

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แอลกอฮอล์เซ็นเซอร์ด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์

ALCOHOL SENSOR BY CARBON NANOTUBE



T132244



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **132244**
วัน,เดือน,ปี..... 4 ก.ค. 2557

12584964
b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-EN-M-043-158

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ALCOHOL SENSOR BY CARBON NANOTUBE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTOR OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT.S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2012

KMITL-2012-EN-M-043-158

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แอลกอฮอล์เซ็นเซอร์ด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์
นักศึกษา	อัสนุชล แสงนวล
รหัสประจำตัว	52611602
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการตกตะกอนไอเคมีแบบเตาความร้อนและแบบขดลวดความร้อน โดยมีเงื่อนไขการสังเคราะห์ คือ อุณหภูมิ เวลา และอัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยนำพาไอระเหยของสารตั้งต้นของคาร์บอนเข้าสู่ห้องปฏิกิริยาในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาแน่น และการเติบโตในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้มาประยุกต์ใช้งานเป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเคมีเมื่อมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยออกแบบเป็นของตัวต้านทาน ผลการทดลองพบว่า เซ็นเซอร์ที่สังเคราะห์แบบขดลวดความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยนำพาสารแหล่งจ่ายคาร์บอน 10 ซีซี/นาที มีการตรวจจับไอเอทานอลดีที่สุดคือ 6.11% การทดลองยังตรวจจับไอระเหยของเมทานอล เบทานอล Tert-batanal Sec-batanal 2-propanal Amy alcohol และ Cyclohexanal นอกจากนี้ยังมีการทดลองผลของอุณหภูมิแวดล้อมที่มีผลต่อการตอบสนองของเซ็นเซอร์ โดยการตรวจจับไอเอทานอลที่อุณหภูมิแวดล้อมที่ -5 องศาเซลเซียสและใช้ความร้อน 85 องศาเซลเซียสไล่ความชื้นหลังจากการตรวจจับ ทำให้เซ็นเซอร์สามารถตรวจจับไอแอลกอฮอล์ได้ดียิ่งขึ้นโดยมีการเปลี่ยนแปลง 76.22% เซ็นเซอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นสามารถตรวจจับไอเอทานอลที่ความเข้มข้นต่ำสุดได้ที่ 50ppm

Thesis	ALCOHOL SENSOR BY CARBON NANOTUBE
Student	Mr. Assuchol Sangnual
Student ID	52611602
Degree	Master Degree of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2555
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Toempong Phetchakul

ABSTRACT

This thesis presents the synthesis of carbon nanotubes using chemical vapor deposition, thermal CVD and Hot filament. The synthesis conditions of temperature, time and inert gas flow rate which take vapor of carbon source to the reaction chamber for process are studied. The results are analyzed in diameter, density and growth of carbon nanotubes with a scanning electron microscope. Then it is applied as alcohol sensor to study the electrochemical properties changing with the alcohol vapor. The results showed that sensor synthesis by hot filament at temperature 700°C for 5 minutes in the flow of the inert gas carrying sources 10 cc/min has percent of resistive changing 6.11%. The experiments show that it can also detect vapors of methanol, bethanol, tert-batanal, Sec-batanal, 2-propanal, Amyl alcohol and Cyclohexanal. In addition, the experimental results of the ambient temperature affect to the response of the sensor are studied. The condition at ambient temperature -5°C and heating temperature after alcohol detecting at 85°C increase the percent of resistive change from 6.16% up to 76.22%. It can detect ethanol vapor at concentrations as low as 50 ppm.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เดิมาพงษ์ เพ็ชรกุล ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการดำเนินงาน การสนับสนุนเครื่องมือต่างๆ และรวมไปถึงการสนับสนุน การศึกษาค้นคว้าของนักศึกษาอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ อำนวย แสงนวล ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สำหรับคำปรึกษาด้านเคมี การตรวจวัดแก๊ส รวมไปถึงความอนุเคราะห์ สารเคมีในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สุจินต์ ตันติพิสิษฐกุล ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับคำปรึกษาด้านเคมีและพฤติกรรมของคาร์บอน

ขอขอบพระคุณ นาย ชลินทร์ สุทธิเนตร นักศึกษาปริญญาโท สำหรับคำปรึกษาที่มีประโยชน์และแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ

สุดท้ายนี้ คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่บิดาและมารดา ที่สนับสนุนในการศึกษาและกำลังใจแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

อัสนุชล แสงนวล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีของคาร์บอน.....	7
2.1 รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน.....	7
2.1.1 โครงสร้างแบบศูนย์มิติ.....	7
2.1.2 โครงสร้างแบบหนึ่งมิติ.....	8
2.1.3 โครงสร้างแบบสองมิติ.....	8
2.1.4 โครงสร้างแบบสามมิติ.....	9
2.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon Nanotubes: CNTs).....	9
2.2.1 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว.....	10
2.2.2 ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น.....	11
2.3 ทฤษฎีการเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	12
2.4 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์.....	14
2.4.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge).....	14
2.4.2 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Ablation).....	15
2.4.3 วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD).....	16
2.5 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน.....	18
2.5.1 สมบัติเชิงกล.....	18
2.5.2 สมบัติทางไฟฟ้า.....	19
2.5.3 สมบัติทางความร้อน.....	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 การประยุกต์ใช้งานคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	21
2.6.1 ตัวเก็บพลังงาน (energy storage).....	21
2.6.2 อุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิชัน.....	22
2.6.3 ทรานซิสเตอร์ (transistors).....	23
2.6.4 โพรบวัดนาโนและนาโนเซ็นเซอร์.....	24
2.6.5 เ็น้าขนาดนาโน.....	25
2.6.6 วัสดุผสม (composite materials).....	25
2.6.7 งานทางด้านเซ็นเซอร์ (Sensors).....	26
2.7 หลักการพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับเซ็นเซอร์.....	28
2.8 แก๊สเซ็นเซอร์ (Gas sensor).....	30
2.8.1 คุณสมบัติทั่วไปของแก๊สเซ็นเซอร์.....	31
2.8.2 แก๊สที่มีความสำคัญต่อมนุษย์.....	31
2.8.2.1 แก๊สตระกูลคาร์บอน (Carbon Species).....	31
2.8.2.2 มีเทน (Methane).....	32
2.8.2.3 เบนซีน (Benzene).....	32
2.8.2.4 ไฮโดรเจน (Hydrogen).....	32
2.8.2.5 แอลกอฮอล์ต่างๆ.....	33
บทที่ 3 กระบวนการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	35
3.1 การเตรียมแผ่นฐานรอง.....	35
3.1.1 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	35
3.1.2 การเคลือบโลหะคะตะลิสต์ (Catalyst).....	40
3.1.3 การเคลือบน้ำยาไวแสงและการถ่ายภาพ.....	41
3.1.4 การทำขั้วไฟฟ้า.....	43
3.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	44
3.2.1 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน.....	45
3.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	45
3.2.1.2 ขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	46
3.2.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน.....	48
3.2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	48
3.2.2.2 ขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	49
3.3 เครื่องมือในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	52
3.3.1 ชนิดรอยสัมผัสและความต้านทานรอยสัมผัสคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ... ..	52
3.3.2 ระบบการวัดแอลกอฮอล์.....	53
3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และการใช้งานเป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์.....	55
4.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	55
4.1.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน.....	55
4.1.2 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน.....	59
4.2 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ใช้เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์.....	62
4.2.1 การต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้วัดความต้านทาน.....	62
4.2.2 ความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ.....	63
4.3 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ของเซนเซอร์.....	64
จากคาร์บอนนาโนทิวบ์	
4.3.1 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์.....	65
คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน	
4.3.2 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์.....	67
คาร์บอนนาโนทิวบ์และแบบขดลวดความร้อน	
4.3.3 ผลการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆด้วย.....	70
เซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์	
4.3.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์.....	76
4.3.5 ความสามารถของเซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับได้แอลกอฮอล์ได้.....	81
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	83
เอกสารอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก (ก) ความรู้เกี่ยวกับแอลกอฮอล์.....	90
ภาคผนวก (ข) ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	125

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	แสดงสีของชั้นซิลิโคนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆกัน.....	38
ตารางที่ 4.1	เงื่อนไขการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน.....	56
ตารางที่ 4.2	เงื่อนไขการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของคาร์บอนแบบศูนย์มิติ.....	7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของคาร์บอนแบบหนึ่งมิติ.....	8
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของคาร์บอนแบบสองมิติ.....	8
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของคาร์บอนแบบสามมิติ.....	9
รูปที่ 2.5 ลักษณะพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	9
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบต่างๆ.....	10
รูปที่ 2.7 ดัชนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	11
รูปที่ 2.8 คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังชั้นเดียวในรูปแบบต่างๆ.....	11
รูปที่ 2.9 ภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	12
รูปที่ 2.10 การสร้างตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบ VLS mechanism.....	12
รูปที่ 2.11 แสดงการเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	13
รูปที่ 2.12 แสดงภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ.....	15
รูปที่ 2.13 แสดงภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีแสงเลเซอร์.....	15
รูปที่ 2.14 แสดงภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีแบบเตาความร้อน.....	16
รูปที่ 2.15 แสดงภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีแบบแบ่งเฟส.....	17
รูปที่ 2.16 แสดงภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีแบบขดลวดความร้อน.....	18
รูปที่ 2.17 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	19
รูปที่ 2.18 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวบ์ในสภาวะสุญญากาศ..	20
รูปที่ 2.19 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพ.....	20
รูปที่ 2.20 แสดงภาพรวมการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งาน.....	21
รูปที่ 2.21 แสดงภาพการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาสร้างเป็นตัวเก็บพลังงาน.....	22
รูปที่ 2.22 แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	22
ในจอแสดงภาพแบบแบนของ Northwestern University	
รูปที่ 2.23 แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันที่ใช้ท่อคาร์บอนนาโนคาร์บอน.....	23
ของบริษัท Samsung	
รูปที่ 2.24 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	24
ชนิดผนังชั้นเดียวในทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้า	
รูปที่ 2.25 แสดงโปรวัตต์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นของกล้องจุลทรรศน์.....	24
แรงอะตอมของ NASA Ames Research Center	
รูปที่ 2.26 แร็กเก็ต VS Nanotube Power ของ Babolat.....	26
รูปที่ 2.27 แสดงการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์เคมี.....	27
รูปที่ 2.28 หัววัดแก๊สที่สร้างจากคาร์บอนนาโนทิวบ์และวงจรการใช้งาน.....	27
รูปที่ 2.29 แสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบนระนาบแผ่นกราฟไฟท์.....	28
ที่ผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.30	แสดงโมเดลการยึดเกาะโมเลกุลของแก๊สจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT.....	29
รูปที่ 2.31	แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ.....	29
	NO ₂ กับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว	
รูปที่ 2.32	อุปกรณ์แก๊สเซ็นเซอร์จำพวกทรานสดิวเซอร์.....	30
รูปที่ 3.1	แผ่นซิลิคอนขนาด 2.5 × 2.5 cm ² หลังจากการทำความสะอาด.....	35
รูปที่ 3.2	แสดงการคำนวณการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้ง.....	37
รูปที่ 3.3	แสดงการคำนวณการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้น.....	37
รูปที่ 3.4	แผ่นซิลิคอนก่อนและหลังการออกซิเดชัน	39
รูปที่ 3.5	เตาความร้อนที่ใช้ในการออกซิเดชัน.....	39
รูปที่ 3.6	การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล)	40
รูปที่ 3.7	ภาพถ่าย SEM ของการเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล)	40
รูปที่ 3.8	การเคลือบพื้นผิวด้วยน้ำยาไวแสง.....	41
รูปที่ 3.9	เครื่องสปรินเนอร์.....	42
รูปที่ 3.10	ภาพหน้ากาก (Mask) ที่ใช้ในการถ่ายแบบ.....	42
รูปที่ 3.11	ภาพของเครื่อง Mask Aligners.....	43
รูปที่ 3.12	การสปีดเตอร์ซีวีโลหะทองแดง.....	43
รูปที่ 3.13	ภาพถ่ายของเครื่องสปีดเตอร์ริงสำหรับเคลือบคະตะไลต์และซีวีโลหะ.....	44
รูปที่ 3.14	โครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโซน.....	45
รูปที่ 3.15	ภาพถ่ายเตาความร้อนแบบสามโซนที่ใช้ในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	45
รูปที่ 3.16	ภาพการแสดงการดันแผ่นฐานรองเข้าไปยังกลางเตาความร้อนแบบสามโซน.....	46
รูปที่ 3.17	ภาพแสดงการปรับอุณหภูมิของเตาความร้อนแบบสามโซน.....	46
รูปที่ 3.18	ภาพแสดงการจ่ายไอแอลกอฮอล์ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	47
รูปที่ 3.19	ภาพแสดงการลดอุณหภูมิในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	47
รูปที่ 3.20	ภาพแสดงการดึงคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ออกจากเตาความร้อน.....	48
รูปที่ 3.21	ภาพแสดงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดสามร้อน.....	49
รูปที่ 3.22	ภาพแสดงการไล่อากาศในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน..	50
รูปที่ 3.23	ภาพแสดงการให้ความร้อนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน..	50
รูปที่ 3.24	ภาพแสดงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน.....	51
รูปที่ 3.25	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อนขณะทดลองจริง.....	51
รูปที่ 3.26	การวัดรอยต่อของคาร์บอนนาโนทิวบ์กับซีวีโลหะทองแดง.....	52
รูปที่ 3.27	กราฟคุณลักษณะ I – V ของเซ็นเซอร์.....	53

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.28 แผนภาพระบบการวัดแอลกอฮอล์ภายในห้องเซ็นเซอร์แลป.....	53
รูปที่ 3.29 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	54
รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 30,000 เท่าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากสังเคราะห์.....	57
แบบเตาความร้อน	
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้.....	58
แบบเตาความร้อน	
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 30,000 เท่าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากสังเคราะห์.....	60
ชนิดลดความร้อน	
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของฟ่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้.....	61
แบบชนิดลดความร้อน	
รูปที่ 4.5 แสดงรายละเอียดการต่อหัวออกไปใช้งาน.....	63
รูปที่ 4.6 คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต่อหัวใช้งานแล้ว.....	63
รูปที่ 4.7 กราฟคุณสมบัติลักษณะ I – V เซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ที่ทำการต่อหัวเรียบร้อยแล้ว.....	64
รูปที่ 4.8 ภาพแสดงระบบการวัดแอลกอฮอล์.....	65
รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหย.....	66
ของเอทานอลที่สังเคราะห์แบบเตาความร้อน	
รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหย.....	67
ของเมทานอลที่สังเคราะห์แบบเตาความร้อน	
รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหย.....	68
ของเอทานอลที่สังเคราะห์แบบชนิดลดความร้อน	
รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหย.....	69
ของเมทานอลที่สังเคราะห์แบบชนิดลดความร้อน	
รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล.	71
รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเมทานอล.	71
รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเบทานอล.	72
รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหย.....	72
ของ Tert-batanal	
รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหย.....	73
ของ Sec-betanal	
รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหย.....	74
ของ iso propyl alcohol	
รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอมมิล	74
แอลกอฮอล์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.20	ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหย.....	75
	ของไซโคลเฮกซานอล	
รูปที่ 4.21	ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ.....	76
	Chamber ที่ 25°C	
รูปที่ 4.22	ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ.....	77
	Chamber ที่ 85°C	
รูปที่ 4.23	ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ....	78
	Chamber ที่ -5°C	
รูปที่ 4.24	ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ....	79
	Chamber 25°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ใน การคืนสภาพความต้านทาน	
รูปที่ 4.25	ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ....	80
	Chamber -5°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ใน การคืนสภาพความต้านทาน	
รูปที่ 4.26	ภาพแสดงระบบการวัดความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ (pass per million : ppm).....	81
รูปที่ 4.27	ความสามารถของเซนเซอร์ที่ตรวจจับแอลกอฮอล์ได้ (pass per million : ppm)...	82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ตัวตรวจวัดแก๊สหรือเซ็นเซอร์ทางเคมีได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานด้านอุตสาหกรรม การตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม การตรวจสอบทางด้านชีววิทยา ตัวตรวจวัดแก๊สที่มีความไวสูงเป็นที่ต้องการในงานด้านการตรวจหาการรั่วไหลของแก๊สระเบิดเช่นไฮโดรเจน และเพื่อตรวจหาเรียลไทม์ของแก๊สที่เป็นพิษหรือก่อให้เกิดอันตรายในงานด้านอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีความต้องการเป็นอย่างมากสำหรับความสามารถในการตรวจสอบและควบคุมสภาวะทางด้านร่างกายของมนุษย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับความกังวลที่เพิ่มขึ้นของภาวะมลพิษของโลก นักวิจัยจากวิชาการบินและการบริหารจัดการพื้นที่แห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (นาซา) กำลังมองหาการใช้งานของตัวตรวจวัดแก๊สที่มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพสูงสำหรับตรวจวัดแก๊สที่ใช้ภายในองค์กรในการดำเนินงานการสำรวจบรรยากาศของดาวเคราะห์ต่างๆ นอกจากนี้ตัวตรวจวัดแก๊สที่จะใช้งานแทนส่วนของประสาทสัมผัสสำหรับการรักษาความปลอดภัยภายในบ้านเรือนก็ยังคงเป็นความกังวลของศูนย์บริการสาธารณสุขที่จะมีการพัฒนาขึ้นมาใช้งาน^[1]

โดยทั่วไปจะมีเกณฑ์ขั้นพื้นฐานหลายประการสำหรับตัวตรวจวัดแก๊สที่ดีและมีประสิทธิภาพในระบบการตรวจวัดคือ (i) มีความไวในการเลือกรับก๊าซสูง (ii) มีการตอบสนองในการทำงานและการคืนสภาพที่เร็ว (iii) มีความเร็วในการประมวลผล (iv) ทำงานที่อุณหภูมิต่ำและไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (v) มีความมั่นคงในการแสดงผล วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นตัวตรวจจับแก๊สได้แก่จำพวกวัสดุที่มีความไวสูงอย่างวัสดุพอลิเมอร์หรือจำพวกสารกึ่งตัวนำ ออกไซด์ของโลหะและวัสดุอื่นๆ ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนเช่น รูพรุนของซิลิคอน^[2-4] เนื่องจากแก๊สที่พบบ่อยที่สุดที่สามารถทำการตรวจจับได้จะใช้หลักการคือ การดูดซับและการคายของโมเลกุลแก๊สในการตรวจจับ

การพัฒนาล่าสุดของนาโนเทคโนโลยีได้สร้างศักยภาพอย่างมากในการสร้างเซ็นเซอร์แบบพกพาที่มีความไวสูงราคาถูก มีการใช้พลังงานต่ำ และมีพื้นที่ผิวสูงมากต่อปริมาณและโครงสร้างกลวงของวัสดุนาโนจึงเหมาะอย่างยิ่งสำหรับการดูดซับแก๊สโมเลกุลและการเก็บรักษา ซึ่งวัสดุนาโนที่เลือกนำมาใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊สที่ได้รับความนิยมชนิดหนึ่งคือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNTs) ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้รับศึกษาและการวิจัยอย่างกว้างขวาง

คาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Iijima ในปี 1991^[5] และได้รับความสนใจอย่างมากในด้านการวิจัยที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากลักษณะเฉพาะของโครงสร้าง เรขาคณิตและคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัว (เช่นคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ ความร้อนและแสง) ด้วยเหตุนี้การประยุกต์ใช้งานในด้านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆจึงมีการศึกษากันอย่างแพร่หลายมากมาย จึงมีทฤษฎีและผลงานการวิจัยที่ได้รับการยอมรับเพื่อจะทำให้เข้าใจถึงวัสดุระดับนาโนนี้ปรากฏอยู่มากมาย^[6]

คาร์บอนนาโนทิวบ์จัดอยู่ในกลุ่มของโครงสร้าง fullerene มีด้วยกันสองประเภทคือ คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังเดี่ยว (SWCNTs) และคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบหลายผนัง (MWCNTs) คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังเดี่ยว SWCNTs ถือได้ว่าเป็นโครงสร้างอะตอมของกราฟไฟต์แบบแผ่นชั้นเดียวที่มีการจัดเรียงตัวม้วนเข้าหากันแบบไร้รอยต่อมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับ 1-100 นาโนเมตร^[7] คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบหลายผนังประกอบด้วยชั้นของกราฟไฟต์หลายชั้นห่อเข้าหากันเป็นรูปทรงหลอดหรือท่อ โดยใช้แกนกลางแกนเดี่ยวร่วมกัน โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติเฉพาะตัวทั้งทางไฟฟ้า ทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีที่ไม่ซ้ำกัน เช่นคุณสมบัติทางกล CNTs จะมีเส้นใยที่แข็งแรงและมีความยืดหยุ่นสูงซึ่งเป็นที่รู้กันว่าเกิดจากพันธะของ C - C คุณสมบัติทางความร้อนของ CNTs จะมีความร้อนสูงในสุญญากาศและอากาศ ในแง่ของสมบัติทางไฟฟ้า CNTs สามารถเป็นได้ทั้งโลหะหรือกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและโครงสร้างของแผ่นกราฟไฟต์ที่ม้วนตัวมาเป็นท่อคาร์บอน^[8] ในคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีเมื่อคาร์บอนนาโนทิวบ์มีการสัมผัสกับแก๊สคุณสมบัติบางอย่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสามารถวัดค่าหรือสัญญาณต่างๆได้ด้วยกันหลายวิธี คาร์บอนนาโนทิวบ์จึงเป็นตัวตรวจจับแก๊สที่ได้รับความนิยมในงานวิจัยกันอย่างแพร่หลาย^[10, 11]

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมานี้จึงทำให้เกิดความสนใจทำการทดลองและศึกษาการทำงานของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อนำมาเป็นตัวตรวจจับแก๊ส โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้ทำการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ เนื่องจากแอลกอฮอล์ในปัจจุบันมีใช้กันอย่างแพร่หลายมากมายหลายชนิด บางชนิดมีการใช้งานในชีวิตประจำวันเช่นแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการล้างแผล แอลกอฮอล์ในรูปของเครื่องดื่ม (เหล้า เบียร์ ไวน์) ซึ่งแอลกอฮอล์ที่อยู่ในรูปของเครื่องดื่มมีความจำเป็นในการทดสอบวัดถึงคุณภาพของกลิ่นและรสเพื่อชี้เฉพาะถึงคุณสมบัติของแอลกอฮอล์ชนิดนั้นๆในการผลิตเพื่อออกจำหน่าย การศึกษาและการทดลองในครั้งนี้เป็นการทดลองเบื้องต้นของการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์มาเป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ เพื่อศึกษาถึงผลการตอบสนองเมื่อเซ็นเซอร์มีการตรวจจับแอลกอฮอล์ได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาถึงกรรมวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition) ทั้งแบบเตาความร้อน (Thermal CVD) และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament CVD)
2. เข้าใจโครงสร้างการเกิดและการกระจายตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์
4. การเปรียบเทียบถึงอุณหภูมิแวดล้อมที่ส่งผลต่อการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาใช้เป็นเซ็นเซอร์เพื่อปรับปรุงและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีขึ้น

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition) ทั้งแบบเตาความร้อน (Thermal CVD) และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament CVD) สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นเซ็นเซอร์ได้
2. โครงสร้างพรุนของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์สามารถตรวจจับหรือดูดซับโมเลกุลของแก๊สได้
3. คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์มาประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์สามารถใช้งานเป็นเซ็นเซอร์ในการตรวจจับแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆได้
4. อุณหภูมิที่พื้นผิวของคาร์บอนนาโนทิวบ์และอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมมีผลต่อการตรวจจับหรือการดูดซับแก๊ส

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

หลักการไฟฟ้าเคมีของแผ่นกราฟไฟท์ที่ประกอบกันเป็นผนังคาร์บอนนาโนทิวบ์มีลักษณะโค้งอิเล็กทรอนิกส์จึงสามารถเปลี่ยนรูปจากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เป็นการกระจายตัวอย่างไม่สมดุลทั้งด้านในท่อและนอกคาร์บอนนาโนทิวบ์ทรงกระบอก (cylindrical sheet) เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์มีการผิดรูปด้านนอก จึงมีเฉพาะ π - Electron ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าเคมีคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นกับโมเลกุลของแก๊ส CO_2 , NO_2 , NH_3 , O_2 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ เป็นต้น หลังการยึดเกาะของโมเลกุลแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์พบว่า ประจุอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากอะตอมคาร์บอนกับโมเลกุลของแก๊ส จะถูกถ่ายหรือดึงจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำให้มีประจุพาหะ (Carrier) มากขึ้นหรือลดลง ทำให้การนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มขึ้นหรือลดลงซึ่งการเพิ่มขึ้นหรือลดลงมากน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของแก๊สที่มาจับกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition) ทั้งแบบเตาความร้อน (Thermal CVD) และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament CVD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition) ทั้งแบบเตาความร้อนและแบบขดลวดความร้อนลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบอยู่ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ และอัตราการไหลของแก๊สที่นำพาไอของสารแหล่งจ่ายคาร์บอน ในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์
3. ศึกษาโครงสร้างการเกิด ความหนาของการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ และการกระจายตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
4. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ รวมถึงการศึกษาสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการใช้งานเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด
5. วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

1.6 การศึกษาขั้นตอน

1. ศึกษาการทฤษฎีของคาร์บอนทั่วไปและทฤษฎีของคาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งแบบผนังชั้นเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes: SCNTs) และแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes: MWNTs)
2. ศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์และหลักการพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์เคมี
3. ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมี Chemical Vapor Deposition) ทั้งแบบเตาความร้อน (Thermal CVD) และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament CVD)
4. วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่ได้จากการสังเคราะห์
5. ศึกษาผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ของเซ็นเซอร์จากคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทั้งแบบเตาความร้อน (Thermal CVD) และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament CVD)
6. เปรียบเทียบผลการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆด้วยเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์
7. ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซ็นเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเนื้อหาในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัตถุประสงค์ สมมุติฐาน ทฤษฎีหรือแนวความคิดของงานวิจัย ขอบเขตงานวิจัยและขั้นตอนของการศึกษา สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีของคาร์บอน

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ เริ่มตั้งแต่รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอนชนิดต่างๆ รวมถึงโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ด้วยวิธีการต่างๆ ลักษณะการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกล และคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ตลอดจนการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ

บทที่ 3 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองที่ประกอบด้วยโลหะคะตะลิสต์โดยใช้โลหะนี้เกิดเป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ และโลหะทองแดงที่ใช้ทำเป็นขั้วเพื่อการต่อใช้งาน โดยโลหะทั้งสองใช้วิธีการสปัตเตอร์ลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 5000 อังสตรอม ตลอดจนการนำฐานรองที่ได้นำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการตกสะสมไอเคมีซึ่งเป็นแบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition) และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical vapor deposition) และนอกจากนั้นยังได้อธิบายถึงรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดลองนี้ด้วย

บทที่ 4 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และการใช้งานเป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ กาววิเคราะห์การเปรียบเทียบด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การทดสอบการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์มาเป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังมีการทดลองผลของอุณหภูมิแวดล้อมที่มีผลต่อการตอบสนองของเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ทำให้ช่วยปรับปรุงค่าการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าและเวลาการตอบสนองให้ดียิ่งขึ้นต่อการตรวจจับแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ และข้อเสนอแนะต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีของคาร์บอน

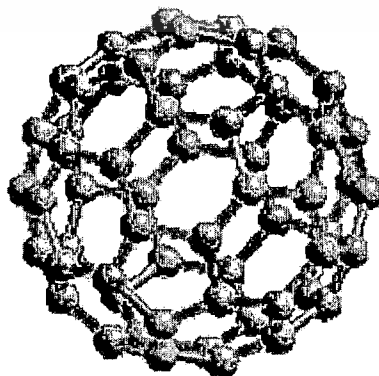
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ เริ่มตั้งแต่รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการต่างๆ ลักษณะการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกล และสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ตลอดจนการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ซึ่งจะขอกกล่าวตามลำดับดังต่อไปนี้

2.1 รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน

คาร์บอนเป็นส่วนประกอบของสสารต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอาหาร อากาศ เครื่องนุ่งห่ม และน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น ทั้งยังมีบทบาทอย่างมากต่อมนุษย์ เนื่องจากองค์ประกอบครึ่งหนึ่งของสสารที่เป็นของแข็งในร่างกายมนุษย์ คือ คาร์บอน ดังนั้นคาร์บอนจึงเป็นหนึ่งในธาตุสำคัญหลักๆ ของมนุษย์ คาร์บอน เป็นธาตุลำดับที่ 6 ในตารางธาตุ มีเลขอะตอมเท่ากับ 6 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 12 และมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในอะตอม แบบ $1s^2 2s^2 2p^3$ สำหรับโครงสร้างของคาร์บอนนั้นสามารถพบได้หลายแบบ โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ชนิดหลักๆ ด้วยกันดังนี้^[12]

2.1.1 โครงสร้างแบบศูนย์มิติ

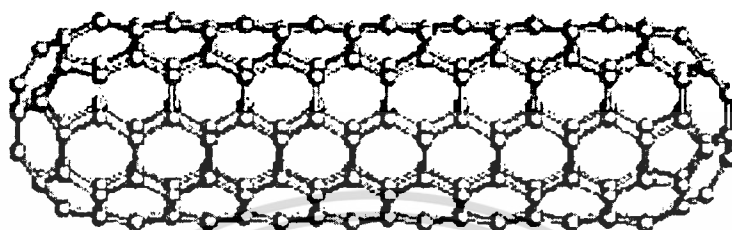
คาร์บอนแบบศูนย์มิติจะมีลักษณะเป็นก้อนเล็กมากจนอาจถือได้ว่ามันเป็นจุดที่ไม่มีมิติหรือศูนย์มิติเรียกว่าฟูลเลอร์ีนส์ (Fullerenes) หรือบัคกี้บอล ซึ่งส่วนใหญ่คาร์บอนที่พบจะอยู่ในรูปของคาร์บอนหกสิบ (C_{60}) โดยแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้งหมด 60 อะตอม มาจับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ทำให้ได้รูปทรงเป็นแบบก้อนทรงกลมกลวงคล้ายลูกเต๋าก้อนหรือลูกบอลขนาดจิ๋วแสดงดังรูปที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ การใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาโทขึ้นไปเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของคาร์บอนแบบศูนย์มิติ^[13]
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 โครงสร้างแบบหนึ่งมิติ

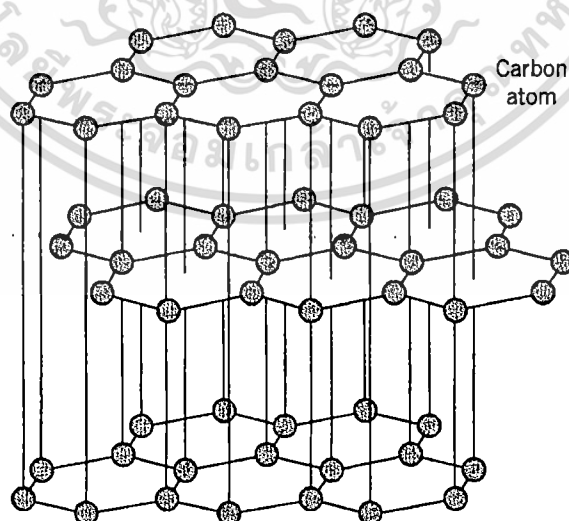
คาร์บอนโครงสร้างแบบหนึ่งมิติจะมีลักษณะเป็นแผ่นคล้ายกับแผ่นกราฟไฟท์ม้วนตัวเป็นท่อที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากจนทำให้ดูเหมือนเป็นเส้นยาวในแนวหนึ่งมิติ เรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งโครงสร้างและการจับตัวของคาร์บอนแบบหนึ่งมิติแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของคาร์บอนแบบหนึ่งมิติ ^[14]

2.1.3 โครงสร้างแบบสองมิติ

มีลักษณะเป็นแผ่นที่วางซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ และยึดระหว่างชั้นเข้าด้วยกันด้วยแรงที่ต่ำกว่าพันธะโคเวเลนต์ ซึ่งก็คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals force) แสดงดังรูปที่ 2.3 คาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบนี้ นิยมนำมาทำเป็นไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมสำหรับโลหะ และใช้เคลือบวัสดุเพื่อป้องกันการเกิดสนิม

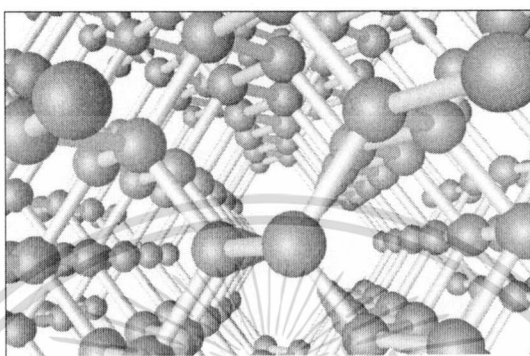


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของคาร์บอนแบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 โครงสร้างแบบสามมิติ

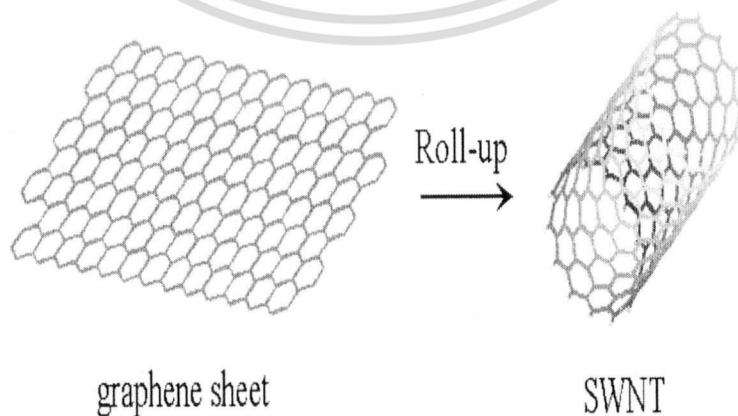
เป็นโครงสร้างที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนทั้งหมดเกาะยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงที่สุด เช่นเดียวกับกับพันธะของเพชร ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความสวยงามและแข็งแรงที่สุด นิยมนำมาใช้เป็นหัวตัดและเจาะวัสดุต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.4 ^[15]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของคาร์บอนแบบสามมิติ

2.2 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotubes: CNTs)

คาร์บอนนาโนทิวบ์จะประกอบด้วยหน่วยย่อยเล็กๆ (โครงสร้างของอะตอมคาร์บอนจำนวน 6 อะตอมมาจัดเรียงตัวกันเป็นวงแหวนรูปหกเหลี่ยม) จำนวนมากมายมาจัดเรียงตัวกันเป็นผนังท่อ ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) ^[17] ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นมีลักษณะเหมือนกับแผ่นกราฟไฟท์ที่มีวนเป็นท่อแสดงดังรูปที่ 2.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นาโนเมตรจนถึงหลายสิบนานาเมตร ^[12] โดยอะตอมคาร์บอนเหล่านี้ต่างเชื่อมต่อกันแบบ sp^2 ^[13, 14] และสามารถแบ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์ออกเป็นสองชนิด คือ



รูป 2.5 ลักษณะพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ^[14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังเดี่ยว (Single-walled Carbon Nanotubes: SWNTs)

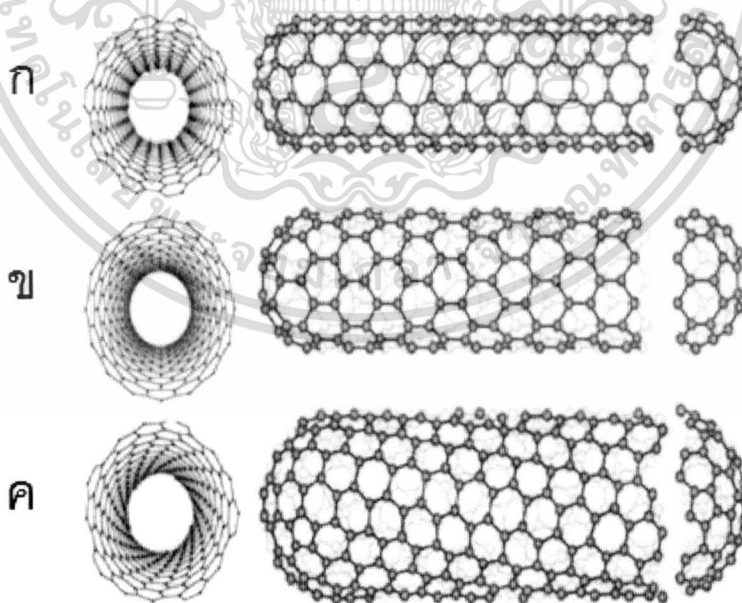
คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังเดี่ยวมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 รูปแบบ ซึ่งแต่ละแบบได้มีการจัดวางตัวในรูปทรงต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 2.6

โดยมีดัชนี (n, m) เป็นตัวบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยกำหนดให้เวกเตอร์ผลลัพท์ของผลรวมเวกเตอร์ $n + m$ คือ เส้นรอบวงของคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ถ้า $m = n$ จะได้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Armchair (n, n) ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0, 0)$ ไปพบกับตำแหน่ง (n, n) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ถ้า $m = 0$ จะได้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Zig-zag $(n, 0)$ ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0, 0)$ ไปพบกับตำแหน่ง $(n, 0)$ มีขนาดมุม θ เท่ากับ 0 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.8

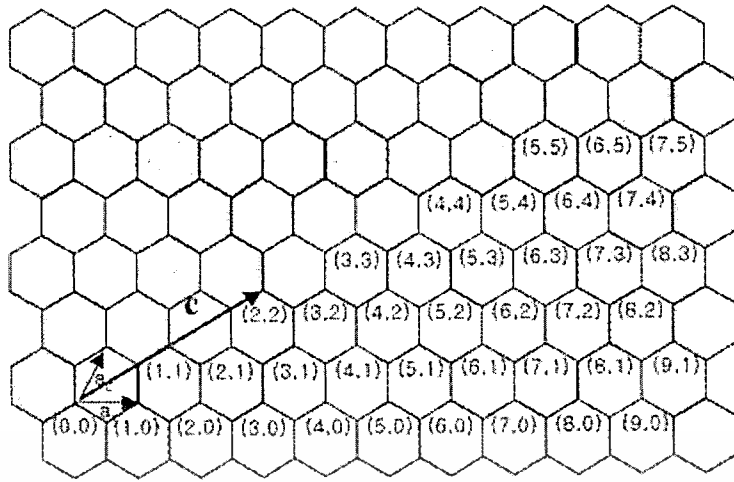
ถ้า $m \neq n$ จะได้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Chiral (n, m) ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0, 0)$ ไปพบกับตำแหน่ง (n, m) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 0-30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.8



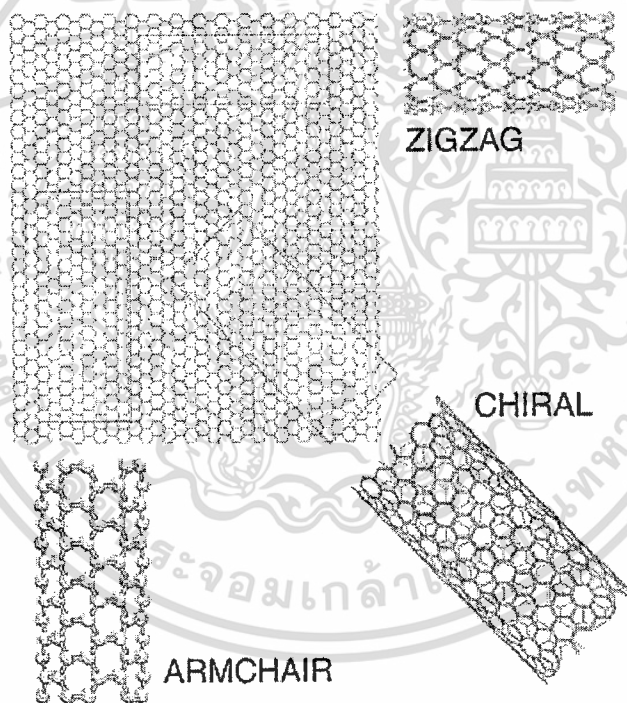
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่างๆ^[12]

(ก) Armchair structure (n, n) , (ข) Zig-zag structure $(n, 0)$ และ (ค) Chiral structure (n, m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



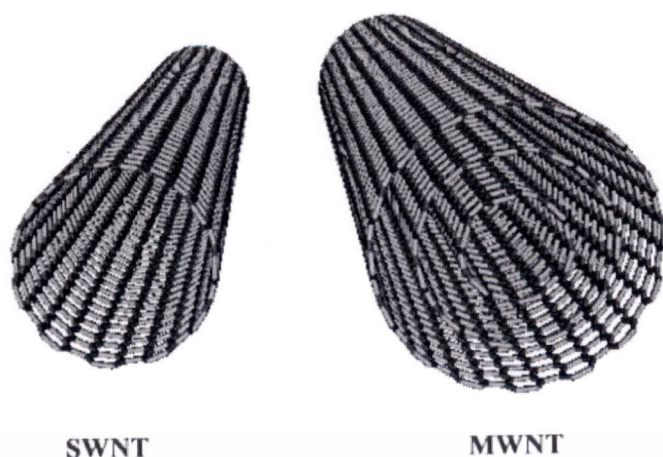
รูปที่ 2.7 ดัชนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมของคาร์บอนนาโนทิวบ์^[18]



รูปที่ 2.8 คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังชั้นเดียวในรูปแบบต่างๆ^[19]

2.2.2 คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes: MWNTs)

ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้นจะมีลักษณะคล้ายกับแบบผนังชั้นเดียวแต่จะมีจำนวนชั้นในการเกิดที่มากกว่าซ้อนทับกันหลายๆชั้น รูปที่ 2.9 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคาร์บอนเอกส้านาโนทิวบ์ผนังเดียวกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้นเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

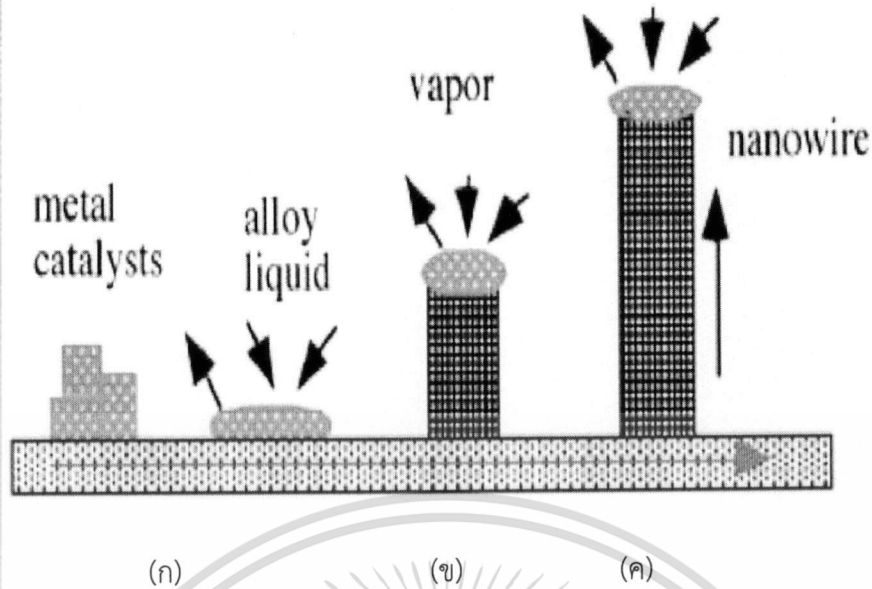
รูปที่ 2.9 ภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์

(ก) คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังชั้นเดียว (ข) คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น

2.3 ทฤษฎีการเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ^[20, 21]

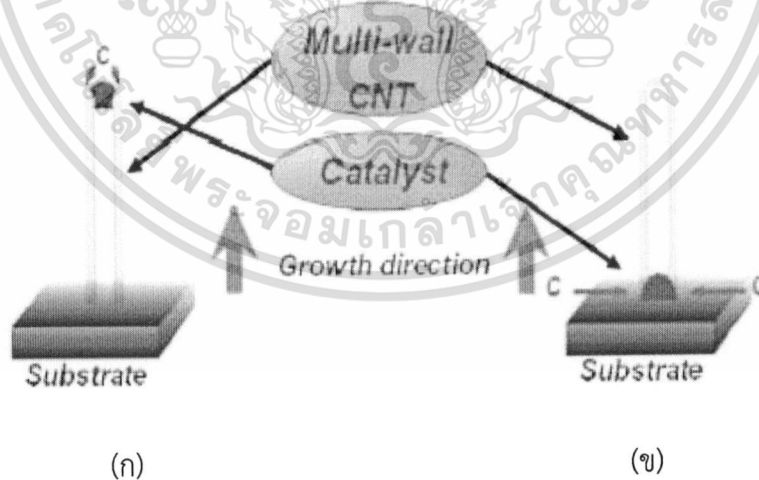
การเติบโตของวัสดุนาโนโครงสร้าง 1 มิติ (one-dimensional nanostructures) ได้แก่ ท่อนาโน (nanotubes) เส้นใยนาโน (nanofibers) และเส้นนาโน (nanowires) นั้นมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกของวัสดุนาโนนั้นๆ ซึ่งเกิดจากกระบวนการนิวเคลียส (nucleation) และการเจริญเติบโตของสารจากสถานะแก๊ส (Vapor) ของเหลว (Liquid) หรือ ของแข็ง (Solid) เมื่อความเข้มข้นของอะตอม ไอออน หรือนิวเคลียสของสารมีมากพอ จะเกิดการไหลไปรวมกันที่นิวเคลียส (Nuclei) และเกิดกระบวนการนิวเคลียสเจริญเติบโตเป็นวัสดุนาโนโครงสร้าง 1 มิติขึ้นนั่นเอง โดยจะเรียกกลไกการเติบโตนี้ว่า กลไก VLS (Vapor-Liquid-Solid mechanism: VLS Mechanism) สำหรับการเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวบ์โดยอาศัยกลไก VLS นี้ อธิบายได้โดย เมื่อโลหะคะตะลิสต์ (metal catalyst) ที่อยู่ในสถานะของแข็ง เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลว และเมื่อให้แหล่งกำเนิดคาร์บอนที่อยู่ในสถานะแก๊สไหลเข้ามา โลหะคะตะลิสต์ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวจะเป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอน โดยอะตอมคาร์บอนจะตกสะสมและแพร่ (diffuse) เข้าไปในผิวโลหะคะตะลิสต์ ทำให้เกิดโลหะผสมระหว่างคาร์บอนและโลหะคะตะลิสต์ที่อยู่ในสถานะของเหลว (alloy liquid) ขึ้น และเมื่ออะตอมคาร์บอนตกสะสมและแพร่มากขึ้นจนอิ่มตัวอย่างสุดขีด จะทำให้เกิดการตกตะกอนของอะตอมคาร์บอนที่ผิวนอกบริเวณรอยต่อพื้นผิวของของแข็งและโลหะผสมที่เป็นของเหลว (solid-alloy liquid interface) เป็นโดมของฟูลเลอร์เร็นส์ (fullerene dome) และสร้างตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ในที่สุด ดังแสดงในรูป 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การสร้างตัวของคาร์บอนนาโนทิวแบบ VLS mechanism ^[20] แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

- (ก) Alloying เป็นขั้นตอนที่โลหะคะตะลิสต์ได้รับความร้อนและมีไอของอะตอมคาร์บอนมาตกสะสมกลายเป็นโลหะผสมที่อยู่ในสถานะของเหลว
- (ข) Nucleation เป็นขั้นตอนที่ไอของอะตอมคาร์บอนเกิดการตกสะสมที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างของแข็งและโลหะผสมที่เป็นของเหลว
- (ค) Axial growth เป็นขั้นตอนการเจริญเติบโตเป็นคาร์บอนนาโนทิว



(ก) (ข)
รูปที่ 2.11 แสดงการเติบโตของคาร์บอนนาโนทิว ^[22]
(ก) แบบ Tip growth และ (ข) แบบ Base growth

โดยรูปแบบการเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบ Base growth และ Tip growth ^[21] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างโลหะคะตะลิสต์กับแผ่นฐานรอง (substrate)

ถ้าอันตรกิริยาระหว่างโลหะคะตะลิสต์กับฐานรองอ่อน (Weak substrate-catalyst interaction) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเป็นแบบ Tip growth โดยโลหะคะตะลิสต์จะอยู่ด้านบนของปลายท่อ ดังแสดงในรูป 2.11 (ก) แต่ถ้าอันตรกิริยาระหว่างโลหะคะตะลิสต์กับฐานรองรับแข็งแรง (Strong substrate-catalyst interaction) การเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเป็นแบบ Base growth โดยโลหะคะตะลิสต์จะอยู่ด้านล่างของท่อ ดังแสดงในรูป 2.11 (ข)

โดยความสมบูรณ์ผลึกของคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของอนุภาคโลหะคะตะลิสต์ อุณหภูมิ และองค์ประกอบของแก๊สที่ใช้ระหว่างการสร้างตัวของท่อ ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นสามารถควบคุมได้จากขนาดของโลหะคะตะลิสต์

2.4 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

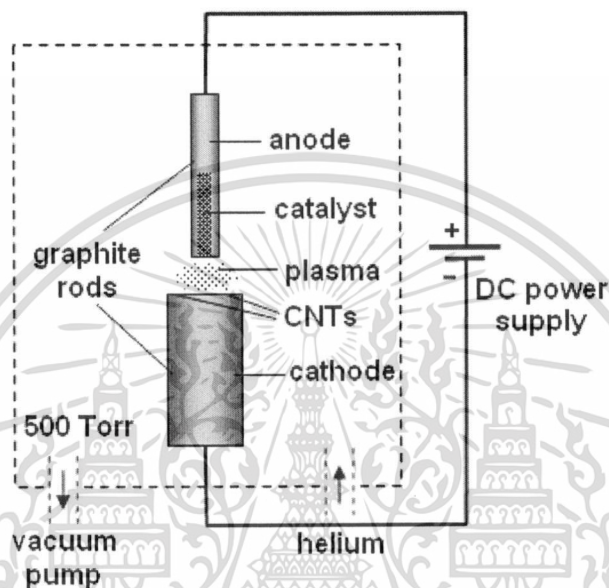
การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นสามารถทำได้ด้วยกันหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีต่างก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป ทั้งในด้านขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณ และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ โดยสามารถแบ่งวิธีการสังเคราะห์หลักๆ ได้ดังนี้^[23]

2.4.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge)^[23]

วิธีอาร์คดิสชาร์จนั้นในช่วงแรกจะเป็นวิธีที่ใช้สังเคราะห์ฟูลเลอร์รีนส์ หรือ C₆₀ ซึ่งต่อมาก็ได้มีการนำมาสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมและรู้จักกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่าที่มีการรับรองผลมา การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีนี้จะทำได้ด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 50-120 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 18-40 โวลต์ ตกคร่อมระหว่างแท่งกราไฟท์สองแท่งที่มีระยะห่างระหว่างแท่งประมาณ 1 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม และอาร์กอน เป็นต้น ที่ความดันประมาณ 500 Torr ความร้อนสูงที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจะทำให้เกิดสถานะพลาสมาขึ้น ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นตรงบริเวณกลางขั้วของแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้ว

