะลิสต์มีค่าสูง เมื่อโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนตกแพร่มายังบริเวณผิวด้านบนของโลหะคตะลิสต์ โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจะเคลื่อนตัวมายังด้านข้าง รวมตัวเกิดเป็นท่อนาโนคาร์บอนแสดงดังภาพที่ 2.12

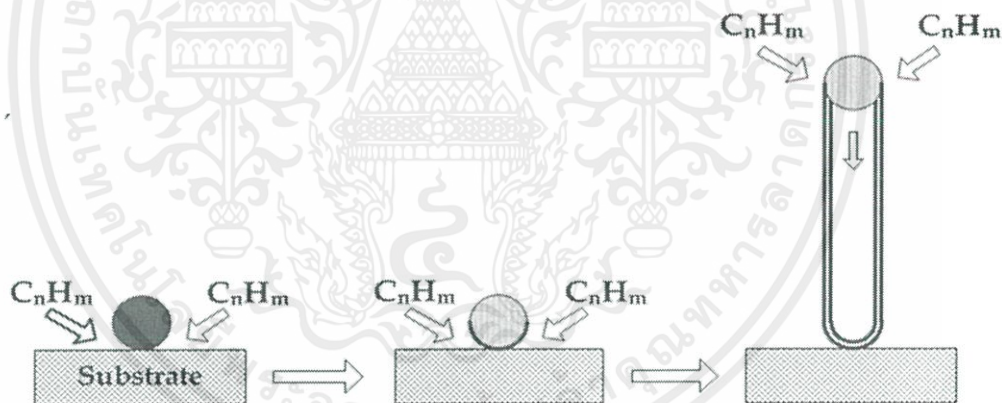
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 แผนภาพจำลองการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนจากฐาน [18]

2.5.1 การเกิดท่อนาโนคาร์บอนจากปลาย (Tip-growth)

เกิดในกรณีที่อันตรกิริยาระหว่างแผ่นรองรับกับโลหะคะตะลิสต์มีค่าต่ำเมื่อโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนแพร่มายังบริเวณผิวด้านบนของโลหะคะตะลิสต์ อะตอมของคาร์บอนแตกตัวและแทรกตัวเข้าไปยังบริเวณด้านข้างของอนุภาคโลหะคะตะลิสต์และดันโลหะคะตะลิสต์ขึ้นไปด้านบนแสดงดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 แผนภาพจำลองการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนจากปลาย [18]

2.6 องค์ประกอบและนิยามของก๊าซเซนเซอร์

2.6.1 นิยามก๊าซเซนเซอร์ [23]

ก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor) คือ วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถรับรู้โมเลกุลของก๊าซที่มากระตุ้นและสามารถตอบสนองในรูปสัญญาณที่สามารถแปลงสัญญาณที่เข้ามา ให้อยู่ในภาพที่เป็นประโยชน์ต่อการประมวลผล โดยก๊าซเซนเซอร์สามารถแบ่งตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.1 Chemical gas sensor

เมื่อวัสดุที่ใช้สร้างเซนเซอร์ตรวจจับก๊าซได้รับก๊าซที่ทดสอบทำให้มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น (Oxidation-reaction) มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนและมีพันธะโคเวเลนต์ (Covalent) เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของก๊าซเซนเซอร์ที่ตรวจจับก๊าซ

2.6.1.1 Physical gas sensor

เมื่อวัสดุที่ใช้สร้างเซนเซอร์ตรวจจับก๊าซได้รับก๊าซที่ทดสอบ โดยโมเลกุลของก๊าซจะดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) ซึ่งเป็นแรงระหว่างพันธะที่มีค่าความแรงน้อยมาก

2.6.2 สมบัติพื้นฐานก๊าซเซนเซอร์ [24]

2.6.2.1 ค่าการตอบสนอง (Response)

ค่าการตอบสนอง คือ ความสามารถในการตอบสนองอย่างรวดเร็วในทันที เมื่อก๊าซที่ต้องการตรวจวัดมาสัมผัสกับเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซ ซึ่งสมบัตินี้มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อก๊าซที่ต้องการตรวจวัดเป็นก๊าซพิษหรือก๊าซไวไฟ หากค่าการตอบสนองมีค่าที่สูง จะทำให้สามารถหลีกเลี่ยงหรือแก้ไขได้ทันก่อนที่จะได้รับอันตรายหรือเกิดเหตุร้ายแรงบริเวณที่ทำการตรวจวัดก๊าซ หากก๊าซเกิดการรั่วไหล

2.6.2.2 ความเสถียร (Stability)

ความเสถียร คือ ผลในการตรวจวัดคงที่ โดยไม่เสื่อมสภาพเร็วในการใช้งาน เพื่อให้เซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซสามารถวัดได้อย่างต่อเนื่อง

2.6.2.3 ความไวในการตรวจวัด (Sensitivity)

ความไวในการตรวจวัด คือ ความสามารถของเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซที่จะบอกความแตกต่างของปริมาณของก๊าซที่ทำการตรวจวัด โดยเมื่อนำไปวัดก๊าซ 2 บริเวณที่มีก๊าซแตกต่างกันน้อยๆ หากเซนเซอร์ไม่สามารถบอกความแตกต่างของก๊าซนั้นได้ อาจส่งผลให้เข้าใจผิดคิดว่าบริเวณนี้มีก๊าซปริมาณเท่ากัน ดังนั้นสมบัตินี้จึงสำคัญมากในกรณีที่วัดก๊าซปริมาณน้อยๆ หรือต้องการความถูกต้องสูง

2.6.2.4 ความจำเพาะ (Selectivity)

ความจำเพาะ คือ ความสามารถในการจำแนกความแตกต่างระหว่างก๊าซตรวจวัด กับก๊าซที่ไม่ต้องการตรวจวัด กล่าวได้ว่า เซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซชนิดหนึ่งๆ ควรมีความสามารถในการตอบสนองต่อก๊าซชนิดเดียวที่ต้องการตรวจวัด ไม่ควรตอบสนองต่อก๊าซชนิดอื่น เพราะจะทำให้สัญญาณรบกวนการวัดได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติต้องพยายามเลือกวัสดุที่เหมาะสมและไวต่อการตรวจวัด

2.6.2.5 พิสัยการวัด (Dynamic range)

พิสัยการวัด คือ ช่วงกว้างของการวัดเซนเซอร์ ในการตรวจวัดก๊าซบางตัวสามารถวัดก๊าซเซนเซอร์ตั้งแต่ 100-1000 ppm แต่บางตัวสามารถตรวจวัดก๊าซได้น้อยกว่า 100 ppm

2.6.2.6 การคืนตัว (Recovery)

การคืนตัว คือ ความสามารถของเซนเซอร์ในการตรวจวัดซ้ำหลายๆครั้ง โดยมีค่าการตอบสนองที่เท่าเดิมกับการตรวจวัดในครั้งแรกเซนเซอร์ที่มีค่าการคืนตัวที่ดี จึงเหมาะสมในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.7 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย

2.7.1 สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic chemicals, VOCs) [5]

สารอินทรีย์ไอระเหย (Volatile organic chemicals, VOCs) คือกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ (Organic Compounds) ที่มีความดันไอมากกว่า 1 มิลลิเมตรปรอท สามารถระเหยเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศได้ง่ายที่อุณหภูมิและความดันปกติ ไอเหล่านี้สามารถจะเปลี่ยนรูปกลับเป็นของเหลวหรือของแข็งตามสภาวะเดิมได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน โมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน อาจมี ออกซิเจน หรือฮาโลเจน เช่น คลอรีน โบรมีน ร่วมอยู่ด้วยเนื่องจากเป็นสารที่สามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้องโดยในชีวิตประจำวันเราได้รับสารอินทรีย์ไอระเหยจากผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น สีทาบ้านควินบุนหรือน้ำยาฟอกสีสารตัวทำละลายในพืชมจากอุปกรณ์สำนักงานอุตสาหกรรมน้ำยาซักแห้งน้ำยาสำหรับย้อมผมและน้ำยาดัดผมสารฆ่าแมลงสารที่เกิดจากเผาไหม้และปะปนในอากาศ น้ำดื่ม เครื่องดื่ม อาหาร เป็นต้นโดยไอระเหยสาร VOCs ในบรรยากาศส่วนมากมาจากอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเลียม สาเหตุหลักมาจากการรั่วไหลในระหว่างการถ่ายเทสารลงถังเก็บ การรั่วของท่อส่งสาร และกลิ่นของน้ำเสีย เป็นต้น [6] ซึ่งสารอินทรีย์ไอระเหยมีผลกระทบต่อสุขภาพและเป็นอันตรายต่อสุขภาพหากได้รับ VOCs บางชนิดในปริมาณมาก จะทำให้เกิดการทำลายระบบประสาทส่วนกลาง เกิดอาการกดประสาทหรือหมดสติโดยทันที และในการได้รับปริมาณน้อยและนานจะมีปัญหาเรื้อรัง อาจทำให้เกิดมะเร็งและความเสื่อมสภาพของเนื้อเยื่อวัยระภายในได้และเมื่อแบ่งกลุ่มสาร VOCs ตามลักษณะโครงสร้างโมเลกุลจะแบ่งได้สองกลุ่มแสดงดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงกลุ่มสารอินทรีย์ระเหยง่าย แบ่งตามโครงสร้างโมเลกุล [6]

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	ตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหยง่าย
กลุ่ม Non-chlorinated VOCs หรือ Non-Halogenated hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีฮาตอคลอรินในโมเลกุล	กลุ่มสาร Aliphatic hydrocarbons เช่น Fuel oils, Gasoline ,Hexane กลุ่มสาร Alcohols, Aldehydes, Ketone เช่น Ethyl alcohol, Methyl alcohol, Formaldehyde กลุ่มสาร Aromatic hydrocarbons เช่น Toluene, Xylenes, Benzene, Nephthalene, Styrene, Phenol)
กลุ่ม Chlorinated VOCs หรือ Halogenated hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีฮาตอคลอรินในโมเลกุลซึ่งสารกลุ่มนี้จะเป็นพิษร้ายแรงและเสถียรกว่าสารกลุ่ม Non-Chlorinated VOCs ในอุตสาหกรรม ส่งผลให้มีระยะสะสมในสิ่งแวดล้อมได้ยาวนานและส่วนมากในกลุ่มนี้จะเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง	1,1,1,2- Tetrachloroethane, 1,1,1-Trichloroethane, 1,1,2,2,-Tetrachloroethane, 1,1,2-Tetrachloroethane, 1,1-Dichloroethane, 1,2,2-Trifluoroethane (Fereon 113), Bromoform, Bromomethane, Carbon tetrachloride, Chloroform, Methylene chloride, Monochlorobenzene, Vinyl chloride, Vinyl trichloride, Vinylidene chloride

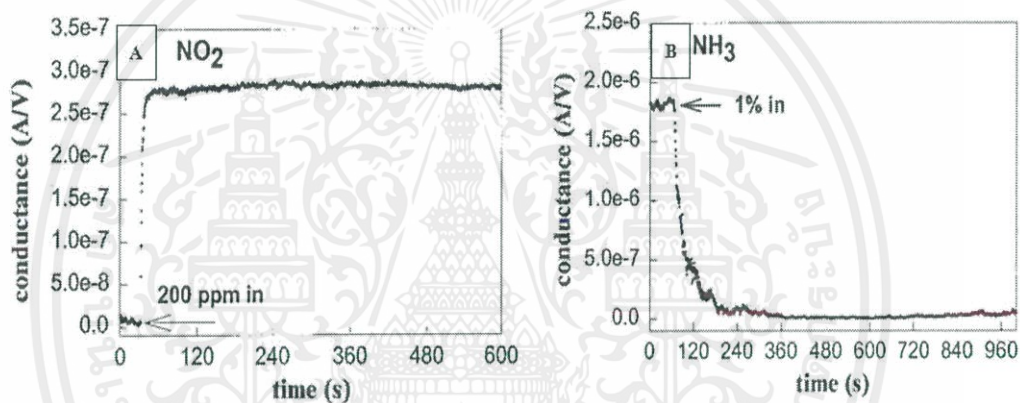
ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมดูแลอย่างเคร่งครัดเพื่อจัดการและควบคุมให้อยู่ภายใต้สภาวะที่พึงประสงค์ได้ ซึ่งหมายถึงการนำสารดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่างๆ ซึ่งการควบคุมสารดังกล่าวสามารถทำได้โดยการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ไอระเหย หรือเรียกว่า ก๊าซเซนเซอร์

