

การสร้างตัวตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ด้วยท่อนาโนของคาร์บอน

FABRICATION OF ORGANIC VAPOR SENSORS BASED ON
CARBON NANOTUBES

บัววรรณ ไชยธงรัตน์
BUAWORN CHAITONGRAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างตัวตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ด้วยท่อนาโนของคาร์บอน

**FABRICATION OF ORGANIC VAPOR SENSORS BASED ON
CARBON NANOTUBES**

บัววรรณ ไชยขจรรัตน์

BUAWORN CHAITONGRAT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **74857**
วัน,เดือน,ปี..... **11 ต.ค. 2550**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2550

**FABRICATION OF ORGANIC VAPOR SENSORS BASED ON
CARBON NANOTUBES**

BUAWORN CHAITONGRAT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONIC ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างตัวตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ด้วยท่อนาโนของคาร์บอน
นักศึกษา	นางสาวบัววรรณ ไชยธงรัตน์
รหัสประจำตัว	47061253
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร.สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์

บทคัดย่อ

ท่อนาโนคาร์บอน(Carbon nanotubes: CNTs) เป็นวัสดุที่มีขนาดระดับนาโนเมตร มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก เหมาะสำหรับนำมาสร้างเป็นวัสดุตรวจจับก๊าซ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจะกล่าวถึง กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจจับสารอินทรีย์ไอระเหย (Volatile Organic Chemicals ;VOCs) ที่ใช้ฟิล์ม CNTs จุดเด่นของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นอยู่ที่สามารถสร้างได้ง่ายบนแผ่นฐานรองซิลิคอนและมีโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นฟิล์ม CNTs กับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม 2 ขั้ว ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 50 ไมครอน ฟิล์ม CNTs ถูกเคลือบลงบนขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมโดยตรงภายในท่อทำปฏิกิริยาของวิธีชีวิตที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ละอองหมอกของสารละลายที่มีส่วนผสมของเอทิลแอลกอฮอล์(C_2H_5OH)และฟลูโรเซน($Fe(C_2H_5)_2$) ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดอะตอมคาร์บอนและแหล่งกำเนิดตัวเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคเหล็ก ตามลำดับ ในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบการตอบสนองของตัวตรวจจับที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์ม CNTs ที่ตำแหน่งและเวลาในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันโดยวัดการตอบสนองในบรรยากาศของ เอทานอล เมทานอล และอะซีโตน จากการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานเริ่มต้นของอุปกรณ์ตรวจจับมีค่าตั้งแต่ $10^2 \Omega$ จนถึง $10^8 \Omega$ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการเคลือบฟิล์ม CNTs ในการเคลือบฟิล์ม CNTs ที่ตำแหน่งอุณหภูมิสูง ฟิล์มที่ได้จะแสดงคุณสมบัติของโลหะ ในขณะที่ฟิล์ม CNTs ที่ถูกเคลือบที่ตำแหน่งที่อุณหภูมิต่ำแสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์ตรวจจับที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อก๊าซทดสอบได้ดีแม้ที่อุณหภูมิห้องทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม CNTs นอกจากนี้ อุปกรณ์ตรวจจับที่สร้างขึ้นยังสามารถตอบสนองต่อก๊าซทดสอบ ความเข้มข้นต่างๆกันได้ดี (เช่น สามารถวัดไออะซีโตน ตั้งแต่ 1000 ppm จนถึง 20 %) อย่างไรก็ตาม การทดลองยังแสดงให้เห็นว่า ตัวตรวจจับที่สร้างด้วย CNTs ยังมีปัญหาด้านเวลาที่ใช้ในการคืนตัว ในการวัดไอ VOCs ที่มีความเข้มข้นสูงๆ และความเสถียรภาพอีกด้วย ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขต่อไป ผลการศึกษานี้จะเป็นแนวทางสำหรับการสร้างท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุตรวจจับก๊าซต่อไปในอนาคต

Thesis Title	Fabrication of organic vapor sensors based on carbon nanotubes
Student	Miss.Buaworn Chaitongrat
Student ID.	47061205
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronic Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Sutichai Chaisitsak

ABSTRACT

Carbon nanotubes (CNTs) are nanomaterial which has very high surface-to-volume ratio. It is suitable for being developed as extremely sensitive gas detector. The purpose of this thesis is to present the fabrication process and characteristic of CNTs film for using as volatile organic chemicals (VOCs) detector. The advantage of this device is simple and compatible in silicon technology. The device consists of aluminum layer as electrode which is gapped between electrode is 50 μm and CNTs film layer. CNTs films were directly deposited on the pattern of aluminum electrodes in CVD reactor tube at atmosphere pressure by using precursor mist of ethanol and ferrocene which were source of carbon and catalytic respectively. In the experiment, we compared the respond of detector which was deposited by CNTs film at different position and deposition time by testing in atmosphere of ethanol, methanol and acetone. The experiment found that the initial resistances of the devices were approximately $10^2 - 10^8 \Omega$ which depends on deposition film's condition. The high temperature CNTs films deposition showed the properties of metal whereas low temperature deposition showed the properties of semiconductor. The detector is able to respond well at room temperature, depending on position and deposition time which deposited CNTs film. Moreover the devices were able to respond the testing gas at different concentration as well (for example it can measure acetone from 1000 ppm to 20 %). However, this experiment showed that the detector using CNTs still have the problem in recovery time which was detected VOCs at high concentration, and stability also to be improve in the future. In conclusion, the results from this experiment can be used as the framework to construct the gas detector from CNTs in the future.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอย่างยิ่ง ต่ออาจารย์ ผศ.ดร. สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาถ่ายทอดความรู้ พร้อมกับให้คำแนะนำ ชี้แนะข้อบกพร่อง และแนวทางในการดำเนินงานวิจัยต่างๆ รวมทั้งการดูแลเอาใจใส่ในการทำงานเป็นอย่างดี คณะอาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้ให้เพื่อให้ผลของงานวิจัยที่ได้มีความสมบูรณ์ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ที่ต้องการค้นคว้าต่อไป

ขอบคุณพี่ๆศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ ความรู้ และเทคนิคในการใช้เครื่องมือ และ คร.อัมพร คร. เอกลักษณ์ และ พันนิมิตร จากศูนย์ไทยไมโครอิเล็กทรอนิกส์(TMEC) สำหรับความอนุเคราะห์ในการช่วยถ่ายภาพ SEM

ขอบคุณคุณเรื่องศักดิ์ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คอยให้กำลังใจและคำแนะนำต่างๆ พี่โจ๊ก ที่เป็นรุ่นพี่ที่ให้คำปรึกษาต่างๆ ได้อย่างดี น้องเอสและน้องๆในห้องแลปที่คอยให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจตลอดมา

และที่ขาดไม่ได้คือ พี่บุญจันทร์ พี่บุญทัน พี่อ๊ว หลานอัญชัญ หลานฟ้าน้อย หลานปราง หลานเอ และหลานเอ็ก ที่คอยให้คำปรึกษาและกำลังใจในการทำงานมาตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

บัววรรณ ไชยทรงรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์.....	XVII
ศัพท์เทคนิค.....	XVIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ความสำคัญของอุปกรณ์ตรวจจับสารอินทรีย์ไอระเหย.....	5
2.2 เซ็นเซอร์.....	6
2.2.1 นิยามเซ็นเซอร์.....	6
2.2.2 คุณสมบัติทั่วไปของเซ็นเซอร์.....	7
2.2.3 นิยามก๊าซเซ็นเซอร์.....	9
2.2.4 เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดต่างๆ.....	11
2.2.5 คุณสมบัติพื้นฐานก๊าซเซ็นเซอร์.....	14
2.3 คาร์บอน.....	15
2.4 ท่อนาโนคาร์บอนพื้นฐาน.....	19
2.4.1 โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน.....	19
2.4.2 ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน.....	21
2.4.2.1 ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว SWNTs.....	21
2.4.2.2 ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น MWNTs.....	22

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.3 โครงสร้างทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน.....	22
2.5 การสังเคราะห์แบบวิธี Chemical Vapor Deposition (CVD).....	28
2.5.1 แบบ Hot-filament enhance Chemical vapor deposition	28
2.5.2 แบบ Vapor phase growth.....	29
2.5.3 แบบ High pressure CO disproportionate process.....	30
2.5.4 แบบ Plasma enhances chemical vapor deposition.....	31
2.5.5 แบบ Thermal chemical vapor deposition	32
2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	33
2.6.1 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM.....	33
2.6.2 วิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปี.....	34
2.7 การประยุกต์ท่อนาโนคาร์บอน.....	40
2.8 การประยุกต์ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัด.....	41
2.8.1 Flow sensing.....	41
2.8.2 Bio sensing.....	41
2.8.3 IR sensing.....	42
2.8.4 Electro-Mechanical sensing.....	43
2.8.5 Chemical sensing.....	44
2.9 กลไกการดูดซับก๊าซของท่อนาโนคาร์บอนและกลไกการนำไฟฟ้าของเส้นเชอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอนที่เกี่ยวข้อง.....	44
2.9.1 SWNTs และ SWNTs bundles.....	44
2.9.2 MWNT.....	46
2.9.3 รอยสัมผัสระหว่างขั้วโลหะ กับท่อนาโนคาร์บอน.....	46
2.9.3.1 ฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอน.....	47
2.9.3.2 ฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอน.....	49
2.9.4 กลไกการนำไฟฟ้าของก๊าซเส้นเชอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน.....	51

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.10 การประยุกต์ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ.....	54
2.10.1 Gas Ionization Sensor.....	54
2.10.2 FET- Based Sensor.....	55
2.10.3 Chemicapacitor.....	55
2.10.4 Chemoresistor.....	56
บทที่ 3 การทดลอง.....	57
3.1 ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย.....	57
3.2 การออกแบบเพื่อสร้างขั้วลูมิเนียม.....	57
3.3 การสร้างขั้วลูมิเนียม.....	59
3.4 ขบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบต่อเนื่อง	
จากท่อไอแอลกอฮอล์และฟลูโอโรเซนที่ความดัน 1 บรรยากาศ	64
3.4.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	64
3.4.2 การเตรียมสารโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา.....	64
3.4.3 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน.....	65
3.5 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดไอสาร VOCs.....	67
3.5.1 วิธีการทดสอบด้วยสาร VOCs อิมตัว.....	68
3.5.2 วิธีการทดสอบด้วยสาร VOCs	
ที่มีปริมาณความเข้มข้นในระดับ ppm ต่างๆ.....	69
3.5.3 การอ่านค่าที่ได้จากการวัด.....	72
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	75
4.1 เปรียบเทียบเซ็นเซอร์ ที่สร้างโดยมีและไม่มีฟิล์ม	
ท่อนาโนคาร์บอน.....	75
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM.....	76
4.1.2 ผลการตอบสนองต่อสาร VOCs.....	78
4.2 การศึกษาดำเนินและเวลาที่ใช้เคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน	
สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสาร VOCs.....	80

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.1 ผลของการตรวจสอบพื้นผิวฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน บนเซ็นเซอร์ ณ ตำแหน่งต่างกัน.....	82
4.2.2 ผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของอุปกรณ์.....	85
4.2.3 ผลต่อการตอบสนองต่อสารอะซีโตน.....	87
4.3 การศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดสาร VOCs ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน.....	93
4.3.1 ผลของอุณหภูมิการทำงานต่อการตอบสนองของเซ็นเซอร์.....	93
4.3.2 ผลการวัดแบบต่อเนื่อง.....	100
4.3.3 ผลการวัดการตอบสนองต่อสารอะซีโตน ความเข้มข้นต่างๆกัน.....	102
4.3.4 ผลการตอบสนองต่อไอสาร VOCs ต่างชนิดกัน.....	104
4.3.5 ผลการวัดการคืนกลับสภาพเดิมโดยใช้แสง.....	105
4.3.6 ผลการวัดความเสถียร.....	108
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	111
เอกสารอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก.....	115
ภาคผนวก ก.....	115
ภาคผนวก ข.....	122
ภาคผนวก ค.....	124
ภาคผนวก ง.....	131
ภาคผนวก จ.....	134
ภาคผนวก ฉ.....	135
ภาคผนวก ช.....	139
ประวัติผู้เขียน.....	145

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รูปแบบต่างๆของคาร์บอน.....	18
2.2 ค่า Work function ของโลหะที่นำมาสัมผัสกับ CNT.....	46
3.1 สถานะการปรับค่าความเข้มข้นไอสารอะซีโตน.....	71
4.1 เงื่อนไขของตำแหน่งและเวลาในการเคลือบฟิล์ม CNT บนแผ่นฐานรองฐานรองเงินเซอร์ Al/SiO ₂	82

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณในทางอุดมคติ.....	8
2.2 ฮีสเตอร์รีซิสตีวยามเอาท์พุทที่แตกต่างไปจากค่าเดิม.....	9
2.3 ส่วนประกอบของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ.....	10
2.4 (ก) ชนิดออร์บิทัล (ข) การรวมตัวของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอน แบบไฮบริไดเซชัน.....	16
2.5 การเกิดพันธะ โควาเลนต์(covalent bonds) โดยการรวมตัวของอะตอม คาร์บอนที่มีไฮบริไดเซชัน sp^2	17
2.6 การม้วนของแผ่นกราฟีนทั้งสองด้านมาบรรจบกันเป็นท่อปิดทรงกระบอก (ก) การม้วนของแผ่นกราฟีน (graphene sheet) ม้วนปิดเป็นท่อทรงกระบอก (ข) โครงสร้างของท่อนโนคาร์บอน ทั้ง 3 ชนิด คือ (1) zigzag (2) armchair และ (3) chiral (ค) การม้วนของแผ่นกราฟีนตาม Chiral vector (\vec{C}_h) เป็นท่อนาโน- คาร์บอน (5,5), (7,3) และ(9,0) ซึ่งเป็นแบบ chiral, armchair และ zigzag.....	20
2.7 ท่อนาโนคาร์บอน (ก) แบบผนังเดี่ยว (ข) แบบหลายผนัง.....	22
2.8 โครงข่ายหกเหลี่ยม (hexagonal lattice) ของ 2D กราไฟต์ โดยยูนิตเซลล์ถูกแทน ด้วยบริเวณที่แรงเงาของสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (rhombus) ซึ่งประกอบด้วยอะตอม ของคาร์บอนจำนวน 2 อะตอม (r_1 และ r_2) โดยที่ \vec{a}_1 และ \vec{a}_2 คือ ยูนิตเวกเตอร์.....	23
2.9 บริเวณ Brillouin zone และแลตทิซส่วนกลับ(reciprocal lattice) ของ 2D กราไฟต์ จุดสมมาตรใน 2D Brillouin zone เรียกว่าจุด Γ , M , K' และ K โดย \vec{b}_1 กับ \vec{b}_2 คือ รีซิพโพรคอลแลตทิซเวกเตอร์(reciprocal lattice vectors).....	23
2.10 แลตทิซหกเหลี่ยมของท่อนาโนคาร์บอน โดย $\vec{C}_h = 4\vec{a}_1 + 2\vec{a}_2$ SWNT ยูนิตเซลล์ คือบริเวณที่แรงเงา ซึ่ง $N = 28$ และมุมระหว่าง \vec{a}_1 และ \vec{C}_h คือ มุมไซรอล $\theta(0 \leq \theta \leq 30^\circ)$	25
2.11 (ก) Brillouin zone ของ SWNT ถูกแทนด้วยเส้น W-W' ในกรณี $(n,m) = (4,2)$ และ (ข) รูปเสมือนแต่ทำการลดโชน โดยเวกเตอร์ \vec{K}_1 และ \vec{K}_2 คือ รีซิพโพรคอลแลตทิซเวกเตอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับ \vec{C}_h และ \vec{T} ตามลำดับ.....	27
2.12 3D Brillouin zone ของกราฟิต์และ cutting line สำหรับ $(n,m) = (4,2)$ SWNT.....	28
2.13 ระบบ Hot-filament enhance Chemical vapor deposition CVD [28].....	29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14 ระบบ Vapor phase growth.....	30
2.15 high pressure CO disproportionate process.....	31
2.16 ระบบ Plasma enhance chemical vapor deposition.....	31
2.17 ระบบ Thermal chemical vapor deposition.....	33
2.18 ภาพ SEM แสดงท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้.....	34
2.19 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ Anti-Stokes scattering.....	35
2.20 กราฟความถี่รามานแสดงโหมดต่างๆ.....	36
2.21 การสั่นของอะตอมคาร์บอนสำหรับ (ก) โหมดRBM และ(ข) โหมดG-band.....	37
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่รามานในโหมด RBM ที่แสดงด้วย ω_{RBM} กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน (ก) $A=234 \text{ cm}^{-1}$ และ $B=10 \text{ cm}^{-1}$ ในกรณีของ SWNT-bundle(เส้นประ) และ (ข) $A=248 \text{ cm}^{-1}$ และ $B=0$ ในกรณีของ Isolated SWNT (เส้นทึบ).....	38
2.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง d_t กับ ω_G และ $\omega_{G'}$ ของ SWNTs หลายๆท่อ ที่มีคุณสมบัติ ของโลหะและสารกึ่งนำ โดยที่จุดที่มีการระบายสีค้ำมีคุณสมบัติ เป็นสารกึ่งตัวนำ และจุดที่ไม่มีการระบายสีค้ำมีคุณสมบัติเป็นโลหะ.....	39
2.24 การวัดค่าความแรงดันไฟฟ้ากับอัตราการไหลของของเหลวค่าต่างๆ ของ เซ็นเซอร์ โดย R คือส่วนที่ใช้เก็บของเหลว, L คือวาล์วทำหน้าที่ควบคุม อัตราการไหลของของเหลว, S คือ ภาชนะที่ใช้ในการไหลของของเหลวและ G คือโวลต์มิเตอร์ทำหน้าที่วัดค่าแรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์.....	41
2.25 ไดอะแกรมของเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วย MWNTs โดยทำหน้าที่ตรงกับสารกลูโคส และเป็นตัวกลางในการ ในการผ่านของอิเล็กตรอนจากกลูโคสไปยัง Pt ที่ทำหน้าที่ ที่เป็นทรานสดิวเซอร์.....	42
2.26 กระบวนการสร้างท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี nanotemplate method.....	43
2.27 ท่อนาโนคาร์บอน IR detector ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง, ขั้วโลหะและ ท่อนาโนคาร์บอนที่เรียงในแนวตั้งเมื่อท่อนาโนคาร์บอนมีการดูดซับรังสี ความนำไฟฟ้าที่ขั้วโลหะจะเกิดการเปลี่ยนแปลง.....	43
2.28 คุณสมบัติ Electromechanical ของท่อนาโนคาร์บอน (ก) ภาพถ่าย AFM ของ	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ท่อนาโนคาร์บอนที่พาดระหว่างช่องที่มีความกว้าง 500 nm และลึก 175 nm (ข) แผ่นฐานรองที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ทิวปีที่พาดบนช่อง และที่ ปลายท่อเชื่อมติดกับขั้วโลหะไฟฟ้า(S เป็น source และ D เป็น drain) ที่มีระยะ ห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3 ± 4 mm (ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของท่อนาโน คาร์บอนเมื่อทดสอบด้วย AFM (ง) Δz_c คือ Vertical displacement และ G คือ conductance ของท่อนาโนคาร์บอน.....	44
2.29 ท่อนาโนคาร์บอนที่มีรวมกันหลายๆท่อ (bundles) (ก) โคอะแกรมของ bundles ของท่อนาโนคาร์บอน (a) ภาพตัดขวางของ bundles (b) ภาพด้านข้างของ bundles (A) Outer surface (B) Groove (C) Interstitial channels (ICs) และ (D) nanotube cavities (ข) ภาพ High resolution TEM แสดง SWNT bundle [20].....	45
2.30 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนเกิดรอยสัมผัส ($q\phi_M < q\phi_S$)	47
2.31 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัส ($q\phi_M < q\phi_S$)	49
2.32 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี ก่อนเกิดรอยสัมผัส ($q\phi_M > q\phi_S$)	50
2.33 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัส ($q\phi_M > q\phi_S$)	50
2.34 แบบจำลอง Al/CNT sensor ก่อนก๊าซจะดูดซับบนก๊าซเซ็นเซอร์ [20].....	51
2.35 แบบจำลอง Al/CNT sensor ขณะก๊าซดูดซับบนก๊าซเซ็นเซอร์.....	52
2.36 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของก๊าซเซ็นเซอร์ Al/CNTs เมื่อทดสอบด้วยก๊าซ NO ₂ โดยการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองขึ้นอยู่กับ อิทธิพล ของ Schottky barrier และปฏิกิริยาของท่อนาโนคาร์บอน กับ NO ₂ (ก) การ ตอบสนองขึ้นอยู่กับอิทธิพลของ Schottky barrier เป็นหลัก (ข) การตอบสนอง ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาจากท่อนาโนคาร์บอน เองกับ NO ₂ เป็นหลัก [20].....	53
2.37 ก๊าซไอออไนเซชันเซ็นเซอร์ซึ่งสร้างด้วย ท่อนาโนคาร์บอน (ก) โครงสร้างของ เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซนี้ประกอบด้วย MWNT-films (แอ โนค), แผ่นแก้วหนา 180 μm (ฉนวน) และโลหะอลูมิเนียม (แค โทค) (ข) โคอะแกรมการทดสอบ เซ็นเซอร์โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าดีซี (ค) ภาพ SEM ของ MWNT-films ใน แนวตั้งบนแผ่นฐานรอง SiO ₂ โดยปลูกด้วยวิธีการ ซีวีดี และทำหน้าที่เป็นขั้ว แอ โนคในเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ.....	54
2.38 โครงสร้างของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบ FET ที่สร้างด้วย	

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
SWNT โดยมีระยะห่างระหว่าง S/D 2.5 และ 5 μm โดยสร้างด้วยโลหะทอง (gold) และมี SiO_2 หนา 100 nm.....	55
2.39 โค้ดแกรมเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบ Chemicapacitor.....	56
2.40 โค้ดแกรมเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบ Chemoresistor.....	56
3.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง.....	58
3.2 (ก) แบบขั้วไฟฟ้าที่ใช้โปรแกรม CoreDRAW 11 ในการเขียนแบบ (ข) ภาพถ่ายจริง ด้วยกล้องจุลทรรศน์ของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม.....	58
3.3 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการเคลือบซิลิคอนไดออกไซด์จะเกิดชั้น SiO_2 ทั้งสองด้าน ของฐานรองซิลิคอน.....	60
3.4 เครื่องระเหยในสุญญากาศ (evaporation)[37]	61
3.5 ฟิล์มอลูมิเนียมเคลือบบนแผ่นซิลิคอนไดออกไซด์	61
3.6 ขั้นตอนของกระบวนการ โฟโวลติโกราฟี (ก) การเคลือบน้ำยาไวแสง (ข) การฉาย แสง (ค) การล้างน้ำยาไวแสง (ง) การเอตซิงค์ และ (จ) ลวดลายของอิมิเนียมที่พร้อม ใช้งาน.....	63
3.7 ภาพถ่ายแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) ขั้นตอนการนำ แอลกอฮอล์มาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ (ข) ขั้นตอนการนำผงฟลูโรเซน มาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ (ค) ขั้นตอนการนำผงฟลูโรเซนที่ผสมอยู่กับ แอลกอฮอล์มาอัลตราโซนิก (ง) สารโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมทั้ง หมด พร้อมที่จะนำไปสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	65
3.8 โครงสร้างของระบบ CVD แบบไฟโรไรซิส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ที่ใช้ในการ สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	66
3.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	67
3.10 ภาพการต่อขั้วที่ใช้ในการวัดของอุปกรณ์ตรวจวัดสาร VOCs (ก) โครงสร้าง (ข) แผ่นฐานรองที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน.....	68
3.11 ระบบการวัดการตอบสนองต่อไอสารอินทรีย์อิมิดที่บรรยากาศห้อง ของ เซ็นเซอร์ตรวจจับไอสาร VOCs.....	69
3.12 ระบบการวัดการตอบสนองต่อไอสาร VOCs ความเข้มข้นระดับ ppm ของ เซ็นเซอร์ตรวจจับไอสาร VOCs.....	70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 การอ่านค่าของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซที่ได้จากการวัด[18].....	73
4.1 ขั้นตอนการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองต่อไอสาร VOCs ของเซ็นเซอร์ที่มีและไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน.....	75
4.2 เซ็นเซอร์ที่สร้างโดยมีท่อนาโนคาร์บอน (ก) ฟิล์มสีดำที่เคลือบบนเซ็นเซอร์หลังจากสังเคราะห์ (ข) ภาพถ่าย SEM แสดง ท่อนาโนคาร์บอนบนเซ็นเซอร์ ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้ผงฟลูโรเซนกับสารละลายแอลกอฮอล์.....	77
4.3 เซ็นเซอร์ที่สร้างโดยไม่มีท่อนาโนคาร์บอน (ก) มีฟิล์มสีดำกระจายอยู่บางส่วนบนเซ็นเซอร์หลังจากสังเคราะห์ (ข) ภาพถ่าย SEM แสดง ท่อนาโนคาร์บอนบนเซ็นเซอร์ ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้เฉพาะสารละลายแอลกอฮอล์.....	78
4.4 ลักษณะค่าความต้านทานไฟฟ้าในการตอบสนองต่อไอสาร VOCs อิมตัว 3 ชนิด คือ 1) เอทานอล 2) เมทานอล และ 3) อะซีโตน ของเซ็นเซอร์ที่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน.....	79
4.5 ลักษณะค่าความต้านทานไฟฟ้าในการตอบสนองต่อไอสาร VOCs อิมตัว 3 ชนิด คือ 1) เอทานอล 2) เมทานอล และ 3) อะซีโตน ของเซ็นเซอร์ที่ไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน	79
4.6 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อไอสาร VOCs อิมตัว ของเซ็นเซอร์ที่สร้างโดยมีและไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน (ได้จากการคำนวณในรูปที่ 4.4-4.5).....	80
4.7 กราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิ(100-700°C) ตามตำแหน่งต่างๆภายในท่อทำปฏิกิริยาของระบบชีวิต แบบไพโรโรซิส และภาพจำลองลักษณะของฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน ที่เคลือบบนแผ่นฐานเก็บตัวอย่าง ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม โดยบริเวณปลายรูปสามเหลี่ยมจะมีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน เคลือบอยู่เบาบางมาก เมื่อเทียบกับฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนบริเวณที่มีเส้นลวดความร้อน.....	81
4.8 ภาพถ่าย SEM ของเซ็นเซอร์ที่เคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร (ก) ทิวปีที่เกิดบนผิวอุณหภูมินิยมจะตั้งตรงและสูงกว่าทิวปีที่เกิดบนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ โดยมีความสูงของทิวปี ~ 100 ไมครอน และ ~ 5 ไมครอน ตามลำดับ (ข) ทิวปีที่เคลือบบนผิวอุณหภูมินิยมขนาดที่จะเล็กและสะอาดกว่าทิวปีที่เกิดบนบนผิวซิลิคอน ไดออกไซด์.....	83

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ภาพถ่าย SEM ของเซ็นเซอร์ (ก-1) และ (ข-1) ท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบอยู่ด้านบนสุด ของเซ็นเซอร์ ที่ตำแหน่ง 13 และ 16 เซนติเมตร ตามลำดับ (ก-2)และ (ข-2) ท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบบนผิวอลูมิเนียมและบนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ของเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่ง 3 และ 16 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	84
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนและความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของชิ้นงานที่ 1-ก ถึง 1-ง โดยเป็นชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร.....	85
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนและความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของชิ้นงานที่ 2-ก ถึง 2-ง โดยเป็นชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 13 เซนติเมตร.....	85
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนและความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของชิ้นงานที่ 1-ก ถึง 1-ง โดยเป็นชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร.....	86
4.13 การตอบสนองต่อ ไออะซี โทน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ของชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร ใช้เวลาการสังเคราะห์ 5, 10 , 15 และ 20 นาทีตามลำดับ.....	87
4.14 การตอบสนองต่อ ไออะซี โทน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ของชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่งที่ 13 เซนติเมตร ใช้เวลาการสังเคราะห์ 5, 10 , 15 และ 20 นาทีตามลำดับ.....	88
4.15 การตอบสนองต่อ ไออะซี โทน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่งที่ 16 เซนติเมตร ใช้เวลาการสังเคราะห์ 5, 10 , 15 และ 20 นาทีตามลำดับ.....	88
4.16 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อ ไออะซี โทน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงาน ที่เคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนเป็นเวลา เวลา 5 นาที 10 นาที 15 นาที และ 20 นาที ณ ตำแหน่งต่างๆ กัน.....	89
4.17 เปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของเซ็นเซอร์ตรวจจับ VOCs กับค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อ ไอสารอะซี โทนความเข้มข้น20 เปอร์เซ็นต์.....	90

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ผลการวัดการตอบสนองของค่าความต้านทานก่อนและหลังการนำชิ้นงานไปวัดด้วยอะซีโตนซึ่งอิมมิดที่บรรยากาศและอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส โดยชิ้นงานตัวอย่างที่ 1 (ก-1) ก่อนการวัดในอะซีโตน(ก-2) วัดในอะซีโตน (ก-3)หลังการวัดในไอสารอะซีโตน (ก-4)หลังการวัดในไออะซีโตน 8 วัน (ก-5) หลังการวัดในไอสารอะซีโตน 9 วัน และ ชิ้นงานตัวอย่างที่ 2 ซึ่งทำการวัดพร้อมกันกับตัวอย่างที่ 1 (ข-1)วัดในไอสารอะซีโตนความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 1 (ข-2) วัดในไอสารอะซีโตนความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2 ห่างจากครั้งแรก 9 วัน.....	92
4.19 ผลของอุณหภูมิต่อการตอบสนองไอของสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ของชิ้นงานที่สร้างด้วย พลาสติกโตนานาโนคาร์บอน ณ ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร.....	95
4.20 ผลของอุณหภูมิต่อการตอบสนองไอของสารอะซีโตนความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ของชิ้นงานที่สร้างด้วย พลาสติกโตนานาโนคาร์บอน ณ ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร.....	97
4.21 เปรียบเทียบ (ก) อุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของก๊าซเซ็นเซอร์ที่สร้างที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร กับ (ข) งานวิจัยของ N. H [40]Quang และคณะ ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์วัดก๊าซแอมโมเนียที่สร้างด้วยโตนานาโนคาร์บอน.....	98
4.22 (ก)เปรียบเทียบอุณหภูมิของการทำงานกับค่าความต้านทานคั้นของชิ้นงานและ (ข) – (ค) เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อไอสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ กับอุณหภูมิในการทำงานของชิ้นงานที่ทำการเคลือบฟิล์มที่ตำแหน่งที่ 10 เซนติเมตร เซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยฟิล์มโตนานาโนคาร์บอน.....	99
4.23 (ก)-(ข) เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อไอสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ กับอุณหภูมิในการทำงาน ของเซ็นเซอร์ที่เคลือบฟิล์มโตนานาโนคาร์บอนที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร	100
4.24 กราฟแสดงลักษณะความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการวัดซ้ำการตอบสนองต่อไอสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20000 ppm ของชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่งที่ 10 เซนติเมตร และเวลาในการสังเคราะห์ 15 นาที	101
4.25 กราฟแสดงลักษณะความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการวัดซ้ำการตอบสนองต่อไออะซีโตนความเข้มข้น 20000 ppm ของชิ้นงานที่สร้างที่ 16 เซนติเมตร และเวลาในการสังเคราะห์ 20 นาที	101

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 ลักษณะค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อการเปิด-ปิดไออะซีโตนที่มีค่าความเข้มข้นต่างๆ (ก) ชั้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร (ข) ชั้นงานที่สร้างที่ตำแหน่งที่ 16 เซนติเมตร.....	103
4.27 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของปริมาณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อต่อการเปิดไอสารอะซีโตน ของเซ็นเซอร์ตรวจจับที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนเป็นเวลา 5 นาที 10 นาที 15 นาที และ 20 นาที.....	104
4.28 กราฟแสดงผลของค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อสาร VOCs ต่างชนิดกัน ซึ่งอ้อมตัวที่บรรยากาศห้องของอุปกรณ์ที่สร้างด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน โดยเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่งที่ 10 และ 16 เซนติเมตรตามลำดับ.....	105
4.29 (ก) กราฟแสดงการตอบสนองต่อไออะซีโตนความเข้มข้น 30 % (ข) กราฟแสดงความไวการตอบสนองของเซ็นเซอร์ โดยใช้เวลา ~ 6-7 วินาที (ค) กราฟแสดงการคืนกลับสภาพเดิมของเซ็นเซอร์ ในอากาศต่างๆ ไปโดยใช้เวลา~ 1-2 นาที.....	107
4.30 (ก) กราฟแสดงการตอบสนองต่อไออะซีโตนความเข้มข้น 30 % (ข) กราฟแสดงความไวการตอบสนองของเซ็นเซอร์ โดยใช้เวลา ~ 6-7 วินาที (ค) กราฟแสดงการคืนกลับสภาพเดิมของเซ็นเซอร์ใช้เวลา~ 1-2 นาที โดยฉายด้วยแสงจากหลอดไฟฟ้าทั้งสแตน 40 วัตต์.....	107
4.30 กราฟแสดงการคืนกลับสภาพเดิมของเซ็นเซอร์ ที่สร้างด้วยชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่ง 16 cm และเวลาการสังเคราะห์ 20 นาที ต่อไอเมทานอลอ้อมตัว (มีความเข้มข้น ~19%) โดยการคืนกลับสภาพเดิมโดยในสภาวะอากาศต่างๆ ไป (ข) การคืนกลับสภาพเดิมโดยฉายด้วยแสงจากหลอดไฟฟ้าทั้งสแตน 40 วัตต์.....	108
4.32 การตอบสนองโดยการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อไออะซีโตนความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ของชั้นงานที่สร้างด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน โดย (ก) เป็นผลการวัดครั้งแรกหลังจากสร้างชั้นงานเสร็จ (ข) ผลการวัดซึ่งห่างจากวันแรก 6 วัน (ค) ผลการวัดซึ่งห่างจากวันแรก 12 วัน.....	110

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
σ	Sigma bond
π	Pi bond
eV	electron Volt
Å	Angstrom
HOMO	Highest Occupied Molecular Orbital
LUMO	Lowest Unoccupied Molecular Orbital
CNTs	Carbon nanotubes
SWNTs	Single-Walled Nanotubes
MWNTs	Multi-Wall Nanotubes
C_h	Chairal Vector
T	Translational vector
d_t	Diameter of CNTs
θ	Chairal angle
d_R	Greatest common divisor (gcd)
Fe	Iron
Ar	Argon
SCCM	Standard cubic centemeter
°C	Celcies degree

ศัพท์เทคนิค

ไฮบริดไดเซชัน	Hybridization
ออร์บิทัล	Orbital
เตตระฮีดรอน	Tetrahedral
เพชร	Diamond
กราไฟต์	Graphite
วาน เดอร์ วาล	Wall der paund
โอเวอร์แลป	Over lap
บัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์	Buckminster fullerence
แผ่นกราฟีน	Graphene sheet
คาร์บอนไฟเบอร์	Carbon fiber
อะมอร์ฟัสคาร์บอน	Amorphous carbon
ท่อนาโนคาร์บอน	Carbon nanotube
ยูนิตเซลล์	Unit cell
ค่าคงตัวแลตทิซ	Lattice constant
บริลลูอินโซน	Brillouin zone
รีซิพโรคัลแลตทิซเวกเตอร์	Reciprocal lattice vector
ไชรอลเวกเตอร์	Chiral vector
ทรานสเลชันนัลเวกเตอร์	Translational vector
เรียลสเปซ	Real-space
แลตทิซหกเหลี่ยม	Hexagon lattice
ออร์ทอกอนอลแลตทิซเวกเตอร์	Orthogonal lattice vector
เฟิร์สบริลลูอินโซน	First Brillouin zone
ไลน์เซกเมนต์	Line segment
ดิสครีตเวฟเวกเตอร์	Discrete wave vector
เอ็นเนอร์จี้ดีสเพอร์ชัน	Energy dispersion
เลขคลื่น	Wave number
คัทติงไลน์	Cutting line
เวฟเวกเตอร์	Wave vector
ควอนไทซ์เวฟเวกเตอร์	Quantize wave vector

ศัพท์เทคนิค(ต่อ)

ไทด์บิงดิง	Tight binding
วาเลนซ์แบนด์	Valence band
คอนดักชันแบนด์	Conduction band
สารกึ่งตัวนำ	Semiconductor
โลหะ	Metallic
ระดับเฟอร์มิ	Fermi level
ซิกแซก	Zigzag
อาร์มแชร์	Armchair

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

โลกของเราประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด บางชนิดถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม และบางชนิดก็มีผลโดยตรงต่อสภาวะแวดล้อมการดำรงอยู่ของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องทำการวัดและควบคุมก๊าซเหล่านี้ เพื่อจัดการและควบคุมให้อยู่ภายใต้สภาวะที่พึงประสงค์ได้จากความจำเป็นดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาการในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณก๊าซต่าง ๆ เพื่อตรวจวัดวิเคราะห์ปริมาณและแยกชนิดของก๊าซหรือสารเคมีต่างๆที่มีในบรรยากาศเพื่อความปลอดภัยของสิ่งมีชีวิตต่างๆ นอกจากนั้นการศึกษาและการพัฒนาเซ็นเซอร์ยังสามารถตอบสนองความต้องการในการควบคุมก๊าซหรือการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อช่วยในการวิเคราะห์กลิ่นและปริมาณสารเคมีต่างๆและสามารถใช้ประกอบในระบบควบคุมของกระบวนการผลิตเพื่อให้เป็นไปตามความต้องการ เป็นต้น

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษเป็นปัญหาที่สำคัญมากปัญหาหนึ่งที่มีผลกระทบต่อมนุษย์และธรรมชาติ โดยเฉพาะปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds: VOCs)[1] ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักและมีไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ฟลูออไรด์, คลอไรด์, โบรไมด์, ซัลเฟอร์ หรือไนโตรเจนประกอบกันเป็นพวกอะลิฟาติก(Aliphatic) หรือ อะโรมาติก(Aromatic) รวมถึงกลุ่มคาร์บอนิล(อัลดีไฮด์และคีโตน) และกลุ่มแอลกอฮอล์ ซึ่งระเหยกลายเป็นไอหรือก๊าซได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดี เป็นของเหลวที่ไม่มีสี ติดไฟไม่เป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากรับประทานเข้าไปมาก ๆ ใช้เป็นตัวทำละลายและเป็นตัวทำปฏิกิริยาในการเตรียมสารอินทรีย์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล นำไปใช้ในการเจือจางในส่วนผสมของยา ทำพลาสติก เหล้า แอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงรถได้อีกด้วย จากการนำไปใช้งานอย่างหลากหลายของสารประกอบอินทรีย์ระเหย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการพัฒนาเซ็นเซอร์ที่มีความไวในการตรวจจับไอของสารเหล่านี้เมื่อมีการรั่วไหลของสารพิษเหล่านี้เพื่อที่จะแก้ไขได้ทันที

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของก๊าซที่ใช้ในปัจจุบันนี้มีหลายชนิด เช่น ก๊าซเซ็นเซอร์แบบเผาไหม้ผ่านตัวกระตุ้น(catalytic combustion gas sensor), ก๊าซเซ็นเซอร์แบบโพเทนทิโอสแตติก(potentiostatic gas sensor), ก๊าซเซ็นเซอร์แบบเซลล์กัลวานิก(galvanic gas sensor), โซลิดอิเล็กโทรไลต์(solid electrolyte gas sensor), เพียโซอิเล็กทริก(piezoelectric type gas sensor), ก๊าซเซ็นเซอร์แบบ FET (Field Effect Transistor type gas sensor), ก๊าซเซ็นเซอร์แบบใช้ไอออนซีเล็กทีฟอิเล็กโทรดเมมเบรน(ion-selective electrode with membrane gas sensor), ก๊าซเซ็นเซอร์

แบบใช้แสง(photonic gas sensor), ก๊าซเซ็นเซอร์แบบพอลิเมอร์เมมเบรน(polymer gas sensor)และ ก๊าซเซ็นเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ(semiconductor gas sensor) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันแล้วจะนิยมใช้ ก๊าซเซ็นเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากมีการตอบสนองสูง มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และมีราคาถูก เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ววัสดุสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้สร้างก๊าซเซ็นเซอร์ เช่น ทินออกไซด์(SnO_2), ไทเทเนียม ไดออกไซด์(TiO_2), ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) และ ซิงค์ออกไซด์(ZnO) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามก๊าซเซ็นเซอร์ประเภทนี้ยังมีข้อจำกัดในการจำแนกสารบางชนิดต่ำ นอกจากนี้คุณสมบัติที่ใช้ในการทำงานก็สูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีการสูญเสียพลังงานอย่างมากในขณะทำการตรวจวัด ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัญหาดังกล่าวและมุ่งหาวิธีการ ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการศึกษาวัสดุชนิดใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของก๊าซเซ็นเซอร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการเริ่มการศึกษาและพัฒนาก๊าซเซ็นเซอร์ ด้วยวัสดุท่อนาโนคาร์บอน(carbon nanotubes: CNTs) ซึ่งเป็นวัสดุชนิดใหม่สำหรับการนำมาสร้างเป็นก๊าซเซ็นเซอร์ ท่อนาโนคาร์บอน เป็นวัสดุที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร และมีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งสารกึ่งตัวและโลหะซึ่งถูกค้นพบ ในปี 1991[2] โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อสุมิโอะ อิจิมะ(Somio Iijima) ซึ่งมีคุณสมบัติที่โดดเด่นเป็นพิเศษทั้งทางกายภาพ ทางฟิสิกส์ และทางไฟฟ้า เช่น ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก $1500 \text{ m}^2/\text{g}$ ความหนาแน่น $1.33 - 1.40 \text{ cm}^3$ ความสามารถในการนำไฟฟ้าประมาณ 10^9 A/cm^2 (ประมาณ 1000 เท่าของทองแดง) การทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี การปลดปล่อยอิเล็กตรอนสามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ $1 - 3 \text{ V}/\mu\text{m}$ และมีความยืดหยุ่นถึงจะถูกงอ ก็สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้โดยไม่เสียหาย[3] ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้าง, เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนของท่อนาโนคาร์บอน ดังนั้น ท่อนาโนคาร์บอนจึงได้รับความสนใจในการถูกนำมาศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างกว้างขวางทั้งในด้านการแพทย์และงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะจากคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนที่มีสัมประสิทธิ์ของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง และทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำไปศึกษาและพัฒนาเพื่อสร้างเป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซและ โมเลกุลต่างๆ เพราะการที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงจึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำปฏิกิริยาต่อก๊าซ และ โมเลกุลต่างๆ ได้ดีประอบกับคุณสมบัติอื่นๆ จึงเหมาะสำหรับเป็นวัสดุเซนซิง (material sensing) ที่ดีของหัวตรวจจับก๊าซ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซด้วยท่อนาโนคาร์บอนเพื่อสร้างเป็น อุปกรณ์จับก๊าซและทำการสร้างชุดทดสอบก๊าซเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน โดยที่ท่อนาโนคาร์บอนที่เรานำมาสร้างเป็นก๊าซเซ็นเซอร์สังเคราะห์ด้วยวิธีการชีวิตแบบไพโรไลซิส โดยมีโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์กับชั้นโลหะอลูมิเนียม 2 ชั้น ซึ่งมีระยะห่างระหว่างชั้นไฟฟ้า 500 ไมครอน โดยการนำเอาฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มี

อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ทำหน้าที่เป็นวัสดุเซนซิง ซึ่งทำให้ตรวจจับที่ถูกต้องสร้างขึ้นมีการตอบสนองได้มาก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างก๊าซเซ็นเซอร์ ด้วยวัสดุที่มีท่อนาโนคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ
2. เพื่อทดสอบสมบัติและการทำงานของก๊าซเซ็นเซอร์ ที่สร้างด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน
3. เพื่อศึกษาวิธีการและระบบที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซ็นเซอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์เพื่อตรวจวัดปริมาณไอสารอินทรีย์ระเหย เช่น เมทานอล เอทานอล และอะซีโตน โดยใช้ฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนเป็นแผ่นเมมเบรนสำหรับส่งผ่านก๊าซ
2. ทดสอบคุณลักษณะของอุปกรณ์ตรวจจับไอสารอินทรีย์ระเหย คือ สมบัติความไวในการตอบสนอง ความละเอียดของการวัด ความจำเพาะ ความเสถียร และพิสัยของการวัดที่สามารถวัดได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นไปตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยในบรรยากาศได้
2. เข้าใจระบบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซ็นเซอร์

โดยรายละเอียดของเนื้อหาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึง ความสำคัญของก๊าซเซ็นเซอร์ และความสำคัญของท่อนาโนของคาร์บอนที่ใช้ในการสร้างก๊าซเซ็นเซอร์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง เป็นการกล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับท่อนาโนคาร์บอน เช่น ธาตุคาร์บอน ชนิด คุณสมบัติ เทคนิคในการสังเคราะห์ การประยุกต์ใช้งานสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์ และเครื่องมือในการวิเคราะห์พื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน เพื่อให้รู้จักและเข้าใจคุณลักษณะและคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนให้มากยิ่งขึ้น

บทที่ 3 การทดลอง เป็นการกล่าวถึง ลำดับขั้นตอนในการทำวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีชีวิตแบบไพโรไลซิส การร่างแบบและสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียม

การตรวจวัดสมบัติและคุณลักษณะ และการศึกษาเทคนิคการตรวจวัดการตอบสนองต่อไอของสารอินทรีย์ของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

บทที่ 4 ผลการทดลอง เป็นการกล่าวถึง ผลการทดลองของเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน โดยทำการเปรียบเทียบเซ็นเซอร์ที่สร้างโดยมีและไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน ศึกษาผลของตำแหน่ง และเวลา ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนต่อการตอบสนองต่อไอสารอินทรีย์ของเซ็นเซอร์ และคุณสมบัติของเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยที่ได้จากการทดลองการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดไอสารระเหยอินทรีย์โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอน รวมทั้งกล่าวถึงแนวทางในการพัฒนาการก๊าซเซ็นเซอร์ด้วยท่อนาโนคาร์บอน เพื่อให้มีคุณภาพมากขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในตรวจจับก๊าซในบรรยากาศ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับท่อนานาโนคาร์บอน เช่น ชาติคาร์บอน ชนิด คุณสมบัติ เทคนิคในการสังเคราะห์ การประยุกต์ใช้งานสำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์ และเครื่องมือในการวิเคราะห์พื้นผิวของท่อนานาโนคาร์บอน เพื่อให้รู้จักและเข้าใจคุณลักษณะและคุณสมบัติของท่อนานาโนคาร์บอนให้มากยิ่งขึ้น

2.1 ความสำคัญของอุปกรณ์ตรวจจับสารอินทรีย์ไอระเหย [32-33]

สารอินทรีย์ไอระเหย หรือ VOCs (Volatile Organic Chemicals) คือ กลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศได้ในที่อุณหภูมิและความดันปกติ สารประกอบอินทรีย์ระเหย จะมี คาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีออกซิเจน ฟลูออไรด์ คลอรีน โบรมีน ซัลเฟอร์ หรือไนโตรเจน ประกอบกันเป็นพวก อะลิฟาติก(Aliphatic) หรือ อะโรมาติก(aromatic) รวมถึงกลุ่มคาร์บอนิล(อัลดีไฮด์ คีโตน)และกลุ่มแอลกอฮอล์ โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอน 2 ถึง 12 อะตอม ระเหยกลายเป็นไอหรือก๊าซได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดี ตัวอย่างของ ตัวทำละลายที่จัดเป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหย เช่น เบนซีน ไชลีน โทลูอีน สไตรีน ฟอรัลดีไฮด์ เปอร์คลอโรเอทิลีน ไวท์ สปิริต (White Spirit) และรับเบอร์ โซลเว้นท์ (rubber solvent) ตัวทำละลายยาง และการผสมซีเมนต์ เป็นต้น ซึ่งในชีวิตประจำวันจะมีสารอินทรีย์ไอระเหย จากผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น สีทาบ้าน ควันบุหรี่ น้ำยาฟอกสี สารตัวทำละลายในพิมพ์ อู่พ่นสีรถยนต์ โรงงานอุตสาหกรรม น้ำยาซักแห้ง น้ำยาสำหรับขัดผมและน้ำยาดัดผม สารฆ่าแมลง สารที่เกิดจากเผาไหม้ และปะปนในอากาศ น้ำดื่ม เครื่องดื่ม และอาหาร

สำหรับสารอินทรีย์ระเหยที่เราคุ้นเคยกันเป็นมากคือ แอลกอฮอล์ (alcohol) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl (-OH)) เป็นองค์ประกอบ แอลกอฮอล์เป็นสารประกอบที่พบบ่อยในธรรมชาติ ในโรงงานและในครัวเรือนและเป็นสารที่มีประโยชน์โดยแอลกอฮอล์ที่เรารู้จักกันดี คือ เมทานอลและเอทิลแอลกอฮอล์ โดยเมทานอล(methanol)จะมีคาร์บอนหนึ่งตัว คือ $\text{CH}_3\text{-OH}$ ใช้เป็นตัวทำละลาย ใช้เป็นสารกันความเย็น(antifreeze) สารสกัดสารเชื้อเพลิง ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตฟอรัลดีไฮด์(formaldehyde) และ เมทิลเอสเทอร์ (methyl esters) ใช้ในการบำบัดน้ำ ใช้ในอุตสาหกรรมแก๊สธรรมชาติ(natural gas) อุตสาหกรรมการผลิตสี น้ำมันชักเงา ซีเมนต์ หมึกพิมพ์ สีย้อม พลาสติก และอุตสาหกรรมการผลิตยา โดยลักษณะ

ของเมทานอลจะเป็นของเหลวใสไม่มีสีและมีกลิ่นแอลกอฮอล์ ไอระเหยของสารนี้ผสมกับอากาศทั่วไปได้ดี และอาจทำให้เกิดระเบิดได้เมื่อได้รับความร้อนและเข้มข้นสูง สำหรับอันตรายด้านสุขภาพ นั้นเมื่อมีสารเข้าสู่ร่างกายจะเป็นพิษต่อประสาทโดยตรง ดับเสื่่อมและเกิดอาการกดประสาท ทำให้ตาบอด สำหรับเอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) จะมีคาร์บอนสองตัว คือ C_2H_5-OH จะนำมาใช้ในการผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ การผลิตสารเคมีอื่นๆ ใช้เป็นสารทำละลายในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องสำอาง น้ำหอม ยาและเวชภัณฑ์ พลาสติก ยางสังเคราะห์ เป็นของเหลวใสไม่มีสี ระเหยได้ ไวไฟ มีกลิ่นเฉพาะตัว และรสเผ็ดฉุน อันตรายด้านสุขภาพ ทำลายชั้นไขมันของผิวหนัง ทำให้ผิวหนังแห้ง แดงและอักเสบ มีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง (ปวดศีรษะ เชื่องซึม สมาธิลดลง สั่น อ่อนเพลีย) มีผลต่อดับ หัวใจ ระบบเลือด และมีอาการโลหิตจาง นอกจากนี้ อะซีโตนก็เป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในงานมากอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้เป็นสารทำละลายในขบวนการทำเรซิน แลคเกอร์ ฟิล์ม กาว หมึกพิมพ์ พลาสติกและสารขัดเงา ใช้เป็นกำจัดไขมันในกระบวนการผลิต ใช้ในการผลิตสี ยาง พลาสติก วัตถุระเบิด ไหมเทียม ยางสังเคราะห์ และใช้ในการล้างและถ่ายภาพ โดยมีชื่อทางเคมีว่า Acetone (อะซีโตน) โดยมีคาร์บอนสามตัว คือ $CH_3-CO-CH_3$ หรือ C_3H_6O มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี เมื่อระเหยจะมีกลิ่นหอมหวานเหมือนมันท์ มีความไวสูงติดไฟได้เร็ว ส่วนผสมของอากาศและไอระเหยของอะซีโตนสามารถทำให้เกิดการระเบิดได้ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารที่มีความเป็นออกซิแดนท์ เมื่อสัมผัสโดยการหายใจในระดับความเข้มข้นต่ำๆ จะไม่มีผลเฉียบพลันต่อสุขภาพ แต่ในระดับความเข้มข้นสูง (ประมาณ 1000 ppm) จะมีอาการปวดศีรษะ อ่อนเพลีย ง่วงนอน คลื่นไส้และอาจมีอาการอาเจียนขึ้นได้ ในระดับที่ความเข้มข้นสูงกว่านี้จะเกิดอาการเป็นลม โคม่าและถึงแก่ชีวิตได้ แต่ปกติแล้วการสัมผัสสารเคมีในระดับความเข้มข้นสูงๆนี้มักไม่ค่อยเกิดขึ้น

สารประกอบอินทรีย์ระเหย ในบรรยากาศ จัดเป็นอากาศพิษ (toxic air) จึงต้องมีการควบคุมดูแลอย่างเคร่งครัดเพื่อจัดการและควบคุมให้อยู่ภายใต้สภาวะที่พึงประสงค์ได้ ซึ่งหมายถึงการนำสารดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุดและไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่างๆ ซึ่งการควบคุมดังกล่าวสามารถทำได้โดยการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ไอระเหย หรือเรียกว่า ก๊าซเซ็นเซอร์ ซึ่งจะกล่าวได้ต่อไปในหัวข้อต่อไป

2.2 เซ็นเซอร์

2.2.1 นิยามเซ็นเซอร์ [17]

นิยามเซ็นเซอร์(sensors) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางกายภาพ (physical) เช่น อุณหภูมิ ความดัน สี และแสง เป็นต้น ไปเป็นปริมาณทางไฟฟ้า (electrical) เช่น ความต้านทาน ความจุไฟฟ้า และกระแส เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งเซ็นเซอร์ได้ 2 แบบ

1) เซ็นเซอร์ทางเคมี(chemical sensor)

เซ็นเซอร์ทางเคมีจัดเป็นอุปกรณ์ตรวจสอบสารประเภทหนึ่ง โดยมีส่วนประกอบพื้นฐานคือ ชั้นของการตรวจสอบสารเชื่อมต่อกับส่วนแปลงสัญญาณ โดยชั้นตรวจสอบสารทำหน้าที่ตรวจสอบด้วยการทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของสารที่ผ่านเข้ามาทำให้ชั้นตรวจสอบสารเกิดการทำให้ปฏิกิริยา จากนั้นส่วนแปลงสัญญาณจะทำหน้าที่แปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซทางเคมีที่สำคัญได้ 2 ประเภท คือ ประเภทวัดความนำไฟฟ้า(conduct metric) และ ประเภทวัดศักย์ไฟฟ้า (potentiometric)

2) เซ็นเซอร์ทางฟิสิกส์(physical sensors)

เซ็นเซอร์ทางฟิสิกส์จัดเป็นอุปกรณ์ตรวจสอบสารประเภทหนึ่ง โดยมีส่วนประกอบพื้นฐานคือ ชั้นของการตรวจสอบสารเชื่อมต่อกับส่วนแปลงสัญญาณ โดยชั้นตรวจสอบสารทำหน้าที่ตรวจสอบด้วยการทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของสารที่ผ่านเข้ามาจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างภายในของชั้นตรวจสอบสาร จากนั้นส่วนแปลงสัญญาณจะทำหน้าที่แปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น เซ็นเซอร์วัดความดัน เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ เป็นต้น