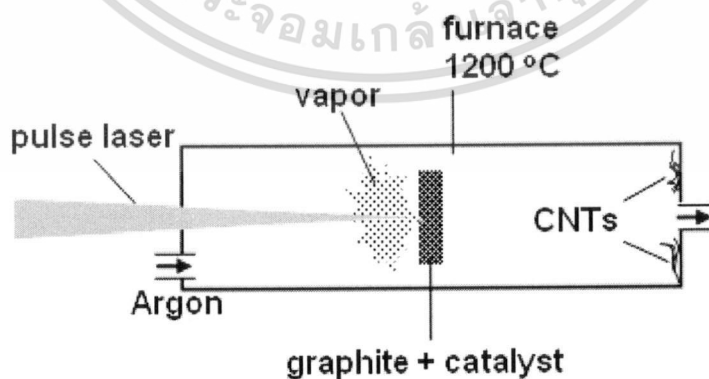
จากรูปที่ 2.12 คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้จะมีความแตกต่างของท่อที่แตกต่างกัน จากการศึกษพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้นั้นขึ้นอยู่กับของผสมระหว่างแก๊สฮีเลียมและอาร์กอน เนื่องจากแก๊สฮีเลียมและอาร์กอนมีสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (diffusion coefficient) และ สมบัติการนำความร้อน (thermal conductivity) ที่แตกต่างกัน ทำให้มีผลต่อความเร็วในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ส่งผลให้ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีขนาดที่แตกต่างกันไป ซึ่งการควบคุมขนาด ความยาว และปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้นั้น อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของการเกิดสถานะพลาสมาและยังสามารถกำหนดชนิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้โดยผสมโลหะบางชนิดเข้าไปในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท่งกราไฟท์เช่น เหล็ก นิเกิล และโคบอลต์ เป็นโลหะคะตะลิสต์เพื่อช่วยให้เกิดการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียว อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเขม่าที่ประกอบด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์และโลหะคะตะลิสต์ที่ผสมอยู่ในแท่งกราไฟท์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ ซึ่งอาจมีความจำเป็นต้องทำการแยกโลหะคะตะลิสต์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ออกจากกันก่อนนำไปใช้ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับประเภทของการนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.12 แสดงภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ [24]

2.4.2 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Ablation)



รูปที่ 2.13 แสดงภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีแสงเลเซอร์ [24]

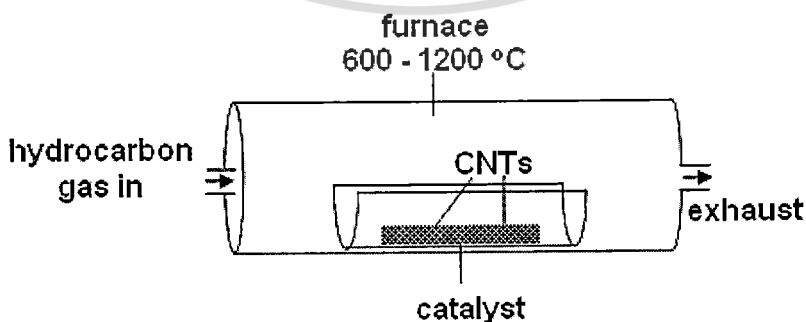
การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์นี้ ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1995 โดยกลุ่มของ Smalley ที่ Rice University วิธีนี้จะใช้แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูง (อาจเป็นทั้งการคำนวณหรือการทดลอง) ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Pulse) หรือ ความยาวคลื่นต่อเนื่อง (Continuous)) ยิ่งไปยังเป้าซึ่งเป็นกราฟไฟท์ ภายใต้สภาวะบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียมและอาร์กอน เป็นต้น ที่ความดันต่ำประมาณ 500 มิลลิเมตรปรอท ในเตาเผาอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ไอร้อนจะขยายตัวและเย็นลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเทคนิคนี้จะคล้ายกับวิธีอาร์คดิสชาร์จตรงที่จะผสมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิเกิล และโคบอลต์ เป็นโลหะคตะลิสต์เพื่อช่วยให้เกิดการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียว ซึ่งวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.13

2.4.3 วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD)

เป็นวิธีที่ให้ความร้อนแก่แก๊สไฮโดรคาร์บอน ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน โดยแก๊สที่นิยมใช้คือ มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอะเซทิลีน (C_2H_2) หรือใช้แอลกอฮอล์ที่ระเหยได้ง่าย เช่น เมทานอล (methanol) และเอทานอล (ethanol) เป็นต้น โดยความร้อนที่นิยมใช้ในการแยกโมเลกุลของแก๊สให้แตกตัวเป็นอะตอมคาร์บอนคือ พลาสมาหรือขดลวดความร้อน ซึ่งวิธีนี้ต้องอาศัยโลหะคตะลิสต์ เช่น นิเกิล เหล็ก และโคบอลต์ เป็นตัวช่วยในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์อยู่ที่ประมาณ 600-900 องศาเซลเซียส ซึ่งวิธีนี้สามารถควบคุมขนาดและความยาวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดขึ้นได้โดยการควบคุมขนาดของโลหะคตะลิสต์และอัตราการไหลของแก๊ส ข้อดีของวิธีนี้ คือ สามารถทำได้ทั้งในบรรยากาศปกติและบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียมและอาร์กอน เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถผลิตคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ในปริมาณมากและมีความบริสุทธิ์สูงอีกด้วย ซึ่งวิธีการตกสะสมไอเคมีมีหลายเทคนิคด้วยกัน คือ

(1) กระบวนการตกสะสมไอเคมีแบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition: Thermal CVD)



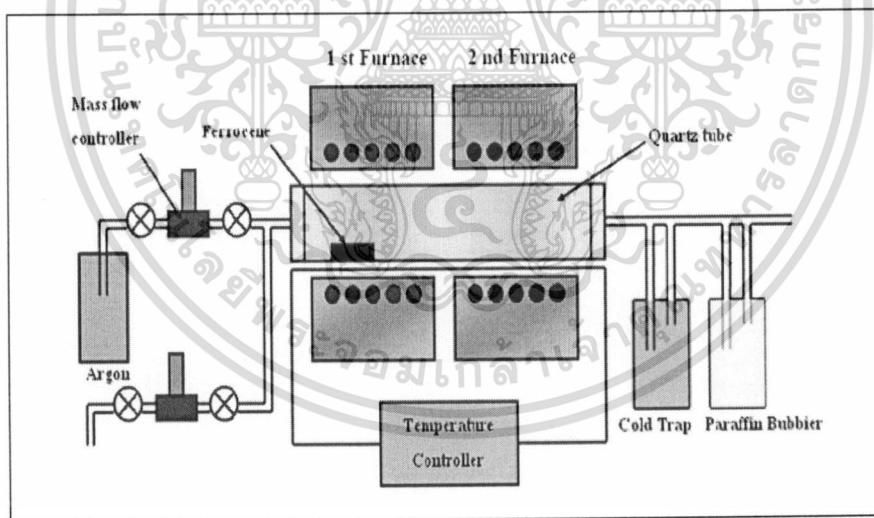
รูปที่ 2.14 แสดงภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีแบบเตาความร้อน^[24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีนี้จะใช้ เหล็ก นิเกิล โคบอลต์ หรือโลหะผสมของทั้งสามชนิดนี้ เป็นตัวคะตะลิสต์เคลือบบนแผ่นฐานรอง โดยมีการเตรียมโลหะคะตะลิสต์ให้มีขนาดเล็กลงด้วยการนำไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูอริก (HF) จากนั้นนำโลหะคะตะลิสต์ที่ผ่านการเตรียมให้มีขนาดเล็กลงแล้วมาใส่ในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 600-1200 องศาเซลเซียส โดยมีแก๊สไฮโดรคาร์บอน ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) เป็นแห่งกำเนิดคาร์บอน ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อยเช่นอาร์กอนและไนโตรเจนดังรูปที่ 2.14

(2) วิธีการเติบโตแบบแบ่งเฟส (Vapor Phase Growth)

จากรูปที่ 2.15 เป็นการแสดงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีการเติบโตแบบแบ่งเฟสซึ่งวิธีนี้มีเตาเผา 2 เตา โดยที่เตาเผาแรกจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเตาเผาที่สอง และมีโลหะคะตะลิสต์วางอยู่ เมื่อปล่อยแก๊สไฮโดรคาร์บอนเข้าเตา ก็จะพาไอของโลหะคะตะลิสต์ที่ระเหยออกมาแล้วไปรวมตัวกันที่เตาเผาที่สอง และจัดเรียงตัวกันเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้น ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนั้นจะทำภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน และคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีทั้งชนิดผนังชั้นเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 นาโนเมตร และชนิดผนังหลายชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70-100 นาโนเมตร

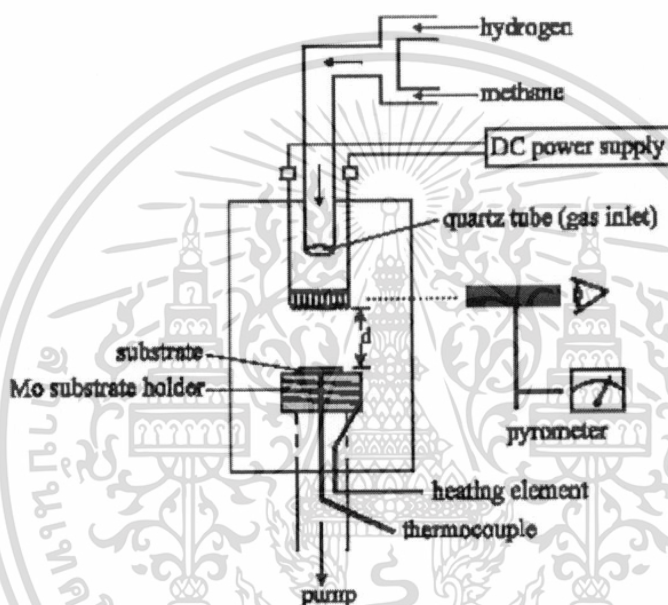


รูปที่ 2.15 แสดงภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีแบบแบ่งเฟส [23]

(3) แบบขดลวดความร้อน (Chemical Vapor Deposition: HF-CVD)

วิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน (HF-CVD) นี้ ซึ่งจะมีหลักการคล้ายกับวิธีเตาความร้อนเพียงแต่จะใช้ขดลวดความร้อน (filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกับแก๊ส วิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อนนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและ ในเชิงพาณิชย์ จากรูปที่ 2.16 เอกสารฉบับนี้จะไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นหลักการทำงานแบบขดลวดความร้อนคือ ใช้ไฟฟ้ากระแสสูงจ่ายให้ขดลวดความร้อน เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวดภายในห้องปฏิกิริยา (Chamber) โดยในห้องปฏิกิริยาจะมีแก๊สที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน เช่นไฮโดรเจนของแอลกอฮอล์^[25-27] อะซิโตน หรือมีเทน เป็นต้น ไหลผ่านเข้ามาภายในห้องปฏิกิริยา ลวดความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1600–2000°C ทำให้อะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆ แยกตัวออกจากโมเลกุลของแก๊สและไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้เตรียมไว้บนแผ่นฐานรอง โดยแผ่นฐานรองจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 550 – 900°C ทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นของเหลวและจับตัวกับคาร์บอนที่ตกลงมา เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็น เหล็ก (Fe) โคบอล (Co) หรือ นิกเกิล (Ni)^[25-27] ซึ่งหาได้ง่าย



รูปที่ 2.16 แสดงภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธีแบบขดลวดความร้อน

2.5 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์^[28, 30]

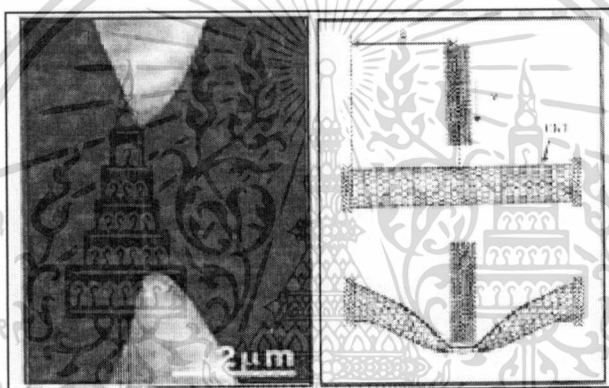
2.5.1 สมบัติเชิงกล

เพชรซึ่งรู้กันดีว่ามีความแข็งแรงมากด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของกราฟีนนั้นคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราฟีนมีความแข็งแรงมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังกล่าว รวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้คาร์บอนนา

โนทิวบ์แข็งแรงกว่าเพชรและกราฟีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีค่าสูงถึง 1 เทราปาสคาล (TPa) หรือ 1000 กิกะปาสคาล (GPa) คงเป็นที่สงสัยว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์เล็กจิ๋วขนาดนั้นจะวัดได้อย่างไร วิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นนี้ทำได้หลายวิธีเช่น โดยอาศัย Thermal vibration หรือใช้ scanning force microscopy โดยยึดปลายหนึ่งไว้แล้ววัดการสั่นสะเทือนในสนามไฟฟ้าและมีการใช้ atomic force microscopy (AFM) จับคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทั้งสองข้างแล้วดึงจนขาดเพื่อหาความต้านทานแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ก) ความแข็งแรงของคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีค่าอยู่ระหว่าง 11-63 Gpa ขณะที่ความแข็งแรงของเหล็กกล้าอัลลอยมีเพียง 2Gpa นอกจากนี้ SWCNTs สามารถยึดตัวได้ถึง 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่จะขาดออกจากกัน SWCNTs มีพื้นที่ผิวได้ถึง $1500 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยมีความหนาแน่น $1.33 \text{ ถึง } 1.40 \text{ g/cm}^3$ รูปที่ 2.17 (ข) ภาพแสดงการยืดหยุ่นที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ขณะที่ม้วนตุลามาชนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง



(ก)

(ข)

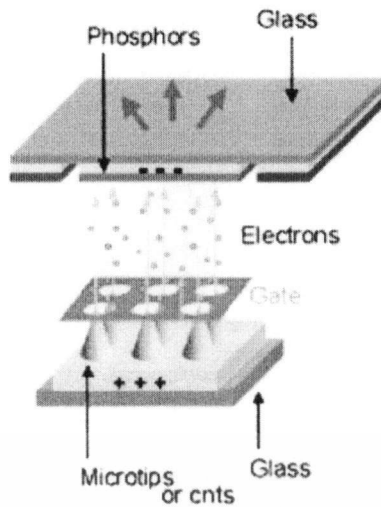
รูปที่ 2.17 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์

- (ก) ภาพถ่าย SEM ของ CNT ที่อยู่ระหว่างปลายสองด้านของ AFM เพื่อวัดค่าความต้านทานแรงดึง
(ข) ภาพแสดงการยืดหยุ่นที่ดีของ CNT ขณะที่ม้วนตุลามาชนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง

2.5.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

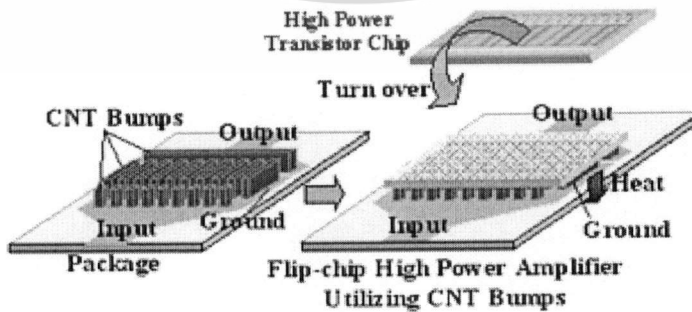
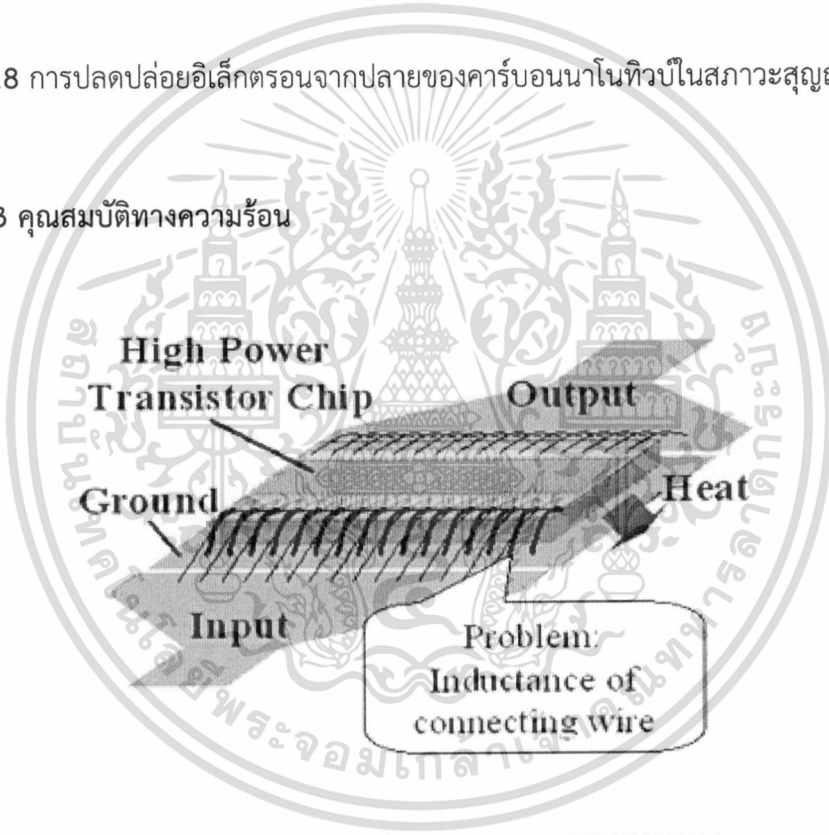
คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มัดหนึ่งของคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 A/cm^2 ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง 10^6 A/cm^2 นอกจากนี้แล้ว คุณสมบัติทางไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของคาร์บอนนาโนทิวบ์ คือ สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ในสภาวะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า เช่นจะกระตุ้น Phosphors ที่วางไว้ห่าง 1 mm จะใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว molybdenum ดังแสดงในรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวบ์ในสถานะสุญญากาศ

2.5.3 คุณสมบัติทางความร้อน



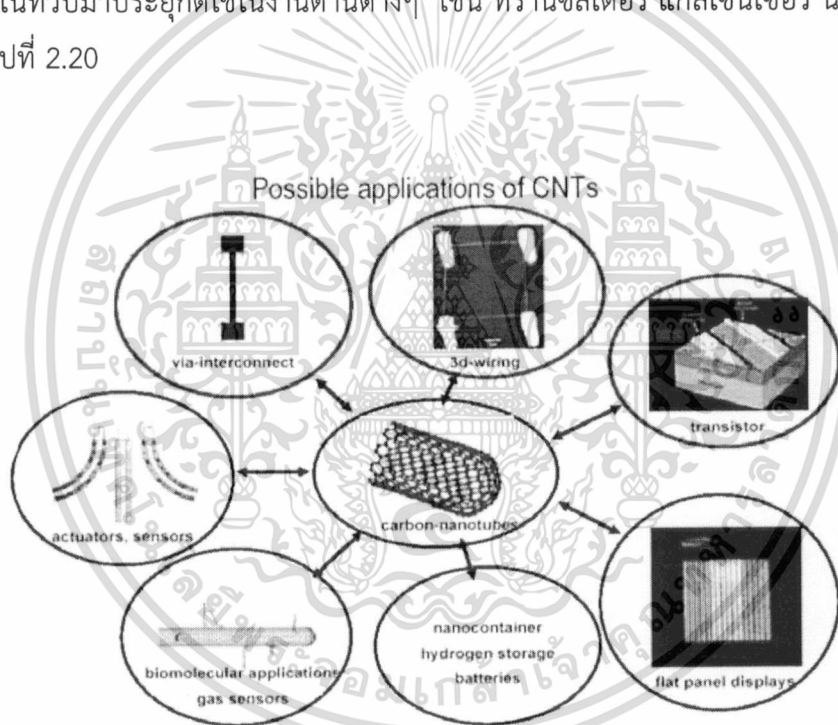
รูปที่ 2.19 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพ [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความนำความร้อนของคาร์บอนนาโนทิวบ์สูงถึง 2000 W/mK โดยมีบางรายงานกล่าวว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าการนำความร้อนได้ถึง 6000 W/mK เมื่อเปรียบเทียบกับเพชรที่มีค่าความนำไฟฟ้าเพียง 3320 W/mK นอกจากนี้ คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง $2800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้สุญญากาศ และ $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในสภาวะปกติ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงกายภาพ ดังรูปที่ 2.19 เป็นการนำคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวบ์มาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพที่ใช้งานกำลังสูง

2.6 การประยุกต์ใช้งานคาร์บอนนาโนทิวบ์

คุณสมบัติพิเศษของคาร์บอนนาโนทิวบ์ดังได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ จึงมีการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ แก๊สเซ็นเซอร์ นาโนคอนเนคเตอร์แสดงรูปที่ 2.20



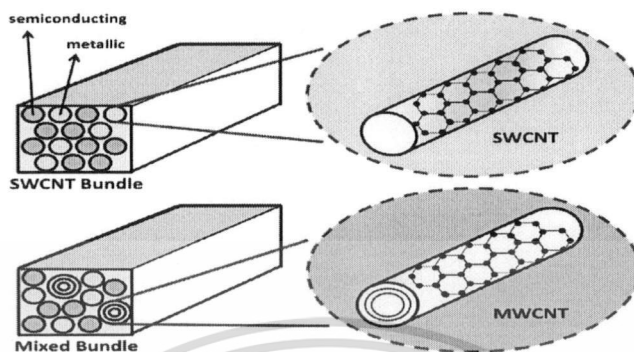
รูปที่ 2.20 แสดงภาพรวมการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งาน^[32]

2.6.1 ตัวเก็บพลังงาน (energy storage)^[33]

ขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่ทำจากกราฟิท์วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และเส้นใยคาร์บอน นิยมนำมาใช้ในแบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cells) และการประยุกต์ทางขั้วไฟฟ้าเคมี ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้า โดยจาก ideal Nernstian behavior พบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีอัตราการถ่ายเทอิเล็กตรอนมากที่สุด ดังนั้นจึงมีการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาใช้เป็นตัวเก็บพลังงาน เช่น เป็นตัวเก็บไฮโดรเจน (Hydrogen storage) เป็น

เอกสตรัคชันของข้อมูลจากเอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยระบบอัตโนมัติของห้องสมุดดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

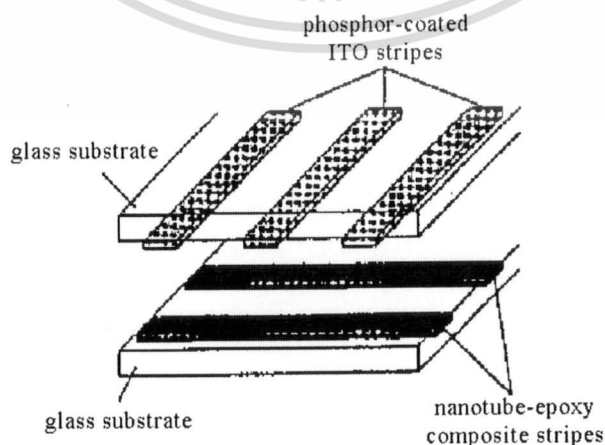
ตัวสอดแทรกของแบตเตอรี่ชนิดประจุลิเทียม (Lithium intercalation) และเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดขั้วไฟฟ้าเคมี (Electrochemical super capacitors) แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงภาพการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาสร้างเป็นตัวเก็บพลังงาน

2.6.2 อุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (field emission devices)

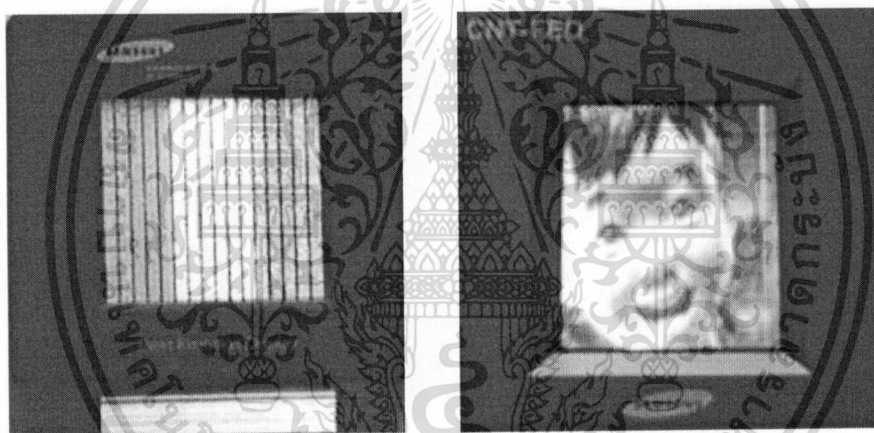
อาศัยหลักการที่ว่าถ้าของแข็งถูกวางไว้ในสนามไฟฟ้าที่สูงมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้ระดับเฟอร์มี (Fermi level) หลุดจากของแข็ง โดยจะทะลุผ่าน (tunneling) กำแพงศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของแข็ง (surface potential barrier) โดยกระแสไฟฟ้าที่แผ่ออกมา (emission current) นั้นขึ้นอยู่กับความแรงของสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวของของแข็งและค่าฟังก์ชันงาน (work function) โดยค่าของฟังก์ชันงานนั้นจะบอกถึงพลังงานที่ใช้ดึงอิเล็กตรอนจากสถานะสูงสุดที่อิเล็กตรอนถูกยึดไว้ (highest bounded state) เข้าไปในระดับสุญญากาศ (vacuum level) โดยความแรงของสนามไฟฟ้าที่ให้ต้องสูงมากพอที่จะดึงอิเล็กตรอนออกมา



รูปที่ 2.22 แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในจอแสดง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ภาพแบบแบนของ Northwestern University
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ถูกนำมาใช้งานในด้านนี้ เนื่องจากมีรูปร่างที่สามารถขยายออกได้ (Elongated shape) จึงทำให้สนามไฟฟ้าที่ได้มีค่ามากขึ้นไปด้วย (large field amplification) อีกทั้งยังนำไฟฟ้าได้ดี ขนาดเล็ก พลังงานที่แผ่ออกมาจึงมีค่าน้อย และสารอื่นๆ ทำปฏิกิริยาด้วยได้ยาก แต่ปัญหาของการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นอุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันก็ยังคงมีอยู่ โดยจะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของการนำไฟฟ้าและการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (conductivity and emission stability) แสดงดังรูปที่ 2.22

ตัวอย่างการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นอุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันเช่น จอแสดงผลแบบแบน (flat panel displays) ดังรูปที่ 2.23 ท่อสำหรับการดิสชาร์จแก๊ส (gas-discharge tubes) ในเครื่องฉายโทรคมนาคม ปืนยิงอิเล็กตรอน (electron guns) ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน หัววัดในกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) และเครื่องขยายไมโครเวฟ (microwave amplifiers) เป็นต้น

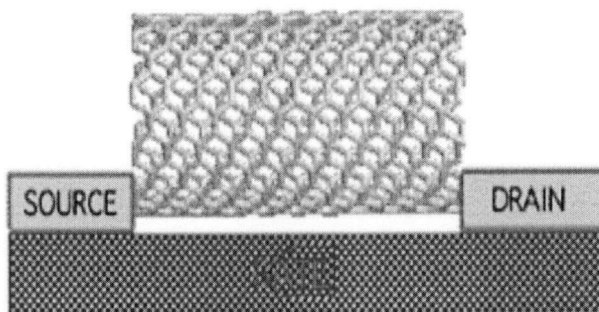


รูปที่ 2.23 แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ของบริษัท Samsung (ก) ขนาด 4.5 นิ้ว^[35] และ (ข) 5 นิ้ว^[36]

2.6.3 ทรานซิสเตอร์ (transistors)

ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้า (field-effect transistor: FET) คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์สามขา สามารถสร้างขึ้นจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียวที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำเพียงหนึ่งเส้นมาวางบนขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว โดยเมื่อใส่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าไปยังขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นเกต (Gate electrode) จะทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกสวิตช์จากสถานะที่นำไฟฟ้า (Conducting state) ไปยังสถานะที่ไม่นำไฟฟ้า (insulating state) ได้ โดยสามารถนำทรานซิสเตอร์ดังกล่าวมาใช้งานพร้อมๆ กันได้ โดยจะทำหน้าที่คล้ายกับสวิตช์ลอจิก (logical switch) ในคอมพิวเตอร์นั่นเอง แสดงในรูปที่ 2.24

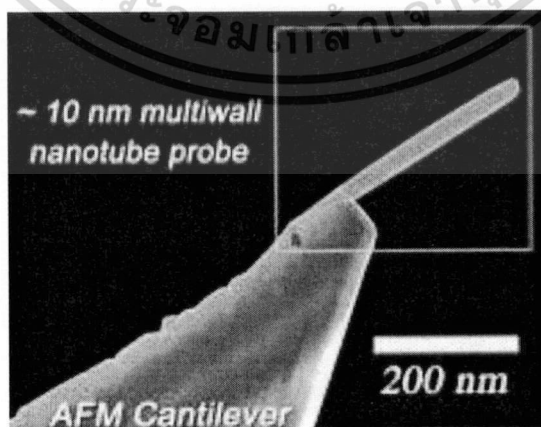
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียวในทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้า^[37]

3.6.4 โพรบวัดนาโนและนาโนเซ็นเซอร์ (Nanoprobes and Nanosensors)

โพรบวัดของกล้องจุลทรรศน์แบบเข็มกวาด (Scanning Probe Microscopes: SPMs) เช่น กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดทันเนลลิง (scanning tunneling microscopy: STM) ต้องการโพรบวัดที่มีขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง ทำให้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวบ์มาใช้เป็นโพรบวัด ทั้งนี้เพราะคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าโมดูลัสของความแข็งแรงและยังมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้มีข้อได้เปรียบกว่าโพรบวัดที่ทำจากซิลิคอนซิลิคอนไนไตรด์ และโลหะชนิดอื่นๆ ในแง่ของความมีเสถียรภาพและความคงทน เนื่องจากไม่ได้รับกระแทกอย่างรุนแรงจากพื้นผิว และที่สำคัญคาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงมากถึง 1.2 นาโนเมตร จึงเป็นการลดปัญหาในเรื่องขีดจำกัดมุมโค้งและรัศมีความโค้งของปลายโพรบวัด เช่น การวัดดีเอ็นเอ เป็นต้น ดังนั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์จึงเหมาะสำหรับทำโพรบวัดเพื่อเพิ่มความสามารถแยกแยะ (resolution) ให้กับกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้ แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงโพรบวัดคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 NASA Ames Research Center^[38]
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 เป้าขนาดนาโน (Nano templates)

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีช่องว่างภายในท่อที่เล็กมากและมีแรงในการดึงดูดภายในท่อสูง (capillary forces) ทำให้สามารถบรรจุแก๊สและของเหลวภายในคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ เช่น มีการเติมสารลงไปคาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อสร้างเส้นนาโน (nanowires) ทำให้สามารถศึกษาสมบัติแบบเปียก (wetting characteristic) ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ โดยการเติมแก๊สหรือของเหลวลงในคาร์บอนนาโนทิวบ์หนึ่งชั้นเดียวนั้นจะมีความยากมากกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น เพราะว่ามีขนาดที่เล็กกว่านั่นเอง แต่ปัญหาที่พบโดยทั่วไป คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนใหญ่จะเป็นแบบปลายปิด จึงต้องทำการเปิดปลายท่อก่อนนำไปใช้ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีอย่างง่าย ๆ เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ซึ่งสร้างแหดตาข่าย (pentagons) ที่อยู่บริเวณยอดปลายปิดของท่อ จะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าบริเวณด้านข้าง ดังนั้นตรงส่วนที่เป็นบริเวณยอดของท่อจะถูกเอาออกไป ในขณะที่ด้านข้างของท่อยังคงอยู่

2.6.6 วัสดุผสม (composite materials)

คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความแข็ง (stiffness) และมีความยืดหยุ่นสูงมาก ดังนั้นจึงถูกนำไปใช้กับการปรับปรุงโครงสร้างในวัสดุต่างๆ เช่น การเสริมแรง (reinforcements) ในวัสดุผสมที่ต้องการความแข็งแรงสูง ทนทาน และน้ำหนักเบา แต่การทดลองที่บอกว่าการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ในวัสดุผสมดีกว่าการเติมเส้นใยคาร์บอนยังมีไม่มากนัก เนื่องจากปัญหาที่พบในการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปทำเป็นวัสดุผสมมีหลายอย่าง เช่น ปัญหาของการสร้างรอยต่อ (interface) ระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับพอลิเมอร์ เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นมีพื้นผิวที่เรียบและมีขนาดที่ใกล้เคียงกับห่วงโซ่ของพอลิเมอร์ (polymer chain) ปัญหาต่อมาคือ การที่คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากมักจะอยู่กันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เกิดการเลื่อนไปมาได้ง่าย เนื่องจากเวลาที่คาร์บอนนาโนทิวบ์มาอยู่ใกล้กันจะมีแรงกระทำต่อกันเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมาก ทำให้การรับแรงทำได้น้อยกว่าการอยู่แบบเส้นเดี่ยว จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียวมีความแข็งแรงกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น โดยการแก้การอยู่เป็นกลุ่มของคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถทำได้โดยการทำให้แตก และการทำให้กระจุกกระจาย (disperse) เป็นต้น แต่ข้อดีของการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ในวัสดุผสมนั้น คือ เพิ่มความเหนียว (toughness) ของวัสดุผสม โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์จะดูดกลืนพลังงานเอาไว้ขณะมีการยืดหยุ่นเกิดขึ้นขึ้น และจากการที่คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความหนาแน่นน้อย ทำให้เพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าและยังทนทานต่อแรงกดต่างๆ อีกด้วย

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ เช่น การเติมพอลิเมอร์ที่สามารถตอบสนองต่อแสงได้ (Photoactive polymers) เช่น PPV (poly-p-phenylenevinylene) ด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์พบว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าอย่างมาก แต่มีสูญเสียผลของการตอบสนองต่อแสง (photoluminescence) และผลของการตอบสนองทางไฟฟ้า (electro-luminescence) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น อีกทั้งวัสดุผสมที่ได้ยังมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย สำหรับวัสดุผสมระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับพอลิเมอร์นั้นถูกนำไปใช้ในหลายสาขา เช่น งานด้านชีวเคมี คือใช้เป็นเยื่อเลือกผ่านของโมเลกุลหรือใช้เป็นทีปลูกเซลล์กระดูก (osteointegration) เป็นต้น

ปัจจุบันบริษัท Babolat ของฝรั่งเศสได้นำแร็กเก็ต VS Nanotube Power ออกจำหน่ายเป็นครั้งแรกในปี 2002 โดยทำจากวัสดุผสมระหว่างแกรไฟต์กับคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำให้แร็กเก็ตมีความทนทานสูงมาก ในขณะที่น้ำหนักเบาลง การตีลูกมีพลังเพิ่มมากขึ้น และลดอาการเกร็งของกล้ามเนื้อของนักเทนนิสได้เป็นอย่างดี^[38] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แร็กเก็ต VS Nanotube Power ของ Babolat^[36]

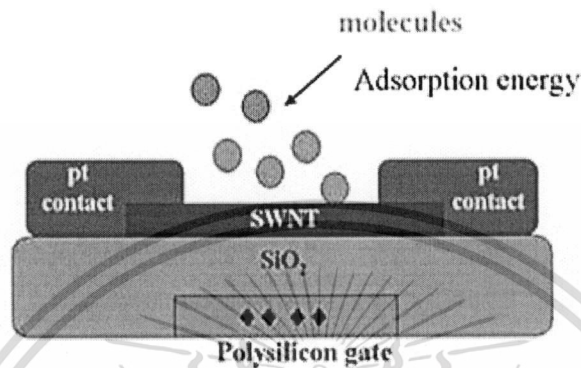
ในอนาคตคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเข้ามามีบทบาทเพิ่มขึ้น ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ วัสดุผสม เซนเซอร์ ยานพาหนะ ตลอดจนถึงยานขนส่งอวกาศ ซึ่งจะประกอบไปด้วยวัสดุ อุปกรณ์ ที่มีเทคโนโลยีขั้นสูงบรรจุอยู่ ทำให้สามารถอำนวยความสะดวกและตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้มากขึ้น

2.6.7 งานทางด้านเซนเซอร์ (Sensors)

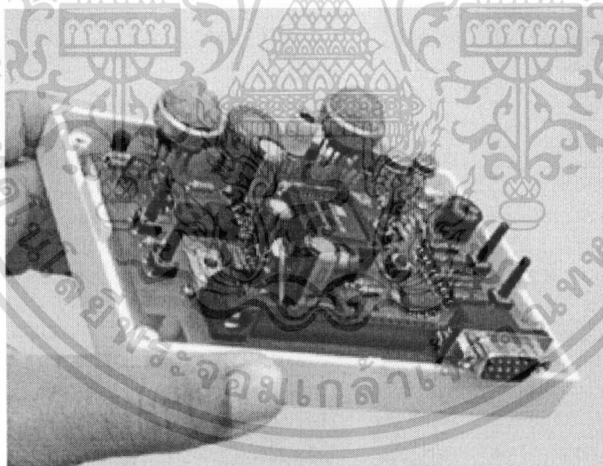
การที่คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถทำให้อยู่ในรูปของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) โดยที่สารกึ่งตัวนำนี้สามารถตอบสนองต่อสารพวกอัลคาไลน์ ฮาโลเจนและแก๊สต่างๆได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นสารกึ่งตัวนำ Semiconducting Carbon Nanotube จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ดีขึ้นอย่างมาก ทำให้เซนเซอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์นี้มีความไวมากขึ้น ซึ่งก็มีการพัฒนาเป็นเซนเซอร์

เอกสารเป็นเอกสารที่ส่งผ่านวัสดุที่รับภาระเชิงกลเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจวัด Cytochrome C, Methane, Krypton และ โมเลกุลของ Alkyl amine แบบสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น แต่การประยุกต์ใช้ Semiconducting Carbon Nanotube เป็นเซ็นเซอร์แบบนี้มีปัญหา คือไม่สามารถแยกชนิดของแก๊สที่ความเข้มข้นต่ำได้และยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิและความเร็วแก๊สที่ไหลผ่าน ทำให้ขาดความสามารถเชิงจำเพาะหรือคัดเลือกเฉพาะที่เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเซ็นเซอร์



รูปที่ 2.27 แสดงการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซ็นเซอร์เคมี



รูปที่ 2.28 หัววัดแก๊สที่สร้างจากคาร์บอนนาโนทิวบ์และวงจรการใช้งาน^[39]

คาร์บอนนาโนทิวบ์ในรูปของเซ็นเซอร์ส่วนมากจะอยู่ในรูปของงานวิจัยซึ่งยังมุ่งเน้นไปที่จะใช้ประโยชน์จากนาโนเทคโนโลยี ในการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สขนาดเล็กที่มีความไวในการรับรู้สูง คาร์บอนนาโนทิวบ์จะถูกสังเคราะห์ขึ้นในรูปแบบต่างๆ ด้วยกระบวนการทางเคมี โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้มานั้นจะถูกนำไปใช้ร่วมกับสารประกอบอื่นๆ เช่น ฟิล์มบางโลหะ โพลีเมอร์ ฯลฯ ในการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซ เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นได้รับการวิเคราะห์คุณสมบัติการรับรู้กับแก๊สต่างๆ หลายชนิด เช่น แก๊สมีเทน (methane) แอลกอฮอล์ (alcohol) เป็นต้น คุณสมบัติเด่นของเซ็นเซอร์ที่

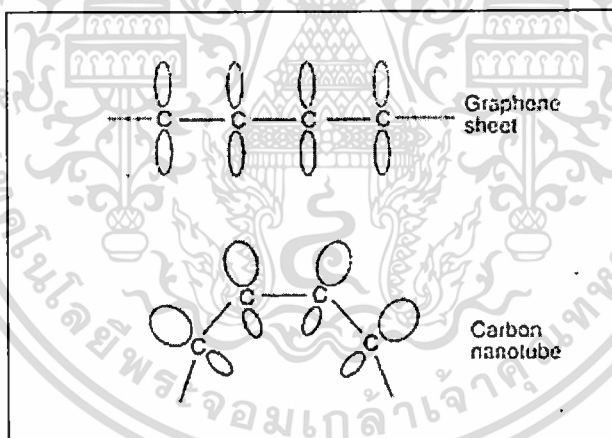
เอกสารถูกบันทึกและเผยแพร่โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างขึ้น คือ มีความไวในการรับรู้สูง และมีอุณหภูมิในการทำงานต่ำ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในงานตรวจวัดแก๊สได้หลากหลายรูปแบบ อีกทั้งมีต้นทุนต่ำเมื่อมีการนำไปผลิตเชิงพาณิชย์ จากรูปที่ 2.27 เป็นรูปแบบโครงสร้างหนึ่งของเซ็นเซอร์ที่ทำมาจากคาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อใช้ในการดูดซับโมเลกุลแก๊ส และรูปที่ 2.28 เป็นเซ็นเซอร์ที่ได้จากคาร์บอนนาโนทิวบ์โดยมีการประกอบเข้าด้วยกันกับวงจรเพื่อการแสดงผลเมื่อนำมาใช้งาน

2.7 หลักการพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับเซ็นเซอร์

ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) เกิดจากการถ่ายประจุจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง เซลล์ไฟฟ้าเคมีอันหนึ่งจึงต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วจึงเกิดเป็นวงจรปิดได้ ประจุที่ถ่ายเทในขั้วตัวอย่างอาจเป็นทั้งอิเล็กตรอนหรือโฮลหรือทั้งสองอย่าง แผ่นกราฟไฟท์ที่ประกอบกันเป็นผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีลักษณะโค้ง อิเล็กตรอนจึงสามารถเปลี่ยนรูป จากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เป็นการกระจายตัวอย่างไม่สมดุลทั้งด้านในท่อและนอกท่อ คาร์บอนนาโนทิวบ์ทรงกระบอก (cylindrical sheet) ดังแสดงในรูปที่ 2.29



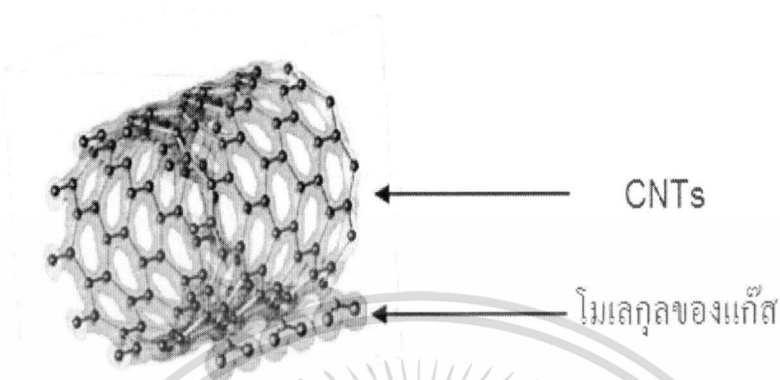
รูปที่ 2.29 แสดงการกระจายตัวของอิเล็กตรอนบนระนาบแผ่นกราฟไฟท์ที่ผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์

เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการผิดรูปด้านนอกท่อ จึงมีเฉพาะ π - Electron ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าเคมี คาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นกับโมเลกุลของแก๊ส CO_2 , NO_2 , NH_3 , O_2 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ เป็นต้น โดยมีโมเลกุลของการยึดเกาะโมเลกุลของแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.30

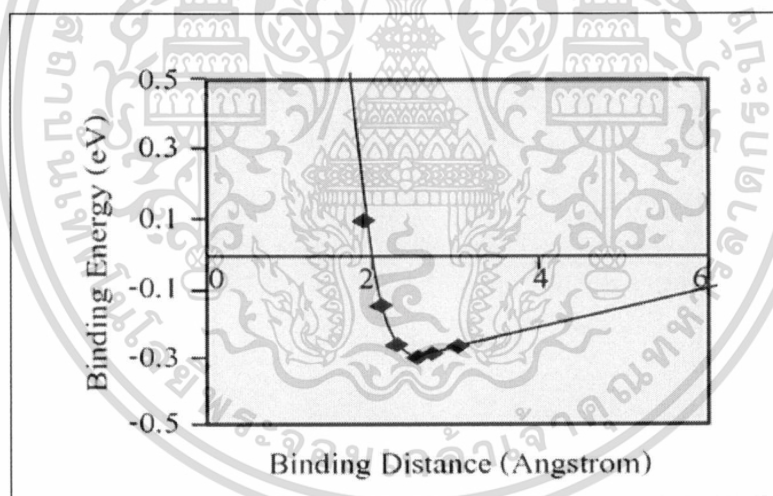
หลังการยึดเกาะ (Binding Energy) ของโมเลกุลแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว จะเป็นฟังก์ชันกับระยะทางจากโมเลกุลของแก๊สถึงคาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งจากการคำนวณกับโมเลกุลแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ NO_2 ที่มีโครงสร้างการยึดเหนี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวตามโมเดลรูปที่ 2.30 จะมี adsorption Energy ประมาณ 0.3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.31



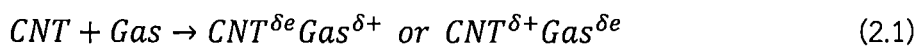
รูปที่ 2.30 แสดงโมเดลการยึดเกาะโมเลกุลของแก๊สจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT



รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ NO_2 กับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว

จากกราฟพบว่าโมเลกุลของแก๊สที่กล่าวข้างต้นมีการแพร่ที่สูงบนพื้นผิวคาร์บอนนาโนทิวบ์ จากการวิเคราะห์ด้วยความหนาแน่นอิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่า ประจุอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากอะตอมคาร์บอนกับโมเลกุลของแก๊ส จะถูกถ่ายหรือดึงจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำให้มีประจุพาหะ (Carrier) มากขึ้นหรือลดลง ทำให้การนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวและชนิดหลายผนัง เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามลำดับ ปฏิริยาไฟฟ้าเคมีทั่วไปเขียนได้ดังสมการที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

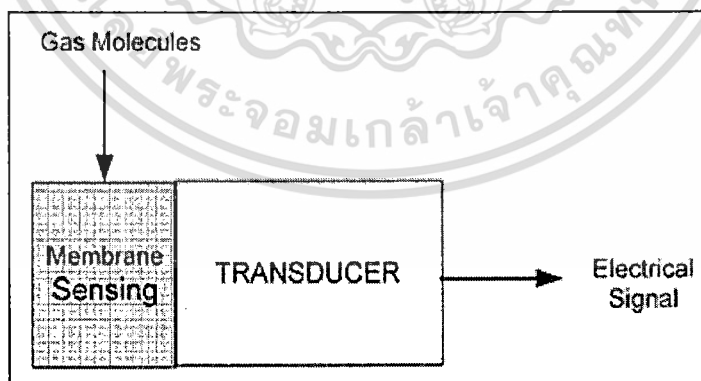


เมื่อ δ คือ ตัวเลขแสดงจำนวนประจุที่ถูกจ่ายระหว่างเกิดปฏิกิริยา

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างอะตอมและกลไกการผิดรูป (Mechanical deformation) คุณสมบัติทั้งสองทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เหมาะที่จะนำมาเป็นเซ็นเซอร์แก๊ส

2.8 แก๊สเซ็นเซอร์ (Gas sensor)

หลายประเทศได้พยายามหาวิธีการต่างๆ เพื่อจัดการกับปัญหามลพิษทางอากาศ อาทิ สนับสนุนการใช้เทคโนโลยีสะอาด บางประเทศหันไปใช้พลังงานทดแทนอย่างพลังงานนิวเคลียร์เพราะเป็นพลังงานที่สะอาดและมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐกิจ ขณะเดียวกันก็มีแผนการติดตามคุณภาพอากาศอยู่เป็นระยะๆ และรายงานคุณภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดที่ติดตั้งกระจายตามพื้นที่ต่างๆ และสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบเคลื่อนที่ (Mobile unit) แต่ในสถานการณ์ปัจจุบันราคาค่าใช้จ่ายของสถานีเคลื่อนที่นี้สูงขึ้น และการใช้เครื่อง Gas Chromatography Infrared Spectroscopy ค่อนข้างจะยุ่งยาก เพราะเครื่องมีขนาดใหญ่และต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการทำงาน จึงมีการคิดค้นและพัฒนาหัวตรวจวัดที่มีขนาดเล็กสะดวกในการพกพาใช้พลังงานต่ำ ราคาถูก และติดตั้งในบริเวณที่ต้องการได้สะดวก เรียกว่า หัวตรวจวัดแก๊สหรือแก๊สเซ็นเซอร์ (Gas Sensor)



รูปที่ 2.32 อุปกรณ์แก๊สเซ็นเซอร์จำพวกทรานสดิวเซอร์

แก๊สเซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์จำพวกทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่ง ใช้สำหรับตรวจจับแก๊สพิษ และการตรวจจับแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ในยานยนต์ โรงงานอุตสาหกรรม บ้านเรือน ตลอดจนที่ต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วทำการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าตามคุณสมบัติที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งแก๊สเซ็นเซอร์ก็ทำงานเช่นเดียวกันคือ ทำหน้าที่ตรวจจับหรือทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแก๊สที่ต้องการวัด แล้วเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สที่ตรวจจับได้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

2.81 คุณสมบัติทั่วไปของแก๊สเซ็นเซอร์

1. ความไวในการตอบสนอง หมายถึงความไวในการตอบสนองอย่างรวดเร็วในทันทีทันใดเมื่อแก๊สที่ทำการวัดมาสัมผัสกับเซ็นเซอร์ ยิ่งถ้าแก๊สที่ทำการวัดนั้นเป็นแก๊สพิษเซ็นเซอร์ที่ดีควรจะทำงานได้อย่างรวดเร็วในการตอบสนอง
2. ความไวในการวัด หมายถึงความแตกต่างของปริมาณแก๊ส คุณสมบัติข้อนี้จะสำคัญเฉพาะกรณีแก๊สที่เราวัดมีปริมาณน้อยๆ หรือต้องการความถูกต้องในการวัดสูงเท่านั้น
3. ความจำเพาะ หมายถึงสามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างแก๊สที่ต้องการวัดกับแก๊สที่ไม่ต้องการวัด เช่น เซ็นเซอร์สำหรับวัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จะจำเพาะเฉพาะแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เท่านั้น
4. ความเสถียร หมายถึงผลในการวัดแก๊สคงที่ไม่เสื่อมสภาพเร็ว เพื่อให้เซ็นเซอร์สามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่อง
5. พิสัยการวัด หมายถึงช่วงกว้างของการวัดของเซ็นเซอร์บางตัวสามารถวัดแก๊สปริมาณตั้งแต่ 100-1,000 ppm (part per millions: ppm)