2.7.2 ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนานคาร์บอน

ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนานคาร์บอนได้รับความสนใจเป็นอย่างกว้างขวาง เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของท่อนานคาร์บอน ทั้งสมบัติทางไฟฟ้า กายภาพ เชิงกล และเคมี สามารถนำไปใช้ พัฒนาเป็นอุปกรณ์ชนิดต่างๆได้ โดยเฉพาะสมบัติทางกายภาพและไฟฟ้า ทำให้ท่อนานคาร์บอนได้รับความสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านก๊าซเซนเซอร์ เนื่องจากมีลักษณะทางโครงสร้างที่เหมาะสมแก่การตรวจวัดก๊าซโดยมีลักษณะโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวสูง มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลก๊าซชนิดต่างๆ มีความไวและการตอบสนองทางไฟฟ้าที่ดี สามารถทำงานที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง รวมทั้งมีต้นทุนที่ต่ำกว่าก๊าซเซนเซอร์ในท้องตลาดทั่วไป

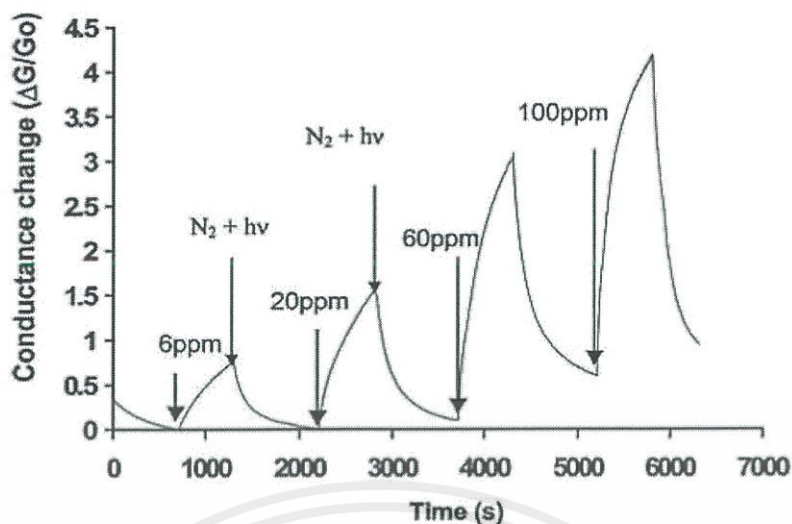
จากงานวิจัย ที่ผ่านมามีการนำท่อนานคาร์บอน มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดก๊าซชนิดต่างๆ เช่น NO₂, O₂, NH₃, CO₂ รวมทั้งสารอินทรีย์ไอระเหย เป็นต้น ดังเช่น งานวิจัยของ Jing Kong เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และคณะ [25] เป็นการตรวจวัดก๊าซโดยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน พบว่ามีการทดลองการนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้เป็นก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว โดยสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีเคลือบโอรเซเหยเคมีลงบนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ผลปรากฏว่าค่าการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ที่ค่าความเข้มข้น 200 ppm แสดงดังภาพที่ 2.14 (A) แสดงผลให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอน ใช้เวลาในการตอบสนองประมาณ 2-5 วินาที ค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงประมาณ 100-1000 เท่าจากเดิม เมื่อเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานก่อนและหลังสัมผัสก๊าซ และเมื่อนำตัวอย่างเดิมไปตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 1% แสดงดังภาพที่ 2.14 (B) พบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 10-100 เท่าจากเดิม เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานก่อนและหลังสัมผัสก๊าซ จึงแสดงให้เห็นว่าท่อนาโนคาร์บอนมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซ NO_2 และ NH_3 ได้



ภาพที่ 2.14 แผนภาพแสดงผลการตรวจวัดก๊าซ (A) NO_2 และ (B) NH_3 ของเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอน [25]

จากงานวิจัยของ Jing Li และคณะ [4] ได้ทำการทดสอบโดยการนำท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว ตรวจวัดก๊าซ NO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆที่อุณหภูมิห้อง พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อสัมผัสกับก๊าซ NO_2 แสดงดังภาพที่ 2.15 โดยได้มีการไล่ก๊าซ NO_2 โดยใช้ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และแสงยูวี (UV light) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เวลาในการคืนตัวที่น้อยลง และเป็นการพัฒนาคุณสมบัติการนำกลับมาใช้ใหม่



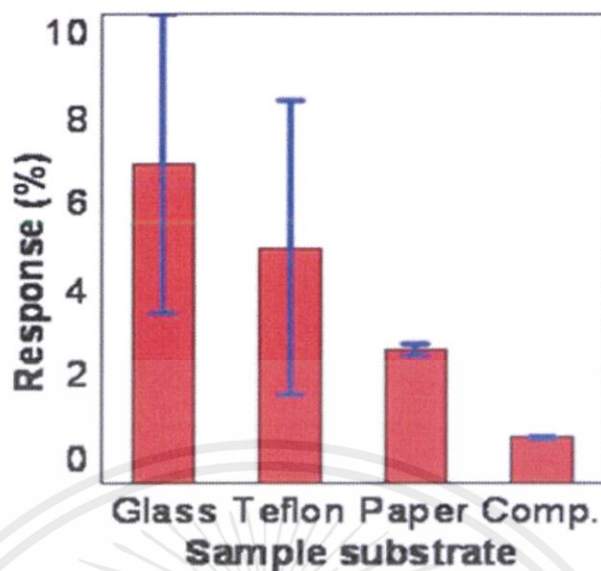
ภาพที่ 2.15 แผนภาพแสดงผลการตรวจวัดก๊าซ NO_2 [4]

ในส่วนการตรวจวัดก๊าซโดยการศึกษากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน จากงานวิจัยของ Woo-Sung Cho และคณะ [26] ได้นำท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นมีสมบัติสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ใช้ตรวจวัดก๊าซ NO_2 ผลปรากฏว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าลดลง แสดงว่าท่อนาโนคาร์บอนเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้แก่ก๊าซ ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีจำนวนโฮลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งโฮลถือเป็นส่วนสำคัญในการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนชนิดพี จึงทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าลดลง

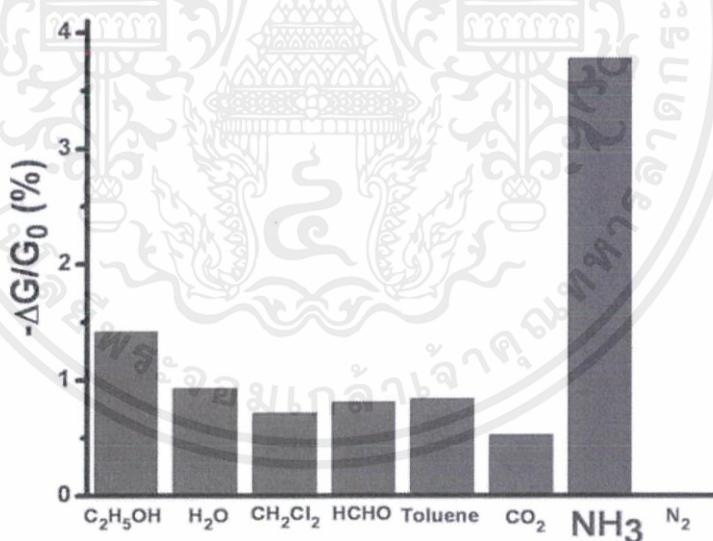
2.7.3 ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส

จากงานวิจัยส่วนใหญ่ อุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์นิยมสร้างบนฐานรองรับจาก กระดาษเพรอน เซรามิกและควอทซ์ เป็นต้น เนื่องจากก๊าซเซนเซอร์บนฐานรองรับเหล่านี้ มีสามารถตอบสนองและการคืนตัวต่อก๊าซได้ดี มีความแข็งแรง ทนต่ออุณหภูมิสูงและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่มีข้อเสียจากการใช้พลังงานสูงในการกระบวนการผลิต มีความยืดหยุ่นน้อยและราคาแพง จึงทำให้ในการใช้กระดาษเซลลูโลสในการเป็นฐานรองรับได้รับความนิยมมากขึ้น เพราะมีคุณสมบัติ ความยืดหยุ่นสูงราคาถูกและย่อยสลายได้ง่ายจากงานวิจัยของ Jin-Woo Han และคณะ [7] ได้ทำการสร้างก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส และสร้างก๊าซเซนเซอร์จากสารประกอบท่อนาโนคาร์บอนกับเซลลูโลส ในการตรวจวัดก๊าซ NH_3 จากภาพที่ 2.16 แสดงการตรวจวัดก๊าซ NH_3 ของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับที่แตกต่างกัน ผลปรากฏว่าก๊าซเซนเซอร์บนกระดาษเซลลูโลสและจากสารประกอบท่อนาโนคาร์บอนกับเซลลูโลส มีค่าการตอบสนองต่อก๊าซ NH_3 น้อยกว่าก๊าซเซนเซอร์บนกระดาษและเพรอน แต่มีความสม่ำเสมอในการตอบสนองมากกว่า นอกจากนี้จากงานวิจัย ยังพบว่า ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนสามารถตอบสนองต่อสารอินทรีย์ ได้ดีกว่าสารอินทรีย์ แสดงดังภาพที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 แผนภาพแสดงค่าการตอบสนองต่อก๊าซ NO₂ ของเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับที่แตกต่างกัน [7]



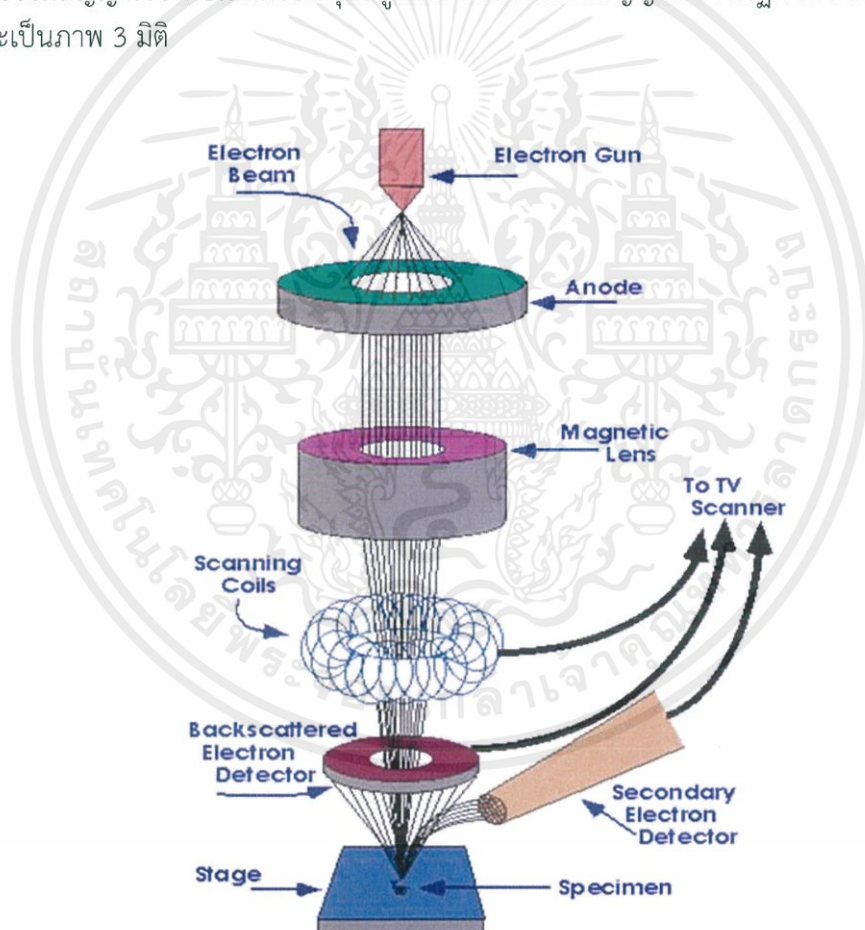
ภาพที่ 2.17 แผนภาพแสดงค่าการตอบสนองต่อก๊าซที่แตกต่างกันของเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองรับกระจก [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 เครื่องมือวิเคราะห์

2.8.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) [28]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังภาพที่ 2.18 เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้วิเคราะห์รายละเอียดลักษณะพื้นผิวภายนอกของตัวอย่าง ในการสร้างภาพตัวอย่างทำโดยการตรวจจอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะเป็นภาพสามมิติ นอกจากนี้ยังอาจดัดแปลงโดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆได้ เช่น การวิเคราะห์ธาตุ การคำนวณหามวลและปริมาตร เป็นต้นหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน แล้วถูกรวมเป็นลำอิเล็กตรอนไปยังพื้นผิวที่ต้องการตรวจวัดส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) จากนั้นจะทำการตรวจวัดสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิและแปลงไปเป็นสัญญาณปรากฏภาพบนจอรับภาพในลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ

