

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์
จมูกอิเล็กทรอนิกส์โดยคาร์บอนนาโนทิวป์เซนเซอร์
Electronic nose by Carbon nanotube sensor



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ 2554
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
TK
๗๘๗๔.๘

เอกสาร สำนักหอสมุดกลาง สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขที่ 130296
เลขทะเบียน 2
วัน เดือน ปี 2 โท. 2557

b. 12598331

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องก่อนหน้านี้มาโดยตลอด ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในการเอื้อเฟื้อสถานที่และห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในการวิจัยต้นแบบ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ นายชลิน สุทธเนตร ในการพัฒนาระบบจุมุกอิเล็กทรอนิกส์ และนาย อสุชล แสงนวล ในการสร้างหัวเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงแก่ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือเป็นกัลยามิตรไม่ว่าโดยตรงหรือโดยอ้อมก็ตาม อาทิเช่นคณะกรรมการพิจารณาให้ทุนสนับสนุน เป็นต้น และหวังว่าจะได้รับการสนับสนุนการวิจัยในโอกาสต่อไป



รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล
(หัวหน้าโครงการ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)... จมูกอิเล็กทรอนิกส์Fโดยคาร์บอนนาโนทิวป์

ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ) Electronic Nose by Carbon Nanotube sensor

แหล่งเงิน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.(วช.).....

ประจำปีงบประมาณ 2554 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 400,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2553 ถึง กันยายน 2554 ✓

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมล

..... รศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกุล. (หัวหน้าโครงการ).....

..... สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์.....

..... คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....

คำสำคัญ (Keywords) E-nose, carbon nanotube, alcohol sensor.....

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการสร้างระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่มีเซนเซอร์แก๊สในท้องตลาดใช้งานร่วมกับเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างขึ้นเป็นโครงสร้างแอเรย์ โดยทำการตรวจจับสารประกอบที่มีแอลกอฮอล์ในที่นี่คือเบียร์สดสามชนิดที่แตกต่างกัน โดยทำการพัฒนาระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เซนเซอร์แก๊สในท้องตลาดก่อนโดยทำการสร้างทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์และทดสอบการแยกแยะชนิดของเบียร์ ผลปรากฏว่าสามารถแยกแยะได้เป็นอย่างดี ในขั้นตอนต่อมาทำการสร้างเซนเซอร์ท่อคาร์บอนและทดสอบการตรวจจับสารระเหยประเภทแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ผลการทดสอบสามารถตรวจจับได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทำการตรวจจับเบียร์สดปรากฏว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ไม่สามารถตอบสนองสาเหตุเกิดจากความชื้นที่เกิดจากน้ำในเบียร์ ทำการทดสอบกับแอลกอฮอล์ที่มีส่วนผสมของน้ำ ผลปรากฏว่าไม่ตอบสนองซึ่งความชื้นจากน้ำมีผลต่อการทำงานและเป็นข้อจำกัดของเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์

Abstract

This project will create an electronic nose system with commercial gas sensors in coupled with carbon nanotube sensors in array structure. It was applied to detect alcohol compound, three kinds of draft beer. Firstly, the electronic nose was developed with the commercial gas sensors only both in hardware and software. The results showed that it can identify draft beers well. Then the carbon nanotube sensors was synthesized and tested with volatile alcohol. It showed the good response with the volatile alcohol but can not response to any the draft beer and alcohol-water solution. The humidity from water limited the carbon nanotube operation in gas detector.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 คำนำ	6
2.2 ธรรมชาติของก๊าซและคุณสมบัติทั่วไป	6
2.2.1 โมเลกุลและไอออน (Molecules and ions)	7
2.2.2 โมล (Mole)	8
2.2.3 กฎการร่วไหลและการแพร่กระจายของแก๊ส	8
2.3 ก๊าซที่มีความสำคัญต่อมนุษย์	9
2.3.1 ออกซิเจน (Oxygen)	9
2.3.2 ก๊าซตระกูลคาร์บอน (Carbon species)	9
2.3.3 มีเทน (Methane)	10
2.3.4 เบนซีน (Benzene)	10
2.3.5 เมทานอลและเอทานอล (Methanol and ethanol)	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 ไฮโดรเจน (Hydrogen)	11
2.4 การทำงานของจุ่มอิเล็กโทรนิคส์	11
2.5 เซ็นเซอร์รับกลิ่น	13
2.5.1 เซ็นเซอร์แบบแสง (Optical sensor)	14
2.5.2 เซ็นเซอร์แบบความร้อน (Thermal Sensor)	15
2.5.3 เซ็นเซอร์แบบไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Sensor)	16
2.5.4 เซ็นเซอร์แบบวัดน้ำหนัก (Gravimetric)	18
2.6 เซ็นเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	20
2.6.1 โครงสร้างของเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์	22
2.6.2 การทำงานของเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์	22
2.6.3 วงจรของเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์	25
2.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis)	26
2.7.1 ความหมายของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก	26
2.7.2 หลักการของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก	26
2.7.3 จำนวนองค์ประกอบหลัก	29
2.7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเดิมกับตัวประกอบหลัก	30
2.7.5 ชนิดของข้อมูลในการสร้างตัวประกอบหลัก	31
2.7.6 การพิจารณาจำนวนตัวประกอบหลักที่เหมาะสม	31
2.7.7 ความหมายของตัวประกอบหลัก	32
2.8 ค่าไอเกนและไอเกนเวกเตอร์ (Eigen value and eigen vector)	33
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
2.9.1 การเฝ้าระวังมลพิษทางอากาศ	36
2.9.2 การจำแนกตัวอย่างกลิ่นน้ำหอม	36
2.9.3 การจำแนกคุณภาพเนื้อสัตว์	37
2.9.4 การจำแนกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับก๊าซอื่นๆ	38
บทที่ 3 ทฤษฎีของคาร์บอน	40
3.1 รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน	40
3.1.1 โครงสร้างแบบศูนย์มิติ	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 โครงสร้างแบบหนึ่งมิติ	41
3.1.3 โครงสร้างแบบสองมิติ	41
3.1.4 โครงสร้างแบบสามมิติ	42
3.2 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes; CNTs)	42
3.2.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes; SWNT)	43
3.2.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes; MWNT)	44
3.3 ทฤษฎีการเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวป์	45
3.4 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน	47
3.4.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge)	47
3.4.2 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Ablation)	48
3.4.3 วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD)	49
3.5 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน	51
3.5.1 สมบัติเชิงกล	51
3.5.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า	53
3.5.3 คุณสมบัติทางความร้อน	53
3.6 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน	54
3.6.1 ตัวเก็บพลังงาน (energy storage)	54
3.6.2 อุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (field emission devices)	55
3.6.3 ทรานซิสเตอร์ (transistors)	56
3.6.4 โพรบวัดนาโนและนาโนเซนเซอร์ (Nanoprobes and Nanosensors)	57
3.6.5 ภาชนะขนาดนาโน (Nanotemplates)	58
3.6.6 วัสดุผสม (composite materials)	58
3.6.7 งานทางด้านเซนเซอร์ (Sensors)	59
3.7 หลักการพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวป์สำหรับเซนเซอร์	61
3.8 แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor)	63
3.8.1 คุณสมบัติทั่วไปของแก๊สเซนเซอร์	64
3.8.2 แก๊สที่มีความสำคัญต่อมนุษย์	64
3.8.2.1 แก๊สตระกูลคาร์บอน (Carbon Species)	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2.2	มีเทน (Methane)	65
3.8.4.3	เบนซีน (Benzene)	65
3.8.4.4	ไฮโดรเจน (Hydrogen)	65
3.8.4.5	แอลกอฮอล์ต่างๆ	65
3.9	หลักการวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟี(Process Gas Chromatography)	67
บทที่ 4	กระบวนการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์	69
4.1	การสร้างแผ่นฐานรอง	69
4.1.1	กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์	69
4.1.2	การเคลือบโลหะคะตะไลต์ (Catalyst)	75
4.1.3	กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	76
4.1.4	การทำขั้วไฟฟ้า	80
4.2	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	80
4.2.1	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเทอร์มอลซีวีดี	81
4.2.1.2	ขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์	82
4.2.2	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน	84
4.3	เครื่องมือในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวบ์	86
4.3.1	ชนิดรอยสัมผัสและความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ	87
4.3.2	ระบบการวัดแอลกอฮอล์	89
4.3	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)	91
4.3.4	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	92
4.3.5	เครื่องรามาน (Raman Spectrometer)	93
บทที่ 5	การทดลองและผลการทดลอง	94
ตอนที่ 1	ระบบจุ่มกึ่งอิเล็กโทรนิคส์	94
5.1.1	คำนำ	94
5.1.2	การออกแบบจุ่มกึ่งอิเล็กโทรนิคส์	95
5.1.2.1	การออกแบบก๊าซเซ็นเซอร์อาร์เรย์	96
5.1.2.2	การออกแบบระบบการทำงาน	99
5.1.2.3	การบันทึกผลการทดลอง	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 การดำเนินการทดลอง	101
5.1.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง	103
ผลการทดลองระบบจุ่มอิเล็กโทรดตอนที่ 2	105
5.2.1 คำนำ	105
5.2.2 ผลการทดลองจุ่มอิเล็กโทรดชนิดเครื่องต้มแอลกอฮอล์เปียร์สโต	106
5.2.3 สรุปผลการทดลองจุ่มอิเล็กโทรดชนิดเครื่องต้มแอลกอฮอล์เปียร์สโต	109
ตอนที่ 3 การทดลองและผลการทดลองคาร์บอนนาโนทิวบ์เซนเซอร์	109
5.3.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	110
5.3.1.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน	110
5.3.1.2 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน	119
5.3.2 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปใช้เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์	128
5.3.2.1 การต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้วัดความต้านทาน	128
5.3.2.2 ความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ	129
5.3.3 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยของแอลกอฮอล์จากคาร์บอนนาโนทิวบ์	130
5.3.3.1 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition)	131
5.3.3.2 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical Vapor Deposition)	133
5.3.3.3 ผลการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆด้วยเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์	136
5.3.3.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์	141
5.3.3.4.1 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้อง 25°C	141
5.3.3.4.2 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิกิริยา Chamber ที่ 85°C	141
5.3.3.4.3 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิกิริยา Chamber ที่ -5 °C	142

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3.4.4 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ
25°C และมีการให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการ
คืนสภาพหลังการดูดซับแอลกอฮอล์ 142

5.3.3.4.5 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ
-5°C และมีการให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการ
คืนสภาพหลังการดูดซับแอลกอฮอล์ 144