2.8.2 แก๊สที่มีความสำคัญต่อมนุษย์

ก่อนจะทำการวัดหรือตรวจจับแก๊ส ต้องมีความเข้าใจคุณสมบัติและความสำคัญของแก๊สที่จะตรวจวัดก่อน ต่อไปจะเป็นตัวอย่างแก๊สที่มีความสำคัญ ซึ่งมีผลต่อมนุษย์

2.8.2.1 แก๊สตระกูลคาร์บอน (Carbon Species)

คาร์บอน มีอยู่ด้วยกัน 2 รูปที่เป็นแก๊สออกไซด์ซึ่งมีความเสถียรคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

1. คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส นอกจากนี้มันยังมีพิษอีกด้วย เพราะว่ามันจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในฮีโมโกลบิน (Hb) ในเส้นเลือดของมนุษย์ คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนเป็นฐานประมาณ 80% ของ CO ในบรรยากาศมาจากรถยนต์ ส่วนการใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น การใช้ออกซิเจนในการถลุงเหล็กจากแร่ เป็นต้น

2. คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่ช่วยให้ติดไฟ CO₂ เป็นแก๊สเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 78°C และที่ความดัน 1 atm CO₂ จะเป็นของแข็งมากกว่าจะเป็นของเหลว CO₂ เป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของถ่านหิน น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ หรือเชื้อเพลิงที่มีฐานของคาร์บอน CO₂ เป็นแก๊สที่ช่วยในการดำรงชีพของมนุษย์ ใช้ในอุตสาหกรรม การผลิตเครื่องดื่มและในเครื่องดับเพลิง ขณะที่สารอาหารในร่างกายมนุษย์ไม่ทำงานผลผลิตของ CO₂ บางส่วนจะช่วยให้ความเป็นกรดของเลือดเหมาะสม ความผิดพลาดหนึ่งของกลไกการหายใจของมนุษย์คือ การสะอึก วิธีการรักษาคือ ให้หายใจเข้าออกถูกระดากเพื่อสร้างระดับ CO₂ เข้าไปในปอด CO₂ จะเข้าไปเป็นตัวกระตุ้นให้หยุดการสะอึก แต่หากมีระดับของ CO₂ ในร่างกายสูงเกินไปก็ไม่มีประโยชน์ โดยหากหายใจ CO₂ ในอากาศที่เกินกว่า 10% อาจทำให้คนหมดสติ และหากรับ CO₂ ที่ระดับสูงต่อเนื่องไปอีก อาจทำให้การหายใจล้มเหลวและตายในที่สุด

2.8.2.2 มีเทน (Methane)

เป็นรูปแบบหนึ่งของสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนไฮโดรเจน (ไฮโดรคาร์บอน) เป็นส่วนประกอบ มีสูตรทางเคมีเป็น CH₄ เกิดจากธรรมชาติจากการเผาเปื่อยทับถมในหนองบึง หรือการสลายตัวของโปรตีน มีเทนเป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ แต่ติดไฟได้และให้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เช่นเดียวกับ อีเทน โพรเพน และบิวเทน

2.8.2.3 เบนซีน (Benzene)

มีสูตรเคมี C₆H₆ เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีกลิ่นและติดไฟง่าย เป็นพวงรีวงคอมปาวด์ ใช้ละลายไขมันและสารอินทรีย์ต่างๆ และใช้สังเคราะห์สารเคมีมากมายหลายชนิด

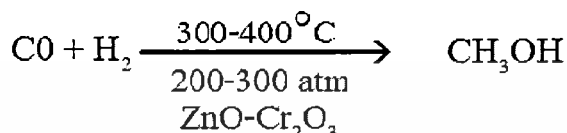
2.8.2.4 ไฮโดรเจน (Hydrogen)

ส่วนประกอบที่เห็นส่วนใหญ่ของไฮโดรเจนคือ น้ำ พบอยู่ในน้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ในอนาคตจะถูกนำมาใช้ทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิง ไฮโดรเจนมีอยู่ที่อุณหภูมิห้องแต่สามารถจะเปลี่ยนไปเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจนสามารถนำมาทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิงได้ ไฮโดรเจนนั้นสามารถลุกติดไฟได้ง่ายและได้รับความเชื่อใจให้ถูกเลือกเป็นเชื้อเพลิงในอนาคตสำหรับรถยนต์และอากาศยาน ปฏิกิริยาของมันจะทำให้ผลิตน้ำออกมา เป็นผลให้ไม่เกิดมลภาวะ ไฮโดรเจนมีสูตรเคมีคือ H₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2.5 แอลกอฮอล์ต่างๆ

1. เมทานอล หรือเมทิลแอลกอฮอล์มีสูตรเคมีคือ CH_3OH ได้จากการสลายตัวของไม้ โดยให้ความร้อนกับไม้ที่อุณหภูมิสูงและปราศจากอากาศ จากการเตรียมเมทิลแอลกอฮอล์ดังกล่าวให้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “Wood alcohol” ในปัจจุบันเมทิลแอลกอฮอล์ผลิตได้จากกระบวนการไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้คะตะลิสต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันสูง



เมทิลแอลกอฮอล์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีพิษอย่างรุนแรง (highly toxic) การบริโภคเมทิลแอลกอฮอล์จำนวนมากทำให้ตายได้ ถ้าร่างกายได้รับในปริมาณที่ไม่มากพอก็อาจทำให้ตาบอดได้ พิษของเมทิลแอลกอฮอล์จะได้รับจากการสูดดมไอระเหยหรือได้รับจากการสัมผัสกับผิวหนัง ดังนั้นการใช้เมทิลแอลกอฮอล์จึงต้องระมัดระวังอย่าง

2. เอทานอล หรือเอทิลแอลกอฮอล์ มีสูตรเคมี $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ เป็นของเหลวที่ไม่มีสี ไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย เอทิลแอลกอฮอล์ผลิตได้จากกรหมักแป้งและน้ำตาล เอทิลแอลกอฮอล์เป็นแอลกอฮอล์ชนิดเดียวที่ใช้ผสมในเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ เช่น สุรา ไวน์ เบียร์ สาเก สาโท และกระแช่ การสังเคราะห์เอทิลแอลกอฮอล์จากไวน์โดยกระบวนการหมักผลองุ่น เป็นวิธีการสังเคราะห์เอทิลแอลกอฮอล์วิธีแรกที่มีมนุษย์ทราบในการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ น้ำตาลที่ได้จากแหล่งต่างๆ สามารถใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์สำหรับใช้เป็นเครื่องดื่ม กระบวนการหมักเกิดขึ้นโดยยีสต์ เอ็นไซม์จะเป็นตัวการที่สำคัญทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเอทิลแอลกอฮอล์



กระบวนการหมักจะไม่สามารถผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์มากกว่า 12 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ เพราะว่ายีสต์จะตายก่อนที่ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์จะสูงถึงค่าดังกล่าว ดังนั้นการที่จะผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นของเอทิลแอลกอฮอล์สูงจะต้องใช้กระบวนการกลั่น เช่น บรันดี วิสกี้ เอทิลแอลกอฮอล์นอกจากใช้ทำเครื่องดื่มแล้วยังสามารถใช้เป็นตัวทำละลายและเป็นตัวทำปฏิกิริยาในการเตรียมสารอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเอทิลแอลกอฮอล์ได้แก่ การเจือจางในหรือเป็นส่วนผสมของยา การทำพลาสติก แลกเกอร์และเครื่องสำอาง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงรถยนต์ได้อีกด้วย โดยในแก๊สโซลีนจะผสมเอทิลแอลกอฮอล์ประมาณ 10% แอลกอฮอล์ที่บริสุทธิ์ 100 % จะถูกเรียกว่า “แอลกอฮอล์สัมบูรณ์” (absolute alcohol)

3. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol) มีสูตรเคมีคือ $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง มีราคาถูก มีคุณสมบัติฆ่าเชื้อโรคได้ (disinfectant) จึงถูกใช้ในการทำความสะอาด บางครั้งอาจเรียกว่า แอลกอฮอล์เช็ดทำความสะอาด (rubbing alcohol) ก็ได้สามารถพบไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ในน้ำยาทำความสะอาด น้ำยาฆ่าเชื้อ สูตรต่างๆ ทั้งที่ใช้ในโรงพยาบาล ตามบ้าน และตามโรงงานต่างๆ โดยมักจะใช้ที่ความเข้มข้นประมาณ 70 % นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวทำละลาย (solvent) ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ อีกด้วย พิษของแอลกอฮอล์ชนิดนี้จะทำให้เกิดอาการเมาได้เหมือนพิษของเอทิลแอลกอฮอล์ สามารถกดสมองและกดการหายใจได้อย่างรุนแรง แต่มักไม่ก่อภาวะเลือดเป็นกรดอย่างรุนแรง (high gap metabolic acidosis) แบบเมทิลแอลกอฮอล์

4. Phenylethane มีจุดหลอมเหลว ที่ -95°C มีจุดเดือด ณ 136.2°C เป็นของเหลวที่ใส ไม่มีสี สามารถละลายได้ ด้วย ethanol, benzene, diethyl ether เป็นส่วนผสมใช้ในการผลิต styrene ผลิตภัณฑ์ใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม และอุตสาหกรรม ปิโตรเคมี และเอทิลเบนซีน มีโอกาสถูกปลดปล่อยออกมาในกระบวนการเผาไหม้ เช่น จากควันท่อไอเสีย รถยนต์ และ ควันบุหรี่ (Keith and Walker, 1995; เกรียงศักดิ์, 2546)

บทที่ 3

กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองที่ประกอบด้วยโลหะคะตะลิสต์ (นิเกิล) เป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ และโลหะทองแดงที่ใช้ทำเป็นขั้วเพื่อการต่อใช้งาน โดยโลหะทั้งสองใช้วิธีการสปัตเตอร์ลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 5000\AA ตลอดจนการนำฐานรองที่ได้นำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการตกสะสมไอเคมีซึ่งเป็นแบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition) และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical vapor deposition) และนอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดลองนี้ด้วย

3.1 การเตรียมแผ่นฐานรอง

3.1.1 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จำเป็นต้องทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนที่ใช้เป็นฐานรองก่อนเพื่อให้ ผุ่น เศษโลหะ และไขมัน ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนหลุดออกไปก่อน การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีขั้นตอน ดังนี้

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน



รูปที่ 3.1 แผ่นซิลิคอนขนาด $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ หลังจากการทำความสะอาด

1. ตัดแผ่นซิลิคอนให้มีขนาด $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$
2. Ultrasonic DI 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่นที่เกาะอยู่ให้หลุดออกไป
3. จุ่ม DI 1 แก้ว 1 นาที
4. ต้มในกรด Nitric (HNO_3) 2 แก้วๆละ 5 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้า
5. ต้มในน้ำ DI 2 แก้วๆละ 5 นาที (กรด Nitric ละลายในน้ำร้อนได้ดี)
6. จุ่มในน้ำ DI 2 แก้วๆละ 1 นาที
7. Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที เพื่อกำจัดไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. จุ่มใน DI 2 แก้วๆ ละ 1 นาที

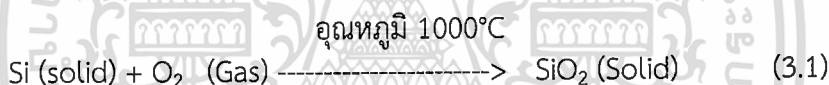
9. เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

แผ่นซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้วจะเข้ากระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อควบคุมไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในเนื้อสารซิลิคอน ชั้นฉนวนหรือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์สร้างจากการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) โดยการให้แผ่นซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ซิลิคอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นซิลิคอน การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีด้วยกัน 2 วิธี

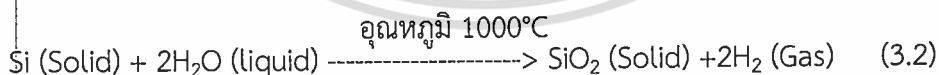
1. การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation)

การออกซิเดชันแบบแห้งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของออกซิเจนบริสุทธิ์กับซิลิคอนใช้อุณหภูมิประมาณ 900° ถึง 1100°C อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงดังสมการ 3.1 วิธีนี้ได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีคุณภาพดีสำหรับการเป็นฉนวน แต่อัตราการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ช้ามาก



2. การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation)

การออกซิเดชันแบบชื้นใช้อะตอมออกซิเจนที่ได้จากการแตกตัวของไอน้ำในการทำปฏิกิริยากับซิลิคอนที่อุณหภูมิประมาณ 900° ถึง 1100°C อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงดังสมการ 3.2



การสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้นนี้จะทำให้เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้ง เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่าอะตอมของออกซิเจนบริสุทธิ์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส ทำให้การเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ทำได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันแบบชื้นนี้คือ มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ต่ำกว่าแบบแห้ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยาแบบแห้งมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชื้น และการออกซิเดชันแบบชื้นนี้จะได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีสภาพผลึกไม่สมบูรณ์ คือเกิดการบิดเบือนของผลึก (Crystal dislocation) หรือเกิดรูพรุนขึ้น ข้อดีของวิธีนี้คือมีอัตราการเกิดออกไซด์สูงกว่าแบบแห้งมาก

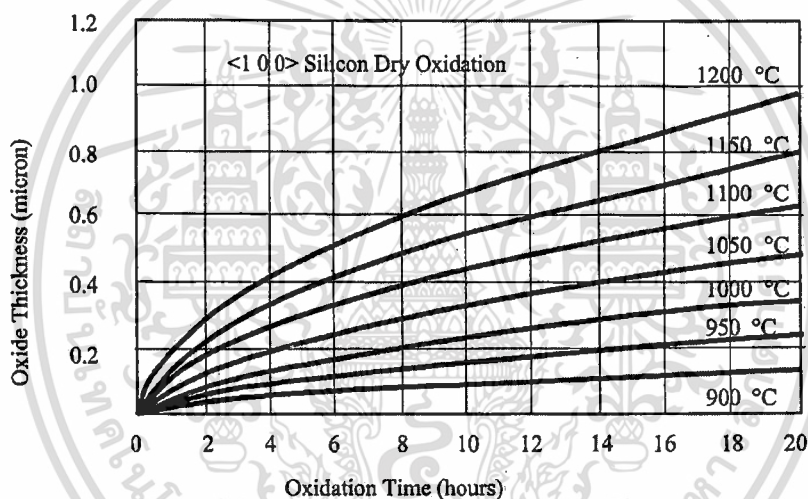
เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

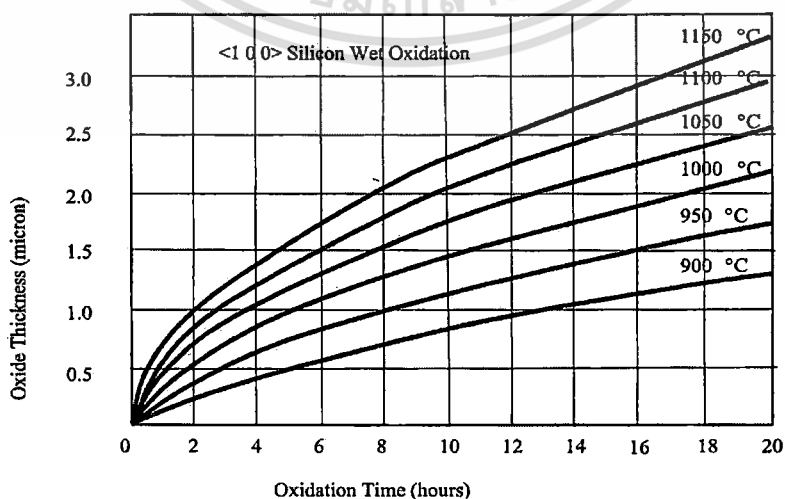
ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แบบ Dry-Wet-Dry ที่ 1.5-1.5-1.5 ชั่วโมง ในการออกซิเดชันแบบแห้งใช้อุณหภูมิ 1000°C อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 1200 ml/min ส่วนการออกซิเดชันแบบชื้นใช้อุณหภูมิ 1000°C อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนในการนำพาไอน้ำ 1000 ml/min เพื่อให้เกิดชั้นออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 5000 อังสตรอม ก่อนนำไปเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป

การหาความหนาของชั้นออกไซด์

ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์สามารถคำนวณหาความหนาได้จากกราฟ Thermal Oxidation ได้จากกราฟรูปที่ 3.2 และ 3.3 ซึ่งเป็นการหาความหนาของชั้นออกไซด์แบบแห้งและแบบชื้นตามลำดับ โดยใช้การเทียบกันระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 3.2 แสดงการคำนวณการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้ง



รูปที่ 3.3 แสดงการคำนวณการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

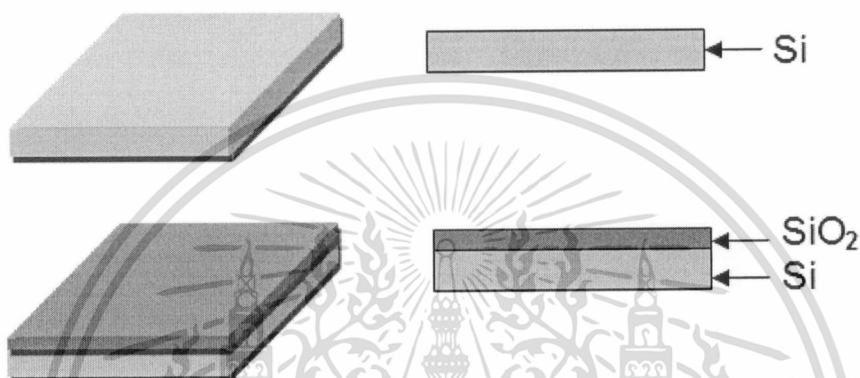
นอกจากนี้ยังสามารถหาความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้จากการพิจารณาคูสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จากการสะท้อนแสงฟลูออเรสเซนซ์ซึ่งสีแต่ละสีที่สะท้อนออกมานั้นเป็นตัวบ่งบอกถึงความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆ กัน^[40]

ความหนา	สี	ความหนา	สี
500A°	สีน้ำตาลอ่อน	5200	สีเขียว
700	สีน้ำตาล	5400	สีเหลืองเขียว
1000	สีม่วงเข้มถึงสีแดงม่วง	5600	สีเขียวเหลือง
1200	สีฟ้า	5700	สีเหลืองถึงสีเทาอ่อน
1500	สีน้ำเงินอ่อนถึงสีเทาน้ำเงิน	5800	สีส้มอ่อนหรือสีเหลืองถึงสีชมพู
1700	สีน้ำเงินถึงสีเหลือง-เขียวอ่อน	6000	สีชมพูอ่อน
2000	สีทองถึงสีเหลือง	6300	สีม่วงแดง
2200	สีทองค่อนข้างสีเหลืองแกมส้ม	6800	สีคล้ายเทา
2500	สีส้มถึงสีเขียวอ่อน	7200	สีน้ำเงินเขียวถึงสีเขียว
2700	สีแดงม่วง	7700	สีเหลืองอ่อน
3000	สีน้ำเงินถึงสีม่วงน้ำเงิน	8000	สีส้ม
3100	สีน้ำเงิน	8200	สีชมพู
3200	สีน้ำเงินถึงสีน้ำเงินเขียว	8500	สีแดงม่วงอ่อน
3400	สีเขียวอ่อน	8600	สีม่วง
3500	สีเขียวถึงสีเหลืองเขียว	8700	สีน้ำเงินม่วง
3600	สีเหลืองเขียว	8900	สีน้ำเงิน
3700	สีเขียวเหลือง	9200	สีน้ำเงินเขียว
3900	สีเหลือง	9500	สีเหลืองเขียว
4100	สีส้มอ่อน	9700	สีเหลืองถึงสีเหลืองอ่อน
4200	สีชมพูอ่อน	9900	สีส้ม
4400	สีม่วงแดง	1.00 μm	สีชมพูอ่อน
4600	สีแดงม่วง	1.02	สีม่วงแดง
4700	สีม่วง	1.05	สีแดงม่วง
4800	สีน้ำเงินม่วง	1.06	สีม่วง
4900	สีน้ำเงิน	1.07	สีน้ำเงินม่วง
5000	สีน้ำเงินเขียว	1.10	สีเขียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแผ่นซิลิคอนด้านที่ไม่ได้มีการขัดมันเมื่อมีการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แล้ว ไม่สามารถมองเห็นสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ถึงความเปลี่ยนแปลง แต่ด้านที่มีการขัดมันเมื่อทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีของแผ่นซิลิคอน สีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นจะหมายถึงความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างได้ซึ่งดูได้จากตารางที่ 3.1 และจากเงื่อนไขของการทดลองที่ต้องการใช้ความหนาที่อยู่ในช่วงประมาณ 5000 \AA สีของชั้นออกไซด์ที่ได้จึงมีสีน้ำเงินเขียว รูปที่ 3.4 เป็นการแสดงถึงแผ่นซิลิคอนก่อนทำการออกซิเดชันและหลังการออกซิเดชัน ซึ่งการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์สร้างได้จากเตาความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 แผ่นซิลิคอนก่อนและหลังการออกซิเดชัน

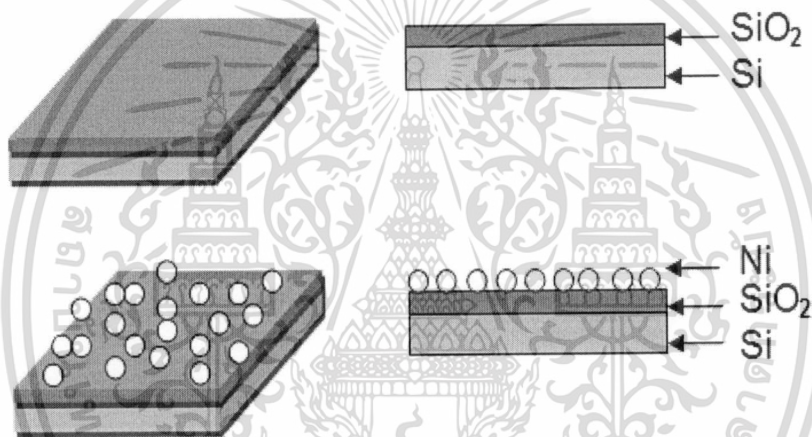


รูปที่ 3.5 เตาความร้อนที่ใช้ในการออกซิเดชัน

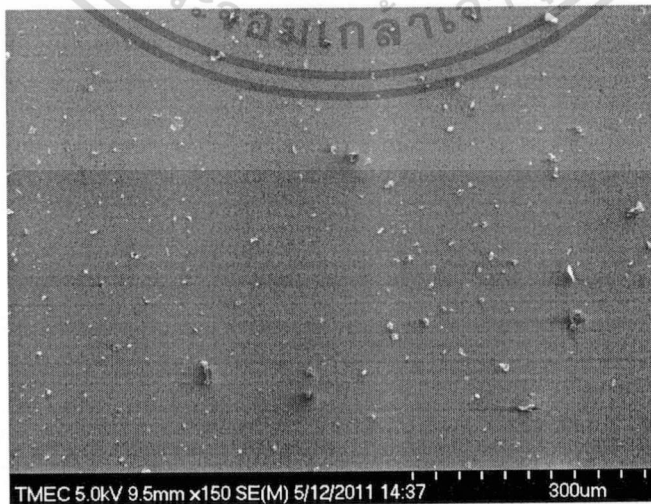
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การเคลือบโลหะคตะลิสต์ (Catalyst)

การเคลือบโลหะคตะลิสต์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ วิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้โลหะนิเกิล (Ni) เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบลงบนฐานรองแบบกลุ่มก้อน (Cluster) เพื่อให้ตัวของอุปกรณ์ขาดจากกันทางไฟฟ้า (นิเกิลเป็นโลหะและนำไฟฟ้า) เนื่องจากต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ขณะตรวจวัดแอลกอฮอล์ จึงต้องการให้กระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่บนคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังนั้นการสับเตเตอร์จะใช้เวลาในการสับเตเตอร์ 30 วินาที ความดันภายใน Chamber ประมาณ 2×10^{-6} Torr ใช้เครื่องอาร์เอฟไดโอดสับเตเตอร์ ใช้ความถี่ 13.65 MHz ภายในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) โลหะนิเกิลที่ได้จะกระจายเป็นจุดๆเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรอง แสดงดังรูปที่ 3.6 รูปที่ 3.7 เป็นภาพถ่าย SEM ของการเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล)



รูปที่ 3.6 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล)

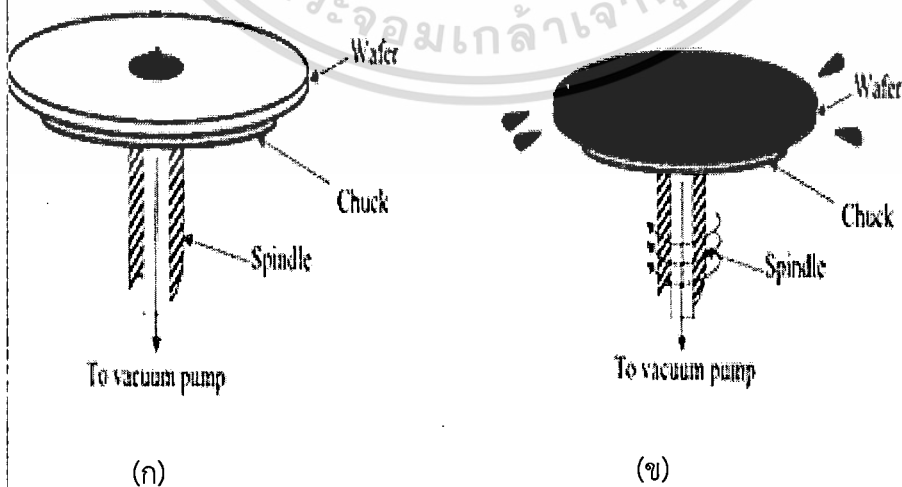


รูปที่ 3.7 ภาพถ่าย SEM ของการเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การเคลือบน้ำยาไวแสงและการถ่ายแบบ

การเคลือบน้ำยาไวแสงเป็นขั้นตอนก่อนการถ่ายแบบตัวอย่างจากกระจกมาส์กไปยังผิวหน้าของแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีการเคลือบโลหะคะตะลิสต์แล้ว ซึ่งกระบวนการนี้ต้องทำในห้องที่มีความสะอาดเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่แผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ โดยเริ่มต้นด้วยการนำแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบโลหะคะตะลิสต์แล้วมาทำการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นที่จับอยู่ที่แผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ออก จากนั้นเคลือบพื้นผิวแผ่นฐานรองด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ 5214.E (เพราะต้องการความหนาของฟิล์ม 5000 อังสตรอม) ด้วยวิธีสปินนิ่ง (spinning) เพื่อต้องการพื้นผิวของน้ำยาไวแสงที่เรียบเป็นแบบฟิล์มบางและมีความหนาของน้ำยาไวแสงที่เท่ากันทุกจุด การสปินนิ่งจึงต้องทำด้วยกันสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที เพื่อให้ น้ำยาไวแสงที่หยดไว้บนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์กระจายตัวไปทั่วๆ แผ่นฐานรอง และขั้นตอนที่สองใช้ความเร็วรอบ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ น้ำยาไวแสงที่เป็นส่วนเกินที่กระจายตัวอยู่บนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์นั้นถูกเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบที่สูงจนทำให้น้ำยาไวแสงที่เป็นส่วนเกินกระเด็นหลุดออกไป และส่วนที่เหลือจะกระจายตัวออกไปโดยรอบเป็นฟิล์มบางและเรียบสม่ำเสมอตามที่ต้องการ ซึ่งความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาไวแสงด้วย รูปที่ 3.8 ได้อธิบายการสปินนิ่งและรูปที่ 3.9 เป็นเครื่องสปินนิ่งที่ใช้งานจริงที่ใช้ในศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยขั้นตอนระหว่างการเคลือบน้ำยาไวแสงนี้ต้องระวังฝุ่นละอองอย่างมากจึงต้องทำในห้องที่สะอาดหรือ Clean Room และเมื่อเคลือบน้ำยาไวแสงเสร็จแล้วต้องนำไปอบที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อต้องการให้น้ำยาไวแสงที่เกาะอยู่บนแผ่นฐานรองแห้งสนิทและยึดเกาะกับแผ่นฐานรองได้ดี ขั้นตอนนี้เรียกว่า Prebake



รูปที่ 3.8 การเคลือบพื้นผิวด้วยน้ำยาไวแสง

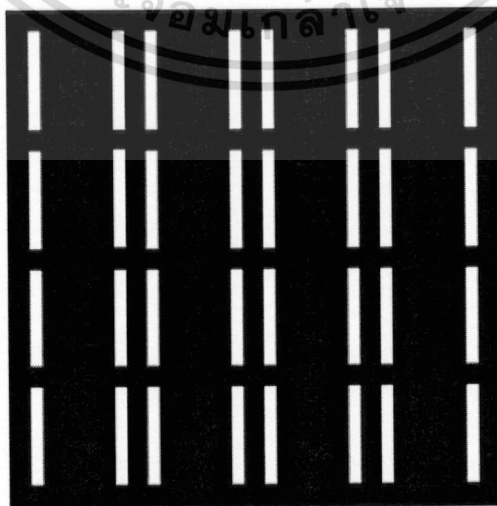
(ก) การหยดน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นซิลิคอน (ข) การสปินน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 เครื่องสปรินเนอร์

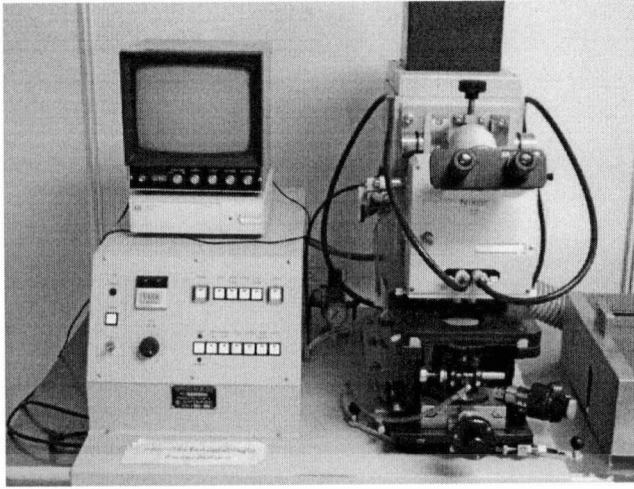
จากนั้นทำการถ่ายแบบลงบนฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ต (UV) ผ่านกระจกต้นแบบหรือกระจกมาสก์ (Photo mask) ที่ออกแบบไว้แล้ว และมีการจัดมาสก์ที่ตรงกับบริเวณที่ต้องการจะถ่ายแบบขั้นตอนนี้เรียกว่า Mask Alignment (ใช้เครื่อง Mask Aligner รูปที่ 3.11) แสงที่ฉายผ่านกระจกต้นแบบจะทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลายจะไม่ทะลุผ่าน ดังนั้นส่วนที่แสงทะลุผ่านไปได้จะทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง (ส่วนสีขาวของรูปที่ 3.10) คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงจะเปลี่ยนไป จากนั้นนำแผ่นที่ฉายแสงแล้วมาทำการ Development คือการสร้างลวดลายด้วยน้ำยา Developer น้ำยาไวแสงชนิดบวกเมื่อทำการ develop แล้ว น้ำยาไวแสงส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายไป ส่วนที่ไม่ถูกแสงจะยังคงอยู่ จากนั้นทำการ Post bake คือการอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ส่วนที่เป็นชั้นฟิล์มแห้งและยึดเกาะติดกับแผ่นฐานรองแน่นยิ่งขึ้น ก่อนนำไปทำการสัปดาห์ด้วยโลหะไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายประชาสัมพันธ์ โทร. 02-261-6000 หรือ 02-261-6001 ในวันและเวลาราชการ

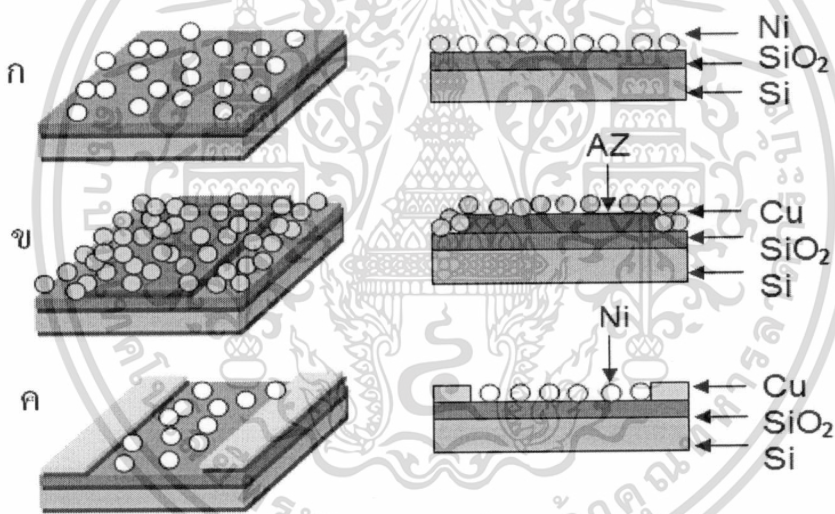
รูปที่ 3.10 ภาพหน้ากาก (Mask) ที่ใช้ในการถ่ายแบบ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ภาพของเครื่อง Mask Aligners

3.1.4 การทำขั้วไฟฟ้า

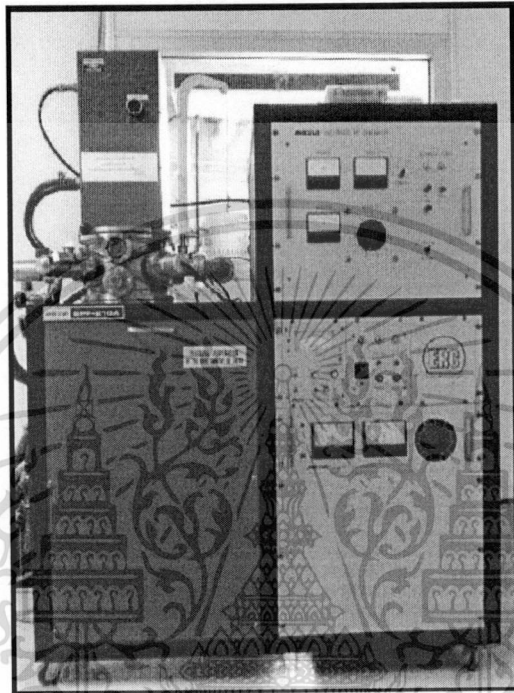


รูปที่ 3.12 การสปัตเตอร์ขั้วโลหะทองแดง

(ก) แผ่นฐานรองที่ทำการสปัตเตอร์โลหะนิเกิลแล้ว (ข) แผ่นฐานรองที่ทำการสปัตเตอร์โลหะทองแดงที่มีการเปิดมาร์คแล้ว (ค) แผ่นฐานรองที่ทำการลอกน้ำยาไวแสงออกแล้ว

การทำขั้วไฟฟ้าเพื่อต่อใช้งานจะใช้โลหะทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า สร้างโดยการสปัตเตอร์เป็นแบบฟิล์มบาง (Thin film) ลงบนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบนิเกิลแล้ว โดยบังคับให้เกิดตรงบริเวณที่ต้องการคือตรงบริเวณที่เราเปิดช่องของน้ำยาไวแสงไว้แล้ว โลหะทองแดงก็จะเกิดเป็นฟิล์มบางตรงบริเวณที่เราต้องการจากขั้นตอนที่ผ่านมา ซึ่งในการสปัตเตอร์นี้ใช้เวลาในการสปัตเตอร์ 3 นาที ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr ใช้เครื่องอาร์เอฟไดโอดสปัตเตอร์ ใช้ความถี่ 13.65 MHz ภายในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน (Ar) โลหะทองแดงที่ได้จะเกาะตัวกันเป็นฟิล์มบางทั่วทั้งแผ่นฐานรองนี้เองแสดงดังรูป 3.12 จากนั้นทำการเอาน้ำยาไวแสงที่ทำหน้าที่เป็นหมึกสกรีนและทองแดงที่อยู่บนไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำยาไวแสงออกให้เหลือไว้เฉพาะส่วนที่เราต้องการโดยการนำเอาแผ่นฐานรองมาแกว่งในอะซิโตน อะซิโตนจะทำการกัดเซาะฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ติดกับแผ่นฐานรองแล้วยกทองแดงที่ติดอยู่ด้านบนของฟิล์ม น้ำยาไวแสงหลุดออกไปด้วยเหลือไว้เฉพาะทองแดงที่ติดอยู่บนแผ่นฐานรองเรียกขั้นตอนนี้ว่าการลอกน้ำยาไวแสงด้วยวิธี lift off



รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายของเครื่องสเป็คเตอรื่งสำหรับเคลือบคะตะลิสต์และซิวโลหะ

3.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมีซึ่งเป็นแบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition) และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical vapor deposition) จุดประสงค์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ แอลกอฮอล์ การสังเคราะห์จะกระทำบนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีนิเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยใช้เอทานอลเป็นสารแหล่งจ่ายคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ และใช้แก๊สเฉื่อยเป็นตัวนำพาสารแหล่งจ่ายคาร์บอน

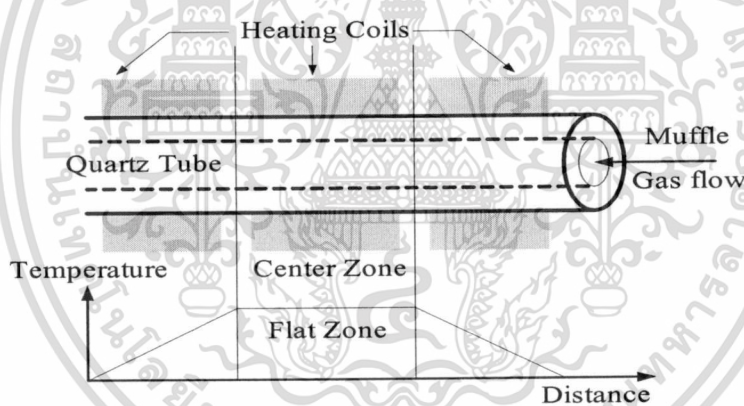
หลักการที่ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์คือ เมื่อไอระเหยของสารแหล่งจ่ายคาร์บอนได้รับความร้อนสูงจะทำให้อะตอมของคาร์บอนแตกตัวออกมาจากโมเลกุลของสารแหล่งจ่ายคาร์บอน (เอทานอล) คาร์บอนที่แตกตัวจะไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาบนฐานรองเกิดการจัดรูปใหม่เป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

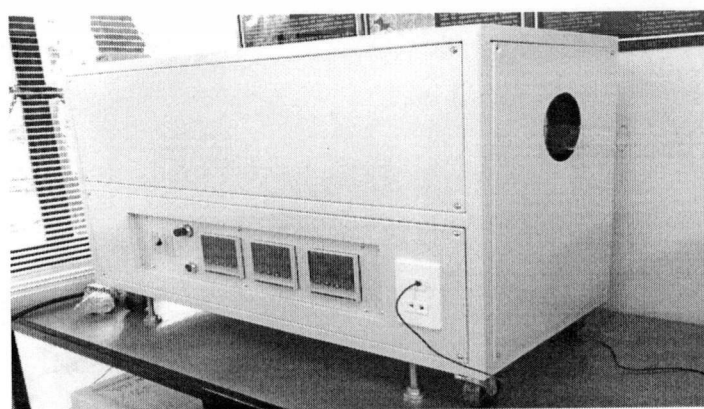
3.2.1 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition)

3.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

1. แก๊สไนโตรเจน
2. Regulator สำหรับปรับแรงดันแก๊สและการบอกปริมาณแก๊สในถัง
3. Flow meter สำหรับควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส
4. สารแหล่งจ่ายคาร์บอน (เอทานอล)
5. เตาความร้อนซีวีดีแบบสามโซน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. หลอดทดลองสำหรับใส่สารแหล่งจ่าย
8. ขวดรูปชมพู่สำหรับเช็คแก๊สไหลออกจากระบบ
9. ฐานรองสำหรับนำมาทำการทดลอง (ซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยนิกเกิล)
10. แผ่นกระเบื้องสำหรับเป็นโบทนำแผ่นฐานรองเข้าไปในเตา
11. แท่งแก้วสำหรับดันฐานรองเข้าไปในเตา



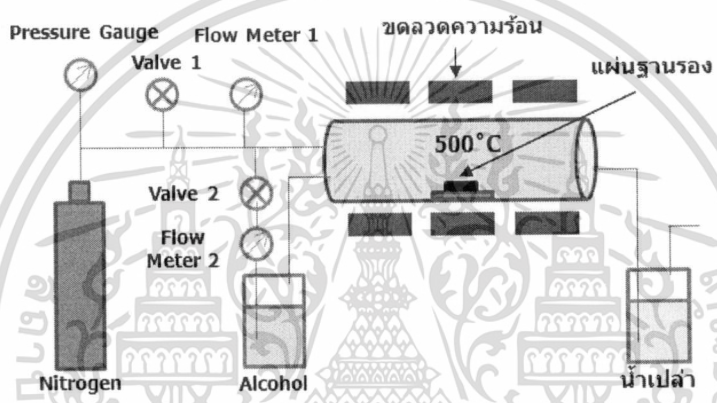
รูปที่ 3.14 โครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโซน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายเตาความร้อนแบบสามโซนที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

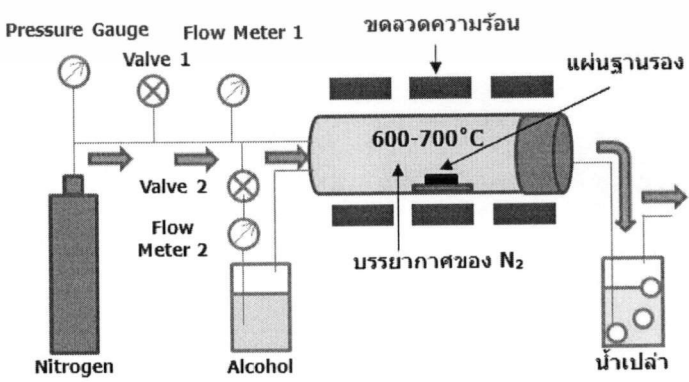
3.2.1.2 ขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์^[41]

(1) เตาความร้อนที่ใช้ทดลองเป็นเตาความร้อนแบบสามโซนและมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15 ซึ่งจะช่วยในการควบคุมอุณหภูมิมีความคงที่และแม่นยำ โดยเริ่มจากเปิดเตาความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นใช้แท่งแก้วดันโบทที่มีแผ่นฐานรองที่เตรียมไว้เข้าไปในเตา โดยวางแผ่นฐานรองไว้ที่ปากเตาเป็นเวลา 5 นาที เพื่อไม่ให้โบทและแผ่นฐานรองเกิดการการขยายตัวอย่างฉับพลันและเกิดการแตกได้เมื่อได้รับความร้อนสูงในขณะที่แผ่นฐานรองอยู่กลางเตา เพราะฉะนั้นจึงให้แผ่นฐานรองได้ทำการปรับอุณหภูมิก่อนจะดันเข้าไปกลางเตา เมื่อโบทและแผ่นฐานรองปรับความร้อนได้แล้วจึงค่อยๆดันแผ่นฐานรองจนถึงกลางเตา โดยใช้เวลาดันแผ่นฐานรองจากปากเตาถึงกลางเตา 5 นาที แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ภาพแสดงการดันแผ่นฐานรองเข้าไปยังกลางเตาความร้อนแบบสามโซน

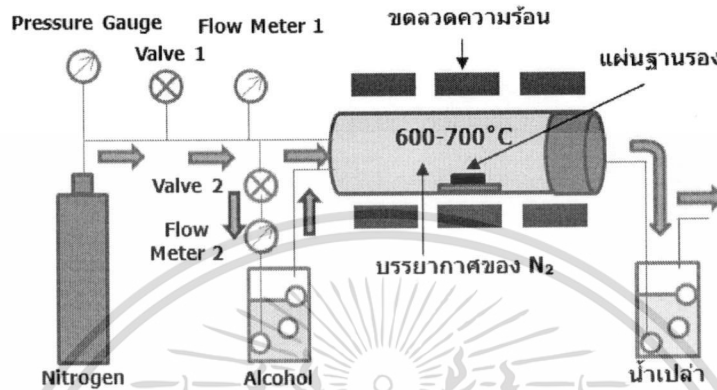
(2) ปิดปากท่อควอทซ์ที่ใช้เป็นห้องปฏิกิริยาให้สนิท ปรับอุณหภูมิของเตาความร้อนให้ได้ อุณหภูมิตามที่ต้องการ (600-700 องศาเซลเซียส) และเปิดแก๊สไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 200 cc/min เข้าไปในเตาความร้อนเพื่อไล่อากาศออกจากเตาไม่ให้เกิดการออกซิไดซ์เมื่อทำการจ่ายเอทานอล ขั้นตอนนี้ใช้เวลา 10 นาที แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ภาพแสดงการปรับอุณหภูมิของเตาความร้อนแบบสามโซน

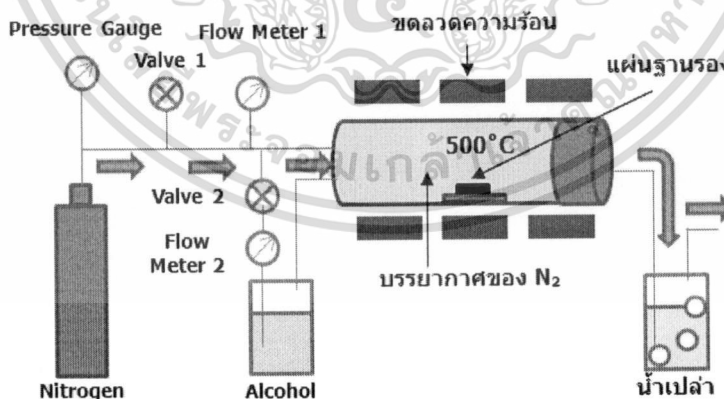
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยที่ดำเนินการศึกษาวิจัยไปก่อนแล้วแต่ยังไม่ผ่านการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการใดๆ ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต เจ้าของลิขสิทธิ์ขอสงวนสิทธิ์ในการดำเนินคดีตามกฎหมาย

(3) เมื่ออุณหภูมิของเตาความร้อนมีอุณหภูมิตามที่ต้องการในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แล้วให้ปรับสวิตช์การจ่ายแก๊สไนโตรเจนไหลผ่านสารแหล่งจ่ายคาร์บอน (เอทานอล) เพื่อนำไอระเหยของสารแหล่งจ่ายคาร์บอนเข้าไปยังเตาที่ใช้เป็นห้องปฏิกิริยาโดยมีอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตามความต้องการที่จะทดลอง (300 และ 500 cc/min) ใช้เวลาในการทดลอง 5 นาที แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ภาพแสดงการจ่ายไอแอลกอฮอล์ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

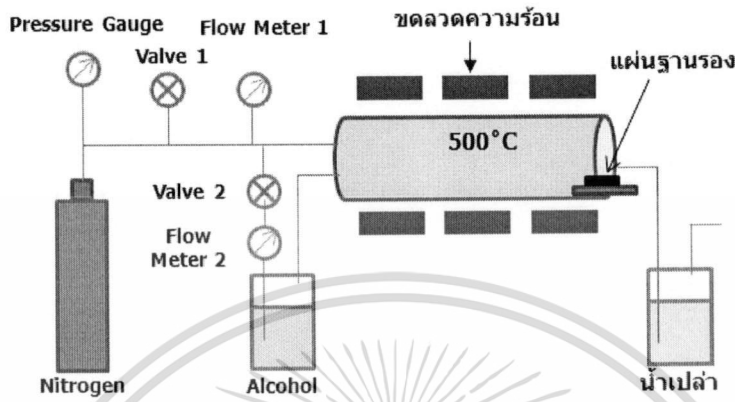
(4) เมื่อจ่ายสารแหล่งจ่ายคาร์บอนครบตามเวลาที่ต้องการในการสังเคราะห์แล้วให้ปรับสวิตช์ของแก๊สไนโตรเจนที่ไหลผ่านสารแหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นการไหลที่ไม่มีสารแหล่งจ่ายคาร์บอนโดยมีอัตราการไหล 200 cc/min พร้อมทั้งปรับอุณหภูมิของเตาความร้อนให้เหลือ 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ภาพแสดงการลดอุณหภูมิในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

(5) ปิดแก๊สไนโตรเจน จากนั้นเปิดฝาท่อควอทซ์แล้วจึงค่อยๆ ดึงแผ่นฐานรองที่มีคาร์บอนนาโนทิวบ์อยู่ด้านบนออกจากห้องปฏิกิริยาช้าๆ ใช้เวลา 5 นาที (จากกลางเตาถึงปากเตา) เมื่อแผ่นฐานรองมาถึงปากเตาให้ทิ้งไว้ที่ปากเตา 5 นาที ก่อนจะนำออกจากเตาความร้อนเพื่อไม่ให้แผ่นฐานรองและโบทเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็วจนแผ่นฐานรองและโบทแตก และเพื่อไม่ให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ไหม้หรือแตกหัก ทั้งนี้ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิวบ์ที่ติดอยู่บนแผ่นฐานรองเกิดการร้อนเมื่ออุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องปล่อยให้แผ่นฐานรองและคาร์บอนนาโนทิวบ์ค่อยๆปรับอุณหภูมิลงก่อน เมื่อแผ่นฐานรองและโบทได้ปรับอุณหภูมิแล้วจึงเอาแผ่นฐานรองและโบทออกจากเตา เมื่อถึงขั้นตอนนี้ก็สิ้นสุดกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ภาพแสดงการตั้งคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ออกจากเตาความร้อน

3.2.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical vapor deposition)

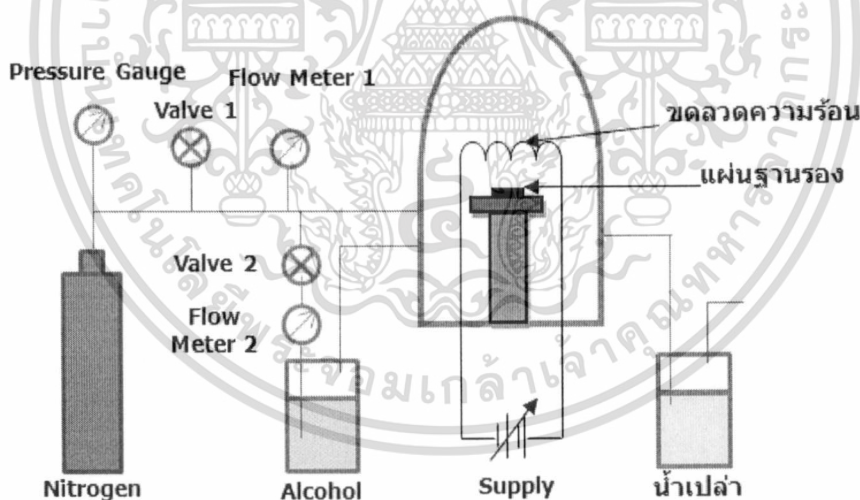
3.2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