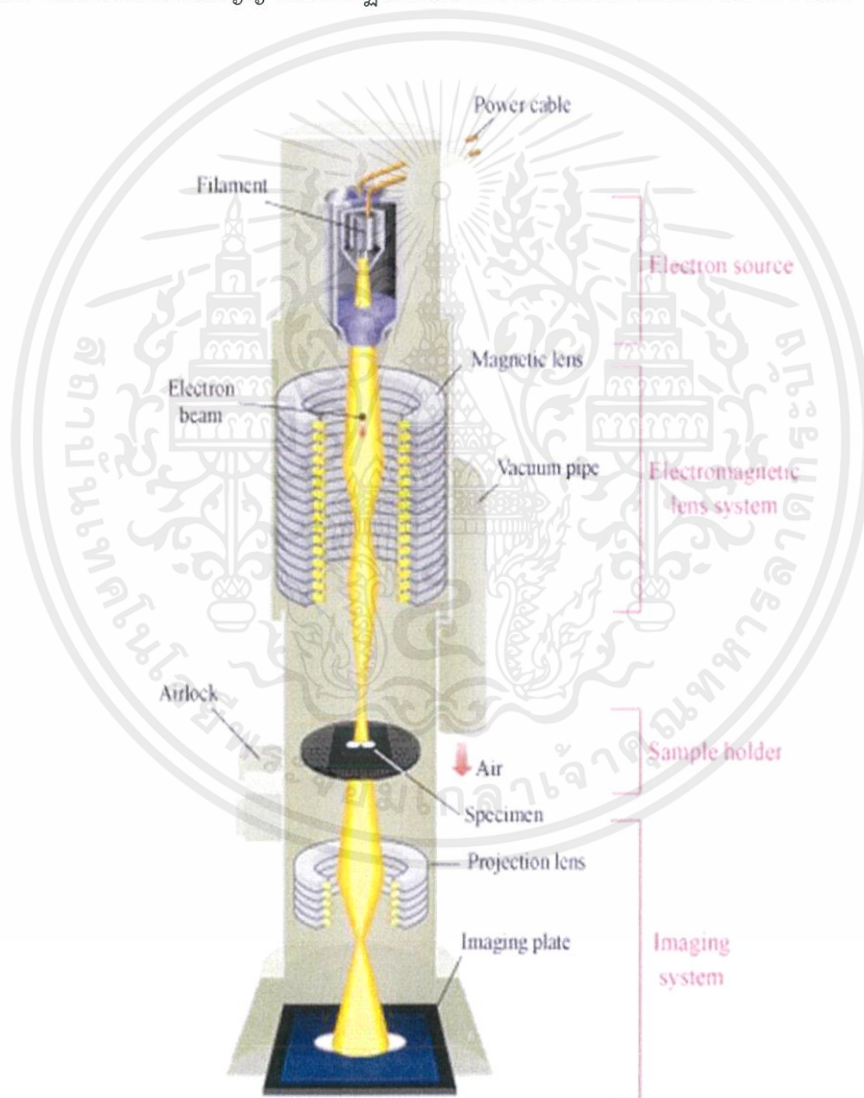


ภาพที่ 2.18 แผนภาพแสดงระบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy, TEM) [29]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงดังภาพที่ 2.19 เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างและความสมบูรณ์ผลึก โดยตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องมีความบางระดับ 1-100 นาโนเมตรซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษ เพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะเป็นภาพ 2 มิติ หลักการทำงานทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่มีพลังงานความเข้มที่สูง กระทำภายใต้สภาวะสุญญากาศ อิเล็กตรอนที่ผลิตได้จะถูกรวมเป็นลำอิเล็กตรอนและยิงลงบนตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัด อิเล็กตรอนพลังงานสูงจะทะลุผ่านตัวอย่าง จากนั้นจะทำการตรวจวัดสัญญาณจากอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างและแปลงเป็นสัญญาณปรากฏภาพบนจอรับภาพในลักษณะเป็นภาพ 2 มิติ



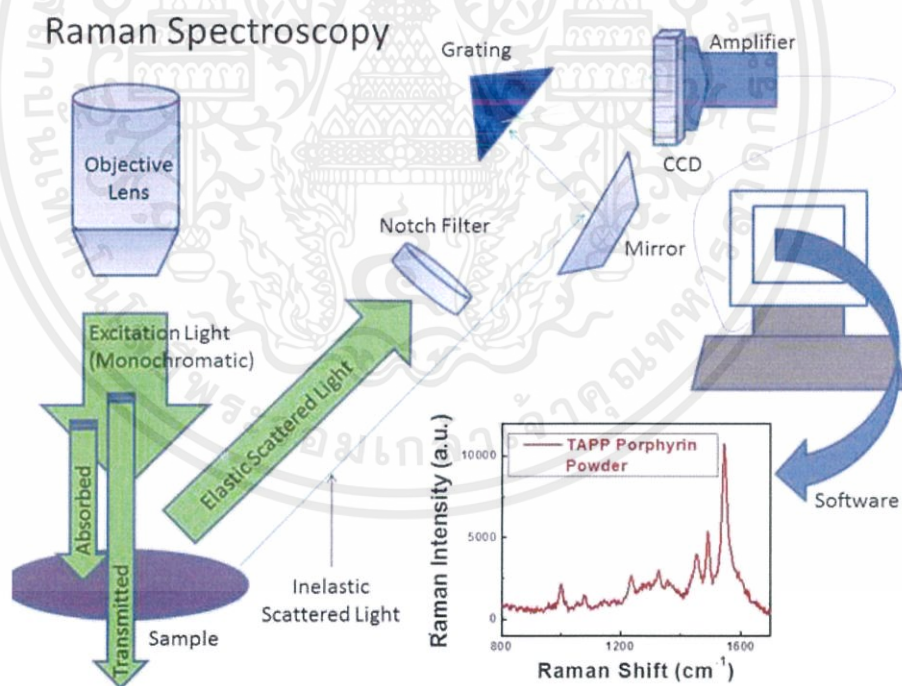
ภาพที่ 2.19 แผนภาพแสดงระบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) [30]

รามานสเปกโทรสโกปีแสดงดังภาพที่ 2.20 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาโครงสร้างของวัสดุสารจากการวัดสเปกตรัมที่เลื่อนไปของ Raman shift และตำแหน่งของสเปกตรัม ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะพันธะของชิ้นงานที่นำมาตรวจวัด โดยสารแต่ละชนิดจะมีสเปกตรัมเฉพาะของแต่ละสารที่แตกต่างกัน เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี จึงมีหลักการสำคัญ คือ การใช้การกระเจิงแสงไม่ยืดหยุ่น (Raman scattering) และการสั่นของโครงสร้างโดยมีหลักการคือ เมื่อแสงเลเซอร์กระทบกับตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาต่อกัน เกิดการเลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลงของระดับชั้นพลังงานเลเซอร์ เนื่องจากการดูดกลืนหรือการคายพลังงานของอะตอม ซึ่งให้ข้อมูลเกี่ยวกับการสั่นของอะตอมในตัวอย่าง ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ออกมาเป็นข้อมูลต่างๆได้ โดยทั่วไปแล้วข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี มีความถี่ที่น่าสนใจอยู่ 3 ความถี่ คือ

1. ความถี่ในช่วง $<200\text{ cm}^{-1}$ โดยจะเรียกว่าย่าน Radial breathing mode (RBM) หากมีความถี่ในช่วงนี้เกิดขึ้นจะมีท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยวเกิดขึ้น
2. ความถี่ในช่วงประมาณ 1340 cm^{-1} เรียกว่า D-band (D: Disorder) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกันกับพันธะของกราฟไฟต์ที่ไม่เป็นระเบียบ
3. ความถี่ในช่วงระหว่าง $1500\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ เรียกว่า G-band (G: Graphite) จะตอบสนองกับพันธะของท่อนาโนคาร์บอน

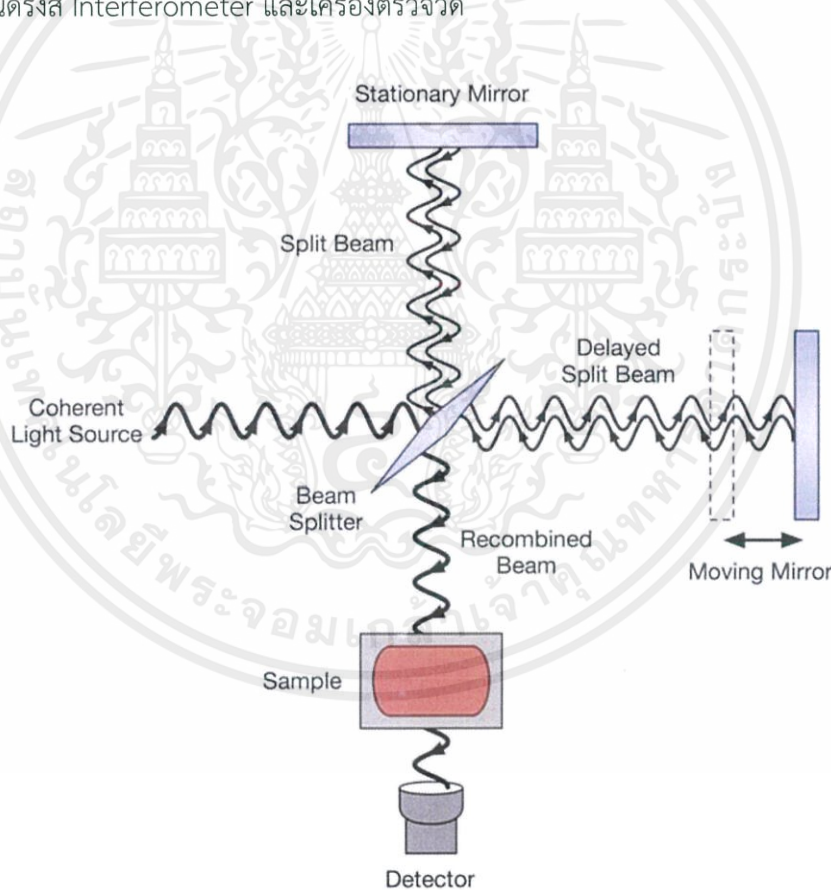


ภาพที่ 2.20 แผนภาพแสดงระบบการทำงานของเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.4 พูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) [31]

ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แสดงดังภาพที่ 2.21 เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopy ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมีในโมเลกุลรวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิดโดยอาศัยหลักการการดูดกลืน (Absorption) หรือการทะลุผ่าน (Transmission) ของแสงในช่วงอินฟราเรด ในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของโมเลกุลของสารตรวจวัด ที่อยู่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์จะสะท้อนทุกตัวในโมเลกุลของสารจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลาเมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายังโมเลกุล โมเลกุลก็จะดูดกลืนรังสีจำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่สังเกตได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมด โดยจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะจะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด สามารถวิเคราะห์ออกมาในรูปแบบของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละชนิดได้ บ่งบอกถึงโครงสร้างโมเลกุลหมู่ฟังก์ชัน และชนิดของสารชนิดนั้นๆ ซึ่งในระบบ FTIR มีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดรังสี Interferometer และเครื่องตรวจวัด



ภาพที่ 2.21 แผนภาพแสดงระบบการทำงานของเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง การเตรียมการทดลองและวิธีการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซเซนเซอร์ การทดสอบระบบวัดก๊าซเซนเซอร์ การสร้างก๊าซเซนเซอร์สารอินทรีย์ระเหยง่ายจากท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส รวมทั้งการตรวจวัดสมบัติเฉพาะด้านต่างๆของท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี

3.1 การออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซ

3.1.1 ส่วนประกอบระบบตรวจวัดก๊าซ

ระบบตรวจวัดก๊าซเซนเซอร์แสดงในภาพที่ 3.1 ประกอบด้วยสามส่วนหลัก ได้แก่

3.1.1.1 ส่วนเตรียมก๊าซสำหรับทดสอบ ประกอบด้วย

- (1) ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.5%
- (2) เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow rate) อัตราไหลสูงสุด 5 ลิตรต่อนาที
- (3) เตาให้ความร้อน (Hot plate)
- (4) ขวดแก้วสำหรับใส่สารทดสอบ

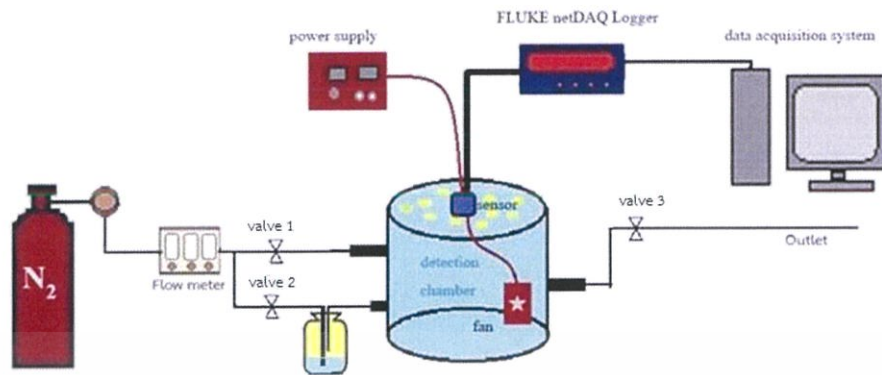
3.1.1.2 ส่วนการตรวจวัดก๊าซเซนเซอร์ ประกอบด้วย