5.3.4 ผลการตอบสนองกับสารประกอบแอลกอฮอล์เปียร์สด 145

บทที่ 6 บทสรุป 146

บรรณานุกรม 148



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของก๊าซหลาย ๆ ตัวในอากาศ สะอาดและแห้ง	6
ตารางที่ 2.2 สูตรลัดและสูตรเคมีของธาตุบางธาตุ	7
ตารางที่ 4.1 แสดงสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆ กัน	73
ตารางที่ 5.1.1 เซนเซอร์ก๊าซที่นำมาใช้และชนิดของก๊าซ	95
ตารางที่ 5.1.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าและความต้านทานของแก๊สเซนเซอร์ต่างๆ ที่ใช้งาน	98
ตารางที่ 5.1.2 วิธีควบคุมการปิดเปิด	99
ตารางที่ 5.1.5 ลำดับขั้นตอนและช่วงเวลาในการทดลอง	102
ตารางที่ 5.2.1 แรงดันตอบสนองของเซนเซอร์แต่ละตัวต่อเครื่องต้มแอลกอฮอล์เปียร์สโตในจุ่ม อิเล็กทรอนิกส์	107
ตารางที่ 5.2.2 เปอร์เซ็นต์ของตัวแปรใหม่ที่สกัดจากจุ่มอิเล็กทรอนิกส์	108
ตารางที่ 5.3.1 เงื่อนไขการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	111
ตารางที่ 5.3.2 เงื่อนไขการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1 ไตอะแกรมของระบบจุ่มระบบอิเล็กทรอนิกส์	3
รูปที่ 2 แสดง (ก) फिल्मคาร์บอนนาโนทิวป์ (ข) ผลอุณหภูมิต่อผลตอบสนองความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ต่อไอระเหยแอลกอฮอล์กับเวลา	4
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของจุ่มอิเล็กทรอนิกส์	12
รูปที่ 2.2 เทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับจุ่มอิเล็กทรอนิกส์	13
รูปที่ 2.3 ชนิดของเซ็นเซอร์ที่นิยมใช้สำหรับจุ่มอิเล็กทรอนิกส์	14
รูปที่ 2.4 ระบบเซ็นเซอร์ตรวจวัดสารเคมีที่ใช้กล้อง CCD ทำการตรวจวัดแสงสีที่เกิดขึ้นบนเซ็นเซอร์อาร์เรย์แบบ Different substituted metalloporphyrins	15
รูปที่ 2.5 โครงสร้างเซ็นเซอร์แบบ Pellistor	15
รูปที่ 2.6 โครงสร้างเซ็นเซอร์แบบ Thermal conductivity	16
รูปที่ 2.7 เซ็นเซอร์แบบ Metal Oxide Semiconductor	17
รูปที่ 2.8 เซ็นเซอร์แบบ Amperometric	17
รูปที่ 2.9 (ก) Potentiometric แบบ Vibrating capacitor (Kelvin probe) (ข) Potentiometric แบบ Insulated gate field-effect transistor	18
รูปที่ 2.10 เซ็นเซอร์แบบ Bulk Acoustic Wave	19
รูปที่ 2.11 เซ็นเซอร์แบบ Surface Acoustic Wave	20
รูปที่ 2.12 เซ็นเซอร์แบบ Flexural plate wave	20
รูปที่ 2.13 เซ็นเซอร์แบบ Metal Oxide Semiconductor รุ่นต่างๆ	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.14	โครงสร้างภายในของเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์	22
รูปที่ 2.15 (ก)	แบบจำลองอธิบายศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของออกไซด์โลหะขณะทำงานปกติ	
(ข)	แบบจำลองอธิบายศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของออกไซด์โลหะขณะวัดก๊าซ	23
รูปที่ 2.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซ็นเซอร์ต่อปริมาณของก๊าซ	24
รูปที่ 2.17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเซ็นเซอร์และความชื้นที่มีผลต่อความไวของเซ็นเซอร์	25
รูปที่ 2.18	วงจรพื้นฐานสำหรับก๊าซเซ็นเซอร์โลหะออกไซด์	25
รูปที่ 2.19	ข้อมูลระดับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่บันทึกได้จากเซ็นเซอร์หลายๆ ตัว	36
รูปที่ 2.20	สัญญาณการเปลี่ยนแปลงของก๊าซเซ็นเซอร์ตรวจวัดน้ำหอม	37
รูปที่ 2.21	ผลการจำแนกเนื้อสัตว์ตามระดับอุณหภูมิต่างๆ ด้วยเทคนิค MDA	38
รูปที่ 2.22	ระบบจุ่มอิเล็กทรอนิกส์สำหรับจำแนกก๊าซต่างๆ โดยใช้เซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์	39
รูปที่ 2.23	ผลการตรวจวัดแสดงเป็นค่าความนำที่วัดได้จากเซ็นเซอร์	39
รูปที่ 3.1	โครงสร้างของคาร์บอนหกสิบ (C_{60})	40
รูปที่ 3.2	โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์	41
รูปที่ 3.3	โครงสร้างของแกรไฟต์	41
รูปที่ 3.4	โครงสร้างแบบเพชร (Diamond).	42
รูป 3.5	ลักษณะพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์	42
รูปที่ 3.6	แบบโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์	43
รูปที่ 3.7	ดัชนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์	44
รูปที่ 3.8	ท่อคาร์บอนผนังชั้นเดียวในรูปแบบต่างๆ	44
รูปที่ 3.9	ภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10	การสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบ VLS mechanism	46
รูปที่ 3.11	แสดงการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน	47
รูปที่ 3.12	แสดงชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากการเติมและไม่เติมโลหะคะตะลิสต์ในกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ	48
รูปที่ 3.13	แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์	49
รูปที่ 3.14	แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยกระบวนการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน	50
รูปที่ 3.15	แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีการเติบโตแบบแบ่งเฟส	50
รูปที่ 3.16	ชีวิตแบบขดลวดความร้อน (Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD))	51
รูปที่ 3.17	การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์	52
รูปที่ 3.18	การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสถานะสุญญากาศ	53
รูปที่ 3.19	ใช้ท่อนาโนคาร์บอนมาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพ	53
รูปที่ 3.20	แสดงภาพรวมการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้ ^[32]	54
รูปที่ 3.21	แสดงภาพการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาสร้างเป็นตัวเก็บพลังงาน	54
รูปที่ 3.22	แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนในจอแสดงภาพแบบแบนของ Northwestern University	55
รูปที่ 3.23	(ก) แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนของบริษัท Samsung ขนาด 4.5 นิ้ว และ (ข) 5 นิ้ว	56
รูปที่ 3.24	แสดงแผนภาพอย่างง่ายของการประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวใน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนาม	57
รูปที่ 3.25 แสดงโพรบวัดท่ออนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของ NASA Ames Research Center	57
รูปที่ 3.26 แร็กเก็ต VS Nanotube Power ของ Babolat	59
รูปที่ 3.27 แสดงการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นเซนเซอร์เคมี	60
รูปที่ 3.28 หัววัดแก๊สที่สร้างจากคาร์บอนนาโนทิวป์และวงจรการใช้งาน	60
รูปที่ 3.29 แสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบนระนาบแผ่นกราฟีนที่ผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวป์	61
รูปที่ 3.30 แสดงโมเดลการยึดเกาะโมเลกุลของแก๊สจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT	62
รูปที่ 3.31 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ NO_2 กับ คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังเดี่ยว	62
รูปที่ 3.32 อุปกรณ์แก๊สเซ็นเซอร์จำพวกทรานสดิวเซอร์	63
รูปที่ 3.33 การวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟ	68
รูปที่ 3.34 การแยกส่วนประกอบของแก๊สในกระบวนการโครมาโตแกรม	68
รูปที่ 4.1 แผ่นซิลิคอนขนาด $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ หลังจากการทำความสะอาด	69
รูปที่ 4.2 แสดงการคำนวณการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้ง	72
รูปที่ 4.3 แสดงการคำนวณการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้น	72
รูปที่ 4.4 แผ่นซิลิคอนก่อนและหลังการออกซิเดชัน	74
รูปที่ 4.5 เตาความร้อนที่ใช้ในการออกซิเดชัน	74
รูปที่ 4.6 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล)	75
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของการเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล)	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8	เคลือบพื้นผิวฐานรองด้วยน้ำยาไวแสง	77
รูปที่ 4.9	เครื่องสปรินเนอร์ที่ใช้ในศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์	77
รูปที่ 4.10	ภาพหน้ากาก (Mask) ที่ใช้ในการสปีดเตอร์ซ์ไฟฟ้า	78
รูปที่ 4.11	ภาพของเครื่อง Mask Aligners	78
รูปที่ 4.12	(ก) แผ่นฐานรองที่ทำการสปีดเตอร์โลหะนิเกิลแล้ว (ข) แผ่นฐานรองที่ทำการสปีดเตอร์โลหะทองแดงที่มีการเปิดมาร์คแล้ว (ค) แผ่นฐานรองที่ทำการลอกน้ำยาไวแสงออกแล้ว	79
รูปที่ 4.13	ภาพถ่ายของเครื่องสปีดเตอร์ริงสำหรับเคลือบคตะไลต์และซิลิโคน	80
รูปที่ 4.14	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ท่อคาร์บอน	81
รูปที่ 4.15	โครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโซน	83
รูปที่ 4.16	ภาพถ่ายเตาความร้อนแบบสามโซนที่ใช้ในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์	83
รูปที่ 4.17	ภาพแสดงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน	84
รูปที่ 4.18	ฐานรองภายในห้องปฏิบัติการของเครื่องสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ติดตั้ง	85
รูปที่ 4.19	แผ่นฐานรองที่ติดตั้งภายในห้องปฏิบัติการ	85
รูปที่ 4.20	การให้ความร้อนแก่ห้องปฏิบัติการ	86
รูปที่ 4.21	การปรับการให้ความร้อนแก่ห้องปฏิบัติการ	86
รูปที่ 4.22	โพรวัด	88
รูปที่ 4.23	เครื่อง Curve Tracer	88
รูปที่ 4.24	กราฟคุณลักษณะ I – V ของตัวตรวจวัดแก๊ส	89
รูปที่ 4.25	แผนภาพระบบการวัดแอลกอฮอล์ภายในห้องเซ็นเซอร์แลป	90
รูป 4.26	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	92
รูปที่ 4.28 เครื่องรามาน (Raman Spectrometer)	93
รูปที่ 5.1.1 เซนเซอร์จุ่มกิโลอิเล็กตรอนิกส์ที่ใช้ในการตรวจวัดเครื่องตีแมลลอคฮอลล์	96
รูปที่ 5.1.2 วงจรของแก๊สเซ็นเซอร์ที่พร้อมใช้งาน	96
รูปที่ 5.1.3 ตัวอย่างก๊าซเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์ รุ่น TGS 2600	97
รูปที่ 5.1.4 ความต้านทานตอบสนองต่อไอสารเคมีต่างๆต่อความต้านทานในอากาศ Rs/Ro ของ เซ็นเซอร์ TGS 2600	97
รูปที่ 5.1.5 ไดอะแกรมการทำงานของจุ่มกิโลอิเล็กตรอนิกส์	99
รูปที่ 5.1.6 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ NI USB Multifunction รุ่น NI USB-6211	100
รูปที่ 5.1.7 สัญญาณจากการสุ่มตัวอย่าง	101
รูปที่ 5.1.8 สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปแรงดันต่อเวลาวินาที่ของแก๊สเซ็นเซอร์ทั้ง 7 ตัว	103
รูปที่ 5.2.1 เปอร์เซ็นต์การดึงความล้มพันธ์ข้อมูลจุ่มกิโลอิเล็กตรอนิกส์ของตัวแปรใหม่	108
รูปที่ 5.2.2 การจำแนกของจุ่มกิโลอิเล็กตรอนิกส์หลังการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA	109
รูปที่ 5.3.1 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข T600-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	112
รูปที่ 5.3.2 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข T600-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	113
รูปที่ 5.3.3 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข T650-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	114
รูปที่ 5.3.4 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข T650-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	115
รูปที่ 5.3.5 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข T700-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	116

รูปที่ 5.3.6 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข
เอกภพและนวัตกรรมที่ส่งเสริมให้ประเทศไทยก้าวไกลสู่สังคมดิจิทัลด้วยปัญญาประดิษฐ์และนวัตกรรม
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T700-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	117
รูปที่ 5.3.7 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้	
(ก) ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของคาร์บอนนาโนทิวบ์	118
รูปที่ 5.3.8 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	
H600-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	121
รูปที่ 5.3.9 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	
H600-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	122
รูปที่ 5.3.10 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	
H650-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	123
รูปที่ 5.3.11 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	
H650-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	124
รูปที่ 5.3.12 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	
700-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	125
รูปที่ 5.3.13 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข	
H700-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า	126
รูปที่ 5.3.14 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้	
(ก) ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของท่อคาร์บอน	127
รูปที่ 5.3.15 แสดงรายละเอียดการต่อข้อออกไปใช้งาน	129
รูปที่ 5.3.16 คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต่อข้อใช้งานแล้ว	129
รูปที่ 5.3.17 กราฟคุณลักษณะ I – V เซนเซอร์แอลกอฮอล์ที่ทำการต่อข้อเรียบร้อยแล้ว	130
รูปที่ 5.3.18 แสดงแผนภาพระบบการวัดแอลกอฮอล์	131
รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่ได้	

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน	132
รูปที่ 5.3.20 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเมทา นอลที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน	133
รูปที่ 5.3.21 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลมี สังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน	134
รูปที่ 5.3.22 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลมี สังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน	135
รูปที่ 5.3.23 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	136
รูปที่ 5.3.24 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	137
รูปที่ 5.3.25 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	137
รูปที่ 5.3.26 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	138
รูปที่ 5.3.27 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	138
รูปที่ 5.3.28 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	139
รูปที่ 5.3.29 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	140
รูปที่ 5.3.30 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	140
รูปที่ 5.3.31 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 25°C	141
รูปที่ 5.3.32 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 85°C	142
รูปที่ 5.3.33 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ -5°C	143

รูปที่ 4.34 ผลการตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิกิริยา

Chamber 25°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืน

สภาพความต้านทาน

143

รูปที่ 5.3.35 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิกิริยา

Chamber -5°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืน

สภาพความต้านทาน

144

รูปที่ 5.3.36 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเปียสัดในท้องตลาด

145

รูปที่ 5.3.37 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเอทิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำเป็น

ส่วนผสม

146



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ประเทศไทยมีธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อมเป็นจำนวนมาก หลากหลายประเภท รัฐบาลได้ส่งเสริมให้ธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อมเพื่อความแข็งแกร่งและมั่นคงทางเศรษฐกิจของประเทศ อย่างไรก็ตาม ธุรกิจเหล่านี้เผชิญปัญหาท้องถิ่นที่เฝ้าแต่ดั้งเดิมในอดีตส่งต่อมาจนถึงปัจจุบัน โดยอาศัยกระบวนการลงมือผลิตเอง จดจำ คัดกรองแบบค่อยเป็นค่อยไปตามธรรมชาติ ดังนั้นในสภาวะโลกปัจจุบันอาจมีหลายธุรกิจที่ประสบปัญหาในการผลิตผลิตภัณฑ์ บางธุรกิจสามารถดำเนินอยู่ได้ด้วยคุณภาพวัตถุดิบในท้องถิ่น และบางธุรกิจก็ไม่สามารถดำเนินอยู่ได้ ปัญหาและอุปสรรคมีมากมายหลายสาเหตุ รวมถึงปัจจัยทางเทคโนโลยีซึ่งนับว่าเป็นปัจจัยสำคัญในธุรกิจอุตสาหกรรม กระบวนการผลิต การควบคุมคุณภาพ และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องอาศัยเทคโนโลยีโดยตรง ดังนั้นหลายธุรกิจจะต้องนำความรู้และเทคโนโลยีที่ได้จากการวิจัยมาช่วยเสริมและพัฒนาเพื่อให้ระบบเศรษฐกิจของประเทศมีความเข้มแข็ง สามารถสร้างรายได้แก่ประชากร ความเป็นอยู่ที่ดี และเป็นการส่งเสริมการวิจัยให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อสังคม

ในธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อมบางประเภทที่ต้องอาศัยกระบวนการหมักบ่ม อาทิเช่นการผลิตเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ กระบวนการหมักบ่มพืชผลทางการเกษตร กระบวนการผลิตน้ำหอม มักจะต้องเกี่ยวข้องกับกลิ่นหรือแก๊สหลายชนิดที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตที่ต้องใช้เวลาเพื่อให้วัตถุดิบเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงสภาพไปเป็นสารที่ต้องการหรือผลิตภัณฑ์ กระบวนการเหล่านี้มักใช้ประสบการณ์ผู้เชี่ยวชาญเป็นผู้ตัดสินใจว่าใช้ได้หรือไม่ โดยผู้เชี่ยวชาญอาศัยประสบการณ์ที่ทำงานมาเป็นเวลานาน พบเจอและสัมผัสบ่อยๆ จนเคยชิน และสามารถจดจำได้ในประสาทสัมผัส แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนากระบวนการย่อมต้องเกิดขึ้นเพื่อปรับปรุงหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์ การใช้ประสบการณ์อาจจะไม่ใช่วิธีการที่เหมาะสม เพราะจะต้องลองผิดลองถูก เหมือนกับกระบวนการภูมิปัญญาท้องถิ่นที่ต้องใช้เวลานาน และไม่สอดคล้องกับโลกปัจจุบันที่มีการแข่งขันสูง เทคโนโลยีจุกอิล็กทรอนิกส์เป็นเทคโนโลยีที่สามารถจดจำกลิ่นแทนมนุษย์ด้วยเวลาที่สั้นกว่าประสาทสัมผัสโดยธรรมชาติ และสามารถจดจำกลิ่นได้ค่อนข้างแม่นยำ โดยสามารถแยกแยะกลิ่นที่มีความคล้ายคลึงกันแต่มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งขั้นตอนนี้ถ้าใช้ผู้เชี่ยวชาญจะต้องใช้เวลานานในการจดจำและแยกแยะ ยิ่งในการพัฒนากระบวนการจะต้องมีองค์ประกอบที่หลากหลายจำนวนมากและใช้เวลาในการทดลองไม่มากนัก ผู้เชี่ยวชาญอาจประสบปัญหาในการแยกแยะและจดจำกลิ่นใหม่ๆ หรือไม่สมารถที่จะจดจำแยกแยะได้ถูกต้องทุกครั้ง ดังนั้นเทคโนโลยีจุกอิล็กทรอนิกส์สามารถที่จะเข้ามาช่วยในกระบวนการดังกล่าว

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาท สำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และวิศวกรรมมากยิ่งขึ้น การพัฒนาเทคโนโลยีในระดับนาโนจึงเป็นสิ่ง ที่จำเป็นและกำลังได้รับความสนใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมวัสดุระดับนาโน หรือการเตรียมอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลงจนอยู่ในระดับโมเลกุล ซึ่งในปัจจุบันท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube, CNTs) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจอย่างมาก

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbonnanotubs; CNTs) คือ วัสดุที่มีรูปร่างเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ซึ่งประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุคาร์บอนเพียงธาตุเดียว ถูกค้นพบเป็นครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อสุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima)^[2] การค้นพบนี้นับเป็นการเริ่มต้นที่ทำให้ให้นักวิทยาศาสตร์ และนักวิจัยต่างมีความสนใจศึกษาถึงโครงสร้าง คุณสมบัติ และวิธีการสังเคราะห์ที่ท่อนาโนคาร์บอน ตลอดจนวิธีการนำไปใช้ และการประยุกต์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนนี้มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ รวมถึงการตอบสนองต่อแก๊สต่างๆ ผู้วิจัยได้พัฒนาการสร้างท่อนาโนคาร์บอนและได้ทดสอบกับสารไอระเหยแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจพอสมควร ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำคาร์บอนนาโนทิวป์เซมิคอนดักเตอร์มาประยุกต์ร่วมกับจุ่มกึ่งตัวนำอินทรีย์โดยใช้สารประกอบแอลกอฮอล์เป็นตัวอย่างในการทดสอบ โดยใช้เบียร์สดในท้องตลาดจริงเป็นตัวอย่างการทดสอบทั้งนี้เพื่อเป็นการต่อยอดงานวิจัยและนำงานวิจัยประยุกต์สู่สังคม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

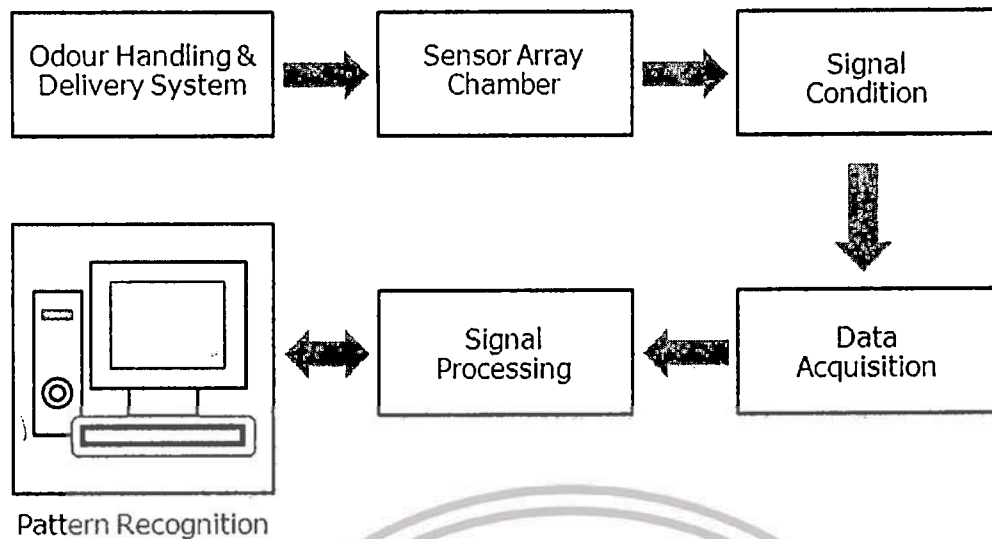
- 1.3.1 ศึกษาหลักการการทำงานของระบบจุ่มกึ่งตัวนำอินทรีย์
- 1.3.2 สร้างระบบจุ่มกึ่งตัวนำอินทรีย์โดยใช้แก๊สเซมิคอนดักเตอร์หลายชนิดต่อร่วมกันแบบอาร์เรย์
- 1.3.3 นำระบบจุ่มกึ่งตัวนำอินทรีย์แยกแยะสารประกอบแอลกอฮอล์
- 1.3.4 สังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์สำหรับใช้งานเป็นแอลกอฮอล์เซมิคอนดักเตอร์
- 1.3.5 ทดสอบคาร์บอนนาโนทิวป์กับการตรวจจับสารแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ
- 1.3.6 นำเซมิคอนดักเตอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ไปใช้งานร่วมกับระบบจุ่มกึ่งตัวนำอินทรีย์

1.3 สมมติฐานการวิจัย

ระบบการรับรู้กลิ่นโดยธรรมชาติประกอบด้วยต่อมรับกลิ่นจำนวนมากในโพรงจมูกที่อยู่บนเซลล์ประสาทรับกลิ่น โดยจะส่งสัญญาณไปยังสมองซึ่งมีหน้าที่จดจำกลิ่นจากรูปแบบสัญญาณที่เซลล์ประสาทส่งมาทำให้มนุษย์สามารถจำและแยกแยะกลิ่นต่างๆได้

จุ่มกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่จำลองการทำงานของระบบการรับรู้กลิ่นตามธรรมชาติ โดยแทนต่อมรับกลิ่นด้วยชุดเซมิคอนดักเตอร์ทางเคมีชนิดต่างๆอย่างน้อยสี่ชนิดหรือมากกว่าก็ได้ซึ่งจะแปลงองค์ประกอบโมเลกุลของแก๊สที่ประกอบเป็นกลิ่นหนึ่ง ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยเซมิคอนดักเตอร์เคมีแต่ละชนิดจะตอบสนองแก๊สชนิดเดียวกันไม่เหมือนกันโดยให้ขนาดสัญญาณไฟฟ้าต่างกัน ดังนั้นองค์ประกอบของกลิ่นจะประกอบด้วยโมเลกุลของแก๊สหลายชนิดทำให้ชุดของเซมิคอนดักเตอร์เคมีให้ชุดสัญญาณแตกต่างกันเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



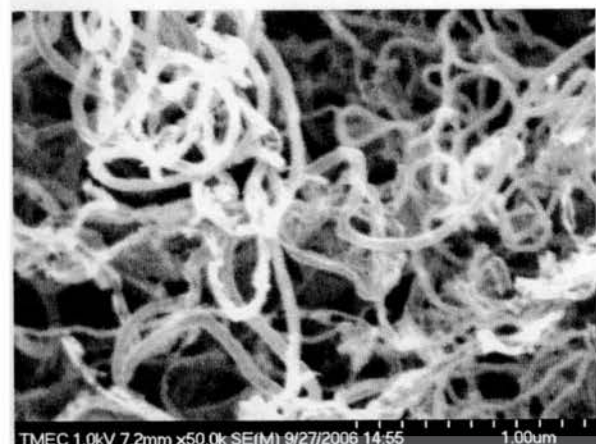
รูปที่ 1 ไตอะแกรมของระบบจมูกระบบอิเล็กทรอนิกส์

เอกลักษณ์เฉพาะ จากนั้นวงจรประมวลผลจะทำหน้าที่จัดจํารูปแบบของชุดสัญญาณว่าเป็นกลิ่นอะไร เพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ตามความต้องการแล้วแต่รายละเอียดซึ่งในส่วนประมวลผลจะขึ้นอยู่กับการพัฒนาโปรแกรม ระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถ แสดงรายละเอียดของระบบได้ดังรูปที่ 1

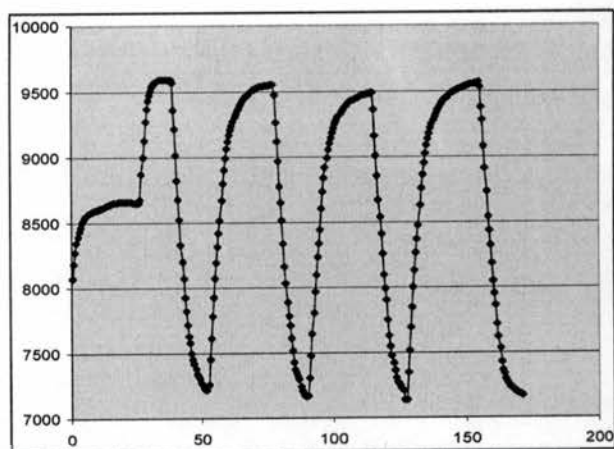
รูปที่ 1 แสดงบล็อกไตอะแกรมของระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยชุดดุกกลิ่นที่จะดุกกลิ่นที่เราต้องการทดสอบเข้ามาที่ ชุดเซนเซอร์หรือแอเรย์ของเซนเซอร์ จากนั้นชุดเซนเซอร์จะแปลงองค์ประกอบแก๊สของกลิ่นที่ทดสอบไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่แตกต่างกันในแต่ละชนิดของหัวเซนเซอร์ในแต่ละตัว จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าจะถูกตกแต่งให้เหมาะสมและส่งไปยังตัวแปลงสัญญาณอนาลอกไปเป็นดิจิตอลเพื่อส่งไปยังวงจรประมวลผล โดยวงจรประมวลผลจะทำการจัดจํารูปแบบสัญญาณ เพื่อไว้ตรวจจับกลิ่นชนิดนี้ต่อไป หรือเพื่อนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นเช่นการแยกแยะกลิ่นต่อไป จากนั้นแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ในรูปแบบต่างๆตามประโยชน์ใช้งาน

คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นท่อในระดับขนาดนาโนเมตร มีการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆหนึ่งในการประยุกต์ใช้งานคือการนำมาเป็นเซนเซอร์เคมี ผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ [9-11] และได้ทำการประยุกต์ใช้งานตรวจจับแอลกอฮอล์ [12] ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2 ในการวิจัยครั้งนี้จะนำเซนเซอร์เคมีท่อนาโนคาร์บอนที่ได้พัฒนาขึ้นมาเป็นหนึ่งในเซนเซอร์ของชุดเซนเซอร์ในระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 แสดง (ก) พิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์