1. ท่อควอตซ์ที่ใช้เป็นห้องทำปฏิกิริยา
2. เอทานอลใช้เป็นสารแหล่งจ่ายคาร์บอน
3. ขดลวดทั้งสแตนเลสใช้เป็นขดลวดความร้อน
4. แก๊สไฮโดรเจน
5. Regulator วัตต์การไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่หัวถัง
6. Flow meter วัตต์การไหลของแก๊สนำพาที่ผ่านแหล่งจ่ายคาร์บอน
7. วาล์วสำหรับปรับอัตราการไหล
8. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า
9. พัดลมระบายความร้อน
10. แผ่นฐานรอง
11. บีกเกอร์สำหรับใส่น้ำเปล่า
12. Thermocouple
13. แวนตากันแดดหรือหรืออุปกรณ์ป้องกันแสงเข้าตา
14. สายยางและข้อต่อต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

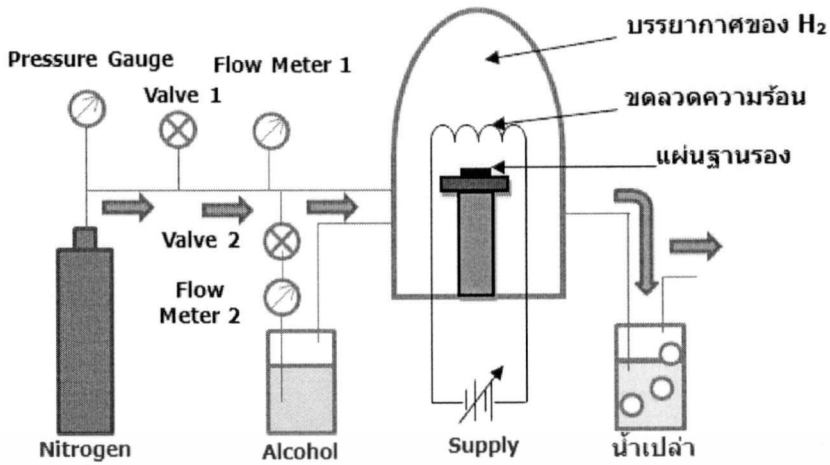
3.2.2.2 ขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

จากรูปที่ 3.21 เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน ประกอบด้วย แก๊สไฮโดรเจนใช้เป็นตัวนำพาสารตั้งต้นในการเกิดคาร์บอน (แอลกอฮอล์) โดยมีวาล์ว 1 โพลมิเตอร์ 1 ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สที่ใช้ในการทดลอง วาล์ว 2 และโพลมิเตอร์ 2 เป็นตัวกำหนดการเปิดปิดการไหลของแก๊สที่นำพาไอระเหยของแอลกอฮอล์เข้าไปยังห้องปฏิกิริยา ภายในห้องปฏิกิริยาประกอบด้วย แผ่นฐานรองซิลิคอนที่ใช้เป็นฐานรองในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ขดลวดความร้อนที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายความร้อนในการสังเคราะห์คาร์บอน มีเทอร์มอคัปเปอ์เป็นตัววัดอุณหภูมิในการสังเคราะห์ แก๊สและสารเคมีที่เหลือจากการสังเคราะห์จะมีน้ำทำหน้าที่เป็นตัวดักจับสารเคมีที่เหลือจากการสังเคราะห์ก่อนปล่อยออกอากาศภายนอก การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์เริ่มจากการวางแผ่นฐานรองลงบนฐานรองของเครื่องสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้อยู่ตรงกลางของขดลวดที่ใช้เป็นตัวให้ความร้อนในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และให้มีระยะห่างจากแผ่นฐานรองถึงขดลวด 0.5 เซนติเมตร จากนั้นปิดห้องปฏิกิริยาให้สนิทแล้วตรวจเช็คข้อต่อรวมถึงสายต่างๆ ก่อนการเปิดแก๊สไฮโดรเจน รวมถึงสายไฟฟ้าที่จะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมายังขดลวดของเครื่องสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และสาย Thermocouple ที่ใช้วัดอุณหภูมิในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้อยู่ในตำแหน่งพร้อมจะใช้งาน



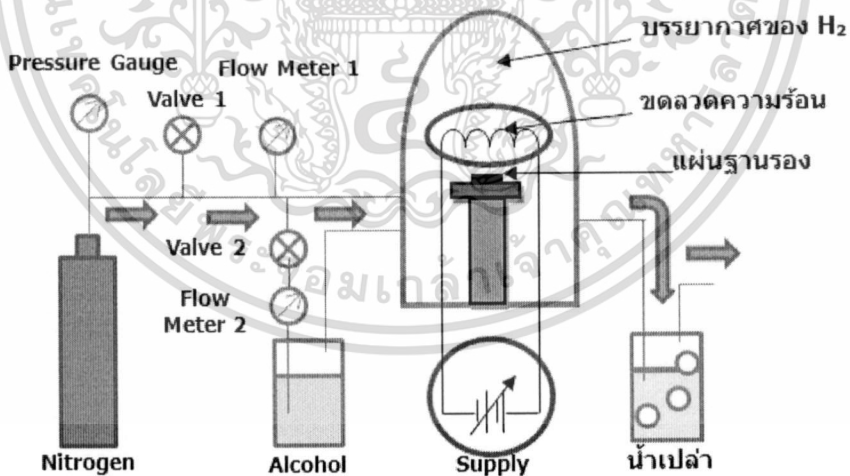
รูปที่ 3.21 ภาพแสดงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน

(2) ไล่อากาศออกจากห้องปฏิกิริยาก่อนที่จะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนที่มีอัตราการไหล 150 cc/min ใช้เวลาในการไล่อากาศ 15-20 นาที สาเหตุที่ต้องทำการไล่อากาศนี้เนื่องจากในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ต้องใช้ความร้อนสูงจากขดลวดประกอบกับแก๊สนำพาคือแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่ติดไฟ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการไล่อากาศที่มีส่วนผสมของแก๊สออกซิเจนซึ่งช่วยให้ไฟติดออกก่อนเพื่อป้องกันอันตรายจากการลุกไหม้หรือการระเบิดของท่อควอดซ์ แสดงดังรูปที่ 3.22 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



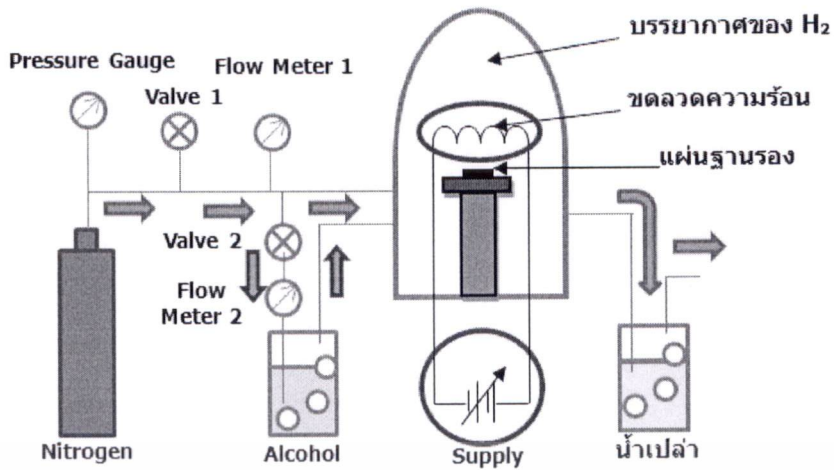
รูปที่ 3.22 ภาพแสดงการไล่อากาศในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อน

(3) ปรับอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 100 cc/min จากนั้นเปิดพัดลมระบายความร้อน แล้วเริ่มให้ความร้อนแก่ห้องปฏิกิริยาโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดความร้อน ขดลวดความร้อนจะทำการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงมาเป็นพลังงานความร้อน การปรับความร้อนนั้นให้ค่อยๆ เพิ่มกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวด เพื่อป้องกันการขาดของขดลวดที่เกิดจากการขยายตัวอย่างฉับพลันเมื่อขดลวดมีความร้อนสูงจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้น อุณหภูมิที่ได้จากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถดูได้จาก Thermocouple ที่ส่งผลมายังกล่องแสดงผล แสดงดังรูปที่ 3.23



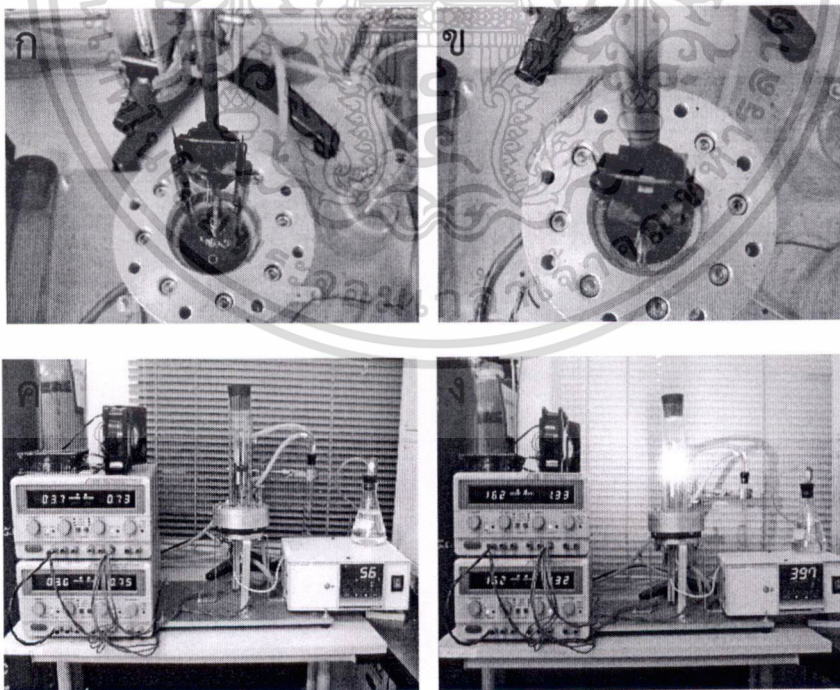
รูปที่ 3.23 ภาพแสดงการให้ความร้อนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อน

(4) เมื่อได้อุณหภูมิตามที่ต้องการในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แล้ว จึงทำการจ่ายไอระเหยของสารแหล่งจ่ายในการเกิดคาร์บอน (เอทานอล) เข้าไปยังห้องปฏิกิริยา โดยการปรับวาล์วให้แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนไหลผ่านเอทานอลเพื่อนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้าไปยังห้องปฏิกิริยา (รูปที่ 3.24) ด้วยอัตราการไหล 10 cc/min ตามเงื่อนไขของเวลาที่สังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 ภาพแสดงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน

(5) เมื่อสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ตามเวลาเงื่อนไขที่จะศึกษาแล้วให้หยุดการจ่ายสารแหล่งจ่ายคาร์บอนแล้วจึงค่อยๆลดกระแสไฟฟ้าลงอย่างช้าๆ เพื่อให้อุณหภูมิในห้องปฏิบัติการค่อยๆลดลง เมื่อห้องปฏิบัติการเย็นลงแล้วให้ปิดแก๊สไฮโดรเจน รอจนระบายแก๊สออกจากห้องปฏิบัติการหมดก่อน แล้วจึงปิดพัดลมระบายความร้อนเป็นอันเสร็จสิ้นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน รูปที่ 3.25 เป็นภาพจริงในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน



รูปที่ 3.25 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อนขณะทดลองจริง

(ก) ห้องปฏิบัติการของเครื่องสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ข) แผ่นฐานรองที่ติดตั้งในห้องปฏิบัติการ

(ค) การให้ความร้อนแก่ห้องปฏิบัติการ (ง) การปรับการให้ความร้อนแก่ห้องปฏิบัติการ

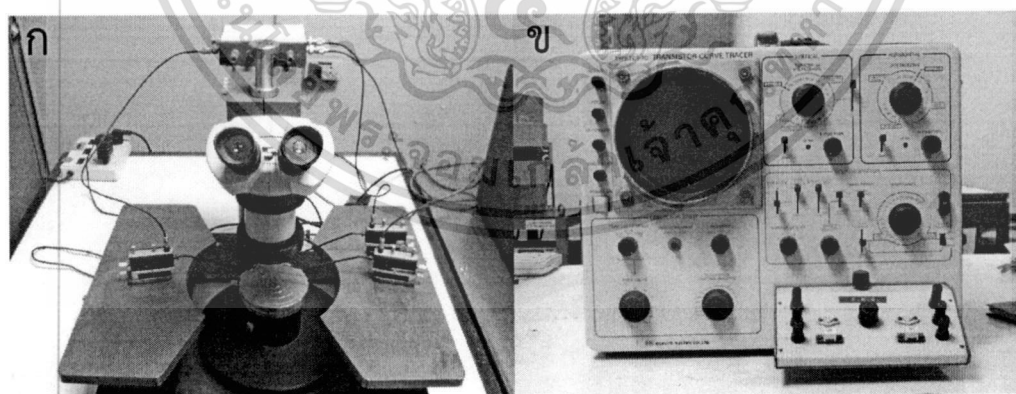
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องมือในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวบ์

3.3.1 ชนิดรอยสัมผัสและความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ

คาร์บอนนาโนทิวบ์ก็คือธาตุของคาร์บอนที่มีการจับตัวกันเป็นรูปท่อ ธาตุคาร์บอนเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ 4 ของตารางธาตุ เป็นหมู่เดียวกับซิลิคอนจึงมีคุณสมบัติเป็นกึ่งตัวนำไฟฟ้า ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์อาจเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี หรือ ชนิดเอ็น ก็ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยในการสังเคราะห์ และรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ อาจเกิดได้ทั้งแบบ รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ และรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

สำหรับการทดลองนี้เป็นรอยสัมผัสระหว่างทองแดงกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ สาเหตุที่เลือกใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรดเนื่องจากทองแดงมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิในการสังเคราะห์มาก (600 – 800 องศาเซลเซียส) เมื่อดูจากจุดหลอมเหลวแล้วแน่ใจว่าทองแดงจะไม่หลอมเหลวขณะสังเคราะห์ แต่ในการสังเคราะห์จริงนั้นพบว่า ทองแดงมีการหลุดล่อนจากแผ่นฐานรองซิลิคอนบางส่วน และอีกเหตุผลหนึ่งคือทองแดงไม่เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนนาโนทิวบ์จะไม่เกิดบนทองแดงที่ต้องการให้เป็นขั้วไฟฟ้า แต่ข้อเสียของทองแดงคือ ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นออกไซด์ได้ง่าย ออกไซด์นี้เป็นฉนวน จะส่งผลให้ความต้านทานที่รอยสัมผัสมีค่าสูงขึ้น เป็นรอยสัมผัสที่แย่ เพราะมีความต้านทานสูงและเมื่อนำแผ่นตัวอย่างไปทำการต่อขั้วต้องติดลวดตัวนำกับอิเล็กโทรดด้วยกาวเงิน เป็นเหตุให้มีค่าความต้านทานรอยสัมผัสมากขึ้นอีกเนื่องจากกาวเงินอาจติดได้ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ความต้านทานโดยรวมมากขึ้น

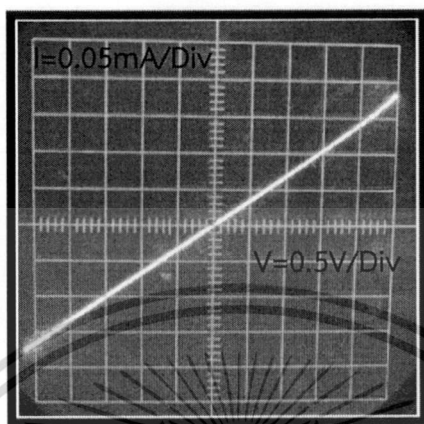


รูปที่ 3.26 การวัดรอยต่อของคาร์บอนนาโนทิวบ์กับขั้วโลหะทองแดง
(ก) โพรบของเครื่อง Curve Tracer (ข) เครื่อง Curve Tracer

ในการพิจารณาว่ารอยสัมผัสเป็นแบบโอห์มมิกคอนแทคหรือเรกติไฟร์นั้น จึงได้ทำการทดลองโดยนำตัวตรวจวัดแก๊สที่ต่อขั้วเสร็จสมบูรณ์แล้วมาทำการวัดกราฟคุณลักษณะ $I - V$ ด้วยเครื่อง Curve Tracer รูปที่ 3.26(ก) เป็นโพรบของเครื่อง Curve Tracer ที่ใช้ในการวัดคุณลักษณะรอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมผัสแบบโอห์มมิคคอนแทคของเซนเซอร์ โดยมีเครื่อง Curve Tracer ทำหน้าที่เป็นตัวอ่านค่าและแสดงผลดังรูปที่ 3.26(ข) ซึ่งผลของการทดลองวัดรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคนั้น จากการทดลองวัดรอบสัมผัสของเซนเซอร์ทุกๆ แผ่นตัวอย่างเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคทั้งสิ้น โดยมีค่าความชันหรือค่าความต้านทานที่รอยสัมผัสที่แตกต่างกันออกไป แสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 กราฟคุณลักษณะ I - V ของเซ็นเซอร์

3.3.2 ระบบการวัดแอลกอฮอล์



รูปที่ 3.28 ภาพแสดงระบบการวัดแอลกอฮอล์ภายในห้องเซ็นเซอร์แลป

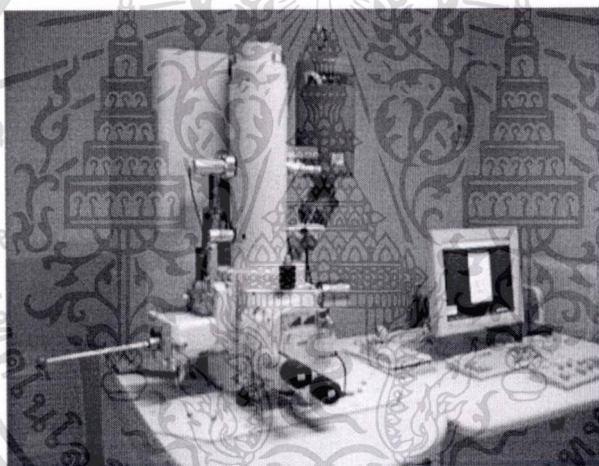
3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์หรือ TMEC เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีแหล่งกำเนิดเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนแบบ cold cathode field emission มีความแยกชัดสูงในระดับ 1.5 นาโนเมตร ที่ 15 กิโลโวลต์ (kV) ควบคุมการทำงานด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์สามารถบันทึกภาพถ่ายไมโครกราฟได้ ติดตั้งพร้อมหัววัดอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (secondary electron detector) หัววัดอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับหลัง (backscattered electron detector) และเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDX) แสดงรูปที่ 3.29

โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

- (1) นำเทปคาร์บอนติดเข้ากับแท่งทองเหลือง
- (2) นำชิ้นงานมาติดบริเวณเทปคาร์บอนให้แน่น
- (3) ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของสารตัวอย่างที่กำลังขยายต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- (4) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDX)



3.29 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และการใช้งาน เป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์

ในบทนี้กล่าวถึงผลของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกัน 2 วิธี คือการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมีแบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition) และการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical Vapor Deposition) โดยมีเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ อุณหภูมิความร้อนที่แผ่นฐานรอง เวลาในการสังเคราะห์ และอัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยที่นำพาไอระเหยของสารตั้งต้นของคาร์บอนมาอย่างห้องปฏิบัติการในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะนำมาทำการเปรียบเทียบด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ถึงลักษณะของผิวหน้า เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาแน่นในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ รวมไปถึงการจัดระเบียบของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จากนั้นนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ทำการต่อวงจรใช้งานเพื่อทำการทดสอบการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์มาเป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเคมีเมื่อมีการตรวจจับแอลกอฮอล์ เซ็นเซอร์ที่มีการตอบสนองในการตรวจจับแอลกอฮอล์ที่ดีจะถูกเลือกมาทดสอบการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาการตอบสนองของเซ็นเซอร์เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์แต่ละชนิดด้วย

นอกจากนี้ยังทำการศึกษากการทดลองผลของอุณหภูมิแวดล้อมที่มีผลต่อการตอบสนองเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์แบบคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าของเซ็นเซอร์เมื่อมีการใช้งานตรวจจับไอแอลกอฮอล์ในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน เพื่อหาเงื่อนไขอุณหภูมิที่เหมาะสมในการตรวจจับแอลกอฮอล์นอกจากนี้ยังศึกษาการให้ความร้อนช่วยลดความชื้นหลังการดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ระหว่างการตรวจจับ ทำให้ช่วยปรับปรุงค่าการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าและเวลาการตอบสนองให้ดียิ่งขึ้นทำให้สามารถที่จะนำไปใช้งานเป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับแอลกอฮอล์

4.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

4.1.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition)

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อนจะทำการสังเคราะห์ลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีการเคลือบโลหะคะตะลิสต์ไว้แล้ว โดยใช้โลหะนิเกิลเป็นโลหะคะตะลิสต์ได้จาก

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแบบกลุ่มก่อน การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน โดยเตาความร้อน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนที่ใช้งานเป็นแบบเตาความร้อนสามโซนโดยแต่ละโซนสามารถปรับค่าอุณหภูมิแยกกันได้อย่างอิสระเพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้งาน การสังเคราะห์จะใช้งานโซนกลางเตาหรือช่วงแฟลตโซน เพื่อควบคุมรักษาระดับของอุณหภูมิให้คงที่แม่นยำในการใช้งาน อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีด้วยกัน 3 อุณหภูมิคือ 600, 650 และ 700 °C เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 5 นาที และใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นของคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยมีอัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยในการนำพาไอระเหยของเอทานอลที่ 300 และ 500 cc/min เพื่อศึกษาถึงลักษณะการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ความหนาแน่น การจัดระเบียบของคาร์บอนนาโนทิวบ์ รวมไปถึงภาพรวมของโครงสร้างทั่วไปของการกระจายตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ก่อนจะนำมาประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ ซึ่งเงื่อนไขและสัญลักษณ์ในการสังเคราะห์ได้นำเสนอไว้แล้วในตารางที่ 4.1 ดังนี้

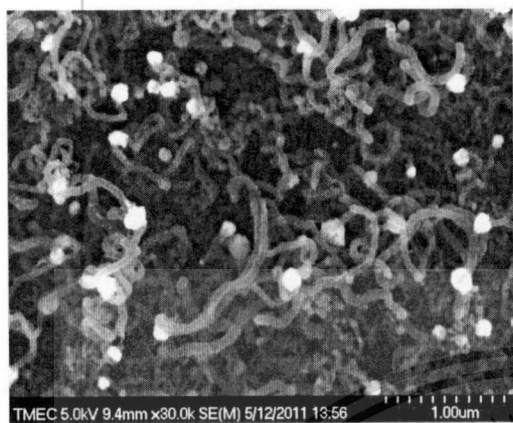
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (cc/min)	สัญลักษณ์ (T-t-cc/min)
5	600	300	T600-5-300
		500	T600-5-500
	650	300	T650-5-300
		500	T650-5-500
	700	300	T700-5-300
		500	T700-5-500

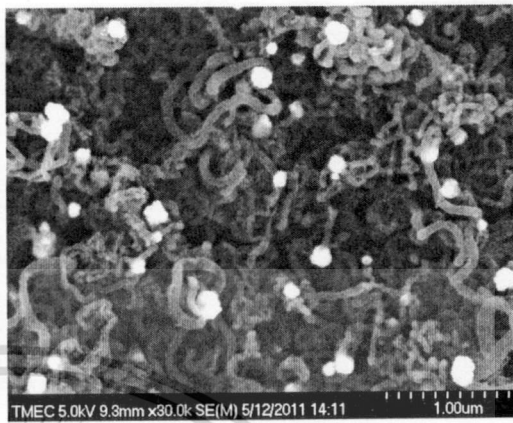
จากรูปที่ 4.1 เป็นการวิเคราะห์ผลโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 30,000 เท่าในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition) พบว่า ทุกเงื่อนไขของการทดลองสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยโลหะคะตะลิสต์นิกเกิลได้ โดยพื้นผิวด้านบนของคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่เรียบสม่ำเสมอ แต่จะมีการกระจายตัวซ้อนทับกันเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรอง และทุกเงื่อนไขในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะไม่มีการเรียงตัวของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเส้นตรงที่มีระเบียบแต่จะเกิดการโค้งงอ และบางส่วนมีการเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มก้อนที่แน่นวางซ้อนทับกันจนทำให้ในบางจุดเกิดเป็นโพรงหรือช่องว่างตรงกลางซึ่งไม่มีคาร์บอนนาโนทิวบ์อยู่ ซึ่งจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทุกเงื่อนไขมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และจากการทดลองเห็นได้ว่าเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไอระเหยของเอทานอล 300 cc/min คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จะมีความหนาแน่นมากกว่าเงื่อนไขอื่นดังแสดงดังรูปที่ 4.1(ก) และที่เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการไหลไอเอทธานอล 500 cc/min คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จะมีความหนาแน่นมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

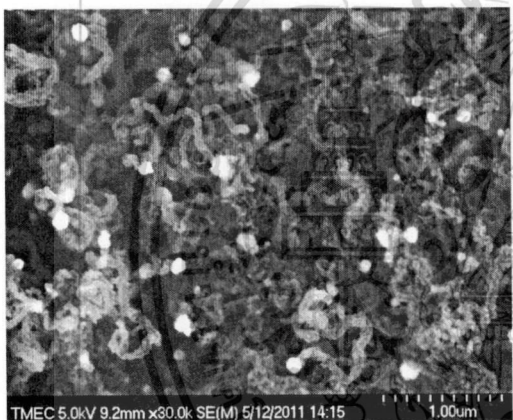
ระเหยเอทานอลที่ 500 cc/min มีขนาดของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ขนาดใหญ่กว่าเงื่อนไขอื่น แสดงดังรูปที่ 4.1(ฉ)



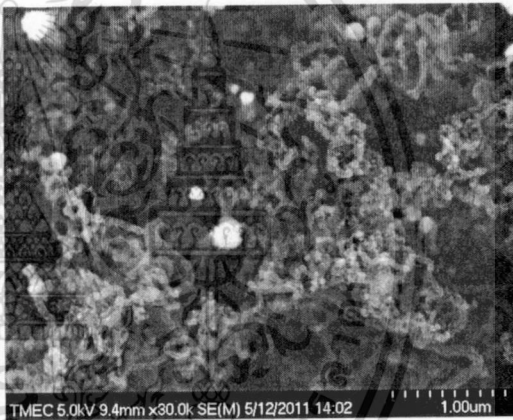
(ก) T600-5-300



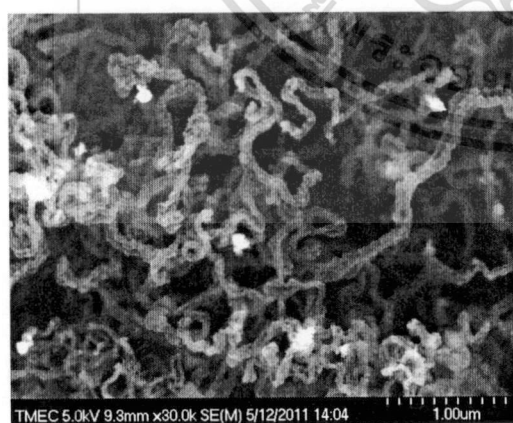
(ข) T600-5-500



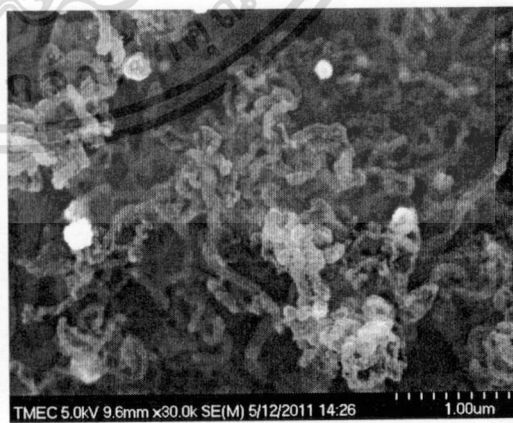
(ค) T650-5-300



(ง) T650-5-500



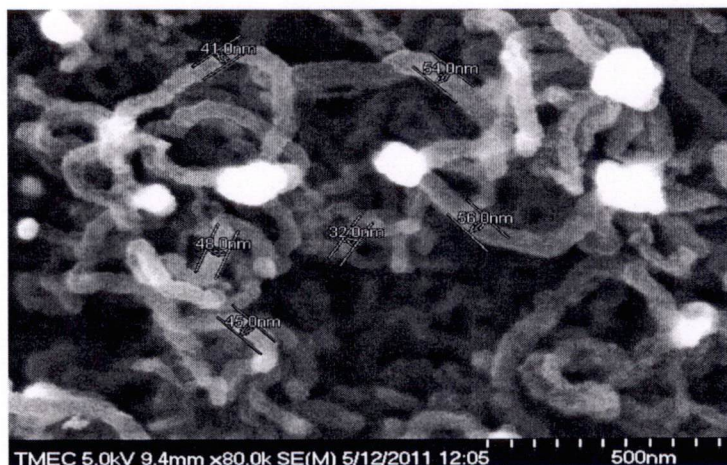
(จ) T700-5-300



(ฉ) T700-5-500

รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 30,000 เท่าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากสังเคราะห์แบบเตาความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้
(ก) ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของคาร์บอนนาโนทิวบ์

จากรูปที่ 4.2(ก) เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 80,000 เท่าพบว่า ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดที่ไม่เท่ากันวางตัวกระจายซ้อนทับกันจนเต็มพื้นที่ ซึ่งขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 32.0 - 56.0 nm การวางตัวที่ไม่เป็นระเบียบทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรง และจากรูปที่ 4.2(ข) เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 80,000 เท่าแบบภาพตัดขวางพบว่า ความหนาของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดจากการซ้อนทับกันจะมีความหนาหรือความสูงที่ไม่เท่ากันทั้งแผ่น ความหนาของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 4.31 μm - 5.38 μm และที่ปลายของท่อจะสังเกตเห็นจุดสีขาวของโลหะคะตะลิสต์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอนในการเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งทำให้การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในครั้งนี้เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะการเกิดแบบไม่วางกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tip growth คือ โลหะคะตะลิสต์ที่มีการหลอมเหลวจะทำหน้าที่จับอะตอมคาร์บอน คาร์บอนที่โดน ดักจับจะแทรกตัวลงไปด้านล่างของโลหะคะตะลิสต์แล้วสร้างพันธะต่อกัน เมื่อเกิดการสะสมอะตอม ของคาร์บอนนี้มากขึ้นจึงสามารถดันโลหะคะตะลิสต์ขึ้นมาอยู่ด้านบนของคาร์บอนนาโนทิวป์เป็นจุดสี ขาวแสดงดังรูป

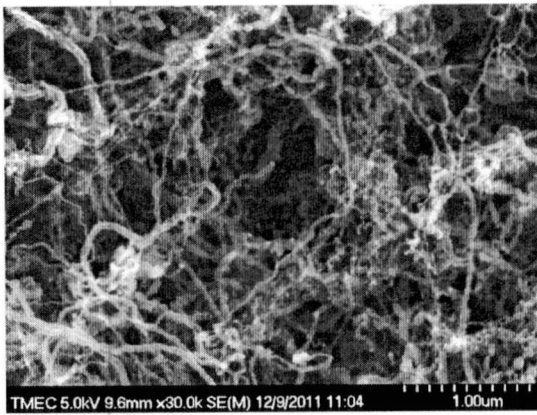
4.1.2 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical Vapor Deposition)

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์จะทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ลงบนแผ่นฐานรอง ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีการเคลือบโลหะคะตะลิสต์ไว้แล้ว ซึ่งการทดลองครั้งนี้ใช้โลหะนิเกิลเป็นโลหะ คะตะลิสต์ โดยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อนได้อธิบายไว้อย่างละเอียดแล้ว ในบทที่ 3 และเพื่อการศึกษาการเปรียบเทียบของการเกิดของท่อคาร์บอน ดังนั้นกระบวนการ สังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อนจึงมีการสังเคราะห์ที่มีเงื่อนไขที่เหมือนกันกับการ สังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบเตาความร้อน ซึ่งความร้อนที่ใช้ในการสังเคราะห์มีด้วยกัน 3 อุณหภูมิคือ 600, 650 และ 750 °C ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที และใช้อีทานอลเป็นสารตั้งต้น ของคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยมีอัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยในการนำพาไอระเหย ของอีทานอลเป็น 8 และ 10 cc/min เพื่อศึกษาถึงลักษณะการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ ความหนาแน่น การจัดระเบียบของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ รวมไปถึงภาพรวมของโครงสร้างทั่วไปของการ กระจายตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้ก่อนจะนำมาประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ ซึ่งเงื่อนไขและ สัญลักษณ์ในการสังเคราะห์ได้นำเสนอไว้แล้วในตารางที่ 4.2

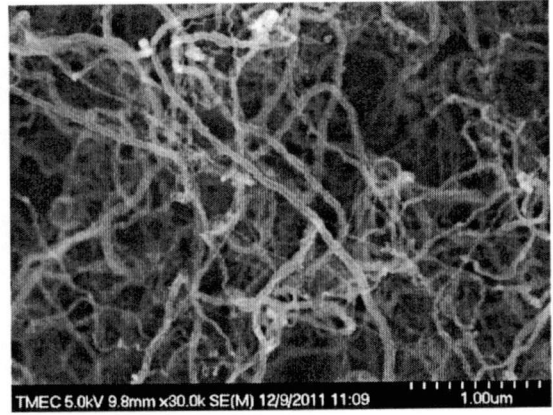
ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อน

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (cc/min)	สัญลักษณ์ (T-t-cc/min)
5	600	8	H600-5-8
		10	H600-5-10
	650	8	H650-5-8
		10	H650-5-10
	700	8	H700-5-8
		10	H700-5-10

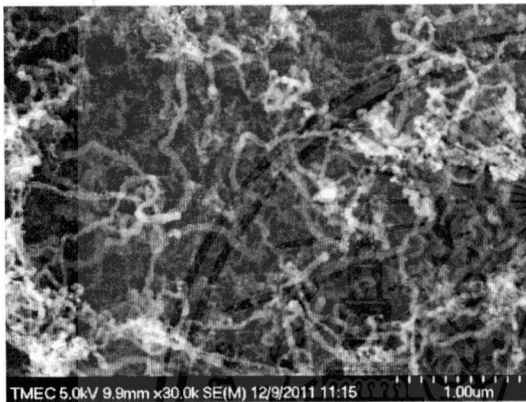
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



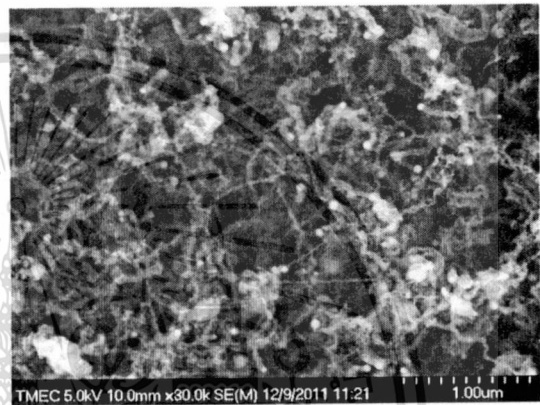
(ก) H600-5-8



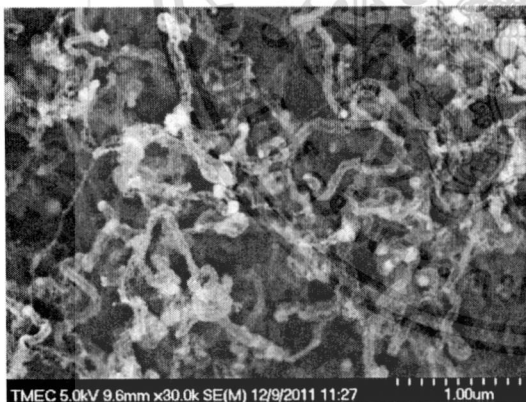
(ข) H600-5-10



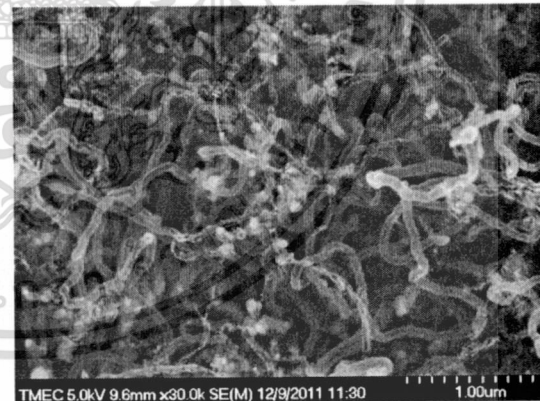
(ค) H650-5-8



(ง) H650-5-10



(จ) H700-5-8

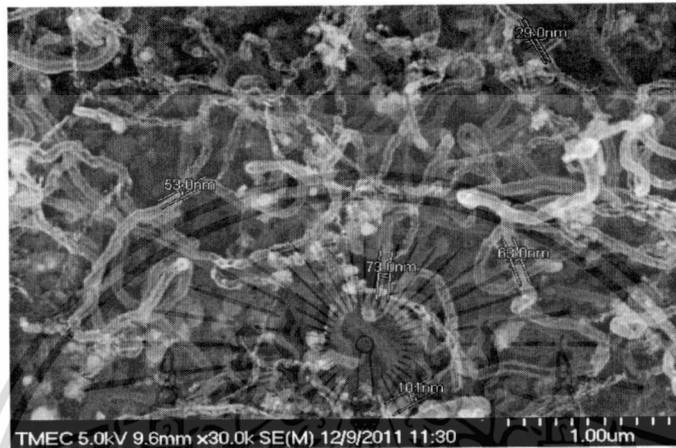


(ฉ) H700-5-10

รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 30,000 เท่าของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากสังเคราะห์ขดลวดความร้อน

จากรูปที่ 4.3 เป็นผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 30,000 เท่า พบว่าทุกเงื่อนไขการทดลองสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยโลหะคะตะลิสต์นิกเกิลได้ พื้นผิวด้านบนของคาร์บอนนาโนทิวป์ไม่เรียบ แต่มีการกระจายตัวของท่อคาร์บอนเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้มีการเรียงตัวมีทั้งเส้นตรงและแบบโค้งงอ มีการกระจายตัวมากกว่าการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และจากการทดลองจะเห็นว่าทุกๆเงื่อนไขการสังเคราะห์จะได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดที่เล็กกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน และการทดลอง H700-5-8 เป็นเงื่อนไขที่มีการกระจายตัวของเส้นคาร์บอนที่สม่ำเสมอ และการทดลอง H600-5-8 เป็นเงื่อนไขที่ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีความยาวและตรงมากที่สุด



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้
(ก) ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของคาร์บอนนาโนทิวบ์

จากรูปที่ 4.4(ก) เป็นผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 30,000 เท่าพบว่าพื้นผิวด้านบนของคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่เรียบ แต่มีการกระจายตัวของท่อคาร์บอนเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรอง คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้มีการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียงตัวมีทั้งเส้นตรงและแบบโค้งงอ มีการกระจายตัวมากกว่าการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และจากการทดลองจะเห็นว่าทุกๆเงื่อนไขการสังเคราะห์จะได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดที่เล็กกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะมีขนาดที่ไม่เท่ากันซึ่งอยู่ในช่วง 29.0-104 nm และจากรูป 4.4(ข) เป็นภาพถ่าย SEM ภาพตัดขวาง พบว่าความสูงของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดการซ้อนทับกันอยู่ในช่วง 4.17-5.99 μm และที่ปลายของท่อคาร์บอนจะมีโลหะคะตะลิสต์นิเกิดติดอยู่ ซึ่งเป็นลักษณะของการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะการเกิดแบบ Tip growth คือ โลหะคะตะลิสต์ที่มีการหลอมเหลวจะทำหน้าที่จับอะตอมคาร์บอน คาร์บอนที่โดนดักจับจะแทรกตัวลงไปด้านล่างแล้วสร้างพันธะต่อกัน เมื่อเกิดการสะสมอะตอมของคาร์บอนมากขึ้นจึงสามารถดันโลหะคะตะลิสต์ขึ้นมาอยู่ด้านบนของปลายท่อแบบเดียวกันกับการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน

สรุปผลการเปรียบเทียบจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งสองแบบ

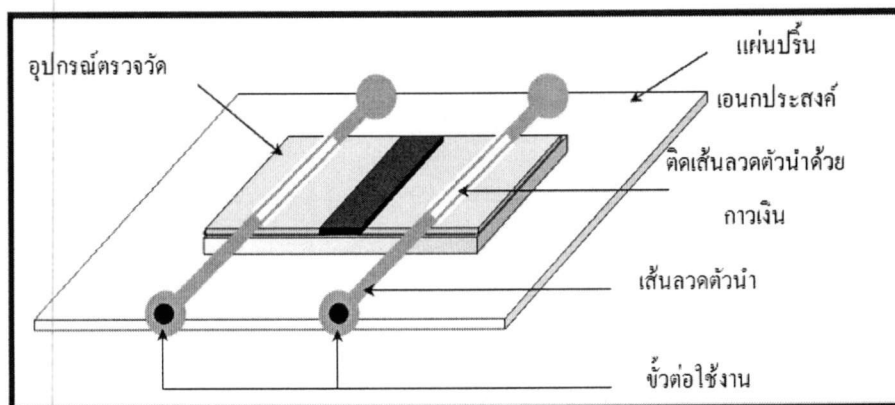
โดยภาพรวมของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งสองแบบผลที่ได้จะมีความแตกต่างกันในลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อนคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะมีการยึดตัวตรงกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน รวมไปถึงการกระจายตัวของท่อคาร์บอนที่มีการกระจายตัวได้สม่ำเสมอ เพราะมีการเกาะกลุ่มหรือการขดตัวเป็นกระจุกที่น้อยกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้โดยภาพรวม คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อนจะมีขนาดที่โตกว่าแบบขดลวดความร้อน แต่ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งสองแบบนี้จะมีการเกิดที่เหมือนกันทั้ง 2 แบบคือการเกิดแบบ Tip growth โดยมีโลหะคะตะลิสต์เกาะอยู่ตรงส่วนปลายของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้

4.2 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ใช้เป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์

4.2.1 การต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้วัดความต้านทาน

การใช้งานคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์นั้น จะใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเคมีของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อมีการดูดซับแอลกอฮอล์ จึงจำเป็นต้องมีขั้วต่อออกมาใช้งาน 2 ขั้วและควรมีความแข็งแรงพอในการใช้งาน ดังนั้นแผ่นฐานรองที่มีคาร์บอนนาโนทิวบ์จะประกอบติดกับแผ่นปรินเอนกประสงค์เพื่อความแข็งแรงและสะดวกในการใช้งาน ส่วนขั้วใช้งานจะใช้การ Bonding ลวดตัวนำกับขั้วทองแดงด้วยกาวเงิน ดังรูปที่ 4.5 และเซ็นเซอร์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วพร้อมใช้งานจะแสดงในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงรายละเอียดการต่อขั้วออกไปใช้งาน



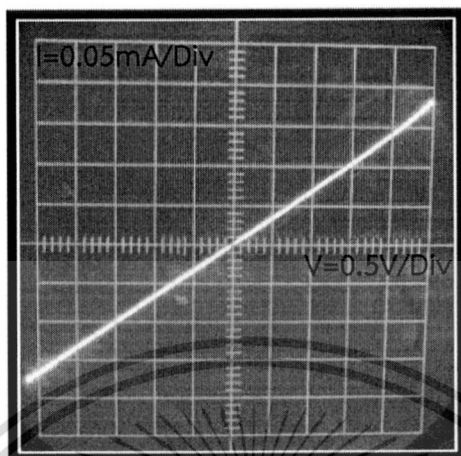
รูปที่ 4.6 คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต่อขั้วใช้งานแล้ว

4.2.2 ความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ

คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ประกอบเป็นเซ็นเซอร์เรียบร้อยแล้วจะทำการตรวจวัดความเป็นโอห์มมิกของรอยสัมผัสระหว่างขั้วใช้งานกับฟิล์มคาร์บอนที่เราสังเคราะห์ได้ การใช้งานของเซ็นเซอร์จะใช้ในลักษณะเดียวกันกับตัวต้านทานหรือตัว Resistor โดยค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเคมีเมื่อคาร์บอนดูดซับแอลกอฮอล์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะให้รอยสัมผัสเป็นแบบโอห์มมิกมากกว่าการเป็นแบบเรกติไฟร์เพื่อให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเซ็นเซอร์ได้สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน

ในการพิจารณาว่ารอยสัมผัสเป็นแบบโอห์มมิกหรือเรกติไฟร์ จึงทดลองตรวจวัดรอยสัมผัสของเซ็นเซอร์ทั้งที่ไม่ได้ต่อขั้วใช้งานและหลังจากที่มีการต่อขั้วเสร็จสมบูรณ์แล้วมาวัดกราฟคุณลักษณะ $I - V$ ด้วยเครื่อง Curve Tracer ผลที่ได้พบว่าเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกทั้งก่อนการต่อขั้วใช้งานและหลังต่อขั้วใช้งาน และผลการวัดเซ็นเซอร์ทุกๆตัวที่สังเคราะห์ได้เป็นรอยสัมผัสแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอห์มมิก โดยมีความชันหรือความต้านทานแตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานเดิมของคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ และอาจรวมกับค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นหลังจากมีการต่อขั้วใช้งาน



รูปที่ 4.7 กราฟคุณลักษณะ I - V เซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ที่ทำการต่อขั้วเรียบร้อยแล้ว

4.3 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ของเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ระบบการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งการวัดไอระเหยแอลกอฮอล์จะกระทำในระบบปิดภายในห้องปฏิบัติการหรือ Chamber ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิจากตัวควบคุมอุณหภูมิระหว่าง -5 - 100 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิห้องปฏิริยานี้จะเป็นอุณหภูมิแวดล้อมในการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ ในห้องปฏิบัติการจะมีที่ยึดหัวเซ็นเซอร์อยู่ภายในสำหรับยึดอุปกรณ์ขณะทำการวัด ส่วนด้านล่างของที่ยึดเซ็นเซอร์จะมีขดลวดทั้งสแตนเลสสำหรับให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในกรณีที่ต้องการไล่ความชื้นที่ผิวฟิล์มหลังการดูดซับไอแอลกอฮอล์ขณะทำการวัด โดยความร้อนที่ให้อาจมีการควบคุมจากค่ากระแสไฟฟ้าตรงที่ป้อนให้ขดลวดจากแหล่งจ่ายพลังงานภายนอกห้องปฏิบัติการ

ก่อนทำการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์จะทำการไล่อากาศในห้องปฏิบัติการด้วยแก๊สไนโตรเจนผ่านวาล์ว V1 และโพลมิเตอร์ควบคุมการไหลของแก๊ส F1 แก๊สไนโตรเจนจะเข้าแทนที่อากาศในห้องปฏิบัติการหรือ Chamber ไล่อากาศออกมาภายนอกโดยมีน้ำดักอยู่ น้ำจะทำหน้าที่เป็นวาล์วปิดกั้นอากาศภายนอกไม่ให้เข้าไปภายใน และทำหน้าที่เจือจางแก๊สที่เหลือจากห้องปฏิบัติการให้ละลายในน้ำก่อนที่จะออกสู่บรรยากาศภายนอก เมื่อต้องการทำการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ให้ทำการปิดวาล์ว V1 และเปิดวาล์ว V2 เพื่อให้แก๊สไนโตรเจนที่ควบคุมปริมาณการไหลของแก๊สผ่านโพลมิเตอร์ F2 ลงไปยังสารละลายแอลกอฮอล์ ไนโตรเจนจะนำพาไอระเหยแอลกอฮอล์ผ่านฟองแก๊สไนโตรเจนไปยังห้องปฏิบัติการหรือ Chamber โดยจะทำสลับกันเป็นวงรอบการวัด การตอบสนองของเซ็นเซอร์ต่อการตรวจจับแอลกอฮอล์จะอยู่ในรูปค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงซึ่งถูกแสดงผลผ่าน

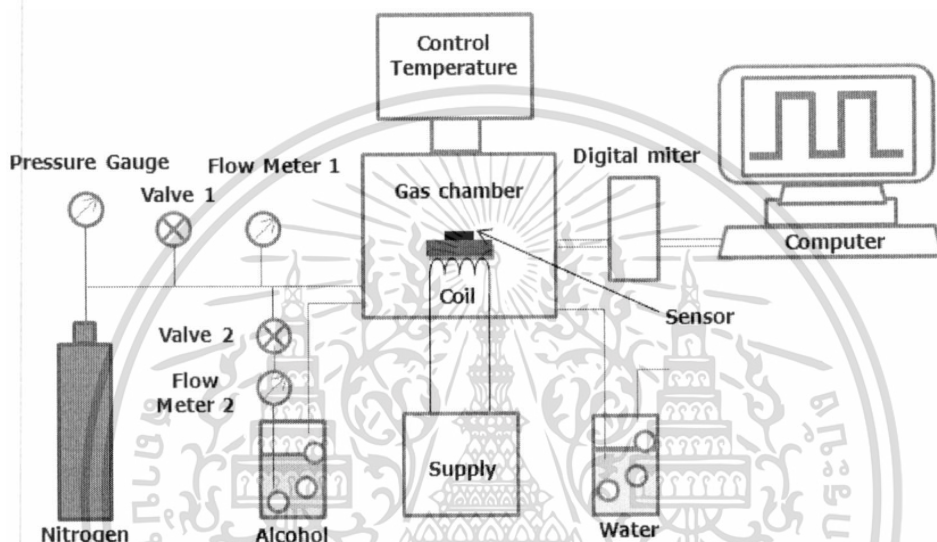
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการเกษตรแห่งชาติ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จอมอนิเตอร์ที่เวลาจริงและบันทึกเก็บไว้เป็นข้อมูลอย่างต่อเนื่อง โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานสูงสุด R_{MAX} และค่าความต้านทานต่ำสุด R_{MIN} ในรอบการวัดของไซเคิลนั้น ดังสมการที่ 4.1

$$\Delta R\% = \frac{R_{MAX} - R_{MIN}}{R_{MIN}} \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ R_{MAX} คือค่าความต้านทานสูงสุดในรอบการวัด

R_{MIN} คือค่าความต้านทานต่ำสุดในรอบการวัด



รูปที่ 4.8 ภาพแสดงระบบการวัดแอลกอฮอล์

4.3.1 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition)

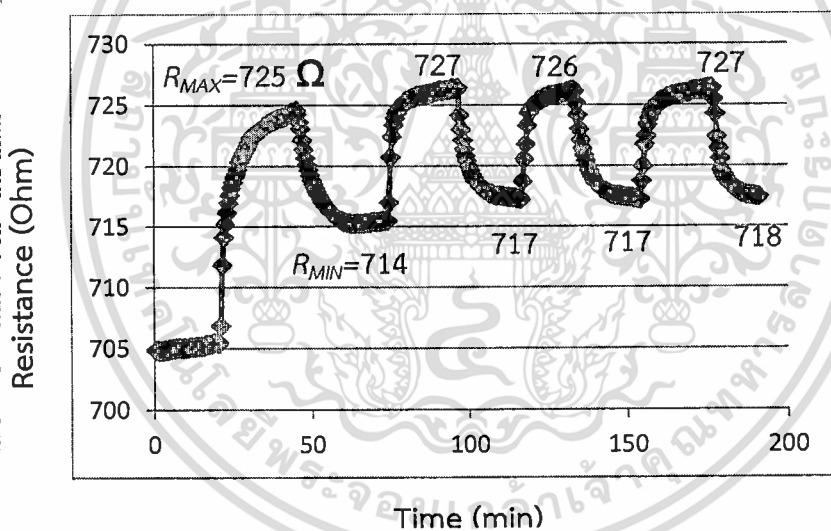
เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลองการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อนนั้น ได้ทำการเลือกใช้งานในเงื่อนไขการสังเคราะห์ T605-5-300 เนื่องจากการกระจายตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์มีการกระจายตัวสม่ำเสมอว่าเงื่อนไขอื่นๆ อีกทั้งไม่มีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนหรือโพรงในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังนั้นในการทดลองการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อนจึงเลือกใช้เซ็นเซอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์นี้