- (1) แคมเบอร์สำหรับใส่แก๊สเซนเซอร์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร สูง 22 เซนติเมตร ปริมาตร 10.79 ลิตร
- (2) พัดลมติดตั้งภายในแคมเบอร์ตรวจวัดก๊าซ
- (3) ปั๊มสุญญากาศแบบโรตารี (Rotary pump)

3.1.1.3 ส่วนการบันทึกข้อมูล ประกอบด้วย

- (1) เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า (FLUKE NetDAQ NETWORKED DATA ACQUISITION UNIT)
- (2) แหล่งจ่ายไฟ (Power supply)
- (3) คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 แผนภาพแสดงระบบตรวจวัดก๊าซ

3.1.2 ขั้นตอนพื้นฐานสำหรับการวัดประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซ

ในการเปิด-ปิดวาล์วในระบบ เพื่อปล่อยก๊าซเข้าสู่ระบบ แสดงตามเงื่อนไขดังตารางที่ 3.1 โดยทำการขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) ชั่งน้ำหนักของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตรก่อนการตรวจวัดก๊าซ
- (2) ปรับบรรยากาศภายในระบบวัดโดยการปล่อยก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาทีเพื่อเป็นการปรับเบสไลน์ (Base line) ในระบบ
- (3) ส่งผ่านไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย เข้าสู่ระบบด้วยก๊าซไนโตรเจนด้วยเทคนิคบับบลิ้ง (Bubbling) ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- (4) หยุดการปล่อยไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย และปล่อยก๊าซไนโตรเจนให้ไหลเข้าสู่ระบบเป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำการไล่ไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ที่ติดอยู่ที่ก๊าซเซนเซอร์ พร้อมทั้งศึกษาเวลาในการคืนตัว (Recovery time) ของก๊าซเซนเซอร์
- (5) ชั่งน้ำหนักของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่หายไปหลังจากตรวจวัดก๊าซ
- (6) คำนวณค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ถูกบันทึกอยู่ในรูปของค่าสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง FLUKE NetDAQ NETWORKED DATA ACQUISITION UNIT ซึ่งค่าการตอบสนอง (Sensor response, SR) สามารถคำนวณหาได้ดังสมการ (1)

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

โดยที่ R คือค่าความต้านทานที่วัดได้

R_0 คือค่าความต้านทานเริ่มต้นของก๊าซเซนเซอร์ภายใต้บรรยากาศสารอินทรีย์ระเหยง่าย

3.1.3 การคำนวณค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs concentration)

การคำนวณค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$PV = RTn_{\text{Chamber}} \quad (2)$$

$$M_{\text{VOC}} = d_{\text{VOC}} \times V_{\text{VOC}} \quad (3)$$

$$n_{\text{VOC}} = \frac{d_{\text{VOC}} \times V_{\text{VOC}}}{MW_{\text{VOC}}} \quad (4)$$

$$C = \frac{n_{\text{VOC}}}{n_{\text{Chamber}}} \quad (5)$$

โดยที่ C คือ ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

n_{VOC} คือจำนวนโมลของสารระเหยอินทรีย์ (โมล (mol))

n_{Chamber} คือจำนวนโมลของก๊าซไนโตรเจนเบสไลนในแชมเบอร์ (โมล (mol))

d_{VOC} คือ ความหนาแน่นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (กรัมต่อตารางเซนติเมตร (g/cm^3))

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

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

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

ในการทำการทดลองจริง เมื่อทราบผลต่างปริมาตรของสารอินทรีย์ระเหยง่ายแล้ว จะคำนวณหาจำนวนโมลของสาร คำนวณหาค่าความเข้มข้น จากสมการ (4) และ (5) ตามลำดับ

ตัวอย่างการคำนวณ หาค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (ในที่นี้ยกตัวอย่างเป็นเอทานอล) จากผลต่างของน้ำหนักสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ในการตรวจวัดที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง)

(1) คำนวณหา n_{Chamber} ที่มีปริมาตร 10.79 ลิตร (L) หรือ $10.79 \times 10^3 \text{ cm}^3$ หรือ

$$10.79 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ จะได้ดังนี้}$$

จากสมการ (2)

$$PV = RTn_{\text{Chamber}}$$

$$n_{\text{Chamber}} = \frac{PV}{RT} \quad (6)$$

แทนค่าลงในสมการ (6)

$$n_{\text{Chamber}} = \frac{101.325 \times 10^3 \times 10.79 \times 10^{-3}}{8.314 \times (20 + 273)}$$

$$n_{\text{Chamber}} = 0.45 \text{ mol}$$

(2) คำนวณหา n_{VOC} จากผลต่างปริมาตรของเอทานอลที่ใช้ในการตรวจวัด

(2.1) คำนวณหาผลต่างปริมาตรของเอทานอล จะได้ดังนี้

กำหนดให้ ก่อนการตรวจวัดก๊าซ เอทานอลมีน้ำหนัก 10 g หลังการตรวจวัดก๊าซ เอทานอลมีน้ำหนัก 7 g ดังนั้นผลต่างของน้ำหนักเอทานอลเท่ากับ 3 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3)

$$M_{\text{VOC}} = d_{\text{VOC}} \times V_{\text{VOC}}$$

$$V_{\text{VOC}} = \frac{M_{\text{VOC}}}{d_{\text{VOC}}} \quad (7)$$

แทนค่าลงในสมการ (7)

$$V_{\text{VOC}} = \frac{3 \text{ g}}{789 \times 10^3 \text{ g/m}^3}$$

$$V_{\text{VOC}} = 3.75 \times 10^{-6} \text{ m}^3 = 3.75 \text{ dm}^3 = 3.75 \text{ L}$$

(2.2) คำนวณหา n_{VOC} จะได้ดังนี้

แทนค่า V_{VOC} จากหัวข้อ 2.1ลงในสมการ (4)

จากสมการ (4)

$$n_{\text{VOC}} = \frac{d_{\text{VOC}} \times V_{\text{VOC}}}{MW_{\text{VOC}}}$$

แทนค่าลงในสมการ (4)

$$n_{\text{VOC}} = \frac{(798 \times 10^3 \text{ g/m}^3) \times (3.75 \times 10^{-6} \text{ m}^3)}{46 \text{ g/mol}}$$

$$n_{\text{VOC}} = 0.065 \text{ mol}$$

(3) หาคความเข้มข้น (C) ของเอทานอลที่ปริมาตร 3.75 L

แทนค่า n_{VOC} จากหัวข้อ 2.2 ลงในสมการ (5)

จากสมการ (5)

$$C = \frac{n_{\text{VOC}}}{n_{\text{Chamber}}}$$

แทนค่าลงในสมการ (5)

$$C = \frac{0.065}{0.45}$$

$$C = 0.144 = 144 \text{ ppt}$$

3.2 การสร้างก๊าซเซนเซอร์สารอินทรีย์ระเหยง่ายจากท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส

3.2.1 การปรับสภาพผิวท่อนาโนคาร์บอน

กระบวนการปรับสภาพผิวท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการทรีตเมนต์ออกซิเจนพลาสมาโดยการนำท่อนาโนคาร์บอนปริมาณ 1 กรัม มาผ่านกระบวนการพลาสมาด้วยออกซิเจน โดยใช้เครื่องทำความสะอาดแบบพลาสมา (รุ่น Harrick Scientific) ซึ่งมีเงื่อนไขดังแสดงในตาราง 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการปรับสภาพผิวท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการทรีตเมนต์ออกซิเจนพลาสมา

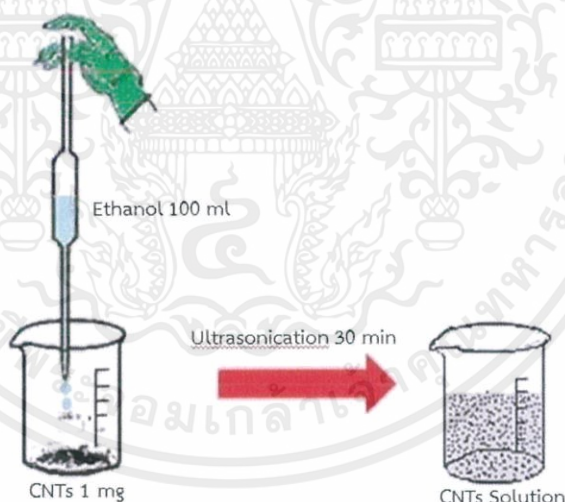
เงื่อนไข	รายละเอียด
ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน	1 กรัม
ความต่างศักย์	740 โวลต์
กระแสไฟฟ้า	40 มิลลิแอมแปร์
กำลังไฟฟ้า	29.6 วัตต์
เวลาการทรีตเมนต์	30 นาที

3.2.2 การเตรียมก๊าซเซพเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส

3.2.2.1 เตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน

การเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนแสดงดังภาพที่ 3.2 โดยทำการขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) นำผงท่อนาโนคาร์บอน 1 มิลลิกรัม ผสมกับสารละลายเอทานอลปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- (2) นำสารในข้อ 1 สั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกภายในตู้ดูดสารเคมีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารละลายท่อนาโนคาร์บอน



ภาพที่ 3.2 แผนภาพการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ

3.2.2.2 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ

การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ

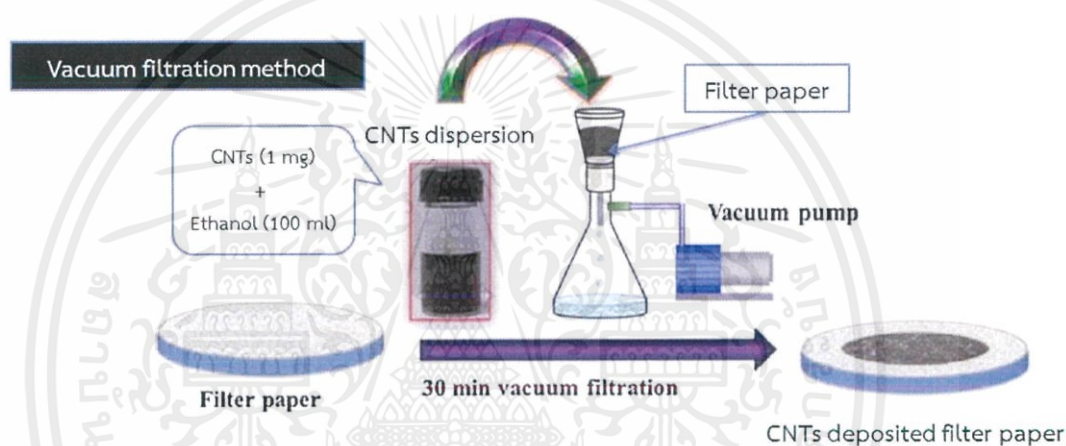
แสดงดังภาพที่ 3.3 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) นำสารละลายท่อนาโนคาร์บอนในข้อ 1 เทลงใน Filtering cup โดยใช้เงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 3.3 และปั๊มอากาศเป็นเวลา 30 นาที
- (2) กระดาษท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการกรองสารละลายท่อนาโนคาร์บอน

ปริมาณสารละลาย ท่อนาโนคาร์บอน (มิลลิลิตร)	จำนวนการกรองสาร (ครั้ง)	จำนวนกระดาษ ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ทั้งหมด (แผ่น)
20	5	5
25	5	5
30	5	5
35	5	5
40	5	5

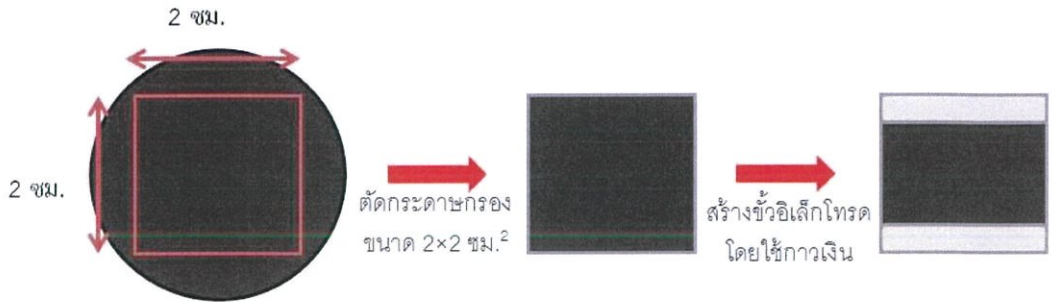


ภาพที่ 3.3 แผนภาพการสร้างก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส

3.2.2.3 การเตรียมก๊าซเซนเซอร์

กระบวนการสร้างก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสแสดงดังภาพที่ 3.4 โดยทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) ตัดท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษกรองเซลลูโลสจากหัวข้อที่ 3.3 โดยตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร และขนาดความยาว 2 เซนติเมตร
- (2) สร้างขั้วอิเล็กโทรด โดยการทากาวเงิน ขนาดขั้วความกว้าง 0.3 เซนติเมตร ความยาว 2 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้ว 1.4 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที



ภาพที่ 3.4 แสดงกระบวนการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส

ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส จะถูกนำไปตรวจวัดประสิทธิภาพ การตรวจวัดก๊าซต่อไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเทคนิคบับบลิง ที่อุณหภูมิห้องตามขั้นตอนพื้นฐานสำหรับการวัดประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซ (หัวข้อ 3.1.2)

3.4 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและพันธะเคมีของท่อนาโนคาร์บอน

นำท่อนาโนคาร์บอนที่ได้หลังจากปรับสภาพผิวท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการที่รีดเมนต์ออกซิเจนพลาสมา (หัวข้อ 3.2.1) ไปทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและพันธะเคมีของท่อนาโนคาร์บอน โดยใช้เทคนิคต่างๆ

สมบัติ	เทคนิควิเคราะห์
สัณฐานวิทยา	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)
โครงสร้างภายใน	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy, TEM)
โครงสร้างคาร์บอน	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)
ชนิดหมู่ฟังก์ชัน	เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

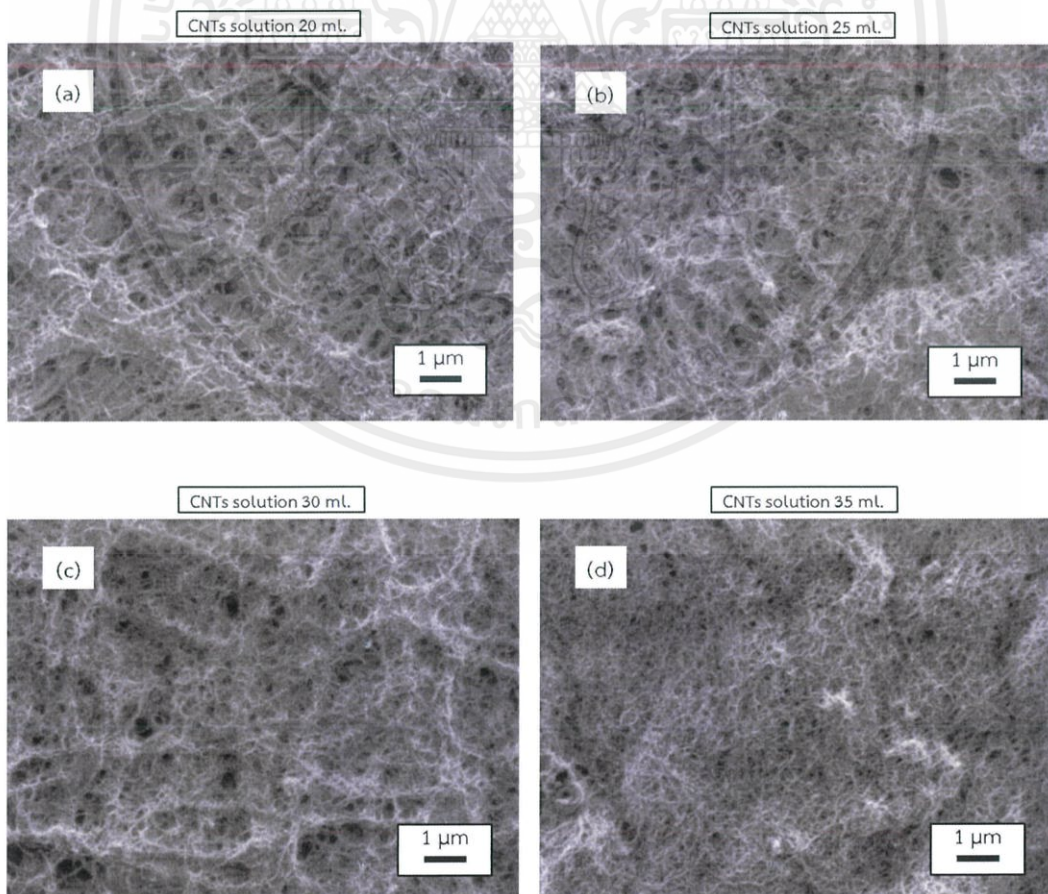
บทที่ 4

ผลการวิจัย

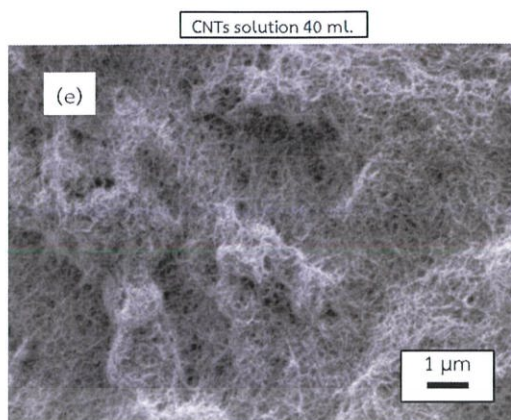
4.1 ผลของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสต่อความสามารถในการตรวจวัดก๊าซ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแบบฟิลด์อิมิสชัน (Field emission scanning electron microscopy, FESEM)

ในการทดลองเป็นการสร้างก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes, MWNTs) บนกระดาษเซลลูโลสโดยใช้เทคนิคการกรองสุญญากาศ เริ่มจากการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน (CNTs solution) จากการใช้ท่อนาโนคาร์บอน 1 มิลลิกรัมต่อสารละลายเอทานอล 100 มิลลิลิตร แล้วทำการเปรียบเทียบการใช้ปริมาณสารละลายท่อนาโนคาร์บอน 20 25 30 35 และ 40 มิลลิลิตรในการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์ ภาพที่ 4.1 (a)-(e) แสดงภาพ FESEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสโดยใช้สารละลายท่อนาโนคาร์บอนปริมาณ 20 25 30 35 และ 40 มิลลิลิตรตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

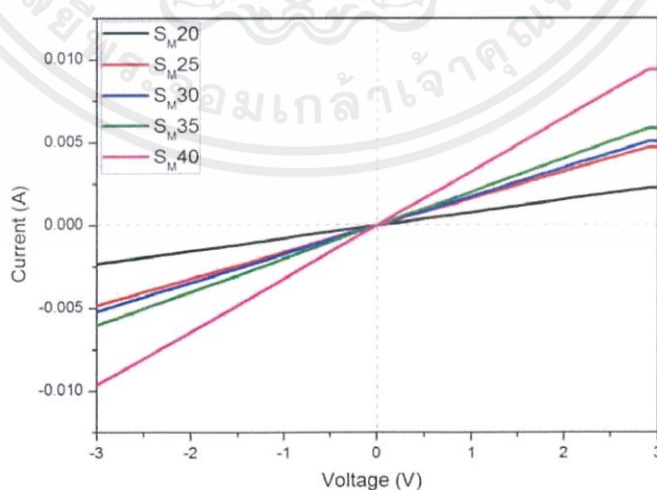


ภาพที่ 4.1 แสดงภาพ FESEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสโดยใช้สารละลายท่อนาโนคาร์บอนปริมาณ (a) 20 (b) 25 (c) 30 (d) 35 และ (e) 40 มิลลิลิตร

จากภาพ FESEM ในภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะสานต่อกันเป็นโครงสร้างแบบร่างแหบนกระดาษเซลลูโลส เมื่อใช้ปริมาณสารละลายท่อนาโนคาร์บอน 20 25 30 35 และ 40 มิลลิลิตร พบว่าความเป็นรูพรุนของโครงข่ายท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสจะมีค่าแนวโน้มลดลง โดยความเป็นรูพรุนของโครงข่ายท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสที่แตกต่างกันนั้น เกิดจากการใช้ปริมาณสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่แตกต่างกัน

4.1.2 ผลของสมบัติทางไฟฟ้า

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของก๊าซเซนเซอร์จาก MWNTs บนกระดาษเซลลูโลสชนิดต่างๆ แสดงในภาพที่ 4.2 โดยที่ S คือ เซนเซอร์ M คือ MWNTs และหมายเลขตัวที่ 1 และ 2 คือปริมาณสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์



ภาพที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

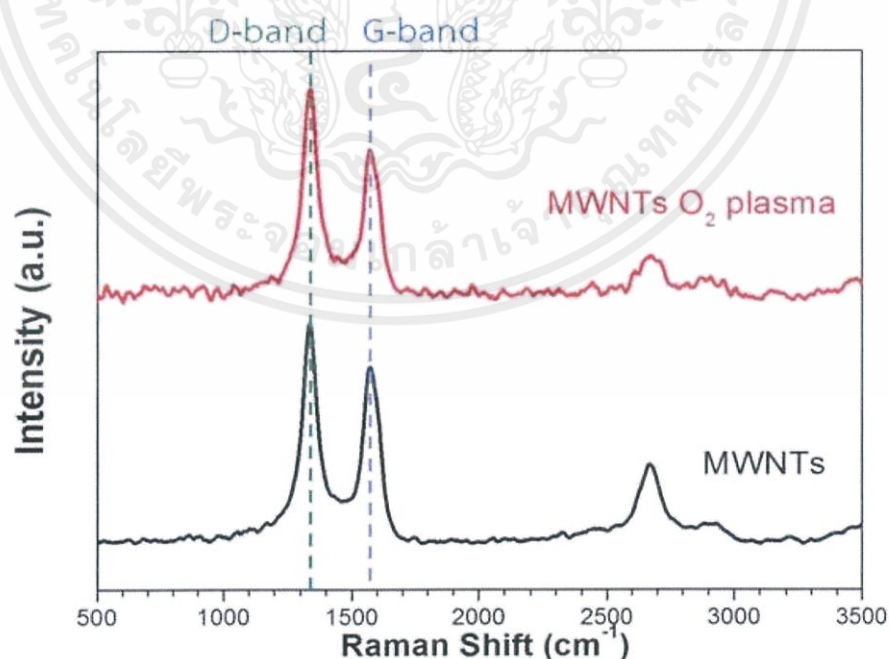
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่างๆ

ก๊าซเซนเซอร์	ค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์ (Resistance; Ω)
S_M20	1285.93
S_M25	618.28
S_M30	576.14
S_M35	496.26
S_M40	310.22

จากภาพที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (Current) ต่อแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ในช่วงแรงดันที่ -3 ถึง 3 โวลต์ (V) และตารางที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของก๊าซเซนเซอร์ S_M20 , S_M25 , S_M30 , S_M35 และ S_M40 จากผลที่ได้พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของก๊าซเซนเซอร์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารละลายท่อนานโนคาร์บอนที่ใช้ในการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์เพิ่มมากขึ้น

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)

ในการทดลอง ท่อนานโนคาร์บอนได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการพลาสมาด้วยออกซิเจนพลาสมา ภาพที่ 4.3 แสดงภาพรามานสเปกตรัมของ MWNTs และ MWNTs O_2 plasma ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี



ภาพที่ 4.3 แสดงภาพรามานสเปกตรัมของ MWNTs และ MWNTs O_2 plasma

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

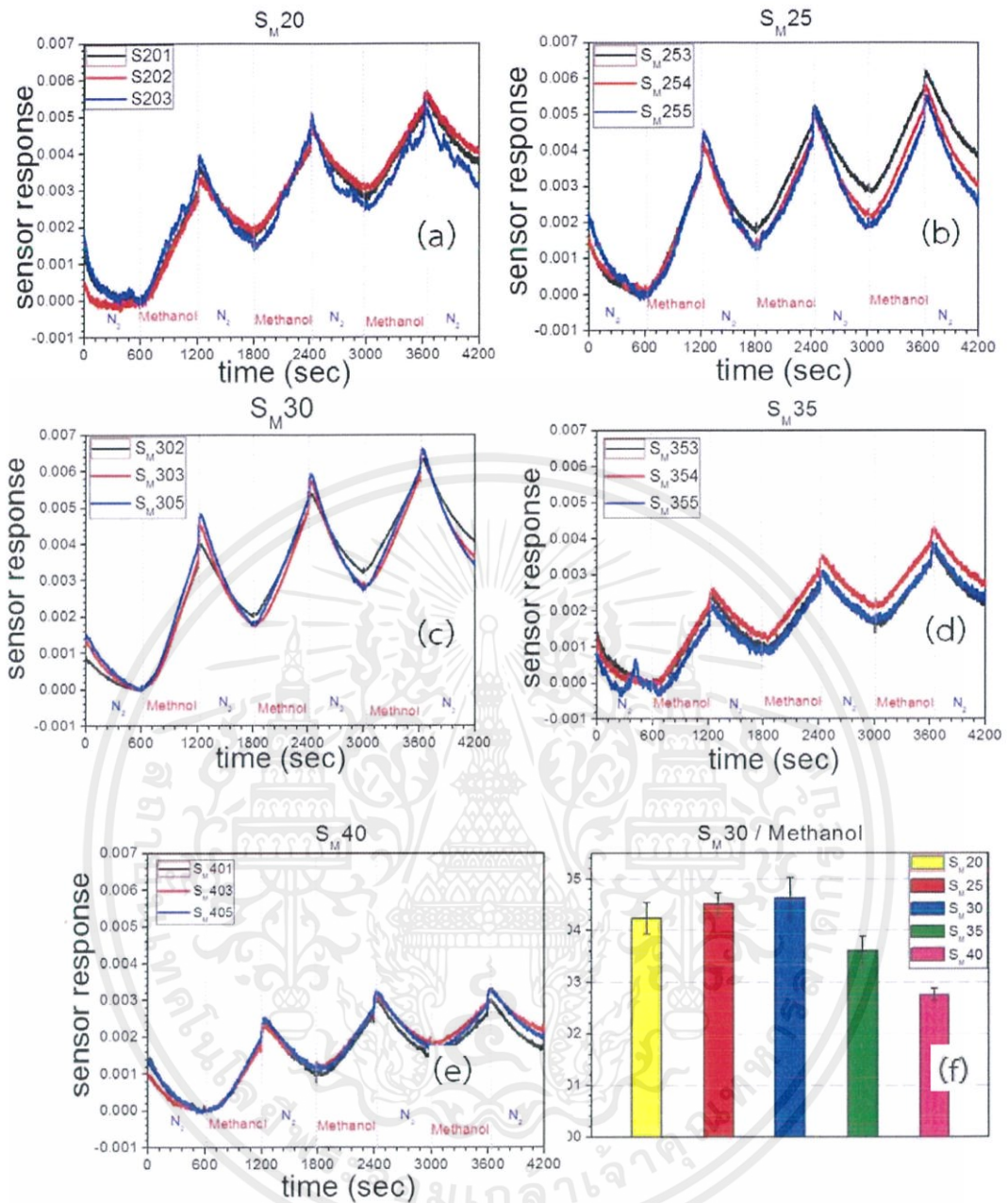
ภาพที่ 4.3 แสดงรามานสเปกตรัมของ MWNTs และ MWNTs O₂ plasma จากรามานสเปกตรัมพบว่าท่อนาโนคาร์บอนทั้ง 2 ชนิดแสดงพีคหลัก 3 ตำแหน่งประมาณ 1340 cm⁻¹ 1580 cm⁻¹ และ 2680 cm⁻¹ โดยแต่ละพีคแสดงถึงตำแหน่งของ D, G และ 2D band ตามลำดับ โดย D band แสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของท่อนาโนคาร์บอน G band แสดงถึงความเป็นระเบียบของท่อนาโนคาร์บอน โดยทั่วไปค่าความสมบูรณ์ของท่อนาโนคาร์บอน สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความสูงของ G band ต่อ D band (I_G/I_D) โดยค่า I_G/I_D ของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นผ่านกระบวนการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา มีค่า 0.70 และ 0.80 ตามลำดับ จากผลที่ได้พบว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นผ่านกระบวนการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา มีค่าความสมบูรณ์ของท่อนาโนคาร์บอนลดลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากออกซิเจนพลาสมาไปทำลายผนังท่อนาโนคาร์บอน ส่งผลให้เกิดความบกพร่อง (Defect) ที่ผนังท่อนาโนคาร์บอน

4.1.4 ผลการตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอล

ในเบื้องต้นเป็นการทดลองการตรวจวัดไอระเหยเมทานอล ของก๊าซเซนเซอร์ที่มีปริมาณท่อคาร์บอนแตกต่างกัน เริ่มต้นด้วยการปรับเบสไลน์โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงทำการส่งผ่านไอระเหยเมทานอลเข้าสู่ระบบด้วยก๊าซไนโตรเจนด้วยเทคนิคบับเบิ้ลเป็นเวลา 10 นาที แล้วทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอล โดยใช้ก๊าซเซนเซอร์ S_M20 S_M25 S_M30 S_M35 และ S_M40 ซึ่งจะใช้ก๊าซเซนเซอร์จำนวน 5 ตัวของเซนเซอร์แต่ละชนิด และจะนำผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์อย่างน้อย 3 ตัวมาใช้ในการวิเคราะห์ผล โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยเมทานอลที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2 และผลตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอล แสดงดังภาพที่ 4.4 โดยที่ S คือ เซนเซอร์ M คือ MWNTs หมายเลขตัวที่ 1 และ 2 คือปริมาณสารละลายท่อคาร์บอนที่ใช้ในการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์หมายเลขตัวที่ 3 คือลำดับอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยเมทานอลที่ใช้ในการตรวจวัดก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่างๆ

ก๊าซเซนเซอร์	ความเข้มข้นไอระเหยเมทานอล (parts per thousand, ppt)
S _M 20	84.72
S _M 25	94.49
S _M 30	95.50
S _M 35	85.18
S _M 40	88.82



ภาพที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอลของก๊าซเซนเซอร์ (a) S_{M20} (b) S_{M25} (c) S_{M30} (d) S_{M35} (e) S_{M40} และ (f) Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่างๆ

จากรูป 4.4 (a)-(e) พบว่าก๊าซเซนเซอร์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยเมทานอล และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยลงเมื่อทำการไล่ก๊าซของไอระเหยเมทานอล ด้วยก๊าซไนโตรเจน ก๊าซเซนเซอร์ที่ตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอลได้ดีที่สุดจากมากไปน้อย คือ S_{M30} , S_{M25} , S_{M20} , S_{M35} และ S_{M40} ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับค่า Normalized sensor response (ภาพที่ 4.3 (f)) เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนค่าการตอบสนองต่อความเข้มข้นของไอระเหยเมทานอล ค่าเวลาการตอบสนอง (Response time) ของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น บน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระดาษเซลล์โลสในการตรวจวัดไอระเหยเมทานอล สามารถคำนวณได้จากเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอลที่ 90% เทียบกับค่าการตอบสนองสูงสุด ในขณะที่ค่าเวลาการคืนตัว (Recovery time) ของแก๊สเซนเซอร์ คำนวณได้จากเวลาที่แก๊สเซนเซอร์ใช้ในการคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ดังตารางที่ 4.3 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.3 แสดงเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์

ก๊าซเซนเซอร์	เวลาการตอบสนอง (Response time; sec)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD)	เวลาการคืนตัว (Recovery time(sec))	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD)
S_{M20}	1209	3.06	-	-
S_{M25}	1204	2.52	-	-
S_{M30}	1203	3.51	-	-
S_{M35}	1220	3.06	-	-
S_{M40}	1217	2.52	-	-

กำหนดให้ “-” คือ ไม่สามารถคำนวณค่าเวลาการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ได้

เมื่อพิจารณาก๊าซเซนเซอร์ S_{M20} S_{M25} และ S_{M30} พบว่าใช้เวลาในการตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอลใกล้เคียงกัน โดยก๊าซเซนเซอร์ S_{M30} ใช้เวลาการตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอลน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่า S_{M30} มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงกว่ากรณีก๊าซเซนเซอร์ S_{M20} และ S_{M25} ในขณะที่ S_{M25} ใช้เวลาการตอบสนองใกล้เคียง S_{M30} แต่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าก๊าซเซนเซอร์ S_{M25} น่าที่จะใช้เวลาในการตอบสนองน้อยที่สุดในกรณีของก๊าซ S_{M35} และ S_{M40} พบว่าก๊าซเซนเซอร์ S_{M35} ใช้เวลาการตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอลนานที่สุด เนื่องจากบริเวณพื้นที่สำหรับดูดซับก๊าซที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ S_{M20} , S_{M25} และ S_{M30} และเมื่อเปรียบเทียบกับ S_{M40} พบว่าก๊าซเซนเซอร์ S_{M35} บางตัวไม่เสถียรขณะทำการปรับเบสไลน์ โดยแสดงค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อปรับเบสไลน์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนโดยแสดงแนวโน้มต่างจากก๊าซเซนเซอร์ตัวอื่นในกลุ่มเดียวกัน ดังภาพที่ 4.4 (d)

นอกจากนี้พบว่าก๊าซเซนเซอร์ทั้งหมด ไม่สามารถคำนวณค่าเวลาการคืนตัวได้ เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนไม่สามารถไลโมเลกุลของไอระเหยเมทานอล ออกจากพื้นผิวของก๊าซเซนเซอร์ได้หมดทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าไม่สามารถคืนสู่ค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนได้ แต่จากแนวโน้มค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ลดลง มีความเป็นไปได้ว่าหากมีการใช้เวลาในการไลก๊าซของไอระเหยเมทานอลที่นานขึ้น จะสามารถไลโมเลกุลของไอระเหยเมทานอลออกจากพื้นผิวของก๊าซเซนเซอร์ได้หมด

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสต่อความสามารถในการตรวจวัดไอระเหยชนิดต่างๆ

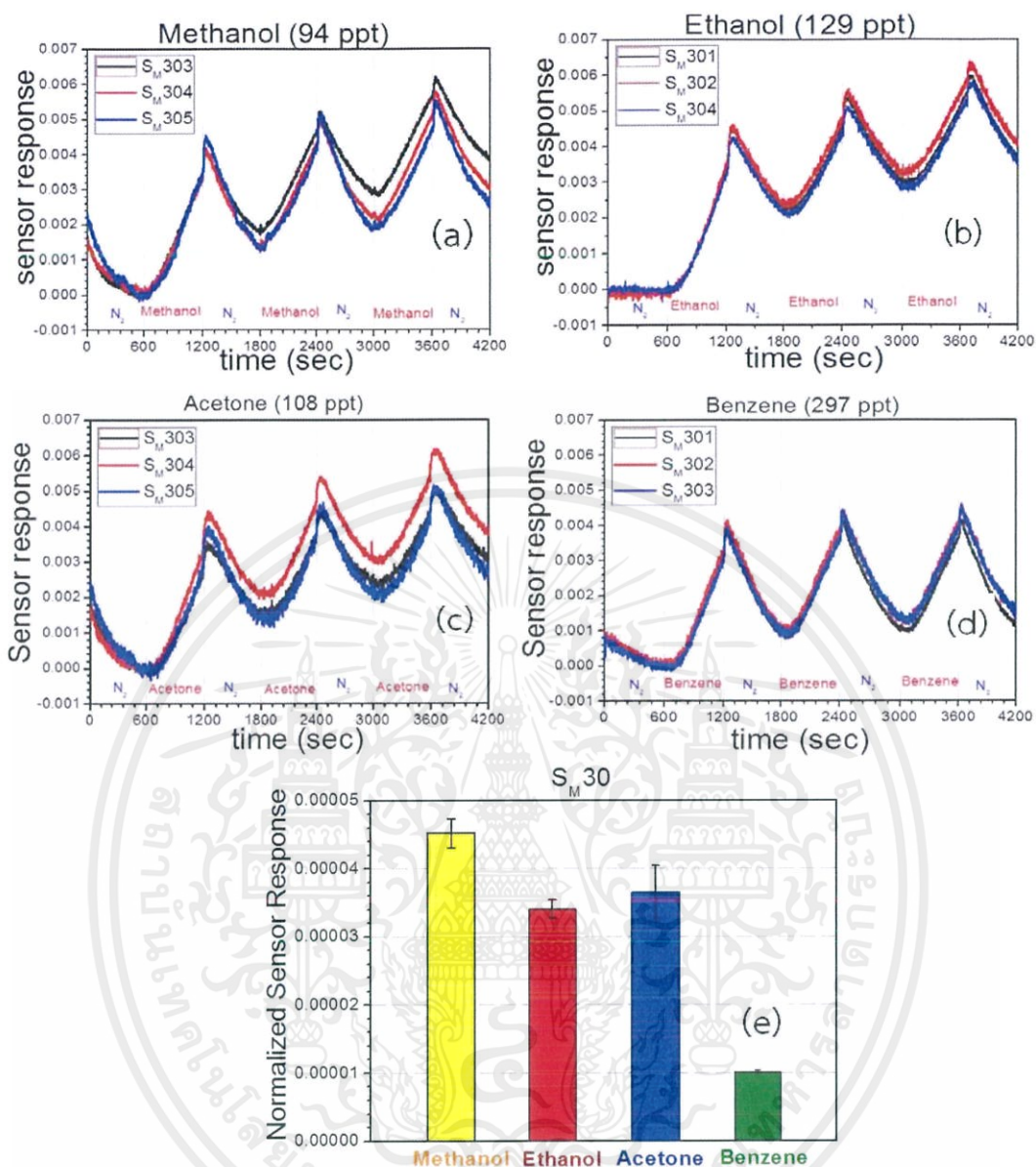
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 ก๊าซเซนเซอร์ S_{M30} มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยเมทานอลได้ดีที่สุด จึงได้มีการนำก๊าซเซนเซอร์ S_{M30} มาใช้ในการตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ชนิดอื่น ในงานวิจัยนี้ไอระเหยที่นำมาทดสอบได้แก่ ไอระเหยเมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเบนซีน เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซชนิดต่างๆ ของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส

4.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWNTs)

การตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ โดยใช้ก๊าซเซนเซอร์ S_{M30} ค่าความเข้มข้นของไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.4 และผลตอบสนองต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดของก๊าซเซนเซอร์ S_{M30}