(ข) ผลอุณหภูมิต่อผลตอบสนองความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ต่อไอระเหยแอลกอฮอล์กับเวลา

งานวิจัยนี้จะทดสอบจุ่มกอิเล็กทรอนิกส์ในการแยกแยะชนิดของผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกันออกตามชนิดที่แตกต่างกัน เช่น เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ เช่น เหล้าขาว เบียร์ วิสกี้ เป็นต้นหรือแยกแยะผลผลิตทางการเกษตรเช่นกาแฟ โดยแยกแยะกาแฟชนิดหรือพันธ์ต่างๆ ออกจากกันได้เป็นต้น

งานวิจัยนี้ทำที่วัดเซนเซอร์เคมีคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้นเองและใช้งานร่วมกับเซนเซอร์เคมีในท้องตลาด สร้างระบบการดูดกลืน วงจรอิเล็กทรอนิกส์ วงจรประมวลผล ซอฟแวร์การประมวลผลและการแสดงผลทางจอแสดงผลสะดวกต่อการใช้งานทั่วไป

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ออกแบบและทดสอบระบบจุ่มกอิเล็กทรอนิกส์เพื่อจำแนกเครื่องดื่มแอลกอฮอล์เบียร์สด
- 1.4.2 พัฒนาโปรแกรมเพื่อแยกแยะกลิ่น
- 1.4.3 สร้างเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์และทดสอบ
- 1.4.4 ใช้งานเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ร่วมกับระบบจุ่มกอิเล็กทรอนิกส์
- 1.4.5 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของจุ่มกอิเล็กทรอนิกส์
- 1.5.2 ศึกษาการทำงานแก๊สเซนเซอร์ชนิดต่างๆ
- 1.5.3 ศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.4 ออกแบบและสร้างจุ่มกอิเล็กทรอนิกส์

1.5.5 ทดสอบการแยกแยะระบบจุ่มกอิเล็กทรอนิกส์กับเครื่องต้มแอลกอฮอล์หลายชนิด

1.5.6 สร้างคาร์บอนนาโนทิวป์เซนเซอร์เพื่อตรวจจับแอลกอฮอล์

1.5.7 นำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปใช้งานร่วมกับระบบจุ่มกอิเล็กทรอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

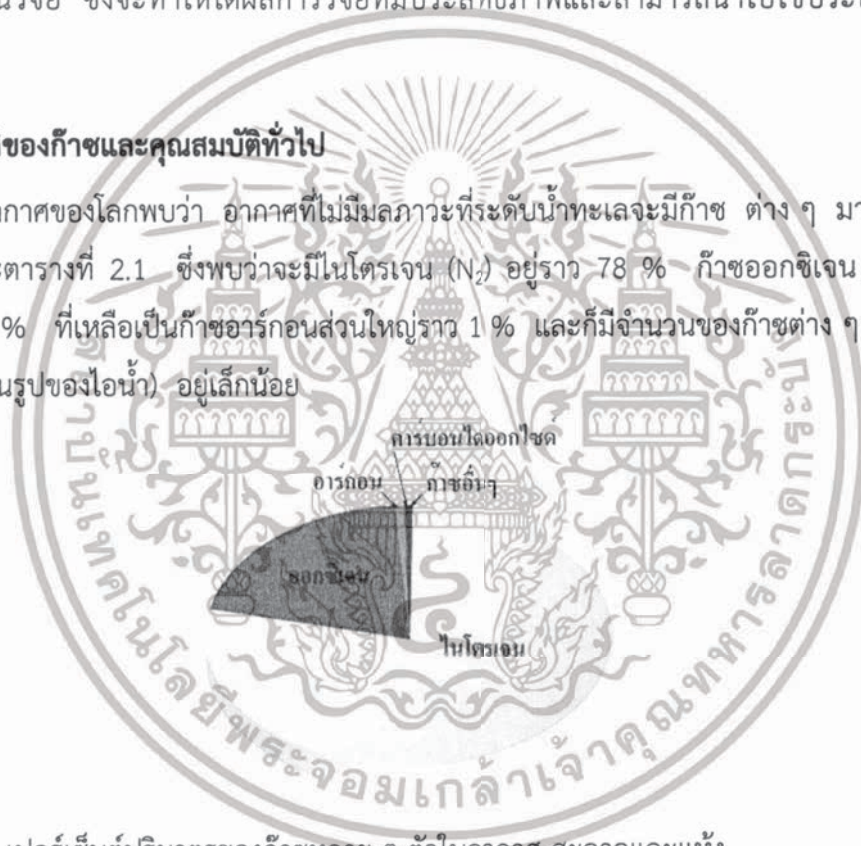
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คำนำ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและออกแบบระบบจุ่มกอลลีเอทโรนิกส์เพื่อใช้แยกแยะและควบคุมคุณภาพเครื่องตีประเภทที่มีแอลกอฮอล์ผสมอยู่โดยอาศัยการทำงานของเซ็นเซอร์ก๊าซหลายชนิดมาต่อร่วมกันแบบอาร์เรย์ ซึ่งมีความจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติและการทำงานของเซ็นเซอร์ก๊าซและเทคนิคการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์อีกทั้งต้องศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อนหน้ามาช่วยในการพัฒนางานวิจัย ซึ่งจะทำให้ได้ผลการวิจัยที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในอนาคต

2.2 ธรรมชาติของก๊าซและคุณสมบัติทั่วไป

ในบรรยากาศของโลกพบว่า อากาศที่ไม่มีมลภาวะที่ระดับน้ำทะเลจะมีก๊าซ ต่าง ๆ มากมาย ดังรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1 ซึ่งพบว่าจะมีไนโตรเจน (N_2) อยู่ราว 78 % ก๊าซออกซิเจน (O_2) อยู่ประมาณ 21 % ที่เหลือเป็นก๊าซอาร์กอนส่วนใหญ่ราว 1 % และก็มีจำนวนของก๊าซต่าง ๆ เช่น CO_2 และ H_2O (ในรูปของไอน้ำ) อยู่เล็กน้อย



ตารางที่ 2.1 เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของก๊าซหลาย ๆ ตัวในอากาศ สะอาดและแห้ง

ก๊าซ	เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร	ก๊าซ	เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร	ก๊าซ	เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร
N_2	78.09	CH_4	0.00015	O_3	0.000002
O_2	20.94	Kr	0.0001	NH_3	0.000002
Ar	0.93	H_2	0.00005	NO_2	0.00001
CO_2	0.032	N_2O	0.000025	SO_2	0.0000000
Ne	0.0018	CO	0.00001		2
He	0.00052	Xe	0.000008		

2.2.1 โมเลกุลและไอออน (Molecules and ions)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซที่มีสมบัติและจำนวนของอะตอมที่แน่นอนเฉพาะตัว จะเรียกว่า “โมเลกุล” ทั้งอะตอมเดี่ยว และโมเลกุลที่สามารถได้รับอนุภาคจากตัวอื่นหรือเปลี่ยนไปเป็นอนุภาคอื่น เราเรียกว่า “ไอออน”

ก. สูตรเคมี (Chemical formulas)

สารประกอบทางเคมีของธาตุต่าง ๆ ปกติจะแสดงในรูปสั้น ๆ ที่เรียกว่า “สูตรเคมี” สูตรเคมีนั้นมีสองอย่างด้วยกัน อย่างแรกคือ “สูตรลัด” ประกอบด้วยอัตราส่วนอย่างง่ายของอะตอม หรือจำนวนตัวเลขน้อยที่สุดที่สามารถเขียนได้อย่างที่สองคือ “สูตรโมเลกุล” ประกอบด้วยจำนวนตัวเลขที่แน่นอนของอะตอมในโมเลกุล เช่น น้ำจะมีทั้งสูตรโมเลกุลและสูตรลัดเหมือนกันคือ H_2O แต่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีสูตรลัดเป็น HO และมีสูตรโมเลกุลเป็น H_2O_2 เมื่อต้องการบอกความหมายจะใช้สูตรโมเลกุล เพราะว่าสูตรโมเลกุลจะบอกทั้งอัตราส่วนของอะตอมและจำนวนจริงของอะตอม ในการแสดงสถานะทางกายภาพก็จะใช้ g, l และ s เพื่อแสดงว่าอยู่ในสถานะก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ตามลำดับ แต่หากมีตัวย่อเป็น aq (aqueous) จะหมายถึงสารที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำ จะเขียนได้เป็น $CO_{2(aq)}$

ตารางที่ 2.2 สูตรลัดและสูตรเคมีของธาตุบางธาตุ

สาร	สูตรลัด	สูตรโมเลกุล
น้ำ	H_2O	H_2O
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	HO	H_2O_2
ซิลิคอนไดออกไซด์	SiO_2	$(SiO_2)_2$
อีธีลีน	CH_2	C_2H_4
ไซโคลเฮกเซน	CH_2	C_6H_{12}
กรดโอซาลิก	HCO_2	$H_2C_2O_4$

ข. โมเลกุล (Molecules)

คือ อะตอมจำนวนหนึ่งที่ต่อเข้าด้วยกันเป็นอนุภาคเล็กที่สุดของสารที่รักษาส่วนประกอบและคุณสมบัติของสารนั้นไว้ โมเลกุลจึงเป็นการรวมตัวทางเคมีของอะตอมหนึ่งตัวหรือมากกว่า ในรูปที่ 9.1 จะแสดงตัวอย่างของโมเลกุลบางตัว แต่ก๊าซเฉื่อยซึ่งไม่รวมตัวกับธาตุใด ๆ จะไม่ใช่โมเลกุล เราจะเรียกอนุภาคที่เล็กที่สุดของก๊าซเฉื่อยว่า อะตอม พบว่าในอุณหภูมิสูง ๆ โมเลกุลจะแยกตัวออกจากกันอยู่ในรูปของอะตอม

ค. สารไอออน (Ionic substances)

นอกจากอะตอมและโมเลกุล ยังมีอนุภาคชนิดที่สามที่เกิดในสาร โดยเรียกอนุภาคนี้ว่า “ไอออน” ไอออนก็คือ อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่สามารถนำประจุไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 โมล (Mole)

สมมติว่ามีคลอรีนที่กั้นสหรน้ำเราสามารถหาน้ำหนักอะตอมของส่วนประกอบคลอรีนซึ่งแยกได้ดังนี้ Ca เท่ากับ 40.08 amu , Cl เท่ากับ 35.453 amu แต่ก็ยังมีปัญหาตรงที่เราใช้น้ำหนักอะตอม น้ำหนักโมเลกุล และน้ำหนักของสูตรเคมี เพื่อเปรียบเทียบมวลของสาร ในห้องทดลองส่วนมากจะใช้หน่วยวัตกรัมเพื่อวัดน้ำหนักมากกว่า amu (atom mass unit) แต่หากต้องการรู้จำนวนอะตอมของสารเราจะทราบได้อย่างไรพิจารณาข้อหาที่มีน้ำอยู่เต็ม เราพบว่าจะมีโมเลกุลของน้ำจำนวนมากมายที่อยู่ในนี้ (ประมาณ 1.7×10^{23}) สมมติว่าต้องการวัดน้ำในมหาสมุทรบนโลกทั้งหมด การวัดด้วยจำนวนดังกล่าวจึงมากและทอหะหะ จึงต้องใช้วิธีในการวัดจำนวนสารที่มากกว่าจำนวนของหน่วยสูตรเคมีหรือสูตรโมเลกุล (ในทางปฏิบัติเรานับไขเป็นหน่วยโหล กระดาะเป็นริม หรือ 500 แผ่น ที่คลิปลกระดาะเป็นกรุส หรือ 144 อัน ทำให้ง่ายต่อการนับจำนวนของมากกว่าจะนับเป็นอัน) เพื่อหลีกเลี่ยงการนับจำนวนที่มากเกินไปเมื่อทำการวัดสาร เราจึงใช้หน่วยที่เรียกว่า “โมล” โดยหนึ่งโมลประกอบไปด้วย 6.022×10^{23} อะตอมโมเลกุล หรือหน่วยของสูตรเคมี ในการกำหนดค่านีจะเรียกว่า “จำนวนอะโวกาโดร” ซึ่งเราจะได้อินบ้อย ๆ ในงานที่เกี่ยวข้องกับการวัดสาร หรือจำนวนอะตอมหรือโมเลกุล

2.2.3 กฎการรั่วไหลและการแพร่กระจายของแกรแฮม

การเคลื่อนที่ของอนุภาคก๊าซตรวจจับได้สองวิธีด้วยกัน

ก. การรั่วซึม (Effusion)

คือ การผ่านของก๊าซที่สามารถผ่านสิ่งกีดขวางที่มีรู เช่นลูกโป่งที่บรรจุฮีเลียมเมื่อตั้งไว้นานจะมีขนาดไม่เท่าเดิมเนื่องจากมีฮีเลียมบางส่วนที่เล็ดลอดออกไปจากโครงสร้างธรรมชาติของยางที่ใช้ทำ

ข. การแพร่กระจาย (Diffusion)