(1) การตรวจจับเอทานอล

จากรูปที่ 4.9 เป็นการทดลองตรวจจับไอระเหยของเอทานอล โดยการทดลองใช้เซ็นเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน การตรวจวัดกระทำตามหัวข้อที่ 4.3 การคำนวณค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ที่วัดได้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 เวลา 0 -15 นาที เป็นการไล่อากาศภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้แก๊สเฉื่อยไนโตรเจน เพื่อไล่อากาศภายในออกจากห้องปฏิบัติการ พบว่าเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ช่วงเวลา 15 -50 นาที เป็นการนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้ามาภายในห้องปฏิบัติการ พบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีการดูดซับไอแอลกอฮอล์อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการจ่ายไอเอทานอลก่อนที่จะดูดซับหรือจับได้ช้าลงเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว หลังจากเกิดการอิ่มตัวในนาที่ที่ 50 จึงหยุดจ่ายไอเอทานอลซึ่งจุดอิ่มตัวนี้เรียกว่า R_{MAX} จากนั้นจะทำการไล่ไอเอทานอลออกโดยการใส่แก๊สไนโตรเจนช่วยไล่ไอเอทานอลออกพบว่า คาร์บอนที่ดูดซับไอเอทานอลออกอยู่นั้นได้ปล่อยไอเอทานอลออกออกมาบางส่วน ค่าความต้านทานจึงไม่กลับมาที่ค่าเริ่มต้นเรียกค่าความต้านทานนั้นว่า R_{MIN} เมื่อทำการทดลองซ้ำในไซเคิลที่ 2-4 พบว่าการทำงานของเซ็นเซอร์ก็สามารถทำงานได้เช่นเดิม

จากการทดลองเมื่อเซ็นเซอร์มีการดูดซับหรือตรวจจับไอเอทานอลเกิดการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเคมีขึ้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน $\Delta R\%$ ที่เกิดขึ้นแต่ละไซเคิลเป็น 1.83%, 1.86%, 1.85% และ 1.86% ตามลำดับ



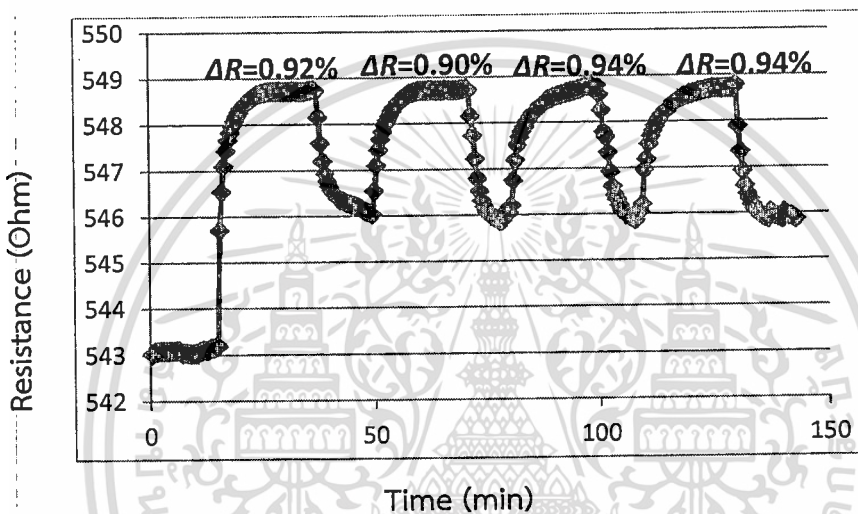
รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน

(2) การตรวจจับเมทานอล

จากรูปที่ 4.10 เป็นการทดลองแบบเดียวกับรูปที่ 4.9 แต่เป็นการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเมทานอล โดยการทดลองใช้เซ็นเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน จากรูปที่ 4.10 เวลา 0-15 นาที เป็นการไล่อากาศภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้แก๊สเฉื่อยไนโตรเจน เพื่อไล่อากาศภายในออก พบว่าเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ช่วงเวลา 15-25 นาที เป็นการนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้ามาภายในห้องปฏิบัติการ พบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีการดูดซับไอเอทานอลอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการจ่ายไอเอทานอลก่อนที่จะดูดซับหรือจับได้ช้าลงเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว หลังจากเกิดการอิ่มตัวในนาที่ที่ 50 จึงหยุดจ่ายไอเอทานอลซึ่งจุดอิ่มตัวนี้เรียกว่า R_{MAX} จากนั้นจะทำการไล่ไอเอทานอลออกโดยการใส่แก๊สไนโตรเจนช่วยไล่ไอเอทานอลออกพบว่า คาร์บอนที่ดูดซับไอเอทานอลออกอยู่นั้นได้ปล่อยไอเอทานอลออกออกมาบางส่วน ค่าความต้านทานจึงไม่กลับมาที่ค่าเริ่มต้นเรียกค่าความต้านทานนั้นว่า R_{MIN} เมื่อทำการทดลองซ้ำในไซเคิลที่ 2-4 พบว่าการทำงานของเซ็นเซอร์ก็สามารถทำงานได้เช่นเดิม

เมทานอลก่อนที่จะดูดซับได้ช้าลงเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว หลังจากเกิดการอิ่มตัวในนาที่ที่ 25 จึงหยุดจ่ายไปเมทานอล โดยมีการใช้แก๊สไนโตรเจนช่วยไล่ไอเมทานอล พบว่าคาร์บอนที่ดูดซับไอเมทานอลได้ปล่อยไอเมทานอลออกมาบางส่วน ค่าความต้านทานจึงไม่กลับมาที่ค่าเดิม และเมื่อทำการการทดลองซ้ำในไซเคิลที่ 2-4 พบว่าการทำงานของเซ็นเซอร์ก็สามารถทำงานได้เช่นเดิม

ผลจากการทดลองตรวจจับพบว่าเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถตรวจจับไอระเหยของเมทานอลได้ โดยมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการตรวจจับอยู่ในช่วง 0.92%, 0.90%, 0.94% และ 0.94 % ตามลำดับของการตรวจจับเมทานอล



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน

4.3.2 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical Vapor Deposition)

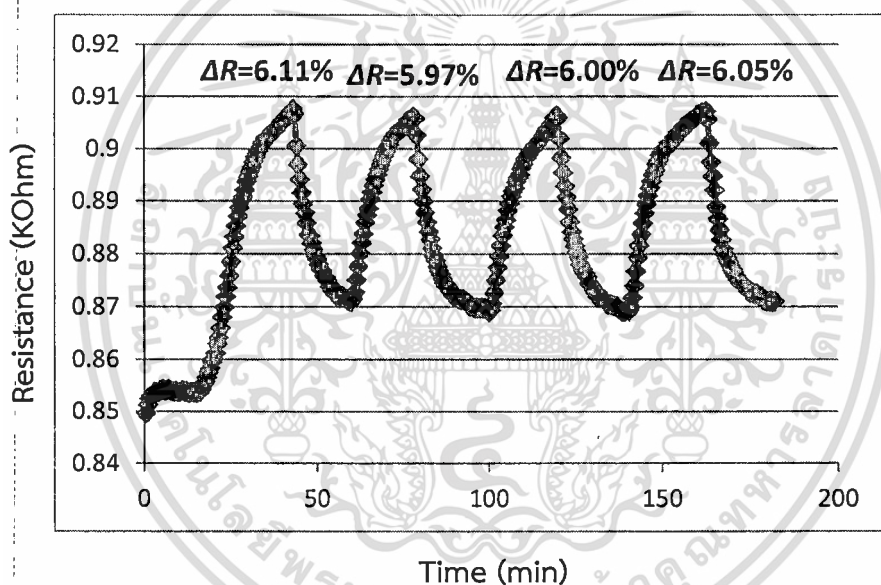
เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ เลือกใช้เซ็นเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์จากเงื่อนไข H700-5-10 เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้นั้น มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีช่องว่างหรือโพรงในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ อีกทั้งไม่มีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน และขนาดเส้นของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์มีขนาดของแต่ละเส้นที่ใกล้เคียงกัน จึงเลือกใช้เซ็นเซอร์จากเงื่อนไขนี้เป็นเซ็นเซอร์ในการทดลองตรวจจับไอแอลกอฮอล์

(1) การตรวจจับเอทานอล

การทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล โดยการทดลองใช้เซ็นเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน การตรวจวัดจะกระทำตามหัวข้อที่ 4.3 จากรูปที่ 4.11 เวลา 0 - 15 นาที เป็นการไล่อากาศภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้แก๊สเฉื่อยไนโตรเจน เพื่อไล่เอทานอลออกจากห้องปฏิบัติการ ไม่ทำให้อุณหภูมิในห้องปฏิบัติการเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศภายในออก พบว่าเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ช่วงเวลา 15 -40 นาที เป็นการนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้ามาภายในห้องปฏิบัติการ พบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีการดูดซับไอเอทานอลอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการจ่ายไอเอทานอล ก่อนที่จะดูดซับได้ช้าลงเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว หลังจากเกิดการอิ่มตัวในนาที่ที่ 40 จึงหยุดจ่ายไอเอทานอล โดยมีการใช้แก๊สไนโตรเจนช่วยไล่ไอเอทานอลพบว่า คาร์บอนที่ดูดซับไปเอทานอลได้ปล่อยไอเอทานอลออกมาบางส่วน ค่าความต้านทานจึงไม่กลับมาที่ค่าเดิม และเมื่อทำการการทดลองซ้ำในไซเคิลที่ 2-4 พบว่าการทำงานของเซ็นเซอร์ก็สามารถทำงานได้เช่นเดิม

ผลจากการทดลองพบว่าเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลได้ดี โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 6.11%, 5.97%, 6% และ 6.05% ของการตรวจวัดเอทานอลตามลำดับ



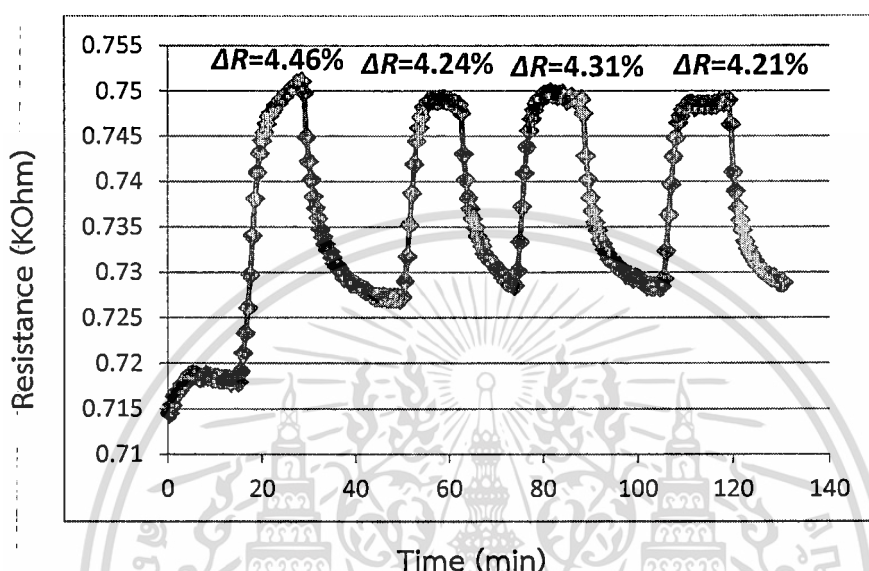
รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่ได้จากการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน

(2) การตรวจจับเมทานอล

ผลทดลองตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลจากรูปที่ 4.12 โดยการทดลองใช้เซ็นเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน พบว่าช่วงของการไล่อากาศออกจะมีการปรับตัวของคาร์บอนเล็กน้อยก่อนเข้าสู่จุดพร้อมใช้งาน เมื่อทำการจ่ายไอเมทานอลเข้ามาห้องปฏิบัติการคาร์บอนก็สามารถดูดซับไอของเมทานอลแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของความต้านทานตามการทดลองข้างต้น และเมื่อหยุดจ่ายไปเมทานอลคาร์บอนที่ทำการดูดซับไอเมทานอลก็จะปล่อยไอเมทานอลออกเพื่อกลับไปยังสภาพเดิม แต่การกลับคืนสภาพเดิมนั้นไม่สามารถกลับไปสู่ค่าเดิมได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมีการฝังตัวของไอเมทานอลบางส่วนในตัวของคาร์บอนดั่งเช่นการทดลองที่ผ่านมา และเมื่อทำการทดลองซ้ำในไซเคิลถัดไปก็สามารถทำงานได้ตามปกติเหมือนการทดลองข้างต้นด้วย

ผลจากการทดลองพบว่าเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลได้ โดยมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 4.46% 4.24%, 4.31% และ 4.21% ของการตรวจวัดเมทานอลตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลที่ได้จากกาสิ่งเคราะห์แบบขดลวดความร้อน

จากกราฟสามารถอธิบายได้จากสมการไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) เกิดจากการถ่ายประจุจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง เซลล์ไฟฟ้าเคมีอันหนึ่งจึงต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว จึงเกิดเป็นวงจรปิดได้ ประจุที่ถ่ายเทในชั้นตัวอย่างอาจเป็นทั้งอิเล็กตรอนหรือโฮล หรือทั้งสองอย่าง แผ่นกราฟไฟท์ที่ประกอบกันเป็นผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์มีลักษณะโค้ง อิเล็กตรอนจึงเกิดการเปลี่ยนรูปทางโครงสร้างเดิม จากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เป็นการกระจายตัวอย่างไม่สมดุลทั้งด้านในท่อและด้านนอกท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ทรงกระบอก (cylindrical sheet) เมื่อโมเลกุลของแอลกอฮอล์ที่มีการแพร่สู่พื้นผิวคาร์บอนนาโนทิวบ์ ประจุอิเล็กตรอนจึงเกิดการเหนี่ยวนำอะตอมคาร์บอนกับโมเลกุลของแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นแรงของแรงวาเลนเวสต์ อิเล็กตรอนจะถูกจ่ายหรือดึงจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งการดึงหรือการจ่ายอิเล็กตรอนจะขึ้นกับค่าของอิเล็กโตรเนกาติวิตีของคาร์บอนกับโมเลกุลแอลกอฮอล์ ถ้าคาร์บอนมีค่ามากกว่าก็จะดึงอิเล็กตรอนให้เองเอียงมาทางด้านคาร์บอน ทำให้มีประจุพาหะ (Carrier) มากขึ้น ทำให้การนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มขึ้น แต่ถ้าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีน้อยกว่า อิเล็กตรอนก็จะถูกดึงไปทางโมเลกุลของแอลกอฮอล์ทำให้การนำไฟฟ้าต่ำลง ซึ่งทำให้มีค่าความต้านทานมากขึ้น ปฏิริยาไฟฟ้าเคมีทั่วไปเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อ δ คือ ตัวเลขแสดงจำนวนประจุที่ถูกจ่ายระหว่างเกิดปฏิกิริยา

จากการเปรียบเทียบการทำงานในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ระหว่างเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อนกับเซ็นเซอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน พบว่าเซ็นเซอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อนนั้นจะมีการดูดซับหรือตรวจจับไอระเหยของแอลกอฮอล์ได้ดีกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน เนื่องจากในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อนอุณหภูมิที่แผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์มีอุณหภูมิที่เท่ากันกับการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน แต่ความร้อนที่ขดลวดความร้อนที่ใช้ในการแตกตัวของโมเลกุลแอลกอฮอล์สูงกว่าที่แผ่นฐานรอง การแตกตัวของโมเลกุลแอลกอฮอล์ทำได้อย่างสมบูรณ์ว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อนที่ใช้ความร้อนในการแตกตัวและการสังเคราะห์ที่เท่ากัน และเมื่ออะตอมคาร์บอนที่แตกตัวเจอกับโลหะคะตะลิสต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอนในการฟอร์มตัวการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำให้การเกิดท่อคาร์บอนมีเส้นที่ตรงกว่าและมีการจัดระเบียบที่ดีกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน และอาจรวมถึงแก๊สที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนอาจมีส่วนช่วยในการ Treatment หรือทำให้ผิวด้านหน้าของคาร์บอนมีความสมบูรณ์ในการเกิดท่อคาร์บอน ดังนั้นการดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ทำได้ดีกว่ารวมทั้งการคืนสภาพเดิมเมื่อหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ด้วย และด้วยเหตุผลนี้จึงเลือกเซ็นเซอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน (H700-5-10) นำไปใช้ในการทดลองการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ

4.3.3 ผลการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆด้วยเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์

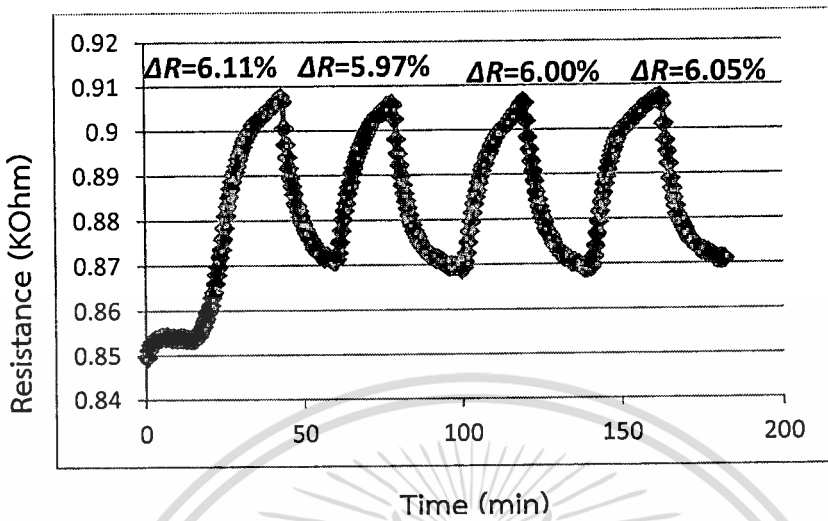
การทดลองการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่มีคุณสมบัติและโครงสร้างภายในที่ต่างกัน การทดลองจะกระทำเช่นเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมา เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเซ็นเซอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อนจากการทดลองที่ 4.3.2 เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของเซ็นเซอร์เมื่อมีการตรวจจับหรือการดูดซับไอแอลกอฮอล์ชนิดที่ต่างกัน โดยการทดลองนี้จะมีแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทดลองด้วยกัน 8 ชนิด ผลการตรวจจับแสดงดังต่อไปนี้

(1) ผลการตรวจจับเอทานอล

ผลจากการทดลองตรวจจับไอของเอทานอลพบว่าสามารถตรวจจับไอของเอทานอลได้ โดยเซ็นเซอร์จะมีการดูดซับหรือตรวจจับได้อย่างรวดเร็วเมื่อโมเลกุลเข้ามาในห้องปฏิกิริยาก่อนที่จะค่อยๆ ทำงานได้ช้าลงเมื่อใกล้จุดอิ่มตัว เมื่อทำการไล่เอทานอลออกเซ็นเซอร์จะมีการคืนสภาพคือการปล่อยไอเอทานอลที่จับอยู่ออกไป แต่ไม่สามารถคืนสภาพได้หมด เมื่อตรวจจับซ้ำเซ็นเซอร์ก็สามารถตรวจจับไอเอทานอลได้อีกครั้ง การตอบสนองขณะอิ่มตัวมีค่าใกล้เคียงกันทุกครั้งที่ทำการตรวจจับ

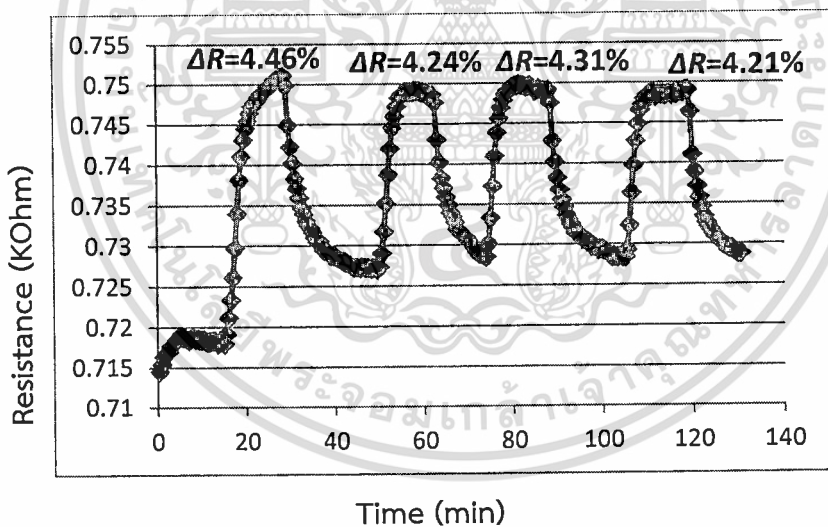
เอกล...
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง 6.11%, 5.97%, 6% และ 6.05% ของการตรวจจับไอเอทานอลตามลำดับดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

(2) ผลการตรวจจับเมทานอล

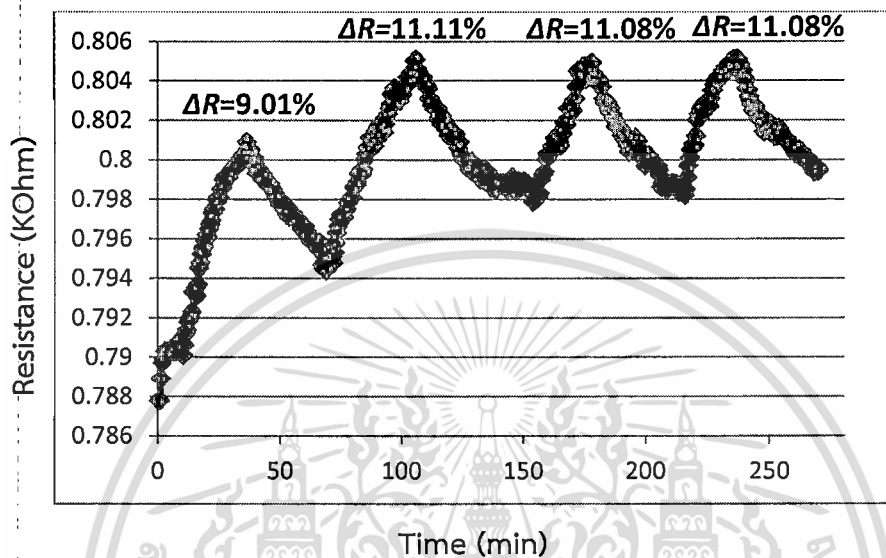


รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเมทานอล

(3) ผลการตรวจจับเบธานอลแอลกอฮอล์

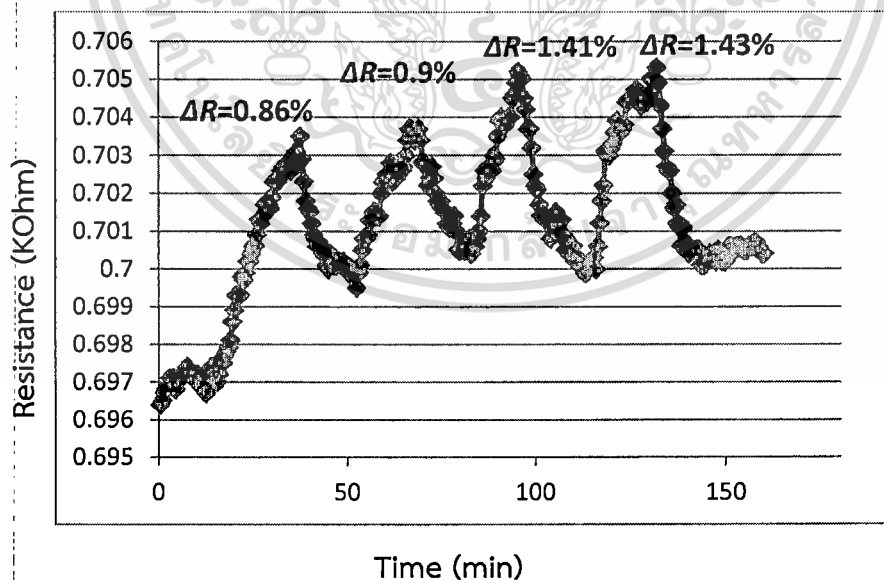
ผลทดลองตรวจจับเบธานอลพบว่าเซ็นเซอร์สามารถตรวจวัดไอระเหยของเบธานอลได้ ลักษณะของกราฟจะคล้ายกับเอทานอลและเมทานอล เพราะเป็นแอลกอฮอล์กลุ่มเดียวกันคือ โครงสร้างภายในจะเรียงต่อกันในแบบอนุกรมทำให้คุณสมบัติจึงคล้ายกับเอทานอลและเมทานอล แต่ การอิมมิดีในการตรวจจับมีการอิมมิดีที่ช้ามากจึงใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 30 นาทีจึงทำการไล่ ไอเบธานอลออกเพื่อทำการทดลองในไซเคิลต่อไป ซึ่งไซเคิลแรกของการตรวจจับมีค่าเปอร์เซ็นต์ที่การค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจจับได้น้อยเพราะได้ทำการตรวจจับครบตามเวลา และเมื่อไล่ไอเบธานอลออก เช่น เซอร์ก็ไม่สามารถไล่ไอเบธานอลออกหมดจึงมีค่า R_{MIN} ค่าหนึ่งทำให้การตรวจจับในไซเคิลถัดไปจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะมีการตรวจจับครั้งใหม่ร่วมกับไอของเบธานอลที่มีการฝังตัวอยู่ก่อนแล้วจึงได้การตอบสนองการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าการตรวจจับของไซเคิลแรก เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ในคือ 9.01%, 11.11%, 11.08% และ 11.08% ตามลำดับของการตรวจวัดเบธานอล แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเบธานอล

(4) ผลการตรวจจับ Tert-batanal

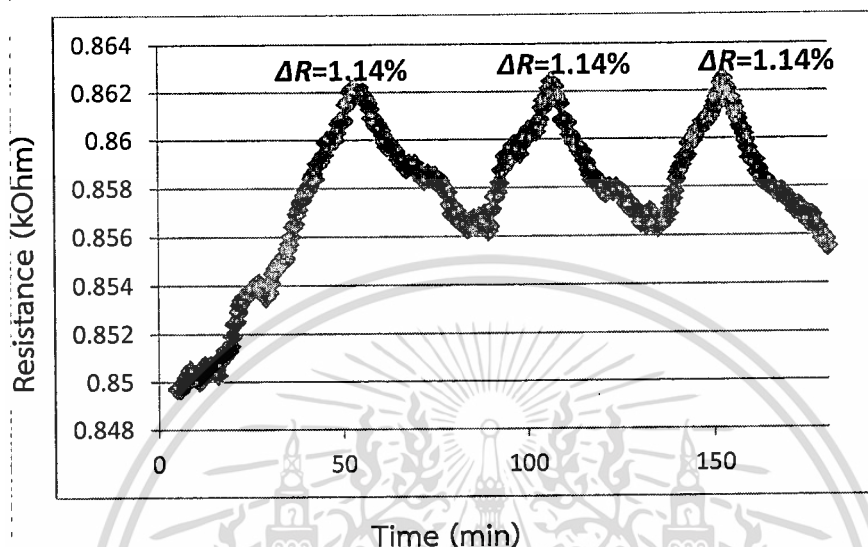


รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของ Tert-batanal

ผลจากการทดลองการตรวจจับ Tert-batanal พบว่าเซ็นเซอร์สามารถตรวจวัดไอระเหยของ Tert-batanal ได้ แต่การดูดซับหรือการตรวจจับจนถึงจุดอิ่มตัวนั้นทำได้ยากและใช้เวลานานจึงใช้หลักการประมาณเวลาในการทดลองการตรวจจับประมาณ 30 นาที ก่อนจะทำการไล่ไอ tert-batanal การคำนวณค่าไม่ว่การณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อจะทำการตรวจวัดซ้ำในไซเคิลที่ 2-4 ผลจากการตรวจจับไป tert-batanal ลักษณะของกราฟที่ได้ คิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการตรวจจับเป็น 0.86%, 0.9%, 1.41% และ 1.43% แสดงในรูปที่ 4.16

(5) ผลการตรวจจับ Sec-betanal



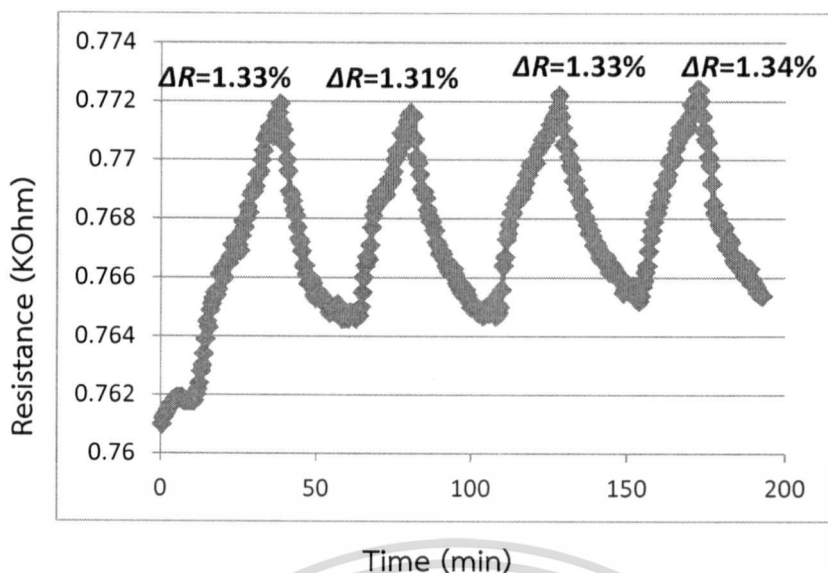
รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของ Sec-betanal

ผลจากการทดลองการตรวจจับไอระเหยของ Sec-betanal เซ็นเซอร์สามารถตรวจจับ Sec-betanal ได้แต่กลับไม่มีการอิ่มตัวหรืออิ่มตัวช้ามาก การทดลองจึงใช้การประมาณเวลาในการตรวจจับ 30 นาที ก่อนการหยุดจ่ายไอของ Sec-betanal เพื่อดูผลการคืนสภาพเดิมของเซ็นเซอร์ ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์ก็สามารถทำงานได้เช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น ผลจากการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้ของแต่ละไซเคิลเป็น 4.46%, 4.24%, 4.31% และ 4.21% ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.17

(6) ผลการตรวจจับ 2-propanal, iso propyl alcohol

ผลการทดลองการตรวจจับ iso propyl alcohol จากรูปที่ 4.18 พบว่าเซ็นเซอร์สามารถตรวจจับไอระเหยของ iso propyl alcohol ลักษณะของกราฟจะคล้ายๆกับเอทานอลและเมทานอล เพราะเป็นแอลกอฮอล์กลุ่มเดียวกัน คือ โครงสร้างภายในจะเรียงต่อกันในแนวนอนทำให้คุณสมบัติจึงคล้ายกับเอทานอลและเมทานอล แต่มีการอิ่มตัวที่ช้ากว่าเอทานอลและเมทานอล การทดลองจึงใช้การประมาณเวลาในการตรวจจับ 30 นาทีจึงหยุดการจ่ายไอ iso propyl alcohol ผลจากการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่เซ็นเซอร์ตรวจจับได้อยู่ในช่วง 1.33%, 1.31%, 1.33% และ 1.34% ตามลำดับ

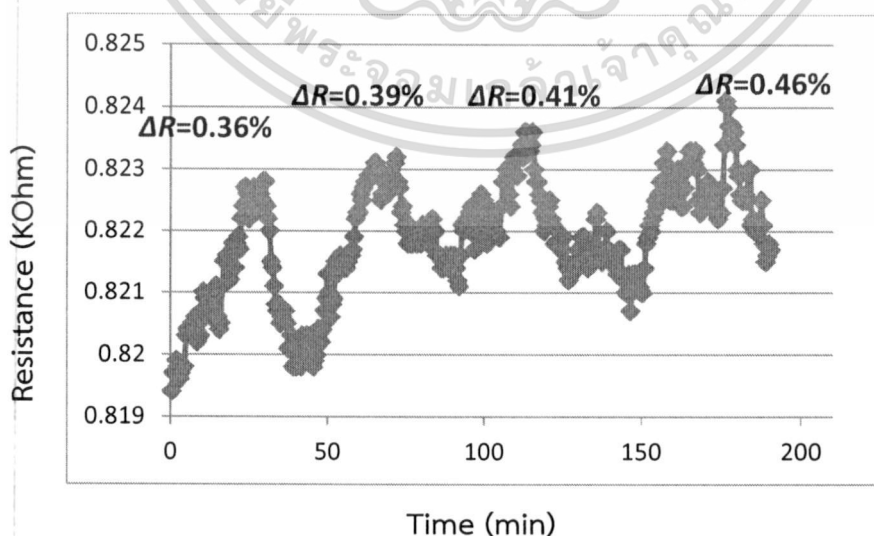
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของ iso propyl alcohol

(7) ผลการตรวจจับเอมมิลแอลกอฮอล์

ผลจากการทดลองตรวจจับเอมมิลแอลกอฮอล์พบว่าเซ็นเซอร์สามารถตรวจวัดไอระเหยของ Amyl alcohol ได้แต่จากรูปจะเห็นได้ว่าการทำงานของคาร์บอนจะไม่มีประสิทธิภาพมากนักเมื่อเทียบกับการวัดเอทานอลหรือเมทานอล แต่กราฟก็ยังคงเป็นรูปของไซเคิลที่มีแนวโน้มว่าสามารถทำงานเป็นเซ็นเซอร์ได้ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 0.36%, 0.39%, 0.41% และ 0.46% ของการตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 4.19

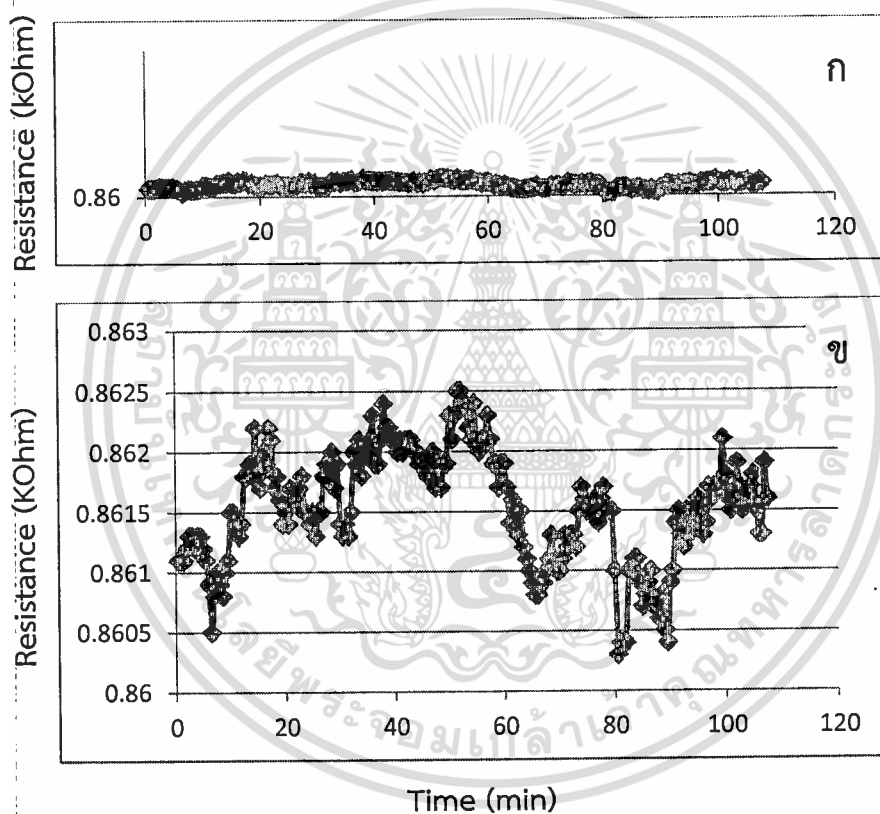


รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยเอมมิลแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(8) ผลการตรวจจับ Cyclohexanal

ผลจากการทดลองการตรวจจับไอโซโคเลเฮกซานอล พบว่าเซ็นเซอร์ไม่สามารถตรวจจับไอระเหยของไซโคเลเฮกซานอลได้เหมือนกับการทดลองข้างต้น จากรูปที่ 4.20(ก) เซ็นเซอร์คาร์บอนมีการตรวจจับแบบไม่เสถียรภาพเหมือนว่ามีการจับแล้วปล่อยไอโซโคเลเฮกซานอลเข้าไปอย่างรวดเร็ว จึงไม่ปรากฏการดูดซับเป็นแบบไซเคิล เมื่อทำการขยายกราฟดังรูปที่ 4.20(ข) เห็นได้ชัดว่าเซ็นเซอร์มีการตรวจจับในแบบที่ไม่เสถียร จากการตรวจจับที่ไม่เสถียรนี้มาจากโครงสร้างภายในโมเลกุลของไซโคเลเฮกซานอล ที่มีการจับตัวแบบโรรมาติกซึ่งการจับตัวของโมเลกุลในลักษณะนี้จะไม่ทำปฏิกิริยาหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนน้อยเพราะเป็นโครงสร้างที่มีความสมบูรณ์ในการจับตัวกันเป็นโมเลกุล



รูปที่ 4.20 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของไซโคเลเฮกซานอล (ก) เป็นการตรวจจับไอไซโคเลเฮกซานอลปกติ (ข)เป็นการขยายสเกลของการตรวจจับไซโคเลเฮกซานอล

สรุปผลการทดลองการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ

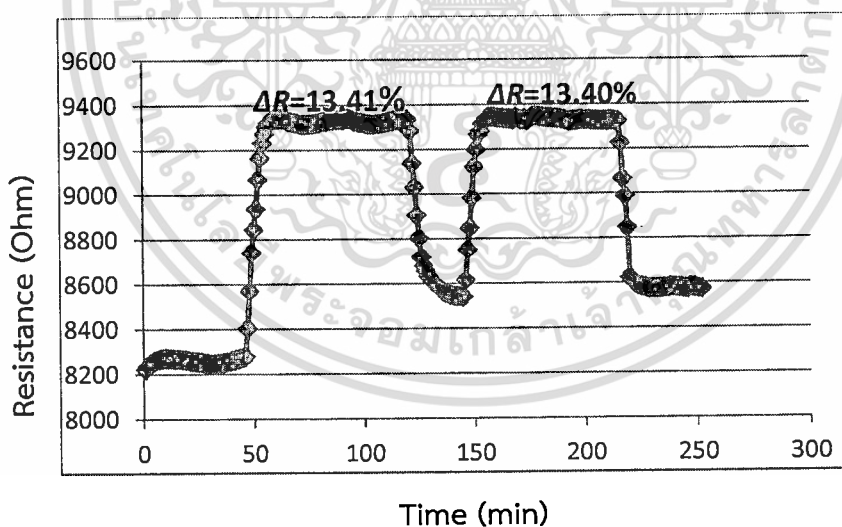
ผลจากการทดลองการวัดไอระเหยของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆพบว่า เซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถตรวจจับไอแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่ได้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างหรือพันธะของแอลกอฮอล์ตัวนั้นๆ โครงสร้างที่ง่ายเช่น methyl alcohol, ethyl alcohol, n-propyl alcohol สามารถที่จะแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ง่ายเพราะเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน เหมือนกับ sec-
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

betanal alcohol, tert-batanal alcohol, Bethanal alcohol, Amyl alcohol ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อน การแลกเปลี่ยนจึงเกิดได้ยาก ส่วน cyclohexanal alcohol โครงสร้างจะต่างไปจากแอลกอฮอล์ทุกชนิด โครงสร้างจะอยู่ในรูปวงแหวนและมีความเสถียรภาพในตัวเองสูงมาก คาร์บอนนาโนทิวบ์จึงไม่สามารถตรวจได้หรือตรวจจับได้น้อยหรือไม่สามารถตรวจจับได้ซึ่งดูได้จากรูปที่ 4.20

4.3.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์

(1) ผลการตรวจวัดไธระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้อง 25°C

การทดลองเริ่มจากปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber เพื่อไล่อากาศประมาณ 50 นาที จะสังเกตเห็นว่าช่วงนี้ค่าความต้านทานมีค่าคงที่ ค่าความต้านทานนี้จะเป็นค่าความต้านทานเริ่มต้นของการทดลอง R_{MIN} หลังจากนั้นจะเริ่มรอบการวัดโดยปล่อยให้ไธระเหยแอลกอฮอล์เข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber จะสังเกตค่าความต้านทานจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นและอิมิตัวที่ค่า R_{MAX} จากนั้นก็จะหยุดจ่ายไธระเหยของแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาเพื่อไล่อากาศในห้องปฏิบัติการออกไป ซึ่งค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะลดลงเข้าสู่ R_{MIN} อีกครั้งเรียกว่าหนึ่งรอบการวัด และจะเริ่มการวัดในรอบต่อไปในลักษณะเดิม ผลจากการทดลองตรวจวัดเมื่อเซนเซอร์อิมิตัวได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็น 13.41% และ 13.40% แสดงดังรูปที่ 4.21

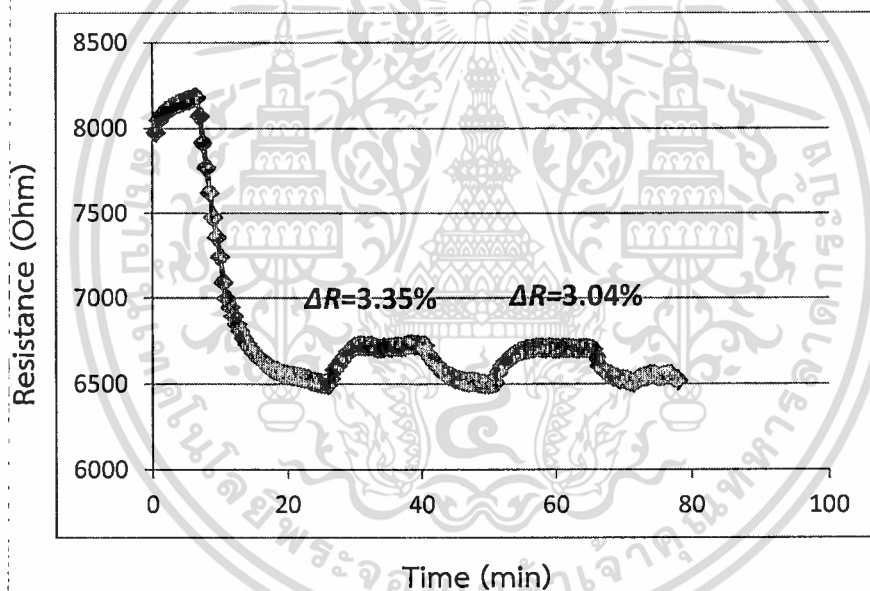


รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ 25°C

(2) ผลการตรวจวัดไธระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 85°C

จากรูปที่ 4.22 การทดลองเริ่มจากปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber เพื่อไล่อากาศประมาณ 10 นาที จะสังเกตเห็นว่าช่วงนี้ค่าความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่ค่าอิมิตัวค่าหนึ่ง หลังจากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 85 °C ค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะลดลงเข้าสู่ค่าอิมิตัวค่าเดิม อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเพิ่มขึ้นและอิมิตัวที่ค่า R_{MAX} จากนั้นก็จะหยุดจ่ายไธระเหยของแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาเพื่อไล่อากาศในห้องปฏิบัติการออกไป ซึ่งค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะลดลงเข้าสู่ R_{MIN} อีกครั้งเรียกว่าหนึ่งรอบการวัด และจะเริ่มการวัดในรอบต่อไปในลักษณะเดิม ผลจากการทดลองตรวจวัดเมื่อเซนเซอร์อิมิตัวได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็น 13.41% และ 13.40% แสดงดังรูปที่ 4.21

ทิวบ์จะเริ่มลดลงซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารประเภทสารกึ่งตัวนำที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งจะตรงข้ามกับโลหะแสดงว่าฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้แสดงคุณสมบัติไปทางสารกึ่งตัวนำมากกว่าโลหะ ค่าความต้านทานจะลดลงและเริ่มอิมิตัวซึ่งเราจะให้ค่าต่ำสุดเริ่มต้นเป็น R_{MIN} หลังจากนั้นจะเริ่มรอบการวัดโดยปล่อยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber จะสังเกตค่าความต้านทานจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นและอิมิตัวที่ค่า R_{MAX} จากนั้นก็จะหยุดจ่ายไอระเหยของแอลกอฮอล์และปล่อยให้แก๊สไนโตรเจนเข้ามาเพื่อไล่อากาศในห้องปฏิบัติการออกไป ซึ่งค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะลดลงเข้าสู่ R_{MIN} อีกครั้งเรียกว่าหนึ่งรอบการวัด และจะเริ่มการวัดในรอบต่อไป ในลักษณะเดิม ผลจากการทดลองแสดงค่าความต้านทานของคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อไอระเหยแอลกอฮอล์กับเวลาจากการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 3.35% และ 3.04% ในรอบการวัดที่หนึ่งและสองตามลำดับ ค่าของ R_{MIN} ที่ได้จากการทดลองก็กลับมาค่าเดิม



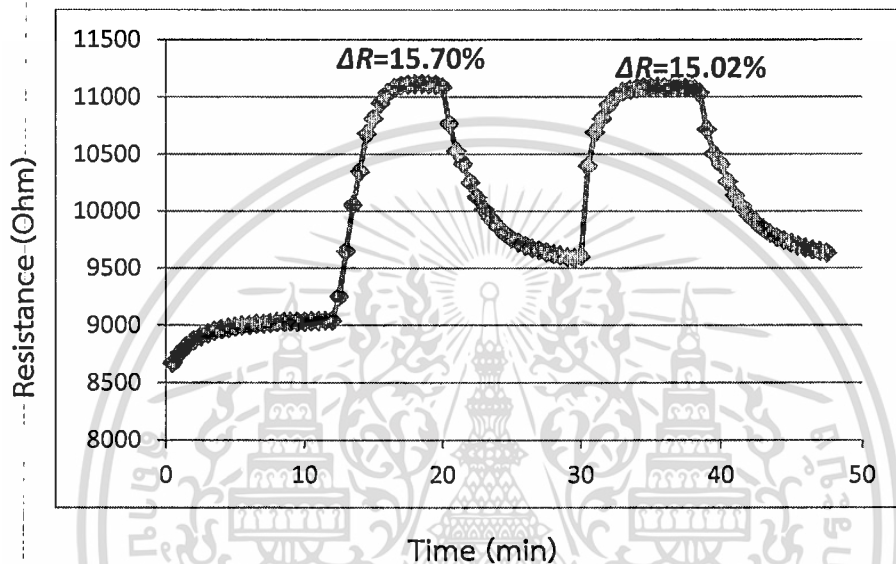
รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ 85°C

(3) ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ -5 °C

ทำการทดลองในทำนองเดียวกับหัวข้อ 4.4.2 โดยเปลี่ยนค่าอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber เป็น -5°C ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 ในช่วงประมาณ 12 นาทีแรกเป็นช่วงที่ให้แก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ -5 °C หลังจากนั้นเริ่มรอบการวัดโดยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไป ค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีค่ามากขึ้นเข้าสู่ค่าอิมิตัวสูงสุด R_{MAX} ต่อไปหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์และปล่อยให้แก๊สไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ ช่วงนี้ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าอิมิตัว ให้ค่าต่ำสุดของรอบการวัดนี้เป็น R_{MIN} และทำการเริ่มวัดรอบการวัดต่อไปอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 15.70 % และ 15.02 % ในรอบการวัดที่หนึ่งและที่สองตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 4.3(1) พบว่าที่อุณหภูมิแวดล้อมต่ำ (-5°C) แอลกอฮอล์ถูกดูดซับได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง (85°C) สังเกตจากค่า $\Delta R\%$ เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของคาร์บอน เมื่อตัวของคาร์บอนมีอุณหภูมิที่ต่ำคาร์บอนจะสามารถดูดซับไอระเหยของแอลกอฮอล์ได้ดีกว่าตอนที่ตัวของคาร์บอนมีอุณหภูมิที่สูง ดังนั้นเมื่อคาร์บอนสามารถดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ได้ดีหรือมากกว่า การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานจึงมีมากกว่าการทดลองที่อุณหภูมิสูง

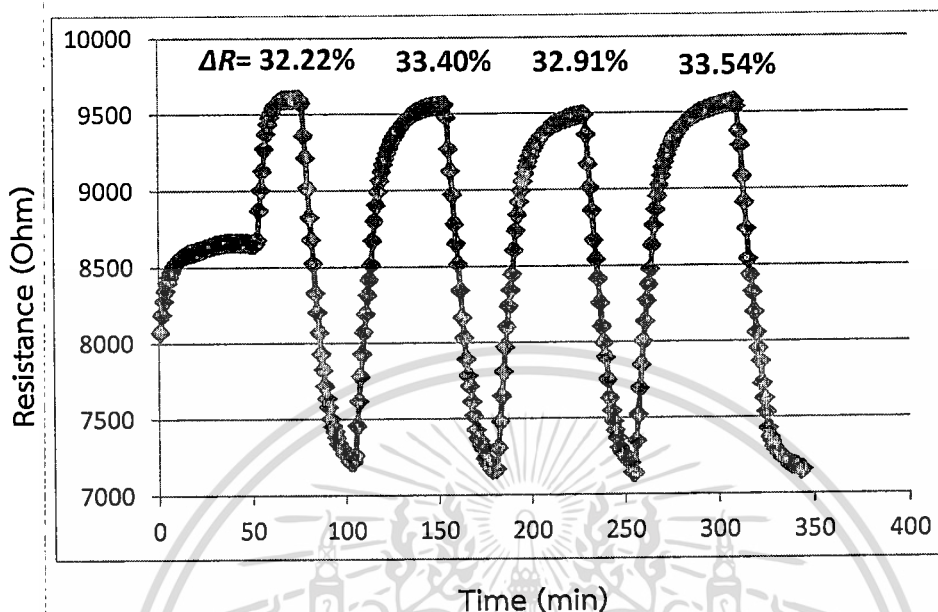


รูปที่ 4.23 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวกับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ -5°C

(4) ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ 25°C และมีการให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืนสภาพหลังการดูดซับแอลกอฮอล์