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	ความเข้มข้นไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (parts per thousand, ppt)
เมทานอล (Methanol)	94.49
เอทานอล (Ethanol)	129.44
อะซีโตน (Acetone)	108.70
เบนซีน (Benzene)	297.15



ภาพที่ 4.5 แสดงตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ S_M30 ต่อไอระเหยสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ (a) เมทานอล (b) แอทานอล (c) อะซีโตน (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ S_M30 ต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ

จากรูป 4.5 (a)-(e) พบว่าก๊าซเซนเซอร์ S_M30 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่อทำการไล่ก๊าซของสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยก๊าซไนโตรเจน ก๊าซเซนเซอร์ S_M30 แสดงค่าการตอบสนองต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ดีที่สุด คือ เมทานอล อะซีโตน เอทานอล และเบนซีน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับค่า Normalized sensor response (ภาพที่ 4.5 (e)) เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนค่าการตอบสนองต่อความเข้มข้นของไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ค่าเวลาการตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าเวลาการคืนตัว ของก๊าซเซนเซอร์ S_{M30} ต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของ S_{M30} ต่อไอระเหยอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ

ไอระเหยอินทรีย์ระเหยง่าย	เวลาการตอบสนอง (Response time; sec)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD)	เวลาการคืนตัว (Recovery time; sec)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD)
เมทานอล (Methanol)	1211	2.08	-	-
เอทานอล (Ethanol)	1221	1.73	-	-
อะซีโตน (Acetone)	1212	3.06	-	-
เบนซีน (Benzene)	1208	1.53	-	-

กำหนดให้ “-” คือ ไม่สามารถคำนวณค่าเวลาการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ได้

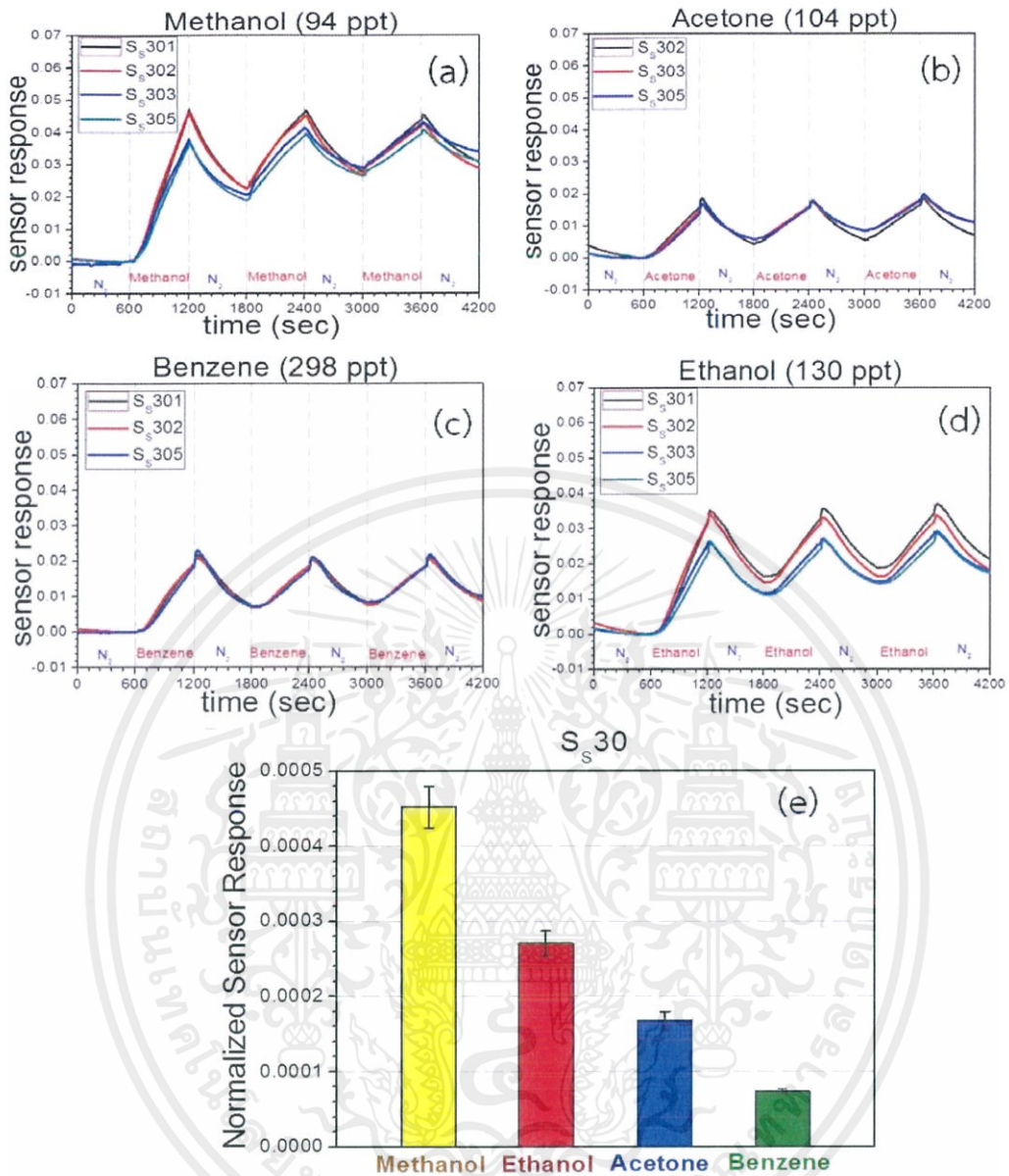
4.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotubes, SWNTs)

การตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ของก๊าซเซนเซอร์ S_{S30} โดยค่าความเข้มข้นของไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.6 และผลตอบสนองต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.5 โดยที่ S คือ เซนเซอร์ S คือ SWNTs หมายเลขตัวที่ 1 และ 2 คือปริมาณสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์หมายเลขตัวที่ 3 คือลำดับอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความเข้มข้นไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดของขก๊าซเซนเซอร์ S_{S30}

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	ความเข้มข้นไอระเหยสารอินทรีย์ (parts per thousand, ppt)
เมทานอล (Methanol)	94.24
เอทานอล (Ethanol)	130.05
อะซีโตน (Acetone)	104.31
เบนซีน (Benzene)	298.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 แสดงผลตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ S₅₃₀ ต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ คือ (a) เมทานอล (b) เอทานอล (c) อะซีโตน (d) เบนซีน และ (e) Normalized sensor response ของไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ

จากรูป 4.6 (a)-(e) พบว่าก๊าซเซนเซอร์ S₅₃₀ แสดงค่าการตอบสนองต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ดีที่สุด คือ เมทานอล เอทานอล อะซีโตน และเบนซีน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับค่า Normalized sensor response (ภาพที่ 4.6 (e)) ค่าเวลาการตอบสนองและค่าเวลาการคืนตัว ของก๊าซเซนเซอร์ S₅₃₀ ต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของ S₅30 ต่อไอระเหยอินทรีย์ระเหยง่าย ชนิดต่างๆ

ไอระเหยอินทรีย์ ระเหยง่าย	เวลาการ ตอบสนอง (Response time; sec)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD)	เวลาการ คืนตัว (Recovery time; sec)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD)
เมทานอล (Methanol)	1152	5.83	-	-
เอทานอล (Ethanol)	1186	4.92	-	-
อะซีโตน (Acetone)	1149	1.73	-	-
เบนซีน (Benzene)	1198	0.58	-	-

กำหนดให้ “-” คือ ไม่สามารถคำนวณค่าเวลาการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์ได้

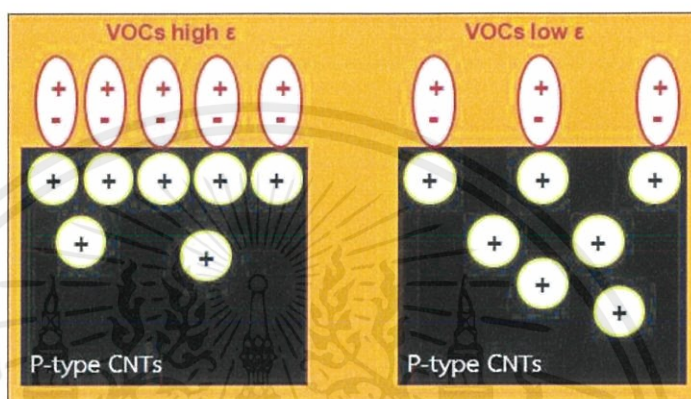
จากผลการทดลองข้างต้น กลไกที่ใช้ในการอธิบายการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ S_M30 และ S₅30 ต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ มีหลักการดังนี้ คือ เมื่อท่อนาโนคาร์บอนสัมผัสกับไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย จะเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายไปยังท่อนาโนคาร์บอน ทำให้ความหนาแน่นโฮล (hole) ของท่อนาโนคาร์บอนลดลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ท่อนาโนคาร์บอนแสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าชนิดพี (p-type)

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและขนาดโมเลกุลของไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย ชนิดต่างๆ

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	ขนาดโมเลกุล (Molecule size: cm ³ /mol)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant, ϵ)
เมทานอล (Methanol)	40.56	32.7
เอทานอล (Ethanol)	58.32	24.5
อะซีโตน (Acetone)	73.52	20.7
เบนซีน (Benzene)	88.00	2.27

จากตารางที่ 4.8 อธิบายได้ว่าความสามารถในการตอบสนองต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย สัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและขนาดโมเลกุลของไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย เมทานอลมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด จะสามารถตรึงการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลในท่อนาโนคาร์บอนชนิดพีที่รอยต่อได้มากที่สุด ขัดขวางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนเพิ่มขึ้นสูงที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.7 นอกจากนี้ยังพบว่าเมทานอลมีขนาดโมเลกุลที่เล็กที่สุด จึงมีอัตราส่วนจำนวนโมเลกุลที่สามารถสัมผัสกับพื้นที่ผิวของท่อนาโนคาร์บอนได้มากที่สุด ส่งผลให้ประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเมทานอลได้สูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีการตรวจไอระเหยอะซีโตนและเอทานอล ของก๊าซเซนเซอร์ของก๊าซเซนเซอร์ S₅₃₀ พบว่ามีค่า Normalized sensor response ในระดับที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่า กรณีของไอระเหยอะซีโตนมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่ากรณีของไอระเหยเมทานอล จึงมีความเป็นไปได้ว่าการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนอาจจะมีค่าต่ำกว่าไอระเหยเอทานอล

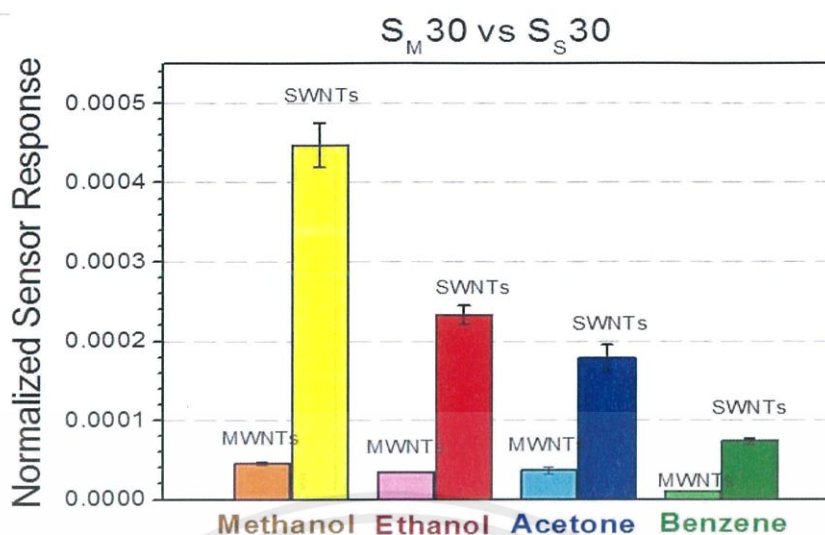


ภาพที่ 4.7 กลไกการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่างกัน

4.3 การศึกษาการเปรียบเทียบผลของจำนวนผนังท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสต่อความสามารถในการตรวจวัดก๊าซชนิดต่างๆ

ผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 ก๊าซเซนเซอร์ S_{M30} และ S₅₃₀ มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ชนิดต่างๆได้ จึงทำการหาค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ S_{M30} และ S₅₃₀ เพื่อเปรียบเทียบผลของจำนวนผนังท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลสต่อความสามารถในการตอบสนองต่อไอระเหยสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์จากท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นและผนังชั้นเดียว ในการตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ ระเหยง่ายชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 4.9 พบว่าก๊าซเซนเซอร์ S_M30 และ S_S30 มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหย สารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ โดยก๊าซเซนเซอร์สามารถตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอลได้ดีที่สุด และตอบสนองไอระเหยเบนซีนได้น้อยที่สุด ก๊าซเซนเซอร์ S_S30 มีค่า Normalized sensor response สูงกว่า S_M30