หากมีใครก็ตามที่สามารถดมหรือรับรู้กลิ่นของฮีเลียมที่รั่วไหลออกมาจากข้อแรกได้ นั่นก็คือ เกิดการแพร่กระจายของก๊าซนั่นเอง อัตราการรั่วไหลและการแพร่กระจาย โมเลกุลของก๊าซที่แตกต่างกันจะเคลื่อนที่ที่อัตราแตกต่างกัน โมเลกุลที่เบากว่าจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าโมเลกุลที่หนักกว่าหรืออาจกล่าวได้ว่า ก๊าซไฮโดรเจนที่บรรจุในลูกโป่งจะเล็ดลอดออกมาได้เร็วกว่าก๊าซฮีเลียมและ เล็ดลอดออกมาได้เร็วกว่าก๊าซไนโตรเจน

กฎของแกรแฮม กล่าวว่า การรั่วไหลของก๊าซจะแปรผกผันกับรากที่สองของมวลโมลาร์ ตามกฎของแกรแฮม อัตราการรั่วไหล (r) ของก๊าซสองตัวที่อุณหภูมิและความดันเดียวกันจะสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2.1)

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{\sqrt{M_2}}{\sqrt{M_1}} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ r_1 และ r_2 แทนนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ก๊าซที่มีความสำคัญต่อมนุษย์

ก่อนที่จะทำการวัดหรือตรวจจับก๊าซ ต้องมีความเข้าใจคุณสมบัติและความสำคัญของก๊าซที่จะตรวจวัดก่อน ต่อไปนี้จะเป็นตัวอย่างก๊าซที่มีความสำคัญ ซึ่งมีผลทั้งตรงและทางอ้อมต่อมนุษย์

2.3.1 ออกซิเจน (Oxygen)

ออกซิเจน เป็นธาตุที่มีอยู่มากบริเวณเปลือกโลก แม้กระทั่งน้ำประกอบด้วยออกซิเจนถึง 88.9 % ของมวล แร่ส่วนใหญ่ก็ประกอบด้วยออกซิเจนที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกซิเจน ซึ่งเมื่อรวมกับธาตุอื่น ๆ แล้วก่อให้เกิดรูประบบใหม่ที่เรียกว่า “ออกไซด์” ก๊าซออกไซด์ได้แก่ CO_2 , CO , N_2O_4 , N_2O_3 , NO_2 , NO , N_2O , SO_2 , F_2O , Cl_2O_2 , ClO_2 และ Cl_2O (อยู่ที่ตำแหน่งด้านขวาบนของตารางธาตุ) ออกซิเจนในอากาศจะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ตัวมันเองจะไม่ติดไฟ แต่ช่วยให้ไฟติด ออกซิเจนในเชิงพาณิชย์ทำได้โดยการกลั่นจากอากาศแต่ก็มีจำนวนน้อย หรือไม่กี่หาจากสถานะที่บริสุทธิ์มากนั่นคือ การแยกด้วยไฟฟ้าของสาละลายที่เป็นของเหลว หรือโดยการใช้ความร้อนแยกเกลือออกไซด์ (Oxide salt)

บทบาทของออกซิเจนต่อความปลอดภัยของมนุษย์มีตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจน เช่น ผลกระทบ atmospheric anoxia ที่ขาดออกซิเจนอันเนื่องจากการขึ้นไปที่สูง หรืออยู่ในที่ที่มีออกซิเจนน้อย เป็นต้น ตัวอย่างนี้คือ ภาวะในการขาดออกซิเจนเนื่องจากกลไกต่าง ๆ ของมนุษย์ นอกจากนี้อันตรายตรง ๆ จากออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสูง อาจจะทำให้เกิดการลุกไหม้ไฟ จึงไม่ควรให้ออกซิเจนดังกล่าวอยู่ใกล้เปลวไฟใด ๆ หรือในทางการรักษาผู้ป่วยพบว่าการใช้ออกซิเจนที่มีความดันสูง อาจจะทำให้มีการชักได้ และเชื่อว่าออกซิเจนจะมีพิษต่อเอ็นไซม์ในสมอง นอกจากนี้ภาวะ Retrolental hyperplasia ในทารกซึ่งทำให้ตาบอด เป็นอาการแทรกซ้อนจากการรักษาด้วยออกซิเจนที่สำคัญด้วย ดังนั้น ในทางการแพทย์บาลจึงต้องมีการควบคุมความกดดันและความเข้มข้นของออกซิเจนตามความเหมาะสมของแต่ละกรณี ทั้งหมดเราคงพอจะเห็นความสำคัญของออกซิเจนที่มีผลต่อมนุษย์โดยตรงบ้างแล้ว ส่วนบทบาทของก๊าซออกซิเจนเบื้องต้นในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การทำเหล็กงานเชื่อม งานรักษาสิ่งแวดล้อม การบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

2.3.2 ก๊าซตระกูลคาร์บอน (Carbon species)

คาร์บอนมีอยู่ด้วยกันสองรูปที่เป็นก๊าซออกไซด์ซึ่งมีความเสถียร คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

ก. คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide)

คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส นอกจากนี้มันยังมีพิษอีกด้วย เพราะว่ามันจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในฮีโมโกลบิน (Hb) ในเส้นเลือดของมนุษย์ คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเป็นฐานประมาณ 80% ของ CO ในบรรยากาศมาจากรถยนต์ ส่วนการใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้ลดออกซิเจนในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถลุงเหล็กจากแร่ เป็นต้น ระดับควบคุมการสัมผัสคาร์บอนมอนอกไซด์ในสถานประกอบการ ให้อยู่ในระดับความเข้มข้นไม่เกิน 35 พีพีเอ็ม Time Weighted Average (TWA) โดยอาศัยการวัดด้วยเครื่องมือวัดคาร์บอนมอนอกไซด์ชนิด hopcalite และระดับคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ผู้ปฏิบัติการสัมผัสต้องไม่เกิน 200 พีพีเอ็ม เป็นอันตราย ถ้าพบระดับสูงกว่านี้ต้องสั่งหยุดการทำงาน และเมื่อระดับเกิน 500 พีพีเอ็ม ให้รีบอพยพคนออกจากสถานที่นั้นโดยทันที

ข. คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่ช่วยให้ติดไฟ CO_2 เป็นก๊าซเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า -78°C ที่ความดัน 1 atm CO_2 จะเป็นของแข็งมากกว่าจะเป็นของเหลว CO_2 เป็นผลมาจากการไหม้ที่สมบูรณ์ของถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติหรือเชื้อเพลิงที่มีฐานของคาร์บอน CO_2 เป็นก๊าซที่ช่วยในการดำรงชีพของมนุษย์ ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดื่มเบา ๆ และในเครื่องดับเพลิง ในมนุษย์ขณะที่สารอาหารในร่างกายไม่ทำงานผลผลิตของ CO_2 บางส่วนจะช่วยให้ความเป็นกรดของเลือดเหมาะสม ความผิดปกติหนึ่งของกลไกการหายใจของมนุษย์คือ การสะอึก วิธีการรักษาคือ ให้อาหารหายใจเข้าออกถูกระตาเพื่อสร้างระดับ CO_2 เข้าไปในปอด CO_2 จะเข้าไปเป็นตัวกระตุ้นให้หยุดการสะอึก แต่หากมีระดับของ CO_2 ในร่างกายสูงเกินไปก็ไม่มีประโยชน์ โดยหากหายใจ CO_2 ในอากาศที่เกินกว่า 10% อาจทำให้คนหมดสติ และหากรับ CO_2 ที่ระดับสูงต่อเนื่องไปอีก อาจทำให้การหายใจล้มเหลว และตายในที่สุด

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานสิ่งแวดล้อม ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของอากาศในห้อง ถ้าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องมากเกินไป (อยู่ที่ระดับไม่เกิน 1000 ppm) จะทำให้รู้สึก "อึดอัดและอับ" คุณภาพของอากาศในห้องที่ไม่ดีเป็นเหตุให้เกิดอาการโรคอ้วนลงคอ สูญเสียสมาธิและเจ็บป่วยและเป็นเหตุให้เกิดความไม่สบาย หรืออีกหลายกรณีหากว่าการระบายอากาศเป็นไปอย่างไม่เหมาะสมความเข้มข้นของ CO_2 ในระบบควบคุมการระบายอากาศตามความต้องการ DCV จึงถูกนำมาใช้เพื่อปรับระบบการจ่ายอากาศบริสุทธิ์ โดยการติดตั้งตัวทรานสดิวเซอร์ CO_2 ไว้กับที่ และต้องมีการตรวจสอบเกณฑ์ในการปรับด้วย

2.3.3 มีเทน (Methane)

เป็นรูปแบบหนึ่งของสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนไฮโดรเจน (ไฮโดรคาร์บอน)เป็นส่วนประกอบ มีสูตรเคมีเป็น CH_4 เกิดจากธรรมชาติจากการเน่าหมักหมมในหนองบึง หรือการสลายตัวของโปรตีน มีเทนเป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ แต่ติดไฟได้ ให้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง เช่นเดียวกับ อีเทน โพรเพน และบิวเทน

2.3.4 เบนซีน (Benzene)

มีสูตรเคมี C_6H_6 เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีกลิ่นและติดไฟง่าย เป็นพวกริงคอมปาวด์ ใช้ละลายไขมันและสารอินทรีย์ต่าง ๆ และใช้สังเคราะห์สารเคมีมากมายหลายชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 เมทานอลและเอทานอล (Methanol and ethanol)

ก. เมทานอล

เรียกอีกอย่างว่าแอลกอฮอล์ไม้ เมทิลแอลกอฮอล์ หรือคาร์บินอลเป็นของเหลวที่ไม่มีสี ติดไฟง่าย ผสมกับน้ำได้ดี เป็นพิษต่อประสาทโดยตรง กินไม่ได้ อาจทำให้ตาบอดได้ เมื่อเป็นของเหลวจะเดือดกลายเป็นไอที่ 65°C เมทานอลใช้เป็นตัวทำละลายของสารอินทรีย์ต่าง ๆ และใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันเบนซินได้เป็นตัวทำละลายวัสดุอินทรีย์เช่น เซลลูลอสและวานิล ใช้ทำพลาสติก กาวเรซิน และกรดอะเซติก

ข. เอทานอล

เรียกอีกอย่างว่าเอทิลแอลกอฮอล์ ระเหยกลายเป็นไอที่ 78°C เป็นของเหลวที่ไม่มีสี ไม่ติดไฟไม่เป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากรับประทานเข้าไปมากๆ ใช้เป็นตัวทำละลายและเป็นตัวทำปฏิกิริยาในการเตรียมสารอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเอทานอล ได้แก่ การเจือจางในส่วนผสมของยาทำพลาสติก เหล้า แลกเกอร์และเครื่องสำอาง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงรถได้อีกด้วย โดยในก๊าซโซลีนจะผสมเอทานอลประมาณ 10% แอลกอฮอล์ที่บริสุทธิ์ 100 % จะถูกเรียกว่า “แอลกอฮอล์สัมบูรณ์” (Absolute alcohol)

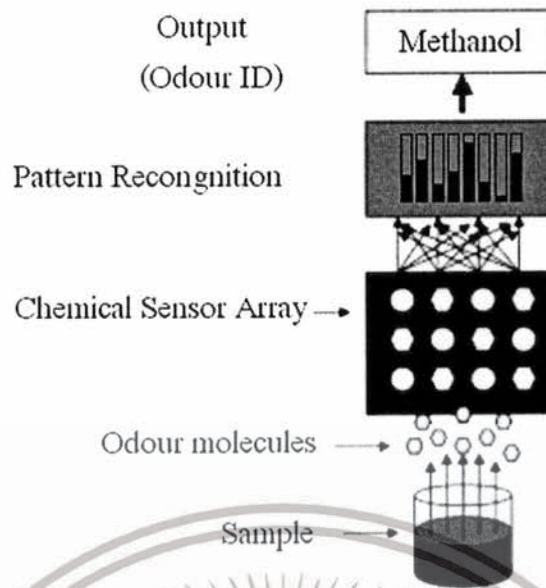
2.3.6 ไฮโดรเจน (Hydrogen)

ส่วนประกอบที่เห็นส่วนใหญ่ของไฮโดรเจนคือ น้ำ พบอยู่ในน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ในอนาคตจะถูกนำมาใช้ทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิง ไฮโดรเจนมีอยู่ที่อุณหภูมิห้องแต่สามารถจะเปลี่ยนไปเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจนสามารถนำมาทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิงได้ไฮโดรเจนนั้นสามารถลุกติดไฟได้ง่าย และได้รับความเชื่อใจให้ถูกเลือกเป็นเชื้อเพลิงในอนาคตสำหรับรถยนต์และอากาศยาน ปฏิกิริยาของมันจะทำให้ผลิตน้ำออกมา เป็นผลให้ไม่เกิดมลภาวะ