2.2.2 คุณสมบัติทั่วไปของเซ็นเซอร์

การนำเซ็นเซอร์ไปใช้งานโดยทั่วไปนั้น มีเงื่อนไขที่ต้องพิจารณาก่อนนำไปใช้งาน เช่น ที่อุณหภูมิ ความชื้น แรงดัน จึงจะทำให้เซ็นเซอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยในเซ็นเซอร์ต่างๆ ไป ค่าที่ต้องพิจารณาต่างๆจะมีความหมายดังนี้

1. ย่านวัด (range) เป็นการจำกัดค่าอินพุต และเอาท์พุทของเซนเซอร์ในการใช้งาน

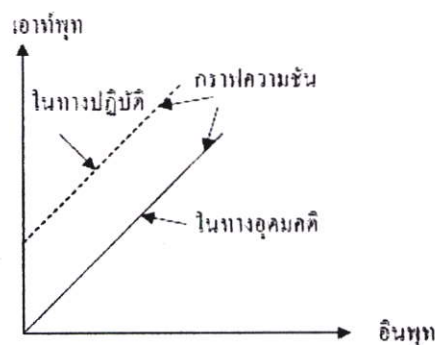
2. ความผิดพลาด (error) เนื่องจากขั้นตอนดำเนินการ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด จะไม่สมบูรณ์แบบในทางปฏิบัติ ดังนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างผลที่ได้จากการวัด และค่าจริงของปริมาณที่ถูกวัด ความแตกต่างนี้เรียกว่า “ความผิดพลาด” ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหาค่าผิดพลาดในการวัดอย่างแน่นอนได้ ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดจึงมีความไม่แน่นอน (Uncertainty) รวมอยู่ด้วยเสมอ

3. ความแม่นยำ (accuracy) และความเที่ยงตรง (precision) ในการวัดค่า ความแม่นยำและความเที่ยงตรง ถือว่าเป็นลักษณะจำเพาะของกระบวนการวัด ความแม่นยำ หมายถึง ค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริงมากเพียงใด ในขณะที่ความเที่ยงตรง จะมีสองความหมาย ความหมายแรก หมายถึง สามารถวัดได้ละเอียด (sharp definition) อุปกรณ์วัดที่มีความละเอียดสูง หมายถึง สเกลที่แบ่งย่อยละเอียดมากทำให้สามารถอ่านค่าได้ละเอียด ในอีกความหมายหนึ่งของคำว่าเที่ยงตรงก็คือค่าที่วัดได้เข้าใกล้กันเพียงใด ในความหมายหลังนี้จะหมายถึง ความคงเส้นคงวา (consistency) หรือ

ความสามารถซ้ำค่าเดิม (repeatability) ของผลการวัด อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง หมายถึงค่าที่ได้จากการวัดจะมีการกระจายน้อยกว่าอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงต่ำ

4. ความไว (sensitivity) หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตหรือการตอบสนองของอุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต หรือค่าที่ถูกวัด

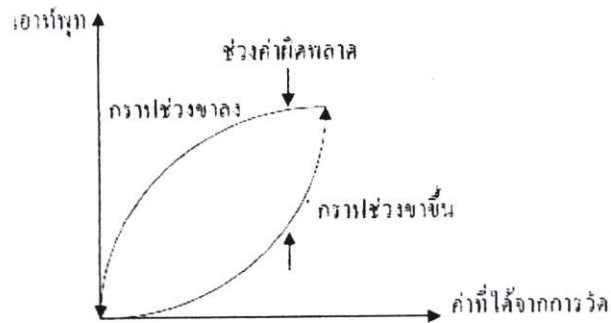
5. ความเป็นเชิงเส้น (linearity) หรือความแม่นยำ โดยความเป็นเชิงเส้นจะแสดงค่าที่วัดได้ว่ามีกราฟดูอย่างไรบนสเกลที่เป็นเชิงเส้น และเป็นสัดส่วน สเกลอาจจะเป็นเชิงเส้นอย่างมากแต่มีความเอียง, ความชัน หรือออฟเซต จากค่าที่ถูกกำหนด แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ในทางอุดมคติ

6. ความมีเสถียรภาพ (stability) ความมีเสถียรภาพของอุปกรณ์วัด หมายถึง ความสามารถในการให้สัญญาณเอาต์พุตเดิม เมื่อใช้วัดสัญญาณอินพุตที่คงที่แม้เวลาจะเปลี่ยนแปลงไป คำว่า การคลาดเคลื่อนมักถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของเอาต์พุตอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ดังกล่าว การคลาดเคลื่อนอาจจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เต็มย่านวัดก็ได้ คำว่า การคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ถูกนำมาใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้นที่เอาต์พุตเมื่ออินพุตมีค่าเป็นศูนย์

7. ฮิสเทอรีซิส (hysteresis) การที่อุปกรณ์วัดให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิมกล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงอาจมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดจากเหตุการณ์นี้เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นนี้ถือว่าเป็นความผิดพลาด แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ฮิสเตอร์รีซิสสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิม

8. การแยกชัด (resolution or discrimination) บอกถึง คุณภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะเฉพาะของความสามารถของอุปกรณ์วัดในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กๆ ของ ณ ที่ถูกวัด
9. ออฟเซ็ท (offset) เป็นค่าเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ ที่ไม่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง หรือที่สัญญาณอินพุตเป็นศูนย์
10. ความเร็วในการตอบสนอง (speed of response) แสดงถึง เวลาที่เอาต์พุตมีค่าอยู่ใน 63 เปอร์เซ็นต์ ของค่าสุดท้ายที่ทำการการตอบสนองของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในการวัด

2.2.3 นิยามก๊าซเซ็นเซอร์

นิยามก๊าซเซ็นเซอร์ (gas sensor) คือ วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถรับรู้โมเลกุลของก๊าซที่มากระดับ และสามารถตอบสนองในรูปแบบสัญญาณที่สามารถแปลงสัญญาณที่เข้ามา ให้อยู่ในรูปแบบที่จะเป็นประโยชน์ต่อการประมวลผล (รูปที่ 2.3) เซ็นเซอร์แบ่งตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เป็น

- 1) Chemical Gas Sensor เมื่อวัสดุที่ใช้สร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซได้รับก๊าซที่ทดสอบทำให้มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น (oxidation-reduction) มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนและมีพันธะเกิด (covalent) ขึ้นบริเวณผิวหน้าของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ
- 2) Physical Gas Sensor เมื่อวัสดุที่ใช้สร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซได้รับก๊าซที่ทดสอบโดยโมเลกุลของก๊าซจะดูดซับ (absorb) ด้วยแรงวานเดอร์วาลส์ (van der waals) ซึ่งเป็นแรงที่มีค่าน้อย

โดยสามารถแบ่งลักษณะการทำงานของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซได้เป็น 3 ชนิดหลักๆ

1) Gas adsorption gas sensor

เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซในกลุ่มนี้ทำงานโดยวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อมีโมเลกุลของก๊าซถูกดูดซับเข้าไปในผิวของวัสดุ และวัสดุที่ใช้ทำเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซจะดูดซับ โมเลกุลของก๊าซเข้าไปที่ผิวและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังนี้

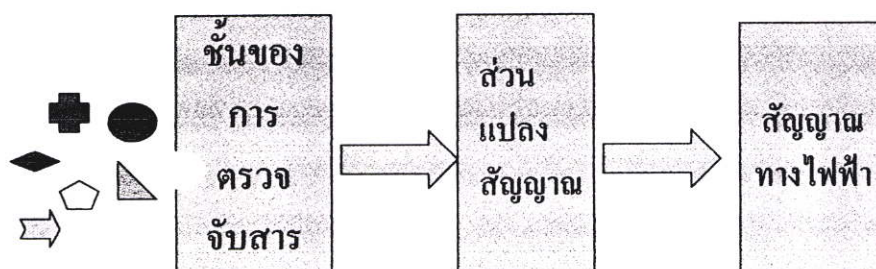
- 1.1 เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุ (surface potential)
- 1.2 เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลซึ่งทำให้น้ำหนักของวัสดุเปลี่ยนแปลงและเป็นผลให้ความถี่เรโซแนนซ์(resonance) ของระบบเปลี่ยนแปลง

2) Gas reaction gas sensor

เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบนี้จะทำการวัดผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อก๊าซที่ต้องการวัดเกิดปฏิกิริยา เช่น การวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ทำแผ่นเมมเบรน(membrane) ที่มีตัวกระตุ้นผสมอยู่เมื่อแผ่นเมมเบรนสัมผัสกับ โมเลกุลก๊าซที่ต้องการวัด จะส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มและชนิดของโมเลกุลก๊าซที่มาสัมผัส ซึ่งส่วนใหญ่เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดนี้ทำจากวัสดุเซรามิก(ceramic)

3) Selective membrane gas sensor

เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซที่ทำงานโดยใช้ประโยชน์ของซีล็คทีฟเมมเบรน(selective membrane) ที่ยอมให้ก๊าซบางชนิดเท่านั้นที่ผ่านเข้าไปได้ เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดที่ใช้วัดออกซิเจน จะมีแผ่นเมมเบรนแบบโซลิดอิเล็กโทรไลต์(solid electrolyte) ที่ทำมาจาก Y_2O_3 และได้ไปด้วย ZrO_2 เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซส่วนที่ใช้วัด SO_2 จะมีแผ่นเมมเบรนแบบ โซลิดอิเล็กโทรไลต์ที่ทำมาจาก K_2SO_4 โดยเมื่อมีก๊าซข้างต้นซึมผ่านเข้าไปจะส่งผลให้สมบัติของแผ่นเมมเบรนเปลี่ยนไป และวัดปริมาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหากเปลี่ยนแปลงมากก็แสดงว่ามีก๊าซดังกล่าวมาก



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ

2.2.4 เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดต่างๆ

การสร้างก๊าซเซ็นเซอร์สามารถสร้างได้โดยขึ้นอยู่กับวิธีและวัสดุที่ใช้ ทำให้ปัจจุบันมีก๊าซเซ็นเซอร์หลายรูปแบบ ดังนั้นการนำเซ็นเซอร์ไปใช้งานยังต้องคำนึงถึงคุณสมบัติและรูปแบบการใช้งานของเซ็นเซอร์ โดยในหัวข้อต่อไปนี้จะขอยกตัวอย่างก๊าซเซ็นเซอร์ประเภทต่างๆและรูปแบบการใช้งาน แต่เนื่องจากเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซมีหลายประเภท โดยจะยกมาเฉพาะที่สำคัญๆ[18] ดังต่อไปนี้

1) เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบเซลล์กัลวานิก(galvanic gas sensor)

หลักการทํางานและ โครงสร้างของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดนี้จะคล้ายกับแบบโพเทนทิโอสแตติก คือมีการวัดความเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในระบบและ โครงสร้างของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดนี้ประกอบด้วย ขั้วเคมีไฟฟ้า กล่าวคือ มีขั้วอานิค ขั้วคาโทดและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แต่มีข้อแตกต่างจากก๊าซเซ็นเซอร์แบบโพเทนทิโอสแตติก คือเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วเคมีไฟฟ้า คือศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขั้วอิเล็กโทรดมีค่าเป็นศูนย์ แต่ขณะเดียวกันก็วัดความเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของก๊าซที่ต้องการวัดที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งเป็นหลักการเดียวกับเซลล์แบตเตอรี่ ตัวอย่างของก๊าซเซ็นเซอร์ชนิดนี้ได้แก่ หัววัดออกซิเจน ก๊าซเซ็นเซอร์แบบนี้จึงใช้ได้เฉพาะกับก๊าซที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูงเท่านั้น

2) โซลิดอิเล็กโทรไลต์(solid Electrolyte gas sensor)

เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบนี้จะอาศัยลักษณะสมบัติการนำไฟฟ้าของโซลิดอิเล็กโทรไลต์ (solid-electrolyte) โดยแทนที่จะใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวเหมือนกับเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ หรือ แบบเซลล์กัลวานิกก็ใช้โซลิดอิเล็กโทรไลต์แทน โดยในการวัดจะทำการวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดที่ขนาบโซลิดอิเล็กโทรไลต์นั้น ตัวอย่างของก๊าซเซ็นเซอร์แบบนี้ได้แก่ หัววัดออกซิเจนที่ทำจากเซอร์โคเนีย(zirconia) โดยที่เซอร์โคเนียเป็นโซลิดอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ไอออนของออกซิเจนเคลื่อนไปได้ง่าย ดังนั้นหากมีความแตกต่างระหว่างความดันไอย่อยของออกซิเจนที่อยู่คนละด้านกันของเซอร์โคเนีย ก็จะมีการเคลื่อนที่ของไอออนของออกซิเจนผ่านเซอร์โคเนีย ซึ่งจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตัวเซอร์โคเนีย ศักย์ไฟฟ้านี้ค่าจะแปรผันกับความแตกต่างของความเข้มข้นของออกซิเจนในลักษณะล็อกกาไลทึม เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบนี้จะทำงานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

3) เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบสารกึ่งตัวนำ(semiconductor gas sensor)

เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบนี้จะอาศัยประโยชน์จากลักษณะจากสารกึ่งตัวนำ คือ เมื่อมีโมเลกุลของก๊าซเข้ามาดูดซับที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดการถ่ายเทระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะมีผลทำให้ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการวัดค่าความต้านทานหรือค่าความนำของกระแสไฟฟ้าจะทำให้ทราบความเข้มข้นของก๊าซได้ ลักษณะการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่ผิวและการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่บัลค์(bulk) แบบการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่ผิวจะมีลักษณะเป็นฟิล์มหนาหรือฟิล์มบาง ส่วนแบบบัลค์ชิ้นงานจะมีความหนามาก โดยมากมีลักษณะเป็นก้อนเผาผนึก(sintered-block) ของสารกึ่งตัวนำบางชนิด ลักษณะการตอบสนองของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซต่อชนิดของก๊าซนั้น จะขึ้นกับชนิดขององค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ในการสร้างและอุณหภูมิการทำงาน ตัวอย่างของวัสดุที่นำมาใช้สร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบนี้ ได้แก่ SnO_2 และ ZnO เป็นต้น ข้อเด่นของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซประเภทสารกึ่งตัวนำคือ มีความไวในการตอบสนองสูงเมื่อมีโมเลกุลของก๊าซมาสัมผัส แต่อย่างไรก็ตามเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซประเภทนี้ก็มีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณา เช่น กระบวนการผลิตเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซประเภทสารกึ่งตัวนำมีกระบวนการในการสร้างที่ยุ่งยาก ซับซ้อนและต้องใช้อุณหภูมิสูงในการสร้าง มีการจำแนกสารบางชนิดค่า กล่าวคือ เมื่อมีโมเลกุลของก๊าซอื่นที่นอกเหนือจากก๊าซตัวอย่างที่ต้องการวัดเข้ามาสัมผัสก๊าซเซ็นเซอร์ประเภทนี้ก็มีการตอบสนอง นอกจากนั้นอุณหภูมิที่ใช้ก็สูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีการสูญเสียพลังงานอย่างมากในขณะที่ทำการตรวจวัด

4) เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบเผาไหม้ผ่านตัวคะตะลิสต์(catalytic combustion gas sensor)

เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซที่อาศัยหลักการที่ เมื่อก๊าซถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูง ดังนั้น การทำงานของก๊าซเซ็นเซอร์หาได้จากการวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความเข้มข้นของก๊าซ ก็จะทำให้ทราบค่าความเข้มข้นของก๊าซได้ ตัวอย่างของก๊าซเซ็นเซอร์ชนิดนี้ได้แก่ เซรามิกส์จำพวกออกไซด์เงินออกไซด์ที่มี Pd เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถนำไปใช้ในการวัดก๊าซ H_2 และ CH_4 ได้ เป็นต้น เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบนี้ใช้ได้ เฉพาะการวัดก๊าซเผาไหม้เท่านั้นและยังมีข้อเสียที่ไม่สามารถแยกชนิดของก๊าซได้

5) เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบโพเทนทิโอสแตติก(potentiostatic gas sensor)

เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซที่ใช้หลักการ ในการวัดความเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเมื่อโมเลกุลของก๊าซที่ต้องการวัดถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์กับระบบ ซึ่งจะส่งผลให้กับกระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปโดยที่ขั้วอิเล็กโทรดมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่กำหนด ดังนั้นการวัดแบบนี้จึงใช้

สำหรับวัดก๊าซที่สามารถถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ได้ทางเคมีไฟฟ้าเท่านั้น โครงสร้างของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดนี้ จึงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเคมี กล่าวคือ มีขั้วแอโนด ขั้วคาโทดและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเพื่อเป็นการเพิ่มความจำเพาะ เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดนี้มักจะมีแผ่นเมมเบรน (membrane) สำหรับส่งผ่านก๊าซ (gas permeable membrane) อยู่ที่ผิวของขั้วไฟฟ้า เพื่อให้ก๊าซที่ต้องการวัดเท่านั้นที่สามารถซึมผ่านเข้าไปได้ และทำการป้องกันไม่ให้ก๊าซที่ไม่ต้องการวัดเข้ามาในระบบการวัด ซึ่งเป็นการลดสัญญาณรบกวนในขณะที่ทำการวัด ตัวอย่างของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดนี้ได้แก่ หัววัดก๊าซ CO และก๊าซ CO₂ เป็นต้น ข้อเด่นของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดนี้คือ มีความไวในการตอบสนองต่อก๊าซที่ต้องการวัดสูง แต่ในขณะเดียวกันก็มีข้อเสียในด้านเสถียรภาพการวัดต่ำ และมีการบำรุงรักษาระบบที่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังมีราคาแพงอีกด้วย

6) เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบใช้แสง (photonic gas sensor)

การวัดก๊าซโดยใช้แสงนั้นสามารถแบ่งย่อยออกได้อีกหลายวิธี เช่น การวัดการสะท้อนของแสงเมื่อแสงผ่านตัวกลางที่มีก๊าซที่ต้องการวัดผสมอยู่ การวัดค่าการดูดแสงในช่วงอินฟราเรด หรือการวัดปรากฏการณ์ Surface Plasma Resonance เป็นต้น

7) เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric type gas sensor)

เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบนี้อาศัยหลักการที่ว่าเมื่อมีโมเลกุลของก๊าซเข้ามาดูดซับ (absorb) ที่ผิวของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของมวลเกิดขึ้น มีผลทำให้ความถี่ของทรานส์ดิวเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการวัดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของทรานส์ดิวเซอร์ ก็จะทำให้ทราบปริมาณของก๊าซที่เข้าดูดซับได้ ลักษณะการวัดเช่นนี้เองทำให้การวัดของทรานส์ดิวเซอร์แบบนี้ ไม่มีความจำเพาะในการวัดชนิดของก๊าซ ดังนั้นโดยทั่วไปจึงนิยมที่จะทำการเคลือบผิวของทรานส์ดิวเซอร์ด้วยสารที่มีสมบัติในการดูดซับสารต่างชนิดกัน เพื่อเพิ่มความจำเพาะในการวัด เช่น การเคลือบผิวด้วย pd ในการวัดก๊าซ H₂ หรือเคลือบด้วย Triethanolaminem ในการวัดก๊าซ SO₂ เป็นต้น โครงสร้างของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ได้แก่ Quartz Crystal หรือสิ่งประดิษฐ์ SAW (surface acoustic wave devices) เป็นต้น

8) เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบ FET (field effect transistor type gas sensor)

เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซนี้อาศัยสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบ FET กล่าวคือ เมื่อมีโมเลกุลของก๊าซที่มีไอโพลเข้ามาดูดซับที่ผิวของเกต (gate) ของ FET จะทำให้ระบบการทำงานของเกตเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไป ทำให้มีการเหนี่ยวนำประจุที่ผิวของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงผลคือ จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วซอส (source) และเดรน (drain)

เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบนี้ นอกจากจะมีโครงสร้างเป็นทรานซิสเตอร์แล้ว อาจจะถูกแปลงให้มีโครงสร้างแบบโคโอดได้ โดยมีหลักการทำงานเช่นเดียวกัน

9) เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบใช้อิออนซีเล็กทีฟอิเล็กโทรดเมมเบรน (ion-selective electrode with membrane gas sensor)

เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดนี้สร้างขึ้น โดยการใช้ไอออนอิเล็กโทรดร่วมกับเมมเบรน และมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความจำเพาะในการทำปฏิกิริยากับก๊าซ แล้วทำการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรดค่า pH มิเตอร์ ตัวอย่างในการวัดเช่น ทำการเคลือบอิเล็กโทรด pH มิเตอร์ด้วยเมมเบรนที่ยอมให้เฉพาะก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ผ่านและมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์อยู่ในระบบเมื่อโมเลกุลก๊าซ CO ผ่านเข้ามาถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ก๊าซ CO จะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้ pH ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เปลี่ยนแปลงไปซึ่งสามารถวัดความเปลี่ยนแปลงได้ด้วย pH มิเตอร์

10) เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบพอลิเมอร์เมมเบรน (polymer membrane gas sensor)

วัสดุที่ใช้สร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดนี้จะแตกต่างจากแบบอื่นๆ ที่กล่าวมาข้างต้นคือ จะใช้สารประเภทพอลิเมอร์เป็นตัวที่ใช้ในการตรวจวัดก๊าซ ส่วนใหญ่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อพอลิเมอร์สัมผัสกับก๊าซก็คือการเปลี่ยนแปลงสภาพความนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ การใช้พอลิเมอร์นั้นมีข้อดีในด้านที่สามารถทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดต่างๆที่เหมาะสมในการวัดหรือวิเคราะห์ก๊าซชนิดต่างๆ ได้ง่าย มีความจำเพาะที่ดี ในขณะที่เดียวกันก็มีข้อเสียในด้านของความคงทนในการใช้งาน

2.2.5 คุณสมบัติพื้นฐานก๊าซเซ็นเซอร์

การนำอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไปใช้งานโดยทั่วๆ ไปนั้น นอกจากจะพิจารณาถึงการนำไปใช้ให้ถูกต้องกับงานแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ไปของเซ็นเซอร์ด้วย โดยในหัวข้อ 2.13 นี้ จะเป็นการกล่าวถึงคุณสมบัติที่เป็นพื้นฐานสำคัญของก๊าซเซ็นเซอร์ที่จำเป็นต้องพิจารณา โดยประกอบด้วย

1. ค่าการตอบสนอง(response)

คือ ความสามารถในการตอบสนองอย่างรวดเร็วในทันที เมื่อก๊าซที่ต้องการวัดมาสัมผัสกับเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซสมบัติข้อนี้มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อก๊าซที่ต้องการวัดเป็นก๊าซพิษหรือก๊าซไวไฟ เพื่อจะได้หลีกเลี่ยงและแก้ไขได้ทันที ก่อนที่จะได้รับอันตรายหรือเกิดเหตุร้ายแรงในบริเวณที่ทำการวัดก๊าซ หากก๊าซรั่วไหลออกมา

2. ความไวของการวัด(sensitivity)

คือ ความสามารถของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซที่จะบอกความแตกต่างของปริมาณของก๊าซที่จะทำการวัด เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซบางชนิดไม่สามารถบอกความแตกต่างของก๊าซปริมาณน้อยๆ เช่น 10 ppm กับ 11 ppm ได้ ดังนั้นเมื่อนำไปวัดก๊าซ 2 บริเวณ ที่มีก๊าซแตกต่างกันน้อยๆก็จะทำให้เข้าใจผิดคิดว่าบริเวณทั้งสอง มีก๊าซในปริมาณเท่ากัน สมบัติชนิดนี้จะสำคัญเฉพาะกรณีก๊าซที่วัดมีปริมาณน้อยๆ หรือต้องการความถูกต้องสูงเท่านั้น

3. ความจำเพาะ(selectivity)

คือ ความสามารถในการจำแนกความแตกต่างระหว่างก๊าซที่ต้องการวัดกับก๊าซที่ไม่ต้องการวัดได้ กล่าวคือ เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซชนิดหนึ่งๆควรมีความสามารถในการตอบสนองต่อก๊าซชนิดเดียวที่ต้องการวัด ไม่ควรที่จะตอบสนองต่อก๊าซชนิดอื่น เพราะจะทำให้สัญญาณรบกวนการวัดได้ในทางปฏิบัติต้องพยายามเลือกวัสดุที่เหมาะสมและไวต่อการวัดก๊าซที่ต้องการวัดโดยเฉพาะมาใช้สร้าง Sensing Membrane หรืออาจจะเจือจางสารบางตัวลงไปในวัสดุที่ใช้สร้าง Sensing Membrane เพื่อให้ Sensing Membrane มีความไวในการตอบสนองของก๊าซที่ต้องการวัดขึ้นมาได้ หรือเลือกต่อการตอบสนองก๊าซที่ไม่ต้องการวัด เช่น การเติม Cr ลงไปในวัสดุสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซที่ทำมาจาก SnO_2 จะทำให้เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซตอบสนองในการวัดเพิ่มขึ้น

4. ความเสถียร (stability)

คือ ผลในการวัดคงที่ไม่เสื่อมสภาพเร็วในการใช้งาน เพื่อให้เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซสามารถวัดได้อย่างต่อเนื่อง

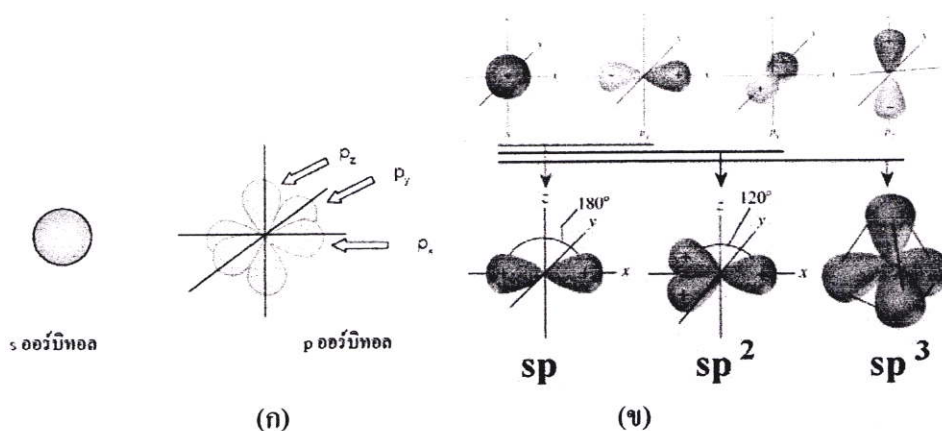
5. พิสัยการวัด(dynamic rang)

คือ ช่วงกว้างของการวัดเซ็นเซอร์ตรวจจับ ก๊าซบางตัวสามารถวัดก๊าซปริมาณตั้งแต่ 100-1000 ppm แต่บางตัวใช้วัดในช่วง 10-50 ppm

2.3 คาร์บอน(carbon)[1]

คาร์บอนเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ IV อะตอมของคาร์บอนประกอบด้วย อิเล็กตรอน ซึ่งเคลื่อนที่อยู่มากๆ นิวเคลียส อิเล็กตรอนทั้งหมดในอะตอมของคาร์บอน อยู่ห่างจากนิวเคลียสไม่เท่ากัน กล่าวได้ว่า อิเล็กตรอนจัดตัวอยู่รอบนิวเคลียสตามระดับชั้นพลังงาน อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานนอกสุดเรียกว่า เวเลนซ์อิเล็กตรอน คาร์บอนจึงมี 4 เวเลนซ์อิเล็กตรอน ซึ่งอิเล็กตรอนทั้ง 4 สามารถเกิด

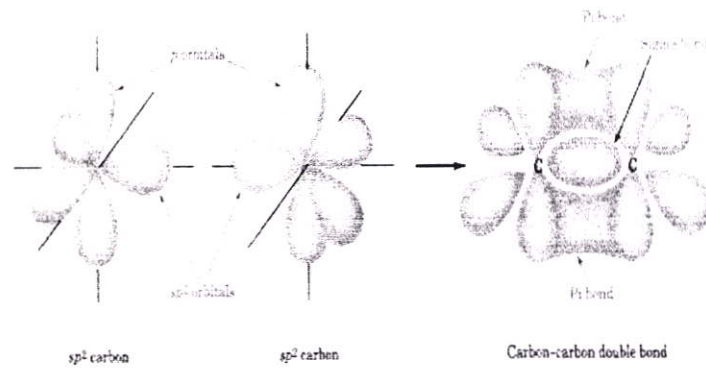
พันธะกับอะตอมอื่นๆ ได้อยู่ใน s ออร์บิทัล (s หรือ 1 ออร์บิทัล) และ p ออร์บิทัล (3 ออร์บิทัล) ซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกลม (sphere) และคัมป์เบลล์ (dumb bells) (รูป 2.5ก) ซึ่งอิเล็กตรอนทั้ง 4 จะเกิดพันธะกับอะตอมใดๆได้ต้องเกิดไฮบริดเซชันก่อน โดยไฮบริดเซชันของคาร์บอนมีทั้งหมด 3 แบบคือ 1) sp ออร์บิทัล (ใช้ s 1 ออร์บิทัลและ p 1 ออร์บิทัล เหลือ p อีก 2 ออร์บิทัล) จะมีรูปร่างเป็นเส้นตรง(linear) มุมระหว่างพันธะเท่ากับ 180° 2) sp² ออร์บิทัล (ใช้ s 1 ออร์บิทัลและ p 2 ออร์บิทัล เหลือ p อีก 1 ออร์บิทัล) จะมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมแบนราบ(trigonal planar) มุมระหว่างพันธะเท่ากับ 120° 3) sp³ ออร์บิทัล (ใช้ s 1 ออร์บิทัลและ p 3 ออร์บิทัล) จะมีรูปร่างเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) มุมระหว่างพันธะเท่ากับ 109.5° โดยแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 (ก) ชนิดออร์บิทัล (ข) การรวมตัวของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนแบบไฮบริดเซชัน

การเกิดพันธะโคเวเลนต์(covalent bonds)[4]ในสารประกอบคาร์บอน อะตอมของคาร์บอน เกาะอยู่กับอะตอมอื่นด้วยพันธะโคเวเลนต์ พันธะโคเวเลนต์เป็นพันธะที่เกิดจากการใช้คู่อิเล็กตรอนระหว่างสองอะตอมร่วมกัน พันธะโคเวเลนต์เป็นพันธะที่เกิดจากการเกยกันระหว่างออร์บิทัล ที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนที่เกิดพันธะ ซึ่งการเกิดพันธะโคเวเลนต์จะมีการเกยกันของออร์บิทัล สองลักษณะ(รูป 2.5)คือ การเกิดพันธะโคเวเลนต์โดยการเกยกันทางด้านปลายของออร์บิทัล ซึ่งเป็นบริเวณที่มีโอกาสพบอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะออร์บิทัลของโมเลกุล อยู่บนแนวแกนระหว่างนิวเคลียสทั้งสอง โดยเรียก ออร์บิทัลของโมเลกุลลักษณะนี้ว่า ซิกมาออร์บิทัล(sigma orbital) และเรียกแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะกับนิวเคลียสทั้งสองนี้ว่า พันธะซิกมา(sigma bond) และ 2. การเกิดพันธะโคเวเลนต์โดยการเกยกันทางด้านข้างของออร์บิทัล ออร์บิทัลของโมเลกุลที่เกิดจากการเกยกันทางด้านข้างของออร์บิทัลอยู่นอกแนวแกนระหว่างนิวเคลียส เรียกว่าพายออร์บิทัล(pi-orbital) และเรียกแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอิเล็กตรอนคู่สามพันธะกับนิวเคลียสทั้งสองว่า พันธะพาย (pi bond) โดยแสดงได้ดังรูปที่ 2.5

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.5 การเกิดพันธะโคเวเลนต์(covalent bonds) โดยการรวมตัว ระหว่างอะตอมคาร์บอนที่มีไฮบริไดเซชัน sp^2

เวเลนซ์อิเล็กตรอนทั้ง 4 ของคาร์บอนที่อยู่ในไฮบริไดซ์ออร์บิทัลสามารถเกิดพันธะโคเวเลนต์ได้ 4 พันธะ ซึ่งอาจจะเป็นพันธะเดี่ยว (single bond) พันธะคู่ (double bond) หรือพันธะสาม (triple bond) ก็ได้ การเขียนสูตรโมเลกุลมีได้ 3 แบบด้วยกันคือ 1. sp^3 hybridization คาร์บอนจะสร้างพันธะเดี่ยว (single bond) ทั้งหมด 2. sp^2 hybridization คาร์บอนจะสร้าง พันธะคู่ (double bond) 1 พันธะ ระหว่างคาร์บอนที่มีไฮบริไดเซชัน sp^2 และ พันธะเดี่ยว 2 พันธะ 3. sp hybridization คาร์บอนจะสร้าง พันธะสาม (triple bond) 1 พันธะ ระหว่างคาร์บอนที่มีไฮบริไดเซชัน sp และ พันธะ พันธะเดี่ยว 1 พันธะ โดยผลของ ไฮบริไดเซชันของคาร์บอน (hybridization of carbon) ทำให้คาร์บอนมีรูปแบบที่ต่างกัน ที่เป็นที่รู้จักกันได้แก่ กราไฟต์ เพชร ฟูลเลอเรนส์ และท่อนาโนคาร์บอน แสดงดัง ตารางที่ 2.1


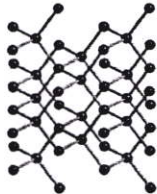

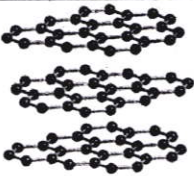

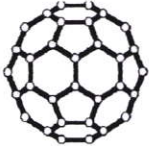

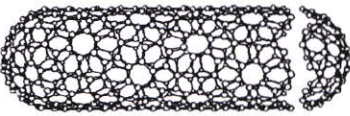
เพชร(diamond) มีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบตัวมัน 4 ตัว ด้วยพันธะโคเวเลนต์ ในรูปแบบ sp^3 hybridization โดยแต่ละด้านจะมีอะตอมอยู่ตรงกลาง เรียกว่า เตตระเซดรอล (tetrahedral) ที่อยู่ระหว่างอะตอมทั้ง 4 ตัว คุณสมบัติของเพชรเป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นวัสดุที่มีความแข็งแกร่งมาก เพราะมีอิเล็กตรอนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะของ σ คุณสมบัติการดูดกลืนแสงของเพชรมีการดูดกลืนแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต แต่ไม่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงธรรมดาคหรือรังสีอินฟราเรด และมีการหักเหของแสงสูง นอกจากนี้ยังมีค่าการส่งผ่านความร้อนสูง(thermal conductivity ที่อุณหภูมิต่ำ)

กราไฟต์มีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบตัวมัน 3 ตัว โดยอะตอมของคาร์บอนมีการจับตัวกันในรูปแบบ sp^2 hybridization ซึ่งพันธะของโคเวเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหก

เหลี่ยม(hexagonal) คล้ายกับตาข่าย โดยแต่ละแผ่นเรียงกันเป็นชั้นในแนวระนาบเดียวกัน โดยมีแรง wall der waals ยึดระหว่างของชั้นกราฟิตนี้ ระยะห่างแต่ละชั้น 0.34 นาโนเมตร

บัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์เร็นต์(buckminster fullerence) C_{60} เป็นสมาชิกของฟูลเลอร์เร็นท์ที่ถูกค้นพบ โดย Smalley ในปี 1985 โครงสร้างของ C_{60} มีลักษณะโครงสร้างแบบปิดประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 5 เหลี่ยม จำนวน 12 วงและ 6 เหลี่ยม 20 วง มีลักษณะเหมือนลูกบอลล[2-3] โดยยังมีสมาชิกตัวอื่นของตระกูลฟูลเลอร์เร็นท์คือ C_{70} , C_{78} , C_{80} และอื่นๆ ซึ่ง C_{60} มีความสมมาตรมากที่สุดโดยเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 อังสตรอม และความยาวพันธะ C-C เท่ากับ 1.40 อังสตรอม และ 1.46 อังสตรอม สำหรับ C_{70} ด้านคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของฟูลเลอร์เร็นท์คล้ายกับแผ่นกราฟีน ซึ่งมีเพียงอิเล็กตรอนใน π ออบิทัลที่นำมาพิจารณา อย่างไรก็ตามผลกระทบที่เกิดจากบริเวณส่วนโค้งของโครงสร้างจำเป็นต้องนำมาพิจารณาจากการใช้ Huckel โมเลกุลออร์บิทัลในการคำนวณพบว่าความกว้างของแถบพลังงานระหว่าง Highest Occupied Molecular Orbital(HOMO) และ Lowest Unoccupied Molecular Orbital(LUMO) มีค่าประมาณ 2 eV โดย C_{60} มีคุณสมบัติสามารถนำไฟฟ้าทางแสง สามารถทำการเจือสาร(dope)ได้คือ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวดได้ดีอีกด้วย

ตารางที่ 2.1 รูปแบบต่างๆของคาร์บอน

เพชร		sp^3	
กราฟิต		sp^2	
ฟูลเลอร์เร็นต์		deformed sp^2	
CNTs			

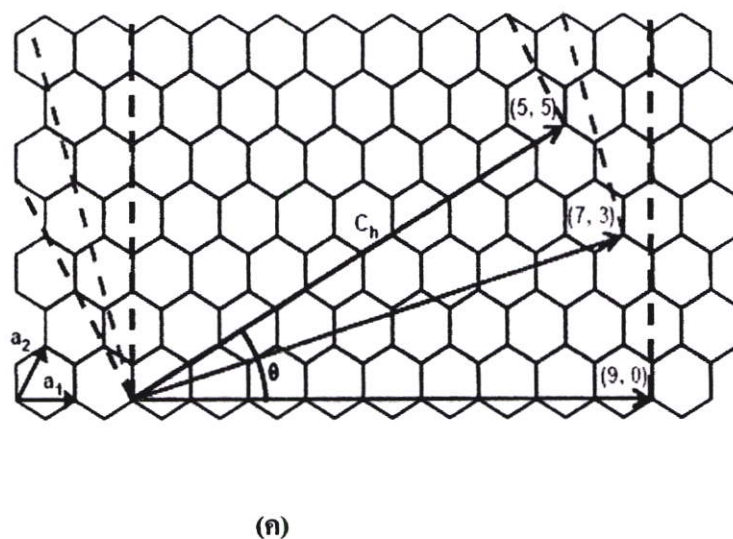
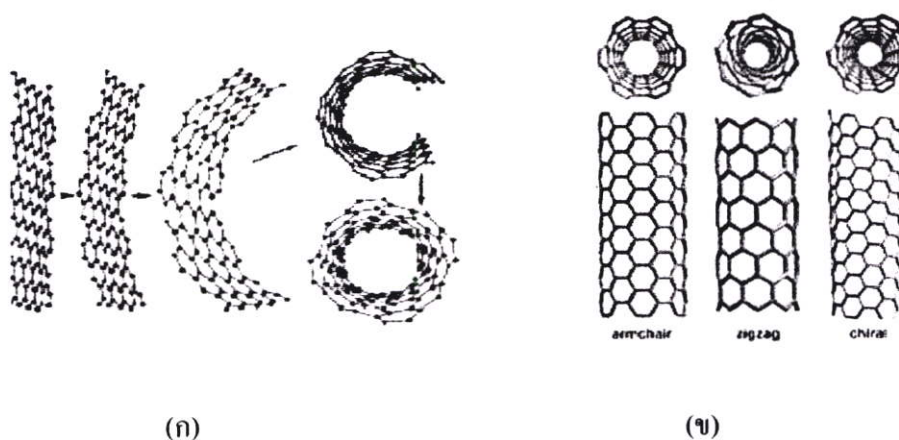
ท่อนานคาร์บอน จะอาศัยการอธิบายผ่านแผ่นกราฟีนของกราฟิต์ โดยการนำแผ่นของกราฟีนม้วนเป็นท่อ ทำให้คุณสมบัติของท่อนานคาร์บอนเปลี่ยนไป ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 2.4

2.4 ท่อนานคาร์บอนพื้นฐาน

ท่อนานคาร์บอนนั้น ประกอบขึ้นจากธาตุคาร์บอน เช่นเดียวกับ เพชร กราไฟต์ ถ้ำถ่าน และฟูลเลอเรนซ์ หรือ C_{60} แต่จะมีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เพชรมีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่ 4 ตัว เกิดเป็นโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อของพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนจึงทำให้เพชรมีความแข็งแรงและคงทนมากขณะที่กราฟิต์มีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่เพียง 3 ตัว พันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายกับรังผึ้งหรือตาข่ายเรียงกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกัน เรียกว่า แผ่นกราฟีนและมีพันธะเชื่อมต่อกันระหว่างระนาบเป็นชั้นๆ พันธะของคาร์บอนในระนาบเดียวกันของแผ่นกราฟิต์นั้นแข็งแรงมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ส่วนถ้ำถ่านจากการเผาไหม้จะมีโครงสร้างคล้ายกราฟิต์แต่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือที่เรียกว่าคาร์บอนอสัณฐาน หรือ amorphous carbon” และ Fullerene หรือ C_{60} ซึ่งมีโครงสร้างของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลมคล้ายลูกฟุตบอล ซึ่งต่างจากท่อนานคาร์บอนที่มีลักษณะ โครงสร้างเป็นท่อกลวงที่เกิดจากการม้วนของแผ่นกราฟีน (รูปที่ 2.6(ก))

2.4.1 โครงสร้างท่อนานคาร์บอน

ท่อนานคาร์บอนจะมีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนที่คล้ายกันกับกราฟิต์ ต่างกันที่ท่อนานคาร์บอนเกิดจากพันธะที่เป็นแบบ $\sigma - \pi$ rehybridization ซึ่งตรงกันข้ามกับการเกิดจากพันธะของกราฟิต์ที่เป็นแบบ $\sigma - \pi$ hybridization (แสดงดังตารางที่ 2.1) ซึ่งทำให้ท่อนานคาร์บอนกับกราฟิต์มีคุณสมบัติแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยโครงสร้างของท่อนานคาร์บอน มีด้วยกัน 3 แบบ คือ (1) zigzag (2) armchair และ (3) chiral โดยแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับกลไกการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนตามผนังของท่อซึ่งเกิดจากรูปแบบของแผ่นกราฟีนทั้งสองด้านมาบรรจบกันตามทิศทางของ Chiral vector (\vec{C}_h) เป็นท่อบิดเป็นทรงกระบอก ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6(ก)-(ค)



รูปที่ 2.6 การม้วนของแผ่นกราฟีนทั้งสองด้านมาบรรจบกันเป็นท่อปิดทรงกระบอก (ก) การม้วนของแผ่นกราฟีน (graphene sheet) ม้วนปิดเป็นท่อทรงกระบอก (ข) โครงสร้างของท่อนโนคาร์บอน ทั้ง 3 ชนิด คือ (1) zigzag (2) armchair และ (3) chiral (ค) การม้วนของแผ่นกราฟีนตาม Chiral vector (\vec{C}_h) เป็นท่อนาโนคาร์บอน (5,5), (7,3) และ (9,0) ซึ่งเป็นแบบ chiral, armchair และ zigzag

จากรูปที่ 2.6 แสดงการม้วนตัวของแผ่นกราฟีนเป็นท่อนาโนคาร์บอนโดยทั้งสองด้านของขอบแผ่นกราฟีนมาบรรจบกันเป็นท่อทรงกระบอก ตาม Chiral vector (\vec{C}_h) รูป 2.6 (ค) หรือ เวกเตอร์ที่มีทิศตามเส้นรอบวงของท่อนาโนคาร์บอนซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ [5]

$$\vec{C}_h = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 \equiv (n, m) \quad (2.1)$$

โดยที่ \vec{a}_1 กับ \vec{a}_2 เป็น ยูนิตเวกเตอร์(unit vector) ของกราฟิต์

นอกจากนี้มุมของ Chiral vector (θ) จะเรียกว่า มุมไชรอล (chiral angle) ซึ่งเป็นมุมระหว่าง \vec{C}_n กับ \vec{a}_1 (แสดงดังรูป 2.7ก) มีค่าอยู่ระหว่าง ($0 \leq \theta \leq 30^\circ$) สามารถหาได้จาก

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{m}{n} \sqrt{3} \right] \quad (2.2)$$

จากสมการ(2.1)และ(2.2) n และ m เป็น ตำแหน่งต่างๆของยูนิตเซลล์ ซึ่งเป็นจำนวนเต็มโดย $0 \leq m \leq n$ โดยที่ $m = 0$ ($\theta = 0^\circ$) เป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบ zigzag และ $n = m$ ($\theta = 30^\circ$) เป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบ armchair ส่วนท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่ได้มีลักษณะตามแบบทั้งสองชนิดข้างต้นนี้ จะเป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบ chiral โดยลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนทั้ง 3 แบบสามารถแสดงได้ดังรูป 2.7 นอกจากนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนสามารถหาได้จาก

$$D = \left| \vec{C}_n \right| / \pi = a(n^2 + nm + m^2)^{1/2} / \pi \quad (2.3)$$

โดยที่ $a = |\vec{a}_1| = |\vec{a}_2|$ คือ lattice constant of graphite

2.4.2 ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน

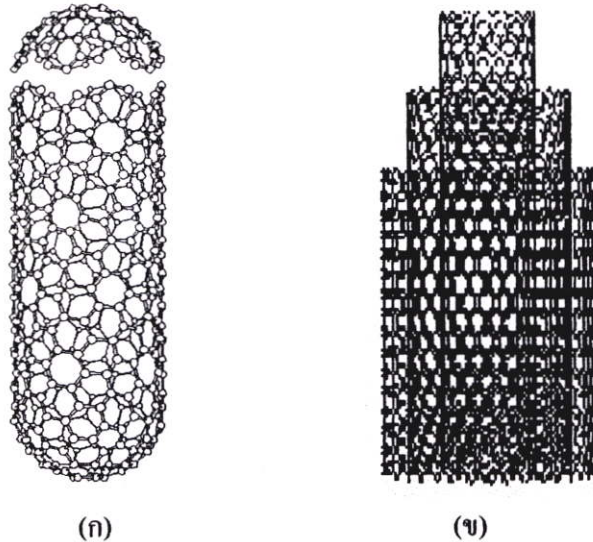
ท่อนาโนคาร์บอนอาจแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักๆ ตาม จำนวนชั้นของผนังท่อคือ ถ้าท่อมีผนังชั้นเดียวจะเรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนทิวป์แบบผนังชั้นเดียว (single-walled nanotubes: SWNTs) ส่วนท่อที่มีผนังหลายชั้นจะเรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (multiple-walled nanotubes: MWNTs) ส่วนใหญ่ขนาดของ ท่อนาโนคาร์บอนทั้งสองแบบที่สังเคราะห์ได้พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณตั้งแต่ 0.4 นาโนเมตร ไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร และมีความยาวตั้งแต่ระดับนาโนเมตร ไปจนถึงหลายเซนติเมตร และเป็นที่น่าสนใจว่าในกรณี ท่อนาโนคาร์บอนแบบมีผนังหลายชั้นนั้น ระยะห่างระหว่างแต่ละชั้นจะเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร ซึ่งระยะนี้มีค่าประมาณระยะห่างระหว่างชั้นของกราฟิต์

2.4.2.1 ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว หรือ (single-walled nanotubes: SWNTs)

จะมีลักษณะ โครงสร้างที่คล้ายกับแผ่นกราฟิต์ที่มีวนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ท่อนาโนของคาร์บอนจึงมีผนังของอะตอมคาร์บอน ที่จัดเรียงพันธะ โควาเลนต์ระหว่างอะตอมเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมที่ปลายของท่ออาจจะปิดด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของคาร์บอน ที่มีโครงสร้างคล้ายครึ่งหนึ่งของฟูลเลอร์เร็นซ์ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 0.4-3 nm [6] แสดงได้ดังรูปที่ 2.7(ก)

2.4.2.2 ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น หรือ (multiple-walled nanotubes: MWNTs)

ผนังของท่อมีลักษณะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกัน และมีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร [6] แสดงในรูปที่ 2.7(ข)



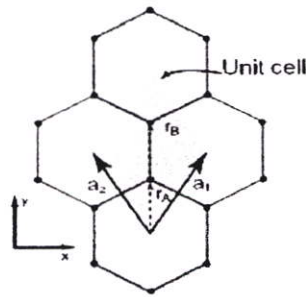
รูปที่ 2.7 ท่อนาโนคาร์บอน (ก) แบบผนังเดี่ยว (ข) แบบหลายผนัง

2.4.3 โครงสร้างทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน

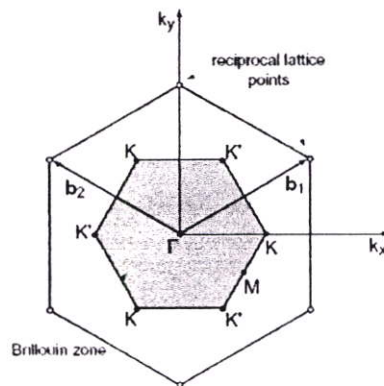
ท่อนาโนคาร์บอน มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้ง โลหะ(metal) หรือสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งโครงสร้างทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน ขึ้นอยู่กับลวดลายการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนตามผนังของท่อนาโนคาร์บอน โดยการจัดเรียงลวดลายที่วนนี้สามารถอธิบายได้จากโครงสร้างของกราฟไฟต์ 2 มิติ ดังนั้น กราไฟต์ประกอบไปด้วยหลายแผ่นๆ ซ้อนกัน ซึ่งแผ่นเหล่านี้เรียกว่าแผ่นกราฟีน(graphene sheet) โดยมีการเรียงตัวกันแบบโครงข่ายรวงผึ้ง แสดงได้ดังในรูปที่ 2.8 บริเวณสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนที่แรเงาแสดงยูนิตเซลล์ (unit cell) ของแผ่นกราฟีน ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวน 2 ตัว (r_1 และ r_2) โดยที่มียูนิตเวกเตอร์ \vec{a}_1 และ \vec{a}_2 ซึ่งมีพิกัด(coordinated) $(\sqrt{3}a/2, \pm a/2)$ มีความยาวของพันธะ C-C อยู่ที่ 1.421Å[7] โครงสร้างแถบพลังงานของกราฟไฟต์ที่เป็นแบบ 2 มิติ ถูกคำนวณได้โดยพันธะซิกมา(σ -bond) และพันธะพาย(π -bond) แถบพลังงานพันธะซิกมาซึ่งเกิดจากพันธะที่เกิดจากในระนาบเดียวกันแต่ก็มีผลเพียงแต่ทำให้โครงสร้างแถบพลังงานมีความเสถียรเท่านั้น ไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพราะฉะนั้น การคำนวณโครงสร้างแถบพลังงานจึงนำเพียงพันธะพายมาพิจารณาโดยคำนวณด้วยวิธี tight binding โดยจึงได้ความสัมพันธ์ดังนี้[8]

$$E(k_x, k_y) = \pm \gamma_0 \left\{ 1 + 4 \cos\left(\frac{\sqrt{3}k_x a}{2}\right) \cos\left(\frac{k_y a}{2}\right) + 4 \cos^2\left(\frac{k_y a}{2}\right) \right\}^{1/2} \quad (2.4)$$

ความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.4 อธิบายแถบวาเลนซ์ของพันธะพาย ($\pi, +$) และแถบคอนดักชันของพันธะพาย ($\pi^*, -$) ซึ่งแถบทั้งสองคือ ดีเจนเนอเรต (degenerate) ที่จุด K ตรงมุมของ hexagonal 2D Brillouin zone โดยค่าพลังงานนี้มีความสัมพันธ์กับพลังงานเฟอร์มิ และที่แถบคอนดักชันและวาเลนซ์มีการโอเวอร์แลป (overlap) ที่ 0.04 eV ทำให้กราฟาไฟต์มีคุณสมบัติเป็นแบบกึ่งโลหะ



รูปที่ 2.8 โครงข่ายหกเหลี่ยม (hexagonal lattice) ของ 2D กราไฟต์ โดยยูนิตเซลล์ถูกแทนด้วยบริเวณที่แรเงาสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (rhombus) ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวน 2 อะตอม (r_A และ r_B) โดยที่ \vec{a}_1 และ \vec{a}_2 คือ ยูนิตเวกเตอร์



รูปที่ 2.9 บริเวณ Brillouin zone และแลตทิซส่วนกลับ (reciprocal lattice) ของ 2D กราไฟต์ จุดสมมาตรใน 2D Brillouin zone เรียกว่าจุด Γ, M, K' และ K โดยที่ \vec{b}_1 กับ \vec{b}_2 คือ รีซีพโรคอลแลตทิซเวกเตอร์ (reciprocal lattice vectors)

จากรูปที่ 2.9 แสดงบริเวณ Brillouin zone ของ 2D กราไฟต์ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความสมมาตรสูง เรียกจุดที่มีความสมมาตรสูงที่จุดกึ่งกลาง จุดที่มุม และจุดกึ่งกลางระหว่างมุมทั้งสองของ Brillouin zone แทนด้วยสัญลักษณ์ Γ , M , K' และ K ตามลำดับ ซึ่งแทนด้วยบริเวณที่แรเงารูปหกเหลี่ยม โดยที่ \vec{b}_1 กับ \vec{b}_2 คือ รีซิพโพรคอลแลตทิซเวกเตอร์ (reciprocal lattice vectors) ของแลตทิซส่วนกลับ (reciprocal lattice) ความสัมพันธ์ระหว่าง ยูนิตเวกเตอร์กับรีซิพโพรคอลแลตทิซเวกเตอร์ ซึ่งอยู่ในระบบ x-y และ k_x - k_y ตามลำดับ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\vec{b}_1 = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, \frac{2\pi}{a} \right), \vec{b}_2 = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, -\frac{2\pi}{a} \right) \quad (2.5)$$

โดย a คือค่าคงตัวแลตทิซ (lattice constant) ของ 2D กราไฟต์ ได้ดังนี้

$$a = |\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = 1.42 \text{ \AA} \times 3^{1/2} = 2.46 \text{ \AA}$$

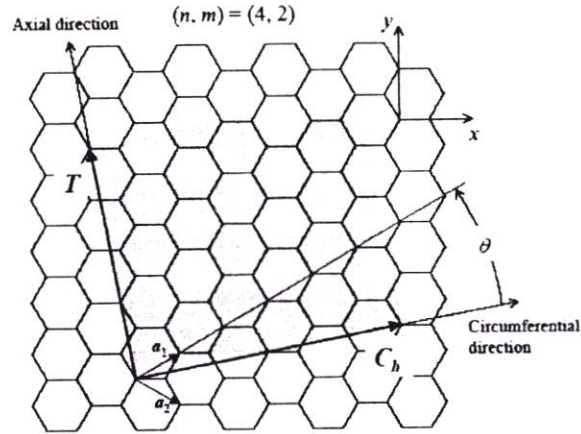
ในกรณียูนิตเซลล์ของ SWNTs จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับยูนิตเซลล์ของ กราไฟต์เนื่องจากมีความสมมาตรที่น้อยกว่า ซึ่งในรูปที่ 2.10 แสดงแลตทิซหกเหลี่ยมของท่อนาโนคาร์บอนที่ยังไม่เกิดการม้วน ซึ่งประกอบไปด้วย \vec{C}_h คือเวกเตอร์ที่มีทิศตามเส้นรอบวงของท่อนาโนคาร์บอน เรียก \vec{C}_h ว่า chiral vector และ \vec{T} คือเวกเตอร์ที่มีทิศตามแกนของท่อนาโนคาร์บอน และเรียก \vec{T} ว่า Translational vector สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

\vec{C}_h เขียนสมการอยู่ในเทอมของเรียลสเปซ (real-space) ซึ่งประกอบด้วย \vec{a}_1 กับ \vec{a}_2 และจำนวนเต็ม 2 จำนวน คือ n และ m ($0 \leq m \leq n$) โดยตัวแปร n และ m คือตำแหน่งต่างๆของยูนิตเซลล์

$$\vec{C}_h = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 \equiv (n, m) \quad (2.6)$$