ในการทดลองตอนนี้จะทำการทดลองคล้ายกับตอนที่ 4.4.2 และ 4.4.3 แต่ให้อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber อยู่ที่อุณหภูมิห้อง 25°C และเพิ่มขึ้นตอนการให้ความร้อนแก่เซ็นเซอร์เฉพาะในครึ่งหลังของรอบการวัดในขณะที่หยุดการให้ไอระเหยแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ การให้ความร้อนถูกควบคุมจากหลอดความร้อนด้านล่างที่ยึดเซ็นเซอร์ในห้องปฏิบัติการโดยให้แหล่งจ่ายพลังงานภายนอกแก่หลอด ในการทดลองนี้ความร้อนที่มีค่าอุณหภูมิประมาณ 85°C ผลการทดลองที่ได้แสดงได้ในรูปที่ 4.24 จากผลการทดลองเมื่อคาร์บอนมีการดูดซับแอลกอฮอล์ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 32.22% 33.40 %, 32.91% และ 33.54 % ในรอบการวัดหนึ่งถึงสี่ตามลำดับ จะเห็นว่าการให้ความร้อนช่วยไล่ความชื้นในช่วงการคืนสภาพจะทำให้คาร์บอนสามารถมีพื้นที่ในการดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ได้มากขึ้นและส่งผลให้ค่าความไวของอุปกรณ์ (Sensitivity) ในการทดลองมีค่าสูงขึ้นด้วย และจากการทดลองเมื่อใช้ความร้อนช่วยไล่แอลกอฮอล์เป็นเอกสารทศวรรษวิสาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นในการคืนสภาพให้หมดไปแล้วยังทำให้คาร์บอนสามารถดูดซับไประเหยแอลกอฮอล์ได้มากขึ้นด้วย



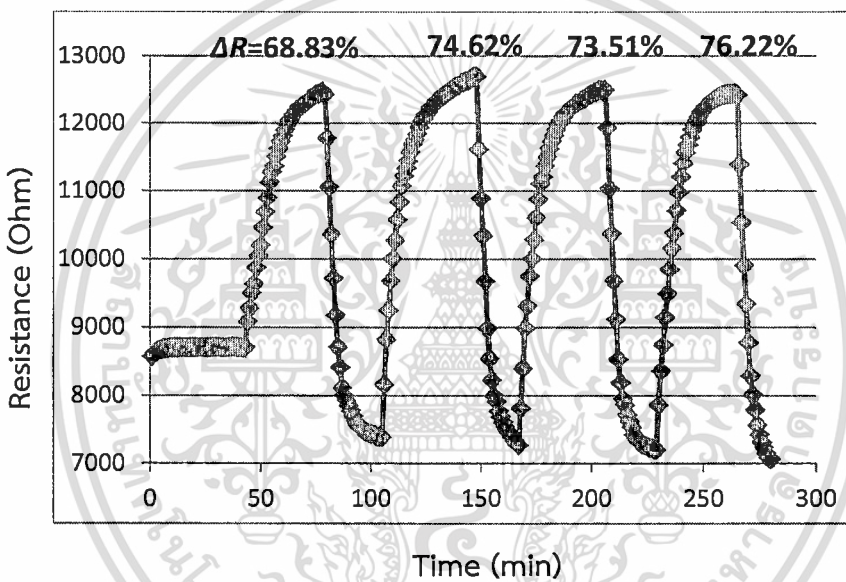
รูปที่ 4.24 ผลการตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิกิริยา Chamber 25°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวป์ในการคืนสภาพความต้านทาน

(5) ผลการตรวจวัดไอรระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิกิริยา -5°C และมีการให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ในการคืนสภาพหลังการดูดซับแอลกอฮอล์

การทดลองตอนนี้จะมีการทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 4.4.2 และ 4.4.3 คือให้อุณหภูมิแวดล้อมห้องปฏิกิริยาเป็น -5°C และให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่อุณหภูมิ 85°C เฉพาะในครึ่งหลังของรอบการวัดในขณะที่หยุดการให้ไอรระเหยแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิกิริยา ความเย็นจะช่วยให้การดูดซับแอลกอฮอล์ดีขึ้นและความร้อนจากหลอดความร้อนที่ให้กับเซ็นเซอร์จะช่วยให้ไอรระเหยแอลกอฮอล์ที่ถูกดูดซับระเหยออกได้มากขึ้นเพื่อช่วยในการคืนสภาพได้เร็วขึ้นและทำให้ผลต่างระหว่าง R_{MAX} และ R_{MIN} มีค่าเพิ่มมากขึ้น ผลการทดลองจากรูปที่ 4.25 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่าเท่ากับ 68.83%, 74.62%, 73.51% และ 76.22% ของรอบการวัดที่หนึ่งถึงสี่ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเย็นจะช่วยให้คาร์บอนสามารถดูดซับไอแอลกอฮอล์ได้ดีขึ้น และความร้อนที่ใช้จะช่วยให้ไอแอลกอฮอล์ที่ติดอยู่กับคาร์บอนหลุดไปเมื่อต้องการการวัดซ้ำ เมื่อนำความร้อนและความเย็นมาประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมจะทำให้การทำงานของเซ็นเซอร์คาร์บอนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดการทดลองตอนนี้จะมีการทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 4.4.2 และ 4.4.3 คือให้อุณหภูมิแวดล้อมห้องปฏิกิริยาเป็น -5°C และให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่อุณหภูมิ 85°C เฉพาะในครึ่งหลังของรอบการวัดในขณะที่หยุดการ

เอกลสารเป็นเอกลสารที่หลงวันเวลาทิวป์ขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ช้เห็นใบใช้ประโยชน์ตามการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ไอระเหยแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ ความเย็นจะช่วยให้การดูดซับแอลกอฮอล์ดีขึ้นและความร้อนจากหลอดความร้อนที่ให้กับเซ็นเซอร์จะช่วยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ถูกดูดซับระเหยออกได้มากขึ้นเพื่อช่วยในการคืนสภาพได้เร็วขึ้นและทำให้ผลต่างระหว่าง R_{MAX} และ R_{MIN} มีค่าเพิ่มมากขึ้น ผลการทดลองจากรูปที่ 4.25 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่าเท่ากับ 68.83%, 74.62%, 73.51 % และ 76.22% ของรอบการวัดที่หนึ่งถึงสี่ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเย็นจะช่วยให้คาร์บอนสามารถดูดซับไอแอลกอฮอล์ได้ดีขึ้น และความร้อนที่ใช้จะช่วยไล่ไอแอลกอฮอล์ที่ติดอยู่กับคาร์บอนหลุดไปเมื่อต้องการการวัดซ้ำ เมื่อนำความร้อนและความเย็นมาประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมจะทำให้การทำงานของเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber -5°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืนสภาพความต้านทาน

สรุปผลของอุณหภูมิที่มีต่อการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซ็นเซอร์

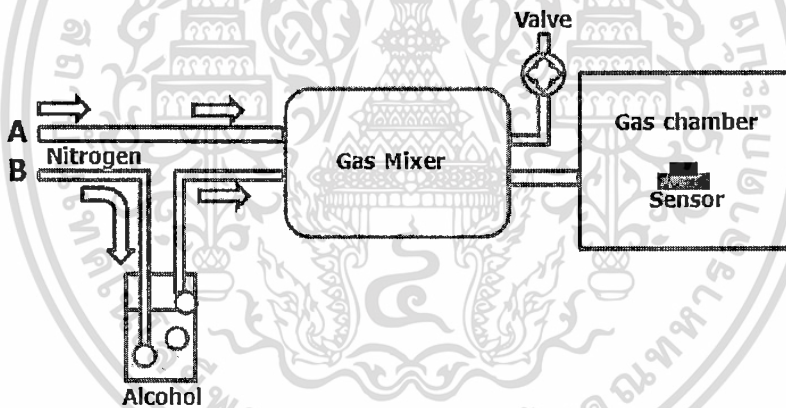
จากการทดลองข้างต้นคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้สามารถทำการตรวจจับหรือการดูดซับไอแอลกอฮอล์ได้ดีเมื่อตัวของคาร์บอนอยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ (รูปที่ 4.23) แต่คาร์บอนมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ได้น้อยเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง (รูปที่ 4.22) ซึ่งตรงกับคุณสมบัติของคาร์บอนที่จะมีการดูดซับแก๊สได้ดีเมื่อคาร์บอนอยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ อีกประการหนึ่งคือที่อุณหภูมิสูง ความร้อนจะเป็นตัวไล่ไอแอลกอฮอล์ที่ผิวของคาร์บอนทำให้คาร์บอนดักจับไอแอลกอฮอล์ได้น้อยหรือมีการจับแล้วปล่อยอย่างรวดเร็วทำให้ผลที่ได้มีค่าน้อยกว่าการตรวจจับที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งถ้านำอุณหภูมิทั้งสองส่วนมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับแอลกอฮอล์ของเซ็นเซอร์จะทำให้เซ็นเซอร์มีการ

เอกลักษณะเฉพาะ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานได้ดีขึ้น คือมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิต่ำแล้วใช้ความร้อนช่วยไล่อัลกอฮอล์ให้คืนสภาพเดิมก่อนการทดลองหรือการใช้งานซ้ำ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังรูปที่ 4.25

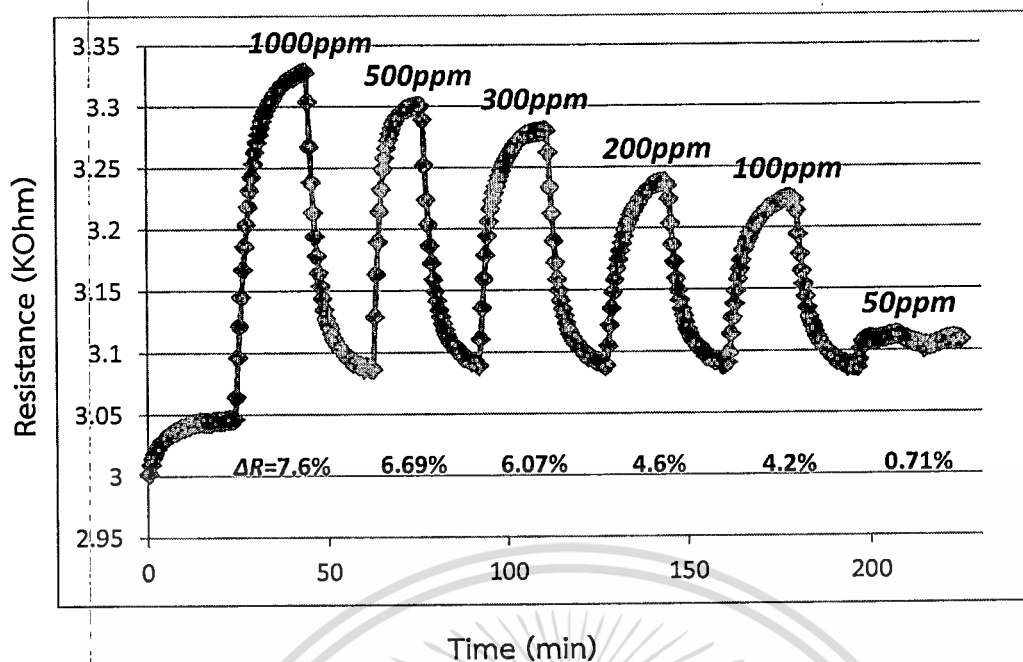
4.3.5 ความสามารถของเซ็นเซอร์ที่สามารถตรวจจับแอลกอฮอล์ได้

การทดลองนี้เป็นการทดลองตรวจวัดไอแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เพื่อตรวจสอบหาจุดต่ำสุดการทำงานของเซ็นเซอร์ที่จะสามารถตรวจจับไอแอลกอฮอล์ได้ การทดลองใช้ระบบการวัดดังรูปที่ 4.8 แต่จะเพิ่มขั้นตอนการผสมความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทดลองซึ่งการทดลองเป็นแบบ Control Volume คือการผสมระหว่างแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์กับไอแอลกอฮอล์ก่อนการวัดเพื่อให้ได้อัตราส่วนตามความเข้มข้นที่จะทำการวัด (part per million : ppm) จากรูปที่ 4.26 แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ (A) จะผสมกับแก๊สไนโตรเจนที่นำพาไอแอลกอฮอล์ (B) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมตามความเข้มข้นที่จะทำการทดลองวัดแบบ ppm แก๊สทั้งสองส่วนจะผสมกันในห้อง Gas Mixer แก๊สที่ผสมแล้วจะมีการปล่อยออกบางส่วนเพื่อควบคุมให้แก๊สที่เข้าไปใน Gas Chamber 200 cc/min ตามระบบการวัด จากนั้นเซ็นเซอร์จึงทำการตรวจวัดหรือตรวจจับไอแอลกอฮอล์และแสดงผลการตรวจจับ



รูปที่ 4.26 ภาพแสดงระบบการวัดความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ (part per million : ppm)

จากรูปที่ 4.27 ผลจากการทดลองการตรวจจับไอแอลกอฮอล์พบว่าที่ระดับแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้น 1000ppm เซ็นเซอร์จะมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ได้ดี มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง 7.6% แต่เมื่อมีระดับความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่เจือจางลง (ไซเคิลที่ 2-4) เซ็นเซอร์จะมีการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ได้น้อยลง ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้ก็น้อยลงตามไปด้วยคือ 6.69%, 6.07%, 4.6%, และ 4.2% ตามลำดับ และเมื่อไอแอลกอฮอล์มีความเข้มข้นในระดับ 50ppm เซ็นเซอร์ไม่สามารถทำการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ได้หรือมีการตรวจจับได้น้อย (ไซเคิลที่ 5) ซึ่งสรุปได้ว่าเซ็นเซอร์ที่สังเคราะห์ได้สามารถทำการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นต่ำสุดที่ระดับ 50ppm ซึ่งเป็นขอบเขตต่ำสุดที่เซ็นเซอร์สามารถทำงานได้



รูปที่ 4.27 ความสามารถของเซ็นเซอร์ที่ตรวจจับแอลกอฮอล์ได้ (part per million : ppm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการทดลอง การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งแบบการตกตะกอน ไอเคมีแบบเตาความร้อนและแบบขดลวดความร้อน รวมถึงการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ และผลการทดลองการตรวจจับแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ รวมไปถึงผลการทดลองสภาพแวดล้อมของอุณหภูมิต่างๆ เมื่อนำเซ็นเซอร์ไปใช้งาน ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

(1) ผลจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งสองแบบ ผลที่ได้จะมีความแตกต่างกันในลักษณะของท่อคาร์บอน โดยการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อนท่อคาร์บอนที่ได้จะมีการยึดตัวตรงกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน รวมไปถึงการกระจายตัวของท่อคาร์บอนที่มีการกระจายตัวได้สม่ำเสมอ เพราะมีการเกาะกลุ่มหรือการขดตัวเป็นกระจุกที่น้อยกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน ขนาดของท่อคาร์บอนที่ได้โดยภาพรวม ท่อคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อนจะมีขนาดที่โตกว่าแบบขดลวดความร้อน แต่ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งสองแบบนี้จะมีการเกิดท่อคาร์บอนที่เหมือนกันทั้ง 2 แบบคือการเกิดแบบ Tip growth โดยมีโลหะคะตะลิสต์เกาะอยู่ตรงส่วนปลายของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้

(2) ผลการทดลองการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์มาเป็นเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ จากการเปรียบเทียบการทำงานในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ระหว่างเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อนกับเซ็นเซอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน พบว่าเซ็นเซอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที และอัตราการไหลของแก๊สนำพาสารแหล่งจ่านคาร์บอน 10 ซีซี/นาที นั้นจะมีการดูดซับหรือตรวจจับไอระเหยของเมทานอลและเอทานอลได้ดีกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน เนื่องจากในการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในการแตกตัวของสารตั้งต้นในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์มีอุณหภูมิที่สูงกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อนทำให้การแตกตัวของสารตั้งต้นทำได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่ออะตอมคาร์บอนที่แตกตัวเจอกับโลหะคะตะลิสต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำให้การเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์มีเส้นที่ตรงกว่าและมีการจัดระเบียบที่ดีกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน ดังนั้นการดูดซับไอของเมทานอลและเอทานอลจึงทำได้ดีกว่าโดยมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง 4.46%, 6.11% ตามลำดับ รวมทั้งการคืนสภาพเดิมเมื่อหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ก็สามารถกลับคืนได้ดีกว่าด้วย

(3) ผลการทดลองการใช้เซ็นเซอร์การตรวจจับไอแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ พบว่าเซ็นเซอร์สามารถตรวจจับ methyl alcohol, ethyl alcohol, n-propyl alcohol, sec-betanal alcohol, tert-batanal alcohol, Bethanal alcohol, Amyl alcohol, cyclohexanal alcohol ได้ ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงพาณิชย์เท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ขบะเอินตนการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในของแอลกอฮอล์ชนิดนั้นด้วย ซึ่งถ้าเป็นโครงสร้างแบบอนุกรมแบบเอทานอลและเมทานอลจะมีการตรวจจับได้ดีกว่าโครงสร้างของ ไฮโคลเฮกซานอลที่มีโครงสร้างแบบวงแหวนโรมาติก ซึ่งโครงสร้างแบบวงแหวนนั้นจะมีการจับกันภายในโมเลกุลที่สมบูรณ์ เมื่อมาสัมผัสกับคาร์บอนนาโนทิวบ์การดึงอิเล็กตรอนจะเกิดได้ยากกว่าทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการตรวจจับจึงมีค่าน้อยหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง

(4) ผลการทดลองการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ที่สภาพอุณหภูมิแวดล้อมที่ต่างกัน พบว่า อุณหภูมิสภาพแวดล้อมมีผลต่อความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์และการดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์เป็นอย่างมาก ความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลงและจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ขึ้นแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำมากกว่าคุณสมบัติของตัวนำ อุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถดูดซับแอลกอฮอล์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง ทำให้เซ็นเซอร์มีค่าความไวที่สูง (Sensitivity) ขึ้น เนื่องจากค่าความต้านทานฐานที่ต่ำลง ผลของการให้ความร้อนแก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการช่วยคืนสภาพความต้านทานหลังดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ จะทำช่วยเพิ่มค่าความไวได้สูงขึ้นอีกและมีเวลาการตอบสนองได้เร็วยิ่งขึ้น การทำงานของเซ็นเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีอุณหภูมิแวดล้อมต่ำที่ -5°C และให้ความร้อนในการคืนสภาพที่ 85°C ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเพิ่มจาก 6.11% เป็น 76.22%

(5) ความสามารถของเซ็นเซอร์ที่สังเคราะห์ได้ สามารถตรวจจับหรือมีระดับการทำงานต่ำสุดที่ 50ppm ซึ่งเป็นความสามารถต่ำสุดที่เซ็นเซอร์จะทำงานได้ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบในการนำเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ไปใช้งาน

จากการทดลองเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์ ได้นำเสนอข้อมูลจากการทดลองข้างต้นซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อให้ได้เซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ที่มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Li, “Carbon nanotubes applications: chemical and physical sensors” in Carbon Nanotubes: Science and Applications, M. Meyyappan, Ed., CRC Press, Boca Raton, Fla, USA
- [2] Z. M. Rittersma, “Recent achievements in miniaturized humidity sensors-a Review of transduction techniques” Sensors and Actuators A, vol. 96, no. 2-3, pp. 196–210, 2002
- [3] R. Fenner and E. Zdankiewicz “Micromachined water vapor sensors: a review of Sensing technologies” IEEE Sensors Journal, vol. 1, no. 4, pp. 309–317, 2001
- [4] E. Traversa “Ceramic sensors for humidity detection: the state-of-the-art and Future developments” Sensors and Actuators B, vol. 23, no. 2-3, pp. 135–156, 1995.
- [5] S. Iijima, “Helical microtubules of graphitic carbon” Nature, vol. 354, no. 6348, pp. 56–58, 1991
- [6] M. Meyyappan, Carbon Nanotubes: Science and Applications, CRC Press, Boca Raton, Fla, USA.
- [7] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and P. C. Eklund, Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes, Academic Press, New York, NY, USA, 1996
- [8] R. Saito, M. Fujita, G. Dresselhaus, and M. S. Dresselhaus “Electronic structure of Chiral graphene tubules” Applied Physics Letters, vol. 60, no. 18, pp. 2204–2206, 1992.
- [9] M. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and P. Avouris, Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications, Springer, Berlin, Germany, 2001
- [10] N. Sinha, J. Ma, and J. T. W. Yeow, “Carbon nanotube-based sensors” Journal Of Nanoscience and Nanotechnology, vol. 6, no. 3, pp. 573–590, 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] J. Li and H. T. Ng, “Carbon nanotubes sensors” in Encyclopedia of Nanoscience And Nanotechnology, vol. 1, pp. 591–601, Marcel Dekker, New York, NY, USA, 2004.
- [12] พิศิษฐ์ สิงห์ใจ. “ท่อนาโนคาร์บอนเทคโนโลยีแห่งศตวรรษที่ 21” Industrial Technology Review (เมษายน 2543): 98-100
- [13] W.S.M. Bride, “Synthesis of Carbon Nanotubes by Chemical Vapor Deposition (CVD)” Williamsburg, Virginia, (April 2001)
- [14] “Nanotubes basics” [Online]. Available http://ipewww.epf.ch/gr_buttet/Manips/Nanotubes (17 August 2005)
- [15] “WHAT'S ALL THE FUSS ABOUT DIAMONDS?” [Online] Available http://www.gemnation.com/base?processor=getPage&pageName=fuss_about_diamonds (15 October 2005)
- [16] “The Role of Natural Graphite in Electronics Cooling” [Online]. Available http://www.electronics-cooling.com/html/2001_august_techbrief.html (10 July 2005).
- [17] Sumio Iijima, “Helical microtubules of graphitic carbon” *Nature*, 354: pp.56-58, (1991)
- [18] M. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P. Eklund, R. Saito “Carbon Nanotubes” *Physics World* pp33-38, (1999)
- [19] “Carbon nanotube” [Online]. Available <http://www.nanotech-now.com/nanotube-buckyball-sites.htm>(14 October 2005)
- [20] B.Y. Xia, P.Y.Y. Sun, Y. Wu, B. Mayers, B. Gates, Y. Yin, F. Kim, H. Yan, “One-Dimensional Nanostructures: Synthesis, Characterization, and Applications” *Advances Materials*, 15: 353-389, (2003)
- [21] C.N. Rao, B.C. Satishkumar, A. Govindaraj, Manashi Nath, “Nanotubes” *CHEM.PHYS.CHEM*, 2: 78-105, (2001)

- [22] สุภาพร ดาวทอง “การหาลักษณะเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์โดยกระบวนการตกตะกอนไอสารเคมี” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2548
- [23] M. Daenen, R.D. de Fouw, B. Hamers, P.G.A. Janssen, K. Schouteden, M.A.J. Veld, “The Wondrous World of Carbon Nanotubes” Eindhoven University of Technology (2003)
- [24] “ท่อนาโนคาร์บอน” วิกีพีเดีย <http://th.wikipedia.org/wiki>
- [25] “ผลของอุณหภูมิแวดล้อมที่มีต่อการตรวจจับแอลกอฮอล์ของเซนเซอร์แบบคาร์บอนนาโนทิวป์” อัสสุชล แสงนวล, ชลินทร์ สุทธิเนตร, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 EL032 pp131-134
- [26] “Investigation on Temperature Effect on Alcohol Sensing of Multi-Walled Carbon Nanotube” Toempong Phetchakul, Assuchol Sangnual and Chalin Sutthinet IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems February 20-23, 2011, Kaohsiung, Taiwan pp.363-366
- [27] “Alcohol Sensor Based on Multi-Wall Carbon Nanotube” Chalin Sutthinet Assuchol Sangnual, Toempong Phetchakul IEE Internationa Symposium on Integrated Circuits (ISIC) 2009, Singapore pp.321-323
- [28] J. Weber, A. Kumar, A. Kumar, and S. Bhansali, “Novel lactate and pH biosensor For skin and sweat analysis based on single walled carbon nanotubes” Sens. Actuators B, vol. 117, pp.308-313, 2006
- [29] J. Suchiro, H. Imakiire, S. Hidaka, W. Ding, G. Zhou, K. Imasaka and M. Hava, “Shottky-type response of carbon nanotube NO₂ gas sensor fabricated onto Aluminum electrodes by dielectrophoresis” Sens. Actuators B, vol. 114, pp. 943-949, 2006
- [30] C. S. Huany, B. R. Huang, Y. H. Jang, M.S. Tsai, and C.Y. Yeh, “Three-terminal CNTs gas sensor for N₂ detection” Diamond Relat. Mater, vol. 14, pp. 1872-1875, 2005
- [31] “Carbon nanotube bumps for thermal and electric conduction in Transistor” Taisuke Iwai, Yuji Awano (Manuscript received April 9, 2007)

- [32] P.M. Ajayan, “Application of Carbon Nanotubes” Applied Physics, 80: 391-425 (2001)
- [33] “Exploring Carbon Nanotube Bundle Global Interconnects for Chip Multiprocessor Applications” Sudeep Pasricha, Nikil Dutt, Fadi J. Kurdahi, 2009 22nd International Conference on VLSI Design
- [34] “Applications of Carbon Nanotubes” Pulickel M. Ajayan and Otto Z. Zhou, Topics Appl. Phys. 80, pp.391–425 (2001), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001
- [35] “Aprototype five-inch carbon nanotube” [Online]. Available <http://www.npl.co.uk/annualreview/2001/page09-seeing-the-future-part1.html> (24 May 2004).
- [36] “Carbon Nanotubes” [Online]. Available <http://www.ipt.arc.nasa.gov/carbonsnano.html> (19 August 2005)
- [37] “CNT: Center for Nanotechnology” [Online]. Available <http://www.ipt.arc.nasa.gov/nanopencil.html> (4 December 2005)
- [38] “ผลิตภัณฑ์นาโนเทคโนโลยี” [Online] Available (4 January 2006)
- [39] เซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซที่ใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีท่อคาร์บอนขนาดนาโน (Carbon Nanotube (CNT) based Gas Sensor) สภาวิศวกร http://www.coe.or.th/e_engineers/knc_detail.php?id=83
- [40] “เทคโนโลยีวงจรรวม 2” หน้า 34-36 รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช
- [41] อัสสุชล แสงนวล, ชลินทร์ สุทธิเนตร, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “เครื่อง CVD แบบความร้อนสำหรับคาร์บอนนาโนทิวบ์” ” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 EL032 pp.1149-1152



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก. ความรู้เกี่ยวกับแอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์ (Alcohol)

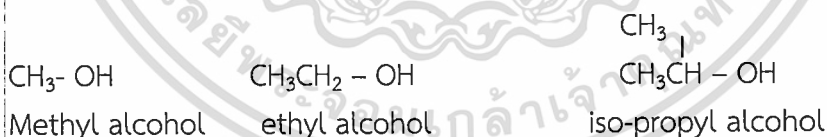
แอลกอฮอล์เป็นสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นหมู่ฟังก์ชัน มีสูตรทั่วไป R - OH การจำแนกประเภทของแอลกอฮอล์

ใช้เกณฑ์การจัดตัวของคาร์บอนอะตอมภายในโมเลกุล แบ่งแอลกอฮอล์ออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. แอลกอฮอล์ปฐมภูมิ (primary alcohol) หมายถึงแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลสร้างพันธะกับคาร์บอนอะตอมปฐมภูมิ เช่น $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$
2. แอลกอฮอล์ทุติยภูมิ (secondary alcohol) หมายถึงแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลสร้างพันธะกับคาร์บอนอะตอมทุติยภูมิ เช่น $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHOH}$
 CH_3 |
3. แอลกอฮอล์ตติยภูมิ (tertiary alcohol) หมายถึงแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลสร้างพันธะกับคาร์บอนอะตอมตติยภูมิ เช่น CH_3
 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHOH}$
 CH_3 |

การเรียกชื่อแอลกอฮอล์

1. ชื่อสามัญ นิยมใช้เรียกแอลกอฮอล์โมเลกุลเล็กมีมวลโมเลกุลน้อย โดยให้เรียกชื่อหมู่แอลคิลก่อนแล้วลงท้ายด้วยคำว่าแอลกอฮอล์ เช่น

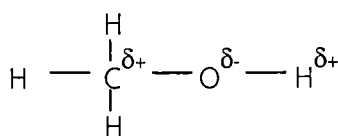


2. ชื่อ IUPAC มีหลักการเรียกดังนี้
 - 2.1 เรียกโซ่คาร์บอนที่ยาวที่สุดและมีหมู่ -OH เกาะอยู่ด้วยเป็นโซ่หลัก
 - 2.2 นับตำแหน่งคาร์บอนอะตอมในโซ่หลัก ให้คาร์บอนที่มีหมู่ -OH เกาะอยู่เป็นตำแหน่งต่ำที่สุด และเรียกเลขตำแหน่งของหมู่ -OH ไว้หน้าชื่อโซ่หลัก
 - 2.3 ให้เรียกเช่นเดียวกับหลักการเรียกชื่อแอลเคนโดยให้ตัด -e ท้ายชื่อแอลเคนออกแล้วเติม -ol แทน
 - 2.4 หมู่แทนที่ให้เรียกโดยใช้หลักเดียวกับการเรียกชื่อแอลเคน คือเรียกเลขตำแหน่งและชื่อหมู่แทนที่ก่อนจึงตามด้วยชื่อของโซ่หลัก
 - 2.5 สำหรับโมเลกุลที่เป็นวงให้ตำแหน่งคาร์บอนอะตอมที่มีหมู่ -OH เกาะอยู่เป็นตำแหน่งที่ 1 เสมอ ดังนั้นในการเรียกชื่อจึงไม่ต้องเรียกเลขตำแหน่งของหมู่ -OH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติทางกายภาพของแอลกอฮอล์

เนื่องจากแอลกอฮอล์ประกอบด้วย C - O - H จึงทำให้แอลกอฮอล์เป็นโมเลกุลมีขั้ว ดังนี้



เมื่ออยู่ในภาวะที่เป็นแอลกอฮอล์สมบูรณ์สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ และสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้เมื่อนำแอลกอฮอล์ไปละลายน้ำ

ตาราง แสดงสมบัติบางประการของแอลกอฮอล์บางชนิด

สูตรโครงสร้าง	ชื่อ IUPAC	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การละลายน้ำ (g/100cm ³)
CH ₃ OH	Methanol	-97.8	65.0	0.7914	α
CH ₃ CH ₂ OH	ethanol	-114.7	78.5	0.7893	α
CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH	1 - propanol	-126.5	94.7	0.8035	α
CH ₃ CHOHCH ₃	2 - propanol	-89.5	82.	0.7855	α
CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	1 - butanol	-89.5	117.3	0.8098	8.0
CH ₃ CH ₂ CHOHCH ₃	2 - butanol	-114.7	99.5	0.8063	12.5
(CH ₃) ₂ CH CH ₂ OH	2 - methyl - 1 -	-	107.9	0.8021	11.1
(CH ₃) ₃ COH	propranol	25.5	82.2	0.7887	α
CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH	2 - methyl - 2 - 1 - pentanol	-79.0	138	0.8144	2.2

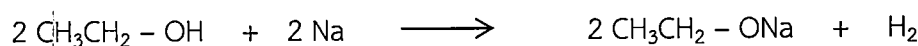
ปฏิกิริยาเคมีของแอลกอฮอล์

1. ปฏิกิริยาการแทนที่

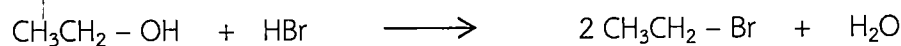
1.1 ปฏิกิริยาแทนที่ด้วยโลหะ

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเหมือนปฏิกิริยาของน้ำ คือโปรตอนของแอลกอฮอล์ถูกดึงด้วยโลหะ เช่น

Na K



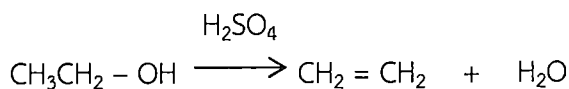
1.2 ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยสารประกอบเฮไลด์ เช่น HCl HBr



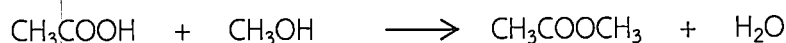
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปฏิกิริยาการกำจัด

แอลกอฮอล์เกิดปฏิกิริยาการกำจัดได้เหมือนแอลคีนและเป็นการกำจัดโมเลกุลของน้ำออกจากแอลกอฮอล์จึงเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ดีไฮเดรชัน (Dehydration)



3. ปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์ (Esterification)

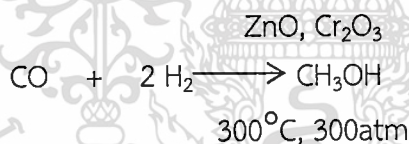


4. ปฏิกิริยาการเผาไหม้

เมทานอล (CH_3OH)

เมทานอลแต่เดิมสังเคราะห์ได้จากการกลั่นไม้ชนิดหนึ่งเรียกว่าไม้แอลกอฮอล์ (wood alcohol) เมื่อไม่มีอากาศอยู่ด้วย ปัจจุบันสังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซ

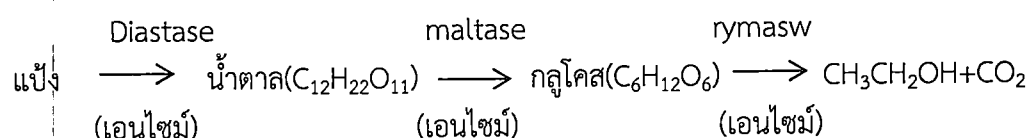
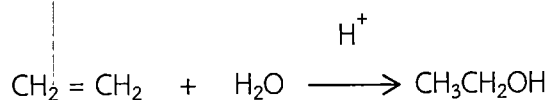
คาร์บอนมอนอกไซด์กับก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูง ภายใต้ความดันและมีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้วย แต่เมทานอลประมาณ 50% ที่ได้ถูกออกซิไดซ์เป็นฟอร์มัลดีไฮด์



เมทานอลส่วนใหญ่จะใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับชะล้างและวานิช ปัจจุบันมีการนำไปผสมกับน้ำมันใช้เติมรถยนต์

เอทานอล ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)

เอทานอลสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการเติมน้ำลงในเอทิลีนโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสังเคราะห์จากกระบวนการหมักแป้งและน้ำตาล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอทานอลที่ได้จากการหมักสารตั้งต้นต่างกันมีชื่อเรียกต่างกัน เช่น

น้ำองุ่น(กลูโคส) → ไวน์
 มันฝรั่ง(แป้ง) → วอดก้า
 ข้าวบาร์เล่ หรือข้าวสอพ → เบียร์

เอทานอลได้จากกระบวนการหมักมีประมาณ 12% เท่านั้น ดังนั้นในการทำวิสกี รัม วอดก้า และอื่น ๆ ซึ่งมีปริมาณแอลกอฮอล์ 40-60% ต้องนำผลผลิตที่ได้จากการหมักทั้งหมดมากลั่น เพื่อเพิ่มปริมาณเอทานอล เอทานอลที่ใช้เป็นตัวทำละลายมักจะเป็น 95% ของเอทานอล และ 5% ของน้ำ

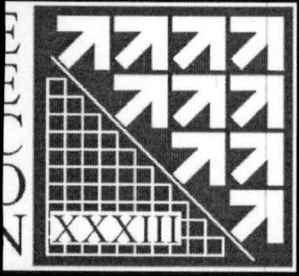


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. อัสสุชล แสงนวล, ชลินทร์ สุทธิเนตร, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “ผลของอุณหภูมิแวดล้อมที่มีต่อการตรวจจับแอลกอฮอล์ของเซนเซอร์แบบคาร์บอนนาโนทิวบ์” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 EL032 pp.1157-1160
2. อัสสุชล แสงนวล, ชลินทร์ สุทธิเนตร, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “เครื่อง CVD แบบความร้อนสำหรับคาร์บอนนาโนทิวบ์” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 EL032 pp.1149-1152
3. Toempong Phetchakul, Assuchol Sangnual and Chalin Sutthinet
“Investigation on Temperature Effect on Alcohol Sensing of Multi-Walled Carbon Nanotube” IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems February 20-23, 2011, pp. 363-366
4. Chalin Sutthinet, Assuchol Sangnual, Toempong Phetchakul “Alcohol Sensor Based on Multi-Wall Carbon Nanotube” International Symposium on Integrated Circuits (ISIC) 2009 pp. 321-323
5. ชลินทร์ สุทธิเนตร, อัสสุชล แสงนวล, ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “เซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับจุ่มก๊อเล็กโทรนิคส์เพื่อการตรวจสอบเบียร์สด” Gordon Research Conferences Current Meetings 2012 pp. 236-245



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๓

33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33)

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- ไฟโตนิกส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)



ร่วมจัดโดย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



111 Years Engineering
Innovation

ผลของอุณหภูมิแวดล้อมที่มีต่อการตรวจจับแอลกอฮอล์ของเซนเซอร์แบบคาร์บอนนาโนทิวป์

Environment Temperature effect on Alcohol detection of CNT sensor

อัสสุชล แสงนวล, ชลินทร์ สุทธิเนตร, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถ.ฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์.0-2739-0643, โทรสาร.0-2739-2384, E-mail: best-kmitl@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิแวดล้อมที่มีต่อการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ และผลการให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ในการไล่ไอระเหยแอลกอฮอล์หลังการตรวจจับแอลกอฮอล์เพื่อการประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์เคมี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (ในการทดลองนี้คือ -5 °C) ช่วยทำให้การตรวจจับแอลกอฮอล์ดีขึ้นมากกว่าที่อุณหภูมิที่สูงกว่า (85 °C) โดยคิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 15.70 % ขณะที่อุณหภูมิที่มากกว่า (85 °C) มีค่า 3.35 % นอกจากนี้การใช้ความร้อนช่วยลดความชื้นที่ฟิล์มยังช่วยให้การกลับคืนค่าความต้านทานทำได้เร็วและทำให้ได้ค่าความต้านทานมีค่าต่ำลงเป็นค่าความต้านทานฐานค่าใหม่ (base line resistance) มีผลทำให้เมื่อนำไปตรวจจับแอลกอฮอล์ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีค่าสูงขึ้น จากการทดลองที่อุณหภูมิแวดล้อม -5 °C และไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 85 °C ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 76.22 % และเวลาการตอบสนองเร็วกว่าที่อุณหภูมิห้อง

คำสำคัญ: แอลกอฮอล์เซนเซอร์, คาร์บอนนาโนทิวป์.

Abstract

This research studied the environment temperature affect to alcohol detecting and heated carbon nanotube film after alcohol detecting for good chemical sensor application. The results showed that at the environment temperature below the room temperature (in this work -5°C), the percent of resistance change is 15.70 % while at the 85°C is 3.35 %. The heating CNT film after alcohol absorption during detecting time reduces the recovery time of the measurement cycle and reduces the minimum resistance as base line resistance cause the increasing sensitivity of ΔR of CNT sensor. The results showed that ΔR reaches to 76.22% at environment temperature -5°C, heating temperature 85°C, and total response time is faster than in the case of room temperature.

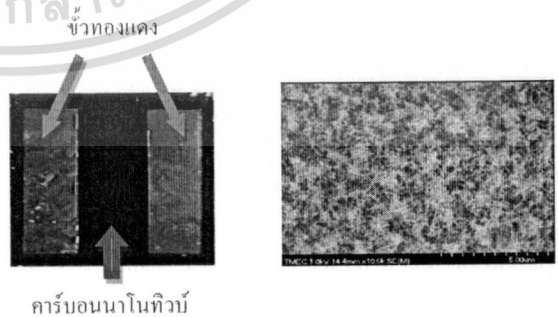
Keywords: Alcohol Sensor, Carbon Nanotubes (CNTs) Films.

1. บทนำ

ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์เป็นวัสดุที่กำลังได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน [1-3] เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ และคุณสมบัติประการหนึ่งคือความนำไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อโมเลกุลของแก๊สหรือไอระเหยมาสัมผัสที่พื้นผิวคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งคุณสมบัตินี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์เซนเซอร์เคมีได้ [4] แต่อย่างไรก็ตามผลของการตอบสนองยังอยู่ในระดับวิจัยและพัฒนา เพื่อให้ได้การเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าที่สูงต่อปริมาณแก๊สหรือไอระเหย มีความไวที่สูงและเวลาการตอบสนองที่เร็ว

ในบทความนี้เป็นการนำเสนอผลของอุณหภูมิแวดล้อมที่มีผลต่อการตอบสนองเซนเซอร์เคมีแบบคาร์บอนนาโนทิวป์โดยอุณหภูมิแวดล้อมที่ทำการตรวจจับมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าสามารถทำให้ค่าความไวสูงขึ้นและเวลาการตอบสนองดีขึ้น โดยทำการศึกษาเงื่อนไขอุณหภูมิที่เหมาะสมในการตรวจจับแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังศึกษาการให้ความร้อนช่วยลดความชื้นที่ผิวฟิล์มหลังการดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ระหว่างการตรวจจับ ทำให้ช่วยปรับปรุงค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าและเวลาการตอบสนองให้ดียิ่งขึ้นทำให้สามารถที่จะนำไปใช้งานเป็นเซนเซอร์ตรวจจับแอลกอฮอล์

2 การสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์



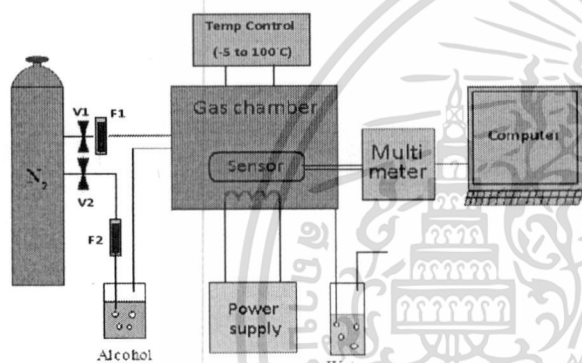
รูปที่ 1 (ก) ภาพถ่ายอุปกรณ์เซนเซอร์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างเสร็จแล้ว และ (ข) ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ใช้ไฮโดรเจนและแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ET-032

ในการวิจัยนี้ฟิล์มบางคาร์บอนนาโนทิวบ์จะถูกสร้างด้วยวิธีตกตะกอนไอระเหยทางเคมีแบบขดลวดความร้อน HFCVD โดยการสังเคราะห์ฟิล์มบางลงบนแผ่นฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ปกคลุมอยู่ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นนิเกิลได้จากการสปัตเตอร์ สารตั้งต้นใช้เอทานอลผสมกับแก๊สไฮโดรเจน (H_2) [5-6] ในอัตราส่วนที่เหมาะสม กระทำที่ความดันบรรยากาศจนได้ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งโครงสร้างอุปกรณ์เป็นแบบตัวต้านทานโดยมีขั้วไฟฟ้าเป็นทองแดงสองขั้วสำหรับใช้งาน รูปที่ 1(ก) แสดงภาพถ่ายฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างเสร็จแล้วโดยมีขั้วทองแดงสำหรับใช้งาน รูปที่ 1(ข) เป็นภาพถ่าย SEM ของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ แสดงให้เห็นฟิล์มคาร์บอนปกคลุมทั่วทั้งแผ่นฐานซิลิกอนไดออกไซด์

3. ระบบการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์



รูปที่ 2 แผนภาพระบบการวัดแอลกอฮอล์

ระบบการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์แสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งการวัดไอระเหยแอลกอฮอล์จะกระทำในระบบปิดภายในห้องปฏิกิริยาหรือ Chamber ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิจากตัวควบคุมอุณหภูมิระหว่าง -5 ถึง 100 °C โดยอุณหภูมิห้องปฏิกิริยานี้จะเป็นอุณหภูมิแวดล้อมในการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ ในห้องปฏิกิริยาจะมีที่ขีดหัวเซนเซอร์อยู่ภายในสำหรับยึดอุปกรณ์ขณะทำการวัด ส่วนด้านล่างของที่ขีดเซนเซอร์จะมีขดลวดทั้งสแตนเลสสำหรับให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในกรณีที่ต้องการไล่ความชื้นที่ผิวฟิล์มบางหลังการดูดซับไอแอลกอฮอล์ ขณะทำการวัดโดยความร้อนที่ให้ควบคุมได้จากค่ากระแสที่ป้อนให้ขดลวดจากแหล่งจ่ายพลังงานภายนอกห้องปฏิกิริยา

ก่อนทำการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์จะทำการไล่อากาศในห้องปฏิกิริยาด้วยแก๊สไนโตรเจนผ่านวาล์ว V1 และมิเตอร์ควบคุมการไหลของแก๊ส F1 แก๊สไนโตรเจนจะเข้าแทนที่อากาศในห้องปฏิกิริยา Chamber ไล่อากาศออกมาภายนอกโดยมีน้ำคักอยู่ โดยน้ำจะทำหน้าที่เป็นวาล์วปิดกั้นอากาศภายนอกไม่ให้เข้าไปภายในและทำหน้าที่เจือจางแก๊สที่เหลือจากห้องปฏิกิริยาให้ละลายในน้ำก่อนที่จะออกสู่บรรยากาศภายนอก เมื่อต้องการวัดการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ทำการเปิดวาล์ว

V1 และเปิดวาล์ว V2 ให้แก๊สไนโตรเจนโดยควบคุมปริมาณแก๊สผ่านมิเตอร์ควบคุมการไหลแก๊ส F2 ลงไปยังสารละลายแอลกอฮอล์ ไนโตรเจนจะนำพาไอระเหยแอลกอฮอล์ผ่านฟองแก๊สไนโตรเจนไปยังห้องปฏิกิริยาหรือ Chamber โดยจะทำสลับกันเป็นวงรอบการวัด ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงถูกแสดงผ่านจอมอนิเตอร์ที่เวลาจริงและบันทึกเก็บไว้เป็นข้อมูลอย่างต่อเนื่อง

4. การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองทุกตอนก่อนที่เซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์จะถูกนำไปวัดในห้องปฏิกิริยาหรือ Chamber จะต้องทำการอบไล่ความชื้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์เบื้องต้นที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 20 นาที ทำการไล่อากาศออกจากห้องปฏิกิริยาหรือ chamber ด้วยแก๊สไนโตรเจนผ่านวาล์ว V1 และมิเตอร์การไหล F1 เป็นเวลา 20 นาที ในขณะที่ห้องปฏิกิริยาจะเต็มไปด้วยบรรยากาศไนโตรเจนและในขณะเวลานี้จะทำการตั้งค่าอุณหภูมิห้องปฏิกิริยาซึ่งเป็นอุณหภูมิแวดล้อมในการวัดให้คงที่ที่ค่าต้องการ เมื่อต้องการวัดการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์จะเปิดวาล์ว 1 และเปิดวาล์ว 2 ผ่านมิเตอร์ควบคุมการไหลแก๊ส F2 ด้วยค่า 200 cc/นาที แก๊สไนโตรเจนจะนำพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไปในห้องปฏิกิริยาซึ่งจะทำปฏิกิริยากับฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อไป ในการวัดจะวัดเป็นรอบการวัดอย่างต่อเนื่องอย่างน้อยสองรอบการวัด เมื่อไอระเหยแอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนนาโนทิวบ์ค่าความต้านทานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าสูงสุดและเริ่มอ้อมตัวเรียกค่าความต้านทานสูงสุดที่เริ่มอ้อมตัว R_{MAX} จากนั้นจะหยุดให้ไอระเหยแอลกอฮอล์โดยเปิดวาล์ว V2 และเปิดวาล์ว V1 ให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้าไปในห้องปฏิกิริยาหรือ Chamber ไล่ไอระเหยแอลกอฮอล์ในห้องปฏิกิริยาออกไป ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนถึงค่าต่ำสุดเรียกว่า R_{MIN} เป็นค่าความต้านทานฐาน ณ อุณหภูมินั้น ซึ่งจะครบหนึ่งรอบการวัด และจะทำการวัดรอบใหม่ต่อไป ค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในรอบการวัดแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง $\Delta R\%$ โดยสามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานสูงสุดและต่ำสุดในรอบการวัดดังสมการที่ 1

$$\Delta R\% = \frac{R_{MAX} - R_{MIN}}{R_{MIN}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ R_{MAX} คือค่าความต้านทานสูงสุดในรอบการวัด
 R_{MIN} คือค่าความต้านทานต่ำสุดในรอบการวัด

4.1 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิกิริยา Chamber ที่ 85 °C

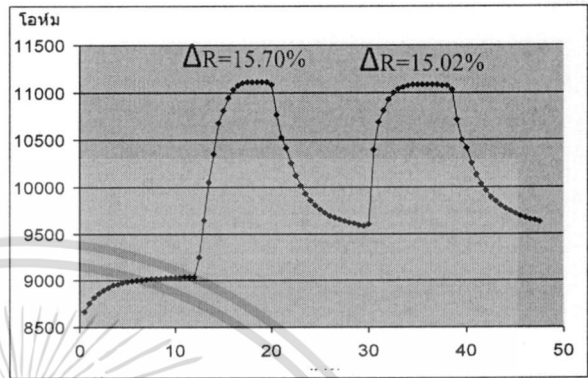
รูปที่ 3 แสดงผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อไอระเหยแอลกอฮอล์กับเวลา เริ่มต้นจากปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิกิริยา Chamber เพื่อไล่อากาศประมาณ 10 นาที จะสังเกตเห็นว่าช่วงนี้ค่าความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่ค่าอ้อมตัวค่าหนึ่ง หลังจากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิห้องปฏิกิริยา Chamber ที่ 85 °C ค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



ด้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเริ่มลดลงซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารประเภทสารกึ่งตัวนำที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งจะตรงข้ามกับโลหะแสดงว่าฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้แสดงคุณสมบัติไปทางสารกึ่งตัวนำมากกว่าโลหะ ค่าความต้านทานจะลดลงและเริ่มอ้อมตัวซึ่งเราจะให้ค่าต่ำสุดเริ่มต้นเป็น R_{MIN} และเป็นค่าความต้านทานฐาน (base line resistance) หลังจากนั้นจะเริ่มรอบการวัดโดยปล่อยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber จะสังเกตค่าความต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นและอ้อมตัวที่ค่า R_{MAX} จากนั้นก็จะหยุดจ่ายไอระเหยของแอลกอฮอล์และปล่อยให้แก๊สไนโตรเจนเข้ามาเพื่อไล่อากาศในห้องปฏิบัติการออกไป ซึ่งค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะลดลงเข้าสู่ R_{MIN} เป็นค่าความต้านทานฐานที่อุณหภูมิห้องอีกครั้งเรียกว่าหนึ่งรอบการวัด และจะเริ่มการวัดในรอบต่อไปในลักษณะเดิมจากการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 3.35% และ 3.04% ในรอบการวัดที่หนึ่งและสองตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นค่ากระทำซ้ำ (Repeatability) อยู่ในเกณฑ์ที่ดีโดยดูจากลักษณะกราฟค่า R_{MIN} ค่า R_{MAX} ค่า เวลาขาขึ้น ค่าเวลาขาลง

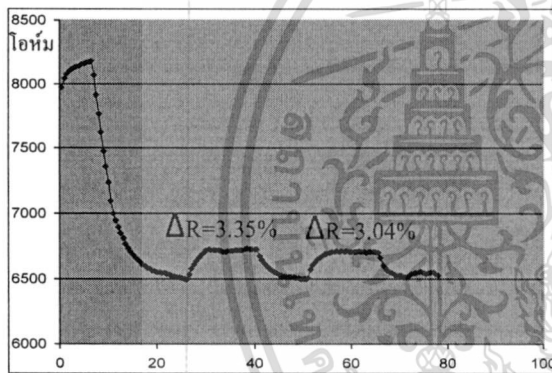
ความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 15.70% และ 15.02% ในรอบการวัดที่หนึ่งและที่สองตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 4.1 พบว่าที่อุณหภูมิแวดล้อมต่ำ (-5°C) แอลกอฮอล์ถูกดูดซับได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง (85°C) สังเกตจากค่า $\Delta R\%$ สำหรับค่ากระทำซ้ำ repeatability มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี จากการเปรียบเทียบการวัดในรอบแรกและรอบที่สอง