2.4 การทำงานของจุมุกอิเล็กทรอนิกส์

การทำงานของจุมุกมนุษย์ก็มีข้อจำกัดอยู่ตรงที่ความสามารถของแต่ละคนไม่เหมือนกันหรือไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการตรวจสอบ รวมถึงความเหนื่อยล้าของสมองทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่าย และสารเคมีที่มีกลิ่นทั้งหลายเป็นสารระเหยที่มีอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบจุมุกอิเล็กทรอนิกส์มาแทนที่การทำงานของมนุษย์ในส่วนนี้ ลักษณะของจุมุกอิเล็กทรอนิกส์จะมีโครงสร้างเหมือนกับการทำงานของจุมุกมนุษย์ โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.5 [1] ส่วน Chemical sensor array ทำหน้าที่รับกลิ่นไอของสารเคมี และส่วนของ Pattern recognition system ทำหน้าที่แยกแยะชนิดของสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

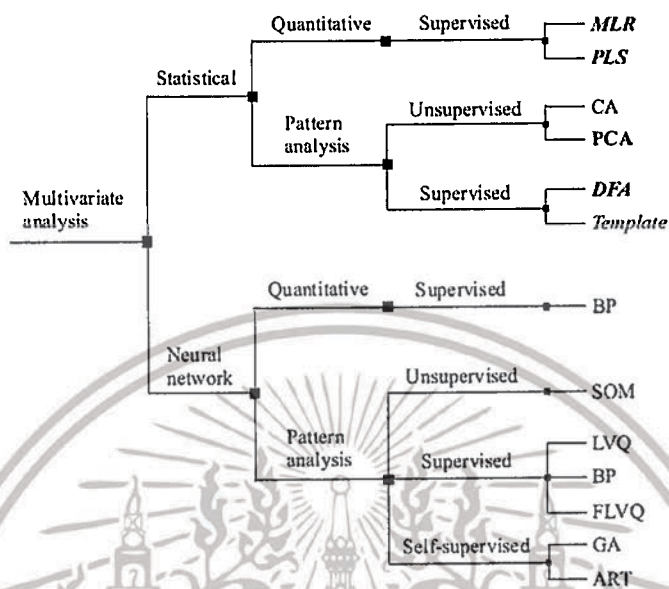


รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของจมูกอิเล็กทรอนิกส์

จมูกอิเล็กทรอนิกส์จะพยายามเลียนแบบธรรมชาติในแทบทุกด้าน ยกตัวอย่าง เวลาที่เราดมกลิ่นอะไรนานๆ จะเกิดความเคยชินและอาจไม่รู้กลิ่นถึงกลิ่นนั้นๆ ในระยะเวลาหนึ่ง เช่น ถ้าเราเดินเข้าไปในห้องที่มีกลิ่นแล้วนั่งอยู่สักพัก เราก็จะเริ่มไม่ได้กลิ่น แต่ถ้าเราเดินออกมาสูดอากาศข้างนอกสักพักแล้วเดินกลับเข้าไปใหม่เราก็จะได้กลิ่นอีก จมูกอิเล็กทรอนิกส์ก็จะมีอาการเช่นเดียวกัน ถ้าเราเอามันมาดมกลิ่นทุเรียนแล้วเอาไปดมกลิ่นไวน์ทันที มันก็จะอาจจะไม่สามารถรับรู้กลิ่นไวน์ได้ดี เนื่องจากโมเลกุลกลิ่นทุเรียนได้เข้าไปจับตัวเซ็นเซอร์ทำให้เซ็นเซอร์ไม่สามารถจับกับโมเลกุลกลิ่นอื่นๆ ที่เข้ามาใหม่ได้ จึงต้องมีวิธีการไล่กลิ่นเดิมออกไปด้วยการเป่าอากาศเข้าไปที่ตัวเซ็นเซอร์ นอกจากนี้จมูกอิเล็กทรอนิกส์ก็เหมือนจมูกมนุษย์ที่ต้องการการเรียนรู้ ตอนที่เราเกิดมานั้นเราแทบไม่มีข้อมูลของกลิ่นอยู่เลยในสมองของเรา เราต้องเรียนรู้ตั้งแต่เด็กๆ ว่าทุเรียนมีกลิ่นอย่างไร สตรอเบอร์รี่มีกลิ่นอย่างไร จมูกอิเล็กทรอนิกส์ก็เช่นเดียวกันที่ต้องการการฝึกฝน เพื่อให้สามารถจดจำแยกแยะกลิ่นได้

จมูกอิเล็กทรอนิกส์ก็จะมีลักษณะที่เลียนแบบระบบรับรู้กลิ่นในธรรมชาติดังนี้ ส่วนรับกลิ่นประกอบไปด้วยตัวนำกลิ่นเข้ามาซึ่งอาจมีมอเตอร์ดูดอากาศ มีท่อรวบรวมกลิ่น (Concentrator) เพื่อให้กลิ่นมีความเข้มข้นสูงขึ้นและที่สำคัญที่สุดก็คือ เซ็นเซอร์รับกลิ่นจำนวนมาก ตั้งแต่ 4 ตัวไปจนถึงนับพันตัว ซึ่งหากจะเปรียบเทียบกับธรรมชาติก็ถือว่าน้อยมาก เช่น สุนัขอาจมีเซลล์รับกลิ่นนับล้านเซลล์ และส่วนรวบรวมสัญญาณ ซึ่งจะทำให้การแปรสัญญาณจากเซ็นเซอร์ (Transducing) และทำการจัดการสัญญาณ (Signal conditioning) เช่น ลดสัญญาณรบกวน จากนั้นก็จะแปลงสัญญาณจากอนาล็อกให้เป็นดิจิตอล (A/D converter) สุดท้ายเป็นส่วนประมวลผลซึ่งจะนำสัญญาณที่ได้รับมาทำการเปรียบเทียบเชิงสถิติกับฐานข้อมูลที่มีอยู่เดิม ซึ่งอาจจะใช้วิธีทางสถิติหรือการระบบประสาทเทียม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Artificial Neural Networks) เพื่อทำการแยกแยะกลิ่น ซึ่งเทคนิคต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล [2] ที่ได้จากจมูกอิเล็กทรอนิกส์มีดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับจมูกอิเล็กทรอนิกส์

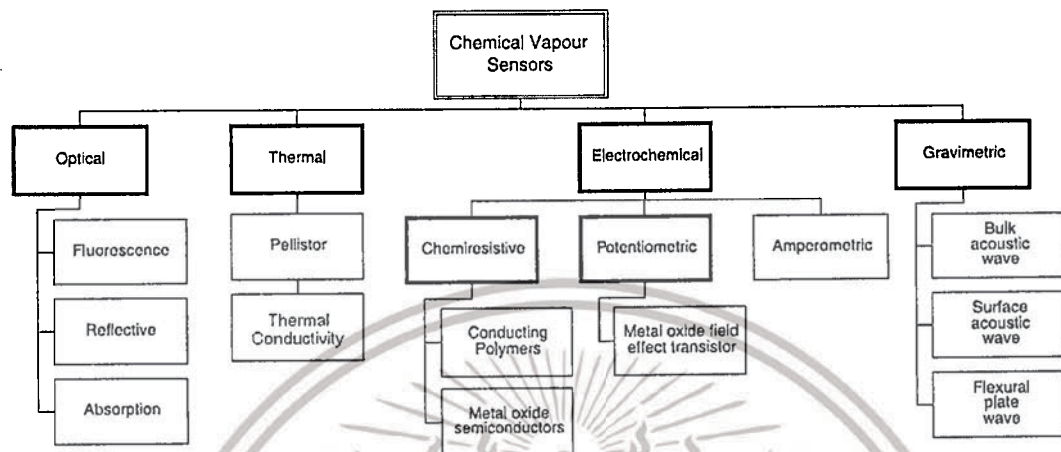
วิธีการในการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับจมูกอิเล็กทรอนิกส์มี 2 วิธีใหญ่ๆ คือการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติและวิธีโครงข่ายประสาทดังรูปที่ 2.48 โดยทั้งสองวิธีการจะแยกเป็นการวิเคราะห์ย่อยอีก 2 ลักษณะคือการวัดปริมาณ (Quantitative) และการวิเคราะห์ชนิดโดยการวิเคราะห์รูปแบบของข้อมูล (Pattern analysis)

2.5 เซ็นเซอร์รับกลิ่น

ตัวรับกลิ่นหรือเซ็นเซอร์รับกลิ่นเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สุดของทั้งจมูกอิเล็กทรอนิกส์และจมูกธรรมชาติ สำหรับจมูกธรรมชาตินั้นเซ็นเซอร์รับกลิ่นเป็นโมเลกุลโปรตีนที่ฝังตัวอยู่ในเมมเบรน ซึ่งแม้จะมีสูตรทางเคมีต่างกัน (ลำดับกรดอะมิโนในโครงสร้างแปรผันไปต่างๆ กัน) แต่ก็เชื่อว่าจะมีโครงสร้างที่คล้ายๆ กัน กล่าวคือเป็นโปรตีนที่มีสายโซ่พันเข้าไปมา (Tran membrane) ระหว่างผิวด้านในและด้านนอกของเยื่อหุ้มเซลล์จำนวนประมาณ 7 รอบ ถึงแม้เซ็นเซอร์ที่มีรูปร่างเดิมแต่การแปรผันลำดับกรดอะมิโนในสายโซ่เหล่านั้นสามารถทำให้เซ็นเซอร์เหล่านั้นเกิดความหลากหลายในการจับกับโมเลกุลกลิ่นได้จำนวนมากนับหมื่นๆ ชนิดขึ้นไป ความหลากหลายในการจับตัวกับโมเลกุลกลิ่นนี้ประกอบกับการมีส่วนร่วมประมวลผลที่ดีขึ้น (สมองส่วนรับรู้และจดจำกลิ่น) ใดๆ ก็ดีโมเลกุลรับกลิ่นของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมก็ยังมีขีดจำกัดหลายประการ เช่น มันไม่สามารถตรวจพบก๊าซพิษโมเลกุลเล็กอย่างคาร์บอนมอนนอกไซด์ ซึ่งมีอันตรายถึงตายได้

งานนี้ได้รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นมันยังไม่สามารถจับตัวกับโมเลกุลกลิ่นที่มีขนาดใหญ่เกิน 300 ดาลตัน (1 Dalton เท่ากับน้ำหนักอะตอมไฮโดรเจน) ทำให้จมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นมีข้อได้เปรียบเหนือจมูกสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมสำหรับการใช้งานหลายๆ ด้าน



รูปที่ 2.3 ชนิดของเซ็นเซอร์ที่นิยมใช้สำหรับจมูกอิเล็กทรอนิกส์

เซ็นเซอร์รับกลิ่นของจมูกอิเล็กทรอนิกส์มีหลักการง่ายๆคือเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติซึ่งอาจเป็นสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า เมื่อมีโมเลกุลกลิ่นมาเกาะ ปัจจุบันมีการค้นคว้าวิจัยเซ็นเซอร์รับกลิ่นประเภทต่างๆ ขึ้นมามากมายเซ็นเซอร์ที่ใช้การพัฒนาระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังรูปที่ 2.3 [3] ซึ่งแสดงชนิดของเซ็นเซอร์แบบต่างๆที่ใช้ในการพัฒนาระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ การทำงานของเซ็นเซอร์รับกลิ่นชนิดต่างๆ มีหลักการดังนี้

2.5.1 เซ็นเซอร์แบบแสง (Optical sensor)

เซ็นเซอร์รับกลิ่นที่ใช้เทคนิคทางแสง คือเซ็นเซอร์ที่อาศัยคุณสมบัติทางแสงต่อสารเคมีที่ต้องการตรวจวัด เซ็นเซอร์ชนิดนี้มีข้อดีที่ความไวสูงสามารถวัดในระดับต่ำๆ ได้แต่มีความยุ่งยากในการออกแบบวงจรเพื่อนำการเปลี่ยนแปลงสัญญาณไปใช้งาน ซึ่งมีอยู่ด้วย 3 เทคนิคคือ

ก. การเรืองแสง (Fluorescence)

อาศัยคุณสมบัติการเรืองแสงออกมาในบางความยาวคลื่นแสงของตัวอย่างแล้วทำการตรวจวัดปริมาณแสงที่เกิดจากการเรืองแสง

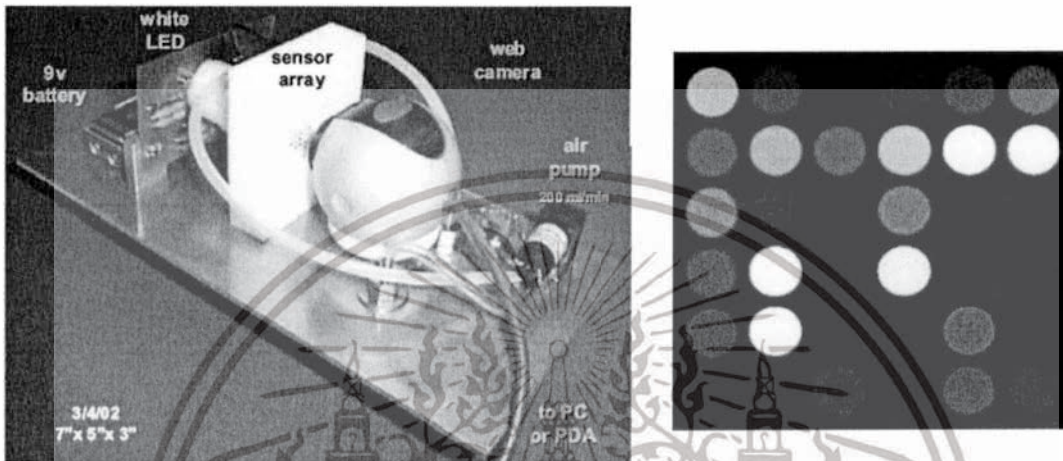
ข. การหักเหแสง (Reflective)