เนื่องจากความยาวของ \vec{C}_h คือ ความยาวเส้นรอบวงของท่อ ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (diameter, d_t) สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$d_t = \frac{|\vec{C}_h|}{\pi} = \frac{\sqrt{\vec{C}_h \cdot \vec{C}_h}}{\pi} = \frac{a\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}{\pi} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.10 แลตทิกหกเหลี่ยมของท่อนาโนคาร์บอน โดย $\vec{C}_h = 4\vec{a}_1 + 2\vec{a}_2$ SWNT

ยูนิตเซลล์ คือ บริเวณที่แรเงา ซึ่ง $N = 28$ และมุมระหว่าง \vec{a}_1 และ \vec{C}_h คือ มุมไจรอล $\theta (0 \leq \theta \leq 30^\circ)$

จุดที่น่าสนใจคือความยาวพันธะ C-C ของท่อนาโนคาร์บอน (2.49 อังสตรอม) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกราฟีน (1.42 อังสตรอม) จะพบว่าความยาวพันธะ C-C ของท่อนาโนคาร์บอน ยาวกว่าเล็กน้อย และมุมระหว่าง \vec{C}_h และ \vec{a}_1 เรียกว่า มุมไจรอล (θ) มีค่าอยู่ระหว่าง $(0 \leq \theta \leq 30^\circ)$ ซึ่งหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\cos \theta = \frac{\vec{C}_h \cdot \vec{a}_1}{|\vec{C}_h| |\vec{a}_1|} = \frac{2n+m}{2\sqrt{n^2+m^2+nm}} \quad (2.8)$$

เนื่องจาก ทราบนิชันเวกเตอร์ \vec{T} ถูกนิยามจากยูนิตเวกเตอร์ของ 1D SWNT ซึ่งขนานกับแกนของท่อนาโนคาร์บอน โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้ $\vec{C}_h \cdot \vec{T} = 0$ และ

$$\vec{T} = t_1 \vec{a}_1 + t_2 \vec{a}_2 \equiv (t_1, t_2), t_1 = \frac{2m+n}{d_R}, t_2 = \frac{2n+m}{d_R} \quad (2.9)$$

โดยที่ d_R คือ เลขหารร่วมที่มีค่ามากที่สุดของ $(2m+n)$ และ $(2n+m)$ และจากนิยามของ d_R จำนวนรูปหกเหลี่ยมในยูนิตเซลล์ของ SWNT แทนด้วยตัวแปร N สามารถหาได้ดังนี้

$$N = \frac{|\vec{C}_n \cdot x \vec{T}|}{|\vec{a}_1 x \vec{a}_2|} = \frac{2(n^2 + m^2 + nm)}{d_r} \quad (2.10)$$

ตัวอย่างเช่น ในกรณีของ SWNT (n,m)=(4,2) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 มีหกเหลี่ยมทั้งหมด 14 อัน และมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนทั้งหมด 28 อะตอม ในยูนิตเซลล์

เนื่องจากยูนิตเซลล์ของ SWNT เป็นแบบ 2D ซึ่งถูกกำหนดโดยออร์ทोगอนอลแลตทิซเวกเตอร์ (orthogonal lattice vector) \vec{C}_n และ \vec{T} ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยเวกเตอร์แลตทิซส่วนกลับที่สัมพันธ์กับทิศทางของของเส้นรอบวง \vec{K}_1 และทิศทางของแกน \vec{K}_2 สามารถถูกกำหนดขึ้นได้โดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\vec{C}_n \cdot \vec{K}_1 = \vec{T} \cdot \vec{K}_2 = 2\pi, \vec{C}_n \cdot \vec{K}_2 = \vec{T} \cdot \vec{K}_1 = 0 \quad (2.11)$$

เมื่อแก้สมการข้างต้น หาค่า \vec{K}_1 และ \vec{K}_2 โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.9 และ 2.10 จะได้ค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\vec{K}_1 = \frac{1}{N} (-t_2 \vec{b}_1 + t_1 \vec{b}_2) \quad (2.12)$$

$$\vec{K}_2 = \frac{1}{N} (m \vec{b}_1 - n \vec{b}_2) \quad (2.13)$$

ในรูปที่ 2.10 แสดงเวกเตอร์แลตทิซส่วนกลับ \vec{K}_1 และ \vec{K}_2 สำหรับ (n,m) = (4,2) SWNT first Brillouin zone ของ SWNT แทนด้วยเส้น W-W' ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ก) เพราะฉะนั้นเซกเมนต์ของเส้น $N \mu K_1$ ($\mu = 1, \dots, N-1$) จะแสดงถึงเวกเตอร์คลื่นที่ไม่ต่อเนื่องในทิศทางของ \vec{C}_n เนื่องจากขอบเขตเงื่อนไขมีค่าเป็นช่วงๆ ในทิศทางของ \vec{C}_n

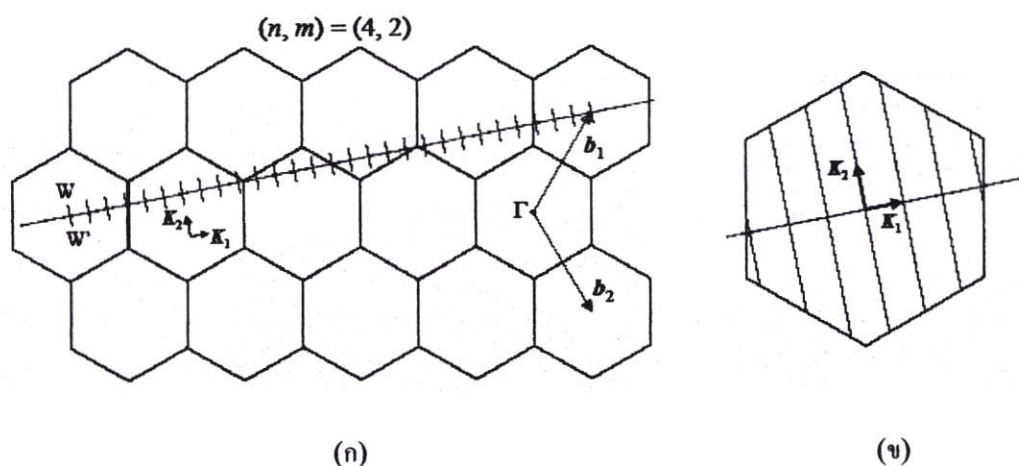
โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ SWNT สามารถอธิบายได้จาก 2D กราไฟต์ ถ้ากำหนดให้ $E_{g,2D}$ คือ ความสัมพันธ์การกระจายพลังงานของ 2D กราไฟต์และค่าความสัมพันธ์การกระจายตัวพลังงานของกลุ่ม N $E_\mu(k)$ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$E_\mu(k) = E_{g,2D} \left(k \frac{K_2}{|K_2|} + \mu K_1 \right), \left(\mu = 0, \dots, N-1 \text{ and } -\frac{\pi}{|T|} < k < \frac{\pi}{|T|} \right) \quad (2.14)$$

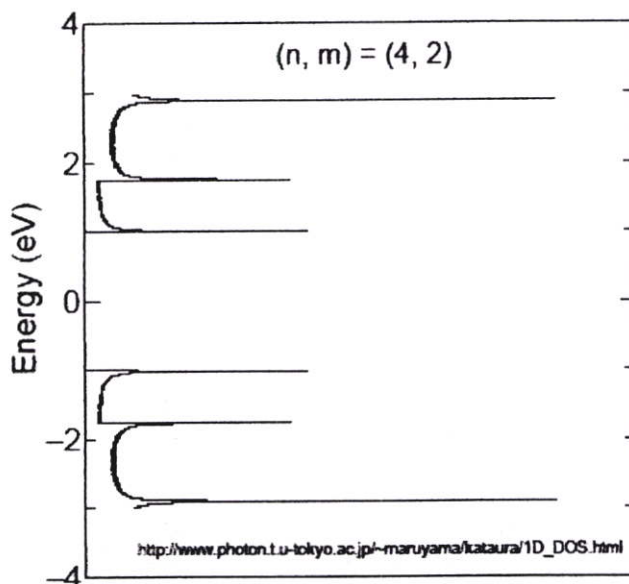
โดย k คือ เลขคลื่น(wave number) ตามแกนของท่อ SWNT ถ้าเส้นโค้งของการกระจายพลังงานนี้มีสถานะอยู่ใน first Brillouin zone ของ 2D กราไฟต์ ซึ่งสามารถทำการแปลงให้อยู่ในรูป

ของค่า \bar{K}_1 และ \bar{K}_2 ได้ในรูปที่ 2.11(ก) ซึ่งสามารถลดรูปได้ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ข) โดยสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์เวกเตอร์คลื่นในกรณีของ SWNT นั้นถูกจำกัดต่างจากกรณีของ 2D กราไฟต์ เวกเตอร์คลื่นที่สามารถเป็นไปได้แสดงในรูปที่ 2.11(ข) ซึ่งจะเรียกว่า “cutting line” ในรูปที่ 2.12 แสดง eDOS ของ $(n,m) = (4,2)$ SWNT ทำการคำนวณด้วยวิธี tight binding ด้วยพารามิเตอร์ (parameters) $\gamma_0 = 2.9$ eV, $s = 0$, และ $a_{c-c} = 0.144$ นาโนเมตร จากรูปที่ 2.11(ข) จะเห็นได้ชัดว่าเส้น cutting line ซึ่งมาจากสมการที่ 2.13 ไม่ลากผ่านจุด \bar{K} (เป็นจุดที่วาเลนซ์และคอนดักชันแบนด์มาบรรจบกันในกรณี 2D กราไฟต์) ดังนั้น $(4,2)$ SWNT จะทำให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งจะไม่มีการมี eDOS ที่ระดับ Fermi (รูปที่ 2.12)

ในกรณีตรงกันข้ามเมื่อเส้น cutting line ผ่านจุด \bar{K} (K-point) เช่น ในกรณีของ $(n,m) = (5,2)$ SWNT ซึ่ง SWNT จะมีคุณสมบัติเป็นโลหะ (metallic) ซึ่งจะมีระดับ eDOS อยู่ใน ระดับ Fermi level โดยทั่วไปแล้ว $(n-m) = 3d$ และ $d = 0, 1, 2, \dots$ จะเป็นโลหะ ในขณะที่ $(n-m) = 3d + 1$ จะมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ที่เป็นคุณสมบัติที่เด่นมากของท่อนาโนคาร์บอน ที่เป็นได้ทั้งโลหะ และสารกึ่งตัวนำซึ่งถูกกำหนดด้วยลักษณะการม้วนหรือการพับของ chirality



รูปที่ 2.11 (ก) Brillouin zone ของ SWNT ถูกแทนด้วยเส้น W-W' ในกรณี $(n,m) = (4,2)$ และ (ข) รูปเสมือนแต่ทำการลดไซน โดยเวกเตอร์ \bar{K}_1 และ \bar{K}_2 คือริซิทโพคอลแลตทิซเวกเตอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับ \bar{C}_n และ \bar{T} ตามลำดับ



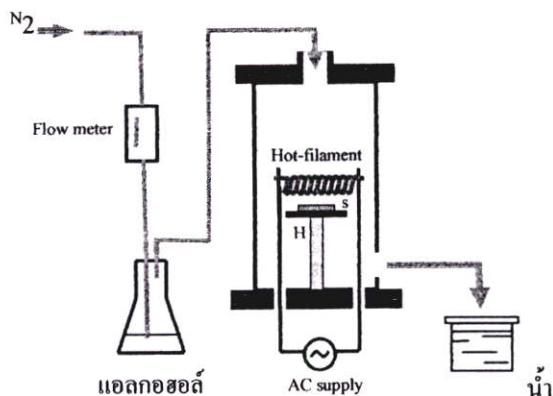
รูปที่ 2.12 3D Brillouin zone ของ กราไฟต์และ cutting line สำหรับ $(n,m) = (4,2)$ SWNT

2.5 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี Chemical vapor deposition (CVD)[15-16]

ท่อนาโนคาร์บอนสามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนที่ต้องการ การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนนั้น สามารถแบ่งออกได้ 3 วิธีหลักๆ คือ 1.วิธี Arc discharge 2.วิธี Laser ablation 3.วิธี Chemical vapor deposition (CVD) แต่ละวิธีก็จะมีวิธีการและเทคนิค รวมถึงข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน โดยในที่นี้เราจะกล่าวถึงการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการ ซีวีดี เทคนิคนี้จะเป็นกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วยที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 500-1200°C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นเป็นรูปแบบตามที่เราต้องการได้ และที่สำคัญที่สุดคือวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ วิธี Chemical vapor deposition (CVD) นั้นยังสามารถแยกย่อยได้อีก 5 แบบ ได้แก่

2.5.1 แบบ Hot filament enhance Chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่มีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแทนการใช้เตาความร้อน โดยระบบของวิธี Hot-filament enhance Chemical vapor deposition แสดงได้ดังรูปที่ 2.13

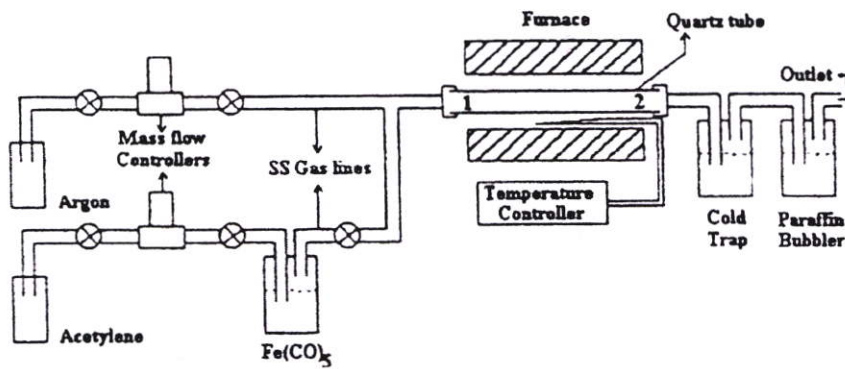


รูปที่ 2.13 ระบบ Hot-filament enhance Chemical vapor deposition CVD [28]

จากรูปที่ 2.13 สามารถอธิบายการทำงานของระบบได้ดังนี้คือ จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน (Filament) เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวดความร้อน แล้วปล่อยก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนเข้ามาในระบบ เมื่อก๊าซโคเคนความร้อนของขดลวดความร้อน จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนและลงมาทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ จะทำให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนซึ่งก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ ไอของแอลกอฮอล์ หรือ มีเทน(CH_4) เป็นต้น ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้โลหะจำพวก เหล็ก(Fe) และ โคบอลต์(Co) วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ไม่ยากและประหยัดค่าใช้จ่าย ส่วนคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ นั้น จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิของฐานรอง, ชนิดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหลของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เป็นต้น

2.5.2 แบบ Vapor phase growth

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยการใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบนำมาเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาภายใน Chamber โดยไม่ใช้ฐานรอง รูปที่ 2.14 แสดงระบบของวิธี Vapor phase growth

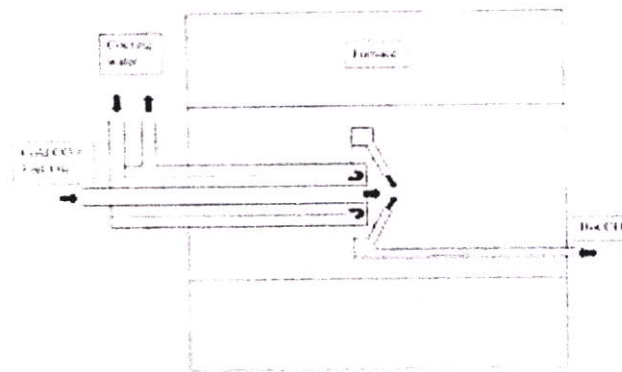


รูปที่ 2.14 ระบบ Vapor phase growth

จากรูปที่ 2.14 ในระบบของวิธี Vapor phase growth จะมีเตาความร้อนอยู่ 2 เตาครอบอยู่ระหว่าง Chamber โดยเตาความร้อนที่ 1 จะทำให้ก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยากลายเป็นไอและก่อตัวกันขึ้นและคงสภาพไว้ เมื่อมาถึงเตาความร้อนที่ 2 จะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนเนื่องจากโดนความร้อนจะแพร่และซึมทรายเป็นอนุภาคของก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นท่อนาโนคาร์บอนโดยทั่วไปแล้วการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีนี้ ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะอยู่ที่ประมาณ 2-4 นาโนเมตร สำหรับ SWNTs และ 70-100 นาโนเมตร สำหรับ MWNTs การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนได้ครั้งละมากๆและมีความบริสุทธิ์สูง แต่ยังคงยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดของท่อนาโนคาร์บอนได้

2.5.3 แบบ High pressure CO disproportionate process

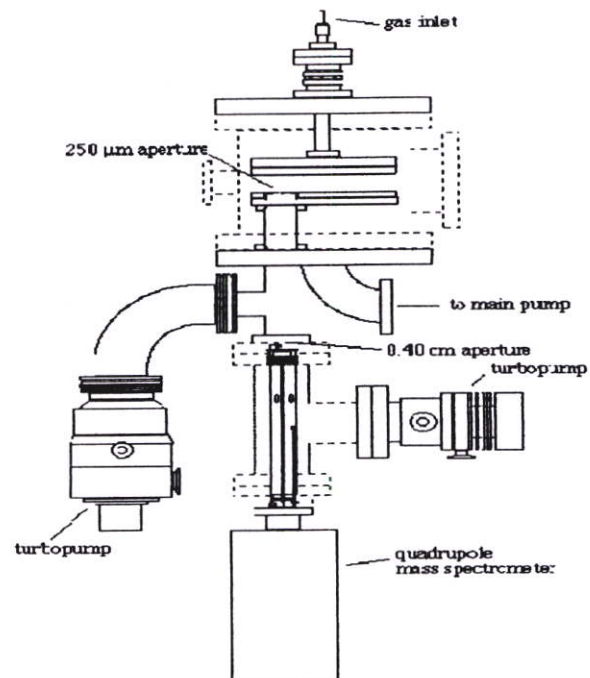
วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์ SWNTs โดยการปล่อยก๊าซ CO ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เข้ามาอย่างต่อเนื่องให้เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซโลหะ เช่น Ferrocene, $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ทำให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนขึ้น ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก โดยขนาดของท่ออยู่ที่ประมาณ 0.7 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าวิธีนี้สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนให้มีขนาดของท่อเล็กที่สุด โดยขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง SWNTs อยู่ที่ประมาณ 1.1 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ แต่ยังคงยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดท่อนาโนคาร์บอนได้อีกทั้งยังเป็นอันตรายต่อร่างกายเนื่องจากใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นก๊าซอันตราย รูปที่ 2.15 แสดงระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process



รูปที่ 2.15 High pressure CO disproportionation process

2.5.4 แบบ Plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD)

วิธีนี้เป็นการกำเนิดประจุไอออนภายใน chamber หรือเตาปฏิกรณ์ โดยใช้แรงดันความถี่สูงเข้ามาทำให้ไอออนของก๊าซที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัวเกิดเป็นพลาสมาขึ้นและเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา รูปที่ 2.16 แสดงระบบของวิธี Plasma enhanced chemical vapor deposition



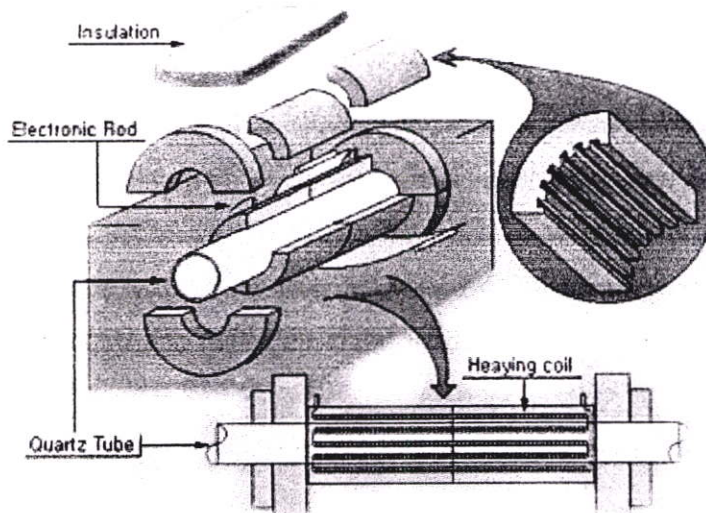
รูปที่ 2.16 ระบบ Plasma enhance chemical vapor deposition

จากรูปที่ 2.16 แผ่นเพลท(plat)จะต่อกับขั้วไฟฟ้า ที่วางขนานกับฐานรอง และฐานรองจะต่ออยู่กับกราวด์ของขั้วไฟฟ้า เมื่อก๊าซเข้ามาตามท่อจากแผ่นเพลทด้านบนตรงกันข้ามกับฐานรอง ถูกแรงดันที่มีความถี่สูง เกิดเป็นพลาสมา ทำให้ไอของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัว และลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง เกิดเป็นท่อนาโนคาร์บอนโดยท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นจะก่อตัวบนอนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง สำหรับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นโลหะจำพวก Fe, Ni, Co เคลือบบนชั้นซิลิกอนหรือชั้นไดออกไซด์ หรือบนแก้วซึ่งการสร้างชั้นเคลือบสามารถทำได้ด้วยวิธี Evaporation หรือวิธี Sputtering โดยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถยึดติดกับฐานรองได้หนาแน่นจะมีผลต่อ ขนาดของท่อ, อัตราการเจริญเติบโต, ความหนาของผนัง, รูปร่างและโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนโดยทั่วไปแล้ว Ni เหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการปลูก MWNTs โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ที่ 15 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตของการใช้ Ni เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 50 % และสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส) ก๊าซที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 และ CO เป็นต้น นอกจากนี้การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถที่จะกำหนดทิศทางการเกิดของทิวป์ให้เป็นท่อตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือโดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้ เฉพาะท่อนาโนคาร์บอนชนิด MWNTs ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิด SWNTs ได้ง่ายนัก (ในปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนชนิด SWNTs ได้ โดยใช้พลาสมาระบบ RF glow-discharge (13.56 MHz) โดยใช้ก๊าซผสมของ CH_4 กับ H_2

2.5.5 แบบ Thermal chemical vapor deposition

วิธีนี้จะใช้ Fe, Ni, Co หรือโลหะผสมทั้งสามชนิดผสมกันทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะทำการกัดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาด nanometer-sized โดยใช้ NH_3 หรือ แอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C - 1200^{\circ}C$ และใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบปล่อยเข้ามาในระบบ เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน แล้วใช้ความร้อนจากเตาความร้อนทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ถูกกัดให้มีอนุภาคขนาด nanometer-sized เกิดเป็นท่อนาโนคาร์บอน โดยส่วนมากจะนิยมใช้วิธีนี้ในการศึกษาคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของท่อนาโนคาร์บอน ที่สังเคราะห์ได้จะเกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 13 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 30-40 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ MWNTs เมื่อความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 2-3 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 1 นาโนเมตร ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนจะอยู่ในรูปของ SWNTs รูปที่ 2.17 แสดงระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition โดยข้อดีของวิธีนี้

คือ 1. สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และ ทิศทางของท่อนาโนคาร์บอน ได้ 2. สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนให้มีลวดลาย (patterned CNTs) บนฐานรองตามที่ต้องการได้ และ 3. สังเคราะห์ในเชิงพาณิชย์ได้



รูปที่ 2.17 ระบบ Thermal chemical vapor deposition

2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน[15-16]

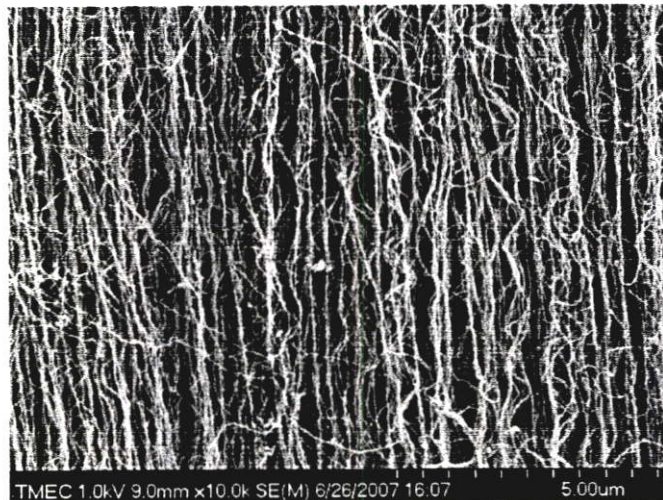
2.6.1 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษารายละเอียดของพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น การสร้างภาพทำโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะเป็นภาพสามมิติ นอกจากนี้ยังอาจดัดแปลงโดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น การวิเคราะห์ธาตุ การคำนวณหามวลและปริมาตร ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบนี้เหมาะสำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยพื้นฐาน

หลักการทำงาน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีระบบการทำงานเหมือนกับแบบส่องผ่าน แต่มีสิ่งที่แตกต่างคือระบบภาพและแสดงผล โดยภาพที่ได้จะถูกส่งสัญญาณเพื่อไปขยาย แล้วจึงแปลภาพบนจอ CRT (cathode ray tube) คอลัมน์ของ SEM จะประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์เช่นเดียวกับ TEM ลำอิเล็กตรอนที่ผ่าน objective lens ไปตกลงบนตัวอย่างนั้น

สามารถที่จะบังคับทิศทางเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างได้ด้วย และมี scanning generator อยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวสุดท้ายกับ objective lens ถ้าอิเล็กตรอนนี้เป็น Primary electron โดยจะถูกโฟกัสลงบนตัวอย่างทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวอย่างส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เรียกว่า Secondary electron และถูกรวบรวมโดย electron collector ซึ่งจะถูกนำไปขยายและแปลสัญญาณให้เกิดเป็นภาพบนจอ CRT ซึ่งสามารถดูได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกไว้บนฟิล์ม ความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับพื้นผิวของตัวอย่าง ถ้าพื้นผิวของตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่ขรุขระ นอกจากนี้ที่ Objective lens จะมีช่อง Aperture เช่นกันเพื่อช่วยเพิ่มความลึกของภาพ SEM นี้อาจติดตั้งและต่อเคเบิลพิเศษเพื่อตรวจสอบตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เช่น Backscattered electron detector อิเล็กตรอนที่เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้จะช่วยในการบอกรายละเอียดของรูปร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนที่ลึกเกินกว่าที่ Secondary electron ทำการตรวจสอบได้ หรือทำการติดตั้งระบบ EDS เพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุ หรือติดตั้ง Transmitted electron detector เพื่อศึกษาลักษณะภายในของตัวอย่างที่ทำให้บางเป็นต้น



รูปที่ 2.18 ภาพ SEM แสดงท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้

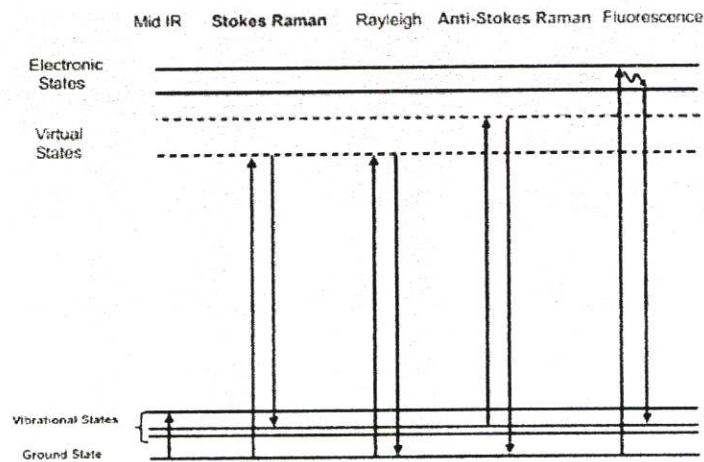
2.6.2 วิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโทรสโกปี

รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้หาโครงสร้างของวัสดุสารจากการวัดสเปกตรัมที่เลื่อนไปของ Raman shift และตำแหน่งของสเปกตรัม ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะพันธะของชิ้นงานที่นำมาวัด โดยสารแต่ละชนิดจะมีสเปกตรัมเฉพาะของแต่ละสารที่แตกต่างกัน

เทคนิคของ Raman spectroscopy มีหลักการที่สำคัญ คือ การใช้การกระเจิงไม่ยืดหยุ่น (Raman scattering) และการสั่นของโครงสร้าง

หลักการทํางาน

เมื่อลำแสงที่มีความเข้มสูงผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งใส แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้แต่จะมีแสงส่วนน้อยเกิดการกระเจิงไปทุกทิศทางและเกิดการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) หรือแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) กับโมเลกุลของสารเมื่อโฟตอนผ่านเข้าไปในโมเลกุลสารจะมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไปซึ่งพลังงานที่เหลือจะให้สเปกตรัมออกมา ลักษณะสเปกตรัมจะเป็นพีคแหลม โดยส่วนใหญ่โฟตอนที่กระเจิงออกมาจะมีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่ตกกระทบ เรียกส่วนนี้ว่า Rayleigh scatter ซึ่งอิเล็กตรอนจะกลับสู่ระดับพลังงานเดิม ก่อนที่จะได้รับการกระตุ้นจากโฟตอน แต่มีโฟตอนบางส่วน (ประมาณ 1 ใน 10^7) ที่กระเจิงออกมาที่มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไป โฟตอนที่มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปนี้ เรียกว่า Raman scatter โฟตอนที่เป็น Raman scatter นี้ส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นมากกว่า ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (Stokes shift) แต่ก็มีส่วนน้อยที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (anti-Stokes shift) ซึ่ง Raman scattering ทั้งสองแบบ อิเล็กตรอนจะไม่ได้กลับมาสู่ระดับพลังงานเดิม Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนจะสูงกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น ส่วน anti-Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนจะมีพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น และ Stokes scattering จะมีปริมาณมากกว่า anti-Stokes scattering



รูปที่ 2.19 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ Anti-Stokes scattering

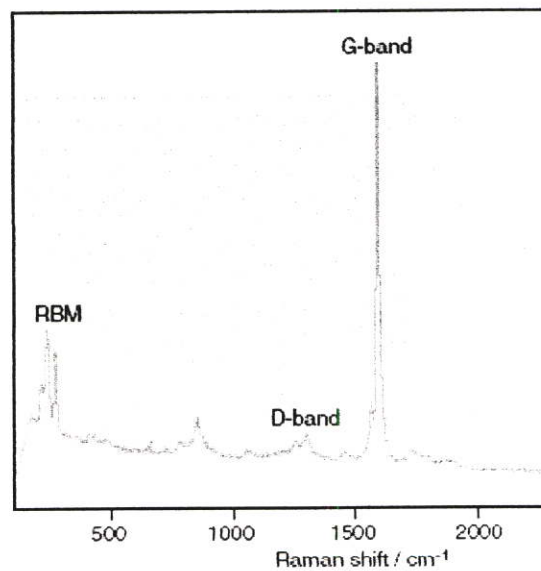
จากรูปที่ 2.19 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering แต่ละกรณี โฟตอนที่ตกกระทบจะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า (virtual state) และเมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ก็จะปล่อยโฟตอนออกมา

การประยุกต์ใช้วัดท่อนาโนคาร์บอน

รามานสเปกโตรสโคปี เป็นเครื่องมือที่สำคัญชนิดหนึ่งที่ทำการวัดลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องเสียเวลาในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน และชิ้นงานที่ทำ การวัดแล้วก็ไม่เกิดการเสียหาย ซึ่งพันธะของฟูเรอเรนซ์ ท่อนาโนคาร์บอน อะมอฟิสคาร์บอนและ โพลีคริสตรอนไลน์คาร์บอน จะอยู่ในรูปแบบของธาตุคาร์บอน สามารถสังเกตได้จากความถี่รามาน ที่วัดได้ในกราฟรามาน ได้ดังรูปที่ 2.20

โดยทั่วไปแล้วข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องรามานมีอยู่ความถี่ที่สนใจอยู่ 3 ความถี่ คือ

- 1) ความถี่ที่อยู่ในช่วง $<200\text{cm}^{-1}$ จะเรียกว่าย่าน RBM (radial breathing mode) หากมีความถี่ในช่วงนี้เกิดขึ้นจะมี SWNTs เกิดขึ้น
- 2) ความถี่ประมาณ 1340cm^{-1} เรียกว่า D-band(D:disorder) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกันกับพันธะของ กราไฟต์ที่ไม่เป็นระเบียบหรือมี Defect
- 3) ช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่าง $1500\text{-}1600\text{cm}^{-1}$ เรียกว่า G-band จะตอบสนองกับพันธะของ ท่อนาโนคาร์บอน



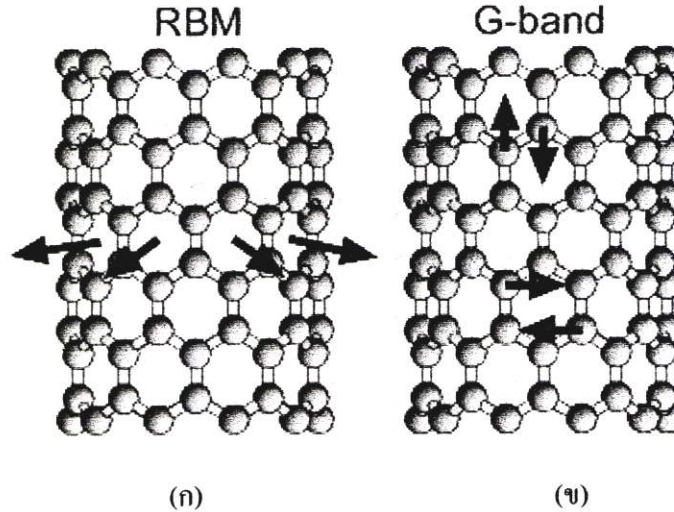
รูปที่ 2.20 กราฟความถี่รามานแสดงโหมดต่างๆ

1) Radial Breathing Mode

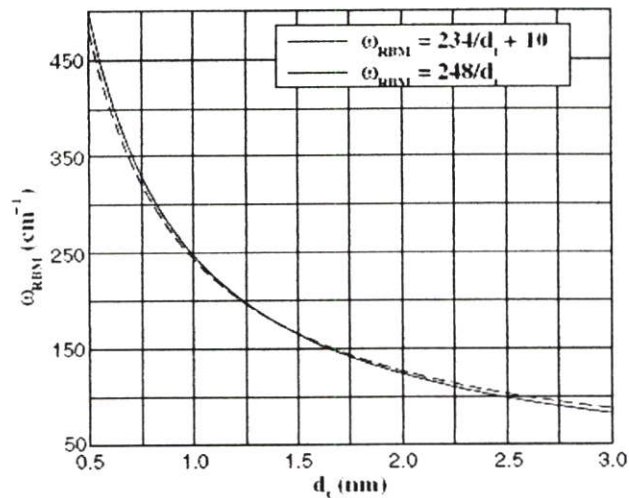
ความถี่ในโหมด RBM เป็นการตอบสนองของการสั่นของอะตอมคาร์บอนในทิศทางที่แผ่ออกมาในทิศทางของรัศมีดังแสดงในรูปที่ 2.21(ก) จึงทำให้สามารถนำการตอบสนองความถี่รามานในโหมดนี้มาหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์ได้ โดยทำการหาค่าผ่านสมการความสัมพันธ์

$$\omega_{RBM} = \frac{A}{d} + B \quad (2.15)$$

โดยที่ ตัวแปร A และ B เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง โดยข้อสำคัญข้อหนึ่งคือความถี่รามานของย่าน RBM จะไม่เกี่ยวข้องกับ มุมของท่อนาโนคาร์บอน(chiral angle) โดยสำหรับ SWNT ที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม(SWNT-bundle) ค่าตัวแปร $A=234 \text{ cm}^{-1}$ และ $B=10 \text{ cm}^{-1}$ (ที่ตัวแปร B จะทำให้เกิดการเลื่อนของ d_c เนื่องจากมีแรงกระทำกันระหว่าง SWNT) และสำหรับ SWNT ที่อยู่โดดเดี่ยวอิสระ (Isolated SWNT) ค่าตัวแปร $A= 248 \text{ cm}^{-1}$ และ $B = 0$ จึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์มีค่าอยู่ระหว่าง $1 \text{ nm} < d_c < 2 \text{ nm}$ และความถี่รามานจะอยู่ในช่วง $120 \text{ cm}^{-1} < \omega_{RBM} < 250 \text{ cm}^{-1}$ และสำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์ที่มีขนาดใหญ่ ($d_c > 2$ นาโนเมตร) หรือ MWNTs ความเข้มของพีคในโหมด RBM จะน้อยจนถึงไม่มีพีคเกิดขึ้นเลย



รูปที่ 2.21 การสั่นของอะตอมคาร์บอนสำหรับ (ก) โหมดRBM และ (ข) โหมดG-band



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่รามานในโหมด RBM ที่แสดงด้วย ω_{RBM} กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน (ก) $A=234 \text{ cm}^{-1}$ และ $B=10 \text{ cm}^{-1}$ ในกรณีของ SWNT-bundle(เส้นประ) และ (ข) $A=248 \text{ cm}^{-1}$ และ $B=0$ ในกรณีของ Isolated SWNT (เส้นทึบ)

2) Tangential mode- G-band

ในโหมดของ G-band แทนพันธะของท่อนาโนคาร์บอนจะมีความถี่รามานอยู่รอบๆ 1580 cm^{-1} และจะมีพีคหลายพีครวมกันอยู่ โดยปรกติแล้วความถี่รามาน tangential mode ของกราฟไฟต์ สังเกตได้ที่ความถี่รามานรอบๆ 1582 cm^{-1} และเรียกว่า G mode(จากกราฟไฟต์) สำหรับ tangential mode ของท่อนาโนคาร์บอนจะไม่เหมือนของกราฟไฟต์เนื่องจากความถี่รามานที่เกิดขึ้นมาจากผลรวมของพีคหลายพีค แต่ก็เรียกว่า G-band เหมือนกันโดยมีพีคของความถี่รามานมากกว่า 6 พีคใน อย่างไรก็ตามจะนำมาพิจารณาอย่างง่าย ๆ เพียง 2 พีคที่มีความเข้มที่สุดเท่านั้น ซึ่งมีต้นกำเนิดพื้นฐานจากการทำลายความสมมาตรของการสั่นในแนวขนานสัมผัสเมื่อแผ่นกราฟีนม้วนตัวกลายเป็นท่อทรงกระบอก(แสดงในรูปที่ 2.21(ข)) ซึ่งความเข้มสูงสุดของพีค G จำนวน 2 พีค จะมีสัญลักษณ์เป็น G^+ สำหรับการเลื่อนตำแหน่งในระดับอะตอมในแนวของแกนของทิวปี และ G^- สำหรับการเลื่อนตำแหน่งในระดับอะตอมในทิศทางของเส้นรอบวงของท่อ ความถี่รามาน G^- จะมีความถี่ต่ำกว่าเนื่องจากบริเวณส่วนโค้งของท่อทำให้การสั่นในทิศทางเส้นรอบวงของท่ออ่อนลง

การบ่งบอกว่าท่อนาโนคาร์บอนมีคุณสมบัติเป็นโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ สามารถดูได้จากพีคของ G^- (แสดงในรูปที่ 2.23) ความกว้างของ G-band จะกว้างมากขึ้นเมื่อมีคุณสมบัติเป็นโลหะเมื่อทำการเปรียบเทียบกับของสารกึ่งตัวนำที่มีพีคแบบ Lorentzian และความกว้างนี้เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนอิสระของท่อนาโนคาร์บอนที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะ พีคที่เกิดจาก G^- ทำการพิกได้ด้วย

เส้น BWF พิกที่มีลักษณะเป็น BWF นี้จะคล้ายกับวัสดุกราฟไฟต์ (graphite-like material) ที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะ เช่น n-dope กราไฟต์ และ n-dope ฟูลเลอร์เร็นซ์ และท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นโลหะ

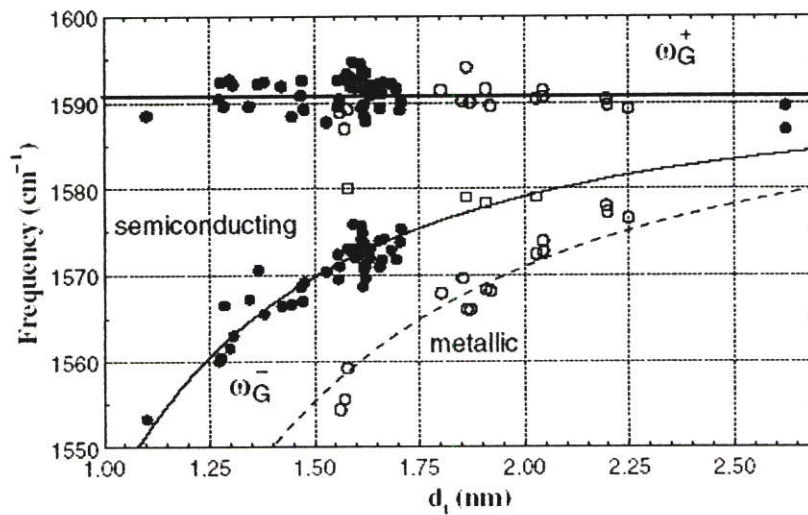
ในรูปที่ 2.23 แสดงถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อนาโนคาร์บอนสัมพันธ์กับความถี่ $G^+(\omega_{G^+})$ และความถี่ $G^-(\omega_{G^-})$ สำหรับโลหะและสารกึ่งตัวนำ ของท่อนาโนคาร์บอนโดยค่า ω_{G^+} จะไม่ขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนในขณะที่ค่า ω_{G^-} ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยค่าของ ω_{G^-} จะลดลงเมื่อขนาดของท่อ (d_t) มีขนาดลดลง

3) D-band

โดยทั้ง D-band คือ Disorder-induced จะแสดงถึง อมอฟิสคาร์บอน หรือ ความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกคาร์บอนโดยจะมีความถี่รามานอยู่ที่ประมาณ 1330 cm^{-1} ในโหมดนี้จะมีค่าของความสูงของพิกที่ไม่มากนักเพราะในย่านนี้แสดงถึงสิ่งที่เป็นสิ่งเจือปนหรือรูปแบบของผลึกที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น

4) อัตราส่วน $I(G)/I(D)$

อัตราส่วนระหว่างความเข้มของพิก G กับความเข้มของพิก D หรือ $I(G)/I(D)$ ซึ่งแสดงถึงความสมบูรณ์และความบริสุทธิ์ของผลึก โดยที่ค่า $I(G)$ หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของพิก G และ $I(D)$ หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของพิก D แล้วนำมาหารกันจะได้ค่าของอัตราส่วน $I(G)/I(D)$ ซึ่งเมื่อมีค่ามากจะแสดงถึงความบริสุทธิ์หรือมีความสมบูรณ์ของผลึกที่สูง



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง d_t กับ ω_{G^+} และ ω_{G^-} ของ SWNTs หลายๆท่อ ที่มีคุณสมบัติของโลหะและสารกึ่งตัวนำ โดยที่จุดที่มีการระบายสีดำมีคุณสมบัติ เป็นสารกึ่งตัวนำและจุดที่ไม่มีการระบายสีดำมีคุณสมบัติเป็นโลหะ

2.7 การประยุกต์ท่อนาโนคาร์บอน

นับตั้งแต่มีการค้นท่อนาโนคาร์บอนในปี 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น คือ นาย สุมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) ของบริษัท NEC[9] โดยหลังจากที่ได้มีการค้นพบนี้ ท่อนาโนคาร์บอนก็ได้ถูกกล่าวถึงเป็นอย่างมากในปัจจุบันทั้งนี้ก็เนื่องมาจากท่อนาโนคาร์บอนมีคุณสมบัติที่พิเศษหลายด้าน อาทิเช่น ทางกล(mechanical), ทางไฟฟ้า(electronic) และทางเคมี(chemical) ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้อย่างมากมาย [10] โดยพอจะกล่าวได้ดังต่อไปนี้

- คุณสมบัติของความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ค่าความยืดหยุ่นของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าสูงถึง 1 เทราปาสคาล (Tpa) หรือ 1000 กิกะปาสคาล (Gpa) ความแข็งแรงของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าอยู่ระหว่าง 11 ถึง 63 Gpa ขณะที่ค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้าอัลลอยมีเพียง 2 Gpa ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีน้ำหนักเบามากกว่าเหล็กและการที่มีค่าความยืดหยุ่นสูงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนไม่แตกหักง่าย จากคุณลักษณะดังกล่าวจึงมีการนำท่อนาโนคาร์บอนนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิตโดยทำให้วัสดุนั้นแข็งแรง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์มากมาย อาทิเช่น เป็นส่วนประกอบใน รถยนต์ เครื่องบิน สิ่งปลูกสร้างต่างๆ หรือเสื่อเกราะกันกระสุน เป็นต้น

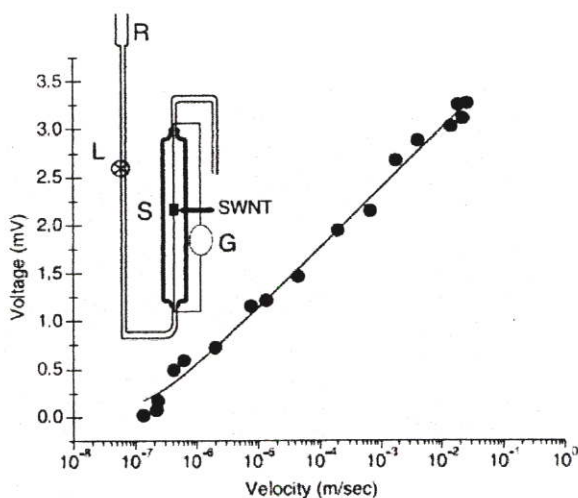
- คุณสมบัติของการนำไฟฟ้า ท่อนาโนคาร์บอนมีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดงหนึ่งมัดของท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 A/cm² ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง 10^6 A/cm² สมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของท่อนาโนคาร์บอนคือ สามารถในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของท่อนาโนคาร์บอนได้ จึงมีการศึกษาเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์สำหรับการสร้างจอภาพแบบรังสีแคโทด ที่ใช้ในจอทีวี หรือจอ คอมพิวเตอร์ โดยการใช้ท่อนาโนคาร์บอนแทนโลหะในส่วนที่เป็นขั้วในตัวหลอดสำหรับจ่ายลำอิเล็กตรอน ด้วยคุณสมบัติที่ เหนือกว่าคือมันให้ความสม่ำเสมอให้ปริมาณที่เพียงพอ และมีอายุการใช้งานของการจ่ายอิเล็กตรอนนานกว่า นอกจากนั้นแล้วยังไม่จำเป็นต้องใช้ในสุญญากาศและยังเป็นการประหยัดพลังงาน เนื่องจากมันสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่จำเป็นต้องเผาไส้หลอดให้แดง อย่างกรณีการใช้โลหะ

- คุณสมบัติทางด้านเคมี ท่อนาโนคาร์บอนสามารถ functionalize (เช่นหมู่ -OH และ -COOH เป็นต้น) ได้ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก 1500 m²/g[10] และ การทนต่อปฏิกิริยาทางเคมีประกอบกับคุณสมบัติอื่นๆ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ สำหรับอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในงานด้านอื่นๆ เช่น Flow sensing, Mass sensing, Bio sensing, IR sensing, Piezo-resistance, Electro-mechanical sensing และ chemical sensing

2.8 การประยุกต์ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัด [11-14]

2.8.1 เซ็นเซอร์วัดการไหล (flow sensing)

Ghosh และคณะ[11] ได้ทำการศึกษาการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับการไหลของของเหลวโดยใช้ท่อนาโนคาร์บอน ชนิด SWNTs ที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธี electric-arc method โดย Ghosh และคณะได้ทำการทดลองด้วยของเหลว น้ำ, เมทานอล, น้ำกับglycerol (75:25), น้ำกับglycerol(75:25), 0.6 M HCl และ 1.2 M HCl โดยทำการวัดแรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์กับอัตราการไหลของของเหลว(แสดงในรูปที่ 2.24) พบว่าที่อัตราการไหลค่าต่างๆของของเหลว เซ็นเซอร์มีความไวในการตอบสนองสูงและมีค่าการคืนกลับสู่สภาพเดิมที่เร็วประมาณ 1 ms นอกจากนี้จากการศึกษาดังกล่าว Ghosh และคณะ ยังเชื่อว่าเซ็นเซอร์ตรวจจับการไหลของของเหลวที่สร้างด้วย ท่อนาโนคาร์บอน ยังสามารถสร้างให้มีขนาดในระดับไมโครมิเตอร์ได้ เพื่อนำไปใช้ในการวัดของเหลวที่มีปริมาตรน้อยๆได้ โดยการลดความยาวของท่อนาโนคาร์บอนให้มีขนาดเล็กลง

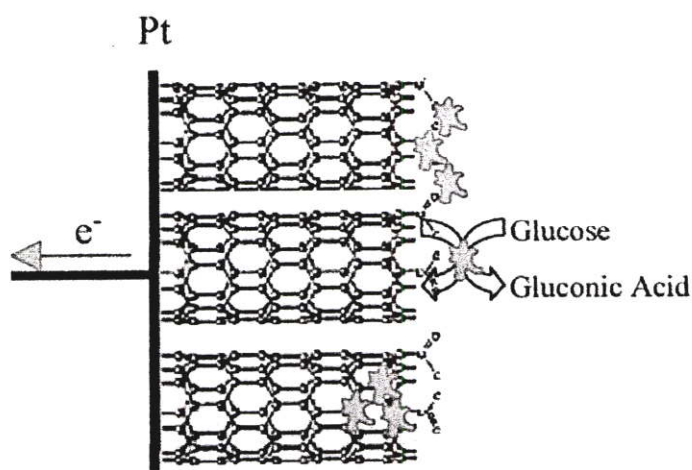


รูปที่ 2.24 การวัดค่าความแรงดันไฟฟ้ากับอัตราการไหลของของเหลวค่าต่างๆ ของเซ็นเซอร์ โดย R คือส่วนที่ใช้เก็บของเหลว, L คือวาล์วทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของของเหลว, S คือภาชนะที่ใช้ในการไหลของของเหลวและ G คือโวลต์มิเตอร์ทำหน้าที่วัดค่าแรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์

2.8.2 ไบโอเซนซิง (bio sensing)

Sotiropoulou และ Chaniotakis [12] ได้ทำการศึกษาและสร้างเซ็นเซอร์ด้วย ท่อนาโนคาร์บอน สำหรับไบโอเซ็นเซอร์ (biosensor) โดยการสร้าง MWNTs ให้เรียงอยู่ในแนวกันบนแผ่นฐานรองแพลทินัม (platinum : Pt) โดยการปลูกด้วยวิธีชีววิธี โดยท่อนาโนคาร์บอนทำหน้าที่ยึดกับสารที่ใช้

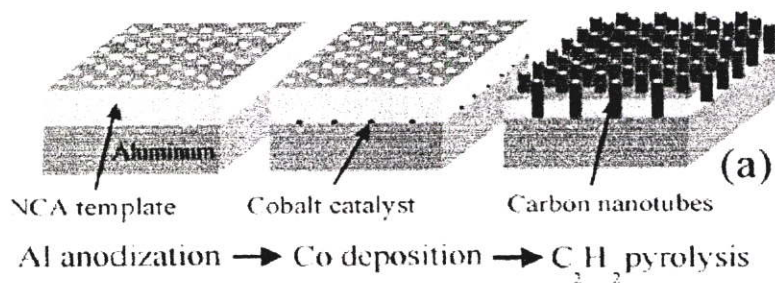
ทดสอบและเป็นตัวกลางในผ่านอิเล็กตรอนของสารที่ใช้ทดสอบ โดยมีแพลทินัมทำหน้าที่เป็นทรานสดิวเซอร์เมื่อปลายท่อของท่อนาโนคาร์บอนมีการตรึงด้วยสารที่ใช้ทดสอบ(แสดงดังรูปที่ 2.25) โดยท่อนาโนคาร์บอนที่นำมาสร้างเป็นเซ็นเซอร์มีด้วยกันสองแบบคือ ท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกทำให้บริสุทธิ์ด้วยการทรีดเม้น (treatment) ด้วยกรดและอากาศ โดยการทรีดเม้นด้วยกรดจะช่วยกำจัดอะมอฟิสคาร์บอนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ ส่วนการ ทรีดเม้นด้วยอากาศโดยวิธีออกซิเดชัน (oxidation) จะเป็นการกำจัดชั้นของกราฟไฟต์ซึ่งอยู่รอบๆท่อนาโนคาร์บอนโดยเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นถูกนำมาทดสอบด้วย กลูโคส (glucose) ผลจากการทดลองพบว่าค่าการตอบสนองและค่าความไวในการตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน ที่ถูกทรีดเม้นด้วยกรด มีค่ามากกว่า เซ็นเซอร์ที่สร้างด้วย ท่อนาโนคาร์บอนที่ถูก ทรีดเม้นด้วยอากาศ



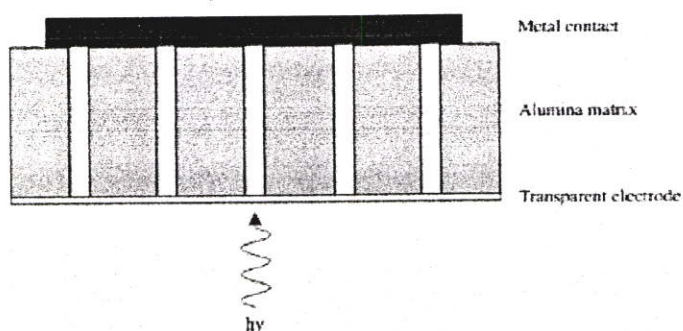
รูปที่ 2.25 โคแอดแกรมของเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วย MWNTs โดยทำหน้าที่ตรึงกับสารกลูโคส และเป็นตัวกลางในการในการผ่านของอิเล็กตรอนจากกลูโคสไปยัง Pt ที่ทำหน้าที่เป็นทรานสดิวเซอร์

2.8.3 IR sensing

ปี 2001 J.M. Xu [13] ได้ทำการศึกษาการสร้าง ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับตรวจจับรังสีอินฟราเรด (IR detector) ด้วยวิธีนาโนเทมเพลต (nanotemplate method) แสดงดังรูปที่ 2.26 ท่อนาโนคาร์บอนมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบคล้ายทรงกระบอกในแนวตั้งอย่างหนาแน่น โดยขนาดของท่อนาโนคาร์บอนจะมีขนาดตามช่องของนาโนเทมเพลตซึ่งมีขนาดในระดับนาโนเมตร โดยในการทดสอบทดสอบด้วย รังสีอินฟราเรดที่ใช้ทดสอบจะผ่านขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงเข้าไปยัง นาโนเทมเพลต โดยที่ท่อนาโนคาร์บอนทำหน้าที่ดูดซับรังสีอินฟราเรด (แสดงดังรูปที่ 2.27) ผลจากการทดลองพบว่า เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นนี้สามารถตอบสนองต่อรังสีอินฟราเรดที่มีสเปกตรัม 1-15 μm