ตารางที่ 4.9 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ นาโนคาร์บอนทั้ง 2 ชนิด

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	เส้นผ่านศูนย์กลาง (นาโนเมตร, nm)
ท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว (SWMTs)	0.4 – 2.0
ท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWMTs)	2.5 – 30.0

จากตารางที่ 4.9 พบว่าท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวมีขนาดผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์โดยใช้ปริมาตรสารละลายท่อ นาโนคาร์บอน เท่ากัน จะทำให้ท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงกว่าท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ดังนั้นก๊าซเซนเซอร์จากท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อก๊าซสูง และแสดงค่าการตอบสนองต่อก๊าซที่สูงกว่าก๊าซเซนเซอร์จากท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น รวมทั้งพฤติกรรมการดูดซับก๊าซของท่อ นาโนคาร์บอน เป็นการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของ ก๊าซกับท่อ นาโนคาร์บอนที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งที่อุณหภูมิห้อง ท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว จะประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่ท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นจะประพฤติตัวเป็นโลหะ (J. Suehiro et al., 2005) ดังนั้นก๊าซเซนเซอร์จากท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวจึงแสดงค่าการตอบสนองต่อก๊าซได้ดีกว่าท่อ นาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยได้ทำการศึกษาการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์ จากท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส ด้วยเทคนิคการกรองสุญญากาศ โดยท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกใช้เป็นวัสดุก๊าซเซนเซอร์ถูกทรีตเมนต์ด้วย ออกซิเจนพลาสมาเป็นเวลา 30 นาที เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O) และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) บนพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน ในการเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยศึกษาเปรียบเทียบการใช้ปริมาณสารละลายท่อนาโนคาร์บอน 20 25 30 35 และ 40 มิลลิลิตร ในการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์ต่อความสามารถในการตอบสนองต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งเมื่อทำการตรวจวัดไอระเหยเมทานอล พบว่าการใช้ปริมาณสารละลายท่อนาโนคาร์บอน 30 มิลลิลิตร ให้การตอบสนองที่สูงสุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการตรวจวัดก๊าซสูง และไม่มีปริมาณมากเกินไป จนบดบังรูพรุนของโครงข่ายท่อนาโนคาร์บอนบนกระดาษเซลลูโลส ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมในการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์บนกระดาษเซลลูโลสมากที่สุด

จากผลการทดลองในเบื้องต้น ได้ทำการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์โดยใช้สารละลายท่อนาโนคาร์บอนแบบชั้นเดียวและผนังหลายชั้นปริมาณ 30 มิลลิลิตร เรียกก๊าซเซนเซอร์ชนิดนี้ว่า S_{530} และ S_{M30} ตามลำดับ เมื่อนำไปตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ พบว่าก๊าซเซนเซอร์ S_{M30} สามารถตอบสนองต่อไอระเหย เมทานอล > อะซีโตน > เอทานอล > เบนซีน และก๊าซเซนเซอร์ S_{530} สามารถตอบสนองต่อไอระเหย เมทานอล > เอทานอล > อะซีโตน > เบนซีน ผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ด้วย อธิบายได้ด้วยหลักการการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายไปยังท่อนาโนคาร์บอน ทำให้ความหนาแน่นโฮลของท่อนาโนคาร์บอนลดลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น และท่อนาโนคาร์บอนแสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าชนิดพี นอกจากนี้ความสามารถในการตอบสนองต่อไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและขนาดโมเลกุลของไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งไอระเหยเมทานอลมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด จะสามารถดึงการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลในท่อนาโนคาร์บอนชนิดพีที่รอยต่อได้มากที่สุด จึงเป็นการขัดขวางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากที่สุด รวมทั้งยังพบว่าเมทานอลมีขนาดโมเลกุลที่เล็กที่สุด จึงมีอัตราส่วนจำนวนโมเลกุลที่สามารถสัมผัสกับพื้นที่ผิวของท่อนาโนคาร์บอนได้มากที่สุด ส่งผลให้ประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเมทานอลได้สูงที่สุด

การศึกษาค่าเปรียบเทียบผลการตอบสนองไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย ต่อท่อนาโนคาร์บอนชนิดแตกต่างกันบนกระดาษเซลลูโลส ต่อความสามารถในการตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่าย พบว่าประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายของก๊าซเซนเซอร์ S_{530} มากกว่า S_{M30} เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวมีพื้นที่ผิว ต่อปริมาตรที่สูงกว่าท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ดังนั้นก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อก๊าซที่มาก อีกทั้งท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวจะประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นจะประพฤติตัวเป็นโลหะที่อุณหภูมิห้อง พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำดูดซับได้ดีกว่าท่อนาโนคาร์บอนที่มีสมบัติเป็นโลหะ จึงส่งผลให้ก๊าซเซเชอร์จากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวแสดงค่าการตอบสนองต่อก๊าซได้ดีกว่าท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าก๊าซเซเชอร์จากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวบนกระดาษเซลลูโลส โดยใช้ปริมาณสารละลายท่อนาโนคาร์บอน 30 มิลลิกรัมมีความเหมาะสมในการประดิษฐ์เป็นก๊าซเซเชอร์ ซึ่งก๊าซเซเชอร์สามารถตอบสนองต่อไอระเหยเมทานอลได้ดีที่สุด

5.2 แนวทางการพัฒนา

สำหรับงานวิจัยนี้ต้องพัฒนาต่อไป โดยจะทำการศึกษาดังต่อไปนี้

- 5.2.1 การประดิษฐ์ก๊าซเซเชอร์จากท่อนาโนคาร์บอน โดยไม่ถูกทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา เพื่อศึกษาผลของสภาพพื้นผิวผนังท่อนาโนคาร์บอนต่อความสามารถในการตรวจวัดก๊าซ
- 5.2.2 การประดิษฐ์ก๊าซเซเชอร์จากท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่นรองรับชนิดอื่น เพื่อศึกษาผลของแผ่นรองรับต่อความสามารถในการตรวจวัดก๊าซ
- 5.2.3 ศึกษาการไลโมเลกุลสารอินทรีย์ระเหยง่ายเพื่อนำก๊าซเซเชอร์กลับมาใช้ใหม่ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น เทคนิคการใช้ความร้อนกับก๊าซเซเชอร์ในการไลโมเลกุลสารอินทรีย์ระเหยง่าย เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, vol. 354, pp. 56–58, 1991.
- [2] V. Amanda, C. Steve, "Adhesion of Carbon Nanotube." (ออนไลน์). เข้าถึงได้เมื่อ พฤศจิกายน 2558. เข้าถึงได้จาก [http://web.mit.edu/mbuehler/www/SIMS/Adhesion of Carbon Nanotube.html](http://web.mit.edu/mbuehler/www/SIMS/Adhesion%20of%20Carbon%20Nanotube.html).
- [3] B. K. Kaushik, and M. K. Majumder, "Carbon Nanotube Based VLSI Interconnects Analysis and Design," *Applied Sciences and Technology*, vol. 86, pp. 57, 2015
- [4] J. Li, Y. Lu, Q. Ye, M. Cinke, J. Han, and M. Meyyappan, "Carbon Nanotube Sensors for Gas and Organic Vapor Detection," *Nano Lett.*, vol. 3, pp. 1–5, 2003.
- [5] "สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds)" (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤศจิกายน 2015. เข้าถึงได้จาก [http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/chemical-hazards/ item/92 -?](http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/chemical-hazards/item/92-?)
- [6] "ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา.", (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤศจิกายน 2015. เข้าถึงได้จาก http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_2_001c.asp?info_id=120.
- [7] J. W. Han, B. Kim, J. Li, and M. Meyyappan, "A carbon nanotube based ammonia sensor on cellulose paper," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 2, pp. 549–553, 2014.
- [8] J. Han, B. Kim, J. Li, and M. Meyyappan, "Carbon Nanotube Based Humidity Sensor on Cellulose Paper," *J. Phys. chem.*, vol. 116, pp. 22094–22097, 2012.
- [9] "History of Carbon and Carbon Materials", (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤศจิกายน 2015. เข้าถึงได้จาก <http://www.caer.uky.edu/carbon/history/carbonhistory.shtml>
- [10] P. R. Buseck, S. J. Tzipursky, and R. Hettich, "Fullerenes from the geological environment.," *Science*, vol. 257, no. 5067, pp. 215–7, 1992.
- [11] R. M. Reilly, "Carbon nanotubes: potential benefits and risks of nanotechnology in nuclear medicine", *J. Nucl. Med.*, vol. 48, no. 7, pp. 1039–42, 2007.
- [12] "Carbon Nanotubes" (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤศจิกายน 2015. เข้าถึงได้จาก <http://www.thenanoage.com/carbon-nanotubes.htm>.
- [13] P. R. Bandaru, "Electrical Properties and Applications of Carbon Nanotube Structures", *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 7, no. 4, pp. 1239–1267, 2007.
- [14] K. Sarangdevot and B. S. Sonigara, "Journal of Chemical and Pharmaceutical Research", *J.Chem. Pharm. Res.*, vol. 7, no. 6, pp. 916–933, 2015.
- [15] S. Hong and S. Myung, "Nanotube electronics: a flexible approach to mobility.", *Nat. Nanotechnol.*, vol. 2, no. 4, pp. 207–208, 2007.
- [16] D. H. Robertson, D. W. Brenner, and J. W. Mintmire, "Energetics of nanoscale graphitic tubules", *Physical Review B*, vol. 45, no. 21. pp. 12592–12595, 1992.
- [17] E. Pop, D. Mann, Q. Wang, K. Goodson, and H. Dai, "Thermal Conductance of an

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Individual Single-Wall Carbon Nanotube above Room Temperature”, *Nano Lett.*, Vol. 6, no. 1. pp. 96-100, 2006.
- [18] J. P. Gore and A. Sane, “Carbon Nanotubes - Synthesis, Characterization, Applications.” (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤศจิกายน 2015. เข้าถึงได้จาก <http://www.intechopen.com/books/carbon-nanotubes-synthesis-characterization-applications/flame-synthesis-of-carbon-nanotubes>
- [19] D. Qian, G. J. Wagner, W. K. Liu, M.-F. Yu, and R. S. Ruoff, “Mechanics of carbon nanotubes”, *Appl. Mech. Rev.*, vol. 55, no. 6, pp. 495, 2002.
- [20] M. Yu, “Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load,” *Science.*, vol. 287, no. 5453, pp. 637–640, 2000.
- [21] M. Yu, B. Files, S. Arepalli, and R. Ruoff, “Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 24, pp. 5552–5, 2000.
- [22] “Chemical Vapor Deposition - Nanoscience & Nanotechnology.” (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ ธันวาคม 2015. เข้าถึงได้จาก <https://sites.google.com/site/nanomodern/Home/CNT/syncnt/cvd>.
- [23] B. Soediono, “The Physical Science Basis”, *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, pp. 160, 1989.
- [24] “ระบบตรวจจับก๊าซอันตราย” (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ ธันวาคม 2015. เข้าถึงได้จาก <http://thailandindustry.com/guru/view.php?id=19024§ion=9&rcount=Y>.
- [25] J. Kong, “Nanotube Molecular Wires as Chemical Sensors,” *Science.*, vol. 287, no. 5453, pp. 622–625, 2000.
- [26] W. S. Cho, S. Il Moon, K. K. Paek, Y. H. Lee, J. H. Park, and B. K. Ju, “Patterned multiwall carbon nanotube films as materials of NO₂ gas sensors,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 119, no. 2, pp. 180–185, 2006.
- [27] J. Wang, X. Zhang, X. Huang, S. Wang, Q. Qian, W. Du, and Y. Wang, “Forced Assembly of Water-Dispersible Carbon Nanotubes Trapped in Paper for Cheap Gas Sensors,” *Small*, vol. 9, no. 22, pp. 3759–3764, 2013.
- [28] “Purdue University - Scanning Electron Microscope.” (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤศจิกายน 2015. เข้าถึงได้จาก <https://www.purdue.edu/ehrs/rem/rs/sem.htm>.
- [29] “Atomic World - Transmission electron microscope(TEM) - Principle of TEM.” (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ พฤศจิกายน 2015. เข้าถึงได้จาก http://www.hk-phy.org/atomic_world/tem/tem02_e.html.
- [30] “Raman Spectroscopy” (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 2558. เข้าถึงได้จาก https://en.wikipedia.org/wiki/Raman_spectroscopy
- [31] “Fourier transform infrared spectroscopy” (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อ ตุลาคม 2558. เข้าถึงได้จาก https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_transform_infrared_spectroscopy

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย)	นางสาวพัชรา	อาจสมัย
ชื่อ-นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)	Miss Patchara	Artsamai
วันเดือนปีเกิด	22 กันยายน 2536	
ที่อยู่	6/1 ต.หนองสูงใต้ อ.หนองสูง จ.มุกดาหาร 49160	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนหนองแขง วิทยาคม พ.ศ. 2559 วิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้