เวลา (นาท)

รูปที่ 4 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ -5°C

4.3 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ 25°C และมีการให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืนสภาพหลังการดูดซับแอลกอฮอล์

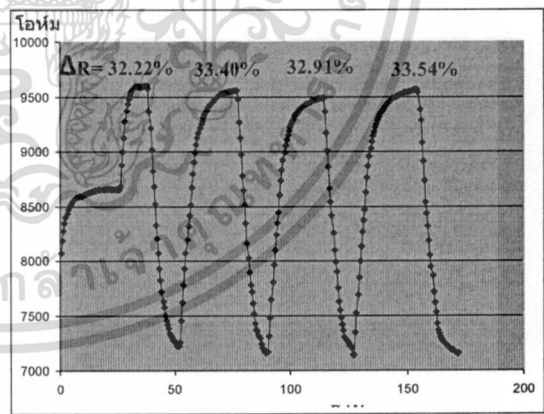


เวลา (นาท)

รูปที่ 3 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 85°C

4.2 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ -5°C

ทำการทดลองในทำนองเดียวกับหัวข้อ 4.1 โดยเปลี่ยนค่าอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber เป็น -5°C ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4 ในช่วงประมาณ 12 นาทีแรกเป็นช่วงที่ทำให้แก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ -5°C หลังจากนั้นเริ่มรอบการวัดโดยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไป ค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีค่ามากขึ้นเข้าสู่ค่าอ้อมตัวสูงสุด R_{MAX} ต่อก็ตกลงจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์และปล่อยให้แก๊สไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ ช่วงนี้ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าอ้อมตัว ให้ค่าต่ำสุดของรอบการวัดนี้เป็น R_{MIN} ซึ่งเป็นค่าความต้านทานฐานที่อุณหภูมิ -5°C ซึ่งจะสังเกตว่ามีค่าสูงกว่าค่าที่อุณหภูมิห้องในตอนที่ 4.1 และทำการเริ่มวัดรอบการวัดต่อไปอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง



เวลา (นาท)

รูปที่ 5 ผลการตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber 25°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืนสภาพความต้านทาน

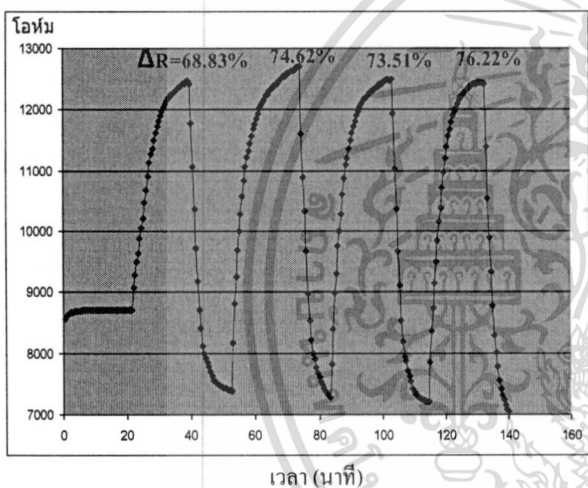
ในการทดลองครั้งนี้จะทำการทดลองคล้ายกับตอนที่ 4.1 และ 4.2 แต่ให้อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber อยู่ที่อุณหภูมิห้อง 25°C และเพิ่มขึ้นตอนการให้ความร้อนแก่เซนเซอร์เฉพาะในครั้งหลังของรอบการวัดในขณะที่หยุดการให้ไอระเหยแอลกอฮอล์และปล่อยให้แก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ การให้ความร้อนถูกควบคุมจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



ลดความร้อนด้านล่างที่ฮีตเซนเซอร์ในห้องปฏิบัติการโดยให้แหล่งจ่ายพลังงานภายนอกแก่หลอด ในการทดลองนี้ความร้อนที่มีค่าอุณหภูมิประมาณ 85°C ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานฐานค่าใหม่ที่ 85°C ผลการทดลองที่ได้แสดงได้ในรูปที่ 5 จากผลการทดลองค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 32.22% 33.40 %, 32.91 % และ 33.54 % ในรอบการวัดหนึ่งถึงสี่ตามลำดับ จะเห็นว่าการให้ความร้อนช่วยลดความชื้นในช่วงการคืนสภาพจะทำให้ค่าความไวของอุปกรณ์สูงขึ้น (Sensitivity) สังเกตจากค่า $\Delta R\%$ ที่สูงขึ้นและเวลาในการตอบสนองเร็ว (Response time) ขึ้นด้วยเช่นกัน ค่าการกระทำซ้ำมีค่าที่ดี

4.4 ผลการตรวจวัดไอรยะเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกริยา -5°C และมีการให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวในการคืนสภาพหลังการดูดซับแอลกอฮอล์



รูปที่ 6 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวกับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิกริยา Chamber -5°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวในการคืนสภาพความต้านทาน

การทดลองครั้งนี้ให้อุณหภูมิแวดล้อมห้องปฏิบัติการเป็น -5°C และให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวที่อุณหภูมิ 85°C เฉพาะในครึ่งหลังของรอบการวัด ในขณะที่หยุดการให้ไอรยะเหยแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ ความเย็นจะช่วยให้การดูดซับแอลกอฮอล์ดีขึ้นและความร้อนจากหลอดความร้อนที่ให้กับเซนเซอร์จะช่วยให้ไอรยะเหยแอลกอฮอล์ที่ถูกดูดซับระเหยออกได้มากขึ้นและรวดเร็วขึ้นทำให้ผลต่างระหว่าง R_{MAX} และ R_{MIN} มีค่ามากขึ้น ค่า R_{MIN} จะเป็นค่าความต้านทานฐานที่ 85°C ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 6 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่าเท่ากับ 68.83%, 74.62 %, 73.51 % และ 76.22% ของรอบการวัดที่หนึ่งถึงสี่ตามลำดับ

5. สรุปและวิจารณ์

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสภาพแวดล้อมมีผลต่อความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวและการดูดซับไอรยะเหยแอลกอฮอล์เป็นอย่างมาก ความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวจะมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลงและจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นคาร์บอนนาโนทิวที่สังเคราะห์ขึ้นแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำมากกว่าคุณสมบัติของตัวนำ อุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้คาร์บอนนาโนทิวสามารถดูดซับแอลกอฮอล์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง ทำให้อุปกรณ์เซนเซอร์มีค่าความไวที่สูง (Sensitivity) ขึ้นเนื่องจากค่าความต้านทานฐานที่ต่ำลง ผลของการให้ความร้อนแก่คาร์บอนนาโนทิวในการช่วยคืนสภาพความต้านทานหลังดูดซับไอรยะเหยแอลกอฮอล์ จะทำช่วยเพิ่มค่าความไวได้สูงขึ้นอีกและใช้เวลาการตอบสนอง (Response time) ได้เร็วยิ่งขึ้น การทำงานของเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวที่มีอุณหภูมิแวดล้อมต่ำที่ -5°C และให้ความร้อนในการคืนสภาพที่ 85°C จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสูงถึง 76.22% คาร์บอนนาโนทิวสามารถใช้งานเป็นตัวตรวจจับแอลกอฮอล์ที่ดีได้โดยประยุกต์ใช้ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคาร์บอนนาโนทิว

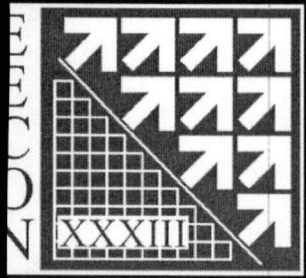
6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนด้านการเงินในงานวิจัย และขอขอบคุณอาจารย์อานาย แสงนวล ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng, B, 19, p.181 (1993).
- [2] W. R. Fahrner, "Nanotechnology and Nanoelectronics" Springer, 2005.
- [3] Phillip G. Collins and Phaedon Avouris "Nanotubes for Electronics" Scientific American, December 2000.
- [4] Sean Brahim, Steve Colbern, Robert Gump, Alex Moser and Leonid Grigorian, "Carbon nanotube-based ethanol sensors" 2009/ Nanotechnology/ 20 /235502, 18 May 2009.
- [5] Sin, M.L.Y. Chow, G.C.T. Fung, C.K.M. Li, W.J. Leong, P. Wong, K.W. Lee, T. "Ultra-Low-Power Alcohol Vapor Sensors Based on Multi-Walled Carbon Nanotube", 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2006.
- [6] T. Phetchakul, S. Cheirsirikul, S. Supadech "Atmospheric pressure HFCVD synthesis of carbon nanotube by using ethanol source" The 10th International Conference on New Diamond Science and Technology ICNDST-10, May 2005, Tsukuba, Japan.

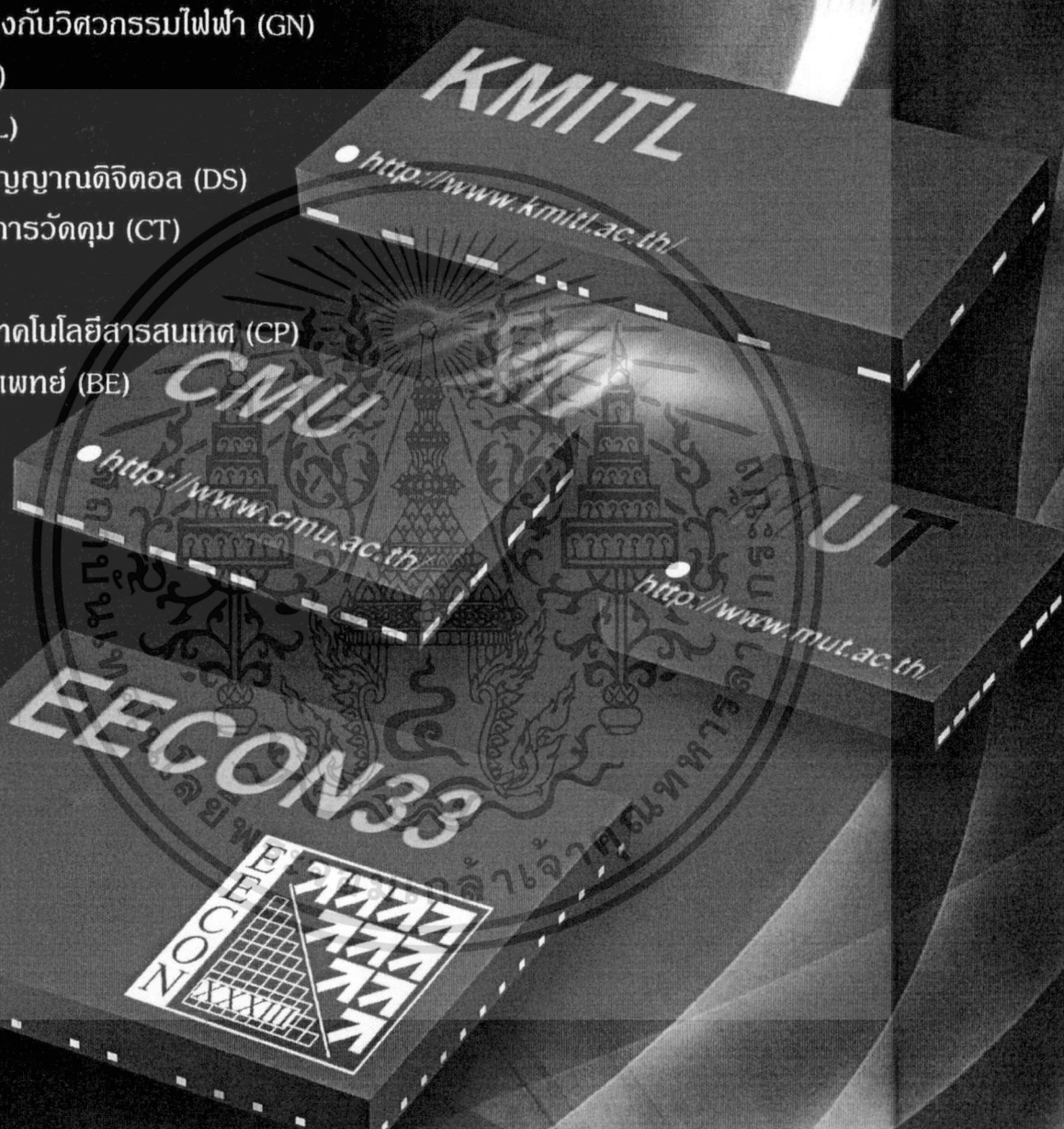
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๓

33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33)

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- ไฟโตนิกส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)



ร่วมจัดโดย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



เครื่อง CVD แบบความร้อนสำหรับคาร์บอนนาโนทิวป์

Thermal CVD for Carbon Nanotube

อัสสุชล แสงนวล, ชลินทร์ สุทธิเนตร, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล และ สมศักดิ์ เชียรศิริกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ที่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์: 0-2326-4550 E-mail: klmonthon@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการสร้างเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีการตกตะกอนไอระเหยทางเคมี (CVD) โดยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้สามารถสังเคราะห์ได้พื้นที่ฟิล์มที่มีขนาดใหญ่ และสังเคราะห์ได้หลายชิ้นงานในเวลาเดียวกัน ทำให้สะดวกในการไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ แหล่งจ่ายใช้แอลกอฮอล์และแก๊สไนโตรเจนทำให้ไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้มีคุณภาพที่ดีจากการตรวจสอบด้วย SEM ซึ่งยืนยันได้ว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

คำสำคัญ: CVD แบบความร้อน, คาร์บอนนาโนทิวป์.

Abstract

This article describes the thermal chemical vapor deposition (CVD) for carbon nanotube (CNT) synthesis. This method can synthesis large area of CNT thin film and produce many samples in one operation. It is good for microelectronic devices application. The sources use alcohol and nitrogen gas that do not release any pollution from the system. The CNT films have good quality by SEM inspection. It confirms that these CNT from this thermal CVD can be applied for electronic devices material.

Keywords: Thermal CVD, CNT.

1. คำนำ

คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งมีการวิจัยเพื่อนำไปใช้งานในรูปแบบต่างๆ อาทิเช่น เป็นตัวปล่อยอิเล็กตรอนแรงดันต่ำสำหรับตัวแสดงผล เป็นอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ระดับนาโนเมตร อุปกรณ์เซนเซอร์ต่างๆ รวมทั้งเป็นตัวเชื่อมไฟฟ้าในวงจรรวม โดยทั้งหมดอาศัยคุณสมบัติอันเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ไม่เหมือนวัสดุอื่นๆ คือมีลักษณะเป็นท่อยาวขนาดเล็กมากระดับนาโนเมตร

การสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์มีได้หลายวิธี [1-3] อาทิเช่นวิธี

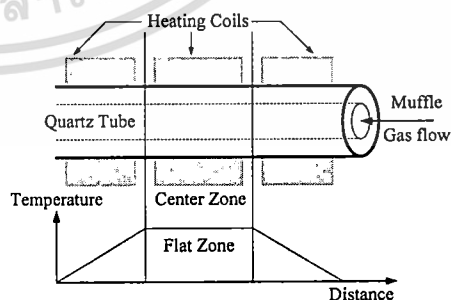
Arc discharge วิธี Laser ablation หรือวิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) โดยเทคนิค CVD จะมีความเหมาะสมเป็นอย่างมากกว่าวิธีอื่นในการควบคุมพื้นที่และความหนา รวมถึงทำเป็นรูปทรงของฟิล์มตามต้องการ ได้สะดวกกว่าเทคนิคอื่น

ในบทความนี้เป็นการสร้างเครื่อง CVD แบบความร้อนขึ้นเองสำหรับสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อนำไปใช้ในงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ เครื่อง CVD สามารถควบคุมอุณหภูมิเที่ยงตรงสูง แหล่งจ่ายสารเชื้อไม่มีมลพิษซึ่งแตกต่างกับ CVD ทั่วไป มักจะมีแหล่งจ่ายที่เป็นแก๊สพิษ อันตรายในการระเบิด เนื่องจากไม่มีสารพิษใดๆ จึงสามารถทำงานที่ความดันบรรยากาศ เป็นการสะดวกอย่างยิ่งในการใช้งาน สามารถสร้างพื้นที่ได้ใหญ่ และสร้างครั้งละหลายๆ ชิ้นงานในเวลาเดียวกัน คุณภาพคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้มีคุณภาพที่ดีนำไปใช้งานทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้เครื่องมีราคาถูกกว่ามาก

2. เครื่อง CVD แบบความร้อน

2.1 เตาความร้อนแบบสามโซน

เครื่อง CVD แบบความร้อนอาศัยพลังงานความร้อนจากเตาตั้งต้นที่ปกติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน พลังงานความร้อนปกติจะได้จากหลอดความร้อน เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิมีความ



รูปที่ 1 โครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโซน

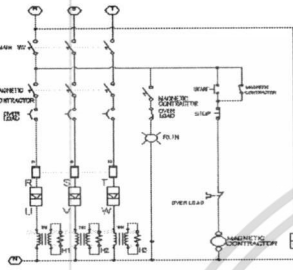
เที่ยงตรงสูงเตาความร้อนจึงเป็นแบบสามโซนที่มีหลอดความร้อนแยกอิสระจากกันสามส่วนคือ ตอนต้น ตอนกลางและตอนปลาย แผนผังโครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโซนแสดงได้ดังรูปที่ 1 ความร้อนที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



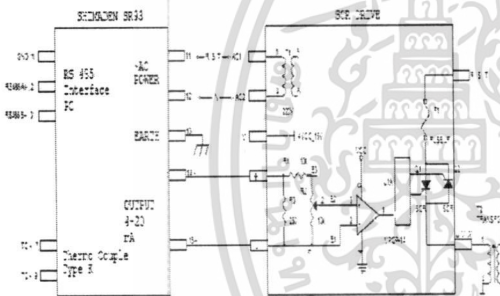
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มข. มทม.ที่มีการนำไปใช้
The 33rd Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT

ในกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนที่มีค่าสูงอยู่ในช่วง 650 - 900°C ดังนั้นจึงใช้ท่อควอดซ์เป็นส่วนหนึ่งของห้องปฏิกริยาในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังรูปที่ 1 แสดงโครงสร้างแบบแนวนอน (ท่อควอดซ์ข้างในแนวนอน) อุณหภูมิของหลอดความร้อนทั้งสามตั้งให้มีค่าเท่ากัน อุณหภูมิส่วนปลายท่อทั้งสองจะมีค่าลดขึ้นขึ้นจากค่าอุณหภูมิห้องและจะมีค่าคงที่ที่บริเวณกลางท่อที่เรียกว่า flat zone ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเที่ยงตรงมาก $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสามารถใช้ในกระบวนการ CVD แบบความร้อนได้ อุณหภูมิที่คงที่นี้จะทำให้ปฏิกริยามีค่าคงที่และสม่ำเสมอในการสร้างฟิล์มบาง

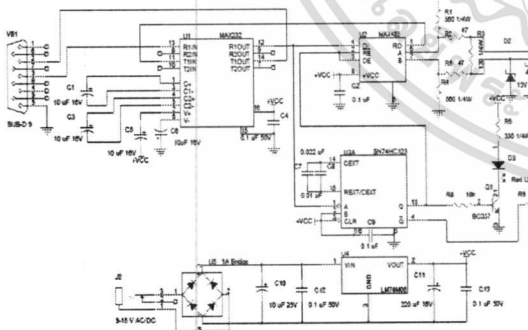


Power Circuit Three zone furnace

(ก)



(ข)



RS485 Interface Circuit

(ค)

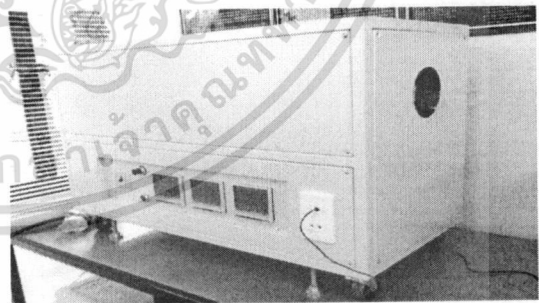
รูปที่ 2 วงจรเตาความร้อนแบบสามโซน (ก) วงจรจ่ายกำลัง

(ข) วงจรควบคุม และ (ค) วงจรเชื่อมต่อ RS 485

วงจรเตาความร้อนแบบสามโซนแบ่งได้เป็นสามภาคได้แก่ ภาคกำลัง, ภาคควบคุมและภาคเชื่อมต่อกับพอร์ต RS485 ดังรูปที่ 2 แสดง

รายละเอียดวงจรภาคต่างๆ โดยวงจรภาคกำลังมีหน้าที่จ่ายกระแสและแรงดันให้กับขดลวดความร้อน การควบคุมใช้หลักการควบคุมมุมเฟสจากรูปที่ 2 (ข) ในส่วนของ SCR Drive ที่เอาท์พุท จะมี SCR อยู่สองตัวต่อกลับด้านกัน คล้ายกับ TRIAC จะแบ่งกันทำงานตัวละครึ่งซีกเมื่อรวมกันก็จะควบคุมได้ทั้งซีกบวกและซีกลบ ลักษณะของสัญญาณทางไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด จะเห็นเป็นแรงดันไฟสลับ ที่เป็นลักษณะคลื่นไซน์ที่มีขนาดปรับเปลี่ยนไปตามมุมทริกของ SCR ที่ขา Gate สัญญาณ Pulse Trig ของ SCR ที่ขา Gate ทั้งคู่จะห่างกัน 180 องศา สามารถจ่ายพิกัดกระแสและแรงดันสูงสุดไปยังหม้อแปลงแบบสเต็ปดาวที่ขดปฐมภูมิ 220 Volt 80 Amp สามารถส่งผ่านแรงดันและกระแสสูงสุดที่ขดทุติยภูมิ 33 Volt 55 Amp และต่อไปยังขดลวดความร้อน การปรับขนาดกระแสและแรงดันทำผ่านมุมทริก SCR จากวงจรควบคุมอีกทีหนึ่งวงจรภาคควบคุมใช้วงจรควบคุม SHIMADEN SR93 [4-5]

รูปที่ 3 แสดงเตาความร้อนของเครื่อง CVD แบบหลอดความร้อนที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้ว ท่อควอดซ์ถูกวางในแนวนอนผ่านหลอดความร้อนสามชุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อควอดซ์ที่ใช้สามารถเปลี่ยนได้หลายขนาด สามารถใส่ท่อขนาดสูงสุด 3 นิ้ว โดยการทดลองนี้ใช้ท่อควอดซ์ขนาด 2 นิ้ว หน้าปัดของเครื่องสามารถตั้งค่าอุณหภูมิของหลอดความร้อนสามโซนได้อย่างอิสระจากกัน การตั้งค่าอุณหภูมิยังสามารถตั้งค่าผ่านทางพอร์ต RS485 ผ่านทางไมโครคอมพิวเตอร์ได้เช่นกัน ปรกติการตั้งค่าอุณหภูมิหลอดความร้อนในการใช้งานเป็นเครื่อง CVD จะตั้งค่าหลอดความร้อนให้มีอุณหภูมิเท่ากันทั้งสามโซน การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์จะกระทำที่บริเวณที่มีอุณหภูมิตั้งที่ตรงบริเวณกลางท่อควอดซ์ที่เรียกว่า flat zone ซึ่งเตาความร้อนแบบสามโซนจะให้อุณหภูมิที่เที่ยงตรงสูงมาก



รูปที่ 3 ภาพถ่ายเตาความร้อนที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

2.2 การทดสอบเตาความร้อนแบบสามโซน

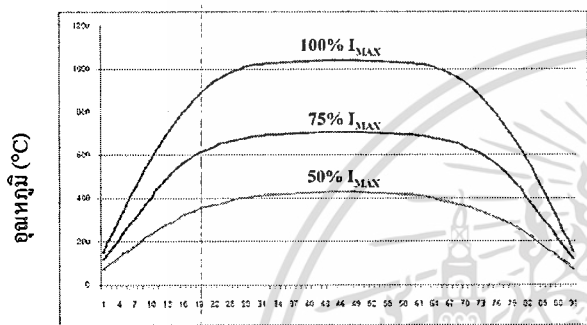
การทดสอบเตาความร้อนกระทำในสองลักษณะได้แก่ การทดสอบแบบเปิดรูปและแบบปิดรูป การทดสอบแบบเปิดรูปกระทำในรูปการป้อนการควบคุมการป้อนกระแสคงที่แก่ขดลวด โดยทำการทดสอบในรูปการป้อนกระแสเป็นสัดส่วนกับค่ากระแสสูงสุด โดยการทดสอบนี้กระทำที่สามเงื่อนไขด้วยกันคือที่ 50%, 75% และ 100% ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

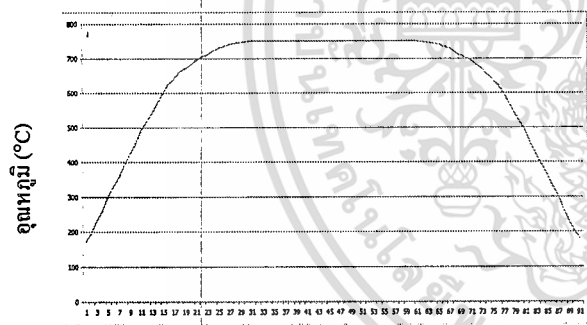


ค่ากระแสสูงสุด ส่วนการทดสอบแบบปิดรูปจะเป็นการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อเตาอุณหภูมิคงที่จะทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ

ผลการทดสอบทั้งสองแบบแสดงดังในรูปที่ 4 โดยรูปที่ 4 (ก) เป็นการทดสอบแบบเปิดรูป โดยการตั้งค่ากระแสที่ต่างๆจะสังเกตเห็นว่าช่วงอุณหภูมิคงที่จะแบนราบ และอุณหภูมิสูงสุดของเตามีค่า ประมาณ 1000°C ส่วนในรูปที่ 4 (ข) เป็นการทดสอบแบบปิดรูปโดยตั้งค่าอุณหภูมิคงที่ที่ 750°C จากการทดลองพบว่าที่ตรงบริเวณ flat zone จะมีอุณหภูมิคงที่ที่ 750°C จากการทดลองทั้งสองมีค่าช่วง flat zone ประมาณ 30 เซนติเมตร ในส่วนใกล้ปากเตาค่าอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจากค่าที่อุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิคงที่อย่างสม่ำเสมอ



(ก)



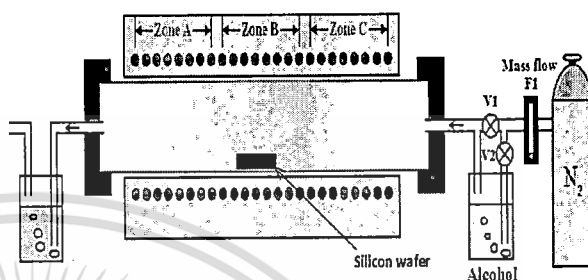
(ข)

รูปที่ 4 อุณหภูมิของเตาความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อควอตซ์ (ก) แบบเปิดรูป และ (ข) แบบปิดรูป

3. การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวด้วย CVD แบบความร้อน

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวด้วย CVD แบบความร้อน อาศัยหลักการที่ว่าความร้อนจะทำให้สารประกอบที่เป็นแหล่งจ่ายตั้งต้นของสารที่ต้องการสังเคราะห์แตกตัวและก่อตัวใหม่เป็นสารที่ต้องการบนแผ่นฐานที่เตรียมสภาพพื้นผิวไว้ได้อย่างเหมาะสม โดยแผ่นฐานจะต้องมีอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงจะทำให้เกิดการก่อตัวของวัสดุที่ต้องการ ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว สารตั้งต้นจะต้องเป็นสารประกอบคาร์บอนซึ่งโดยมากสารตั้งต้นจะมีสถานะเป็นแก๊สหรือไฮโดรเจน ในการ

สังเคราะห์นี้ใช้แอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นและใช้แก๊สเฉื่อยไนโตรเจนเป็นตัวนำพาไอแอลกอฮอล์ รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างเครื่อง CVD แบบความร้อน โดยปลายด้านหนึ่งของท่อควอตซ์ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแก๊สไนโตรเจนและแอลกอฮอล์ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งมีระดับน้ำเป็นตัวดักจับแก๊สที่เหลือจากปฏิกิริยาและเป็นตัวป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกไหลเข้าไปในท่อควอตซ์



รูปที่ 5 แผนภาพเครื่อง CVD แบบความร้อน

กระบวนการสังเคราะห์เริ่มต้นจากตั้งค่าอุณหภูมิเตาที่ 500°C เมื่ออุณหภูมิเตาคงที่แล้วใส่แผ่นฐานที่เตรียมจากซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีโลหะนิกเกิลปกคลุมเป็นเม็ดเล็กๆ กระจายตัวทั้งแผ่นด้วยวิธีการสปัตเตอร์ มีหน้าที่เป็นตัวคะตะไลต์ในการสังเคราะห์ นำแผ่นฐานไว้ที่กลางเตาและปรับค่าอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว ในการทดลองนี้ใช้ค่าตั้งแต่ 650-750°C ซึ่งสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวได้ตลอดช่วงในขณะที่ปล่อยแก๊สไนโตรเจนผ่านมิเตอร์ F1 ผ่านวาล์ว V1 ด้วยอัตราการไหล 0.2 ลิตรต่อนาที เมื่ออุณหภูมิเตาคงที่ที่อุณหภูมิตั้งกล่าวไว้แล้วเปิดวาล์ว V1 และเปิดวาล์ว V2 และปรับมิเตอร์ F1 ให้แก๊สไนโตรเจนไหลผ่านวาล์ว V2 ที่อัตราการไหล 0.3 - 0.5 ลิตรต่อนาที ไนโตรเจนจะนำพาไฮโดรเจนแอลกอฮอล์เข้าไปในท่อควอตซ์ และใช้เวลาในการสังเคราะห์ในช่วง 5-10 นาที หลังจากนั้นปิดวาล์ว V2 และเปิดวาล์ว V1 ปรับอัตราการไหล 0.2 ลิตรต่อนาที ตั้งค่าอุณหภูมิเตาลดลงที่ 500°C แล้วนำแผ่นฐานออกจากเตาเพื่อนำไปตรวจสอบต่อไป

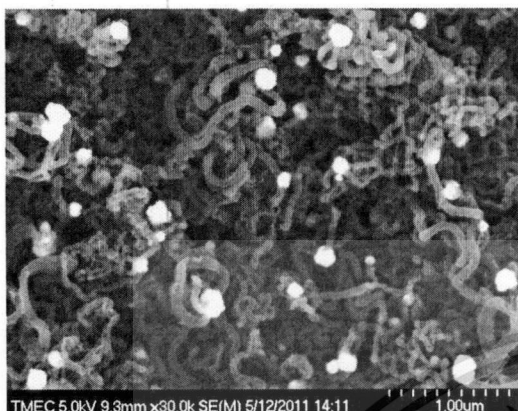
4. ผลการทดลอง

ผลการตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่อัตราขยายแตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 6 สังเกตเห็นว่าวัสดุที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็กจำนวนมากอาจไม่เป็นวัสดุที่แน่นทึบเมื่อตรวจสอบคุณสมบัติวัสดุที่ได้เป็นคาร์บอน ซึ่งสารที่สังเคราะห์ได้นั้นเป็นโครงสร้างคาร์บอนนาโนทิว ในรูปสังเกตเห็นว่าโลหะนิกเกิลที่เป็นตัวคะตะไลต์อยู่ด้านบนของฟิล์มบาง โดยรูปที่ 6 (ก) แสดงให้เห็นท่อคาร์บอนนาโนทิวที่กำลังขยายสามหมื่นเท่า ส่วนรูปที่ 6 (ข) แสดงให้เห็นขนานเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคาร์บอนที่กำลังขยายแปดหมื่นเท่า ซึ่งมีขนาดประมาณ 30-50 นาโนเมตร และรูปที่ 6 (ค) เป็นภาพตัดขวางที่กำลังขยายหนึ่งหมื่นเท่า แสดงให้เห็นถึงความหนาของฟิล์มคาร์บอน-

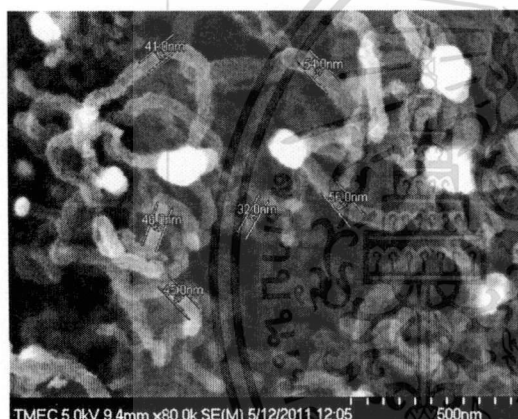
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



นาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ จากรูปพบว่าค่าความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วง 4-5 ไมโครเมตร ลักษณะของฟิล์มบางคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นกระจายตัวเต็มพื้นที่แผ่นฐานรอง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM: Scanning Electron Microscope) (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 3 หมื่นเท่า, (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 8 หมื่นเท่า และ (ค) ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 1 หมื่นเท่า

5. สรุป

เครื่อง CVD แบบความร้อนที่พัฒนาขึ้นสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้เป็นอย่างดี กระบวนการสังเคราะห์ทำให้ความดันบรรยากาศ ใช้แอลกอฮอล์และไนโตรเจนเป็นสารตั้งต้นทำให้ไม่มีมลพิษและอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ตัวหลักของเครื่องประกอบด้วยเตาความร้อนแบบสามโซนที่ควบคุมอุณหภูมิที่เที่ยงตรงสูงทำให้ปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์คงที่สม่ำเสมอ มีระยะช่วงอุณหภูมิคงที่ Flat zone ขาวทำให้มีเนื้อที่ในการสังเคราะห์ได้ดีละมาก ๆ ทำให้ประหยัดและสามารถสังเคราะห์ได้คาร์บอนนาโนทิวป์พื้นที่ขนาดใหญ่ทำให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้เครื่อง CVD แบบลดความร้อนยังมีราคาถูก

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant, *Nature* 388 (1997) 756.
- [2] Z.F. Ren, Z.P. Huang, J.H. Wang, M.P. Siegal, P.N. Provencio, *Science* 282 (1998) 1105.
- [3] A. Thess, *Science* 273 (1996) 483.
- [4] SR90 Series (SR91, SR92, SR93, SR94) Digital Controller Instruction Manual, SHIMADEN CO., LTD.
- [5] SR90 Series (SR91, SR92, SR93, SR94) Digital Controller Communication interface (RS232/RS485) Instruction Manual, SHIMADEN CO., LTD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มท. มหิดล. ที่มีการนำไปใช้
The 33rd Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT



IEEE-NEMS 2011

2011 *IEEE International Conference on*
Nano/Micro Engineered and Molecular Systems

Kaohsiung, Taiwan

February 20-23, 2011

Organizers

- IEEE Nanotechnology Council
- National Cheng Kung University, Taiwan
- National Tsing Hua University, Taiwan
- National Sun Yat-sen University, Taiwan
- Industrial Technology Research Institute, Taiwan
- Nanotechnology and Micro System Association, Taiwan
- Peking University, China
- The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong



Investigation on Temperature Effect on Alcohol Sensing of Multi-Walled Carbon Nanotube

Toempong Phetchakul

Department of Electronics, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand 10520
E-mail : kptoempo@kmitl.ac.th

Assuchol Sangnual and Chalin Sutthinet

Department of Electronics, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand 10520

Abstract— This research studied the environment temperature affect to alcohol detecting and heated carbon nanotube film after alcohol detecting for a good chemical sensor application. The results showed that at the environment temperature below the room temperature (in this work -5°C), the percentage of resistance changing is 15.70 % while at the 85°C is 3.35 %. The heated CNT film after alcohol absorption during detecting time reduces the recovery time of the measurement cycle and reduces the minimum base resistance so increasing sensitivity of ΔR of CNT sensor. The results show that ΔR reaches to 76.22 % at environment temperature -5°C , heating temperature 85°C , and recovery time is faster than in the case of room temperature and no heating the film.

Keywords-component; carbon nanotube; alcohol sensor

I. INTRODUCTION

Carbon nanotubes (CNTs) have interesting electrical, mechanical and electromechanical properties for many applications. Especially, many kinds of sensor devices, for example, chemical sensor are expected to use the unique properties of CNTs. The tubular molecules structure consist of one (single-walled) or multi (multi-walled) rolled up grapheme layers which is controlled by size of catalyst increase the surface per area ratio of thin film for adsorption and absorption gas or vapor in chemical sensor.

Carbon nanotube based gas sensors have been researched for several years because of some promising properties such as response time, sensitivity, operating temperature [1]-[5]. The conductivity changes when the gas or vapor is exposed on the surface which leads to apply for chemical sensor. However, the results show the potential in the level of research that have to develop for receiving the higher conductivity changing to gas or vapor and fast response time.

In this research, the study of environment temperature and heated CNT film after adsorption or absorption of gas molecules affect to response of CNT as alcohol sensor was investigated. The property that was

observed is sensitivity. The environment temperature can improve the absorption or adsorption of alcohol on surface that enhance the sensitivity better under the suitable condition during alcohol detecting. Furthermore, the heating CNT for recovery condition after detecting enhance the resistance changing and increasing the sensitivity for a good chemical sensor application.

II. FABRICATION

The sensor was fabricated by atmospheric pressure hot filament chemical vapor deposition (HFCVD) [6] on insulator substrate of n-type silicon which was covered with silicon dioxide by thermal oxidation and then sputtered nickel cluster as catalyst of CNTs growth and patterned copper as ohmic contact terminals. The sources are ethanol and hydrogen gas controlled the ratio of hydrogen pass through ethanol for vapor bubbling per total hydrogen source about 8 vol.%. The complete resistive CNT sensor with two copper contacts is shown in Fig. 1(a) and CNT film micrograph by SEM is shown in Fig. 1(b), respectively. From this method, the CNT are mostly multi-wall CNT with the thickness 5 microns for 30 minutes.

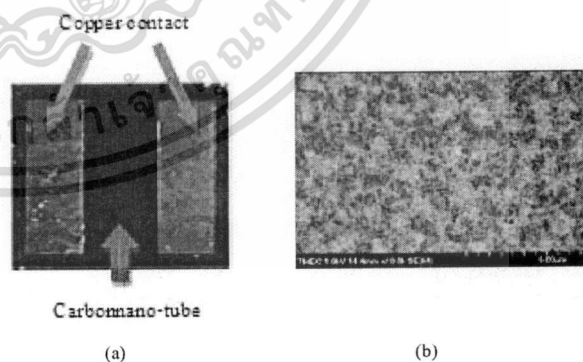


Figure 1(a) Image of CNT sensor and (b) SEM image of CNT surface.

III. ALCOHOL MEASUREMENT SYSTEM

The alcohol vapor measurement system is shown in Fig. 2. The measurement is in the closed chamber which controlled temperature within chamber by temperature controller. This temperature is called as environment temperature of detecting. The environment temperature is for enhancing of alcohol absorption or adsorption on the sensor surface. In the chamber, there is a heating filament supplied by outer electrical source under the sensor holder for heating the CNT in the case that we want to recover the CNT film after absorbed/adsorbed alcohol vapor.

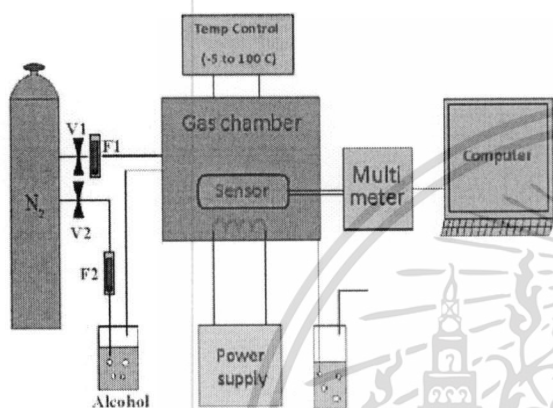


Figure 2 Measurement System

The alcohol vapor is carried by inert nitrogen gas bubble into chamber that is controlled by temperature control unit which varied temperature between -5°C to 100°C . Nitrogen gas is controlled the flow rate by valve 1 (V1) and flow meter (F1) before flows into the chamber. The water at the end is used for blocking the system and dilutes the waste of the gas before release in air. When the alcohol vapor is to be measured, V1 is closed and V2 is opened and controlled flow rate by F2. After resistance increase nearly reaches to the saturated value, it is switched to nitrogen gas V1 again and waiting for recovering the surface resistance reach to the minimum value that is one cycle of measurement. The responses are monitored real time on display and record continuously.

IV. EXPERIMENT AND RESULTS

All of the experiments, the CNT sensors have to bake for removing the moisture adsorbed on the surface before bring it into the chamber. This procedure takes 20 minutes long at 70°C . The air in the chamber is replaced by nitrogen gas via valve V1 and flow meter F1 for 20 minutes. The chamber is now all filled with nitrogen and the environment temperature is settled constantly. The cycle of measurement started when valve V1 is closed and valve V2 is opened and control the flow rate via flow meter F2, 200 cc/min, and then nitrogen gas will carry

vapor of alcohol into the chamber. The measurement will measure as cycle of measurement continuously at least 2 cycles. The alcohol vapor adsorb on the surface increase the film resistance and reach to the saturation value or maximum value R_{MAX} then stop alcohol vapor by closing valve V2 and open valve V1 for pure nitrogen gas flow in the chamber. The nitrogen replace and drive out the alcohol vapor, the resistance decreases to the minimum resistance R_{MIN} that is one cycle of measurement. The next cycle will repeat in the same procedure. The resistance changing will show in the form of changing percentage $\Delta R\%$. The percentage of changing is defined as

$$\Delta R\% = \frac{R_{MAX} - R_{MIN}}{R_{MIN}} \times 100 \quad (1)$$

where R_{MAX} and R_{MIN} are the maximum and minimum value respectively.

Environment temperature 85°C and no recovery heating

Fig.3 shows the case that the chamber temperature is 85°C and no heating filament under the holder for recovery the base condition. The nitrogen gas flows into the chamber for replacing the air in the chamber for 10 minutes. It is noticed that the resistance increase and reach to saturation value. Then the chamber temperature, the environment temperature, is set up for 85°C . The CNT film resistance start to decrease that confirms it shows semiconductor property which conduct current better at high temperature rather than metal. The resistor decrease and reach to minimum saturation value R_{MIN} . The cycle of measurement start at this point by flowing alcohol vapor into the chamber. It is noticed that resistance increase and reach to maximum value R_{MAX} and then stop to supply alcohol and purge vapor in the chamber by nitrogen. The resistance decrease to minimum value R_{MIN} again that a cycle of measurement is completed and then start a new cycle. The results show that resistance can recover to the same base

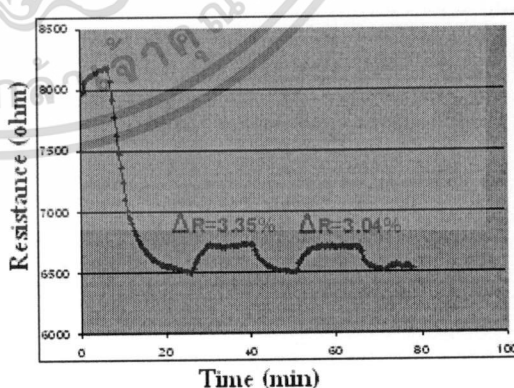


Figure 3 Response of CNT Resistance at Chamber Temperature 85°C

resistance value. The percentages of resistance changing $\Delta R\%$ are 3.35 % and 3.04 % for the first and second cycle respectively.

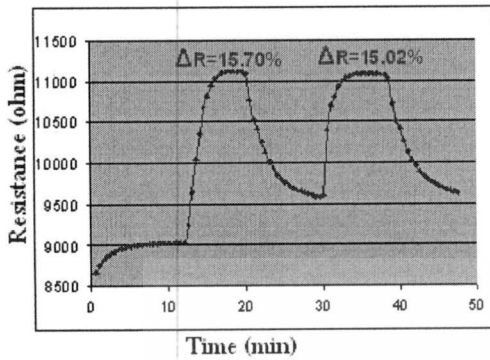


Figure 4 Response of CNT resistances at chamber temperature -5°C

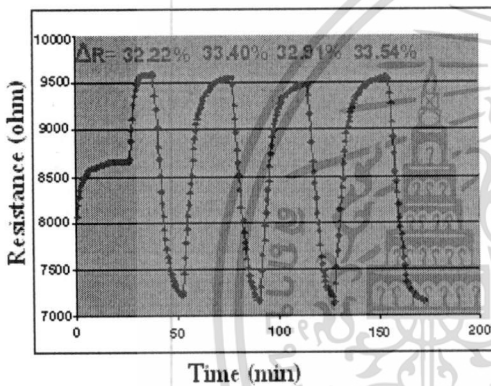


Figure 5 Response of CNT resistances at chamber temperature 25°C and heated CNT at 85°C

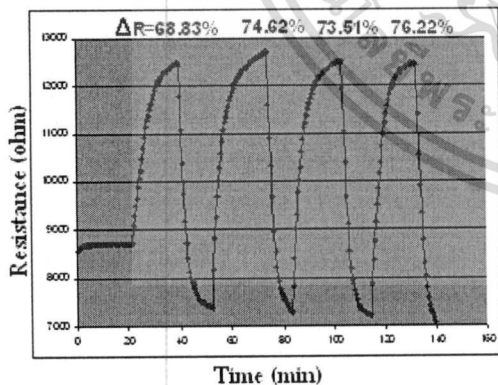


Figure 6 Response of CNT resistances at chamber temperature -5°C and heated CNT at 85°C

Environment temperature -5°C and no recovery heating

The same procedure in last section is used in this experiment by setting up chamber temperature -5°C . Fig. 4 shows the case of chamber temperature is -5°C and no heating the filament under the sensor holder. After flowing nitrogen in 10 minutes, the resistance reaches to saturated value called base resistance at -5°C . The starting point of cycle begin when vaporized alcohol flow into the chamber, this time the resistance increase to a maximum R_{MAX} . Then stop to supply vaporized alcohol, the resistance decrease to a new minimum value but can not recover to the same base resistance at 5°C . It should be some vapor is left over on the surface. The results show that in the first and second cycle, the resistance can recover to the same new base resistance value. The percentages of resistance changing $\Delta R\%$ are 15.70 % and 15.02 % for the first and the second measurement cycle respectively. It found that low environment temperature, CNT tends to absorb alcohol vapor better than high temperature.

Environment temperature 25°C and heating for recovery film.

Fig. 5 shows the case of chamber temperature is at room temperature 25°C and heating CNT at 85°C by filament. The same procedure as before with the room temperature environment 25°C and heating only the period for recover film after detecting alcohol at 85°C . In this case, base resistance is heated below initial base line at room temperature because heating temperature is at 85°C . The percentages of resistance changing are better than the two prior conditions because of the base resistance shift down. The $\Delta R\%$ values are 32.22%, 33.40%, 32.91 % and 33.54 % for the first to fourth cycle respectively.

Environment temperature -5°C and heating for recovery film

Fig. 6 shows the case that chamber temperature is -5°C and heating CNT at 85°C . It is mixed condition of low environment temperature for better adsorption and heated sensor for low base resistance. The maximum resistance R_{MAX} is higher than the room temperature before. From the experiment, the sensitivity of sensor at low temperature is better than high temperature because CNT can adsorb alcohol at low temperature better than high temperature. The percentages of resistance changing $\Delta R\%$ are 68.83%, 74.62%, 73.51% and 76.22% for the first to fourth cycle respectively. Heating CNT reduces the base resistance and enhances the resistance difference for high sensitivity.

V. CONCLUSION

The temperature effect on alcohol sensing of multi-wall carbon nanotube has been investigated. Two types of temperature, environment temperature and heated CNT film temperature, affect to the sensitivity for good detecting. The

low environment temperature helps the adsorption of alcohol on CNT surface increasing the maximum resistance R_{MAX} . The heated sensor temperature reduces the minimum base resistance. The percentage of resistance changing $\Delta R\%$ in the case of low environment temperature -5°C and heated temperature 85°C is around 70%. It is so difference from the case of high environment temperature 85°C and no heated CNT

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank National Research Council of Thailand (NRCT) for financial support and thank to Mr. Amnuay Sangnual from Chemical Department, Faculty of Sciences, Prince Songkhla University for good advice.

REFERENCES

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng, B, 19, p.181 (1993).
- [2] W. R. Fahrner, "Nanotechnology and Nanoelectronics" Springer, 2005.
- [3] Phillip G. Collins and Phaedon Avouris "Nanotubes for Electronics" Scientific American, December 2000.
- [4] Sean Brahim, Steve Colbern, Robert Gump, Alex Moser and Leonid Grigorian, "Carbon nanotube-based ethanol sensors" 2009, Nanotechnology, 18 May 2009.
- [5] Sin, M.L.Y. Chow, G.C.T. Fung, C.K.M. Li, W.J. Leong, P. Wong. K.W. Lee, T. "Ultra-Low-Power Alcohol Vapor Sensors Based on Multi-Walled Carbon Nanotube", 1st IEEE International Conference on Nano /Micro Engineered and Molecular Systems, 2006.
- [6] T. Phetchakul, S. Cheirsirikul, S. Supadech "Atmospheric pressure HFCVD synthesis of carbon nanotube by using ethanol source" The 10th International Conference on New Diamond Science and Technology, ICNDST-10, May 2005.





NANYANG
TECHNOLOGICAL
UNIVERSITY



IEEE
SINGAPORE SECTION

ISIC-2009

12th International Symposium on Integrated Circuits

14-16 December 2009

Suntec Singapore
International Convention
& Exhibition Centre

Final Programme

Supported by:



Held in:

UNIQUELY
Singapore
www.visitshgapore.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Alcohol Sensor Based on Multi-Wall Carbon Nanotube

Chalin Sutthinet, Assuchol Sangnual, Toempong Phetchakul
 Department of Electronics, Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Bangkok, Thailand
 chalin_sutthinet@yahoo.com

Abstract— We have demonstrated multi-walled carbon nanotube (MWCNTs) based sensors, which are capable of detecting alcohol vapor. The properties of the sensor were as a function of baking times at ethanol flow rate 200 cc/min and nitrogen gas flow rate 200 cc/min. Moreover, the various of baking times were observed that the highest sensitivity was obtained at baking time of 25 minutes at 70 °C can be explained for residual of ethanol on the surface. It was found that the optimum operating at room temperature (25 °C). It is expected that many applications of CNTs-based sensors will be explored in future as the interest of the nanotechnology research in this field increases.

keywords—alcohol sensor, chemical sensor, carbon nanotubes

I. INTRODUCTION

Interest in nanomaterials has been growing rapidly for the past several years. Especially, carbon nanotubes (CNTs) are promising as new materials for a variety of potential applications. Recently, CNTs-based gas sensors have received considerable attention because of their outstanding properties, such as faster response, higher sensitivity, lower operating temperature and wider variety of gases that may be detected compared with the other types of gas sensors. CNTs-based gas sensing utilizes a change in an electrical property due to adsorption of gas molecules as the output signal. The fabricated sensor was applied to detection of alcohol vapor by resistance spectroscopy.

II. EXPERIMENTAL

A. Sensor fabrication

The MW-CNT-based gas sensor was fabricated by Chemical Vapor Deposition (CVD) method. Condition of fabrication was showed in TABLE I.