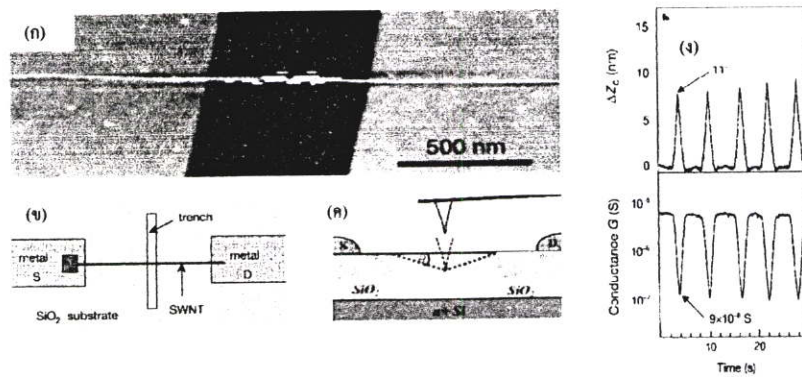
รูปที่ 2.26 กระบวนการสร้างท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี nanotemplate method



รูป 2.27 ท่อนาโนคาร์บอน IR detector ประกอบด้วยชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง, ชั้นโลหะ และ ท่อ นาโนคาร์บอนที่เรียงในแนวตั้ง เมื่อท่อนาโนคาร์บอน มีการดูดซับรังสี ความนำ ไฟฟ้าที่ชั้นโลหะจะเกิดการเปลี่ยนแปลง

2.8.4 Electro-Mechanical Sensing

T.W. Tomblor และคณะ[14] ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทาง electromechanical ของท่อนาโนคาร์บอน โดยสร้างท่อนาโนคาร์บอนให้พลาตอยู่ระหว่างช่องที่มีความกว้าง 500 นาโนเมตร และลึก 175 นาโนเมตร (แสดงดังรูปที่ 2.28) โดยทดสอบการเปลี่ยนรูปร่างท่อนาโนคาร์บอนด้วยปลายของ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงของอะตอม (atomic force microscope; AFM) (แสดงดังรูปที่ 2.28 (ข)) ผลจากการทดลองพบว่า ค่าความนำไฟฟ้าลดลงเมื่อปลายของ AFM ถูกกดลงที่ท่อนาโนคาร์บอน และกลับคืนเป็นท่อแนวตรงหลังจากการทดสอบ โดยค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อ รูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถที่จะนำไปสร้างเป็น mechanical sensor ได้



รูปที่ 2.28 คุณสมบัติ Electromechanical ของท่อนาโนคาร์บอน (ก) ภาพถ่าย AFM ของท่อนาโนคาร์บอนที่พาดระหว่างช่องที่มีความกว้าง 500 nm และลึก 175 nm (ข) แผ่นฐานรองที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ทิวป์ที่พาดบนช่อง และที่ปลายท่อเชื่อมติดกับขั้วโลหะไฟฟ้า (S เป็น source และ D เป็น drain) ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3 ± 4 mm (ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อทดสอบด้วย AFM (ง) ΔZ_c คือ Vertical displacement และ G คือ conductance ของท่อนาโนคาร์บอน

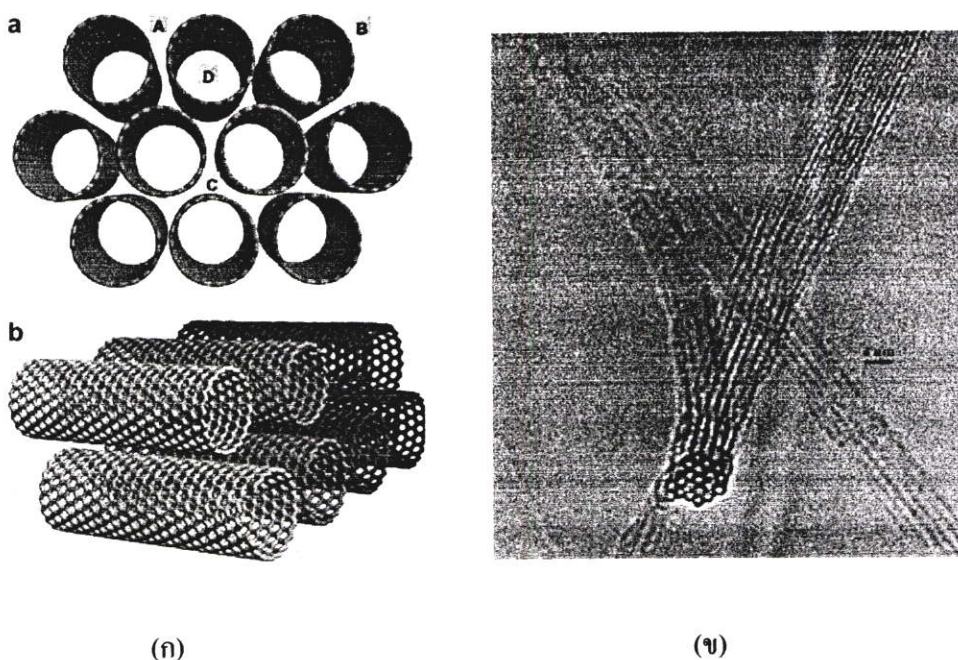
2.8.5 Chemical sensing

จากคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนที่โดดเด่นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มากมายนั้น แต่ถึงอย่างไรก็ตามก็อยู่ในขั้นตอนของการศึกษา ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง แต่จากการศึกษาพบว่า เซ็นเซอร์ทางเคมี มีความเป็นไปได้มากที่สุดในการที่นำมาใช้งานได้จริง โดยในปัจจุบันจึงมีการศึกษาเซ็นเซอร์ทางเคมีที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอนเป็นอย่างมาก

2.9 กลไกการดูดซับก๊าซของท่อนาโนคาร์บอนและกลไกการนำไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอนที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 SWNTs และ SWNTs bundles

โดยทั่วไปแล้วท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จะไม่เป็นท่อ SWNTs เดี่ยวแบบโดดๆ แต่จะรวมกันอยู่เป็นหลายๆท่อ โดยจะเรียกท่อ SWNTs กลุ่มนี้ว่า SWNTs bundles โดยท่อที่รวมกันหลายๆท่อนี้ แต่ละท่อจะยึดรวมกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ท่อนาโนคาร์บอนที่มีครวมกันหลายๆท่อ (bundles) (ก) โคอะแกรมของ bundles ของ
 ท่อนาโนคาร์บอน (a) ภาพตัดขวางของ bundles (b) ภาพด้านข้างของ bundles (A)
 Outer surface (B) Groove (C) Interstitial channels (ICs) และ (D) nanotube cavities
 (ข) ภาพ High resolution TEM แสดง SWNT bundle [20]

จากรูปที่ 2.29 แสดง บริเวณผิวของท่อนาโนคาร์บอนที่มีการดูดซับก๊าซชนิด SWNTs bundles หรือจะเรียกว่า bundles ซึ่งจะประกอบด้วยทิวป์ของ SWNT หลายๆทิวป์มีครวมกัน ยกตัวอย่างเช่น SWNTs (10, 10) จะท่อมัครวมกัน 40-200 ทิวป์ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1.37 นาโนเมตร และมีระยะห่างของจุดกึ่งกลางแต่ละท่อ 17 อังสตรอม SWNTs bundles แสดงได้ในรูปที่ 2.24(ก) โดยแต่ บริเวณของ SWNTs bundles ใน SWNTs bundles จะเรียกว่า บริเวณที่ก๊าซหรือโมเลกุลจะดูดซับบน ผิวของ SWNTs Bundles มี 3 บริเวณด้วยกัน คือ (A). ผิวนอก (outer surface) ของ SWNTs bundles คือ บริเวณส่วนที่โค้งด้านนอกของ SWNTs bundles (B). กรูฟ (groove) คือช่องที่อยู่ระหว่าง SWNTs 2 ท่อติดกัน (C). Interstitial channels (ICs) คือ ช่องระหว่าง SWNTs 3 ท่อที่ติดกัน โดยมีขนาด 2.6 อังสตรอม นอกจากนี้ก๊าซหรือโมเลกุลยังสามารถที่จะดูดซับเข้าไปภายในท่อของ SWNTs ได้ โดย SWNTs มีลักษณะเป็นท่อปลายเปิดด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้วย โดยมีขนาดของท่อ 13.56 อังสตรอม

ก๊าซหรือโมเลกุลส่วนมากสามารถดูดซับที่บริเวณผิวด้านนอกของท่อและบริเวณกรูฟได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น โดยถ้าเป็นอะตอมหรือโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะถูกดูดซับที่บริเวณกรูฟก่อน นอกจากนี้ ก๊าซหรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เช่น He สามารถที่จะแทรกเข้าไปในบริเวณของ ICs ได้ ทั้ง MWNT และ SWNTs

2.9.2 MWNT

การดูดซับของก๊าซที่ผิวของ MWNT สามารถศึกษาได้เฉพาะที่บริเวณผิวด้านนอกของ MWNT และภายในท่อของ MWNT ที่มีลักษณะเป็นท่อปลายเปิด อะตอมหรือโมเลกุลจึงจะสามารถแทรกเข้าไปในท่อของ MWNT ได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันการศึกษาคู่ควบกับก๊าซของ MWNT ยังไม่มีการสรุปที่แน่ชัดเนื่องจาก MWNT มีโครงสร้างที่เป็นหลายผนังและมีการจัดเรียงของท่อ MWNT ที่เป็นอิสระ ทำให้การศึกษาคู่ควบของก๊าซหรือ โมเลกุลมีความยุ่งยากและความซับซ้อน

2.9.3 รอยสัมผัสระหว่างขั้วโลหะ กับท่อนาโนคาร์บอน

การศึกษากลไกการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน หรือ อุปกรณ์ที่สร้างจากท่อนาโนคาร์บอน เมื่อถูกสร้างขึ้นมาเสร็จเรียบร้อยแล้วจำเป็นต้องมีการต่อเส้นลวดโลหะ หรือขั้วโลหะออกไปภายนอกเพื่อเชื่อมกับอุปกรณ์ภายนอกอื่นๆ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องสร้างรอยสัมผัส (contact) ระหว่างโลหะกับท่อนาโนคาร์บอน ที่เป็นส่วนต่างๆของตัวอุปกรณ์ เช่น การต่อขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นกับเครื่องมือวัด เป็นต้น สำหรับโลหะที่ใช้มักเป็น อลูมิเนียม(Al), โครเมียม(Cr), พาลาเดียม(Pd), แพลตินั่ม(Pt), ทองคำ(Au)และ โมลิบดีนัม(Mo) เป็นต้น ซึ่งมีค่า work function แสดงดังตาราง 2.2 ซึ่งจะเห็นว่าโลหะที่นำมาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าต่อกับสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอน ส่วนใหญ่มีค่า work function มากกว่าสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอน ยกเว้นอลูมิเนียมมีค่า work function เท่ากับ 4.28 eV ซึ่งน้อยกว่าสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งมีค่า work function เท่ากับ 4.5 eV ซึ่งมีค่าเท่ากับค่า work function ของ graphite [35] แต่อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติสารกึ่งตัวนำ CNT และ โลหะ เมื่อนำมาสัมผัสจะมีสิ่งบกพร่องที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างท่อนาโนคาร์บอน กับโลหะ เช่นมีอะตอมแปลกปลอมอื่นๆหรือประจุไฟฟ้าอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัส เช่น โลหะจะมีสิ่งสกปรกและฟิล์มบางออกไซด์เกิดขึ้นที่ผิว โดยเฉพาะผิวของโลหะอลูมิเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ง่าย ส่วนสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอน ที่ผิวสัมผัสจะมีการออกซิเดชันและการสร้างพันธะของ functional chemical group ซึ่งสาเหตุดังกล่าวจะมีผลต่อค่า work function ของสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอน เมื่อนำโลหะอลูมิเนียมมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอน ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึงพื้นฐานของแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

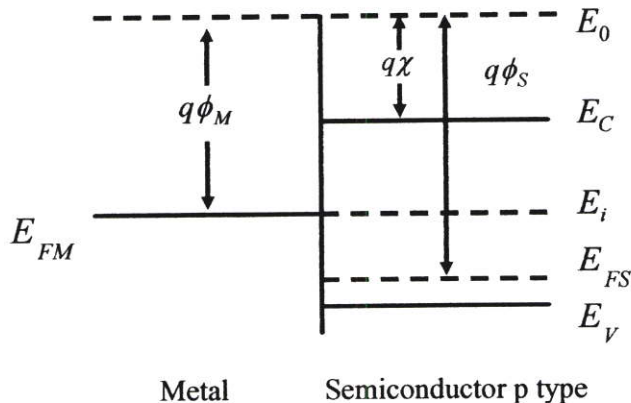
ตาราง 2.2 ค่า Work function ของโลหะที่นำมาสัมผัสกับท่อนาโนคาร์บอน [20]

Metal	Pt	Pd	Au	Mo	Cr	CNT	Al
work function, ϕ_w (eV)	5.65	5.12	5.10	4.60	4.50	4.5	4.28

รอยสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ แบ่งได้ 2 ชนิด ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้า คือ รอยสัมผัสแบบโอห์มิก(ohmic contact) และรอยสัมผัสแบบช็อตคกี(schottky contact) ซึ่งรอยสัมผัสแบบโอห์มิกเป็นรอยสัมผัสที่มีความนำไฟฟ้าสูง กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง และไม่มีแรงดันตกคร่อมรอยสัมผัส ส่วนรอยสัมผัสแบบช็อตคกีเป็นรอยสัมผัสที่แสดงคุณสมบัติเรกติไฟร์(rectifier) คล้ายกับไดโอด โดยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ทิศทางเดียว โดยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ สามารถให้คุณสมบัติได้ 2 ลักษณะ คือ อาจเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก หรือ รอยสัมผัสแบบช็อตคกี ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่นำมาประกอบกันที่นำมาสร้างให้เป็นรอยสัมผัส ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่นำมาประกอบกันชนิดพีเท่านั้น

2.9.3.1 ฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าสารกึ่งตัวนำที่นำพาพาโนคาร์บอน

ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำกรณีฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าสารกึ่งตัวนำที่นำพาพาโนคาร์บอนก่อนเกิดรอยสัมผัส แสดงในรูปที่ 2.30 ระดับสุญญากาศ(vacuum level : E_0) ใช้เป็นระดับอ้างอิงเพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งระดับสุญญากาศนี้นิยามว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็งและหยุดนิ่งที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรือพลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ



รูปที่ 2.30 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนเกิดรอยสัมผัส ($q\phi_M < q\phi_S$)

ทางด้านโลหะระดับเฟอร์มิ(Fermi level: E_{FM}) หรือค่าเฉลี่ยอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในโลหะนั้น จะมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_C) ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศ เรียกว่า ฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ เขียนแทนด้วย ϕ_m มีค่าดัง

สมการ 2.16 สำหรับโลหะที่นำมาสร้างรอยสัมผัสกับวัสดุกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอนใช้มักเป็น อลูมิเนียม(Al), โครเมียม(Cr), พาลาเดียม(Pd), แพททินัม(Pt), ทองคำ(Au) และ โมลิบดีนัม(Mo) เป็นต้น ซึ่งมีค่าฟังก์ชันงาน แสดงดังตาราง 2.2 ซึ่งค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมบัติประจำตัวของโลหะแต่ละชนิด มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

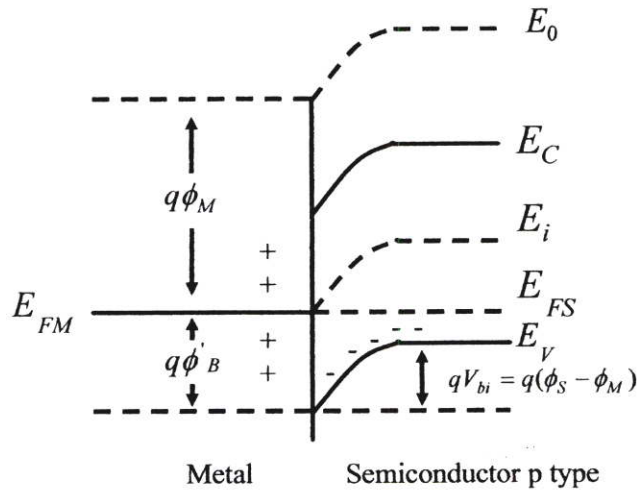
$$q\phi_m = E_0 - E_{FM} \quad 2.16$$

ทางด้านสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอนชนิดพี ระดับเฟอร์มิ (E_{FS}) จะอยู่ต่ำกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานและระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ซึ่งฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเขียนแทนด้วย ϕ_s ดังสมการที่ 2.17

$$q\phi_m = E_0 - E_{FS} \quad 2.17$$

ส่วนความแตกต่างของระดับสุญญากาศและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเรียกว่า ค่า อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity: χ) เป็นสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีเท่ากับ 4.8 eV [36]

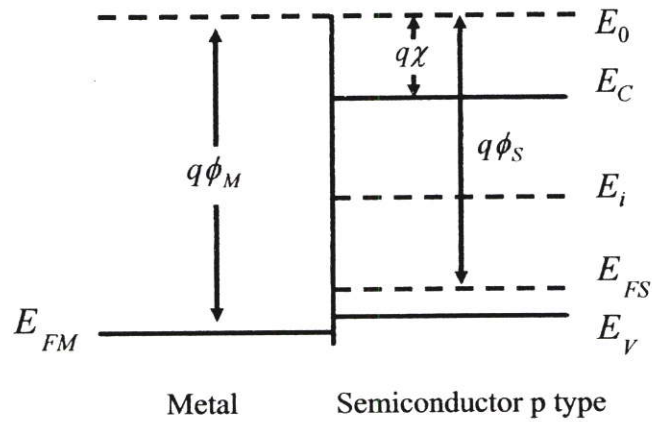
การเกิดรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_m < q\phi_s$) ก่อนเกิดรอยสัมผัส จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพี E_{FS} จะอยู่ที่ระดับต่ำกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ E_{FM} เมื่อเกิดรอยสัมผัสจะมีการถ่ายเทประจุพาหะโดยอิเล็กตรอนจากด้านโลหะจะเคลื่อนเข้าไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทั้งให้เกิดประจุบวกที่ด้านโลหะบริเวณรอยสัมผัส จนกระทั่งถึงสภาวะสมดุลความร้อนซึ่งระดับเฟอร์มิของทั้งสองอยู่ที่ระดับเดียวกัน กระแสสุทธิของรอยสัมผัสเป็นศูนย์ ขณะที่อิเล็กตรอนจากโลหะที่เคลื่อนเข้าไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะเกิดการรวมตัวใหม่ (recombine) ระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่บริเวณผิวสัมผัส ทำให้โฮล บริเวณนี้ มีความหนาแน่นลดลง การลดลงของโฮลจะทำให้เกิดไอออนลบของอะตอมผู้รับในด้านสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากประจุไฟฟ้าบวกในโลหะและประจุไฟฟ้าลบในสารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัส ทำให้มีสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ โดยมีทิศทางจากทางด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นทิศที่ต่อต้านการเคลื่อนที่โฮลจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ไปยังด้านโลหะ หรือ ก็คือมีกำแพงศักย์ของโฮลเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส กำแพงศักย์นี้มีค่าเท่ากับ qV_{bi} ซึ่งหาได้จากการ ไล่จางลงของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำและมีค่าเท่ากับ $q(\phi_s - \phi_m)$ รอยสัมผัสนี้จะมีคุณสมบัติเป็น รอยสัมผัสแบบผสมระคติไฟร์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.31



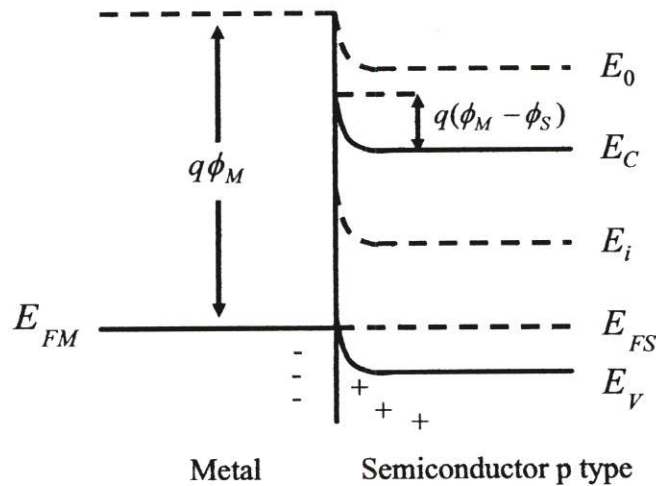
รูปที่ 2.31 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัส ($q\phi_M < q\phi_S$)

2.9.3.2 ฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอน

ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำกรณีฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอนก่อนเกิดรอยสัมผัส แสดงในรูปที่ 2.32 จะเห็นว่าฟังก์ชันงานของโลหะ $q\phi_M$ มีค่ามากกว่าของสารกึ่งตัวนำชนิดพี $q\phi_S$ ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ E_{FS} จึงสูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ E_{FM} เมื่อสารทั้งสองมาสัมผัสกันและอยู่ในภาวะสมดุล ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ที่ระดับเดียวกันแสดงในรูปที่ 2.33 จะเห็นว่าบริเวณรอยสัมผัสแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะโค้งงอขึ้นด้วยขนาด $q(\phi_M - \phi_S)$ และไม่มีกำแพงศักย์ซึ่งจะต่อต้านโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำที่จะไปยังโลหะ ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัสโดยให้สารกึ่งตัวนำมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านโลหะ โฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสเข้าไปยังด้านโลหะได้เป็นอย่างดี จึงมีกระแสไหลได้เป็นจำนวนมาก และเมื่อกลับขั้วแรงดันไบอัสโดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ กระแสจำนวนมากจะไหลจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นกระแสสามารถไหลผ่านรอยสัมผัสได้ทั้งสองทิศทาง ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ รอยสัมผัสแบบโอห์มิก



รูปที่ 2.32 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนเกิดรอยสัมผัส ($q\phi_M > q\phi_S$)

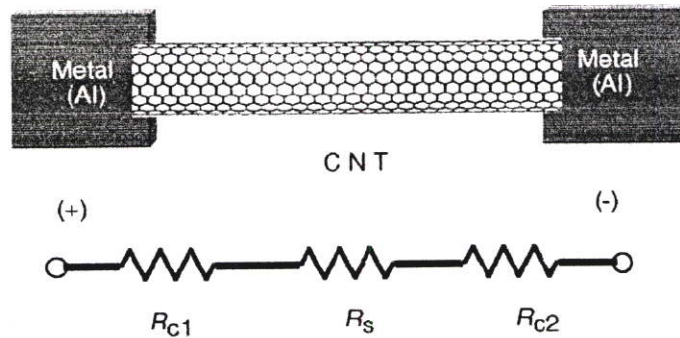


รูปที่ 2.33 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัส ($q\phi_M > q\phi_S$)

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติสารกึ่งตัวนำและโลหะเมื่อนำมาสัมผัสจะมีสิ่งบกพร่องที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอนกับโลหะ เช่นมีอะตอมแปลกปลอมอื่นๆหรือประจุไฟฟ้าอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัส เช่น โลหะจะมีสิ่งสกปรกและฟิล์มบางออกไซด์เกิดขึ้นที่ผิว โดยเฉพาะผิวของโลหะอลูมิเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ง่าย ส่วนสารกึ่งตัวนำ ท่อนาโนคาร์บอนที่ผิวสัมผัสจะมีการออกซิเดชันและสร้างพันธะกับหมู่ฟังก์ชันอื่นที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ เรียกว่า Functional chemical group ซึ่งสาเหตุดังกล่าวจะมีผลต่อค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำท่อนาโนคาร์บอนด้วยเหมือนกัน

2.9.4 กลไกการนำไฟฟ้าของก๊าซเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน

กลไกของการนำไฟฟ้าเมื่อมีการตรวจวัดก๊าซของเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน ปัจจุบันยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดและยังมีการศึกษากันอยู่ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามก็ได้มีการรายงานก่อนหน้านี้ว่า กลไกการนำไฟฟ้าของก๊าซเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน เกิดจากการดูดซับก๊าซที่ผิวของท่อนาโนคาร์บอนและเกิดจากการดูดซับก๊าซที่ผิวของโลหะซึ่งใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของก๊าซเซ็นเซอร์ [20] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.34 และรูปที่ 2.35



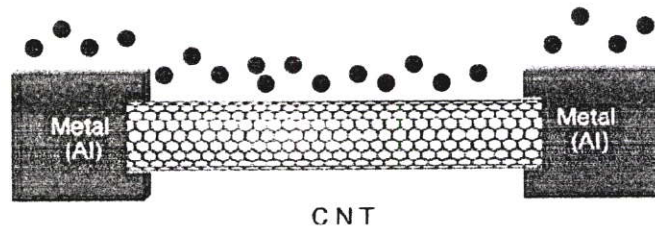
รูปที่ 2.34 แบบจำลอง Al/CNT sensor ก่อนก๊าซจะดูดซับบนก๊าซเซ็นเซอร์ [20]

จากรูปที่ 2.34 เป็นแบบจำลองก๊าซเซ็นเซอร์ก่อนนำไปวัดกับก๊าซ ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนถูกต่อเชื่อมปลายทั้งสองด้านเข้ากับขั้วไฟฟ้าโลหะอลูมิเนียม โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้ารวม (R_T) คือ

$$R_T = R_{C1} + R_S + R_{C2} \quad (2.18)$$

R_S , R_{C1} และ R_{C2} คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนและค่าความต้านทานไฟฟ้าของผิวสัมผัสของ Al/CNT ทั้งสอง โดยกำหนดให้ $R_{C1} \gg R_{C2}$ ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้ารวม (R_T) คือ

$$R_T \approx R_{C1} + R_S \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.35 แบบจำลอง Al/CNT sensor ขณะก๊าซดูดซับบนก๊าซเซ็นเซอร์

จากรูปที่ 2.35 แสดงแบบจำลอง Al/CNT sensor ขณะดูดซับก๊าซบนก๊าซเซ็นเซอร์ ซึ่งเมื่อก๊าซดูดซับบนผิวของก๊าซเซ็นเซอร์มีผลทำให้กลไกการนำไฟฟ้าของเซ็นเซอร์มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1) เกิดการดูดซับโมเลกุลก๊าซที่ผิวท่อนาโนคาร์บอน

เมื่อมีก๊าซมาดูดซับบนผิวของท่อนาโนคาร์บอน จะเกิดจากพันธะระหว่างท่อนาโนคาร์บอน กับ อะตอมหรือ โมเลกุลที่มาดูดซับกับทิวป์ด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (van der waals force) ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าแบบอ่อน ดังนั้นเมื่อมีโมเลกุลมาดูดซับที่ผิวของทิวป์ จึงเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างกันซึ่งสามารถอธิบายโดยสมการที่ 2.20



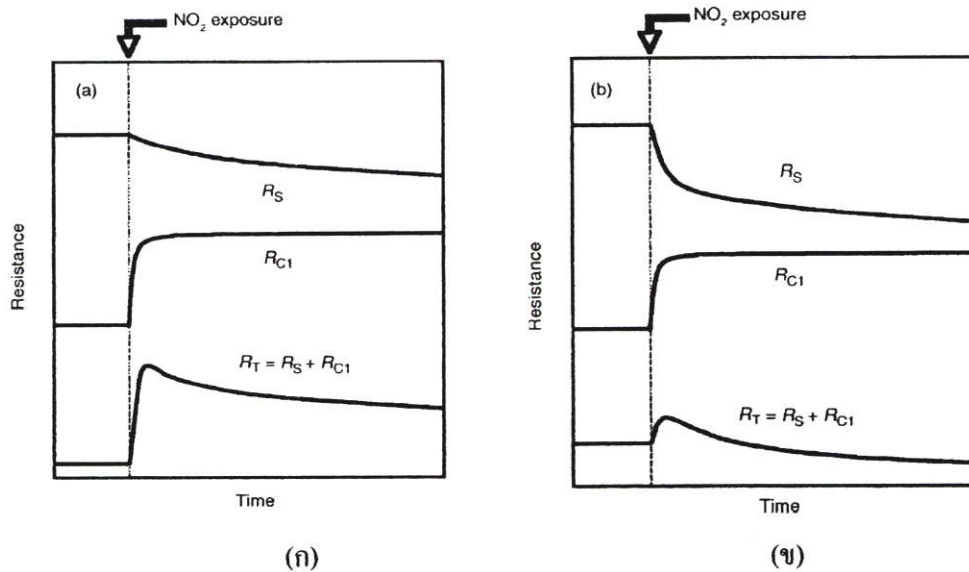
โดย δ คือจำนวนประจุที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดปฏิกิริยาระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับก๊าซ

จากสมการ (2.19) การดูดซับที่ผิวของท่อนาโนคาร์บอนจะมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างผิวของท่อนาโนคาร์บอนกับ โมเลกุลของก๊าซ โดยอาจจะเป็นก๊าซหรือท่อนาโนคาร์บอนก็ได้ที่มีการให้หรือเสียอิเล็กตรอนทั้งนี้ขึ้นกับก๊าซที่มาดูดเกาะที่ผิวของท่อนาโนคาร์บอนว่าจะให้หรือรับอิเล็กตรอนจากท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทำให้มีการเปลี่ยนการนำไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ จึงสามารถวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_s) ของเซ็นเซอร์ได้

2) เกิดการดูดซับ โมเลกุลก๊าซที่ผิวรอยต่อ Al

ในกรณีที่ก๊าซถูกดูดซับที่ผิวของอูมิเนียมมีผลทำให้ ค่า Work function และ Schottky barrier มีค่าเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_{c1}) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้ารวม(R_T) ในสมการ(2.29) ของก๊าซเซ็นเซอร์ คือผลจากการรวมค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากคูคซับ โมเลกุลก๊าซ ที่ท่อนาโนคาร์บอน(R_S) และการคูคซับ โมเลกุลก๊าซที่ Al (R_{C1}) โดยผลของค่า R_T ที่ได้จากการรวม R_S และ R_{C1} (1)ก๊าซเซ็นเซอร์ที่มีค่า $R_{C1} > R_S$ กล่าวคือ การตรวจจับก๊าซส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการคูคซับก๊าซกับผิวอลูมิเนียม (2) ก๊าซเซ็นเซอร์ที่มีค่า $R_{C1} < R_S$ ซึ่งการตรวจจับก๊าซส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการคูคซับก๊าซกับท่อนาโนคาร์บอน แสดงได้ดังรูปที่ 2.36(ก)และ2.36(ข) ตามลำดับ



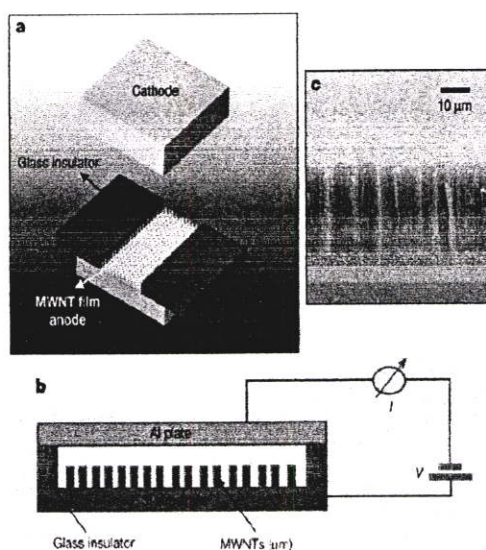
รูปที่ 2.36 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของก๊าซเซ็นเซอร์ Al/CNTs เมื่อทดสอบด้วยก๊าซ NO_2 โดยการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองขึ้นอยู่กับ อิทธิพลของ Schottky barrier และปฏิกิริยาของท่อนาโนคาร์บอน กับ NO_2 (ก) การตอบสนองขึ้นอยู่กับอิทธิพลของ Schottky barrier เป็นหลัก (ข) การตอบสนองขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาจากท่อนาโนคาร์บอน เองกับ NO_2 เป็นหลัก [20]

รูปที่ 2.36 แสดงแบบจำลองค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ที่มีโครงสร้าง Al/CNT เมื่อทดสอบกับก๊าซ NO_2 เมื่อ NO_2 คูคซับที่ผิวท่อนาโนคาร์บอน จะทำให้ความต้านทาน (R_S) ลดลงเนื่องจาก NO_2 จะรับอิเล็กตรอนบวกท่อนาโนคาร์บอนทำให้พานะในท่อนาโนคาร์บอน (hole) เพิ่มมากขึ้น ในกรณีโมเลกุลของ NO_2 ที่คูคซับที่ผิวรอยต่อ Al จะทำให้ความต้านทาน (R_{C1}) เพิ่มขึ้นเนื่องค่า work function เปลี่ยนแปลงทำให้รอยสัมผัสช็อคก็มีค่าเพิ่มขึ้น

2.10 การประยุกต์ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ

2.10.1 Gas Ionization Sensors

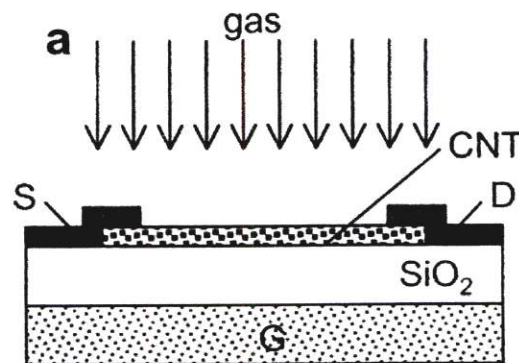
Modi และคณะ[21]ได้ทำการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซด้วย ท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้หลักการไอออไนเซชัน (ionization) ของก๊าซ (แสดงดังรูปที่ 2.37) โดย MWNT-films ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด ซึ่งในการทดสอบจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าดีซี (DC) ให้กับเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ ซึ่งรอบๆปลายของท่อนาโนคาร์บอนจะมีสนามไฟฟ้าแรงสูงแบบไม่เป็นเชิงเส้น (high nonlinear electric Fields) ทำให้สามารถวัดชนิดของก๊าซ โดยค่าการ electrical breakdown ของก๊าซ และความเข้มข้นของก๊าซโดยการวัดค่ากระแสไฟฟ้า ได้ โดยก๊าซที่ใช้ทดสอบคือ NH_3 , CO_2 , N_2 , O_2 , He, Ar และ air ผลจากการทดสอบพบว่าเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, ความชื้นและมีค่าของการ recovery ที่เร็วมากเนื่องจากไม่มีการดูดซับ โมเลกุลของก๊าซที่เซ็นเซอร์ แต่พบว่าเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซนี้ไม่สามารถวัดก๊าซที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 25 ppm ได้ (โดยทำการวัดเทียบกับ chromatography)



รูปที่ 2.37 ก๊าซไอออไนเซชันเซ็นเซอร์ซึ่งสร้างด้วย ท่อนาโนคาร์บอน (ก) โครงสร้างของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซนี้ประกอบด้วย MWNT-films (แอโนด), แผ่นแก้วหนา $180 \mu\text{m}$ (ฉนวน) และโลหะอลูมิเนียม (แคโทด) (ข) ไลอะแกรมการทดสอบเซ็นเซอร์โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าดีซี (ค) ภาพ SEM ของ MWNT-films ในแนวตั้งบนแผ่นฐานรอง SiO_2 โดยปลูกด้วยวิธีการ ชีววิธี และทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดในเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ

2.10.2 FET- Based Sensor

Takao Someya และคณะ[22] ได้ทำการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบ FET ด้วย Single-walled Carbon nanotube แสดงได้ดังรูปที่ 2.38 โดยทำการสังเคราะห์ ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการชีวิตบนโลหะเร่งปฏิกิริยา Fe/Mo โดยในการทดสอบทำการทดสอบด้วยไอของของเหลว แอลกอฮอล์ (alcohol vapor) หลายชนิด คือ ethanol, methanol, 1-propanol, 2-propanol, 1-butanol, tertiary-butanol, 1-pentanol และ 1-octanol จากการทดสอบพบว่า เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆได้โดยทำการวัดกระแสเดรนที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการทดสอบด้วยไอของสารดังกล่าวที่ความเข้มข้นในระดับ ppm และเวลาในการคืนกลับสภาพเดิมประมาณ 2 วินาที จากการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซที่สร้างขึ้นนี้สามารถวัดการตอบสนองต่อแอลกอฮอล์ได้หลายชนิด(wide rang of alcohol vapors)และมีคุณสมบัติของการเป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ คือสามารถ reproducible หลังจากการทดสอบด้วยไอของแอลกอฮอล์ แต่อย่างไรก็ตามการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบ FET ด้วย SWNTs มีกระบวนการในการสร้างที่ซับซ้อน

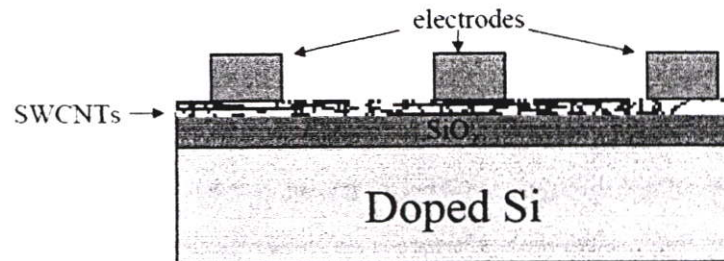


รูปที่ 2.38 โครงสร้างของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบ FET ที่สร้างด้วย SWNT โดยมีระยะห่างระหว่าง S/D 2.5 และ 5 μm โดยสร้างด้วยโลหะทอง (gold) และมี SiO_2 หนา 100 nm

2.10.3 Chemicapacitor

Snow และคณะ[23] ได้ทำการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซด้วย SWNTs โดยการวัดค่าความจุของเซ็นเซอร์ แสดงดังรูปที่ 2.39 โดย การครีโอล (drop) SWNTs ลงบน SiO_2 ซึ่งมีความหนา 10 นาโนเมตร โดย SWNTs และซิลิคอน(Si)ทำหน้าที่เป็นเพลท (plate)ของตัวเก็บประจุ หลังจากนั้นจึงสร้างขั้วโลหะด้วยพาราเดียม (palladium) ขนาด 2 x 2 มิลลิเมตร บน SWNTs โดยในการทดสอบด้วยก๊าซ 19 ชนิดและป้อนแรงดัน AC ขนาด 0.1 V (30 kHz) ผลจากการทดลองพบว่า เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซที่สร้างขึ้นนี้มีค่าของการตอบสนองสูง(50 ppb) เวลาในการตอบสนองและเวลาในการ

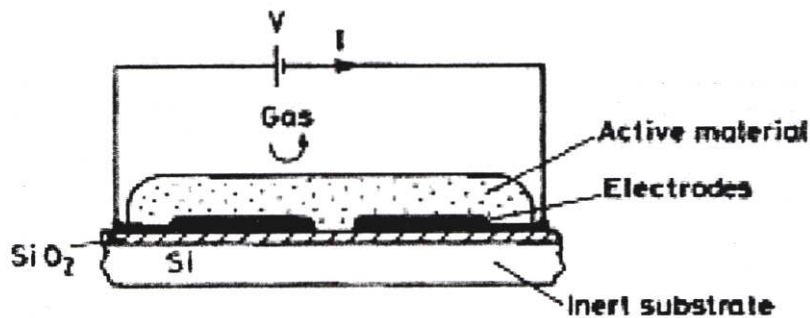
คืนกลับสภาพเดิมเร็ว หรือน้อยกว่า 4 วินาที และสามารถตอบสนองต่อก๊าซหลายชนิด (โดยในการทดสอบทดสอบด้วยก๊าซ 19 ชนิด) นอกจากนี้เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซที่สร้างขึ้นมีการทำงานที่คงที่ และไม่มีสัญญาณรบกวนในขณะที่ทำการวัด



รูปที่ 2.39 ไคอะแกรมเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบ Chemicapacitor

2.10.4 Chemoresistor

Jing Li และคณะ [24] ได้ทำการสร้างก๊าซเซ็นเซอร์ด้วยท่อนาโนคาร์บอนโดยการวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ แสดงดังรูปที่ 2.40 โดยทำการทดสอบด้วย NO_2 โดยผลจากการทดสอบพบว่าเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นมีค่าการตอบสนองต่อความเข้มข้นของ NO_2 ที่ระดับ 44 ppb และมีการเวลาในการคืนกลับสภาพเดิมประมาณ 4 วินาที



รูปที่ 2.40 ไคอะแกรมเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบ Chemoresistor

บทที่ 3

การทดลอง

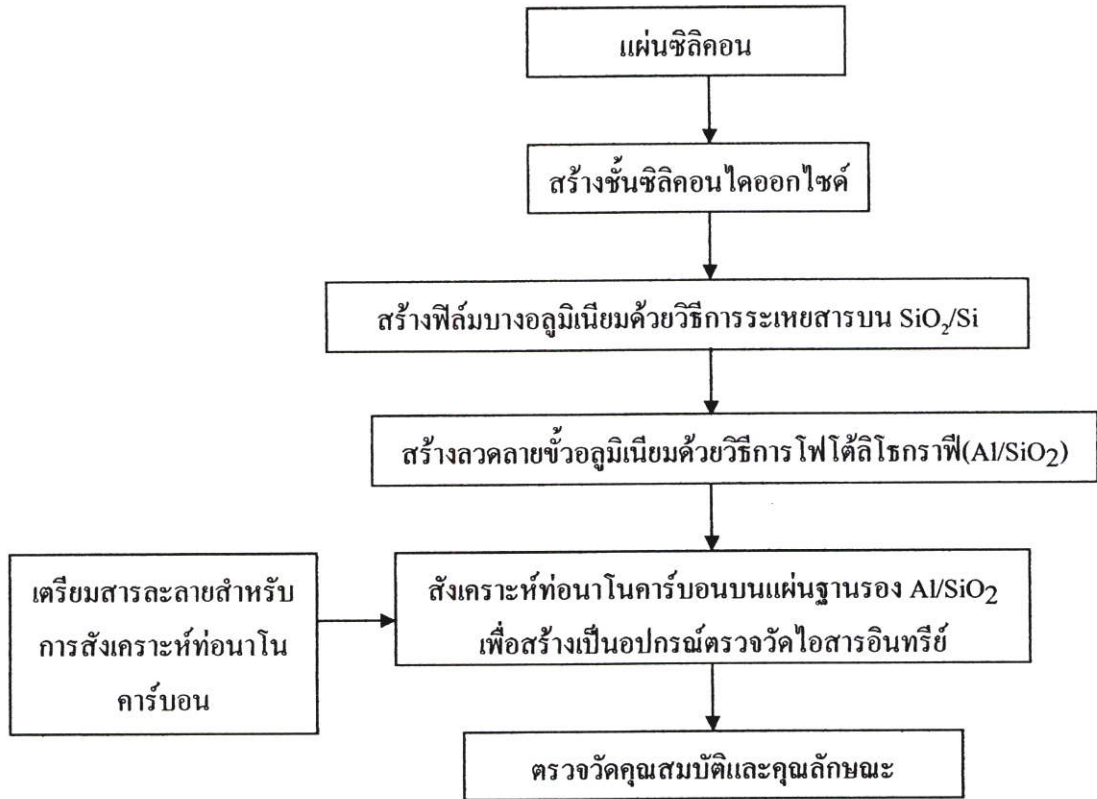
ในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมการทดลองและวิธีการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย ลำดับขั้นตอนในการทำวิจัย การเตรียมสารละลายสำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน การร่างแบบและสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะอลูมิเนียม การสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดสารประกอบสารอินทรีย์ไฮโระเหยด้วยการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธีการชีวิตแบบไพโรไลซิส การตรวจวัดคุณสมบัติและคุณลักษณะ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

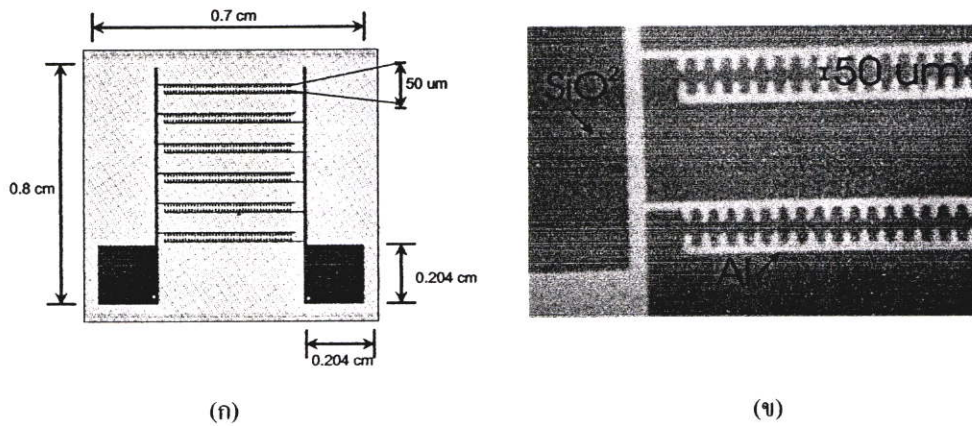
ในงานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นจากการสร้างขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม ซึ่งเริ่มต้นจากการเขียนแบบด้วยโปรแกรมคดเรลครอ 11 (CoreDRAW 11) จากนั้นจึงนำแผ่นซิลิกอนขนาด 0.7 X 0.8 เซนติเมตร ด้วยการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และชั้นอลูมิเนียมด้วยวิธีออกซิเดชัน (oxidation) และการระเหยสาร ในสุญญากาศ บนแผ่นซิลิกอน ตามลำดับ จากนั้นทำการสร้างลวดลายของอลูมิเนียมตามที่ออกแบบไว้ ด้วยขบวนการสร้างโฟโตลิโทกราฟี โดยรายละเอียดในการสร้างขั้วไฟฟ้านี้ได้อธิบายในหัวข้อ 3.2 จากนั้น จึงสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการไฮโระเหยทางเคมี (chemical vapour deposition; CVD) แบบไพโรไลซิส (pyrolysis) ที่ความดัน 1 บรรยากาศ โดยใช้สารละลายเอทิลแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นของอะตอมคาร์บอนและฟลูโรเซนสำหรับเป็นโลหะในการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งรายละเอียดในการเตรียมสารละลายและขั้นตอนในการสังเคราะห์ ได้อธิบายในหัวข้อ 3.4 จากนั้นจึงนำแผ่นฐานรองเซ็นเซอร์ที่เคลือบท่อนาโนคาร์บอนนี้ มาทำการตรวจวัดและคุณลักษณะของชิ้นงานที่สร้างต่อไป โดยแผนผังลำดับขั้นในการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1

3.2 การออกแบบเพื่อสร้างขั้วอลูมิเนียม

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมคดเรลครอ 11 (CoreDRAW 11) ในการเขียนแบบเนื่องจากโปรแกรมนี้มีลักษณะพิเศษ คือสามารถเขียนแบบในระดับไมครอนได้ โดยปกติแล้วควรเขียนแบบให้มีจำนวนซี่ (grid) มากที่สุดระยะ (grid space) ให้น้อยที่สุด แต่ในงานวิจัยนี้ถูกจำกัดด้วยขบวนการฉายฟิล์มในขบวนการสร้างมาสก์(mask)จึงทำให้สามารถเขียนแบบได้ขนาดดังต่อไปนี้ ขนาดของพื้นที่ของขั้วไฟฟ้ามีขนาดชิ้นงานกว้าง 0.7 เซนติเมตร และยาว 0.8 เซนติเมตร บริเวณสัมผัสฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน กำหนดให้มีซี่สัมผัสสลับฟันปลาทั้งหมด 12 ซี่ สลับกันด้านละ 6 ซี่ และระยะห่างระหว่างซี่ 50 ไมครอน แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.2 (ก) แบบขั้วไฟฟ้าที่ใช้โปรแกรม CoreDRAW 11 ในการเขียนแบบ (ข) ภาพถ่ายจริงด้วยกล้องจุลทรรศน์ของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม

3.3 การสร้างขั้วอลูมิเนียม

1. การเตรียมฐานรองซิลิกอน

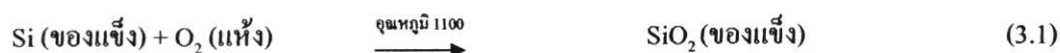
- ใช้แผ่นซิลิกอนชนิดพีระนาบ (100) สภาพด้านทาน 1-2 โอห์ม เซนติเมตร ความหนา 600 ไมโครเมตร

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น

- ทำความสะอาดผิวหน้าด้วยน้ำบริสุทธิ์ (De-Ionize; DI) ในเครื่องอัลตราโซนิค (ultrasonic) เป็นเวลา 15 นาที
- ดั้มในกรดไนตริก (HNO₃) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะหนักที่ผิวหน้าแผ่นซิลิกอน
- ดั้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนครั้งที่ 1
- ดั้มในไตรโคลโรเอททีลีน (trichloroethylene) เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 5 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนครั้งที่ 2

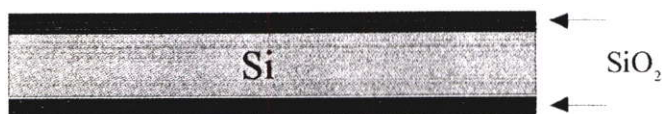
3. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้น จะทำการเคลือบชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) บนผิวแผ่นซิลิกอน สำหรับใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal Oxidation) โดยการทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิกอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้ง หรือไอน้ำ ในบรรยากาศ ซึ่งมีอุณหภูมิสูง โดยมีสมการทางเคมีแสดงได้ดังนี้



สำหรับกลไกการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ เกิดจากก๊าซออกซิเจนแพร่ผ่านชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ เข้าไปจนถึงผิวหน้าสัมผัสระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยาเคมี การสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้ ทำได้ 2 ลักษณะ คือ 1) การออกซิเดชันแบบแห้ง (dry oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นใดเจือปน ที่อุณหภูมิสูง 900 ถึง 1100 องศาเซลเซียส จะทำให้อะตอมของซิลิกอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ และ 2) การออกซิเดชันแบบชื้น (wet Oxidation) เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิกอน

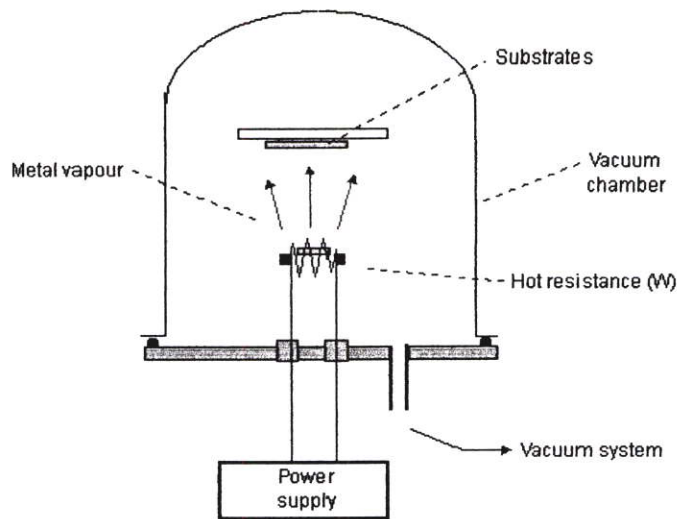
กับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี้แสดงดังในสมการ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ สำหรับการออกซิเดชันแบบชั้นทำให้เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้งทั้งนี้ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับ ไอน้ำได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันแบบชั้นนี้ จะมีความหนาแน่น น้อยกว่าแบบซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาแบบแห้ง ทำให้คุณสมบัติของการเป็นชั้นฉนวน ที่สร้างด้วยแบบแห้งดีกว่าแบบชั้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้เราได้ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ โดยวิธี Dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นใช้วิธี Wet oxidation ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ในเวลา 1.5 ชั่วโมง และใช้ Dry oxidation เป็นครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 0.5 ชั่วโมง ได้ออกไซด์ เคลือบอยู่บนแผ่นซิลิคอน ได้ความหนาซิลิคอนไดออกไซด์ ประมาณ 5000 อังสตรอม แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านการเคลือบซิลิคอนไดออกไซด์จะเกิดชั้น SiO_2 ทั้งสองด้านของ ฐานรองซิลิคอน

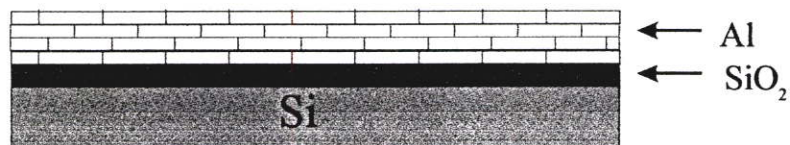
4. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

นำแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นฉนวน มาทำการเคลือบชั้นโลหะอลูมิเนียมเพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้า ด้วย กระบวนการเมทัลไลเซชัน (metallization process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการสร้างชั้นของ โลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับขั้วไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการระเหยในสุญญากาศ (evaporation) โดยการเปลี่ยนอะลูมิเนียมให้กลายเป็นไอภายใต้ความดันต่ำ โดยระบบต้องการความ ดันประมาณ 10^{-6} Torr เป็นการทำให้ออกซิเจนและความชื้นเหลือน้อยที่สุด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะเป็น ผลให้อะลูมิเนียมมีความต้านทานสูง แบบจำลองเครื่องระเหยในสุญญากาศ แสดงได้ดังรูป 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องระเหยในสุญญากาศ (evaporation)[37]

จากรูปที่ 3.4 อะลูมิเนียมจะระเหยแพร่ไปเคลือบบนแผ่นสลิค ทำให้มีชั้นอะลูมิเนียมบางๆ เคลือบบนแผ่นสลิค การควบคุมความหนาของโลหะนั้นจะมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมโดยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าทำให้อัตราการเคลือบแผ่น (deposition rate) สูงขึ้นตามไปด้วยแต่ว่าสิ่งสำคัญของระบบนี้คือการยากในการควบคุมความหนาของฟิล์ม คั้งนั้นความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมในงานวิจัยนี้จึงมีความหนา 0.5 ไมครอน



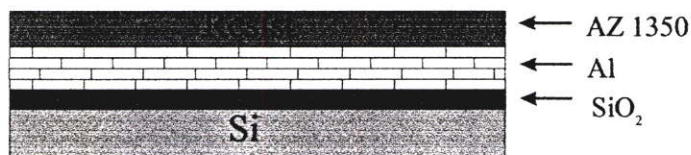
รูปที่ 3.5 ฟิล์มอะลูมิเนียมเคลือบบนแผ่นซิลิคอนไดออกไซด์