อาศัยคุณสมบัติการหักเหของแสงของตัวอย่างแล้วทำการตรวจวัดแสงที่หักเหจากการผ่านตัวอย่าง

ค. การดูดกลืนแสง (Absorption)

อาศัยคุณสมบัติการดูดกลืนคลื่นแสงในบางความยาวของตัวอย่างที่นำมาตรวจวัดแล้วทำการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนที่ความยาวคลื่นต่างๆ งานวิจัยที่เกี่ยวกับเซ็นเซอร์แบบแสงกำลังอยู่
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในชั้นวิจัย ดังเช่นในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ที่อยู่บนพื้นฐานของเซ็นเซอร์แบบแสง เมื่อตัวอย่างผ่านชุดเซ็นเซอร์ อาร์เรย์คุณสมบัติของตัวอย่างจะทำการดูดกลืนแสงในบางช่วงความถี่ทำให้สีของเซ็นเซอร์ตำแหน่งต่างๆของเซ็นเซอร์อาร์เรย์มีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป จากนั้นทำการตรวจวัดแสงที่เปลี่ยนแปลงด้วยกล้อง CCD ซึ่งจะได้ข้อมูลเป็นสีที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อทำการตรวจวัดสารเคมีที่ต่างชนิดกันก็จะได้รูปแบบของสีที่เกิดขึ้นบนเซ็นเซอร์แตกต่างกันไป



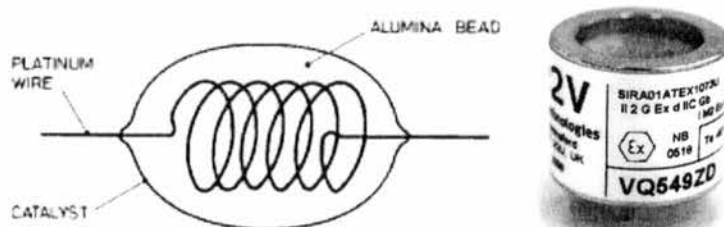
รูปที่ 2.4 ระบบเซ็นเซอร์ตรวจวัดสารเคมีที่ใช้กล้อง CCD ทำการตรวจวัดแสงสีที่เกิดขึ้นบนเซ็นเซอร์อาร์เรย์แบบ Different substituted metalloporphyrins

2.5.2 เซ็นเซอร์แบบความร้อน (Thermal Sensor)

Thermal Sensor สำหรับรับกลิ่นมีหลักการทำงานดังรูปที่ 2.5 เซ็นเซอร์แบบ Thermal sensor มีข้อดีที่ใช้งานง่ายและสามารถวัดได้ในระดับต่ำ แต่ต้องมีการควบคุมการรบกวนทำงานจากสิ่งแวดล้อมรอบๆ เซ็นเซอร์แบบนี้มี 2 ชนิด คือ

ก. Pellistor

เซ็นเซอร์แบบ Pellistor ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ ใช้สำหรับตรวจจับก๊าซที่ติดไฟง่ายหรือที่มีความสามารถในการนำพาความร้อน (Thermal conductivity) แตกต่างจากอากาศ ค่าความต้านทานของตัวเซ็นเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตรวจพบก๊าซต่างชนิดไปจากอากาศมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.5

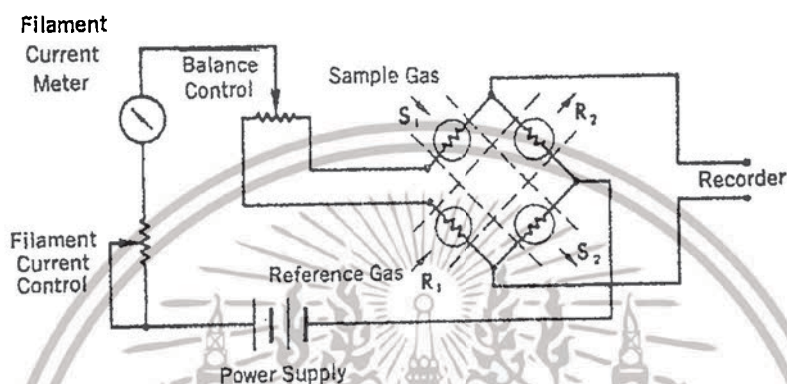


รูปที่ 2.5 โครงสร้างเซ็นเซอร์แบบ Pellistor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. Thermal Conductivity

เซ็นเซอร์แบบ Thermal conductivity มีโครงสร้างและหลักการทำงานเหมือนเซ็นเซอร์แบบ Pellistor แต่ทำมาจากเส้นลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทาน เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงกันอยู่เป็นวงจรบริดจ์ โดยอาศัยหลักการนำพาความร้อนเปรียบเทียบกับก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่ง ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเมื่อมีก๊าซตัวอย่างเข้ามาก็จะทำให้วงจรบริดจ์ไม่สมดุลก็จะสามารถตรวจจับก๊าซตัวอย่างได้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างเซ็นเซอร์แบบ Thermal conductivity [5]

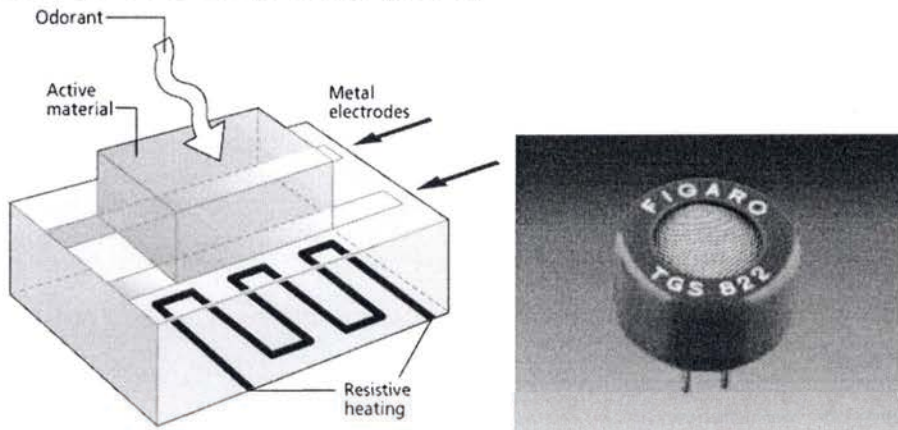
2.5.3 เซ็นเซอร์แบบไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Sensor)

เซ็นเซอร์รับกลิ่นที่ใช้เทคนิค Electrochemical หรือไฟฟ้าเคมี มีข้อดีที่การออกแบบวงจรเพื่อนำไปใช้งานทำได้ง่าย มีด้วยกัน 3 เทคนิค คือ

ก. Chemical resistive

เป็นเซ็นเซอร์รับกลิ่นที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดเนื่องจากเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Semiconductor) หรือ MOS มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 ซึ่งมีการนำมาใช้เชิงพาณิชย์ทั่วไป ค่าความต้านทานของตัวเซ็นเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีก๊าซตัวอย่างมาเกาะที่ตัวเซ็นเซอร์ เซ็นเซอร์ประเภทนี้จะมีการใช้งานเชิงพาณิชย์แล้ว อีกทั้งยังมีราคาที่ย่อมเยา

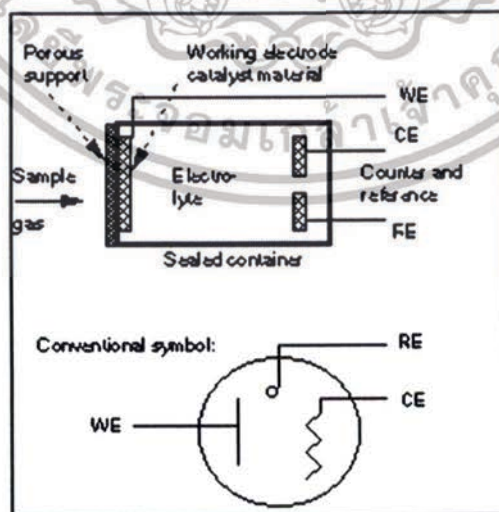
Metal Oxide Semiconductors (MOS)



รูปที่ 2.7 เซ็นเซอร์แบบ Metal Oxide Semiconductor

ข. Amperometric

อาศัยคุณสมบัติโครงสร้างของ Amperometric แสดงดังรูปที่ 2.8 ขั้วอิเล็กโทรดจะถูกจุ่มอยู่ในอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่เหมาะสม ขั้วอิเล็กโทรดทำงาน (Working electrode) ทำมาจากแพลททินัม (Platinum) หรือทอง ตัวอย่างก๊าซจะสามารถผ่านเมมเบรน (Membrane) มาได้ ซึ่งจะสัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ในเวลาเดียวกัน จึงทำให้เกิดการออกซิไดซ์ขึ้นซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดความแตกต่างขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า Counter Electrode (CE) และ Reference Electrode (RE) ซึ่งความแตกต่างของประจุไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าเป็นสัญญาณเอาท์พุทของเซ็นเซอร์นั่นเอง

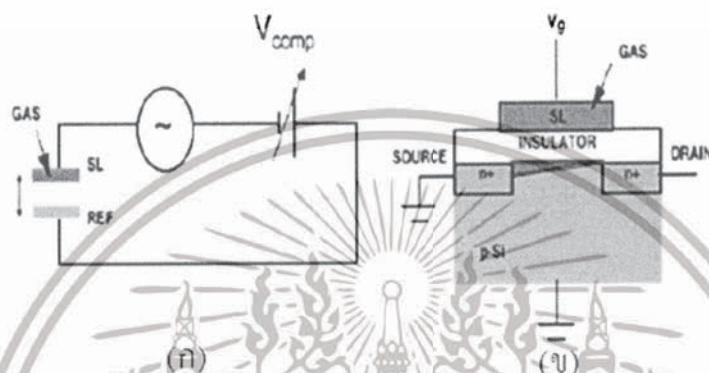


รูปที่ 2.8 เซ็นเซอร์แบบ Amperometric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. Potentiometric

เซ็นเซอร์แบบ potentiometric เป็นเซ็นเซอร์ทางเคมีชนิดหนึ่ง ใช้สำหรับวัดปริมาณความเข้มข้นขององค์ประกอบก๊าซ มีหลักการทำงานโดยการวัด Electrical potential ของ electrode ระหว่าง working electrode กับ reference electrode ซึ่ง potential ของ working electrode จะขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของก๊าซที่ทำการตรวจวัด ตัวเซ็นเซอร์มีโครงสร้างการทำงานดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 (ก) Potentiometric แบบ Vibrating capacitor (Kelvin probe)

(ข) Potentiometric แบบ Insulated gate field-effect transistor

2.5.4 เซ็นเซอร์แบบน้ำหนัก (Gravimetric)

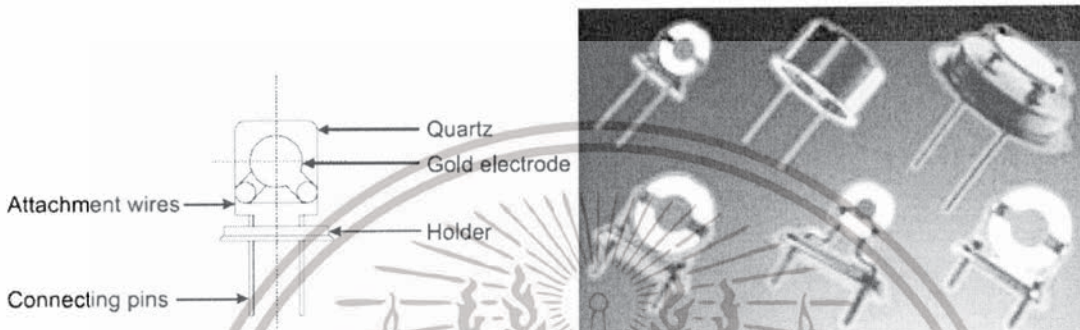
เซ็นเซอร์รับคลื่นที่ใช้เทคนิค Gravimetric คือเซ็นเซอร์ที่วัดตัวอย่างโดยใช้เทคนิคน้ำหนักของตัวอย่างทำให้ค่าทางไฟฟ้าของเซ็นเซอร์เปลี่ยนแปลงไป เซ็นเซอร์ชนิดนี้มีข้อดีที่สามารถตรวจวัดได้ในระดับต่ำ แต่การออกแบบวงจรการทำงานค่อนข้างซับซ้อน ที่ใช้งานกันมีดังต่อไปนี้