TABLE I. FABRICATION CONDITION

Substrate	Condition				
	Temp (°C)	Power (w)	Source	catalyst	Time (Min)
Copper	600-700	120	Alcohol	Nickel	30

Figure 1 (a) obviously shows the pattern of nickel and copper electrode, while Figure 1 (b) shows the result after the CNTs film was grown.

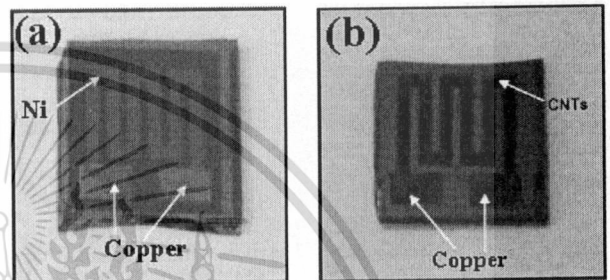


Figure 1. (a) Pattern of nickel (b) CNTs grown on substrate

B. SEM scanning electron microscopy images of the carbon nanostructures

In the pre-synthesis phase, scanning electron microscope (SEM) imaged nickel dispersing on silicon substrate as Figure 2 (a). Figure 2 (b) shows the CNT film in the post-synthesis phase.

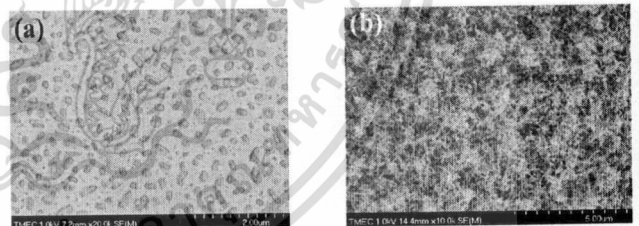


Figure 2. SEM image (a) Nickel (b) CNTs

C. Energy Dispersive X-ray (EDX)

According to the examination by Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), Figure 3 (a) indicates that in the pre-synthesis phase, there were 3-peak spectrum comprising silicon (Si) from the substrate, oxide (O) from oxygen, and nickel (Ni). The Ni peak is lower than Si's, which means nickel is less than silicon. In the post-synthesis phase, Figure 3 (b) shows that as a result of CNT spreading over the silicon substrate, only 2-peak spectrum of nickel (Ni) and carbon (C), the highest, were emerged.

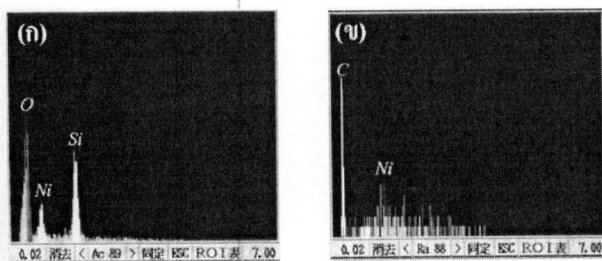


Figure 3. EDX image (a) Pattern of nickel (b) CNTs grown on substrate

D. Raman analyses of CNTs

The Raman spectra of CNTs was plotted in Figure 4, which shows D and G peaks at about 1350 cm^{-1} and 1600 cm^{-1} respectively. The G-Band, representing perfect carbon bond, was higher than the D-Band, representing imperfect carbon bond.

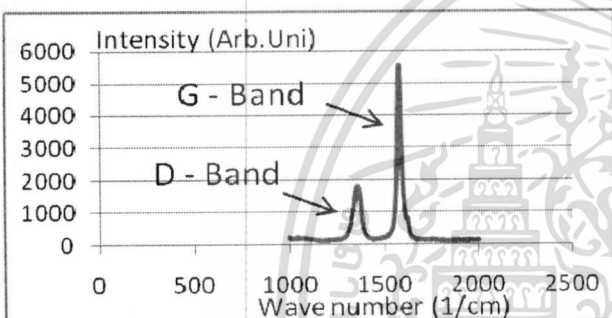


Figure 4. Raman spectrum of MWCNTs sensor

E. Measurement System

The measurement was separated into 2 cases: 1) without heating sensor and 2) heating sensor, and the gas used in this research was alcohol vapor as Figure 5.

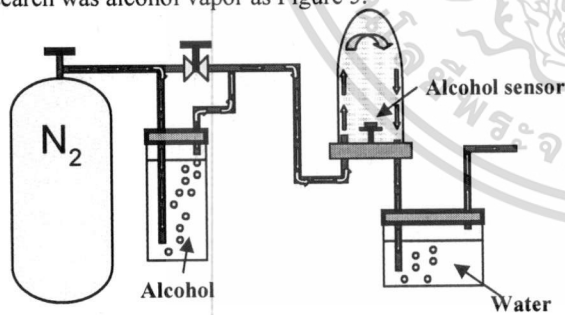


Figure 5. Schematic diagram of measurement system

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Gas sensing characterisation without heating

According to Figure 5, it found that distributing nitrogen at the beginning caused electrical resistance at the stable rate of 1.126 Kilo ohm as Figure 6 shows. When opening valve in order that nitrogen conducted alcohol vapor into the system,

the resistance had significantly increased until being saturated at approximately 1.144 Kilo ohm. This reaction took about 17 minutes and the increasing rate was 1.598%. Thereafter, closing the valve of alcohol vapor distribution, the resistance had considerably decreased to approximately 1.132 Kilo ohm. Even though re-implementing the experiment, the results were similar.

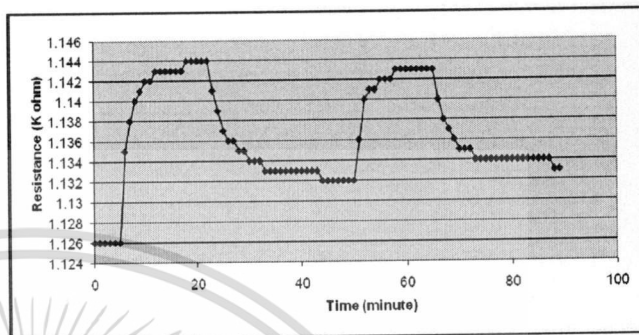


Figure 6. Response of the MWCNTs-based gas sensor resistance without heating

B. Gas sensing characterisation by heating

Refer to Figure 5, it found that distributing nitrogen at the beginning caused electrical resistance at the stable rate of 0.95 Kilo ohm as Figure 7 shows. When opening valve in order that nitrogen conducted alcohol vapor into the system, the resistance had significantly increased until being saturated at approximately 0.986 Kilo ohm. This reaction took about 16 minutes and the increasing rate was 1.598%. Thereafter, closing the valve of alcohol vapor distribution, the resistance had considerably decreased to approximately 0.976 Kilo ohm. Even though re-implementing the experiment, the results were similar.

Generally, the resistance should lower to the same level as at the beginning after completing the experimental process. However, there would be some molecules of alcohol vapor remaining on CNTs film. It took long time before the resistance decreased to the same as the beginning.

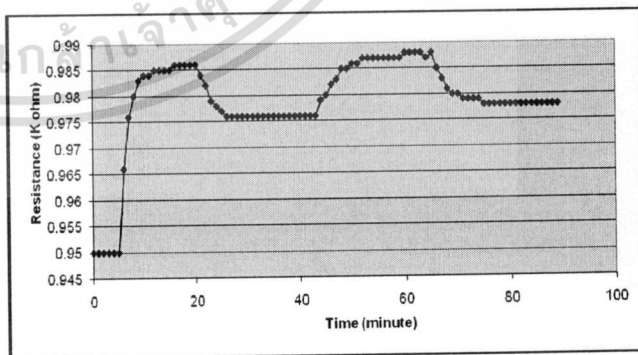


Figure 7. Response of the MWCNTs-based gas sensor resistance by heating

IV. CONCLUSION

The research aims to study how to fabricate alcohol sensor based on multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs). Nickel, as a catalyst, was used to fabricate CNT film with better quality to detect alcohol vapor.

Without heating the sensor, the resistance started at 1.126 Kilo ohm and increased upto 1.144 Kilo ohm, which the difference was only 18 ohm or 1.598%. For heating the sensor, the resistance started at 0.95 Kilo ohm. Due to heating, the quantity of electrons on electrical conduction band was higher. Consequently, the resistance increased upto 0.986 Kilo ohm, which the difference was 36 Ohm or 3.789 %. It was proven that heating to the measurement caused the lower resistance. When implementing the detection, the resistivity rate increased, and the sensitivity was higher. The operation of cylinder-shaped CNT structure caused electrons irregularly scattering around the inside and outside walls [3], effecting the change of electric charge. It found that when detecting alcohol vapor, its electric charge decreased or the resistance increased. This process is a chemical reaction of electricity, which

depends on types of the different gases, temperature, and gas sensing characterization. The results of the study will be useful to develop the CNTs fabrication and other concerned materials.

Acknowledgment

This research was financially supported by the Thailand Research Found.

REFERENCES

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng., B 19 (1993) 181.
- [2] R. F. Service, Science 271 (1996) 1232
- [3] Shu Peng, James O'Keeffe, Chengyu Wei, K. Cho, Jing Kong, Robert Chen, Nathan Franklin, H. Dai, "Carbon Nanotube Chemical and Mechanical Sensors" Conference Paper for the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring ,(2-3)





GRC Khon Kaen University
2012
 Graduate Research Conference

รวมบทความย่อ

การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัย
 ระดับบัณฑิตศึกษารั้งที่ 13
 วันศุกร์ที่ 17 กุมภาพันธ์ 2555
 ณ วิทยาลัยการปกครองท้องถิ่นและอาคารศูนย์วิชาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY



เซนเซอร์ท่อานาโนคาร์บอนสำหรับจมูกอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการตรวจสอบเบียร์สด

Carbon Nanotubes Sensor for Draft Beer Electronic Nose Application

ชลินทร์ สุทธิเนตร (Chalin Sutthinat)* อัสสุชล แสงนวล (Assuchol Sangnual)*

ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกุล (Dr.Toempong Phetchakul)**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างหัววัดแอลกอฮอล์ด้วยท่อานาโนคาร์บอน และระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ในการแยกแยะเบียร์สดชนิดต่าง ๆ เพื่อที่จะประยุกต์เป็นระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ด้วยหัววัดท่อานาโนคาร์บอนต่อไป ในส่วนของหัววัดท่อานาโนคาร์บอน ถูกสร้างด้วยวิธีคตะกอนไอระเหยทางเคมีแบบความร้อนกับก๊าซไนโตรเจน และแบบขดลวดความร้อนกับก๊าซไฮโดรเจน ผลการทดสอบกับแอลกอฮอล์ ปรากฏว่าแบบที่สร้างด้วยลวดความร้อนกับก๊าซไฮโดรเจน ให้ผลตอบสนองที่ดีกว่า สำหรับระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ ใช้หัววัดในท้องตลาดหลาย ๆ ชนิดรวมกันเป็นอาร์เรย์วิธีการวิเคราะห์ผลใช้วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ผลที่ได้สามารถแยกแยะเบียร์สดสามชนิดที่แตกต่างกันได้

ABSTRACT

This paper presents the synthesis of Carbon nanotubes (CNTs) sensor for alcohol detecting and electronic nose (E-Nose) System for distinguishing difference kind of draft beer for CNTs E-nose application in the future. The CNTs sensor were synthesized by thermal CVD with nitrogen gas and hot-filament CVD with hydrogen gas. The result show that by hot filament CVD with hydrogen gas received the respond better than by thermal CVD with nitrogen gas. In E-nose system many kind of commercial sensor were used as an array. The processing method by PCA (Principal Component Analysis) was used. Three kind of draft bear can be distinguished.

คำสำคัญ: จมูกอิเล็กทรอนิกส์ ท่อานาโนคาร์บอน เซ็นเซอร์ก๊าซ

Key Words: Electronic Nose, CNTs, Gas sensor

* มหามบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

** รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

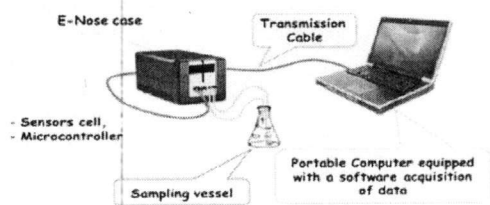
บทนำ

ขบวนการหรือขั้นตอนในการผลิตเครื่องดื่มประเภทแอลกอฮอล์ เช่น สุรา และ เบียร์ ต่าง ๆ ในธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม การจะควบคุมคุณภาพทั้งในเรื่องของรสชาติ กลิ่นหอม และ ปริมาณแอลกอฮอล์ จะต้องใช้เครื่องมือ ตรวจสอบ สารต่าง ๆ ที่อยู่ในเครื่องดื่มเหล่านั้น โดยต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีที่มีราคาแพง เช่น เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ และ เครื่องวิเคราะห์หาองค์ประกอบสารเคมี เพื่อหาสารประกอบที่สำคัญ เช่น ปริมาณแอลกอฮอล์ ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ เพราะต้องอาศัยการสุ่มตรวจเป็นระยะ และ ต้องนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ยังห้องปฏิบัติการทางเคมี และ ต้องใช้ความชำนาญของมนุษย์ในการตรวจสอบเรื่องกลิ่น สี และ รสชาติ หากมีเครื่องมือบางอย่างที่จะสามารถช่วยงานเหล่านี้ได้ จมูกอิเล็กทรอนิกส์จึงน่าจะเหมาะสมในการนำมาใช้งานเพื่อสร้างระบบตรวจสอบคุณภาพในขบวนการผลิตเบียร์ในเบื้องต้น เนื่องจากมีความเหมาะสมทางด้านราคา และ สะดวกในการพกพาไปใช้ในงานยังที่ต่างๆ

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. ระบบการวัด

จมูกอิเล็กทรอนิกส์หรือระบบตรวจวัดก๊าซด้วยเซนเซอร์อาร์เรย์มีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้ จากรูปที่ 1 จะมีส่วนที่ใส่ตัวอย่างที่จะทำการตรวจวัด ส่วนของเซนเซอร์วัดก๊าซ ส่วนของวงจรวัด ส่วนของวงจรเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ส่วนของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล (Pearce, 2009; AMARI, 2009)



รูปที่ 1 จมูกอิเล็กทรอนิกส์

2. จมูกอิเล็กทรอนิกส์

จมูกอิเล็กทรอนิกส์คือการเลียนแบบการรับรู้กลิ่นของสิ่งมีชีวิต จมูกของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติจะรับรู้กลิ่นได้โดยเมื่อมีอนุภาคของกลิ่นฟุ้งไปในอากาศ เมื่อไปกระทบกับ ค่อมรับรับรู้กลิ่นในโพรงจมูก ค่อมรับรู้กลิ่นจะมีอยู่จำนวนมากซึ่งแต่ละชนิดจะมีการตอบสนองต่อกลิ่นแต่ละแบบที่แตกต่างกันไปเมื่อ ค่อมรับรู้กลิ่นตอบสนองต่อกลิ่นต่างๆ นั้นแล้วก็จะส่งสัญญาณ ไฟฟ้าเคมี ไปยังสมอง สมอง จะทำการประมวลผล โดยการเปรียบเทียบกับกลิ่นที่เคยจดจำได้ในอดีต จากความทรงจำนำมาประมวลผลเทียบเคียง จึงแยกแยะได้ออกว่าเป็นกลิ่นอะไร จำนวนของ ค่อมรับกลิ่นในโพรงจมูกนั้นมีจำนวนมหาศาล เทียบกับ เซนเซอร์ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นได้ในปัจจุบัน การที่จะเลียนแบบการทำงานของจมูกจริงๆ จึงเป็นการยากที่จะทำได้ละเอียดอ่อนเท่ากับจมูก และ สมองของสิ่งมีชีวิต อีกทั้ง เซลล์สมองของสิ่งมีชีวิตก็มีจำนวนมากมายมหาศาลที่จะใช้ประมวลผลในการแยกแยะกลิ่นต่างๆ จมูกอิเล็กทรอนิกส์จึงยังอยู่ในขั้นเริ่มต้นที่จะต้องพัฒนาต่อไป (Pearce, 2009)

3. การสร้างเซนเซอร์

เซนเซอร์ที่ใช้ในจมูกอิเล็กทรอนิกส์นี้จะมีอยู่สองชนิดคือ

- 1) เซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอน
- 2) เซนเซอร์ออกไซด์โลหะ

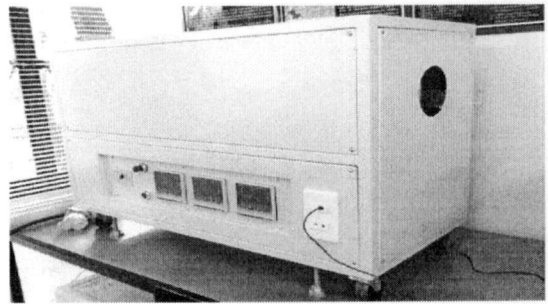
โดยการสร้างระบบวัดจำเป็นต้องใช้เซนเซอร์จำนวนหลายตัวเพื่อหาเอกลักษณ์ของกลิ่นต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องใช้เซนเซอร์ที่มีจำหน่ายมาใช้ประกอบรวมกันกับเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนที่เราสร้างขึ้นเอง เพราะเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนทำการแยกแยะก๊าซได้ดีเพียงบางกลุ่มก๊าซเท่านั้น การตั้งคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน เราเลือกใช้วิธีการตกตะกอนไอเคมีด้วยความร้อนหรือเทอร์มอลซีวีดี (Thermal Chemical Vapor Deposition) โดยจะให้การให้ความร้อนสองแบบด้วยกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) เตาความร้อนแบบสามโซน (Three Zone Furnace)

2) ขดลวดความร้อน (Hot Filament)

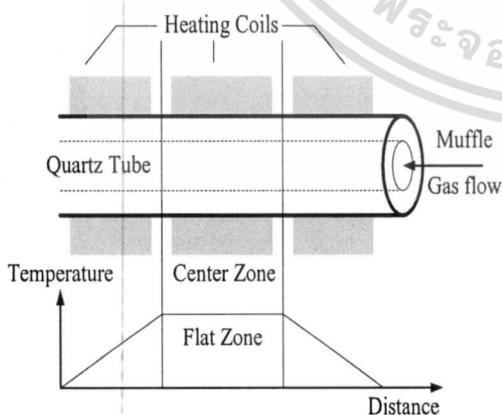
วิธีเตาความร้อนแบบสามโซน (Three Zone Furnace) วิธีนี้จะใช้ก๊าซในโตรเจนเป็นก๊าซในการทำงาน เตาความร้อนแบบสามโซนแสดงโครงสร้างและลักษณะของเตาดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 จะให้อุณหภูมิที่นิ่งในบริเวณกลางเตา เมื่อเราจ่ายสารที่จะทำปฏิกิริยาเข้าไปโดยจะเป็นสารที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน เมื่อสารนั้นแตกตัวจากความร้อนแล้วจากนั้นมันรวมตัวกันใหม่โดยจะไปจับตัวกันตามคะตะลิสต์ที่เป็นโลหะ เกิดเป็นท่อานาโนคาร์บอนขึ้นมาตามจุดที่เราต้องการ จากการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขต่างๆ ผลที่ได้จะนำมาทำการเปรียบเทียบถึงผิวหน้าของการเกิดท่อานาโนคาร์บอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาในการเกิดท่อานาโนคาร์บอน รวมถึงการเรียงตัวหรือการจัดระเบียบของท่อานาโนคาร์บอนจากนั้นจะนำมาทำการทดสอบการใช้ท่อานาโนคาร์บอนมาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซในกลุ่มแอลกอฮอล์ โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าของท่อานาโนคาร์บอนเมื่อมีการดูดซับแอลกอฮอล์เพื่อทดสอบว่าท่อานาโนคาร์บอน ที่สร้างจากเงื่อนไขใดให้คุณสมบัติในการเป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ที่ดี



รูปที่ 3 เตาความร้อนแบบสามโซนที่ใช้ในการสร้างท่อานาโนคาร์บอน

การสังเคราะห์ท่อานาโนคาร์บอนมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์จะมีด้วยกัน 3 เงื่อนไข คือ อุณหภูมิที่ทำกรสังเคราะห์ เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ และอัตราการไหล โดยโลหะคะตะลิสต์ ที่ใช้เป็นิกเกิด

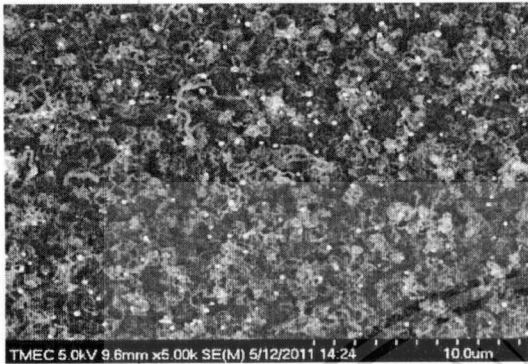
- 1) เปิดเตาความร้อนรอให้ได้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นส่งฐานรองเข้าไปในเตา โดยใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 5 นาทีต่อการเคลื่อนที่เข้าไปหนึ่งครั้งจนไปถึงบริเวณกลางเตา
- 2) ปล่อก๊าซในโตรเจนเข้าไปในระบบ
- 3) ปรับอุณหภูมิของเตาความร้อนที่จะใช้ให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ ประมาณ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นเปิดแก๊สในโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.2 cc/min เข้าไปในเตาความร้อนเพื่อไล่อากาศออกจากเตาไม่ให้เกิดการออกซิไดซ์เมื่อทำการจ่ายแอลกอฮอล์ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที
- 4) หลังจากที่เราใช้วิธีแบบความร้อนมีอุณหภูมิตามที่ต้องการสังเคราะห์ท่อานาโนคาร์บอนแล้ว ปิดแก๊สในโตรเจน แล้วก็เปิดแอลกอฮอล์ที่มีอัตราการไหล 0.3 cc/min เข้าไปในเตาใช้วิธีแบบตามเวลาที่ต้องการใช้ในการสังเคราะห์ท่อานาโนคาร์บอน
- 5) จากนั้นปิดแอลกอฮอล์แล้วเปิดแก๊สในโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.2 cc/min พร้อมทั้งปรับอุณหภูมิของเตาใช้วิธีแบบความร้อนให้เหลือ 500 องศาเซลเซียส



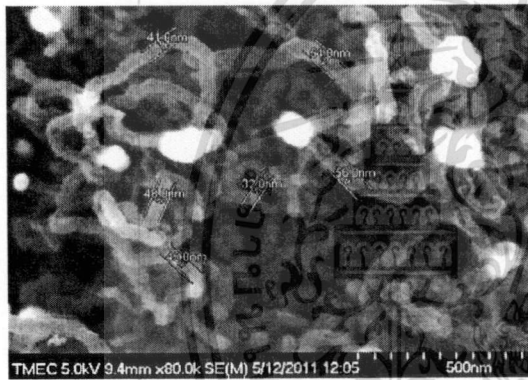
รูปที่ 2 โครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

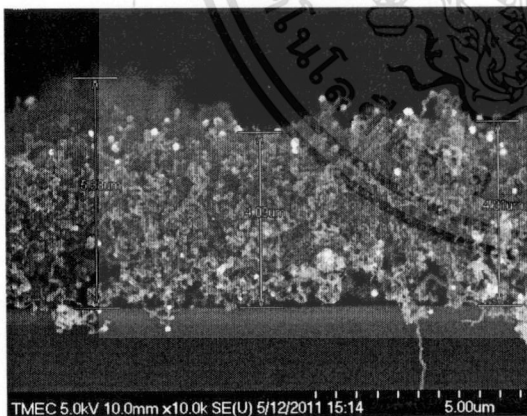
6) เมื่ออุณหภูมิถึง 500 องศาเซลเซียส แล้วจึงปิดก๊าซไนโตรเจน จากนั้นปล่อยให้เย็นก่อนนำมาใช้งาน



(ก)



(ข)

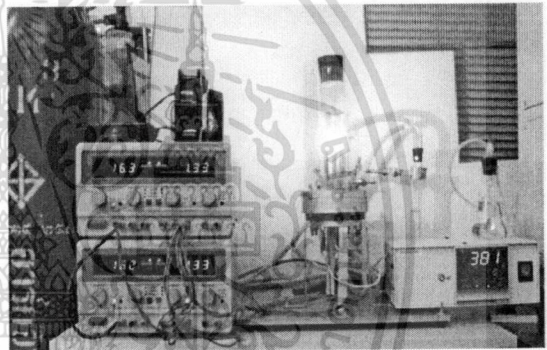


(ค)

รูปที่ 4 ภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ (ก) กำลังขยาย 5,000เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000เท่า (ค) ภาพตัดขวางของฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน

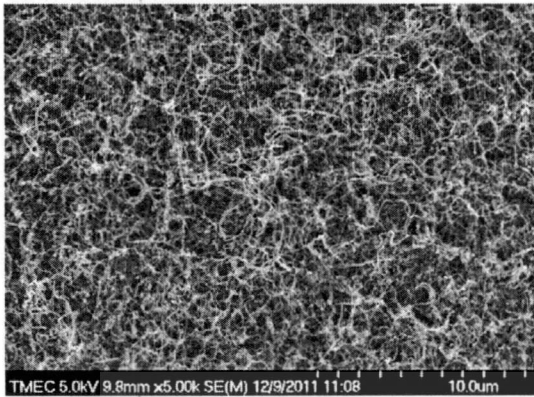
จากรูปที่ 4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเส้นงอ ขนาดของเส้นสม่ำเสมอ ขนาดของท่ออยู่ในช่วง 32.0-56.0 nm และมีความสูงอยู่ในช่วง 4.31-5.38 um สังเกตจุดสีขาวที่ปรากฏนั้นคือ โลหะคะตะลิสต์นิกเกิล ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนในครั้งนี้เกิดท่อนาโนคาร์บอนในลักษณะการเกิดแบบ Tip growth คือ โลหะคะตะลิสต์จะอยู่ด้านบนของปลายท่อ

การสร้างเซนเซอร์จากวิธีไอระเหยทางเคมีแบบขดลวดความร้อน (Hot Filament Chemical Vapor Deposition: HF-CVD)

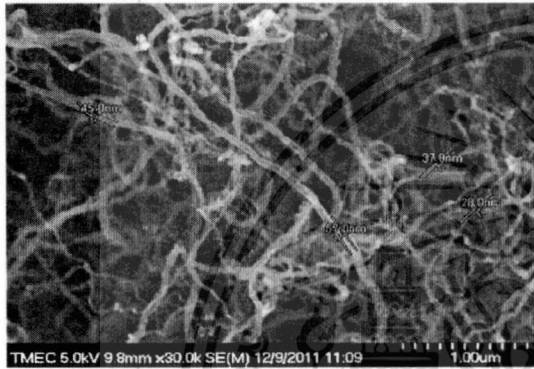


รูปที่ 5 เป็นการสร้างเซนเซอร์จากวิธีไอระเหยทางเคมีแบบขดลวดความร้อน (Hot Filament Chemical Vapor Deposition: HF-CVD)

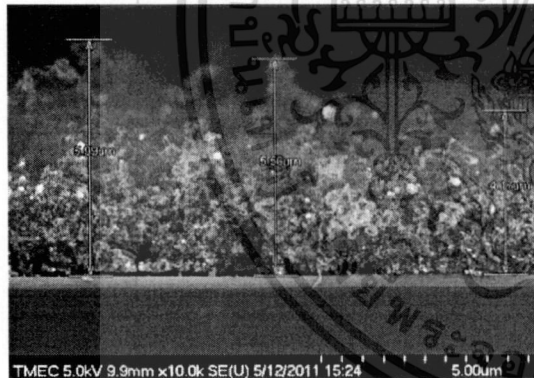
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

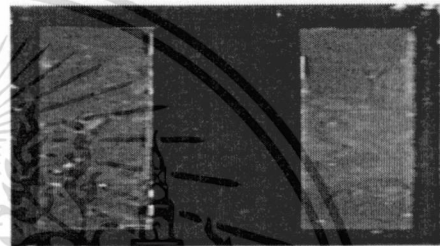


(ค)

รูปที่ 6 ภาพถ่าย SEM ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Hot-filament CVD (HFCVD) (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า (ค) ภาพตัดขวางฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน

จากรูปที่ 6 เป็นการสร้างเซนเซอร์จากวิธีไอระเหยทางเคมีแบบขดลวดความร้อน (Hot Filament Chemical Vapor Deposition:HF-CVD)วิธีนี้จะใช้ก๊าซ

ไฮโดรเจนเป็นก๊าซทำงาน เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดของเส้นสม่ำเสมอ ขนาดของท่ออยู่ในช่วง 28.0-57.0 nm และความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วง 4.17-5.99 um จากการดูผลจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) จากรูปที่ 6 (ค) เป็นที่น่าสังเกตว่าลักษณะของเส้นเหยียดตรงกว่าจากการสร้างด้วยวิธีเตาความร้อนแบบสามโซน (รัฐพงษ์, 2551)



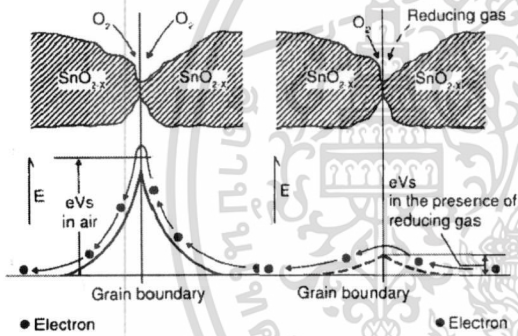
รูปที่ 7 เซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนที่สร้างเสร็จ

เซนเซอร์ในการใช้งานจะทำขั้วต่อออกไปใช้งานจากฐานรองซิลิกอนในรูปที่ 7 นำไปยึดติดกับตัวนำ โดยมีกาวเงินเป็นตัวยึดลวดตัวนำเข้ากับแผ่นฐานรองซิลิกอนได้เป็นเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอน

เซนเซอร์ก๊าซชนิดออกไซด์ของโลหะ เซนเซอร์ก๊าซชนิดออกไซด์ของโลหะที่เราเลือกมาใช้จะมีส่วนตรวจจับก๊าซ สร้างจากสนิมหรือออกไซด์ของโลหะเช่นออกไซด์ของดีบุก (SnO_2) เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ส่วนให้ความร้อนของเซนเซอร์โมเลกุลของออกซิเจน จะไปเกาะตัวที่ผิวของผลึกออกไซด์โลหะด้วยประจุที่เป็นลบ (Negative charge) ทำให้เกิดศักย์ขึ้นที่ผิวและประจุบวกอยู่ภายนอกจึงแสดงแบบจำลองในรูปที่ 8 ด้านซ้ายมือโมเลกุลของออกซิเจนสร้างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างผลึกออกไซด์ซึ่งเกิดขบวนการไหลของอิเล็กตรอน จึงทำให้ความต้านทานของเซนเซอร์เพิ่มขึ้น เมื่อมีตัวอย่างที่ต้องการวัดผ่านเข้ามาทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง หรือทำให้เกิด การ Deoxidizing ทำให้เกิดการดึงออก ออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากผิวของผลึกออกไซด์โลหะทำให้ความหนาแน่นประจุลบที่ผิวผลึกออกไซด์โลหะลดลงและทำให้ศักย์ไฟฟ้าซึ่งขัดขวางการไหลของอิเล็กตรอนลดลงดังในรูปที่ 8 ด้านขวามือ โดยความสัมพันธ์ของความต้านทานและความเข้มข้นดูได้จากสมการที่ 1 และรูปที่ 9 โดย แสดงในหน่วย ppm และสัดส่วนความต้านทาน R_S/R_0 ที่จะมีค่าลดลงถ้าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเซนเซอร์ก๊าซ ที่เลือกจะใช้รุ่น MQ2, MQ3, MQ4, MQ5, MQ6, MQ7, TGS286, TGS2602 ซึ่งเป็นกลุ่มที่ใช้ตรวจวัดก๊าซทั่ว ๆ ไปมีรายละเอียดก๊าซที่ตรวจวัดดังในตารางที่ 1 การต่อใช้งานแสดงดังรูปที่ 10 ใช้ไฟเลี้ยง 5 โวลท์ (Figaro Engineering Inc., 2010; Hanwei Electronics co.,Ltd, 2011)



รูปที่ 8 กลไกการทำงานของเซนเซอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซนเซอร์และความเข้มข้นของ Deoxidizing gas ดังสมการที่ 1

$$R_S = AC^{-\alpha} \quad (1)$$

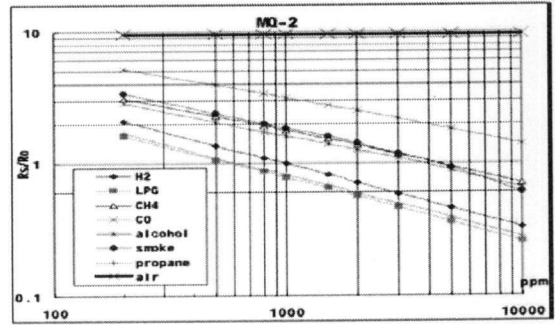
R_S คือ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์

A คือ ค่าคงที่

C คือ ค่าความเข้มข้นของก๊าซ

α คือ ค่าความชันของกราฟความ

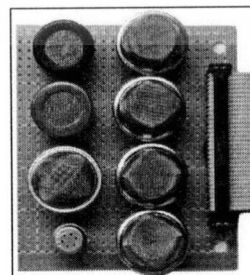
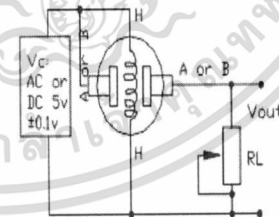
ต้านทาน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอัตราส่วนความต้านทาน

ตารางที่ 1 เซนเซอร์ก๊าซที่นำมาใช้และชนิดของก๊าซ

ตัวที่	รุ่น	ชนิดก๊าซที่ตรวจจับ
1	MQ2	General Combustible
2	MQ3	Alcohol
3	MQ4	Natural, Methane
4	MQ5	LPG, Natural, Coal
5	MQ6	LPG, Propane
6	MQ7	Carbon Monoxide
7	TGS286	Ammonia
8	TGS2602	Air Contaminants

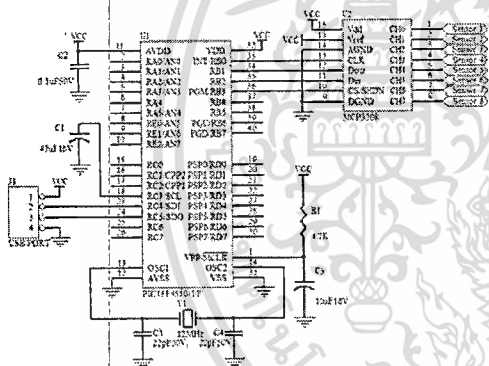


รูปที่ 10 วงจรเซนเซอร์และหัวเซนเซอร์ชนิดออกไซด์โลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วงจรเชื่อมต่อ (Interface)

การเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์กับคอมพิวเตอร์จะแสดงดังรูปที่ 11 เราเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และไอซีแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลของบริษัทไมโครชิพเทคโนโลยี (Microchip Technology Inc.) ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC18F4550 โดยมี USB Port อยู่ภายใน โดยใช้ USB Port ในการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์การทำงานของไมโครคอมพิวเตอร์ จะจัดการอ่านค่าจากไอซีแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลเบอร์ MPC3208 ติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูปแบบ SPI serial interface ไอซีตัวนี้มีความละเอียด 12 Bit โดย A to D หนึ่งตัวจะรับแรงดันจากเซนเซอร์ได้ 8 ตัวจากนั้นส่งค่าไปประมวลผลยังคอมพิวเตอร์ต่อไป



รูปที่ 11 วงจรเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์

5. วิธีการประมวลผล

การเปลี่ยนแปลงความต้านทานในรอบการวัดแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง $\Delta R\%$ โดยสามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานสูงสุดและต่ำสุดในรอบการวัดดังสมการที่ 2

$$\Delta R\% = \frac{R_{MAX} - R_{MIN}}{R_{MIN}} \times 100 \quad (2)$$

R_{MAX} คือ ค่าความต้านทานสูงสุดในรอบการวัด
 R_{MIN} คือ ค่าความต้านทานต่ำสุดในรอบการวัด

วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis) PCA เป็นวิธีการทางสถิติที่นิยมใช้กันมากวิธีหนึ่งในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางสถิติหลายตัวแปร เพื่อหาลักษณะและความสัมพันธ์ที่เป็นรูปแบบเฉพาะตัวของกลุ่มตัวแปร ถูกใช้ในงานหลายๆ ด้านทางวิศวกรรมศาสตร์เกี่ยวกับงาน วิเคราะห์สัญญาณการบีบอัดสัญญาณการเข้ารหัสการแยกแยะสัญญาณเป็นต้น โดยในที่นี้เราจะมาใช้เพื่อหาลักษณะเฉพาะของเบียร์สด การทำงานของ PCA แบ่งขั้นตอนได้ดังนี้ การจัดรูปแบบข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์แต่ละตัวและจำนวนครั้งในการเก็บข้อมูลจะจัดข้อมูลเป็นแบบเมตริกซ์ จำนวนเซ็นเซอร์ทั้งหมดจัดเป็น Columns และจำนวนครั้งของข้อมูลที่ทำการบันทึกจัดเป็น Rows หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ลบด้วยค่าเฉลี่ยของทุก Columns เมื่อจัดรูปแบบข้อมูลแล้วคำนวณหา Covariance เมตริกซ์ และหาค่า eigenvector และ eigenvalue จาก Covariance เมตริกซ์ ผลลัพธ์จาก PCA จะได้ค่า eigenvalues และ eigenvector ซึ่งข้อมูลทั้งสองมีความสมนัยซึ่งกันและกัน ขั้นตอนสุดท้ายคือการแปลงเพื่อแสดงเป็นภาพฉาย โดยจะเลือกแกนจากเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ eigenvector ที่มีการกระจายสูงสุด 3 แกนที่พิจารณาจากค่าของ eigenvalue สามารถกำหนดได้คือ Projection 1 (PC1), Projection 2 (PC2) และ Projection 3 (PC3) ทั้งสามแกนสามารถแสดงเป็นภาพฉายได้ในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับชุดข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์ และเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยวิเคราะห์จำแนกข้อมูลของกลิ่นตัวอย่างได้ แสดงสมการการคำนวณดังนี้ (รุ่งโรจน์, 2550)

$$X = [x^{(1)} x^{(2)} x^{(3)} \dots x^{(n)}] \quad (3)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_1^{(2)} & x_1^{(3)} & \dots & x_1^{(n)} \\ x_2^{(1)} & x_2^{(2)} & x_2^{(3)} & \dots & x_2^{(n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_m^{(1)} & x_m^{(2)} & x_m^{(3)} & \dots & x_m^{(n)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{x} = \sum_{k=1}^n x_i^{(k)} ; i = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

$$x^j = x^j - \bar{x} ; j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n x_i^{(k)} x_j^{(k)} \quad (7)$$

; $k = 1, 2, \dots, n.$

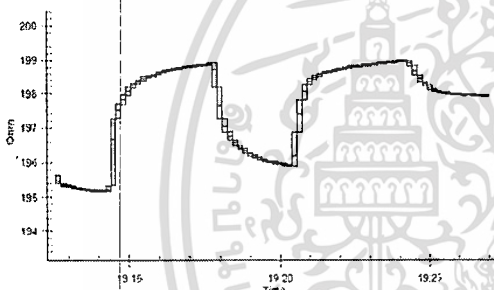
$$S(X) = \frac{1}{n-1} XX^T \quad (8)$$

$$XX^T = \frac{1}{(n-1) \sum_{k=1}^n (x^{(k)} - \bar{x})(x^{(k)} - \bar{x})^T} \quad (9)$$

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. หัววัดท่อนาโนคาร์บอน

การทดสอบเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนที่สร้างจากวิธีเตาความร้อนแบบสามโซนกับการวัดไอระเหยของแอลกอฮอล์

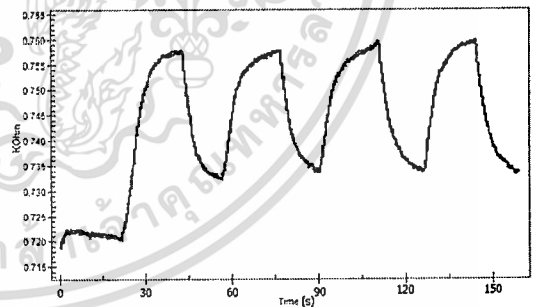


รูปที่ 12 ค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดสารตัวอย่าง ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) โดยใช้เซนเซอร์ที่สร้างโดยใช้วิธีที่ได้จากเตาความร้อนแบบสามโซน (Three Zone Furnace)

จากรูปที่ 12 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดที่อุณหภูมิห้อง พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายในโตรเจนเข้ามาในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 195.4 โอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ในโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆหนึ่งคือเริ่มอ้อมตัวอยู่ที่ประมาณ 198.8 โอห์ม ใช้เวลาประมาณ 0.03 นาทีซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 1.535% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลง

ลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่งประมาณ 195 โอห์ม และเมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

การทดสอบเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนที่สร้างจากวิธีขดลวดความร้อน (Hot Filament) กับการวัดแอลกอฮอล์จากรูปที่ 13 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายในโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 720 โอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ในโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดๆหนึ่งคือเริ่มอ้อมตัวอยู่ที่ประมาณ 758 โอห์ม ใช้เวลาประมาณ 20 นาที ซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 5.27 % ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่งประมาณ 735 โอห์มและเมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน



รูปที่ 13 ค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดสารตัวอย่าง ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) แบบขดลวดความร้อน (Hot Filament)

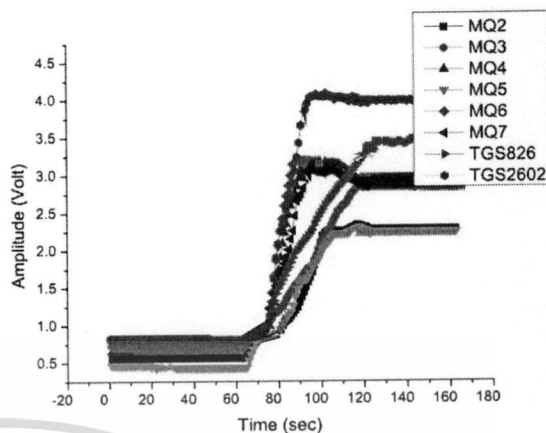
จากการทดลองพบว่า การนำเอาฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนไปใช้เป็นเซนเซอร์ทั้งวิธีเตาความร้อนแบบสามโซนและแบบวิธีไอระเหยทางเคมีแบบขดลวดความร้อน (HF-CVD) เปรียบเทียบกัน ผลปรากฏว่า ฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนจากการสร้างด้วยวิธีไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

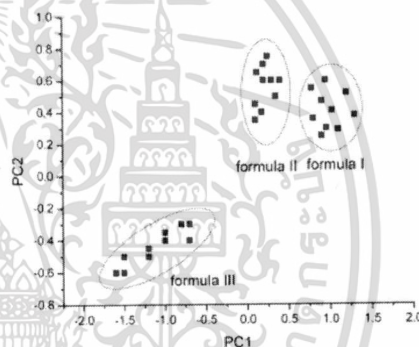
ระเหยทางเคมีแบบขดลวดความร้อน (HF-CVD) ให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าเตาความร้อนแบบสามโซน (Three Zone Furnace)

2. ระบบจมูกอิล็กทรอนิกส์

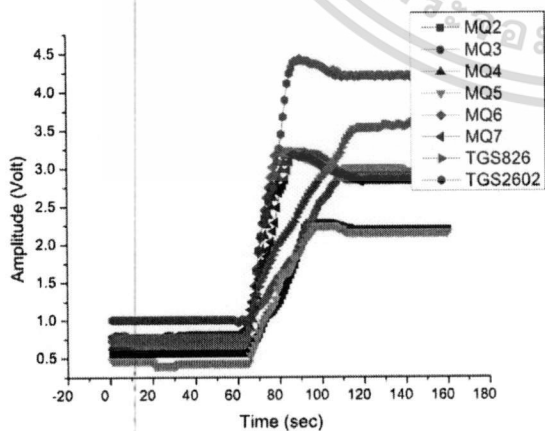
ระบบจมูกอิล็กทรอนิกส์ใช้เซนเซอร์ออกไซด์ของโลหะ ในการวัดจะใช้สารตัวอย่าง (Sample) และสารมาตรฐาน (Standard solution) ที่เราทราบปริมาณแอลกอฮอล์ที่แน่นอนจากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมี รวมทั้งเบียร์สดสูตรต่าง ๆ ที่มีความเข้มข้นและรสชาติที่แตกต่างกันใช้ทั้งหมด 3 สูตร มาเป็นตัวเปรียบเทียบ จากกราฟรูปที่ 14 และ 15 การตอบสนองของเซนเซอร์ต่อเบียร์สดแต่ละสูตรนั้น จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปทำให้แยกแยะได้ว่าเบียร์ที่นำมาเป็นตัวอย่งนั้นคือเบียร์สดชนิดใดจากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์หาเอกลักษณ์ของมันโดยใช้วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis :PCA) ทำให้ได้กราฟออกมาดังรูปที่ 16 ทำการวัดทั้งหมด 10 ครั้งทำให้เห็นถึงลักษณะที่แตกต่างกันคือเบียร์สดสูตรที่ 1 กับสูตรที่ 2 นั้นมีความเข้มข้นของรสชาติมากปริมาณแอลกอฮอล์ค่อนข้างสูงแต่ได้สมุนไพรรสชาติและการหมักบ่มต่างกัน ส่วนสูตรที่ 3 นั้นเป็นเบียร์อย่างอ่อนปริมาณแอลกอฮอล์ไม่เข้มข้นมารสชาติจะเบาบางกว่าซึ่งผลที่ได้ก็สัมพันธ์กันกับการวิเคราะห์ทางเคมี



รูปที่ 15 การตอบสนองของเซนเซอร์เทียบกับเวลา วัดครั้งที่สอง



รูปที่ 16 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA)



รูปที่ 14 การตอบสนองของเซนเซอร์เทียบกับเวลา วัดครั้งแรก

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการสร้างเซนเซอร์ที่อนาโนคาร์บอน และพัฒนาระบบจมูกอิล็กทรอนิกส์ที่ใช้เซนเซอร์ออกไซด์โลหะควบคู่กันไป ซึ่งเมื่อได้เซนเซอร์ที่อนาโนคาร์บอนที่มีการตอบสนองที่ดีแล้วจะได้นำมาใช้ร่วมกับระบบจมูกอิล็กทรอนิกส์ในอนาคต เราพบว่าการสร้างฟิล์มที่อนาโนคาร์บอนใช้วิธีโอรเซเหยเคมีแบบขดลวดความร้อน (Hot Filament) โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยาจะให้คุณภาพของเซนเซอร์ที่ดีกว่าวิธีการสร้างโดยใช้เตาความร้อนแบบสามโซน (Three Zone Furnace) ที่ใช้ก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนโตรเจน เพราะฉะนั้นจึงควรจะได้้นำวิธีการสร้างฟิล์มด้วยวิธีขจัดความรื้อนกับก๊าซไฮโดรเจนนำไปใช้ต่อไป

ส่วนของระบบวัดจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เซนเซอร์ชนิดออกไซด์ของโลหะเป็นเซนเซอร์ เมื่อนำมาตรวจสอบเบียร์สด ที่มีสูตรแตกต่างกันทำให้สามารถแยกแยะเบียร์สดได้ โดยใช้วิธีเปรียบเทียบกับสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเนื่องมาจากอุณหภูมิความชื้นในขณะที่ทำการวัด ที่มักไม่เท่ากันในแต่ละตัวอย่างเนื่องจากเบียร์สดจะต้องจัดเก็บและหมักในที่ที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำเพื่อรักษารสชาติเมื่อนำออกมาวัดก็จะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความชื้นจะทำให้ไอน้ำมาเกาะที่หัวเซนเซอร์ จะมีผลต่อการวัดมาก จากการสร้างระบบวัดเพื่อตรวจสอบหาเอกลักษณ์และปริมาณแอลกอฮอล์ในเครื่องดื่มประเภทเบียร์สด ปัจจัยหลายอย่างในการผลิตนั้นมีความไม่แน่นอนทำให้เกิดปริมาณแอลกอฮอล์และกลิ่นรสที่แตกต่างกันการสร้างจมูกอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ตรวจสอบนี้มีประโยชน์ต่อผู้ผลิตเบียร์สดเพื่อใช้ตรวจสอบและควบคุมคุณภาพในเบื้องต้น ซึ่งเซนเซอร์ที่อนา โนคาร์บอนและระบบการวัดของจมูกอิเล็กทรอนิกส์นั้นก็ยังอยู่ในขั้นตอนที่จะต้องมีการพัฒนาให้ก้าวหน้ากันต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทางด้านงบประมาณในโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- T.C.Pearce,S.S.Schiffman, H.T.Nagle, and
J.W.Gardner. 2009. Handbook of Machine
Olfaction Electronic Nose Technology.
WILEY-VCH Verlag GmbH &Co.KGaA.

- Aziz AMARI, Nezha EL BARI, Benachir
BOUCHIKHI. 2009. Conception and
Development of a Portable Electronic Nose
System for Classification of Raw Milk
Using Principal Component Analysis
Approach.
Figaro Engineering Inc. 2010. Production catalogue.
Figaro_TGS_Series.pdf.
Hanwei Electronics co.,Ltd. 2011. Technical data MQ
series.

- รัฐพงษ์ นาคาไชย. 2551. วิทยานิพนธ์ปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง.
รุ่งโรจน์ เมลานนท์. 2550. การจำแนกตัวอย่างกลิ่น
น้ำหอมด้วยจมูกอิเล็กทรอนิกส์. การประชุม
วิชาการนเรศวรวิจัยครั้งที่ 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอัสสุชล แสงนวล
วัน เดือน ปีเกิด	6 กรกฎาคม พ.ศ. 2528
ที่อยู่	127 หมู่ 3 ตำบลควนโส อำเภอกวนเนียง จังหวัดสงขลา 90220
ประวัติการศึกษา	2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. อัสสุชล แสงนวล, ชลินทร์ สุทธิเนตร, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “ผลของอุณหภูมิแวดล้อมที่มีต่อการตรวจจับแอลกอฮอล์ของเซนเซอร์แบบคาร์บอนนาโนทิวบ์” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 EL032 pp.1157-1160
2. อัสสุชล แสงนวล, ชลินทร์ สุทธิเนตร, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “เครื่อง CVD แบบความร้อนสำหรับคาร์บอนนาโนทิวบ์” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 EL032 pp.1149-1152
3. Toempong Phetchakul, Assuchol Sangnual and Chalin Sutthinet
“Investigation on Temperature Effect on Alcohol Sensing of Multi-Walled Carbon Nanotube” IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems February 20-23, 2011, pp. 363-366
4. Chalin Sutthinet, Assuchol Sangnual, Toempong Phetchakul “Alcohol Sensor Based on Multi-Wall Carbon Nanotube” International Symposium on Integrated Circuits (ISIC) 2009 pp. 321-323
5. ชลินทร์ สุทธิเนตร, อัสสุชล แสงนวล, ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “เซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับจุ่มกิโลอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการตรวจสอบเปียร์สด” Gordon Research Conferences Current Meetings 2012 pp. 236-245