5. การสร้างลวดลายขั้วอะลูมิเนียมโดยวิธีการโฟโตลิโธกราฟี

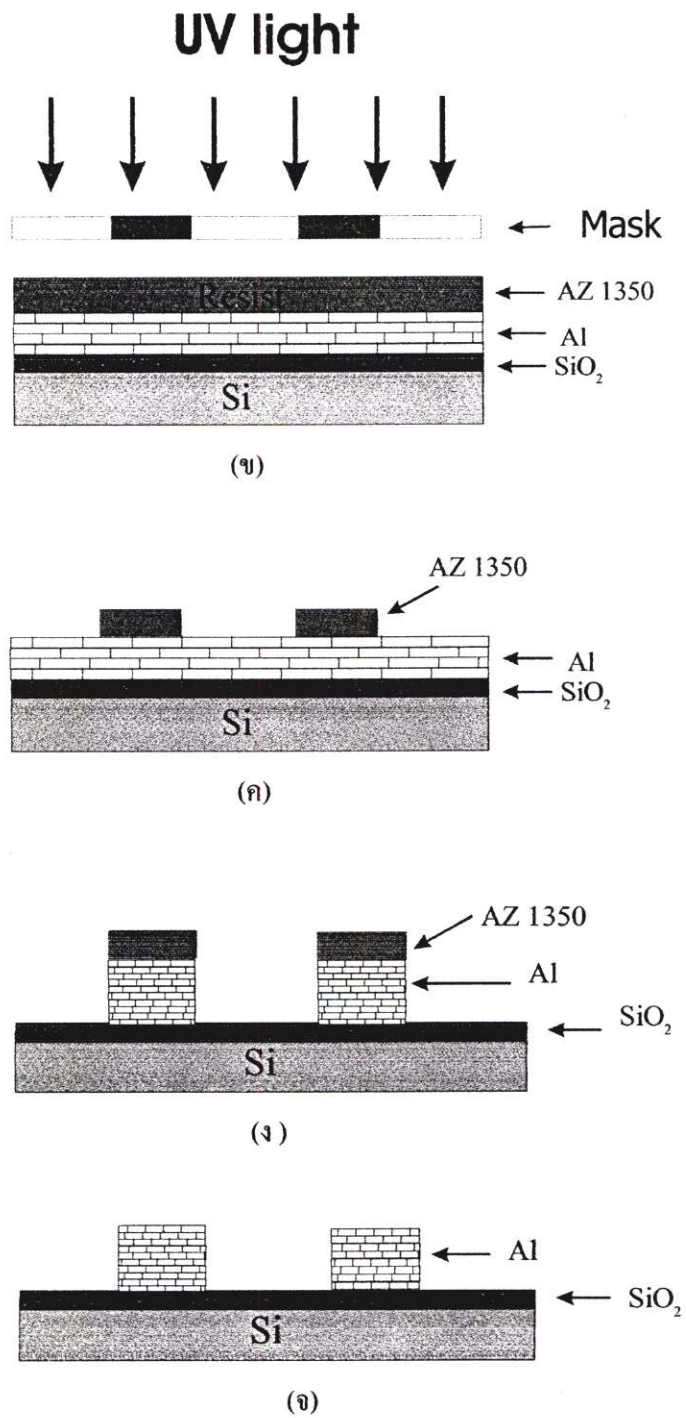
หลังจากเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมบนแผ่นซิลิคอนเรียบรื้อแล้ว จากนั้นจึงนำแผ่นดังกล่าวไปทำการสร้างลวดลายอะลูมิเนียมที่ออกแบบไว้(รูปที่ 3.2(ก)) ด้วยเทคนิคโฟโตลิโธกราฟีเพื่อการสกัดหรือ เอตซิ่ง (etching) ชั้นอะลูมิเนียมบางส่วนที่เคลือบอยู่บนผิวสลิคซิลิคอนไดออกไซด์ออกเพื่อให้ได้ลวดลายของอะลูมิเนียมตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยขั้นตอนของเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี จะประกอบด้วย 1) การเตรียมผิวหน้า 2) การเคลือบน้ำยาไวแสง 3) การอบชั้น soft bake 4) การปรับ

ชั้นมาสก์ 5) การฉายแสง 6) การล้างน้ำยาไวแสง 7) การอบชั้น hard bake 8) การเอตซิงค์ และ 10) การลอกน้ำยาไวแสงและ 11) ตรวจสอบลวดลายหลังจากลอกน้ำยาไวแสง

ในงานวิจัยนี้เราได้ทำการสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียม โดยการทำความสะดวกผิวหน้าของชั้นอลูมิเนียมโดยการล้างในอะซีโตนเป็นเวลา 5 นาที และล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ DI เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นจึงนำไปอบเพื่อกำจัดความชื้น ที่อุณหภูมิ ราว 200-250 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที โดยการอบนี้จะ เรียกว่า Pre bake หรือ dehydration bake เมื่ออบเสร็จจึงทำการเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวค AZ 1350 ด้วยวิธีแบบสปินเนอร์ (spinner) โดยการนำแผ่นที่อบเสร็จแล้วไปวางลงบนแท่นหมุน และยึดติดบนแท่นหมุนด้วยระบบสูญญากาศ จากนั้นน้ำยาไวแสงหยดลงบริเวณตรงกลางของแผ่น 1-3 หยด จากนั้นจึงหมุนแผ่นด้วยความเร็วรอบราว 500 rpm/min เป็นเวลา 5 วินาที และ 5000 rpm/min เป็นเวลาประมาณ 30 วินาที โดยน้ำยาไวแสงจะถูกแรงเหวี่ยง ทำให้กระจายออกไปโดยรอบเกิดเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวของแผ่นชั้นอลูมิเนียม จากนั้นนำไปอบชั้น soft bake อุณหภูมิที่ใช้คือ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จึงนำไปทำการฉายแสง UV (exposure) (เนื่องจากเป็นมาสก์แรกจึงไม่ต้องการปรับชั้นมาสก์ (mask alignment)) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-แสงขึ้นที่ชั้นน้ำยาไวแสง โดยผ่านกระจกโฟโตนิกส์ ซึ่งถูกวางทาบทับ (contact) บนแผ่นชั้นอลูมิเนียม เป็นเวลา 20 วินาที จึงนำไปล้างน้ำยาไวแสงออกซึ่งน้ำยาไวแสงชนิดบวคนี้ ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไป เมื่อจุ่มลงในน้ำยาล้าง Developer AZ จากนั้นจึงนำไปตรวจสอบว่าได้ลวดลายตามต้องการหรือไม่ ด้วยเครื่องจุลทรรศน์ เมื่อได้ลวดลายที่ต้องการแล้วจึงนำไปทำการอบชั้น soft bake ที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที (post bake) หลังจากนั้น นำไปสกัดชั้นอลูมิเนียมออกด้วยสารละลาย $H_3PO_4:HNO_3:CH_3COOH:H_2O$ ในอัตราส่วน 80:5:5: 10 ตามลำดับ เพื่อให้ได้ลวดลายของอลูมิเนียมบนแผ่นซิลิคอนพร้อมสำหรับการนำไปเคลือบด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



(ก)



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (ข) การเคลือบน้ำยาไวแสง (ข) การฉายแสง (ค) การล้างน้ำยาไวแสง (ง) การเอตซิงค์ และ (จ) ลวดลายของออดิเนียมที่พร้อมใช้งาน

3.4 ขบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบต่อเนื่องจากอะลูมิเนียมออกไซด์ และฟลูออรีน ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

ฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่นำมาสร้างเป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับไอสาร VOCs ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการชีวิตแบบไพโรไลซิส เป็นวิธีที่ใช้อุปกรณ์ที่ไม่สลับซับซ้อน ใช้ค่าใช้จ่ายไม่สูง และสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนได้ที่ละมวกๆ ทำให้สามารถเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนได้ทั่วแผ่นฐานรองเซ็นเซอร์ ซึ่งรายละเอียดการเตรียมอุปกรณ์และวิธีการทดลอง อธิบายได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

3.4.1 อุปกรณ์และสารเคมี

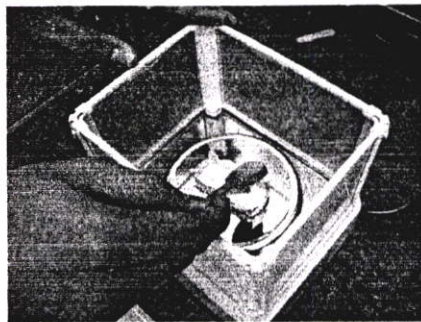
1. ท่อควอทซ์สำหรับเป็นภาชนะทำปฏิกิริยา (chamber)
2. ขวดแก้วสำหรับใส่สารละลาย
3. เอทิลแอลกอฮอล์ (ethy alcohol)
4. ฟลูออรีน (ferroence)
5. ถังเก็บก๊าซอาร์กอน (Ar)
6. แผ่นซิลิคอนขนาดประมาณ 0.7 X 0.8 เซนติเมตร
7. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง
8. เครื่องทำหมอก (atomizer)
9. เครื่องวัดอัตราการไหล (flow meter)
10. เทอร์โมคัปเปิล (thermo couple)
11. นาฬิกาจับเวลา

3.4.2 การเตรียมสารโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

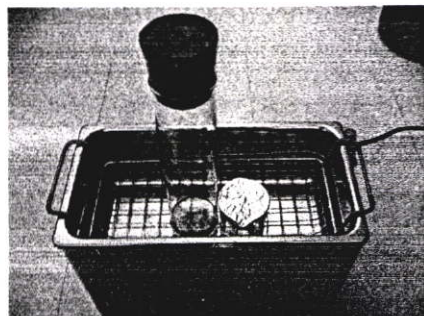
โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นต่อการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยในการทดลองนี้ ได้ใช้ฟลูออรีนเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโลหะตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะถูกนำไปผสมกับสารละลายแอลกอฮอล์ ขั้นตอนและวิธีการเตรียมสารโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้ โดย เริ่มต้นจากการคำนวณอัตราส่วนน้ำหนักของแอลกอฮอล์กับฟลูออรีนตามเงื่อนไขที่จะใช้ในการทดลอง(รูปที่ 3.7(ก)-(ข)) จากนั้นนำแอลกอฮอล์กับฟลูออรีนมาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ เมื่อทำการชั่งน้ำหนักจนได้อัตราส่วนแล้ว ก็นำมาผสมกัน และสุดท้ายจึงนำไปอัลตราโซนิกในรูปที่ 3.7(ค) ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ฟลูออรีนและแอลกอฮอล์ละลายเข้ากัน ดังแสดงในรูป 3.7(ง)



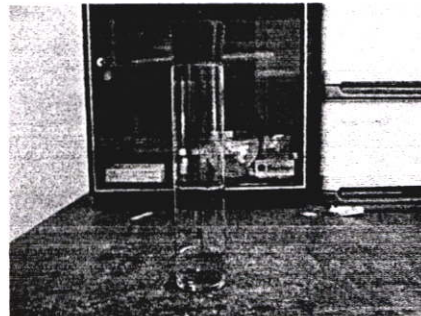
(ก)



(ข)



(ค)

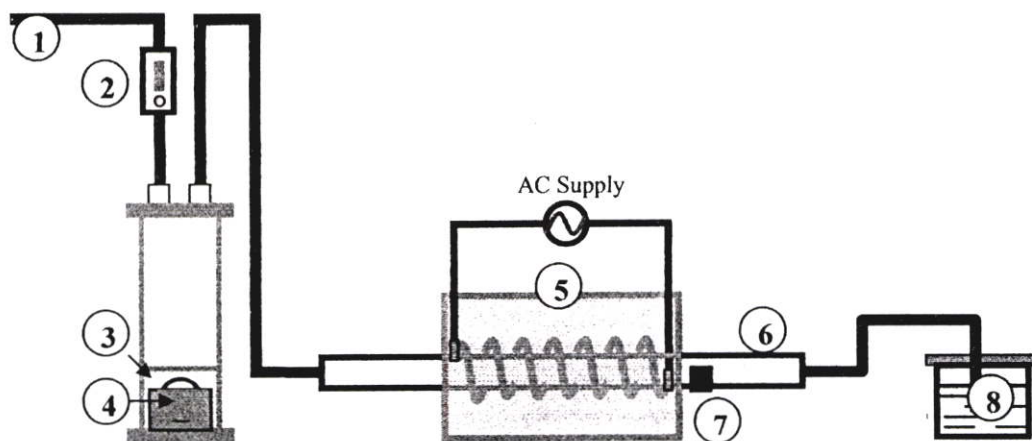


(ง)

รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) ขั้นตอนการนำ แอลกอฮอล์มาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ (ข) ขั้นตอนการนำผงฟลูโรเซนมา ชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ (ค) ขั้นตอนการนำผงฟลูโรเซนที่ผสมอยู่กับ แอลกอฮอล์มาอัตราไซนิก (ง) สารโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมทั้งหมด พร้อมที่จะนำไปสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

3.4.3 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน

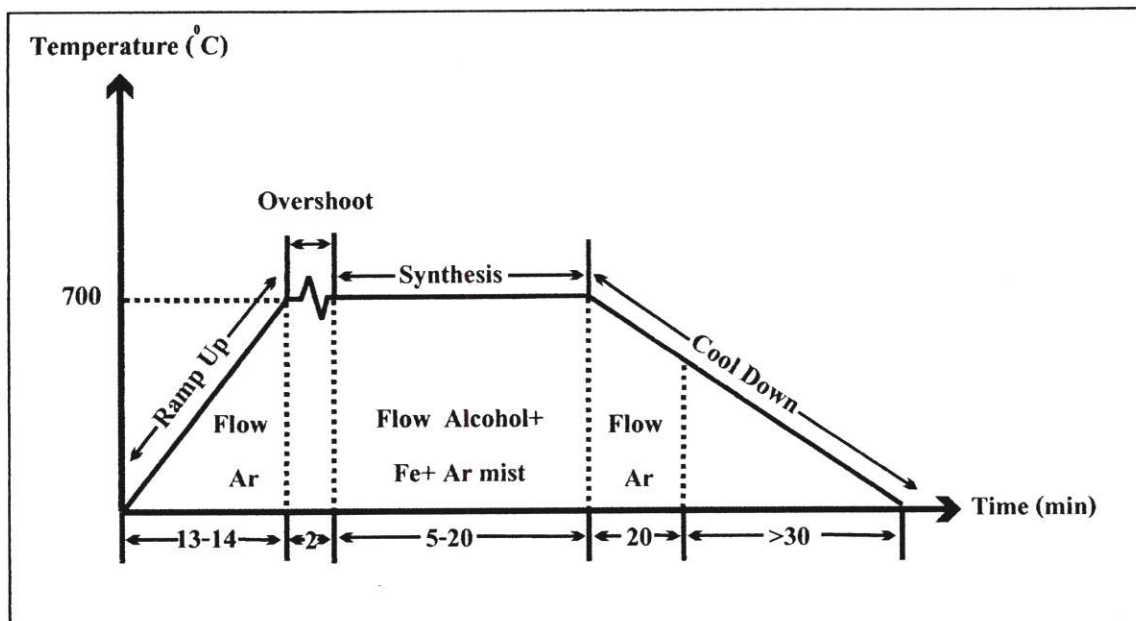
อุปกรณ์ตรวจจับ VOCs มีโครงสร้างประกอบด้วยขั้วโลหะไฟฟ้าอลูมิเนียมและท่อนาโนคาร์บอน โดยชั้นบนของขั้วไฟฟ้าจะมีชั้นฟิล์มของท่อนาโนคาร์บอนเคลือบอยู่ ซึ่งการเคลือบท่อนาโนคาร์บอนนี้จะถูกเคลือบบนขั้วโลหะไฟฟ้าได้โดยตรงในขณะที่ทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธีชีวิตแบบไฟโรไรซิส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ แสดงดังรูปที่ 3.8



- | | |
|---|---------------------------------|
| (1) ช่องทางเข้าของก๊าซนำพา | (2) Flow meter |
| (3) ฟลูโรเซนผสมกับแอลกอฮอล์ | (4) เครื่อง Atomizer (1-2 MHz) |
| (5) ฮีตเตอร์ | (6) ท่อควอตซ์หรือท่อทำปฏิกิริยา |
| (7) แผ่นฐานรอง Al/SiO ₂ หรือแผ่นเก็บตัวอย่าง | (8) น้ำ |

รูปที่ 3.8 โครงสร้างของระบบ CVD แบบไพโรไลซิส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

จากรูปที่ 3.8 เป็นภาพแสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ซึ่งประกอบไปด้วย 1) ก๊าซอาร์กอน (Ar) ใช้เป็นก๊าซนำพา 2) Flow meter (เครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ) ใช้ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 3) ฟลูโรเซนใช้เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะผสมในแอลกอฮอล์ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน 4) เครื่อง Atomizer (1-2 MHz) ใช้เป็นตัวทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมในแอลกอฮอล์กลายเป็นไอหมอก 5) ฮีตเตอร์ ใช้เป็นตัวให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา 6) ท่อควอตซ์หรือท่อทำปฏิกิริยา 7) แผ่นฐานรองเซินเซอร์ (Al/SiO₂) หรือแผ่นเก็บตัวอย่าง ใช้สำหรับรองรับท่อนาโนคาร์บอนในขณะที่สังเคราะห์ ซึ่งแผ่นฐานรองเซินเซอร์ที่มีท่อนาโนคาร์บอนเคลือบอยู่จะถูกนำไปตรวจสอบคุณลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่อไป และ 8) น้ำ ใช้ป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกไหลย้อนเข้ามาภายในระบบ อุณหภูมิฮีตเตอร์ในระหว่างการสร้างสามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการสังเคราะห์ท่อนานาโนคาร์บอน

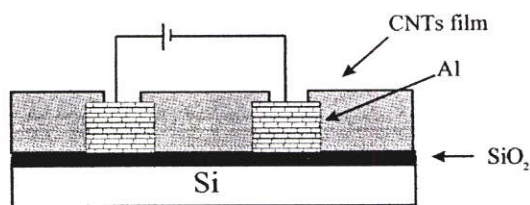
จากรูปที่ 3.9 เริ่มการสังเคราะห์โดยทำการปล่อยก๊าซอาร์กอนให้ไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลเข้าไปในกระบอกแก้วซึ่งภายในบรรจุฟลูโรเซนผสมกับแอลกอฮอล์ ที่อัตราการไหล 1 L/min เพื่อไล่อากาศออกจากระบบ โดยในระหว่างนี้จะเปิดฮีตเตอร์ให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิตามเงื่อนไขที่กำหนด 700 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15 นาที หลังจากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนในการสังเคราะห์ โดยเปิดเครื่อง Atomizer เพื่อให้ฟลูโรเซนที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์เป็นละอองหมอกลอยขึ้นไปตามท่อแก้วและไหลไปในท่อควอตซ์ อัตราไหล 1 L/min ซึ่งในขั้นตอนนี้ท่อนานาโนคาร์บอนจะถูกสังเคราะห์ขึ้น โดยขั้นตอนการสังเคราะห์นี้จะใช้เวลา 20 นาที จากนั้น เมื่อครบตามกำหนดเวลาจึงทำการปิดเครื่อง Atomizer และฮีตเตอร์ ปล่อยเฉพาะก๊าซอาร์กอน อัตราไหล 1 L/min 20 นาที ขณะเดียวกันก็ปล่อยให้ระบบเย็นลงเช่นกัน จากนั้น จึงนำแผ่นฐานรองเซ็นเซอร์ที่เคลือบท่อนานาโนคาร์บอนไปทดสอบสำหรับใช้สร้างเป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับไอสาร VOCs ในระบบที่เราสร้างขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ เราได้สร้างระบบที่ใช้สำหรับทดสอบก๊าซและไอสาร VOCs สำหรับเซ็นเซอร์ที่เราสร้างขึ้นซึ่งอธิบายระบบที่ใช้ทดสอบได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

3.5 การทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดไอสาร VOCs

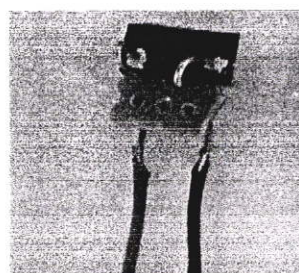
เซ็นเซอร์ตรวจวัดไอสาร VOCs ที่สร้างด้วยฟิล์มท่อนานาโนคาร์บอน จะถูกนำมาทดสอบกับไอสาร VOCs 2 ประเภท คือ ไอสาร VOCs ซึ่งอิมตัวที่บรรยากาศและอุณหภูมิห้อง และ VOCs ปริมาณความเข้มข้นในระดับ ppm ที่บรรยากาศและอุณหภูมิห้อง โดยการทดสอบแบบแรกเป็นการ

ทดสอบแบบง่าย เพื่อศึกษาว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถที่จะตอบสนองต่อสาร VOCs ได้หรือไม่ สำหรับระบบหลังใช้ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นที่สำคัญของเซ็นเซอร์ เช่น การจำแนกความเข้มข้นของไอสาร VOCs ต่างๆกัน ที่เซ็นเซอร์จะสามารถวัดได้และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานของเซ็นเซอร์ เป็นต้น สำหรับสาร VOCs ที่นำมาใช้ทดสอบในการวิจัยครั้งนี้ คือ เอทานอล เมทานอล และอะซีโตน

ในการนำเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน มาทดสอบนั้น ก่อนการทดสอบได้ทำการต่อขั้วไฟฟ้าโลหะอลูมิเนียม โดยใช้กาวเงินสำหรับเชื่อมต่อกับ เครื่องมือวัดและจ่ายแรงดันไฟฟ้า Keithley SourceMeter รุ่น 2400 แสดงดังรูปที่ 3.10



(ก)



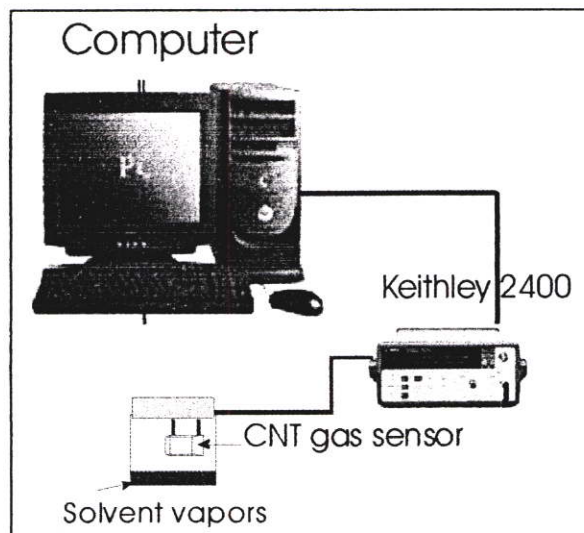
(ข)

รูปที่ 3.10 ภาพการต่อขั้วที่ใช้ในการวัดของอุปกรณ์ตรวจวัดสาร VOCs (ก) โครงสร้าง (ข) แผ่นฐานรองที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน

3.5.1 วิธีการทดสอบด้วยสาร VOCs อิ่มตัว

ชุดทดสอบการตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนต่อไอสาร VOCs อิ่มตัว แสดงได้ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ควบคุมการวัด การแสดงผล และการบันทึกข้อมูล เครื่องมือวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้าของบริษัท Keithley รุ่น 2400 ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับเซ็นเซอร์คงที่ 1 โวลต์ ขณะทำการวัด และวัดค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ไปแสดงผลในเครื่องคอมพิวเตอร์ และบิเกอร์ทำหน้าที่บรรจุมวลสาร VOCs ที่ใช้ทดสอบ ซึ่งสาร VOCs สามชนิดที่เรานำมาทดสอบ เมื่อมีการอิ่มตัวในอากาศและอุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) จะมีปริมาณความเข้มข้นไม่เท่ากัน โดยเอทานอลจะมีปริมาณความเข้มข้น ~ 9%, เมทานอล ~19% และอะซีโตน ~30% (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาพผนวก ง [28]) จะเห็นว่าชุดทดลองนี้ไม่สามารถควบคุมปริมาณความเข้มข้นของสาร VOCs ได้ จึงไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้ทดสอบกับก๊าซเซ็นเซอร์ที่ต้องการทดสอบคุณสมบัติด้านอื่นๆเช่น การจำแนกความเข้มข้นของก๊าซ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม การทดสอบด้วยวิธีนี้ก็เหมาะสำหรับการทดสอบว่าเซ็นเซอร์ที่เรา

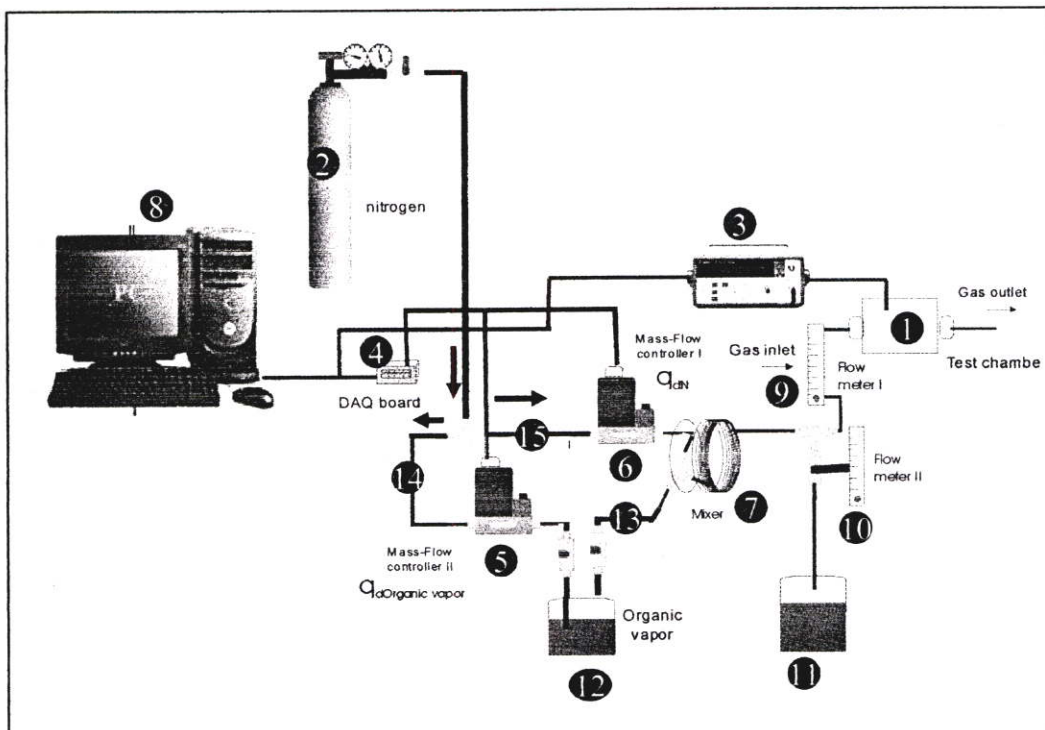
สร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อสาร VOCs ได้หรือไม่ เนื่องจากเป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายและใช้อุปกรณ์ไม่มากนัก



รูปที่ 3.11 ระบบการวัดการตอบสนองต่อไอสารอินทรีย์อิมิตัวที่บรรยากาศห้อง ของเซ็นเซอร์ตรวจจับไอสาร VOCs

3.5.2 วิธีการทดสอบด้วยไอสาร VOCs ที่มีปริมาณความเข้มข้นในระดับ ppm ต่างๆ

สาร VOCs ที่มีปริมาณความเข้มข้นในระดับ ppm คือ สาร VOCs ซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับสาร VOCs ที่อิมิตัว ซึ่งก๊าซเช่นเซอร์ที่ตี ต้องสามารถตรวจจับก๊าซที่มีความเข้มข้นในระดับ ppm หรือก๊าซที่มีความเข้มข้นที่น้อยมาก ๆ ได้ เนื่องจากก๊าซพิษบางชนิดถึงแม้ได้รับในปริมาณที่มีความเข้มข้นที่น้อยมาก ๆ ก็ก่อให้เกิดอันตรายถึงชีวิตได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสร้างชุดทดสอบการวัดที่สามารถปรับและควบคุมปริมาณความเข้มข้นของไอสาร VOCs ให้มีความเข้มข้นในระดับ ppm สำหรับทดสอบอุปกรณ์ที่เราสร้างขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



- | | |
|---|---|
| (1) ภาชนะ สเตนเลส ปิด(Chamber) | (9) Flow meter I |
| (2) ถังไนโตรเจน | (10) Flow meter II |
| (3) เครื่องมือวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้า | (11) ที่ดูดอากาศหรือปั๊ม |
| (4) Data acquisition Device | (12) ภาชนะบรรจุสารระเหยอินทรีย์ |
| (5) Mass flow controller II | (13) วาล์ว |
| (6) Mass flow controller I | (14) ท่อผ่านไนโตรเจนผ่านไปยังภาชนะ VOCs |
| (7) ท่อخذเป็นวงกลม | (15) ท่อผ่าน ไตรเจน |
| (8) เครื่องคอมพิวเตอร์ | |

รูปที่ 3.12 ระบบการวัดการตอบสนองต่อไอสาร VOCs ความเข้มข้นระดับ ppm ของเซ็นเซอร์ตรวจจับไอสาร VOCs

จากรูปที่ 3.12 เป็นภาพแสดงโครงสร้างของชุดทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับสาร VOCs ซึ่งประกอบด้วย 1) ภาชนะสเตนเลส ปิด(chamber) ทำหน้าที่เป็นภาชนะที่ใช้บรรจุเซ็นเซอร์ ซึ่งมีปริมาตร 299 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยภาชนะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าสำหรับต่อเชื่อมเซ็นเซอร์กับเครื่องมือวัด 2) ถังไนโตรเจนทำหน้าที่เป็นก๊าซพาไอสารอินทรีย์และเจือจางไอสารอินทรีย์เพื่อให้ได้ความเข้มข้นไอสารอินทรีย์ที่ต้องการ 3) เครื่องมือวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้าของบริษัท

Keithley รุ่น 2400 4) Data acquisition Device (NI-USB 6008) ซึ่งเป็นบอร์ดที่ใช้เชื่อมสัญญาณ
 ความคุม 5)-6) Mass-Flow controller I และ II กับเครื่องคอมพิวเตอร์ สำหรับเครื่องควบคุมอัตราการ
 ไหลของก๊าซ (mass flow controller I และ II)ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซในโตรเจน โดยมีการ
 ควบคุมอัตราการไหลมากที่สุดคือ 5000 sccm และ 200 sccm (standard cubic centimeter per
 minute: ลูกบาศก์เซนติเมตรมาตรฐาน) 7) ท่อขดเป็นวงกลม ทำหน้าที่ ผสมก๊าซในโตรเจนกับไอ
 สารอินทรีย์ระเหย 8) คอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ติดต่อเครื่องมือวัด Keithley รุ่น 2400 และ DAQ Board
 ด้วยโปรแกรม LabView Version 7.1 ในเพื่อบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัว
 เซ็นเซอร์เมื่อทดสอบด้วยไอสารอินทรีย์ 9)-10) เครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ(Flow meter I-
 II)ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของไอของสารอินทรีย์เข้าไปในภาชนะที่ใช้บรรจุเซ็นเซอร์ โดยมี
 อัตราการไหลสูงสุด 1 ลิตรต่อนาที 11) ที่คู่อากาศหรือปั๊ม ใช้สำหรับดูดก๊าซในโตรเจนและสาร
 VOCs ให้ออกจากระบบเร็วขึ้น 12) ภาชนะบรรจุสารระเหยอินทรีย์ 13) วาล์วควบคุมไม่ให้สาร
 VOCs แพร่หรือระเหยเข้าไปในบรรยากาศของไนโตรเจนเมื่อต้องการ Flow เฉพาะก๊าซในโตรเจน
 14) ท่อผ่านไนโตรเจนผ่านไปยังภาชนะบรรจุสารระเหยอินทรีย์ ใช้สำหรับพาไอของสารประกอบ
 อินทรีย์ระเหย เข้าไปในระบบที่วัด และ 15) ท่อผ่านไนโตรเจน สำหรับความเข้มข้นสาร VOCs ที่
 ใช้ในการทดสอบสามารถปรับค่าความเข้มข้น โดยการเจือจางสาร VOCs ด้วยไนโตรเจนใน
 อัตราส่วนที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การเจือจางไนโตรเจนในอะซีโตนเพื่อให้ได้ความเข้มข้น 40000
 ppm, 20000 ppm, 10000 ppm, 6000 ppm และ 4000 ppm แสดงได้ดังตารางที่ 3.1 โดยที่ q_{dN} คือ
 อัตราการไหลของก๊าซในโตรเจนที่ไม่ผ่านไอของสารอินทรีย์ และ $q_{dOrganicvapor}$ คือ อัตรา
 การไหลของก๊าซในโตรเจนที่ผ่านไอของสารอินทรีย์

ตาราง 3.1 สภาวะการปรับค่าความเข้มข้นไอสารอะซีโตน

(ภาพผนวก ก2.1)

Concentration (ppm)	อัตราการไหลของก๊าซผสม(sccm)	
	$q_{dOrganicvapor}$	q_{dN}
40000	200	1131.11
20000	200	2517.68
10000	100	1530.94
6000	100	2629.22
4000	100	4002.06

โดยค่าความเข้มข้นของอะซีโตนและอัตราส่วนในการเจือจางในตารางที่ 3.1 คำนวณได้จากสมการที่ 10 และ 11 ในภาพผนวก ก.

$$C_{ppm} = \frac{24.5 \times 10^6 W_t}{(q_D + q_V)M} \text{ และ } q_V = \frac{24.5W}{M} t$$

$$\text{โดยที่ } q_D = q_{dN} + q_{dOrganicvapor}$$

q_D คือ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้เจือจางไอระเหยอินทรีย์ (ลิตรต่อนาที)

q_V คือ อัตราการไหลของไอระเหยอินทรีย์ (ลิตรต่อนาที)

W_t คือ มวลของไอสารอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอ (กรัมต่อนาที)

M คือ มวลโมเลกุลของสารอินทรีย์ (กรัมต่อนาที)

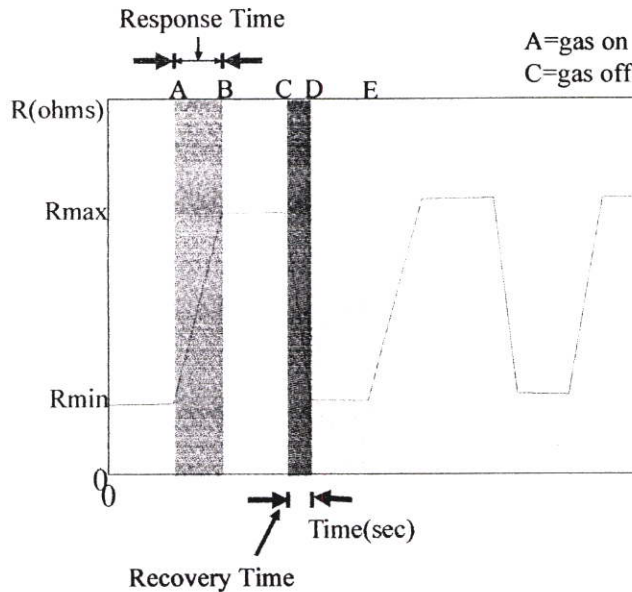
C_{ppm} คือ ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (พีพีเอ็ม)

ในการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นจะถูกจัดวางไว้ในแชมเบอร์ ซึ่งมีปริมาตร 290 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าขณะทดสอบอยู่ที่ 1 โวลต์ โดยใช้ เครื่องมือวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้าของบริษัท Keithley รุ่น 2400 เป็นเครื่องมือในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและวัดลักษณะค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และทำการเชื่อมต่อสัญญาณการวัดเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่ทำการบันทึกค่าโดยใช้โปรแกรม LabView version 7.1 โดยขณะการวัดลักษณะค่าความต้านทานไฟฟ้า จะปล่อยก๊าซไนโตรเจน เข้าสู่ระบบวัดเพื่อสร้างค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้น (based line resistance) ในอัตรา 800 sccm เป็นเวลา 100 วินาที ในขณะที่เดียวกันอีกด้านหนึ่งก็ทำการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผ่านเข้าไปในภาชนะที่บรรจุสารอะซีโตน โดยไนโตรเจนจะเป็นก๊าซที่พาไอของสารอะซีโตนเข้าไปในระบบเช่นเดียวกัน เพื่อผสมกับก๊าซไนโตรเจนและสามารถปรับค่าความเข้มข้นไอสารอะซีโตน โดยการปล่อยก๊าซเข้าสู่ระบบทดสอบในอัตราต่างๆกัน ตามตารางที่ 3.1 จะได้ไอสารอะซีโตนที่มีความเข้มข้น 40,000 ppm, 20,000 ppm, 10,000 ppm, 6,000 ppm และ 4,000 ppm ตามลำดับ

3.5.3 การอ่านค่าที่ได้จากการวัด

ในการวัดการตอบสนองสาร VOCs แต่ละครั้งจะทำการเซต Base Line ก่อน ในบรรยากาศอากาศทั่วไป (สำหรับการวัดในไอสารอิมัตว) หรือในก๊าซไนโตรเจน (สำหรับการวัดในไอสาร VOCs ที่มีปริมาณความเข้มข้นในระดับ ppm ต่างๆ) จนสามารถวัดค่าความต้านทานจากเซ็นเซอร์

ในบรรยากาศอากาศทั่วไปหรือในโตรเจน ได้ค่าความต้านทานคงที่ค่าหนึ่ง จากนั้นจึง ปล่อยสาร VOCs เพื่อทดสอบค่าในการตอบสนองต่อ VOCs ที่ต้องการตรวจวัด การพิจารณาการอ่านค่าในการตรวจวัดแสดงได้ดังในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การอ่านค่าของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซที่ได้จากการวัด[18]

จากรูปที่ 3.13 สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. ความเร็วในการตอบสนอง(response time) จะพิจารณาเมื่อมีการปล่อยสาร VOCs ที่ต้องการวัดเข้าไปในระบบ(จุด on gas) ซึ่งค่าความต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยจะเพิ่มขึ้นทันทีจากจุดเริ่มต้นปล่อยสาร VOCs จนถึงจุดอิ่มตัวคือเมื่อค่าความต้านทานคงที่ จากจุด A ไปจุด B ตามรูปที่ 3.13
2. เวลาในการคืนกลับสภาพเดิม(recovery time) จะพิจารณาเมื่อมีการปิดสาร VOCs ที่ต้องการวัด (จุด off gas) ซึ่งค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงโดยจะค่อยๆลดลงจนถึงจุด Rmin จากจุด C ไปจุด D จนค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับจุดเริ่มต้น คือที่จุด A เท่ากับ E ตามรูปที่ 3.13
3. ค่าเปอร์เซ็นต์ในการตอบสนองต่อไอสารอินทรีย์ (Response (%)) อ่านค่าได้จากการคำนวณจากสูตร

$$\text{Response (\%)} = ((R_{\text{max}} - R_{\text{min}}) / R_{\text{min}}) \times 100 \quad (3.3)$$

Rmax คือ ความต้านทานขณะทำการทดลองในไอของสารอินทรีย์

Rmin คือ ค่าความต้านทานอยู่ในอากาศที่บรรยากาศห้อง

4. ความเสถียร (stability)

คือ ผลในการวัดคงที่ไม่เสื่อมสภาพเร็วในการใช้งาน เพื่อให้เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซสามารถใช้วัดได้อย่างต่อเนื่อง

5. พิสัยการวัด(dynamic rang)

คือ ช่วงกว้างของการวัดเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซบางตัวสามารถวัดก๊าซปริมาณตั้งแต่ 100-1000 ppm แต่บางตัวใช้วัดในช่วง 10-50 ppm

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้ จะเป็นการกล่าวถึงผลของการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดสาร VOCs ซึ่งสร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน โดยทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่สร้างโดยมีและไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน ศึกษาผลของตำแหน่งและเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนต่อการตอบสนองต่อสาร VOCs ของอุปกรณ์ตรวจวัด และทดสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจจับไอสารอินทรีย์ที่สร้างขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์ที่สร้างโดยมีและไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน

ในการทดลองได้ทำการสร้างเซ็นเซอร์ที่มีและไม่มีชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน โดยเงื่อนไขที่สำคัญในการสร้าง คือ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจำเป็นต่อการเกิดท่อนาโนคาร์บอน ในการทดลองได้ใช้เหล็กซึ่งเป็นส่วนประกอบในฟลูโรเซน ($\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$) เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาและสารละลายแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เป็นแหล่งกำเนิดอะตอมคาร์บอน จากนั้น จึงทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของเซ็นเซอร์ทั้งสองในบรรยากาศไอสาร VOCs อิ่มตัว 3 ชนิด คือ เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เมทานอล (CH_3OH) และอะซีโตน (CH_3COCH_3) ขั้นตอนการทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองต่อไอสาร VOCs ของเซ็นเซอร์ที่มีและไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน

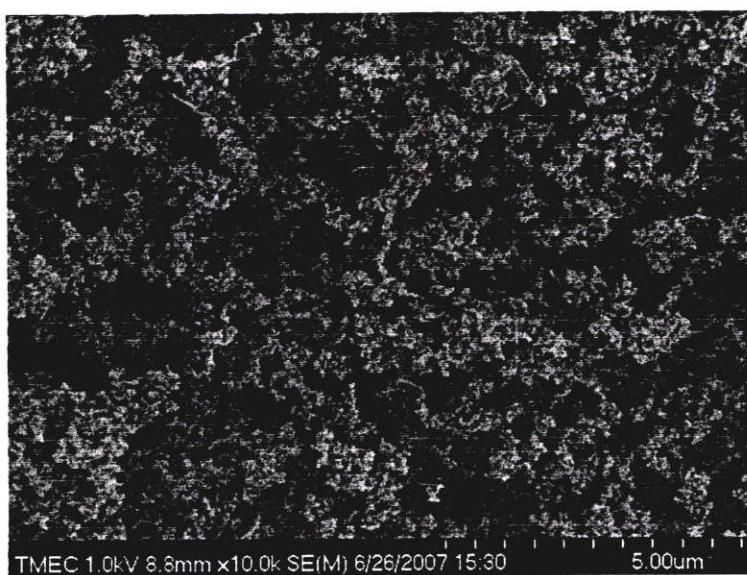
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM

การสร้างเซินเซอร์ที่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน สร้างได้โดยการวางแผ่นฐานรองเซินเซอร์ (Al/SiO_2) ไว้ที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร ของท่อทำปฏิกิริยา(รูปที่ 4.7) จากนั้น จึงเริ่มทำการสังเคราะห์ ท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้สารละลายแอลกอฮอล์ผสมกับฟลูโรเซน ละลายอยู่ในอัตราส่วน 1 % ของ น้ำหนักแอลกอฮอล์ ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 20 นาที ในรูปที่ 4.2(ก) แสดง แผ่นฐานรองเซินเซอร์ หลังจากสังเคราะห์เสร็จเรียบร้อยแล้ว พบว่า บนแผ่นฐานรองมีฟิล์มสีดำเคลือบอยู่ทั่วทั้งแผ่น จึงนำ แผ่นฐานรองไปตรวจสอบด้วยภาพถ่าย SEM ซึ่งแสดงได้ดังในรูปที่ 4.2(ข) พบว่า ฟิล์มสีดำดังกล่าว เป็นท่อนาโนคาร์บอนซึ่งมีการเรียงตัวอย่างอิสระทั่วแผ่นฐานรอง นอกจากนี้ ยังสังเกตเห็นว่ารอบๆ ของทิวป์จะมีอนุภาคเล็กๆรูปทรงกลมเกาะอยู่รอบๆทิวป์ โดยอนุภาคที่วานี้คาดว่าน่าจะเป็น สารประกอบของเหล็กจำพวก เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และแมกนีไทต์ (magnetite: Fe_3O_4) ซึ่งซึ่ง อนุภาคเหล่านี้ถือว่าเป็นสิ่งเจือปนที่เกิดในระหว่างการสังเคราะห์ [9]

สำหรับการสร้างเซินเซอร์ที่ไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน จะวางแผ่นฐานรองเซินเซอร์ ไว้ที่ตำแหน่งที่ 10 เซนติเมตร เช่นเดียวกัน จากนั้น จึงเริ่มสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยใช้ เฉพาะสารละลายแอลกอฮอล์ เป็นเวลา 20 นาที ในรูปที่ 4.3(ก) แสดงแผ่นฐานรองเซินเซอร์ หลังจากสังเคราะห์เสร็จเรียบร้อยแล้ว พบว่า มีฟิล์มสีดำเคลือบอยู่บางส่วนบนแผ่นฐานรอง จึง นำไปตรวจสอบด้วยภาพถ่าย SEM พบว่า บริเวณที่เป็นสีดำนั้นเป็นท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งใน ขั้นตอนการสร้างแม้ว่าจะไม่ได้ใส่ฟลูโรเซนในสารละลายแอลกอฮอล์ แต่ก็พบว่ามีเกิดของท่อ นาโนคาร์บอนบนแผ่นฐานรองเซินเซอร์อยู่บ้างและมักอยู่เป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ข) แต่ลักษณะดังกล่าวมีอยู่น้อยมากและมีขนาดของทิวป์ที่ใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทิวป์ที่ สังเคราะห์จากฟลูโรเซนผสมกับสารละลายแอลกอฮอล์ (รูปที่ 4.2(ข)) ทั้งนี้เนื่องจาก อาจเกิดจาก ก่อนหน้าการทดลองมีอนุภาคของเหล็กที่ค้างอยู่ในระบบจำนวนมาก จึงยากแก่การทำทำความสะอาด ได้หมดจึงมีอนุภาคของเหล็กค้างอยู่จำนวนหนึ่งแต่น้อยมาก ดังนั้นในการสังเคราะห์จึงมีทิวป์ เกิดขึ้น



(ก)

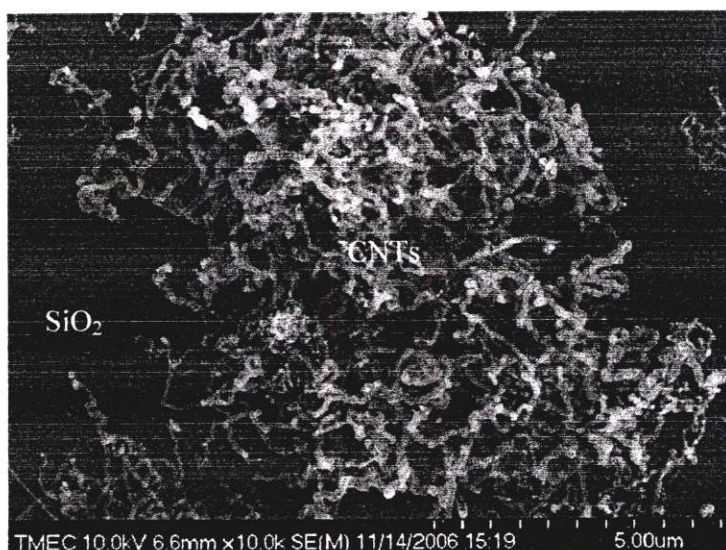


(ข)

รูปที่ 4.2 เซ็นเซอร์ที่สร้างโดยมีท่อนาโนคาร์บอน (ก) फिल्मสีดำที่เคลือบบนเซ็นเซอร์หลังจาก
สังเคราะห์ (ข) ภาพถ่าย SEM แสดง ท่อนาโนคาร์บอนบนเซ็นเซอร์ ซึ่งสังเคราะห์
โดยใช้ผงฟลูโรเซนกับสารละลายแอลกอฮอล์



(ก)



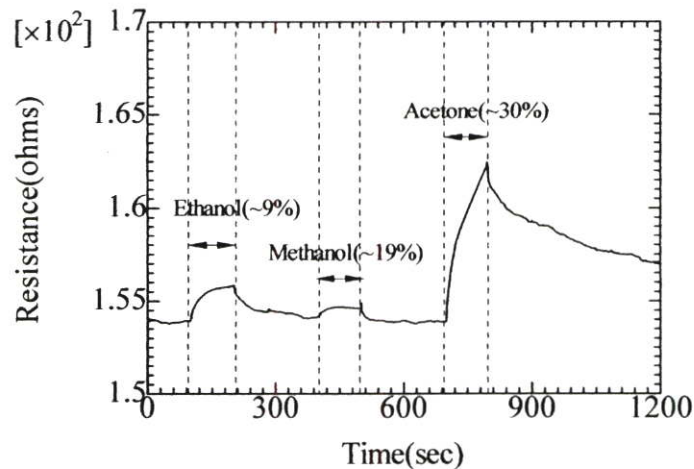
(ข)

รูปที่ 4.3 เซ็นเซอร์ที่สร้างโดยไม่มีท่อนาโนคาร์บอน (ก) มีฟิล์มสีดำกระจายอยู่บางส่วนบน เซ็นเซอร์หลังจากสังเคราะห์ (ข) ภาพถ่าย SEM แสดง ท่อนาโนคาร์บอนบนเซ็นเซอร์ ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้เฉพาะสารละลายแอลกอฮอล์

4.1.2 ผลการตอบสนองต่อสาร VOCs

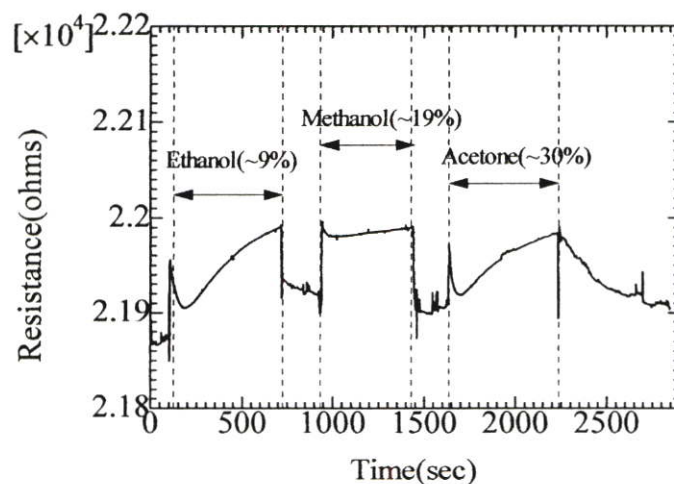
เซ็นเซอร์ที่สร้างโดยมีและไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน ถูกนำไปวัดในไอสาร VOCs อิ่มตัว (ระบบการวัดสามารถดูได้ในหัวข้อ 3.5.1) คือ เอทานอล เมทานอล และอะซิโตน ซึ่งเมื่ออิ่มตัวที่ บรรยากาศและอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส จะมีความเข้มข้น ~9, ~19 และ ~30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ในการทดลองจะวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในอากาศต่างๆไป(อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 100 วินาที จากนั้นจึงนำไปวัดใน ไอสารเอทานอล เป็นเวลา 100 วินาที หลังจากนั้นจึงวัดความต้านทานของเซ็นเซอร์ในอากาศต่างๆไป เป็นเวลา 200 วินาที เพื่อให้ไอสารที่ทดสอบระเหยออกจากตัวเซ็นเซอร์ เมื่อความต้านทานคืนกลับมายังค่าความต้านทานที่ตอนเริ่มต้น จึงวัดซ้ำแบบเดิม โดยเปลี่ยนจากเอทานอลเป็นเมทานอลและอะซีโตน ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ของเซ็นเซอร์ที่มีและไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ลักษณะค่าความต้านทานไฟฟ้าในการตอบสนองต่อไอสาร VOCs อิมตัว 3 ชนิด คือ

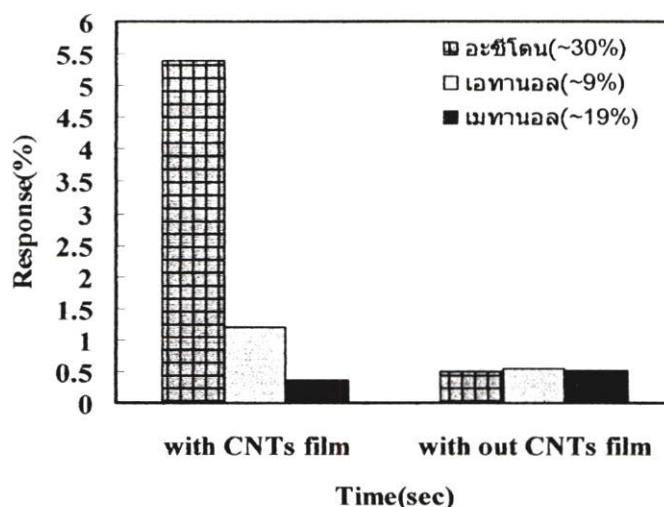
- 1) เอทานอล 2) เมทานอล และ 3) อะซีโตน ของเซ็นเซอร์ที่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน



รูปที่ 4.5 ลักษณะค่าความต้านทานไฟฟ้าในการตอบสนองต่อไอสาร VOCs อิมตัว 3 ชนิด คือ

- 1) เอทานอล 2) เมทานอล และ 3) อะซีโตน ของเซ็นเซอร์ที่ไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 สามารถนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อสาร VOCs ทั้ง 3 ชนิด ได้จากสมการที่ (3.3) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



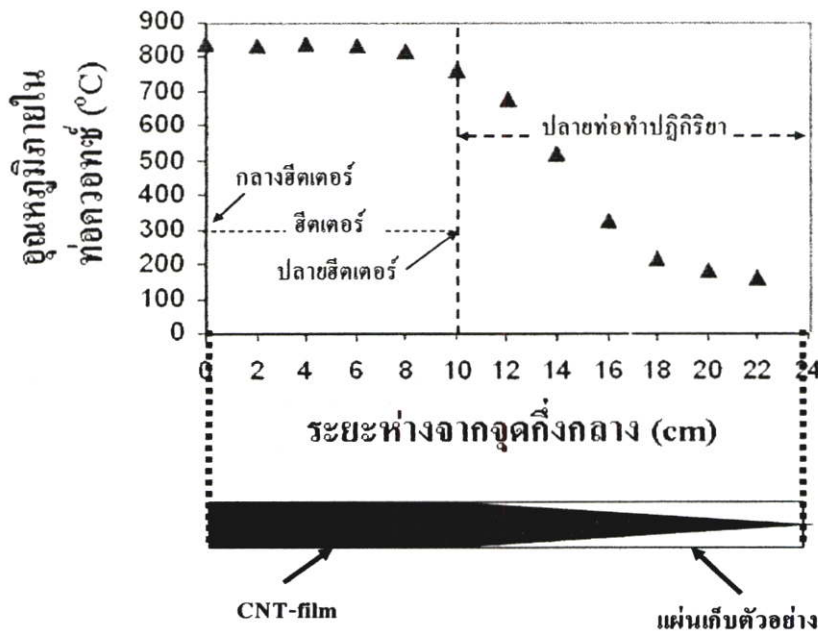
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อไอสาร VOCs อิ่มตัว ของเซ็นเซอร์ที่สร้างโดยมีและไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน (ได้จากการคำนวณในรูปที่ 4.4-4.5)

จากรูปที่ 4.5 - 4.6 พบว่า เซ็นเซอร์ที่สร้าง โดยมีและไม่มีชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน สามารถตอบสนองต่อไอสาร VOCs อิ่มตัวได้ทั้ง 3 ชนิด แต่เมื่อเปรียบเทียบเซ็นเซอร์ที่สร้างโดยไม่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อไอสาร VOCs ทั้ง 3 มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก(รูปที่ 4.6) เมื่อเทียบกับเซ็นเซอร์ที่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน จะมีค่าการตอบสนองต่อสารทั้ง 3 แยกกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงว่าผลการตอบสนองของเซ็นเซอร์ดังกล่าว เกิดจากการตรวจจับของฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน ดังนั้น ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จากการทดลองนี้ สามารถนำไปสร้างเป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดสาร VOCs ได้ จึงได้ทำการศึกษาถึงเงื่อนไขที่ใช้ในการสร้างเซ็นเซอร์ด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสาร VOCs ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.2 การศึกษาดำเนินและเวลาที่ใช้เคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนสำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสาร VOCs

ในงานวิจัยนี้ ท่อนาโนคาร์บอนที่นำมาสร้างเป็นก๊าซเซ็นเซอร์นี้ จะถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการซีวีดีแบบไพโรไลซิส ซึ่งการสังเคราะห์ทีวปีด้วยวิธีนี้ จำนวนทีวปีที่เคลือบบนแผ่นฐานรองเซ็นเซอร์ (Al/SiO_2) หรือ แผ่นเก็บตัวอย่างในแต่ละตำแหน่งจะมีจำนวนทีวปีไม่เท่ากัน บริเวณกึ่งกลางท่อจะมีจำนวนทีวปีมากกว่าบริเวณปลายท่อ นอกจากนี้ อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งที่ฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน

เคลือบบนแผ่นฐานรองเซินเซอร์ ในแต่ละตำแหน่งจะมีอุณหภูมิแตกต่างกันซึ่งแสดงได้ดังในรูปที่ 4.7 ดังนั้น จึงได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน ต่อเซินเซอร์ในการตอบสนองต่อไอสาร VOCs และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซินเซอร์



รูปที่ 4.7 กราฟการกระจายตัวของอุณหภูมิ(100-700°C) ตามตำแหน่งต่างๆภายในท่อทำปฏิกิริยาของระบบชีวิต แบบไพโรไรซิส และภาพจำลองลักษณะของฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบบนแผ่นฐานเก็บตัวอย่าง ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม โดยบริเวณปลายรูปสามเหลี่ยมจะมีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน เคลือบอยู่เบาบางมากเมื่อเทียบกับฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนบริเวณที่มีเส้นลวดความร้อน

จากรูปที่ 4.7 แสดง การกระจายตัวของอุณหภูมิและจำนวนท่อนาโนคาร์บอนตามตำแหน่งต่างๆภายในท่อทำปฏิกิริยา การวัดอุณหภูมิจะวัดจากตำแหน่งกึ่งกลาง(0 เซนติเมตร) ของท่อไปยังปลายท่อที่มีระยะ 24 เซนติเมตร โดยที่ระยะ 0 - 10 เซนติเมตร จะมีอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และระยะ 10-24 เซนติเมตร จะมีอุณหภูมิตั้งแต่ 700-100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับจำนวนท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบบนแผ่นฐานรอง Al/SiO_2 ที่วางไว้บริเวณต่างๆภายในท่อ พบว่า แผ่นฐานรองที่วางไว้บริเวณ 0-10 เซนติเมตร จะมีฟิล์มเคลือบอยู่เต็มแผ่นฐานรองมากกว่าแผ่นฐานรองที่นำไปวางไว้ที่ตำแหน่งที่ 10-24 เซนติเมตร ซึ่งจากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า บริเวณ 10-24 เซนติเมตร ลักษณะการเคลือบของฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่นฐานรองจะมีรูปทรงปลายแหลมซึ่งอาจเกิด

จากแนวการไหลของก๊าซอาร์กอนที่บริเวณตอนปลายไม่สม่ำเสมอ ซึ่งตรงปลายนี้จะมีจำนวนท่อนาโนคาร์บอนน้อยมาก

สำหรับการนำแผ่นฐานรองเซินเซอร์ไปวางตามตำแหน่งภายในท่อนั้น ควรวางไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสม เนื่องจากท่อทำปฏิกิริยานี้มีอุณหภูมิตั้งแต่ 100-700 องศาเซลเซียส บริเวณตรงกลางของท่อจะถูกพันด้วยเส้นลวดความร้อนหรือฮีตเตอร์ มีอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ดังนั้น จึงไม่ควรนำแผ่นฐานรองเซินเซอร์ไปวางไว้ที่บริเวณดังกล่าว เพราะจะทำให้อะลูมิเนียมละลายได้หรือถ้าวางไว้ที่ตำแหน่งปลายท่อมากเกินไปจำนวนทิวปีที่เคลือบบนเซินเซอร์จะมีน้อยมากไม่สามารถนำไปสร้างเป็นเซินเซอร์ได้ เนื่องจากไม่สามารถวัดสัญญาณทางไฟฟ้าได้และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิและจำนวนทิวปีที่เกิดที่ตำแหน่งต่างๆภายในท่อ แสดงในรูปที่ 4.7 ดังนั้น เงื่อนไขของตำแหน่งที่จะวางแผ่นฐานรองเซินเซอร์ คือ 10, 13 และ 16 เซนติเมตร และเงื่อนไขของเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน คือ 5, 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.1

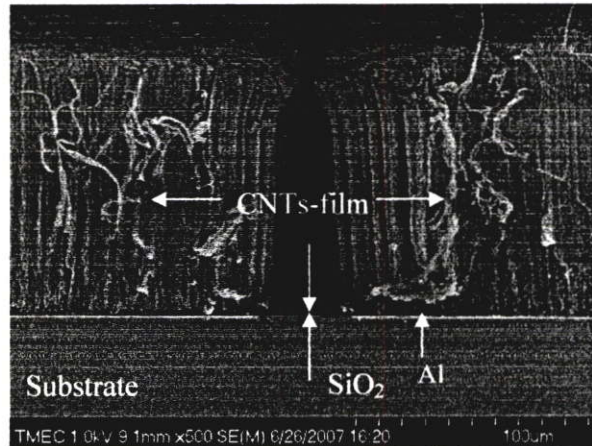
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขของตำแหน่งและเวลาในการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่นฐานรองเซินเซอร์(Al/SiO_2)

เงื่อนไข ชิ้นงานที่	ตำแหน่ง	เวลาในการเคลือบชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน			
		ก	ข	ค	ง
1	10 เซนติเมตร	5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที
2	13 เซนติเมตร	5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที
3	16 เซนติเมตร	5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที

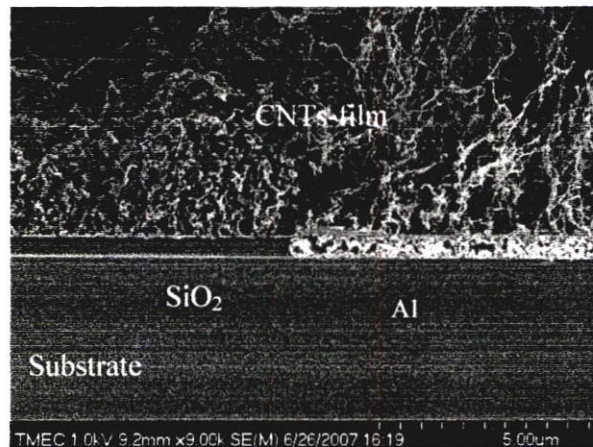
4.2.1 ผลของการตรวจสอบพื้นผิวฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนบนเซินเซอร์ ณ ตำแหน่งต่างกัน

ในการทดลองนี้ได้นำเซินเซอร์ที่เคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่ง 10, 13 และ 16 เซนติเมตร และเวลาในการเคลือบ 20 นาที ไปตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM เพื่อศึกษาลักษณะทางโครงสร้างจุลภาค ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนบนเซินเซอร์ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.8-4.9 โดยรูปที่ 4.8 เป็นลักษณะของฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบบนเซินเซอร์ที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร โดยรูปที่ 4.8 (ข) เป็นภาพถ่าย SEM แบบตัดขวาง จะเห็นว่าลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนเป็นท่อตั้งตรง ทิวปีที่เกิดบนอะลูมิเนียมจะเป็นทิวปีที่เรียงกันตั้งฉากบนผิวอะลูมิเนียม ซึ่งมีความสูงของทิวปี ~ 100 ไมครอน ส่วนทิวปีที่เกิดบนผิวซิลิคอนไดออกไซด์จะมีความสูงของทิวปี ~ 5 ไมครอน นอกจากนี้ ยังเห็นว่าทิวปีที่ผิวอะลูมิเนียมจะมีลักษณะตั้งตรงและรอบๆทิวปีสะอาดมากกว่าทิวปีที่อยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ซึ่งจะมีสิ่งสกปรกเกาะอยู่รอบๆทิวปีมากกว่า ส่วนทิวปีที่อยู่ผิวด้านบนของเซินเซอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.3(ข) ลักษณะของทิวปีจะพลาดกันไปมาอย่างอิสระและรอบๆทิวปีจะมีสิ่งสกปรกเคลือบอยู่คล้ายกันกับทิวปีที่เกิดบนผิวซิลิคอนไดออกไซด์

สำหรับในรูปที่ 4.9(ก)-(ข) เป็นลักษณะของฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบบนเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่ง 13 และ 16 เซนติเมตร ตามลำดับ จากภาพถ่าย SEM แสดงทิวปีที่อยู่บนเซ็นเซอร์ทั้งสอง พบว่า ทิวปีที่ด้านบนเซ็นเซอร์และทิวปีที่แสดงในภาพตัดขวางบนผิวอลูมิเนียมและผิวซิลิคอนไดออกไซด์ มีลักษณะเหมือนกัน คือ ทิวปีที่เกิดจะมีการเรียงตัวอย่างอิสระ โดยรอบๆทิวปีจะมีสิ่งสกปรกเกาะอยู่รอบๆคล้ายกันกับทิวปีที่เกิดบนผิวฟิล์มของชิ้นงานที่เคลือบที่ตำแหน่งที่ 10 เซนติเมตร



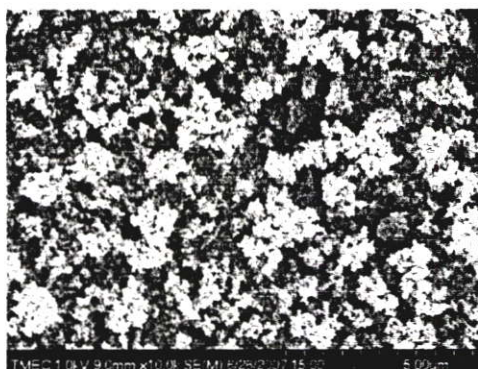
(ก)



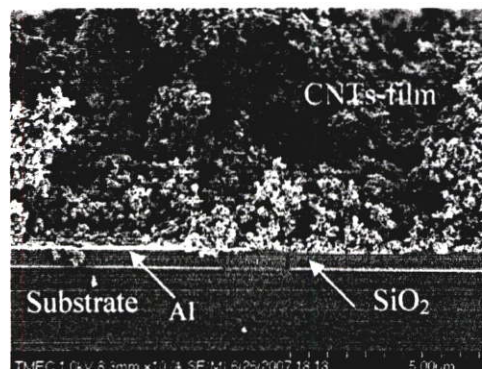
(ข)

รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM ของเซ็นเซอร์ที่เคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร

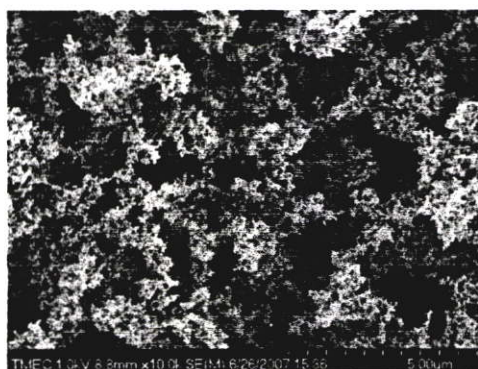
(ก) ทิวปีที่เกิดบนผิวอลูมิเนียมจะตั้งตรงและสูงกว่าทิวปีที่เกิดบนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ โดยมีความสูงของทิวปี ~ 100 ไมครอน และ ~ 5 ไมครอน ตามลำดับ (ข) ทิวปีที่เคลือบบนผิวอลูมิเนียมขนาดท่อจะเล็กและสะอาดกว่าทิวปีที่เกิดบนบนผิวซิลิคอนไดออกไซด์



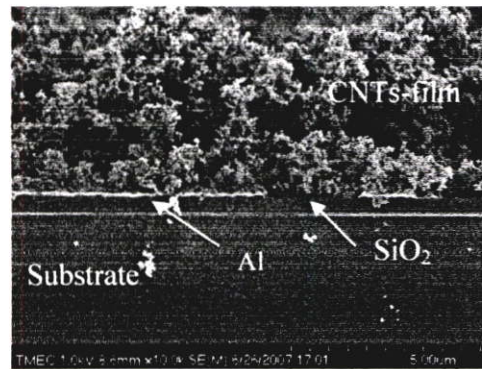
(ก-1)



(ก-2)



(ข-1)

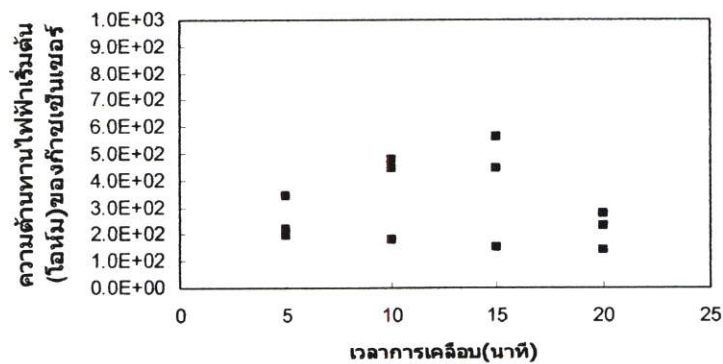


(ข-2)

รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ของเส้นเซอร์ (ก-1) และ (ข-1) ท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบอยู่ด้านบนสุดของเส้นเซอร์ ที่ตำแหน่ง 13 และ 16 เซนติเมตร ตามลำดับ (ก-2)และ (ข-2) ท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบบนผิวอลูมิเนียมและบนผิวซิลิกอนไดออกไซด์ ของเส้นเซอร์ที่ตำแหน่ง 13 และ 16 เซนติเมตร ตามลำดับ

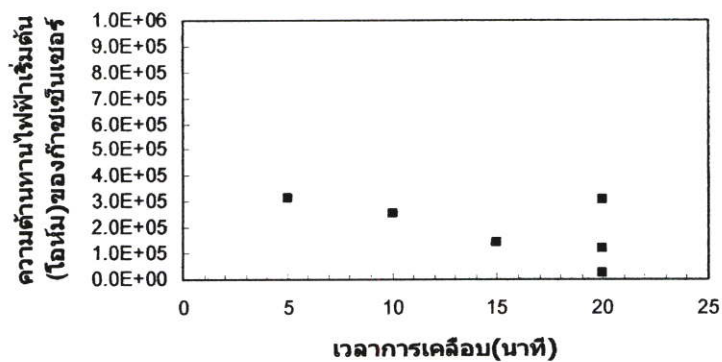
4.2.2 ผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของอุปกรณ์

ก.) ชั้นงานที่ 1-ก ถึง 1-ง



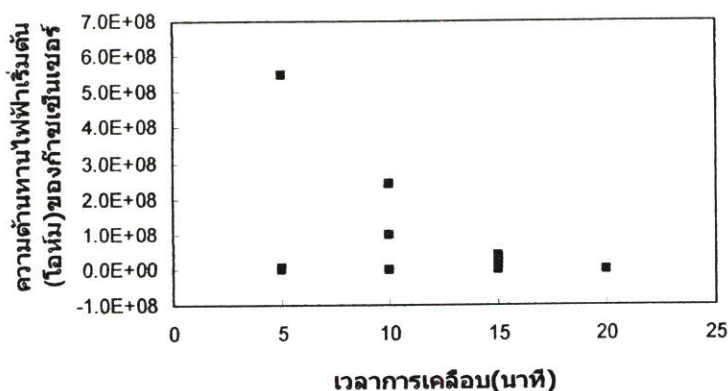
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนและความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของชั้นงานที่ 1-ก ถึง 1-ง โดยเป็นชั้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร

ข.) ชั้นงานที่ 2-ก ถึง 2-ง



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนและความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของชั้นงานที่ 2-ก ถึง 2-ง โดยเป็นชั้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 13 เซนติเมตร

ก.) ชิ้นงานที่ 3-ก ถึง 4-ง



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนและความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของชิ้นงานที่ 1-ก ถึง 1-ง โดยเป็นชิ้นงานที่สร้างตำแหน่ง 16 เซนติเมตร

รูปที่ 4.10-4.12 เป็นผลการเปรียบเทียบความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของแต่ละชิ้นงานที่เคลือบท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่ง 10, 13 และ 16 เซนติเมตร โดยแต่ละตำแหน่งจะใช้เวลาในการเคลือบฟิล์ม 5, 10, 15 และ 20 นาที ผลจากการเปรียบเทียบพบว่า ชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่งเดียวกัน แต่ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มต่างกัน ความต้านทานเริ่มต้นของเซ็นเซอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเคลือบฟิล์มเพิ่มมากขึ้น สำหรับชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร ความต้านทานเริ่มต้นของเซ็นเซอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์ม 5, 10 และ 15 นาที แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบฟิล์มเป็น 20 นาที ค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซ็นเซอร์มีแนวโน้มลดลงเหมือนกับเซ็นเซอร์ที่เคลือบฟิล์มที่ตำแหน่งที่ 13 และ 16 เซนติเมตร การที่เซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งที่ 10 เซนติเมตร ที่เคลือบฟิล์ม 5-15 นาที มีค่าความต้านทานเริ่มต้นเพิ่มขึ้นอาจเกิดจากลักษณะของฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน เนื่องจากเวลาการเคลือบฟิล์มจะมีผลทำให้ฟิล์มมีความบริสุทธิ์และจำนวนของทิวป์บนชิ้นงานต่างกัน โดยสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นพร้อมกับท่อนาโนคาร์บอนจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการสังเคราะห์ โดยไอผสมระหว่างแอลกอฮอล์กับผงฟลูโรเซนจะถูกพัดเข้าไปในท่อทำปฏิกิริยาก่อนที่จะเกิดทิวป์ ขณะนั้นอุณหภูมิของท่อทำปฏิกิริยายังไม่ถึงอุณหภูมิค่าซึ่งไม่เหมาะสมที่จะเกิดทิวป์ ดังนั้น ไอผสมเหล่านี้ จึงเกาะอยู่ตามผนังภายในท่อ (โดยเฉพาะบริเวณที่มีฮีตเตอร์(0 - 10 เซนติเมตร)) ซึ่งระหว่างรอให้อุณหภูมิของท่อมีอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ไอผสมที่เกาะตามผนังท่อจะถูกเผาไหม้เป็นสารประกอบจำพวกอะมอร์ฟัสคาร์บอน (amorphous carbon) และสารประกอบประเภทเหล็ก (Fe_2O_3 หรือ Fe_3O_4) ซึ่งสิ่ง

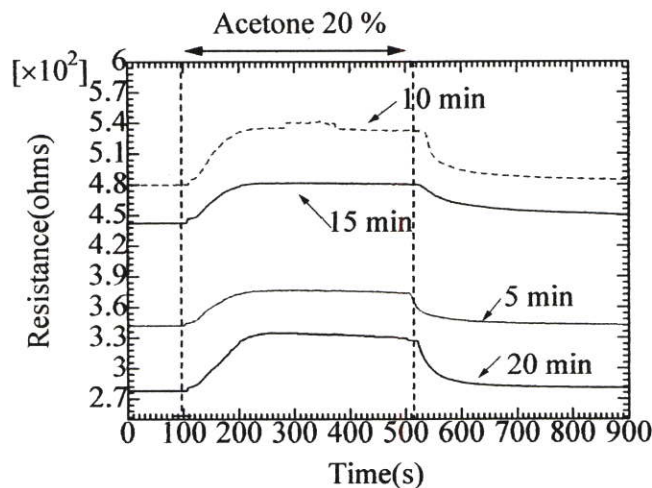
สกรปรกเหล่านี้จะหลุดลงมาเคลือบที่ผิวฟิล์มท่อนานาโนคาร์บอนจึงเป็นสาเหตุของการเคลือบฟิล์มในช่วงเวลา 20 นาที มีการนำไฟฟ้าได้ดี (ค่าความต้านทานเริ่มต้นมีค่าต่ำ)

สำหรับเซ็นเซอร์ที่เคลือบฟิล์มท่อนานาโนคาร์บอนที่ตำแหน่งต่างกันและใช้เวลาในการเคลือบเท่ากัน ความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของเซ็นเซอร์ที่เคลือบ ตำแหน่งที่ 10 เซนติเมตร จะมีค่าน้อยกว่าเซ็นเซอร์ที่เคลือบฟิล์มที่ตำแหน่งที่ 13 และ 16 เซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ก็อาจเกิดจากลักษณะของฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นฐานรองเซ็นเซอร์ที่ได้กล่าวในข้างต้น

4.2.3 ผลต่อการตอบสนองต่อไอสารอะซีโตน

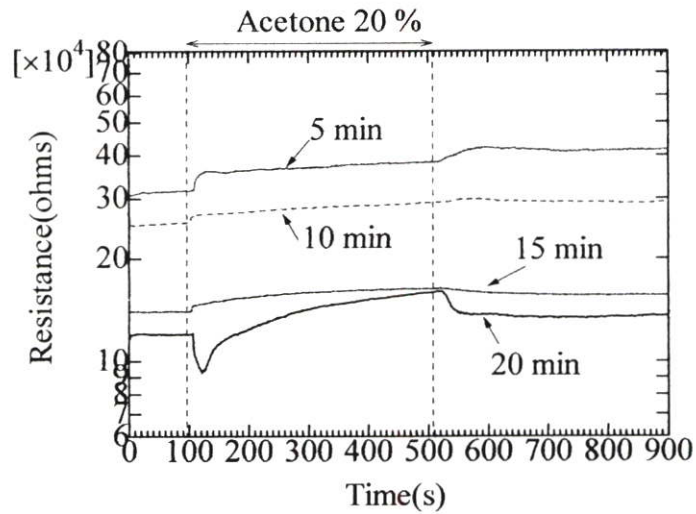
ในการทดลอง ได้นำชิ้นงานที่ทำการสร้างในหัวข้อ 4.2.2 ตามเงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 4.1 มาทดสอบกับไอสารอะซีโตนซึ่งมีปริมาณความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ (200,000 ppm) โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ขณะทำการทดลอง 1 โวลต์และวัดที่อุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส ในการวัดจะปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในระบบวัด อัตราไหล 200 sccm เป็นเวลา 300 วินาที เพื่อทำการสร้างค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้น (based line resistance) จากนั้น จึงทำการปล่อยไอสารอะซีโตน อัตราไหล 200 sccm เป็นเวลา 300 วินาที จึงหยุดปล่อยไอสารอะซีโตนและปล่อยเฉพาะก๊าซไนโตรเจน อัตราไหล 200 sccm เป็นเวลา 300 วินาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงได้ดังรูป 4.13-4.15

ตำแหน่งที่ 10 เซนติเมตร



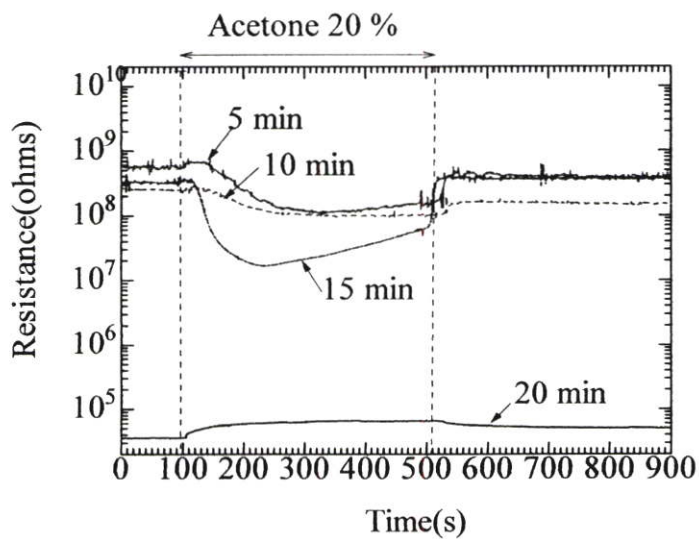
รูปที่ 4.13 การตอบสนองต่อ ไออะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ของชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร ใช้เวลาการสังเคราะห์ 5, 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ

ตำแหน่งที่ 13 เซนติเมตร



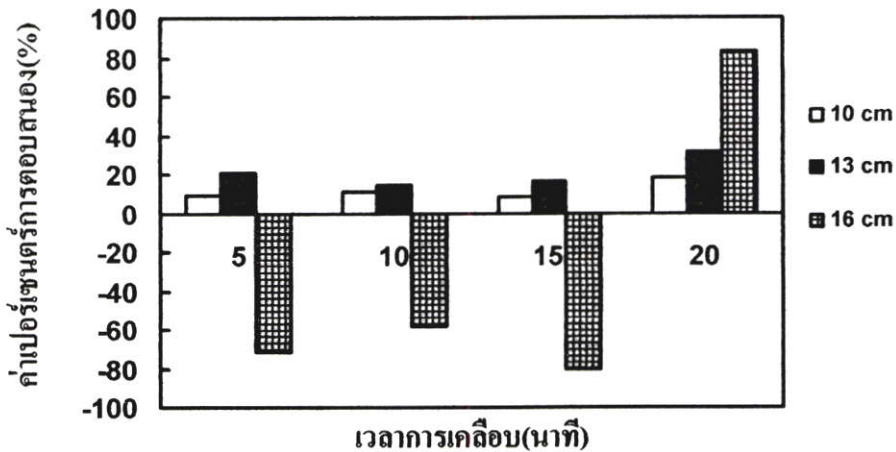
รูปที่ 4.14 การตอบสนองต่อไออะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ของชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 13 เซนติเมตร ใช้เวลาการสังเคราะห์ 5, 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ

ตำแหน่งที่ 16 เซนติเมตร



รูปที่ 4.15 การตอบสนองต่อไออะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ของชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร ใช้เวลาการสังเคราะห์ 5, 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ

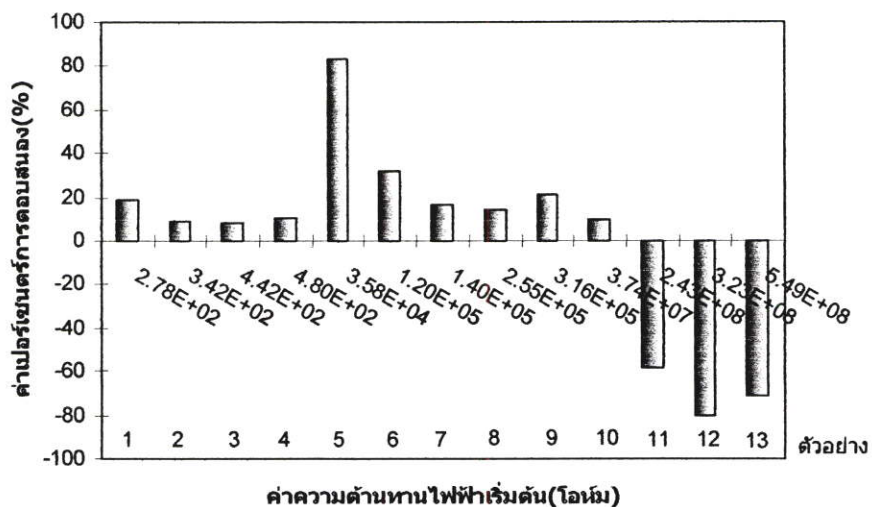
ผลจากการทดลองในรูปที่ 13-15 พบว่า ความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปล่อยไออะซิโตนเข้าไปในระบบวัด ซึ่งเมื่อนำความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงนี้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การตอบสนอง พบว่า เปอร์เซ็นต์การตอบสนองของชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร และ ใช้เวลาในการเคลือบ 20 นาที มีเปอร์เซ็นต์การตอบสนองมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อไออะซิโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ของชิ้นงาน ที่เคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนเป็นเวลา เวลา 5 นาที 10 นาที 15 นาที และ 20 นาที ณ ตำแหน่งต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่า เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นเมื่อมีการตอบสนองต่อไออะซิโตน ความต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลง 2 ลักษณะ คือ 1) เพิ่มขึ้น และ 2) ลดลง ซึ่งโดยทั่วไปความต้านทานจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อโมเลกุลสารที่ใช้ทดสอบมาสัมผัสที่ผิวท่อนาโนคาร์บอนนั้น จะเกิดจากการให้หรือรับอิเล็กตรอนระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับก๊าซที่ทดสอบอย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งได้อธิบายไว้ในสมการที่ 2.20 จากรูปที่ 4.16 เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นเมื่อมีการตอบสนองต่อไอสารชนิดเดียวกัน ความต้านทานของบางชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นและบางชิ้นงาน จึงได้นำเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของแต่ละชิ้นงานมาพล็อตเปรียบเทียบกันในรูปแบบที่ 4.17 พบว่า ชิ้นงานที่มีความต้านทานเริ่มต้นสูง (มากกว่า $3.74 \times 10^7 \Omega$) เมื่อมีการตอบสนองต่อไออะซิโตน ความต้านทานของชิ้นงานจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ชิ้นงานที่มีความต้านทานเริ่มต้นต่ำ (น้อยกว่า $3.74 \times 10^7 \Omega$) เมื่อมีการตอบสนองต่อไออะซิโตน ความต้านทานของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งชิ้นงานทั้ง 2 แบบนี้ จะมีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบบนชิ้นงานต่างกัน ชิ้นงานที่มีความต้านทานเริ่มต้นสูง จะมีฟิล์มเคลือบบนแผ่นฐานรองเซ็นเซอร์น้อยกว่า ชิ้นงานที่มีความต้านทานเริ่มต้นต่ำ ซึ่งการที่ความต้านทานของชิ้นงานที่

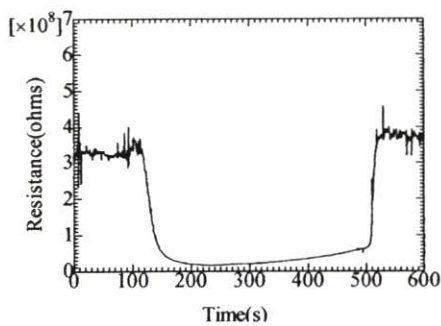
มีความต้านทานเริ่มต้นสูง ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลจากการทดปฏิกิริยากันระหว่างอะซีโตนกับ
 ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม โดยชั้นงานที่มีฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนเคลือบอยู่บางๆเมื่อตอบสนองต่อไออะซี
 โตนค่าความต้านทานมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว อาจเกิดจากรอยสัมผัสช็อคก็ เนื่องจากฟิล์มที่เคลือบ
 เป็นฟิล์มบางๆทำให้โมเลกุลที่มาดูดซับสามารถจะผ่านเข้าไปที่ผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับทิวปี
 ได้ จึงทำให้ความต้านทานมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ในทางตรงกันข้ามชั้นงานที่มีค่าความต้านทานต่ำ
 ฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนจะมีความหนาแน่นของทิวปีมาก โมเลกุลที่มาดูดซับไม่สามารถจะผ่านเข้าไป
 ที่ผิวสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับท่อนาโนคาร์บอนไม่ได้



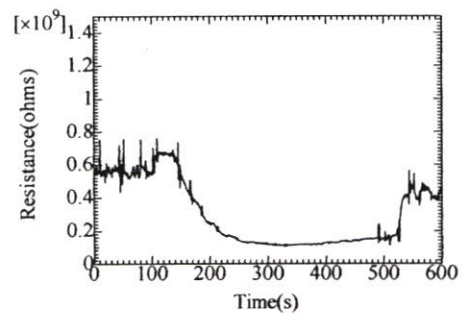
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของเซ็นเซอร์ตรวจจับ VOCs กับค่า
 เปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อไอสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้ยัง พบว่า เซ็นเซอร์ที่มีความต้านทานสูง(มากกว่า $3.74 \times 10^7 \Omega$)เมื่อนำไปวัดใน
 ระบบไอสาร VOCs อิ่มตัวซ้ำกันหลายๆครั้ง พบว่า เมื่อมีการตอบสนองต่อไออะซีโตนความ
 ต้านทานของเซ็นเซอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงในเซ็นเซอร์ตัวเดียวกัน โดยทำการทดลอง ครั้งที่ 1
 รูปที่ 4.18(ก - 1)ได้นำชิ้นงานไปทดสอบกับสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าการ
 ตอบสนองที่วัดได้ ~ 80 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2 รูปที่ 4.18(ก - 2) นำเซ็นเซอร์ไปวัดในไออะซีโตน
 อิ่มตัวที่บรรยากาศและอุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส (ปริมาณความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์) ครั้งที่
 3 รูปที่ 4.18(ก - 3) นำเซ็นเซอร์ไปวัดในไอสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ซ้ำอีกครั้ง
 พบว่า การตอบสนองของชิ้นงานมีค่าลดลงเหลือ ~ 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการวัดครั้ง
 ที่ 1 ทั้งนี้อาจเกิดจากมีโมเลกุลจำนวนมากของไอสารอะซีโตนซึ่งค้างอยู่ที่ผิวฟิล์ม ในขณะที่ทำการ
 วัดครั้งที่ 2 จึงทิ้งชิ้นงานไว้เพื่อรอให้สารอะซีโตนที่ค้างที่ผิวฟิล์มระเหยออก การวัดครั้งที่ 4(รูปที่

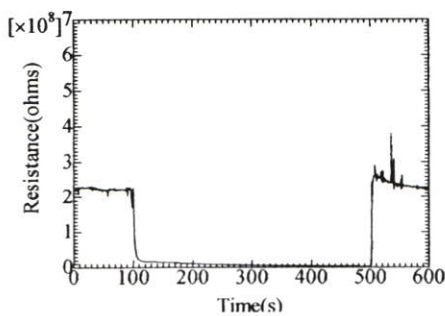
4.18(ก-4) ซึ่งห่างจากการวัดครั้งแรก 8 วัน จึงนำเซ็นเซอร์มาวัดในไอของสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ซ้ำอีก และมีเปอร์เซ็นต์การตอบสนองเพิ่มขึ้นราว 55 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าการตอบสนองในการวัดครั้งที่ 3 และ การคืนกลับสภาพเดิมจะช้ากว่าการวัดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 3 ที่มีการคืนกลับสภาพเดิมอย่างรวดเร็ว แสดงว่า โมเลกุลที่ค้างที่ผิวของฟิล์มระเหยออกไปบางส่วน และยังมีส่วนที่ค้างอยู่อีกจำนวนหนึ่งที่ไม่สามารถระเหยออกไปได้ และครั้งที่ 5 รูปที่ 4.18(ก - 5) ห่างจากการวัดครั้งแรก 9 วัน จึงนำชิ้นงานไปวัดในไอสารอะซีโตนความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ซ้ำอีก พบว่า รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อมีการตอบสนองและมีเปอร์เซ็นต์การตอบสนองอยู่ที่ ~ 53 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสันนิษฐานว่าการที่เซ็นเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการตอบสนองจากความต้านทานลดลงเป็นเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากการทิ้งชิ้นงานไว้ในบรรยากาศห้องเป็นเวลานาน ทำให้ความชื้นมาเกาะที่ผิวของฟิล์ม กลไกการดูดซับของเซ็นเซอร์จึงมีการเปลี่ยนแปลง โดยในขณะเดียวกันก็ได้ทำการวัดเปรียบเทียบโดยนำเซ็นเซอร์ที่สร้างที่ตำแหน่งที่ 16 เซนติเมตร และใช้เวลาการเคลือบ 5 นาที ซึ่งเมื่อมีการตรวจวัดไออะซีโตนครั้งแรก จะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานลดลงเช่นเดียวกับก๊าซเซ็นเซอร์ตัวอย่างที่นำมาทดลองโดยทำการตรวจวัดเฉพาะไอของสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2 ห่างจากการวัดครั้งที่ 9 วันจึงนำชิ้นงานมาทำการวัดในไอสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ซ้ำอีก พบว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงเช่นเดิม รูปแบบการตอบสนองของอุปกรณ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.18(ข - 1) และ (ข - 2)



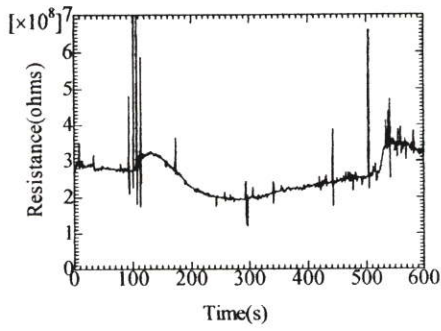
ก-1



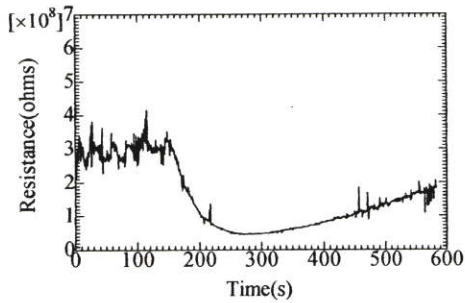
ข-1



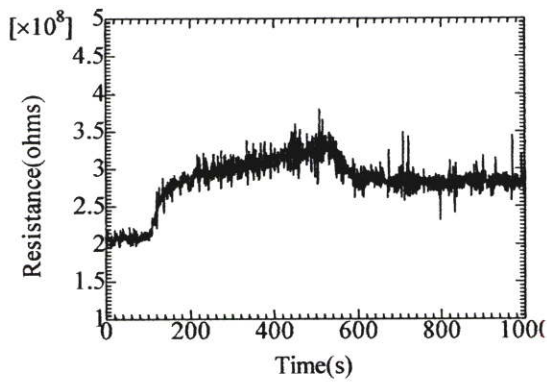
ก-2



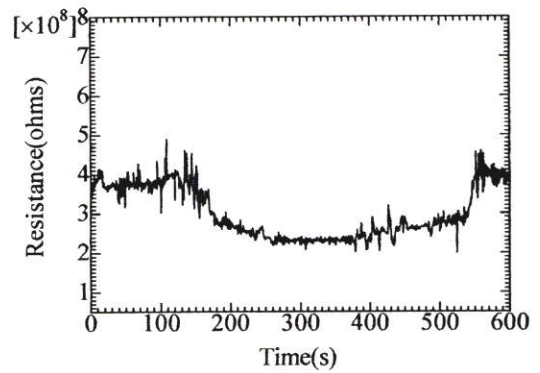
ก-3



ก-4



ก-5



ข-2

รูปที่ 4.18 ผลการวัดการตอบสนองของค่าความต้านทานก่อนและหลังการนำชิ้นงานไปวัด

ด้วยอะซีโตนซึ่งอ้อมตัวที่บรรยากาศและอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส โดยชิ้นงานตัวอย่างที่ 1 (ก-1) ก่อนการวัดในอะซีโตน(ก-2) วัดในอะซีโตน (ก-3)หลังการวัดในไอสารอะซีโตน (ก-4)หลังการวัดในไออะซีโตน 8 วัน (ก-5) หลังการวัดในไอสารอะซีโตน 9 วัน และ ชิ้นงานตัวอย่างที่ 2 ซึ่งทำการวัดพร้อมกันกับตัวอย่างที่ 1 (ข-1)วัดในไอสารอะซีโตนความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 1 (ข-2) วัดในไอสารอะซีโตนความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2 ห่างจากครั้งแรก 9 วัน

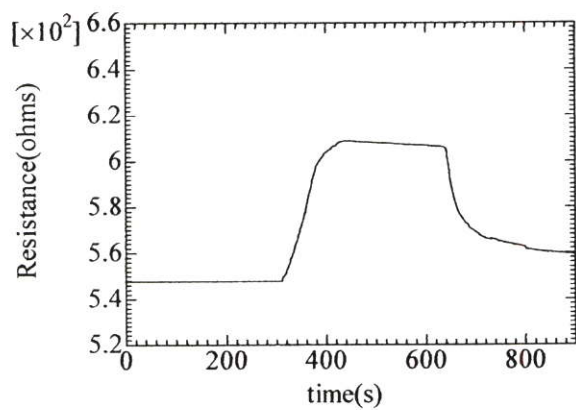
ผลการทดลอง พบว่า การนำชิ้นงานไปวัดในระบบการวัดไอสาร VOCs อิมตัวจะมีผลต่อรูปแบบการตอบสนองของชิ้นงาน โดยจะทำให้รูปแบบความต้านทานในการตอบสนองต่ออะซีโตนเปลี่ยนจากลดลงเป็นเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเกิดจากระบบที่ใช้วัด โดยสาร VOCs ที่อยู่ในระบบนี้จะไม่มีการเข้า - ออก ไอของสารจะกระจายอยู่ในเฉพาะบีเกอร์ที่หุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ เมื่อนำชิ้นงานเข้าไปวัดในบีเกอร์ ซึ่งมีสาร VOCs กระจายอยู่ภายในบีเกอร์ สาร VOCs จะมาเกาะที่ผิวของฟิล์ม ซึ่งหลังจากการวัดเสร็จ โหมดหลอดเหล่านี้ก็จะระเหยออกจากฟิล์มแต่อาจจะมีโมเลกุลส่วนหนึ่งที่ซึมเข้าไปในชั้นฟิล์มและเกาะแน่นที่ผิวของท่อนาโนคาร์บอนทำให้ระเหยออกไปไม่ได้ ทำให้กลไกในการตอบสนองของเซ็นเซอร์เปลี่ยนแปลง ในขณะที่เดียวกันเซ็นเซอร์ที่นำมาทำวัดในไอสารอะซีโตนความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นวัดในระบบที่ก๊าซและสาร VOCs ผ่านเข้าออกจากระบบได้ตลอดเวลา ทำให้โมเลกุลก๊าซที่ใช้ทดสอบไม่สามารถที่จะซึมเข้าไปที่ผิวของชั้นฟิล์มและระเหยออกได้ง่าย ดังนั้น เมื่อทำการวัดซ้ำอีกครั้ง รูปแบบของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงจึงมีลักษณะเช่นเดิม แต่อย่างไรก็ตามเป็นเพียงการตั้งข้อสังเกต ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลที่จะสามารถนำมาอ้างอิงได้เนื่องจาก การนำชิ้นงานมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซยังอยู่ในขั้นตอนของการวิจัยและศึกษา

4.3 การศึกษาคุณสมบัติของเซ็นเซอร์วัดไอสาร VOCs ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน

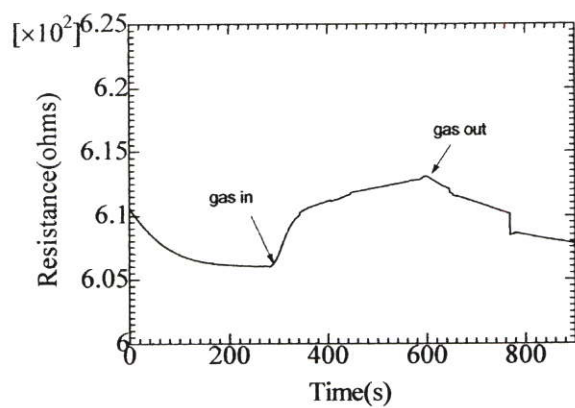
ในการทดลองนี้ จะทำการทดสอบคุณสมบัติการเป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดสาร VOCs โดยทำการวัดอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานของอุปกรณ์ โดยวัดในสาร VOCs อย่างต่อเนื่อง และวัดไอสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน โดยนำชิ้นงานที่สร้างจากแผ่นฐานรองที่เคลือบท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่งที่ 10 และ 16 เซนติเมตร โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน 15 และ 20 นาที

4.3.1 ผลของอุณหภูมิการทำงานต่อการตอบสนองของเซ็นเซอร์

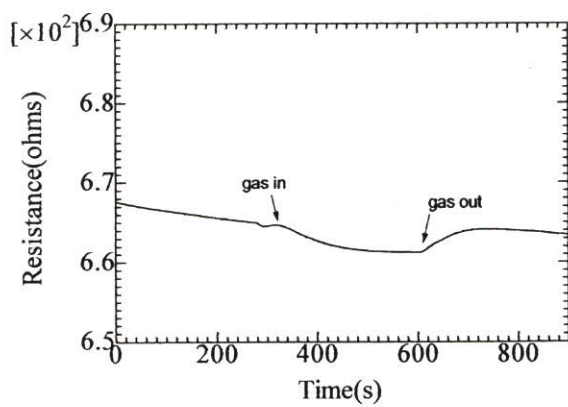
ในการทดลองนี้เราได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัด VOCs ที่สร้างขึ้น โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นชิ้นงานที่สร้างจากแผ่นฐานรอง ซึ่งวางไว้ที่ตำแหน่ง 10 และ 16 เซนติเมตร เวลาในการสังเคราะห์ 15 และ 20 นาที ตามลำดับ โดยในการทดลองจะนำชิ้นงานวางไว้ในระบบวัดซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 150 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงปล่อยไอสารอะซีโตนความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ เข้าไปในระบบวัดเพื่อทดสอบการตอบสนองของอุปกรณ์ที่อุณหภูมิกำ 28, 50, 75, 100 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20



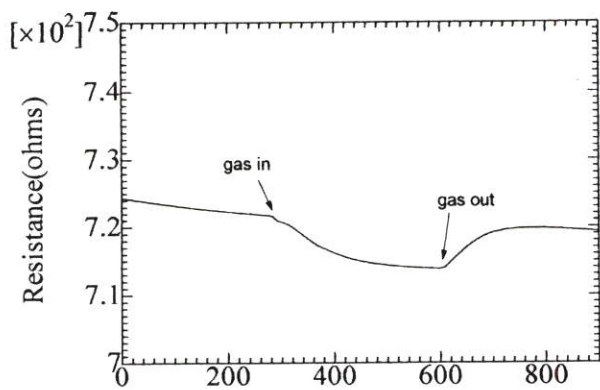
(ก) 28 องศาเซลเซียส



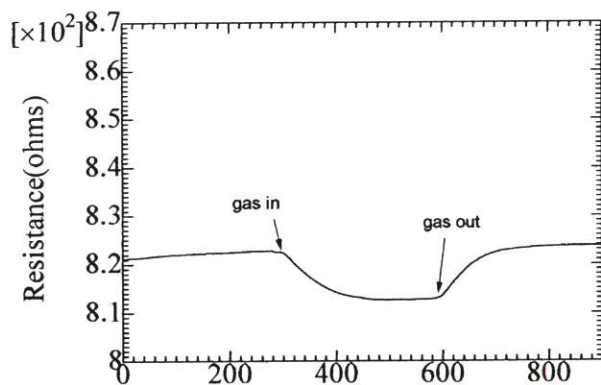
(ข) 50 องศาเซลเซียส



(ค) 75 องศาเซลเซียส

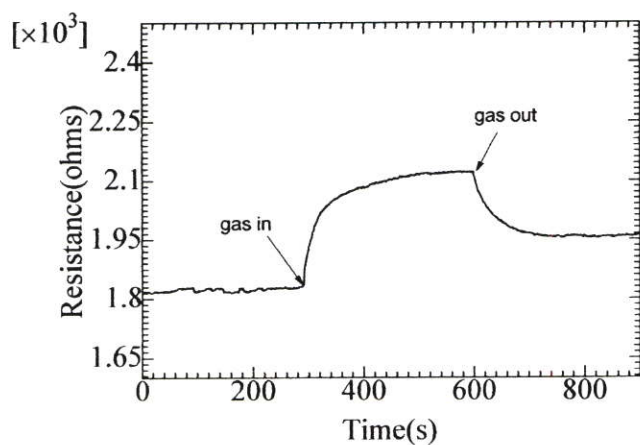


(ง) 100 องศาเซลเซียส

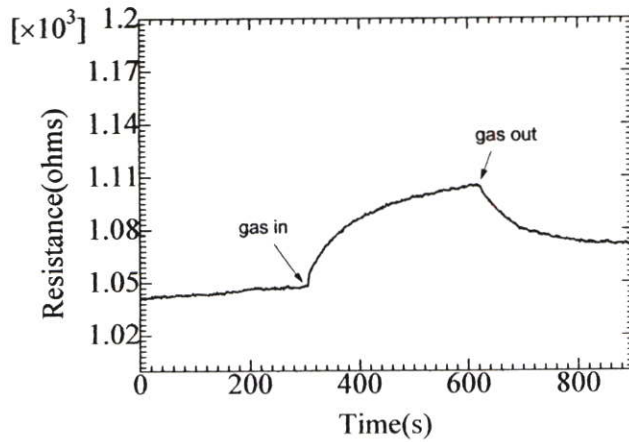
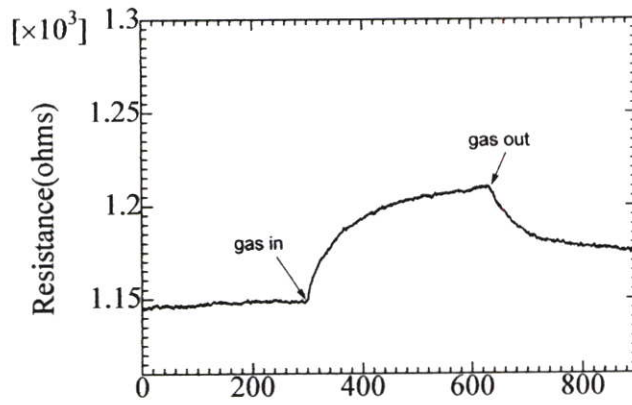
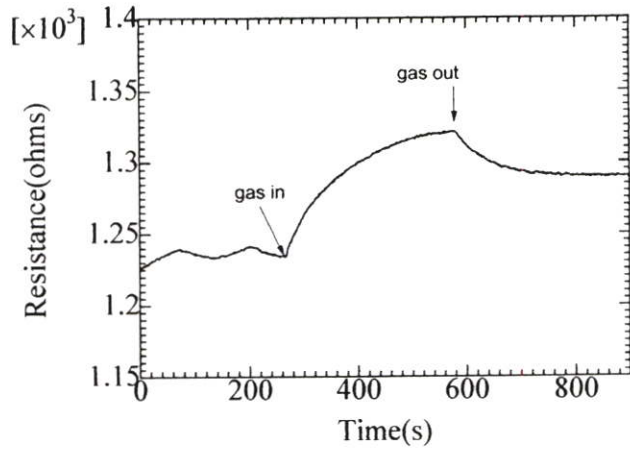


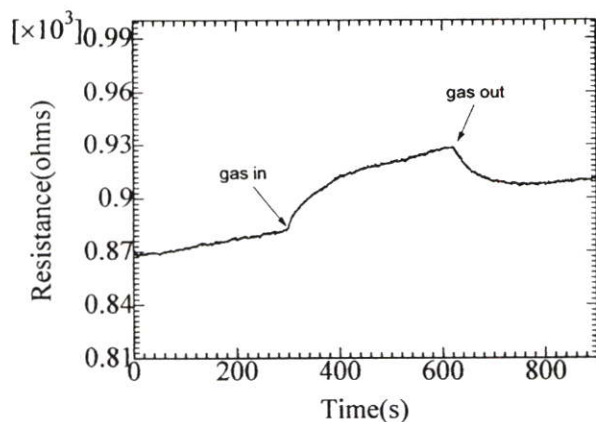
(จ) 150 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.19 ผลของอุณหภูมิต่อการตอบสนองไอของสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ของชั้นงานที่สร้างด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน ณ ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร



(ก) 28 องศาเซลเซียส

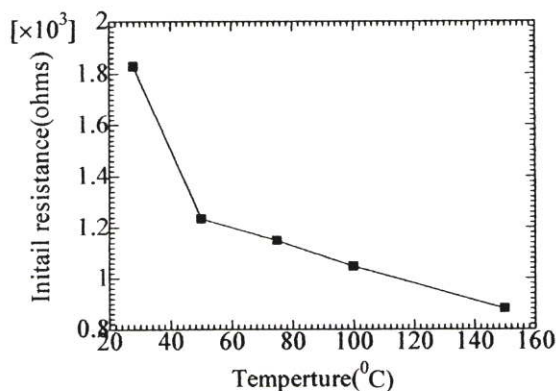




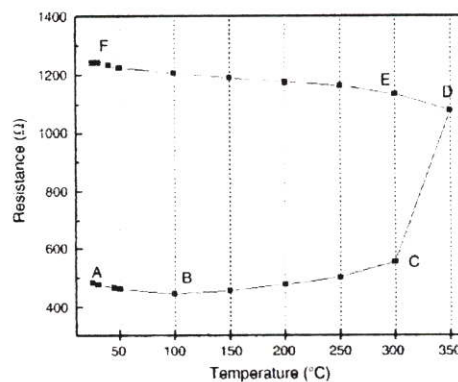
(จ) 150 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.20 ผลของอุณหภูมิต่อการตอบสนองไอของสารอะซีโตนความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ของชิ้นงานที่สร้างด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน ณ ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร

รูปที่ 4.19 และ 4.20 เป็นผลการทดสอบการตอบสนองต่อไอสารอะซีโตน ในสถานะที่มี อุณหภูมิต่างๆกัน โดยรูปที่ 4.19 แสดงผลการตอบสนองของชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่งที่ 10 เซนติเมตร จะเห็นว่า ที่อุณหภูมิ 28, 50, 75, 100 และ 150 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจะมีความต้านทานเริ่มต้น 0.55, 0.61, 0.65, 0.72 และ 0.82 $k\Omega$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่เป็น โลหะ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความต้านทานเพิ่มขึ้น สำหรับในรูปที่ 4.20 เป็นผลการตอบสนองของ ชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่งที่ 16 เซนติเมตร พบว่า ที่อุณหภูมิ 28, 50, 75, 100 และ 150 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีความต้านทานเริ่มต้น 1.83, 1.23, 1.49, 1.05 และ 0.88 $k\Omega$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงคุณสมบัติ ของวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำ เมื่อนำผลการทดลองในรูปที่ 4.21(ก-1) เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ของ N. H Quang และคณะ [40] ในรูปที่ 4.21(ก-2) ซึ่งเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เซ็นเซอร์วัดก๊าซ ที่ สร้างจากท่อนาโนคาร์บอนเหมือนกัน จะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความต้านทานมีค่าลดลง เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่า ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ



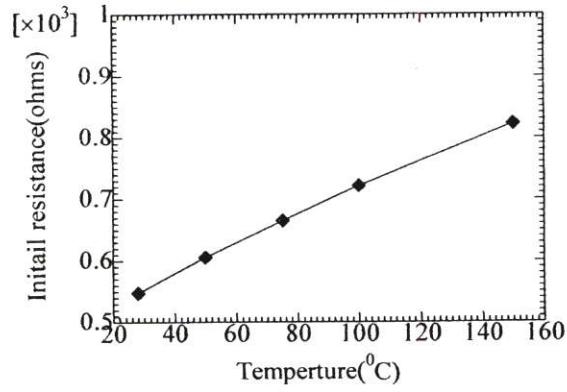
(ก-1)



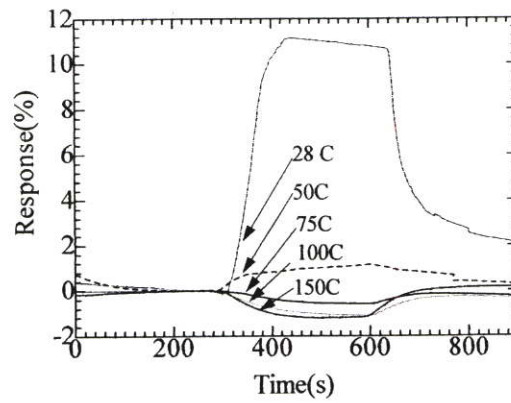
(ก-2)

รูปที่ 4. 21 เปรียบเทียบ (ก) อุณหภูมิกับความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของก๊าซเซ็นเซอร์ที่สร้างที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร กับ (ข) งานวิจัยของ N. H [40] Quang และคณะ ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์วัดก๊าซแอมโมเนียที่สร้างด้วยท่อานาโนคาร์บอน

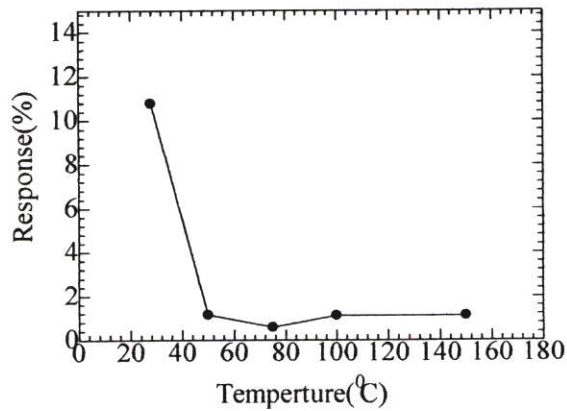
นอกจากนี้ จากการผลการทดลองในรูปที่ 4.19 จะเห็นว่า เมื่อการตอบสนองตั้งแต่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ขึ้นไปเมื่อมีการตอบสนองค่าความต้านทานของชิ้นงานจะมีค่าลดลง ซึ่งน่าจะเกิดจากความร้อนเพิ่มมากขึ้นทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชิ้นงาน รูปแบบการตอบสนองจึงเปลี่ยนแปลงตาม ซึ่งตรงกันข้ามกับรูปที่ 4.20 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจา 25 ไปจนถึง 150 องศาเซลเซียส รูปแบบการตอบสนองยังเหมือนเดิม ทั้งนี้จะเกิดจากชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดลองในรูปที่ 4.19 เป็นชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร ซึ่งจะมีสิ่งเจือปนพวกโลหะมากกว่าชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จึงน่าจะเป็นผลของโลหะมากกว่าผลของท่อานาโนคาร์บอน หรือ ท่อานาโนคาร์บอนอาจมีคุณสมบัติเป็นโลหะมากกว่าเป็นสารกึ่งตัวนำแต่อย่างไรก็ดี ผลจากการทดลองในรูปที่ 4.19 และ 4.20 สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานของอุปกรณ์ที่สร้างด้วยท่อานาโนคาร์บอน คือ 28 องศาเซลเซียส และเมื่อนำข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองมาเปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 10 และ 16 เซนติเมตร พบว่าชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร เหมาะสำหรับนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซมากกว่าชิ้นงานที่สร้างที่ 10 เซนติเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.22 และ 4.23



(ก)

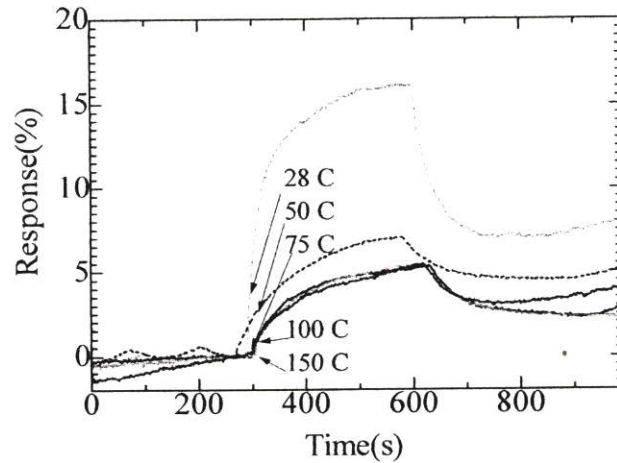


(ข)

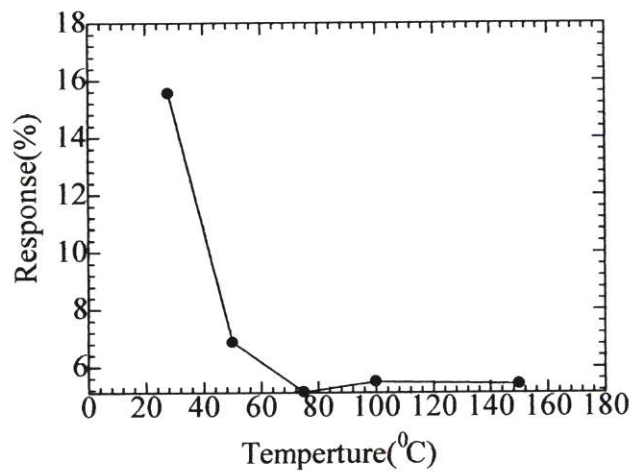


(ค)

รูปที่ 4.22 (ก)เปรียบเทียบอุณหภูมิของการทำงานกับค่าความต้านทานคั้นของชิ้นงานและ(ข)-(ค) เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อไอสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ กับอุณหภูมิในการทำงานของชิ้นงานที่ทำการเคลือบฟิล์มที่ตำแหน่งที่ 10 เซนติเมตร เซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน



(ก)



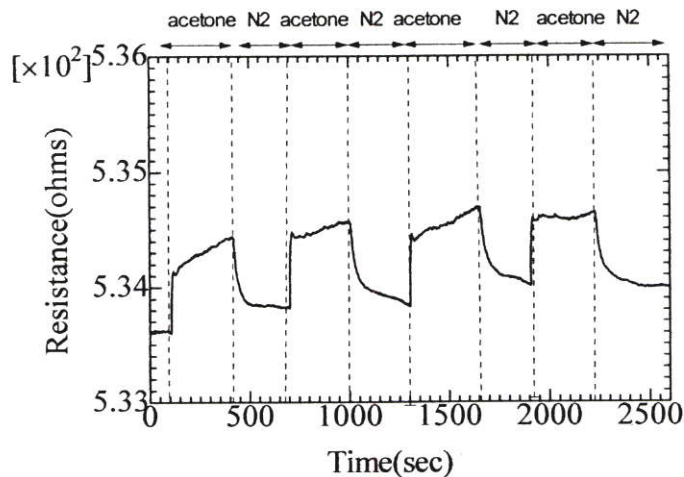
(ข)

รูปที่ 2.23 (ก)-(ข) เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อไอสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ กับอุณหภูมิในการทำงาน ของเซ็นเซอร์ที่เคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร

4.3.2 ผลการวัดแบบต่อเนื่อง

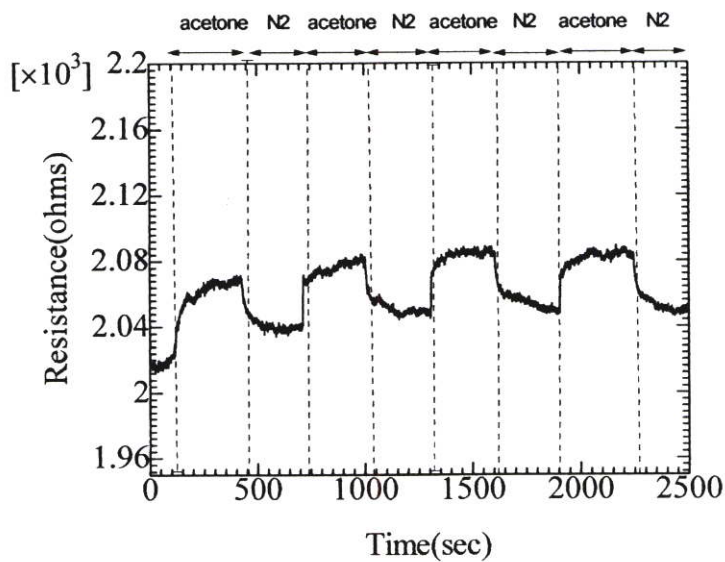
ในการทดลองจะนำชิ้นงานทั้งสองไปวางไว้ในระบบวัดแบบปิด โดยอุณหภูมิในการวัด 28 องศาเซลเซียส และให้แรงดันไฟแก่ชิ้นงานทั้งสองคงที่ที่ 1 โวลต์ ในการทดลองจะปล่อยก๊าซไนโตรเจน 300 วินาที จากนั้นจึงปล่อยสารอะซีโตนความเข้มข้น 20000 ppm เป็นเวลา 300 วินาที

จากนั้นทำการวัดซ้ำ 4 ครั้ง ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อวัดในไอสารอะซีโตนแต่ละครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.24



(ก)

รูปที่ 4.24 กราฟแสดงลักษณะความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการวัดซ้ำการตอบสนองต่อ ไอสารอะซีโตน ความเข้มข้น 20000 ppm ของชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่งที่ 10 เซนติเมตร และเวลาในการสังเคราะห์ 15 นาที



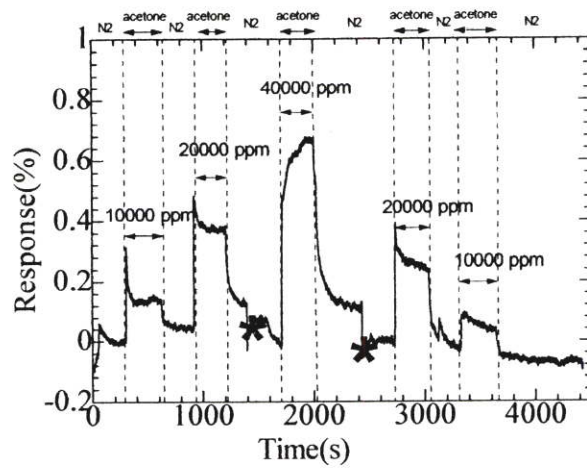
(ข)

รูปที่ 4.25 กราฟแสดงลักษณะความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการวัดซ้ำการตอบสนองต่อ ไออะซีโตนความเข้มข้น 20000 ppm ของชิ้นงานที่สร้างที่ 16 เซนติเมตร และ เวลาในการสังเคราะห์ 20 นาที

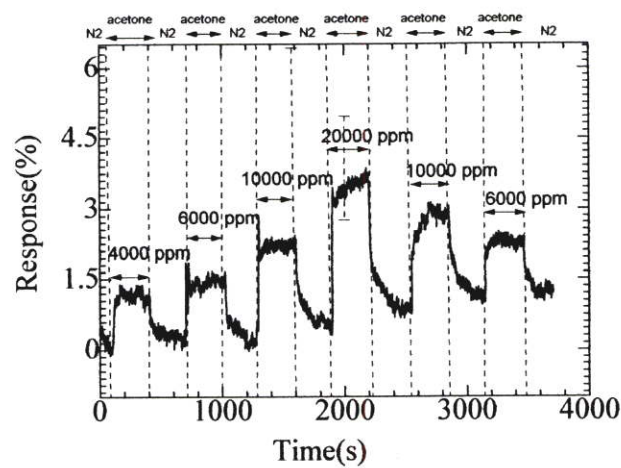
รูปที่ 4.24 และ 4.25 เป็นผลการทดสอบการวัดแบบต่อเนื่อง เซ็นเซอร์ที่นำมาทดสอบเป็นชิ้นงานที่เคลือบทิวปีตำแหน่งที่ 10 และ 16 เซนติเมตร และเวลาการเคลือบ 15 และ 20 นาที ตามลำดับ ผลจากการวัดของชิ้นงานที่เคลือบทิวปีตำแหน่งที่ 10 เซนติเมตร แสดงได้ดังในรูปที่ 4.24 ความต้านทานเริ่มต้นที่จุดเบสไลน์เมื่อชิ้นงานอยู่ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนที่จะทำการทดสอบกับไออะซีโตน มีค่าอยู่ที่ประมาณ 533.6 $k\Omega$ โดยในการทดสอบครั้งแรกเมื่อพ่นไออะซีโตนความเข้มข้น 20000 ppm เป็นเวลา 300 วินาที ปรากฏว่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจาก 533.613 $k\Omega$ มาอยู่ที่ 534.4 $k\Omega$ จากนั้นจึงได้ทำการปิดไออะซีโตน ปล่อยให้ชิ้นงานคืนกลับสภาพเดิมโดยให้ไออะซีโตนระเหยออกจากตัวชิ้นงานด้วยการพ่นก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเป็นเวลา 300 วินาที ความต้านทานเริ่มต้นที่จุดเบสไลน์ครั้งที่ 2 มีค่าประมาณ 533.8 $k\Omega$ จากนั้นจึงพ่นไออะซีโตนเป็นครั้งที่ 2 เป็นเวลา 300 วินาทีเช่นเดียวกัน ค่าความต้านทานเริ่มต้นจาก 533.8 $k\Omega$ เพิ่มขึ้นมาอยู่ที่ 534.6 $k\Omega$ ซึ่งค่าความต้านทานที่จุดเบสไลน์และค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองมีค่ามากกว่าการทดสอบครั้งที่ 1 เมื่อทดสอบครั้งที่ 3 และ 4 พบว่า ความต้านทานเริ่มต้นและค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองมีค่ามากกว่าการวัดครั้งที่ 1 แต่ใกล้เคียงกับการวัดครั้งที่ 2 เช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่งที่ 16 เซนติเมตร ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.25 การวัดครั้งที่ 2, 3 และ 4 มีค่าความต้านทานเริ่มต้นและค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองใกล้เคียงกัน และมากกว่าครั้งที่ 1 ความต้านทานที่จุดเบสไลน์มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละครั้งที่วัดอาจเกิดจากไออะซีโตนค้างบนชิ้นงาน ซึ่งจะเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลของอะซีโตนกับทิวปี เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงซึ่งโดยทั่วไปก๊าซเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอนจะมีการสร้างพันธะกับก๊าซที่ทดสอบ เช่น แอมโมเนีย เป็นต้น โดยเมื่อมีก๊าซมาดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบ Physisorption และ Chemisorption ซึ่งเกิดการดูดซับบริเวณจุดบกพร่องของทิวปี (defect-free SWNT) กับที่สิ่งเจือปน ซึ่งจุดบกพร่องของทิวปีกับสิ่งเจือปนจำพวกเหล็กออกไซด์ และอะมอฟสคาร์บอน จะมีอิเล็กตรอนเหลือพร้อมที่จะสร้างพันธะกับอะตอมอื่น ซึ่งลักษณะที่พร้อมจะสร้างจะพันธะนี้เรียกว่า “dangling bonds” ซึ่งจะมีส่วนรบกวนทิวปีและปลายทิวปี เมื่อมีโมเลกุลมาดูดซับที่บริเวณเหล่านี้ dangling bonds จะสร้างพันธะกับก๊าซเพื่อให้ตัวมันเสถียรจึงทำให้ชิ้นงานมีการอึดตัวไม่สามารถดูดซับก๊าซได้ และการดูดซับที่บริเวณเหล่านี้ อาจจะเป็นการดูดซับแบบ Chemisorption จึงทำให้การคืนกลับสภาพเดิมของก๊าซเซ็นเซอร์ใช้เวลานานมากขึ้น[39]

4.3.3 ผลการวัดการตอบสนองต่อสารอะซีโตนความเข้มข้นต่างๆกัน

การทดลองนี้เป็นการศึกษา การตรวจจับไอสารอะซีโตนที่ความเข้มข้นต่างๆ ของเซ็นเซอร์ที่สร้างโดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์ม 15 นาที ที่ตำแหน่งที่ 10 เซนติเมตร และเซ็นเซอร์ที่สร้างโดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์ม 20 นาที ที่ตำแหน่งที่ 16 เซนติเมตร โดยในการทดลองจะปล่อยไนโตรเจนเข้าไปในระบบการวัด 100 วินาที ขณะเดียวกันก็ปล่อยไออะซีโตน ความเข้มข้น 4000 ppm, 6000 ppm, 10000 ppm, 20000 ppm และ 40000 ppm ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.26



(ก)



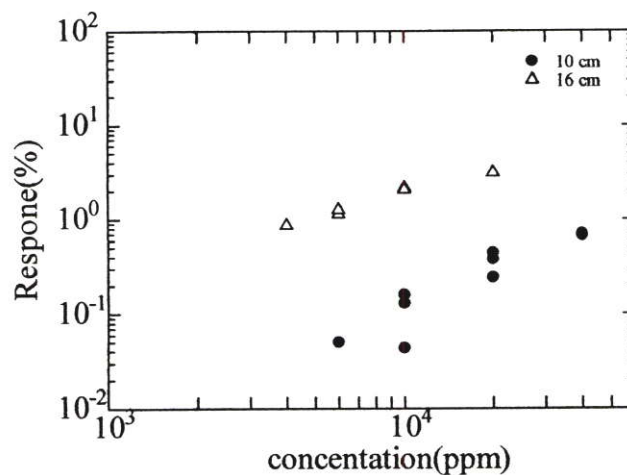
(ข)

รูปที่ 4.26 ลักษณะค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อการเปิด-ปิดไออะซิโตนที่มีค่าความเข้มข้นต่างๆ (ก) ชั้นงานที่สร้างที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร (ข) ชั้นงานที่สร้างที่ตำแหน่งที่ 16 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.26(ก) พบว่า ค่าความต้านทานเริ่มต้นเมื่อชั้นงานอยู่ในบรรยากาศไนโตรเจนก่อนที่ จะทำการทดสอบด้วยไออะซิโตน อยู่ที่ 534.17 โอห์ม โดยในการวัดครั้งแรกจะทดสอบด้วยอะซิโตน ความเข้มข้น 4000 ppm ปรากฏว่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจาก 534.17 มาอยู่ที่ 534.364 โอห์ม จากนั้น จึง ทำการทดสอบด้วยสารอะซิโตนความเข้มข้น 6000 ppm ซึ่งก่อนการทดสอบด้วยไอสารอะซิโตนนี้ ชั้นงานมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นอยู่ที่ 533.876 โอห์ม เช่นเดียวกันกับก่อนทำการทดสอบด้วย ไอ สารอะซิโตน 10000 ppm ที่มีค่าความต้านทานเริ่มต้น 533.79 โอห์ม และก่อนทำการทดสอบด้วยไอ

สารอะซีโตน 20000 ppm ที่มีค่าความต้านทานเริ่มต้น 533.615Ω แต่เมื่อนำปริมาณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในรูปที่ 4.26(ก) มาทำการเปรียบเทียบปริมาณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อทดสอบด้วยสารอะซีโตนที่มีความเข้มข้นต่างๆ พบว่าถึงแม้ว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าตอนเริ่มต้นไม่เท่าค่าเดิม โดยมีค่าความต้านทานลดลง ซึ่งไม่สามารถสรุปสาเหตุที่แน่ชัดได้ แต่อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ตรวจจับที่สร้างโดยการเคลือบด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้เวลาการสังเคราะห์ 15 นาที นี้ก็สามารถจำแนกค่าความเข้มข้นของก๊าซได้ค่าต่างๆ ได้ แต่เมื่อความเข้มข้นน้อยกว่า 4000 ppm เซ็นเซอร์ไม่สามารถที่จะจำแนกค่าได้ เช่นเดียวกันกับเซ็นเซอร์ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 20 นาที ที่ตำแหน่งที่ 16 เซนติเมตร รูปที่ 4.26 (ข) เมื่อมีการวัดกับไอสารอะซีโตนที่มีความเข้มข้นต่ำก็ไม่สามารถที่จะจำแนกค่าได้ซึ่งต้องมีการพัฒนาต่อไป

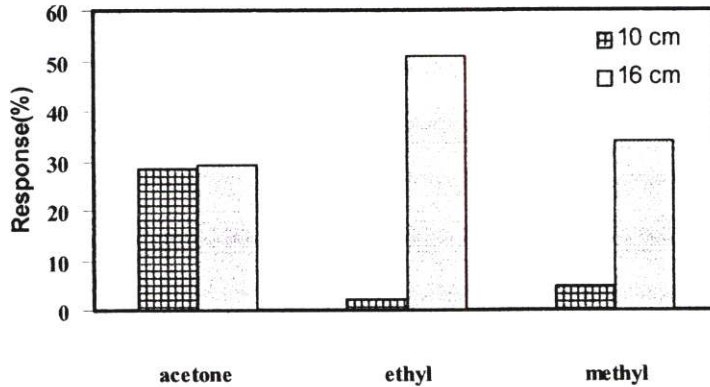
จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 ได้ทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ของการตอบสนองต่อการเปิดไอสารอะซีโตนซึ่งมีความเข้มข้น ppm ต่างกัน ของอุปกรณ์ตรวจจับที่สร้างด้วยชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนบนขั้วลูมิเนียมที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร และ 16 เซนติเมตร ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของปริมาณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อต่อการเปิดไอสารอะซีโตน ของเซ็นเซอร์ตรวจจับที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนเป็นเวลา 5 นาที 10 นาที 15 นาที และ 20 นาที

4.3.4 ผลการตอบสนองต่อสาร VOCs ต่างชนิดกัน

การทดลองนี้จะศึกษาถึงการตอบสนองของเซ็นเซอร์ต่อไอสาร VOCs ต่างชนิดกัน คือ สารเอทานอล, สารเมทานอล และสารอะซีโตน ซึ่งอ้อมตัวที่บรรยากาศห้อง อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส จะมีความเข้มข้นอยู่ที่ ~ 9, 19 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การตอบสนองของเซ็นเซอร์ต่อไอสาร VOCs ต่างชนิดกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.28



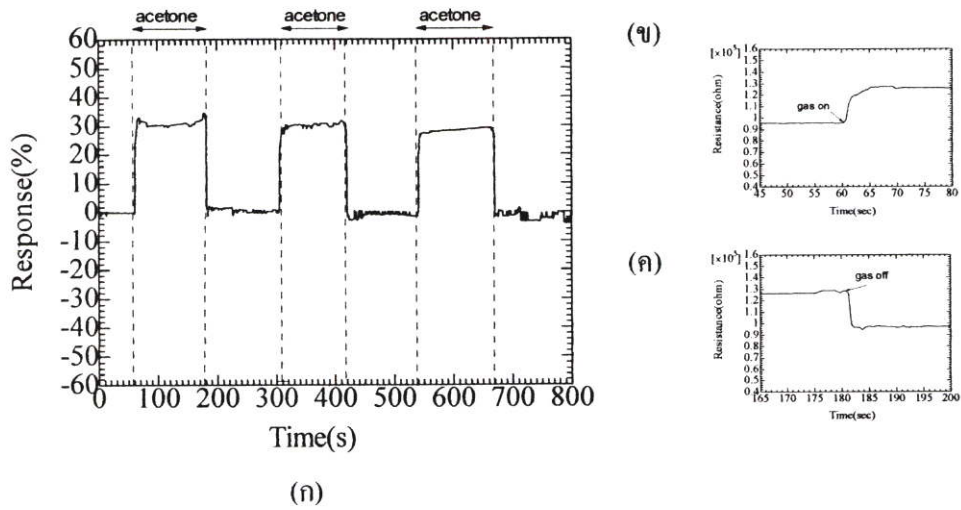
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงผลของค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อสาร VOCs ต่างชนิดกันซึ่งอิมิตัวที่บรรยากาศห้องของอุปกรณ์ที่สร้างด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน โดยเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่งที่ 10 และ 16 เซนติเมตร ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.28 แสดง เปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อสาร VOCs ต่างชนิดกันของอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอนโดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นชิ้นงานที่เคลือบด้วยฟิล์มที่ตำแหน่งที่ 10 และ 16 เซนติเมตร พบว่า ชิ้นงานทั้งสองสามารถตอบสนองต่อสาร VOCs ต่างชนิดกัน ได้ โดยเมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองต่อไอสารเมทานอลและเอทานอลมาพล็อตเปรียบเทียบกับ การตอบสนองต่อไอสารอะซีโตน แล้วจะเห็นว่าชิ้นงานทั้งสองมีความสามารถในการตอบสนองต่ออะซีโตนใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่า ชิ้นงานที่สร้างที่ตำแหน่งที่ 16 เซนติเมตรสามารถตอบสนองต่อไอสารเอทานอลได้มากกว่าสารอะซีโตนและสารเมทานอล ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้ในการสร้างเป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจจับไอแอลกอฮอล์ แต่อย่างไรก็ตามต้องมีการทดสอบคุณสมบัติ การคืนกลับสภาพเดิมและความเสถียรภาพของอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ต่อไอเอทานอลเพิ่มเติม

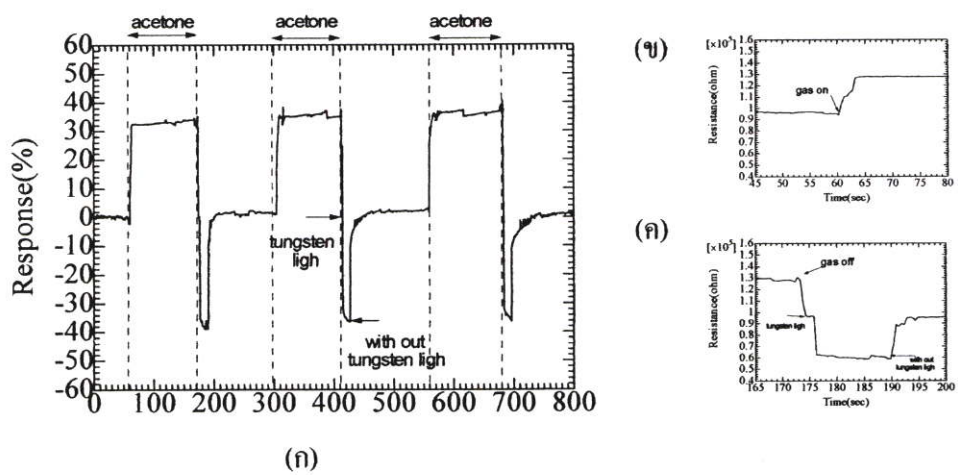
4.3.5 ผลการวัดการคืนกลับสภาพเดิมโดยใช้แสง

ในการทดลองนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบการคืนกลับสภาพเดิมของเซ็นเซอร์ ในสภาวะที่อยู่ในอากาศต่างๆ ไปด้วยแสงไฟจากหลอดไฟทังสเทน (tungsten) 40 วัตต์ เซ็นเซอร์ที่นำมาทดสอบ เป็นเซ็นเซอร์ที่เคลือบท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร และเวลาเคลือบ 20 นาที ในการวัดครั้งแรก จะทำการวัดค่าความต้านทานที่จุดเบสไลน์ที่อากาศต่างๆ ไปเป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นจึงวัดในไอสารอะซีโตนอิมิตัว(ความเข้มข้น 30 %) 120 วินาที จากนั้นจึงหยุดวัดในไอสารอะซีโตนและปล่อยให้ชิ้นงานคืนกลับสภาพเดิมในสภาวะอากาศต่างๆ ไป เป็นเวลา 120 วินาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานเดียวกันนี้มาวัดครั้ง 2 ในการวัดจะวัดความต้านทานที่จุดเบสไลน์ที่อากาศ

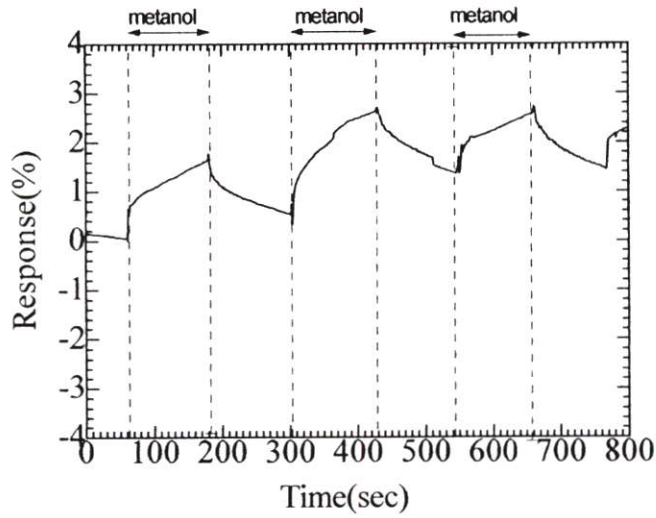
ทั่วๆไปเป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นจึงวัดในไอสารอะซีโตนอิมั้วเป็นเวลา 120 วินาที จากนั้นจึง
 ปล่อยให้ชิ้นงานคืนกลับสภาพเดิมโดยการฉายด้วยแสงจากหลอดไฟทั้งสเดน รว 10 วินาที จากนั้น
 ปล่อยให้ชิ้นงานคืนกลับสภาพเดิมในอากาศทั่วๆไป โดยใช้เวลารว 120 วินาที หลังจากนั้นจึงทำ
 การวัดซ้ำอีก 3 ครั้ง ซึ่งผลการวัดครั้งที่ 1 และ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับโดยการ
 ทดสอบครั้งที่ 1 แสดงได้ดังในรูปที่ 4.29 เป็นการคืนกลับสภาพเดิมในสภาวะอากาศทั่วๆไปของ
 เซ็นเซอร์ พบว่า ในการทดสอบด้วยไออะซีโตนทั้ง 3 ครั้ง ค่าเปอร์เซ็นต์ในการตอบสนอง เมื่อ
 สารอะซีโตนสัมผัสกับตัวชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ 30 ค่าความไวในการตอบสนองอยู่ที่ประมาณ 6-7
 วินาที และใช้เวลาในการคืนกลับสภาพเดิมประมาณ 1-2 นาที ค่าความต้านทานจึงกลับมาที่ค่าเดิม
 ในรูปที่ 4.30 เป็นผลการทดสอบครั้งที่ 2 โดยนำชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบครั้งที่ 1 มาทดสอบการ
 คืนกลับสภาพเดิมในสภาวะโดยการฉายด้วยแสงไฟโดยใช้หลอดไฟทั้งสเดน ขนาด 40 วัตต์ พบว่า
 ค่าเปอร์เซ็นต์ในการตอบสนองต่อไอสารอะซีโตนในแต่ละครั้งอยู่ที่ประมาณ 30 – 35 ค่าความไว
 ในการตอบสนองอยู่ที่ประมาณ 6-7 วินาที และใช้เวลาในการคืนกลับสภาพเดิมประมาณ 1-2 นาที
 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเซ็นเซอร์ที่คืนตัวในสภาวะอากาศทั่วๆไป นอกจากนั้น ยังได้นำชิ้นงานไป
 ทดสอบในไอเมทานอลและทำการเปรียบเทียบการคืนกลับสภาพเดิมของชิ้นงานในสภาวะที่อยู่ใน
 อากาศทั่วๆไปและในสภาวะที่ฉายด้วยแสงไฟโดยใช้หลอดไฟทั้งสเดน เช่นเดียวกันกับการทดลอง
 ก่อนหน้านี้ ซึ่งผลจากการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.31 (ก)และ(ข) ตามลำดับ ในรูปที่ 4.31 (ก) จะ
 เห็นว่า ในการทดสอบด้วยไออะซีโตนครั้งที่ 1 ค่าเปอร์เซ็นต์ในการตอบสนองอยู่ที่ประมาณ 1.6 ค่า
 ความไวในการตอบสนองอยู่ที่ประมาณ 3-4 วินาที จากนั้นจึงปล่อยให้ชิ้นงานคืนกลับสภาพเดิมใน
 สภาวะอากาศทั่วๆไป ซึ่งใช้เวลามากกว่า 1-2 นาที เมื่อวัดครั้งที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ในการตอบสนอง
 อยู่ที่ประมาณ 1.7 ค่าความไวในการตอบสนองอยู่ที่ประมาณ 3-4 วินาที และใช้เวลาในการคืนตัว
 มากกว่า 1-2 นาที เช่นเดียวกันกับเมื่อวัดครั้งที่ 3 ก็ใช้เวลาในการคืนตัวมากกว่า 1-2 นาที จากนั้นได้
 นำชิ้นงานดังกล่าวนี้มาทำการทดสอบการคืนตัวโดยฉายด้วยแสงไฟโดยใช้หลอดทั้งสเดน ในรูปที่
 4.31 (ข) พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ในการตอบสนองอยู่ที่ประมาณ 1.0 ค่าความไวในการตอบสนองอยู่ที่
 6-10 วินาทีและใช้เวลาในการคืนตัวประมาณ 1-2 นาที ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคืนกลับสภาพเดิมโดย
 ฉายด้วยแสงไฟจากหลอดไฟทั้งสเดน จะใช้นเวลาน้อยกว่าการคืนกลับสภาพเดิมในภาวะที่อยู่ใน
 อากาศทั่วๆไป นอกจากนั้น จะเห็นว่าการคืนกลับสภาพเดิมในสภาวะอากาศทั่วๆไป ค่าความ
 ต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีโมเลกุลของสารที่ใช้ทดสอบค้างอยู่ที่ผิวของ
 ฟิล์ม เมื่อนำมาฉายด้วยแสงไฟจะช่วยให้โมเลกุลระเหยออกจากผิวของอุปกรณ์ได้ง่าย



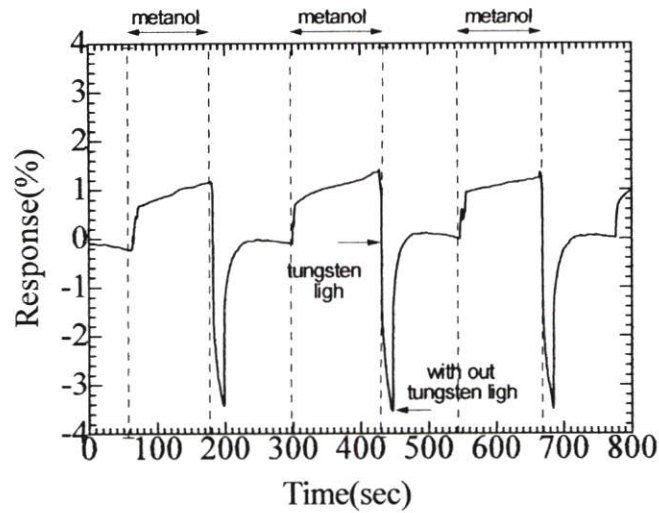
รูปที่ 4.29 (ก) กราฟแสดงการตอบสนองต่อไออะซิโตนความเข้มข้น 30 % (ข) กราฟแสดง ความไวการตอบสนองของเซ็นเซอร์ โดยใช้เวลา ~ 6-7 วินาที (ค) กราฟแสดง การคืนกลับสภาพเดิมของเซ็นเซอร์ ในอากาศทั่วไปโดยใช้เวลา ~ 1-2 นาที



รูปที่ 4.30 (ก) กราฟแสดงการตอบสนองต่อไออะซิโตนความเข้มข้น 30 % (ข) กราฟแสดง ความไวการตอบสนองของเซ็นเซอร์ โดยใช้เวลา ~ 6-7 วินาที (ค) กราฟแสดง การคืนกลับสภาพเดิมของเซ็นเซอร์ ใช้เวลา ~ 1-2 นาที โดยฉายด้วยแสงจาก หลอดไฟฟ้าทังสแตน 40 วัตต์



(ก)



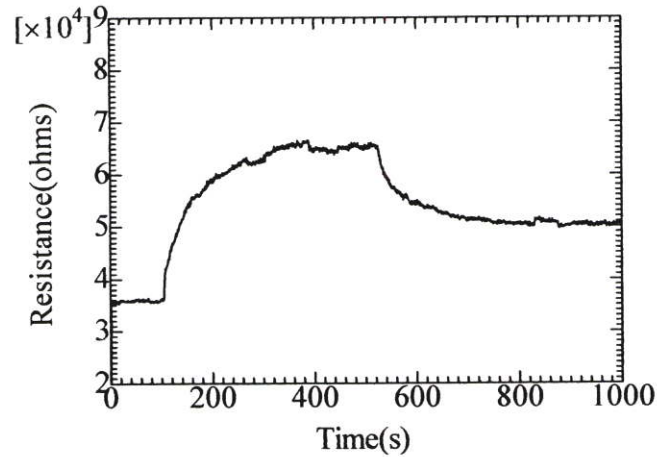
(ข)

รูปที่ 4.31 กราฟแสดงการคืนกลับสภาพเดิมของเซ็นเซอร์ ที่สร้างด้วยชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่ง 16 cm และเวลาการสังเคราะห์ 20 นาที ต่อไอเมทานอลอิ่มตัว (มีความเข้มข้น ~19%) โดยการคืนกลับสภาพเดิมโดยในสภาวะอากาศต่างๆ ไป (ข) การคืนกลับสภาพเดิมโดยฉายด้วยแสงจากหลอดไฟฟ้าทั้งสแตน 40 วัตต์

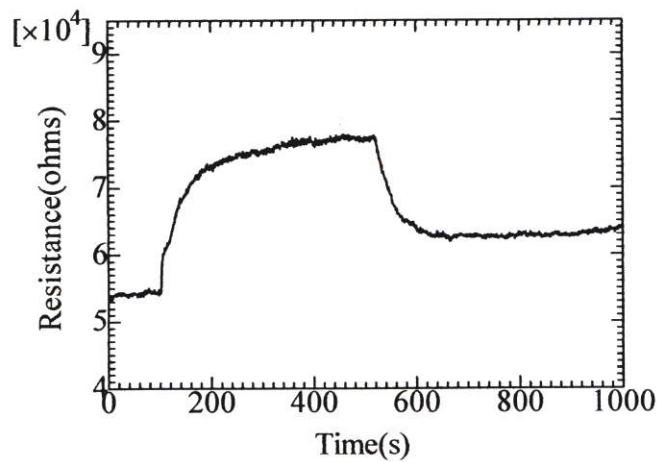
4.3.6 ผลการวัดความเสถียร

ในการทดลองนี้ เป็นการศึกษาคุณสมบัติความเสถียรภาพของเซ็นเซอร์วัดสาร VOCs ที่เคลือบท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่ง 16 เซนติเมตร และเวลาการสังเคราะห์ 20 นาที ความเสถียรภาพของ

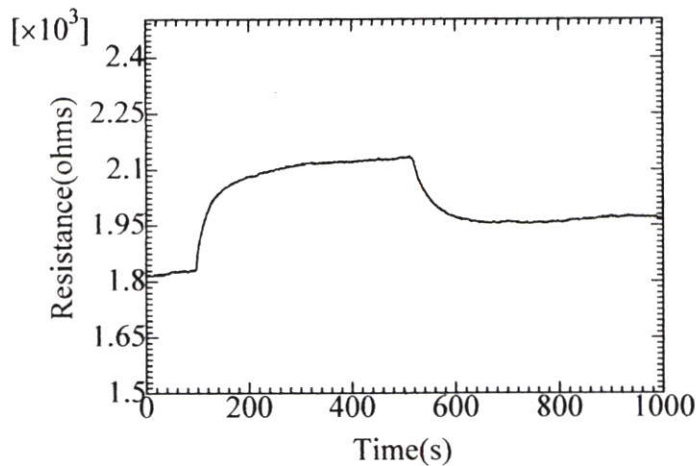
อุปกรณ์ในการทดลองนี้จะพิจารณาจากผลการวัดคงที่เมื่อผ่านการทดสอบและใช้งานมากกว่า 1 ครั้งขึ้นไป ในการวัดแต่ละครั้งจะทำการสร้างค่าความต้านทานเริ่มต้นที่จุดเบสไลน์โดยปล่อยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 100 วินาที จากนั้นจึงปล่อยอะซิโตนความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 400 วินาที หลังจากนั้นจึงปล่อยให้ชิ้นงานคืนกลับสภาพเดิมด้วยการหยุดปล่อยอะซิโตนแล้วปล่อยให้โมเลกุลระเหยออกจากชิ้นงานโดยการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 500 วินาที จากนั้นจึงเก็บชิ้นงานตัวเดียวกันนี้ไว้เป็นเวลา 6 วัน และ 12 วัน จึงนำมาวัดซ้ำอีกครั้ง ซึ่งผลการทดลองในแต่ละครั้งแสดงได้ดังรูปที่ 4.32



(ก) การวัดครั้งแรก



(ข) ห่างจากวันแรก 6 วัน



(ก) ห่างจากวันแรก 12 วัน

รูปที่ 4.32 การตอบสนองโดยการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อไออะซีโตน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ของชิ้นงานที่สร้างด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน โดย (ก) เป็นผลการวัดครั้งแรกหลังจากสร้างชิ้นงานเสร็จ (ข) ผลการวัดซึ่งห่างจากวันแรก 6 วัน (ค) ผลการวัดซึ่งห่างจากวันแรก 12 วัน

รูปที่ 4.32(ก)-(ค) เป็นผลการศึกษาคูณสมบัติความเสถียรภาพของอุปกรณ์ตรวจจับสาร VOCs ในรูปที่ 4.32(ก) เป็นการทดสอบครั้งที่ 1 จะนำชิ้นงานมาทดสอบครั้งแรกหลังจากสร้างเสร็จ พบว่า มีความต้านทานเริ่มต้นอยู่ที่ 35.83 kΩ เปอร์เซ็นต์การตอบสนองมีค่าอยู่ประมาณ 83 และใช้เวลาในการคืนกลับสภาพเดิมมากกว่า 500 วินาที จากนั้นจึงเก็บชิ้นงานไว้เป็นเวลา 6 วัน จึงนำมาทำการทดสอบครั้งที่ 2 ในรูปที่ 4.32(ข) พบว่า ชิ้นงานมีค่าความต้านทานเริ่มต้นอยู่ที่ 54.380 kΩ เปอร์เซ็นต์การตอบสนองมีค่าอยู่ประมาณ 42 และใช้เวลาในการคืนกลับสภาพเดิมมากกว่า 500 วินาที หลังจากนั้นก็เก็บชิ้นงานเดียวกันนี้ไว้อีก 6 วัน จึงนำมาทำการทดสอบครั้งที่ 3 ในรูปที่ 4.32 (ค) พบว่า ชิ้นงานมีค่าความต้านทานเริ่มต้นอยู่ที่ 1.83 kΩ ค่าเปอร์เซ็นต์ในการตอบสนองมีค่าอยู่ประมาณ 16 และใช้เวลาในการคืนกลับสภาพเดิมมากกว่า 500 วินาที ซึ่งจะเห็นว่า การทดสอบแต่ละครั้งชิ้นงานจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นลดลงเรื่อยๆ ทั้งนี้อาจเกิดจากเมื่อเก็บชิ้นงานไว้ในบรรยากาศอากาศต่างๆ ไปความชื้นที่อยู่ในอากาศจะมีผลกับฟิล์ม ซึ่งฟิล์มคิงที่เราสร้างนั้นนอกจากจะประกอบด้วยท่อนาโนคาร์บอนแล้วยังมีสิ่งเจือปนซึ่งเป็นเหล็ก จึงทำให้ความชื้นซึ่งประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับออกซิเจนจับตัวกับเหล็ก ความชื้นเหล่านี้จะเสียอิเล็กตรอนให้กับเหล็ก ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงานลดลง[38] ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำให้โมเลกุลเหล่านี้หลุดออกจากเหล็ก นอกจากนี้ยังทำให้เปอร์เซ็นต์ในการตอบสนองของชิ้นงานลดลงด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ เป็นการนำเสนอการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดไอสาร VOCs โดยการเคลือบฟิล์มของ ท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่นฐานรองเซ็นเซอร์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม ด้วยวิธีชีวิต โดยใช้ หมอกของแอลกอฮอล์ผสมกับผงฟลูโรเซน แผ่นฐานรองเซ็นเซอร์สามารถสร้างได้โดยการนำแผ่น ซิลิคอน ขนาด 0.7 x 0.8 เซนติเมตร มาสร้างชั้นซิลิคอนออกไซด์และชั้นอลูมิเนียมด้วยวิธีออกซิ เดชันและการระเหยสารในสุญญากาศ ตามลำดับ จากนั้น ทำการสร้างลวดลายของขั้วไฟฟ้า อลูมิเนียมซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วอะลูมิเนียมมีขนาด 50 ไมครอน ด้วยกระบวนการสร้างโฟโต ลิโทกราฟี

ในการทดลองได้สร้างเซ็นเซอร์ที่มีและไม่มีชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน จากนั้นจึงนำไปทดสอบ ในไอสาร VOCs อิมิด์ อะซีโตน เอทานอล และ เมทานอล ผลจากการทดลองพบว่า เซ็นเซอร์ที่ สร้างโดยไม่มีฟิล์มสามารถตอบสนองต่อไอสาร VOCs อิมิด์ทั้งสามชนิดได้ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ การตอบสนองใกล้เคียงกันมากจนถือได้ว่ามีค่าเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับ เซ็นเซอร์ที่สร้างโดยมีฟิล์มจะมีค่าการตอบสนองต่อไอสาร VOCs ต่างชนิด แยกกันอย่างเห็นได้ชัด และสามารถตอบสนองได้ดีกว่า ดังนั้น เซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอนสามารถที่จะนำไปใช้ ในการตรวจวัดไอสาร VOCs ได้ ในการสร้างเซ็นเซอร์ได้ทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและ ระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มซึ่งได้ส่งผลต่อเซ็นเซอร์ในการตอบสนองต่อไอสาร VOCs และ คุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซ็นเซอร์จะมีค่าตั้งแต่ $10^2 \Omega$ จนถึง $10^8 \Omega$ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการเคลือบฟิล์ม ในการเคลือบฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ตำแหน่ง อุณหภูมิสูง ฟิล์มที่ได้จะแสดงคุณสมบัติของโลหะ ในขณะที่ฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกเคลือบที่ ตำแหน่งอุณหภูมิต่ำแสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ โดยสามารถตอบสนองต่อก๊าซได้ดีกว่าฟิล์มที่ เป็นโลหะเมื่อวัดที่อุณหภูมิห้อง โดยสามารถตอบสนองต่อก๊าซทดสอบ ความเข้มข้นต่างๆกันได้ดี (เช่น สามารถวัด ไออะซีโตน ตั้งแต่ 1000 ppm จนถึง 20 %) นอกจากนี้การทดลองยังแสดงให้เห็น ว่าเซ็นเซอร์ยังมีปัญหาในด้านเวลาที่ใช้ในการคืนตัว ในการวัดไอ VOCs ที่มีความเข้มข้นสูงๆ จึงได้ทำ การปรับปรุงด้วยการฉายด้วยแสงไฟ(หลอดไฟทั้งสแตนด์ 40วัตต์)ลงบนเซ็นเซอร์ พบว่า เซ็นเซอร์ใช้ เวลาในการคืนกลับสภาพเดิมเร็วขึ้นประมาณ 6-7 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเวลาในการฉายแสงไฟที่ เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามเซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอนยังมีปัญหาในด้วยความ เสถียรภาพ ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขต่อไป ผลการศึกษานี้จะเป็นแนวทางสำหรับการสร้างท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุตรวจจับก๊าซต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] “ไฮบริไดเซชัน”, [Online].
Available : http://chemsci.kku.ac.th/kwanjai/pps/hybridization_PPshow.pps
- [2] R. H. Petrucci et al.: General Chemistry: Principles and Modern Applications, Prentice hall, 8th edition (2002).
- [3] N. Wang, Z. K. Tang, G. D. Li and J. S. Chen, Nature, 2000, 408, 50 [Links].
- [4] “สารประกอบคาร์บอน”. [Online].
Available : http://www.geocities.com/tony_nattapol/SH02_5.htm
- [6] “ท่อนาโนคาร์บอน”, [Online].
Available : <http://www.technologymedia.com/article/detail.asp?arid=2484&pid=257>
- [7] T.W. Ebbesen, Carbon Nanotubes, Edited by T.W. Ebbesen, CRC Press (Boca Raton, New York, London, Tokyo) 1997, Chapter I.
- [8] R. Saito, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus: Physical Properties of Carbon Nanotubes (Imperial College Press, London, 1999).
- [9] S. Iijima, Nature (London) 354 (1991) 56-58.
- [10] Masciangioli, T. and W.X. Zhang, Environmental technologies at the nanoscale. Environmental Science & Technology, 2003. 37(5): p. 102A-108A
- [11] S. Ghosh, A. K. Sood, N. Kumar, “Carbon Nanotube Flow Sensors”, Science Vol. 299. no. 5609, pp. 1042 – 1044.2003.
- [12] S. Sotiropoulou and N.A.Chaniotakis, “Carbon Nanotube Array-based Biosensor”. Analytical and Bioanalytical Chemistry, vol 375, pp. 103-105, 2003.
- [13] J.M. Xu. "Highly Ordered Carbon Nanotube Arrays and IR Detection", Infrared Physics & Technology, vol 42, pp.485-491, 2001.
- [14] T. W. Tomblor, C. Zhou, L. Alexseyev, J. Kong, H. Dai, L. Liu, C. S. Jayanthi, M. Tang, S.-Y. Wu.” Reversible electromechanical characteristics of carbon nanotubes under local-probe manipulation vol 405 , pp 769-772. 2000.
- [15] พิษณุ นาด จิวสิทธิ์ประไพ “การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีเทอร์มอลซีวีดีจาก แอลกอฮอล์”วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไมโคร อิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [16] ปฎิคม ศรีชมพล “การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์อย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1

บรรยากาศ”วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [17] ชูศักดิ์ คัล้ายแจ่มและวิริยา สุวรรณเนตร.รายงานผลการฝึกงานภาคฤดูร้อนเรื่อง การศึกษา
การทำงานของเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซด้วยเทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค,
งานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์(RDE3) ฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสาขาอิเล็กทรอนิกส์
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ,หน้า 5
- [18] ยงยุทธ วรรณมา ปทส.(เทคนิคระบบไฟฟ้าสื่อสาร) “การพัฒนาเซ็นเซอร์ขนาดเล็กสำหรับ
ตรวจวัดก๊าซ CO ด้วยพอลิอนิลีน”วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าธนบุรี
- [19] “van der Waals force”, [Online] Available: [http://www.il.mahidol.ac.th/course/ap_chemistry/
chemical_bonding/vanderwaals.htm](http://www.il.mahidol.ac.th/course/ap_chemistry/chemical_bonding/vanderwaals.htm)
- [20] J. Suehiro, H. Imakiire, S. Hidaka, W. Ding, G. Zhou, K. Imasaka, M. Hara, ' Schottky-
type response of carbon nanotube NO₂ gas sensor fabricated onto aluminum electrodes
by dielectrophoresis', Sensors and Actuators B , vol.114 pp. 943-949,2006.
- [21] Modi, N. Koratkar, E. Lass, B. Wei, and P. M. Ajayan, " Miniaturized gas ionization
sensors using carbon nanotubes ". Nature vol 424, pp. 171-174,2003.
- [22] T.Some ya, J.Small, P.Kim, C.Nuck olls, and J.T .Y ardley, “Alcohol Vapor Sensors
Based on Single-Walled Carbon Nanotube FieldEffect Transistors," Nano Lett. vol 3, pp.
877-881, 2003.
- [23] E. S. Snow, F. K. Perkins, E. J. Houser, S. C. Badescu, T. L. Reinecke, "Chemical
Detection with a Single-Walled Carbon Nanotube Capacitor ," Science vol. 307, pp.
1942-1945 , 2005.
- [24] Jing Li1, Yijiang Lu1, Qi Laura Ye1, Jie Han1 and M.Meyyappan
- [25] “gas”, [Online] Available:
www.kku.ac.th/mediacenter/mediacenteruploads/libs/html/1321/content/04gas.doc.
- [26] “Hybridization”, [Online] Available:
<http://pirun.ku.ac.th/~g4686046/chemistry/Stoichiometry.ppt>
- [27] “สารละลาย”, [Online] Available:
http://www.mwit.ac.th/~cha_swat/text/document_stoichiometry.doc
- [28] Gary O. Nelson. Gas Mixtures Preparation and Control. Lewis publishers, INC. (1992)
- [29] “DAQ device รุ่น NI-USB6009”, [Online] Available:

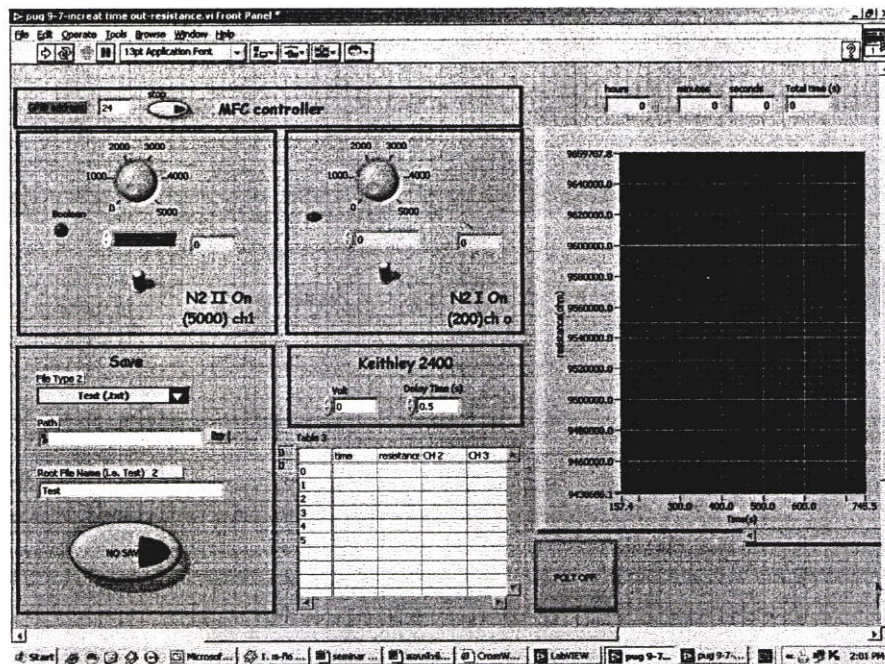
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/14604>

- [30] S.Chaisitsak, A. Tuantraont and J. Nukeaw, “The effect of process parameters in the growth of carbon nanotubes at atmospheric pressure using ferrocence-ethanol mist’, 7th International Conference on the science and application of Nanotubes, Nagano, Japan, June 2006.
- [31] J. Kong, N. R. Franklin, C. Zhou, M. G. Chapline, Shu Peng, K.Cho, H. Dai, ‘Nanotube Molecular Wires as Chemical Sensors’, Science ., Vol. 287., pp. 622 – 625, January 2000
- [32] นายทรงวุฒิ ศรีสว่าง นายนพพร จรุงเกียรติ นางสาวศรินญา ภู่มัจฉิตต์, ภัยอันตรายจากสารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds) และการจัดการกับสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่เป็นตัวทำ,
[Online] Available: <http://monitor.onep.go.th/document/voc.htm>
- [33] “สารเคมี”, [Online] Available:<http://www.anamai.moph.go.th/chemnet/chemistry.asp>
- [34] สุริชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์, วิศวกรรมลาดกระบัง (อยู่ระหว่างพิจารณา)
- [35] H. Ago, T. Kugler, F. Cacialli, W.R. Salaneck, M.S.P. Shaffer, A.H. Windle, R.H. Friend, Work functions and surface functional groups of multiwall carbon nanotubes, J. Phys. Chem. B 103 (1999) 8116–8121.
- [36] S. Suzuki, C. Bower, Y. Watanabe, and O. Zhou, “Work functions and valance band states of pristine and Cs-intercalated single walled carbon nanotube bundles,” Appl. Phys. Lett., vol. 76, pp. 4007–4009, 2000.
- [37] “เครื่องระเหยในสุญญากาศ”, [Online]
Available:http://www.icmm.csic.es/fis/english/evaporacion_resistencia.html
- [38] R.P. Tandon a, M.R. Tripathy a, A.K. Arora b, ‘ Surat Hotchandani Gas and humidity response of iron oxide—Polypyrrole nanocomposites,’ Sensors and Actuators, vol 114 ,pp. 768–773, 2006
- [39] H-Q. Nguyen, J-S. Huh , ‘Behavior of single-walled carbon nanotube-based gas sensors at various temperatures of treatment and operation,’ Sensors and Actuators, vol 117, pp. 426-430, 2006
- [40] N. H. Quang, M. V. Trinh, B-H. Lee, J-S. Huh, ‘ Effect of NH₃ gas on the electrical properties of single-walled carbon nanotube bundles,’ Sensors and Actuators, ‘voll 113,pp.341–346,2006.

ภาคผนวก ก

โปรแกรมที่ใช้ในการวัดและควบคุมระบบการวัดอุปกรณ์ตรวจจับ
ไอสารอินทรีย์

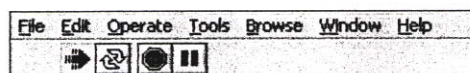
โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่มีใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนมาก เพราะสะดวกในการใช้วิเคราะห์ปัญหาทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถรับสัญญาณ input ผ่านทาง Data acquisition board และสามารถแสดง Output ในรูปแบบของกราฟหรือมิเตอร์ได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำโปรแกรม LabVIEW 7.1 มาใช้ในการพัฒนาชุดทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหย โปรแกรมแลปวิฟทำหน้าที่ควบคุม คำนวณ และแสดงผลที่ได้จากการวัด แสดงได้ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 โปรแกรม วัดและควบคุมชุดทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดไอสารอินทรีย์ (ส่วนของ front Panel)

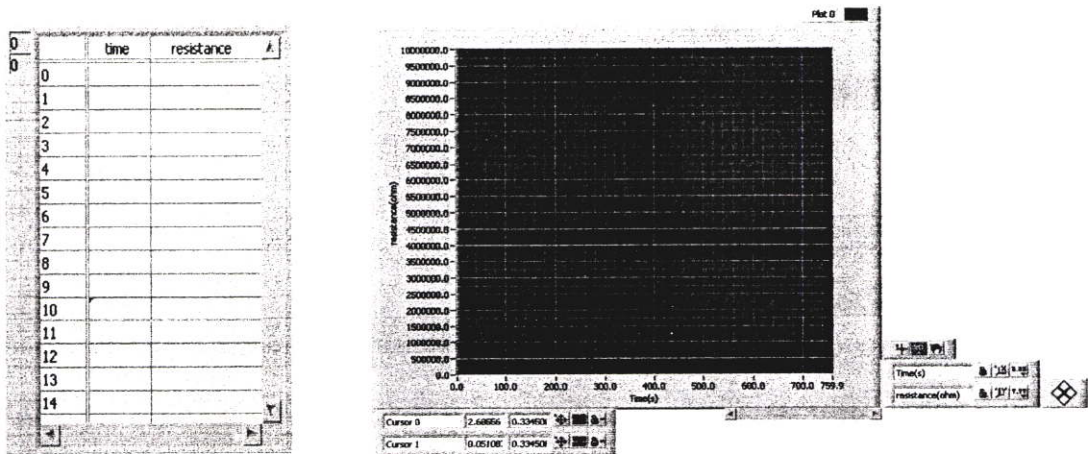
ก.1 ส่วนประกอบสำคัญของ Block diagram ประกอบด้วย

ก.1.1 ควบคุมและแสดงสถานะภาพการทำงานของโปรแกรม เป็นส่วนที่ใช้ในการควบคุมและแสดงสถานะของโปรแกรม

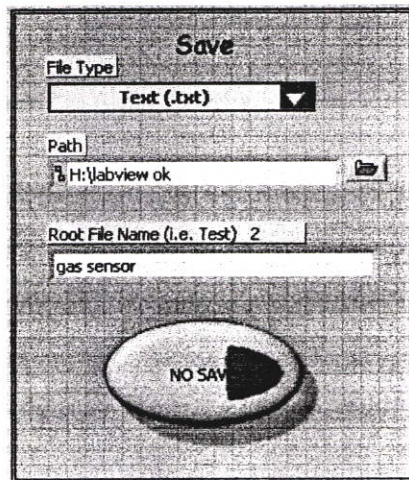


ก.1.2 แสดงผลที่ได้จากการวัด

เป็นส่วนที่แสดงสัญญาณที่รับเข้ามาจาก DAQ Board ออกในรูปของกราฟ



ก.1.3 บันทึกข้อมูล

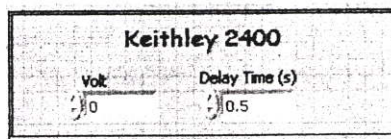


ก.1.4 เวลา

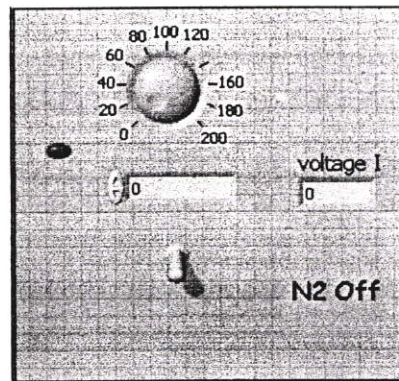
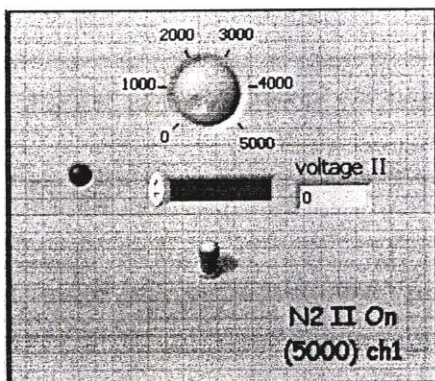
เป็นส่วนที่แสดงเวลาจริงที่ใช้ในการทดลอง โดยมีหน่วยเป็น ชั่วโมง(Hours), นาที (minutes), วินาที (seconds) และ total time เป็นเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นวินาที(s)

hours	minutes	seconds	Total time (s)
0	0	5	4.665

ก.1.5 เครื่องมือวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้าของบริษัท Keithley รุ่น 2400



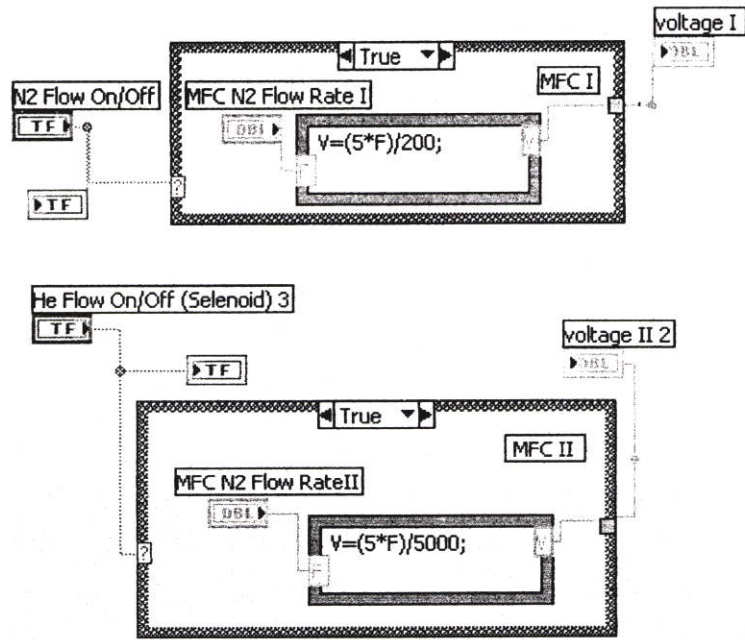
ก.1.6 ส่วนที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ



ก.2 ส่วนประกอบของ Block diagram ประกอบด้วย

ก.2.1 การคำนวณอัตราการไหลของ MFC I และ II

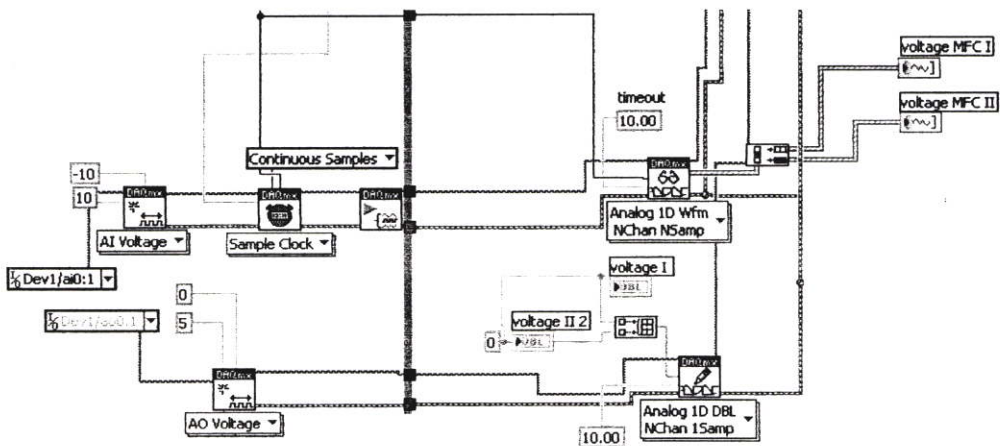
ทำได้โดยกำหนดค่าอัตราการไหล (F) จากนั้นค่า F ถูกแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า (voltage I และ II) โดย $V = (5XF)/200$ สำหรับ MFC I (อัตราการไหลสูงสุด 200 sccm) และ $V = (5XF)/5000$ สำหรับ MFC II (อัตราการไหลสูงสุด 5,000 sccm)



รูปที่ ก.2 Block diagram แสดงคำนวณอัตราการไหลของ MFC I และ II

ก.2.2 DAQ Device (NI-USB6008)

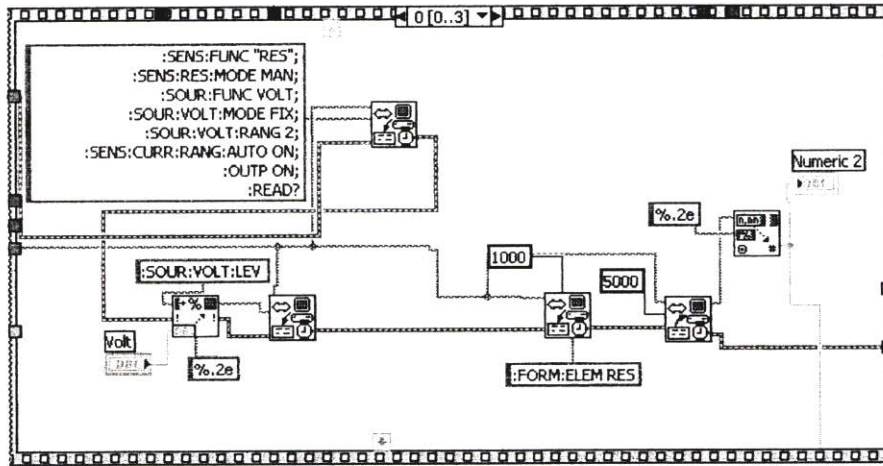
DAQ ทำหน้าที่ควบคุมให้ MFC II มีอัตราการไหลตามค่าที่กำหนด โดยค่าที่กำหนดนี้เป็นค่าของ voltage I และ II ซึ่งจะส่งมายัง Analog ID DBL -> NChan 1Samp แสดงได้โดย Block diagram รูปที่ 3



รูปที่ ก.3 Block diagram การทำงานของ DAQ

ก.2.3 Keithley

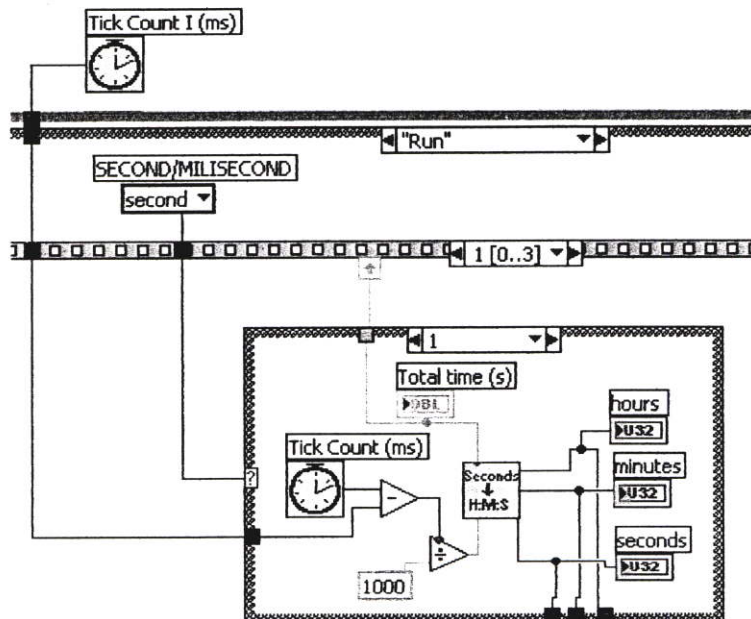
Block diagram นี้จะควบคุมให้ Keithley ทำการจ่ายแรงดัน และวัดค่าความต้านทานกลับมายัง เครื่องคอมพิวเตอร์แสดงได้โดย Block diagram รูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 Block diagram การทำงานของ Keithley

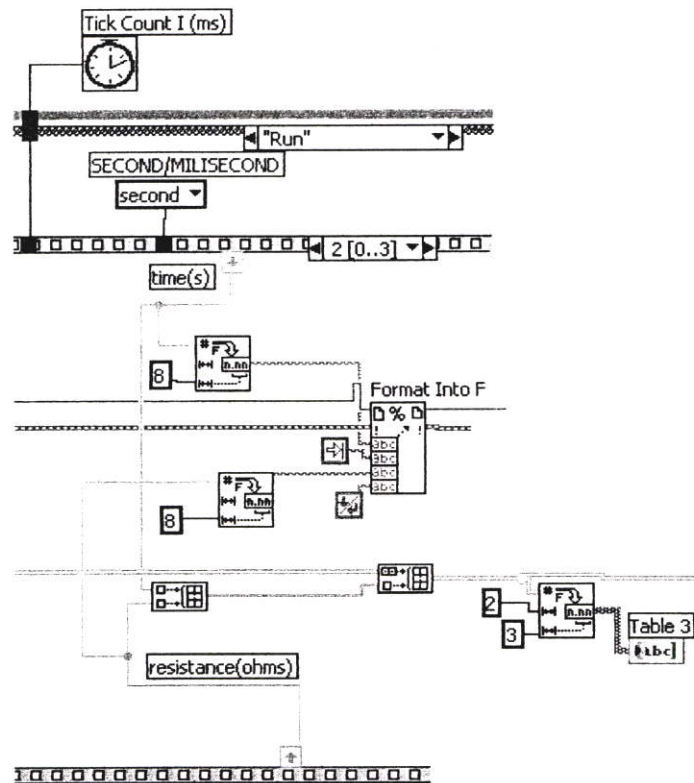
ก.2.4 การคำนวณเวลา

รูปที่ ก.5 Block diagram แสดงการคำนวณเวลา โดย เวลา(s) = (Tick Count I(ms) - Tick Count II(ms))/1000



รูปที่ ก.5 Block diagram แสดงการคำนวณเวลา

ก.2.5 บันทึกข้อมูล



รูปที่ ก.6 Block diagram แสดงการบันทึกข้อมูล

ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

Equilibrium Structure

Average Diameter of SWNT's	1.2-1.4 nm
Distance from opposite Carbon Atoms (Line 1)	2.83 Å
Analogous Carbon Atom Separation (Line 2)	2.456 Å
Parallel Carbon Bond Separation (Line 3)	2.45 Å
Carbon Bond Length (Line 4)	1.42 Å
C-C Tight Bonding Overlap Energy	~ 2.5 eV
Group Symmetry (10, 10)	C5V

Lattice: Bundles of Ropes of Nanotubes: Triangular Lattice(2D)

Lattice Constant	17 Å
------------------	------

Lattice Parameter:

(10, 10) Armchair	16.78 Å
(17, 0) Zigzag	16.52 Å
(12, 6) Chiral	16.52 Å

Density:

(10, 10) Armchair	1.33 g/cm ³
(17, 0) Zigzag	1.34 g/cm ³
(12, 6) Chiral	1.40 g/cm ³

Interlayer Spacing:

(n, n) Armchair	3.38 Å
(n, 0) Zigzag	3.41 Å
(2n, n) Chiral	3.39 Å

Optical Properties

Fundamental Gap:

For (n, m); n-m is divisible by 3 [Metallic] 0 eV

For (n, m); n-m is not divisible by 3 [Semi-Conducting] ~0.5 eV

Electrical Transport

Conductance Quantization $n \times (12.9 \text{ kW})^{-1}$

Resistivity $10^{-4} \text{ W}\cdot\text{cm}$

Maximum Current Density 10^{13} A/m^2

Thermal Transport

Thermal Conductivity(Room Temperature) $\sim 2000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Phonon Mean Free Path $\sim 100 \text{ nm}$

Relaxation Time $\sim 10^{-11} \text{ s}$

Elastic Behavior

Young's Modulus (SWNT) $\sim 1 \text{ TPa}$

Young's Modulus (MWNT) 1.28 TPa

Maximum Tensile Strength $\sim 30 \text{ GPa}$

ภาพผนวก ค
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวัดความเข้มข้นก๊าซ

ก.1 การวัดปริมาณความเข้มข้นของ VOCs

ปริมาณความเข้มข้นของ VOCs คือ ปริมาณความเข้มข้นของ VOCs ผสมอยู่ในสารอื่นที่ไม่ใช่ VOCs ชนิดเดียวกัน หรือเรียกว่า ไอผสม ซึ่งส่วนใหญ่นิยมวัดในรูปของร้อยละ (ร้อยละ โดยมวล (%W/W) และร้อยละ โดยปริมาตร (%V/V)) หรือ ส่วนในล้านส่วน (parts per million; ppm) เช่นเดียวกันกับการวัดของก๊าซผสม ดังนั้นในหัวข้อต่อไปนี้จะเป็นการกล่าวถึงพื้นฐาน การวัด และการคำนวณปริมาณความเข้มข้นของ VOCs โดยอาศัยพื้นฐานจากการคำนวณจากก๊าซผสม เช่น ทฤษฎีเบื้องต้นของก๊าซและก๊าซในอุดมคติเพื่อให้มีความเข้าใจในระบบและการคำนวณสำหรับการวัดปริมาณความเข้มข้นของ VOCs โดยจะกล่าวได้ดังหัวข้อต่อไป

ก.1.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของก๊าซและก๊าซอุดมคติ[25-26]

ก๊าซ คือ สสารที่มีอนุภาคอยู่ห่างกันมาก มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทุกทิศทางอย่างไม่เป็นระเบียบ มีสมบัติฟุ้งกระจาย แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อย ความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลว และของแข็ง ในการกำหนดสถานะของก๊าซจะต้องระบุปริมาณ อุณหภูมิ และความดันเสมอ นอกจากนี้ปริมาณของก๊าซจะเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยน[25]

ก๊าซอุดมคติ คือ แก๊สที่อยู่ในสถานะใดๆ ที่เป็นไปตามกฎของแก๊สอุดมคติ คือ กฎของบอยล์ กฎของชาร์ล กฎของอะโวกาโดร (Avogadro) ซึ่งเมื่อรวมกฎทั้ง 3 เข้าด้วยกันทำให้ได้กฎของแก๊สอุดมคติ แสดงดังสมการ (ก.1)

$$PV = nRT \quad (\text{ก.1})$$

จากสมการ (ก.1) เป็นสมการค่าคงที่ของแก๊ส (ideal gas constant) ซึ่งพบว่าที่สภาวะมาตรฐาน (STP) ปริมาตรของแก๊ส 1 โมล จะเท่ากับ 22.141 ลิตร ที่ความดัน 1 บรรยากาศอุณหภูมิ 273.15 K พบว่า ค่าคงที่ของแก๊ส (Universal gas constant) หรือ R มีค่าเท่ากับ 0.08205 l. atm / mol. โดยแก๊สทุกชนิดจะมีค่า R เท่ากัน

V คือ ปริมาตรของก๊าซ เนื่องจากก๊าซมีสมบัติฟุ้งกระจายและเคลื่อนที่ตลอดเวลา ปริมาตรของก๊าซจึงมีค่าเท่ากับปริมาตรของภาชนะที่บรรจุแก๊สนั้น หน่วยของปริมาตรคือ ลิตรหรือลูกบาศก์เดซิเมตร มิลลิเมตรหรือลูกบาศก์เซนติเมตร และลูกบาศก์เมตร

T คืออุณหภูมิของก๊าซ นิยมวัดเป็นองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) องศาฟาเรนไฮต์ ($^{\circ}\text{F}$) องศาโรเมอร์ ($^{\circ}\text{R}$) และเคลวิน (K) หน่วยที่ใช้มากที่สุดในเรื่องการคำนวณของก๊าซ คือ เคลวิน (K) ซึ่งสัมพันธ์กับองศาเซลเซียส คือ $K = 273 + ^{\circ}\text{C}$ ค่าที่ละเอียดคือ 273.15

P คือ ความดันของก๊าซ ซึ่งหมายถึง แรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกัน ในกรณีที่ก๊าซบรรจุอยู่ในภาชนะ ความดันของก๊าซเกิดจากการชนกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับภาชนะ

หน่วยของความดัน คือ บรรยากาศ (atm) มิลลิเมตรของปรอท (mmHg) นิวตันต่อตารางเมตร ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดย $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$

STP คือ อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Standard Temperature and Pressure) อุณหภูมิและความดันมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0 องศาเซลเซียส หรือ 273.15 เคลวิน และ 1 บรรยากาศ หรือ 760 มิลลิเมตรของปรอท ในวิชาเคมีนิยมใช้บรรยากาศ (atm)

โมล (n) คือ หน่วยของปริมาณสารหน่วยหนึ่ง มีวิธีหา 4 แบบ 1) จำนวนอนุภาคต่อโมล ของสาร 2) จำนวนโมลกับมวลของสาร 3) ปริมาตรต่อโมล ของก๊าซ และ 4) ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมล อนุภาค มวลและปริมาตร

ก.1.2 การคำนวณปริมาณความเข้มข้นของ VOCs [28]

ปริมาณความเข้มข้นของ VOCs ในไอผสมนั้น จะมีปริมาณความเข้มข้นมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับก๊าซที่ผสม โดยถ้าปริมาณความเข้มข้นของ VOCs มีปริมาณความเข้มข้นมากกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ การวัดจะใช้บอกในหน่วย ของร้อยละ สามารถคำนวณจากสมการ (ก.2)

$$C_{\%} = \frac{10^2 V_a}{V_a + V_b + \dots + V_n} \quad (\text{ก.2})$$

สมการ (ก.2) เป็นการคำนวณปริมาณความเข้มข้นของไอสารในหน่วยร้อยละ สำหรับแก๊สอุดมคติโดย $C_{\%}$ คือคำนวณความเข้มข้นสารละลายในหน่วยร้อยละ V_a คือ ปริมาตรของสารที่ต้องการทราบในแก๊สผสมหรือ ไอผสม $V_a + V_b + \dots + V_n$ (อุณหภูมิคงที่)

สำหรับปริมาณความเข้มข้นของ VOCs ที่มีปริมาณความเข้มข้นน้อยกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ การวัดจะนิยมใช้บอกในหน่วย ส่วนในล้านส่วน (parts per million; ppm) หรือ พีพีเอ็ม สามารถคำนวณจากสมการ(ก.3)

$$C_{ppm} = \frac{10^6 V_a}{V_D + V_a} \quad (\text{ก.3})$$

สมการ ก.3 เป็นการคำนวณความเข้มข้นของไอสารในหน่วยพีพีเอ็ม โดย C_{ppm} คือคำนวณความเข้มข้นสารละลายในหน่วยพีพีเอ็ม V_D คือ ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการเจือจาง และ V_a คือ ปริมาตรของสารที่ต้องการทราบในแก๊สผสมหรือ ไอผสม $V_D + V_a$

จากสมการ (ค.2) และ (ค.3) กำหนดให้ $V_a = \frac{nRT}{P}$ โดยที่ $n = \frac{W}{M}$ (W คือมวล (กรัม) และ M คือมวลโมเลกุล) ดังนั้น

$$V_a = \frac{WRT}{MP} \quad (\text{ค.4})$$

ดังนั้น ความเข้มข้นในสมการ (ค.2) และ (ค.3) คือ

$$C_{\%} = \frac{10^2 V_a}{V_D + V_a} = \frac{10^2 \frac{WRT}{MP}}{\frac{WRT}{MP} + V_D} = \frac{10^2}{1 + \frac{V_D MP}{WRT}} \quad (\text{ค.5})$$

$$C_{ppm} = \frac{10^2 V_a}{V_D} = \frac{10^2 \frac{WRT}{MP}}{V_D} \quad (\text{ค.6})$$

ในสมการที่ (ค.6) เนื่องจากค่า V_a มีค่าน้อยมาเมื่อเทียบกับ ค่า V_D จึงไม่นำมาคำนวณในสมการ

โดย $W = V_L \rho_L$ เมื่อ V_L และ ρ_L คือปริมาตรและความหนาแน่นของของเหลว ตามลำดับ แทนในสมการ ค.6 ได้

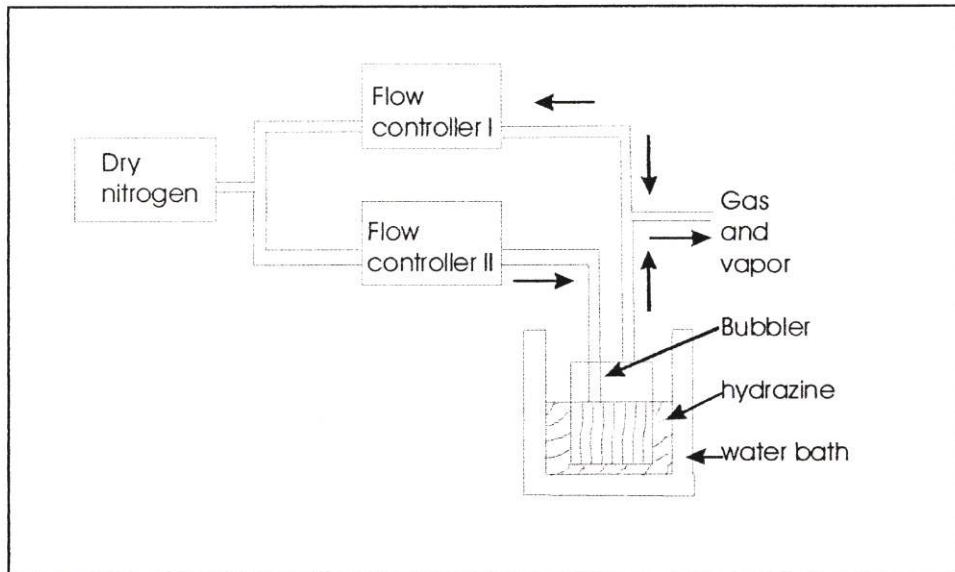
$$C_{ppm} = \frac{10^6 V_L \rho_L RT}{V_D MP} \quad (\text{ค.7})$$

จากสมการ (ค.7) ที่ อุณหภูมิห้อง (25°C) และความดัน 1 บรรยากาศ (760 mmHg) ดังนั้น

$$C_{ppm} = \frac{24.5 \times 10^6 V_L \rho_L}{V_D M} = \frac{24.5 \times 10^6 W}{V_D M} \quad (\text{ค.8})$$

ค.2 ระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้น VOCs ซึ่งเจือจางด้วยก๊าซ

สารประกอบอินทรีย์ระเหยจัดเป็นสารที่เป็นพิษเมื่ออยู่ในอากาศ ดังนั้นเมื่อมีการทดสอบก๊าซ เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นกับ VOCs จึงจำเป็นต้องทดสอบในระบบปิดและเป็นระบบที่สามารถควบคุม ปริมาณความเข้มข้นของ VOCs ได้ โดยระบบที่กล่าวนี้แสดงดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 โครงสร้างของระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้น VOCs ซึ่งเจือจางด้วยก๊าซ

จากรูปที่ ค.1 Mass flow controller I และ II ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหล หรือปริมาตรของ ก๊าซในโตรเจน โดย Mass flow controller I ควบคุมการปริมาณการไหลของก๊าซในโตรเจนสำหรับ ผสมกับไอของ VOCs สำหรับ Mass flow controller II จะควบคุมปริมาณการไหลของก๊าซ ในโตรเจนให้มีอัตราการไหลคงที่สำหรับทำหน้าที่เป็นก๊าซที่จะพาไอของสารประกอบอินทรีย์ ระเหย มาผสมกับในโตรเจนที่ควบคุมโดย Mass flow controller I โดยวิธีการนี้เรียกว่า การเจือจาง สารประกอบอินทรีย์ไอระเหยด้วยก๊าซ ซึ่งเมื่อมีการเจือจางด้วยก๊าซในโตรเจนมากๆ ปริมาณความ เข้มข้นของ VOCs จะน้อย หรือถ้าก๊าซในโตรเจนน้อยเกินไป ปริมาณความเข้มข้น VOCs จะมาก ดังนั้นการเจือจางหรือการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซในรูปที่ ค.1 ให้มีปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ ได้ปริมาณความเข้มข้นของ VOCs ตามที่กำหนด

ก.2.1 การคำนวณปริมาณความเข้มข้น จากระบบ

จากรูปที่ ค.1 ซึ่งเป็นระบบควบคุมปริมาณความเข้มข้น VOCs ซึ่งเจือจางด้วยก๊าซ จากระบบดังกล่าวสามารถคำนวณความเข้มข้นของ VOCs จากสมการ (ค.7) และ (ค.8) ได้ดังนี้

$$C_{ppm} = \frac{22.4 \times 10^6 \left(\frac{T}{273} \right) \left(\frac{760}{P} \right) W_t}{(q_D + q_v) M} \quad (\text{ค.9})$$

จากสมการ (ค.9) ที่ อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และความดัน 1 บรรยากาศ (760 mmHg)

$$C_{ppm} = \frac{24.5 \times 10^6 W_t}{(q_D + q_v) M} \quad (\text{ค.10})$$

$$q_v = \frac{24.5 W}{M} \quad (\text{ค.11})$$

ตัวอย่าง การคำนวณความเข้มข้นไอสารอะซีโตน จากสมการ(ค.10)และ(ค.11)

กำหนด $q_D = q_{dN} + q_{dOrganicvapor}$, $w_t = 0.039$ g/min (ภาคผนวก ข.) โดยการผ่านของก๊าซไนโตรเจน

อัตรา 100 Scm ($q_{dOrganicvapor}$), $q_{dN} = 707.233$ sccm และ

M(มวลของอะซีโตน = 58 g/mol แทนในสมการ (ค.10) และ (ค.11) ดังนี้

$$q_v = \frac{24.5 w_t}{M} = \frac{24.5(L/mol)0.039(g/min)}{58(g/mol)} = 0.0165 \text{ L/min}$$

$$C_{ppm} = \frac{24.5(L/mol) \times 10^6 \times 0.039(g/min)}{0.823733(L/min)58(g/mol)} = 20000$$

โดยที่ q_D คือ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้เจือจางไอระเหยอินทรีย์(ลิตรต่อนาที)

- q_v คือ อัตราการไหลของไอระเหยอินทรีย์(ลิตรต่อนาที)
- q_{dN} คือ อัตราการไหลของก๊าซใน โตรเจนที่ไม่ผ่านไอของสารอินทรีย์
- $q_{dOrganicvapor}$ คือ อัตราการไหลของก๊าซใน โตรเจนที่ผ่านไอของสารอินทรีย์
- W_t คือ มวลของไอสารอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอ(กรัมต่อนาที)
- M คือ มวลโมเลกุลของสารอินทรีย์ (กรัมต่อนาที)
- C_{ppm} คือ ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (พีพีเอ็ม)
- * พีพีเอ็ม(ppm) Part Per Million คืออัตราส่วนของก๊าซต่อหนึ่งล้านส่วน

ภาพผนวก ง

การคำนวณเบื้องต้นปริมาณความเข้มข้นของสาร VOCs ซึ่งอิมัตัว
ที่บรรยากาศห้องและอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

การคำนวณปริมาณความเข้มข้นของสาร VOCs ซึ่งอิมิต์ที่บรรยากาศและอุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความดันไอของของเหลว ดังนี้

$$\log p = A - \frac{B}{(C + t)} \quad \text{และ} \quad C_{\%} = \frac{10^2 p_n}{P}$$

โดย P คือ ความดันไอ 760 mmHg

p_n คือ ความดันไอย่อยของของเหลว (mmHg)

$C_{\%}$ คือ ปริมาณความเข้มข้น (%)

อะซีโตน

$$\log p = 7.0245 - \frac{1161}{224 + 28} = 2.417$$

$$p = 261.431 \text{ mmHg}$$

ดังนั้น

$$C_{\%} = \frac{(100)(261.431)}{760} = 34.399 \%$$

เอทานอล

$$\log p = 8.0449 - \frac{1554.3}{222.7 + 28} = 1.845$$

$$p = 69.984 \text{ mmHg}$$

ดังนั้น

$$C_{\%} = \frac{(100)(69.984)}{760} = 9.208 \%$$

เมทานอล

$$\log p = 7.8786 - \frac{1473.1}{230 + 28} = 2.169$$

$$p = 147.571 \text{ mmHg}$$

ดังนั้น

$$C_{\%} = \frac{(100)(147.571)}{760} = 19.417\%$$

แอมโมเนีย

$$\log p = 7.555 - \frac{1003}{247.9 + 28} = 3.919$$

$$p = 8298.507$$

คั้งนั้น

$$C_{*} = \frac{(100)(8298.507)}{760} = 1091.908 \%$$

น้ำ

$$\log p = 8.1075 - \frac{1750.3}{235.0 + 28} = 1.452$$

$$p = 28.314$$

คั้งนั้น

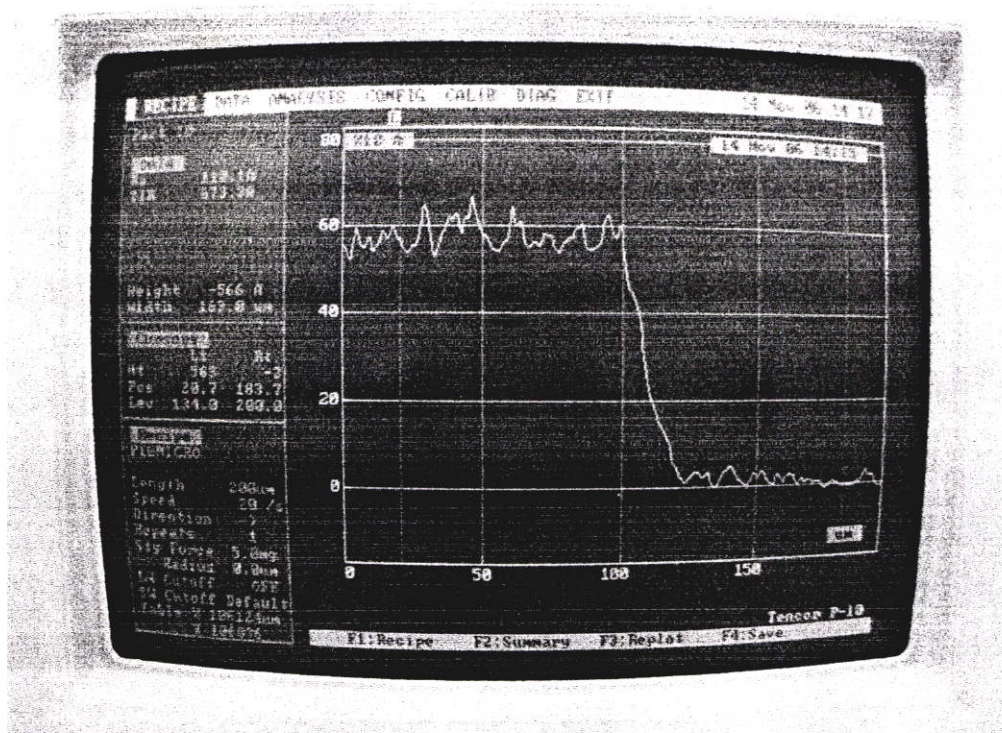
$$C_{*} = \frac{(100)(28.314)}{760} = 3.725 \%$$

ตารางที่ ๑.1 Constants for Vapor Pressure Calculations [28]

Compound	Temperature Range(^o C)	Constants		
		A	B	C
Acetone	-	7.0245	1161	224
Ammonia	-83-60	7.555	1003	247.9
Ethyl alcohol	-	8.0449	1554.3	222.7
Methyl alcohol	-20-140	7.8786	1473.1	230
Water	0-60	8.1075	1750.3	235.0
Water	60-150	7.9668	1668.2	228.0

ภาพผนวก จ

ความหนาของชั้นออกซิเดียม

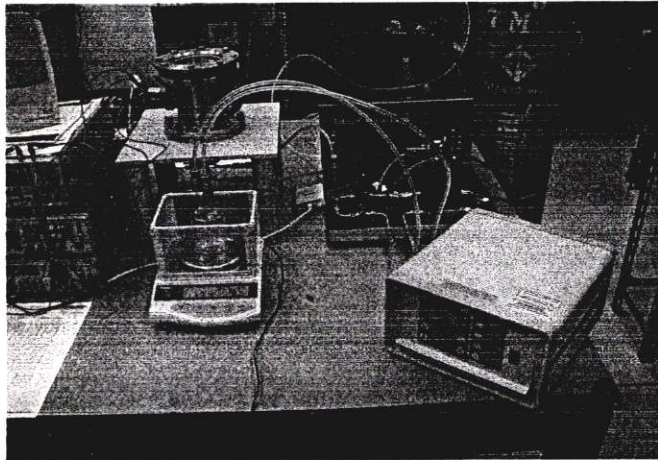


รูปที่ จ.1 ผลการวัดความหนาของชั้นฟิล์มออกซิเดียมที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของเซ็นเซอร์
มีความหนา 0.566 ไมครอน

ภาพผนวก ฉ
การทดลองหามวลสารอะซีโตนที่ระเหยเป็นไอ (w_p)

วิธีการทดลองเพื่อหามวลไอสารอะซีโตนที่เป็นไอระเหย

1. นำอะซีโตนไปชั่งน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ ฉ.1 จากนั้นทำการปล่อยก๊าซไนโตรเจน อัตราไหล 200 sccm 100 sccm 70 sccm และ 50 sccm และบันทึกข้อมูลในแต่ละอัตราการไหลมีไออะซีโตนหายไปเท่าไรในเวลา 1 นาที โดยบันทึกน้ำหนักที่หายไปในช่วงเวลา 1 นาที เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ ฉ.1
2. ทำการหาน้ำหนักของไออะซีโตนที่หายไป โดยบันทึกน้ำหนักที่หายไปในช่วงเวลา 1 นาที เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ ฉ.1
3. จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ในตารางที่ ฉ.1 ไปทำการพล็อตกราฟเพื่อหาน้ำหนักเฉลี่ยของไออะซีโตนที่หายๆไปใน 1 นาที
4. ผลจากการชั่งน้ำหนักของอะซีโตนที่หายไป 1 วินาที พบว่า ถ้าไนโตรเจน อัตราไหล 200 sccm จะมีน้ำหนักอะซีโตนหายไป 0.1313 g/min, ไนโตรเจน อัตราไหล 100 sccm จะมีน้ำหนักอะซีโตนหายไป 0.0039 g/min, ไนโตรเจน อัตราไหล 70 sccm จะมีน้ำหนักอะซีโตนหายไป 0.0229 g/min และ ไนโตรเจน อัตราไหล 50 sccm จะมีน้ำหนักอะซีโตนหายไป 0.0046 g/min



รูปที่ ฉ.1 ภาพถ่ายจริงการทดลองหามวลไอสารอะซีโตนที่เป็นไอระเหย

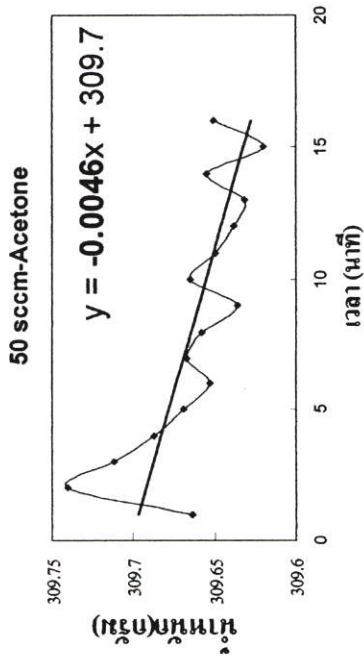
ผลการทดลอง

50 sccm	
นาที	กรัม
0	309.664
1	309.74
2	309.712
3	309.687
4	309.669
5	309.653
6	309.667
7	309.658
8	309.636
9	309.665
10	309.65
11	309.638
12	309.632
13	309.655
14	309.62
15	309.651

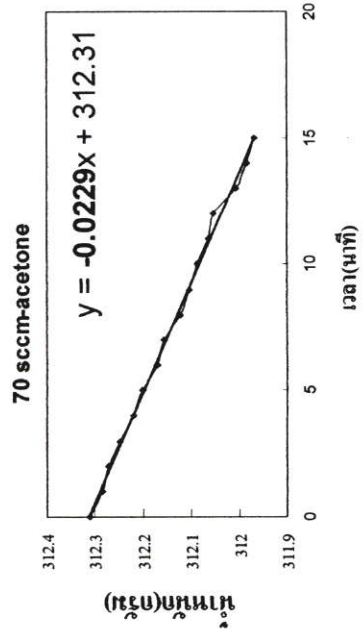
70 sccm	
นาที	กรัม
0	312.31
1	312.285
2	312.272
3	312.248
4	312.22
5	312.202
6	312.171
7	312.158
8	312.123
9	312.104
10	312.088
11	312.063
12	312.054
13	312.007
14	311.985
15	311.969

100 sccm	
นาที	กรัม
0	312.872
1	312.832
2	312.797
3	312.762
4	312.729
5	312.694
6	312.657
7	312.625
8	312.585
9	312.547
10	312.5
11	312.462
12	312.413
13	312.376
14	312.323
15	312.276

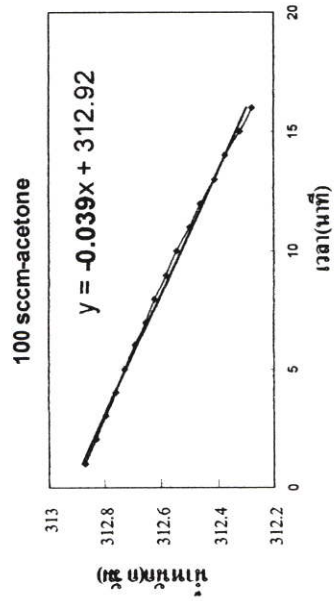
200 sccm	
นาที	กรัม
0	311.636
1	311.506
2	311.354
3	311.21
4	311.084
5	310.942
6	310.801
7	310.68
8	310.542
9	310.407
10	310.289
11	310.141
12	310.036
13	309.892
14	309.81
15	309.674



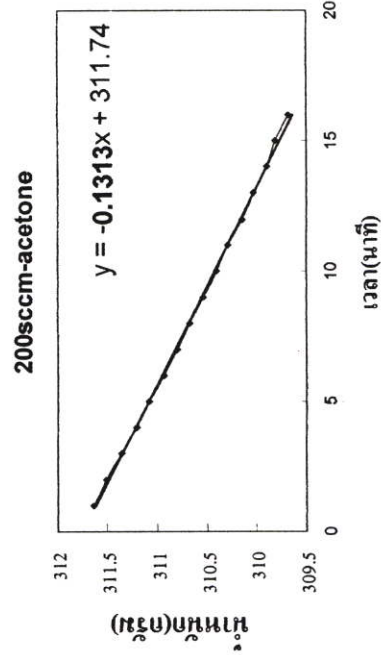
เมื่อใช้อัตราไหล 50 sccm $w_t = 0.0046$ g/min



เมื่อใช้อัตราไหล 70 sccm $w_t = 0.0229$ g/min



เมื่อใช้อัตราไหล 100 sccm $w_t = 0.0039$ g/min



เมื่อใช้อัตราไหล 200 sccm $w_t = 0.1313$ g/min

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์นี้

[1] บัवरณ์ ไชยธรรตน์ และ สุริชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์, “เซนเซอร์ของไอสารอินทรีย์อย่างง่ายด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังเดี่ยว,”การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29ม เล่ม 2, หน้า 901-902, 2549

เซนเซอร์ไอของสารอินทรีย์อย่างง่ายด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังเดี่ยว (The simplified organic-vapour sensor based on single-walled carbon nanotube sensor)

บัววรรณ ไชยรงค์ และ สุทธิชัย ชัยสิทธิศักดิ์

ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุและอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ (02)-3264222 โทรสาร (02)-392398 E-mail: kscsutich@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เป็นการแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลการตอบสนองของไอสารประกอบอินทรีย์ระเหย เอทานอล เมทานอลและอะซิโตนที่บรรยากาศห้อง(ความดัน 1 บรรยากาศและ 28 องศาเซลเซียส)ที่มีต่อเซนเซอร์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ เซนเซอร์มีขนาด 0.7*0.8 เซนติเมตร และมีโครงสร้างอย่างง่ายซึ่งประกอบด้วยฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังเดี่ยวที่เคลือบบนซิลิคอนออกไซด์(หนา 1000 อังครอง)และขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม (ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 50 ไมโครเมตร) ด้วยวิธีการชีวิตแบบไพโรไลซิส โดยใช้เอทานอลและเหล็กเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนนาโนทิวป์และตัวเร่งปฏิกิริยา โดยได้ทำการศึกษาค่าของคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ถูกเคลือบที่ตำแหน่งต่างๆภายในท่อการสังเคราะห์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเซนเซอร์ (การตอบสนอง การคืนกลับสภาพเดิมและความเสถียรในการตอบสนอง)

คำสำคัญ : คาร์บอนนาโนทิวป์, ก๊าซเซนเซอร์

Abstract

This report is a study of the response of volatile organic compounds such as ethanol, methanol and acetone at atmosphere (1 atm, 28 °C) on SWCNTs sensors. Sensors is 0.7*0.8 cm size and have a simple structure which bases on single-walled nanotube thin film deposited on SiO₂/Si wafer with Al finger electrodes(finger gap ~50 μm) by using the CVD pyrolysis of ethanol and ferrocene as a carbon source and catalytic, respectively. The effect of the nanotube films deposited at different position along the inner quartz reactor on the characteristics of sensor (response, recovery and repeatability) has been investigated.

Keyword: carbon nanotubes, gas sensor

1. คำนำ

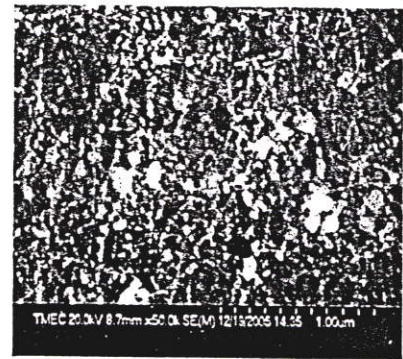
นับตั้งแต่มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์ (carbon nanotubes: CNTs) ในปี ค.ศ. 1991 [1] ก็เริ่มมีการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุคาร์บอนนาโนทิวป์กันอย่างกว้างขวางและพบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์ นั้นเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่น่าสนใจมากเนื่องจากสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดี มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็ก สามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ นอกจากนี้การที่คาร์บอนนาโนทิวป์มีขนาดเล็กในระดับนาโนนั้นทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมากซึ่งมีความสำคัญในการนำไปสร้างเป็นเซนเซอร์ทางเคมี ดังเช่น ในปี ค.ศ. 2000 Kong และคณะ [1] ได้สร้างเซนเซอร์ทางเคมีโดยใช้สารกึ่งตัวนำคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังเดี่ยว (single-walled carbon nanotubes :SWCNTs) โดยทดสอบด้วยก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) ในโครเจนไดออกไซด์ (NO₂) และ ออกซิเจน (O₂) โดยพบว่าเซนเซอร์นี้มีความไวในการวัดเร็วมาก (response) เมื่อเทียบกับเซนเซอร์ที่ได้จากสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น นอกจากนี้เซนเซอร์ที่สร้างขึ้นยังมีขนาดเล็กและสามารถทำงานที่อุณหภูมิห้องได้ แต่อย่างไรก็ตาม เซนเซอร์ที่สร้างด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีข้อจำกัดบางประการเนื่องจาก เซนเซอร์ไม่สามารถจำแนกสารที่ต้องการวัดได้ เวลาในการคืนกลับสู่สภาวะเริ่มต้นช้า มีต้นทุนสูงในการสังเคราะห์ เป็นต้น นอกจากนี้เซนเซอร์ยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซอีกด้วย [3]

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการสร้างเซนเซอร์ทางเคมีจากคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีอย่างง่ายโดยใช้ต้นทุนในการสร้างต่ำ สามารถทำงานได้ที่บรรยากาศห้องและมีขนาดเล็ก โดยได้ศึกษาคุณสมบัติของเซนเซอร์ เช่น การตอบสนองในการวัด (response) การคืนกลับสภาพเดิมของเซนเซอร์ (recovery) และ ความเสถียรในการใช้งาน (repeatability) ของเซนเซอร์ต่อไอของสารอินทรีย์ เช่น เอทานอล เมทานอลและอะซิโตน

2. การทดลอง

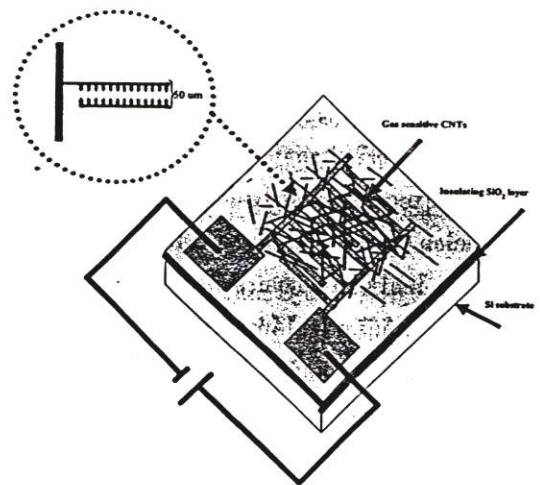
คาร์บอนนาโนทิวป์ที่นำมาใช้สร้างเซนเซอร์นี้ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการชีวิต (chemical vapor deposition: CVD) แบบไพโรไลซิส (pyrolysis) [4] คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วย

วิธีนี้เป็นแบบหนึ่งเดียว โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ น้อยกว่า 5 นาโนเมตร และท่อที่มีความยาวมากกว่า 1 ไมโครเมตร โดยจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด (field-emission scanning electron microscope: FE-SEM) แสดงดังรูปที่ 1. และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope: TEM) โดยรอบๆ ท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์จะมีอนุภาคของเหล็กขนาด 5-10 นาโนเมตร



รูป.1 ภาพถ่าย (a) FE-SEM

โครงสร้างของเซนเซอร์ดังรูปที่ 2. โดยใช้แผ่นซิลิคอน (silicon) ขนาด 0.7 * 0.8 เซนติเมตร (ชนิดพีและมีระนาบ 100) สร้างเป็นฐานรองเซนเซอร์ซึ่งถูกเคลือบด้วยซิลิคอนออกไซด์ (หนา 1,000 อังสตรอม) และอะลูมิเนียม (Al) ด้วยวิธีการออกซิเดชัน (oxidation) และการระเหยสารในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ตามลำดับ จากนั้นทำการทำการกัดอะลูมิเนียมเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม (ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 50 ไมโครเมตร) ด้วยวิธีการทำโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) ดังรูปที่ 2. จากนั้นสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์เคลือบบนฐานรองเซนเซอร์ภายใต้บรรยากาศของผงฟูโรเซน (ferrocene) เอทานอล (ethanol) และก๊าซอาร์กอน (argon, 99 %) โดยนำแผ่นฐานรองเซนเซอร์วางไว้ที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่อุณหภูมิ 700 องศาและความดัน 1 บรรยากาศ ดังในรูปที่ 3. โดยตำแหน่งของแผ่นฐานรองเซนเซอร์วางไว้ที่ระยะ 10 (EF-1), 13 (EF-2), 16 (EF-3) และ 19 (EF-4) เซนติเมตรภายในท่อควอร์ต (quartz) โดยแต่ละตำแหน่งมีอุณหภูมิ [4] ประมาณ 700, 350, 300 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



รูป 2. โครงสร้างเซนเซอร์ ที่สร้างด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์

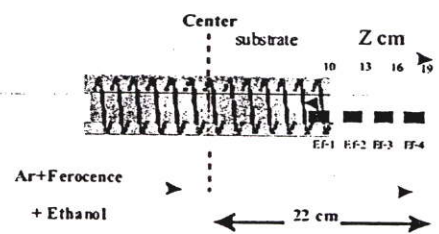
3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในรายงานฉบับนี้เราสนใจการตอบสนองของเซนเซอร์ที่สร้างด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์ต่ออากาศ(air)และไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยสามชนิดคือ เอทานอล(ethyl : C₂H₅OH), เมทานอล(methyl: CH₃-OH)และ อะซิโตน(acetone: CH₃COCH₃) ซึ่งอ้อมด้วยบรรยากาศห้อง โดยให้แรงดันไฟฟ้ากับเซนเซอร์ 1 โวลต์ จากนั้นทำการวัดและบันทึกผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์และ Keithley source meter(model 2004) การตอบสนองของเซนเซอร์คือไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยคำนวณได้จากสมการ (1) [5]

$$\text{Response (\%)} = ((R_t - R_0) / R_0) \times 100 \quad (1)$$

โดย R_t และ R₀ เป็นค่าความต้านทานทางไฟฟ้าขณะอยู่ในสภาวะของไออ้อมตัวและขณะอยู่ในอากาศที่บรรยากาศห้องตามลำดับ

หลังจากทำการเคลือบด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์แล้ว เซนเซอร์ EF-1 (z=10 cm), EF-2(z=13 cm), EF-3(z=16 cm) และ EF-4(z=19 cm) มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ทำการวัดที่บรรยากาศห้อง คือ 2, 26, 68 และ 62 kΩ ตามลำดับ โดยความหนาของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เคลือบบนฐานรองเซนเซอร์จะมีความหนาลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำตำแหน่งห่างจาก



รูป3. การปลูกฟิล์มเซนเซอร์จากคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีการ ซีวีดี แบบไพโรไลซิส ภายในท่อควอร์ต

ขดลวดฮีตเตอร์ (heater) [6] โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ที่หนาจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยและมีสีดำสนิทส่วนคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีความบางจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้ามากและมีสีเทาอ่อน รูปที่ 4 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์ EF-1 และ EF-3 เมื่อทดสอบด้วยเมทานอลเป็นเวลา 10 นาที โดยการตอบสนองของเซนเซอร์ทั้งสองมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งปล่อยให้เซนเซอร์กลับสู่

ได้ดังรูปที่ 7. จากรูปจะพบว่า Ef -3 มีอัตราส่วนของ A/B ต่อไอของสารทุกชนิดมากที่สุดแสดงให้เห็นว่ามีความไวมากที่สุด การตอบสนองของเซนเซอร์ที่ถูกเคลือบด้วย SWCNTs มีความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น [7-8] อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาของ SWCNTs กับ โมเลกุลของสารมาดูดเกาะ (absorption) ที่ SWCNTs ปฏิกิริยาระหว่าง SWCNTs กับ ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม [9]

3. สรุป

เซนเซอร์ที่สร้างด้วย SWCNTs สามารถตอบสนองต่อไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหย เช่น เมทานอล เอทานอล และอะซิโตน ที่อุณหภูมิและบรรยากาศห้อง โดยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นนั้นสามารถสร้างด้วยโครงสร้างอย่างง่ายโดยวิธีการระเหยในสุญญากาศ และ โฟโวลโทกราฟีโดยเมื่อทดสอบด้วยไอของสารอินทรีย์ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้นโดยแบ่งเป็นสองลักษณะ คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดขณะเริ่มการตอบสนองต่อไอของสารและค่าความต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยการที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางพื้นผิวของ SWCNTs นอกจากนี้ยังพบว่าเวลาในการกลับสู่สภาวะเริ่มต้นของเซนเซอร์ยังเร็วขึ้นเมื่อฉายด้วยแสงจากหลอดไฟทั้งสแกนเป็นเวลา 10 วินาที โดยเซนเซอร์ใช้เวลาในการกลับสู่สภาวะเริ่มต้น 5 ถึง 6 นาที

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนอุปกรณ์จากห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุและอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารอ้างอิง

1. S. Ijima, Nature 354, 56(1991)
2. J. K ong, N.R.Franklin, C.Zhou, M.G.Chapline. S.Peng, K.Cho, and H.Dai, Science 287, 622 (2000).
3. Niraj, Jiazhi Ma, and John T. W. Yeow. Carbon nanotube_Based Sensors, Naaoscience and Nanotechnology, Vol.6, 573-590, 2000
4. การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ (Synthesis of carbon nanotubes by using chemical vapor deposition at one atmosphere) นายปฏิคม ศรีชมพล และ ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์
5. Nguyen Hong Quang, Mai Van Trinh, Bong-Ho Lee. Jeung-Soo Huh, Effect of NH3 gas on the electrical properties of

single-walled carbon nanotube bundles, Sensors and Actuators B 113 (2006)341-346.

6. S. Chaisitsak, A Poyai and J. Nukeaw, KMITL international conference on science and application 2006 (KSAS2006), BKK, Thailand, pp.127
7. T.Some ya, J.Small, P.Kim, C.Nuck olls, and J.T.Yardley, Alcohol vapor sensors based on single-walled carbon nanotube field effect transistors, Nano Lett. 3, 877(2003)
8. M. Penza, P. Antolini, M. Vittori-Antisari, Carbon nanotubes-based surface acoustic waves oscillating sensor for vapour detection, Thin Solid Films 472(2005) 246-252
9. Junya Suehiro, Hiroshi Imakiire, Shin-ichiro Hidaka, Weidong Ding, Guangbin Zhou, Kiminobu Imasaka, Masanori Hara, Schottky-type response of carbon nanotube NO₂ gas sensor fabricated onto aluminum electrodes by dielectrophoresis, Sensors and Actuators B 114(2006) 943-949



บัววรรณ ไชยรงค์

การศึกษา

-วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์)

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสาน

มิตร

งานที่สนใจ

-การสังเคราะห์และการสร้างเซนเซอร์

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาวบัววรรณ ไชยตรงรัตน์
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 11 สิงหาคม 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดหนองบัวลำภู
วุฒิศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2546