ก. Bulk Acoustic Wave

เซ็นเซอร์แบบ Bulk Acoustic Wave (BAW) มีโครงสร้างแบบ Piezoelectric crystals มักทำจากควอตซ์ (Quartz) ซึ่งมีความทนทานต่อเสียงก้องของคลื่นวิทยุได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะเมื่อยามที่มีการเพิ่มระดับของคลื่นเสียงภายในตัว Crystal ตามปกติชนิดของ Crystal ที่ใช้ในเครื่องนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่หรือเวลาที่ใช้อ้างอิง Piezoelectric crystals นี้จะถูกเคลือบด้วยตัวเคลือบที่ว่องไวสูงโดยมีความหนาประมาณ 2-3 ไมโครเมตร ซึ่งตัวเคลือบที่ใช้จะต้องมีความทนต่อสารเคมีและความร้อน ปกติแล้ว Piezoelectric crystals จะมีหลักการง่ายๆ คือ เมื่อปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิหรือมวลของสารประกอบคลื่นที่ทดสอบ เกิดการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ความถี่ของคลื่นเสียงที่ตอบสนองเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสารประกอบคลื่นถูกดูดซับที่บริเวณผิวหน้าของตัวเคลือบก่อให้เกิดการสะท้อนของคลื่นเสียงที่ความถี่ต่างๆ อีกทั้งระดับของความถี่สะท้อนก็เปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงทั้งความถี่และระดับของความถี่สะท้อนล้วนมีสัมพันธ์กับน้ำหนักของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบกลืนต่างๆ แต่ถึงอย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นสูง ๆ การเปลี่ยนแปลงจะสวนทางกับระดับของความถี่สะท้อนจึงมีความจำเป็นต้องใช้วิธีอื่นในการทดสอบแทน ความไวของตัวเซ็นเซอร์ชนิดนี้สัมพันธ์กับกระบวนการให้ความถี่ โดยทั่วไปจะให้ความถี่ในช่วง 10 ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนมากจะใช้ในการวัดความจำเพาะของก๊าซและวิธีเลือกใช้นั้นจะขึ้นกับจำนวนองค์ประกอบของสารประกอบกลืนการใช้เซ็นเซอร์ ชนิดนี้จึงยากในการควบคุมไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิหรือความชื้นของก๊าซเองก็ตาม โครงสร้างและลักษณะของเซ็นเซอร์แบบ Bulk acoustic wave แสดงดังรูปที่ 2.10

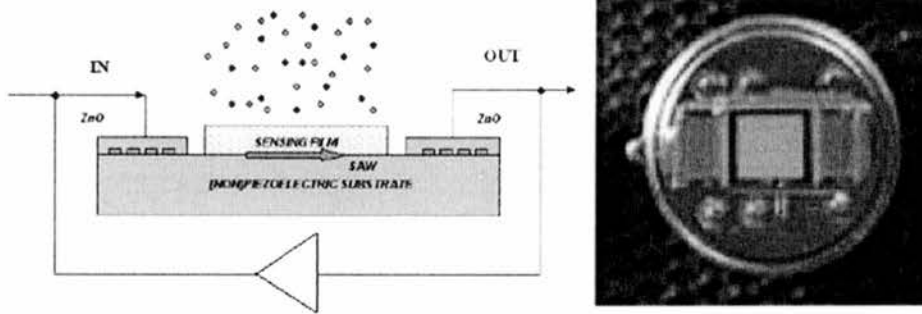


รูปที่ 2.10 เซ็นเซอร์แบบ Bulk Acoustic Wave

ข. Surface Acoustic Wave

เซ็นเซอร์แบบ Surface Acoustic Wave (SAW) กระบวนการทำงานจะคล้ายๆ กับเซ็นเซอร์ BAW เว้นแต่เซ็นเซอร์แบบ SAW จะมีการเปลี่ยนคลื่นความถี่วิทยุจะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงจากสนามไฟฟ้า สร้างขั้วไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของเซ็นเซอร์ และจะไม่เข้าไปข้างใน การให้ความถี่ในช่วงตั้งแต่ 100-1000 เมกะเฮิร์ตซ์ สื่อนำของคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยเข้าร่วมในการดูดซับโมเลกุลของตัวอย่างบนตัวเซ็นเซอร์ด้วย การเปลี่ยนแปลงความถี่จะสัมพันธ์กับจำนวนของการดูดซับของตัวอย่างที่บนชั้นผิวหน้าของเซ็นเซอร์ในส่วนของตัวเซ็นเซอร์ซึ่งมักจะทำจากควอตซ์ (Quartz) หรือลิเทียม (Lithium) มักจะเคลือบด้วยตัวเคลือบ 2 ชนิด ซึ่งมักจะทำจากอลูมิเนียม โดยมีคุณสมบัติในการแพร่และการสะท้อนคลื่น โดยชนิดแรกใช้ในการเป็นตัวเซ็นเซอร์และอีกชนิดหนึ่งจะใช้เป็นตัวอ้างอิง โดยในระบบของตัวอ้างอิงของตัวเซ็นเซอร์ชนิดนี้จะคล้ายกับการเปลี่ยนรูปของสารซิลิเฟอร์ ความไวของ Sensor ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการของการให้คลื่นความถี่ คือ ความถี่ของคลื่นเสียงที่ใช้ต้องมีความถี่สูงและมีความสัมพันธ์ของสัญญาณไฟฟ้า สำหรับการผลิตเซ็นเซอร์ชนิดนี้นั้นจะใช้สารซิลิคอน (Silicon) ที่มีราคาแพง เพราะว่าจำเป็นต้องใช้ในกระบวนการที่มีความถี่สูงมาก เพราะในการผลิตแต่ละครั้งต้องมีการควบคุมเพื่อให้ในกระบวนการมีความผิดพลาดของผลผลิตน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โครงสร้างและลักษณะเซ็นเซอร์แบบ SAW ดังรูปที่ 2.11

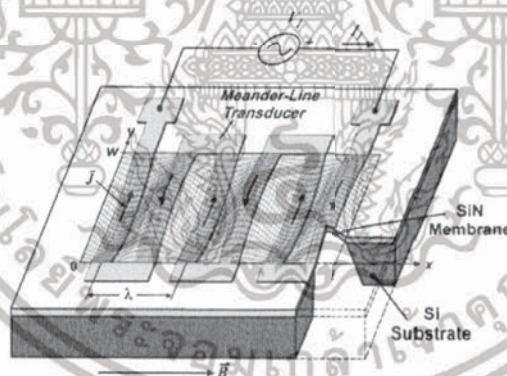
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 เซ็นเซอร์แบบ Surface Acoustic Wave

ค. Flexural plate wave

เซ็นเซอร์แบบ Flexural plate wave มีโครงสร้างคล้ายกับเซ็นเซอร์แบบ Surface Acoustic Wave และมีหลักการการทำงานที่คล้ายๆกัน ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.12 ซึ่งอาศัยความถี่เรโซแนนท์ของเซ็นเซอร์ ซึ่งเมื่อจ่ายความถี่ให้กับเซ็นเซอร์จะทำให้เซ็นเซอร์เกิดการตอบสนองในลักษณะการเกิดคลื่นผิวที่ความถี่หนึ่งขึ้น เมื่อมีตัวอย่างเข้ามาจะทำให้คลื่นผิวเปลี่ยนความถี่ไปทำให้เกิดเป็นสัญญาณอีกความถี่ขึ้นมาเมื่อขับตัวอย่างทิ้งออกไปเซ็นเซอร์ก็จะกลับมาเกิดคลื่นผิวที่ความถี่เดิม



รูปที่ 2.12 เซ็นเซอร์แบบ Flexural plate wave

2.6 เซ็นเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

เซ็นเซอร์ชนิดนี้ได้มีการพัฒนาขึ้นในปี 1971 โดยนายทาคุชิ ในทางอุตสาหกรรมนั้นจะทำจากเซรามิกและมีการเคลือบด้วยฟิล์มกึ่งตัวนำ ซึ่งใช้ดีบุกออกไซด์เป็นตัวเคลือบ ตัวฟิล์มนี้จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้โลหะเปลี่ยนไปเป็นสเปกตรัม (Spectrum) เพื่อให้ง่ายต่อการแยกชนิดของสารประกอบเคมีแต่ละสารที่มีในกลิ่นทดสอบ ปัจจุบันได้พัฒนาให้เซ็นเซอร์ชนิดนี้สามารถทำตรวจสอบได้ในที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50-400 องศาเซลเซียส ดังนั้นชนิดของตัวเซ็นเซอร์แต่ละตัวที่ใช้ในเครื่องควรมีความไวในการทำเอกซามินเป็นเอกซามินที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาต่อสารเคมีแต่ละตัวที่ไม่เท่ากันทั้งนี้เพื่อที่จะได้ครอบคลุมสารเคมีชนิดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของกลืนที่ทดสอบ และในที่สุดสามารถที่จะจำแนกชนิดของกลืน โดยหลักการแล้วผลตอบสนองของทางเคมีของกลืนที่มีต่อเซ็นเซอร์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากเซ็นเซอร์รับกลืนแบบสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์หรือเรียกสั้นๆว่าเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์ลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.13 เซ็นเซอร์แบบนี้เป็นเซ็นเซอร์ที่ได้รับความนิยมสูงสุด เพราะว่ามีโครงสร้างที่ง่ายต่อการใช้งาน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเซ็นเซอร์ชนิดนี้มาหลายๆแบบตามแต่ความต้องการวัสดุ MOS อยู่ในรูปผลึกเล็กๆจำนวนมากที่มีผิวสัมผัสต่อกัน โดยในการนำไฟฟ้านั้น อิเล็กตรอนก็จะต้องวิ่งข้ามไปมาระหว่างผิวสัมผัสเหล่านั้นซึ่งมักจะถูกเคลือบบางๆด้วยชั้นของก๊าซออกซิเจนซึ่งก็จะทำให้เกิดแรงต้านทานไฟฟ้าที่ทำให้อิเล็กตรอนข้ามไปมาได้ลำบากยิ่งขึ้น แต่ถ้ามีก๊าซซึ่งมีสมบัติทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 200-500 องศา ก็จะทำให้ชั้นของออกซิเจนที่เคลือบอยู่นั้นลดลงไป ทำให้วัสดุ MOS นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ซึ่งสมบัติเช่นนี้เองที่เราใช้ในการตรวจหากลืนที่มีสมบัติทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง



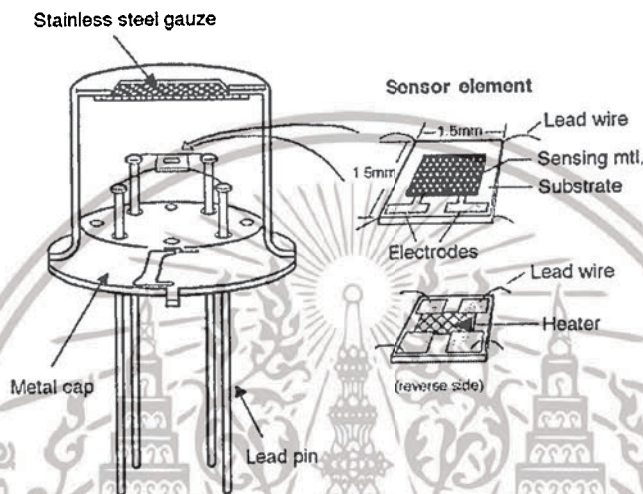
รูปที่ 2.13 เซ็นเซอร์แบบ Metal Oxide Semiconductor รุ่นต่างๆ

เซ็นเซอร์ชนิดนี้จึงต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งเพื่อเผาให้วัสดุมีอุณหภูมิเหมาะสม ชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ n-type semiconductors (Zinc, iron oxide) ใช้ในปฏิกิริยา Reducing compound อีกชนิดคือ p-type semiconductors (Nickel, Cobaltoxide) ใช้กับปฏิกิริยา Oxidizing compound งานวิจัยและพัฒนาเซ็นเซอร์ประเภทนี้ก็ยังคงดำเนินต่อไปโดยเฉพาะในมหาวิทยาลัย ในประเทศไทยเองก็มีการวิจัยเซ็นเซอร์ MOS ที่ศูนย์โลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 โครงสร้างของเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์

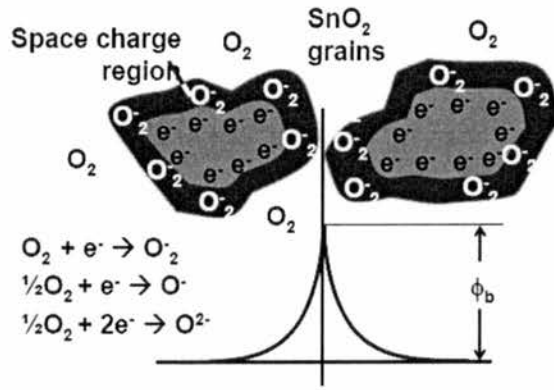
โครงสร้างของเซ็นเซอร์ก๊าซแบบโลหะออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 2.13 มี Active material ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่เป็นโลหะออกไซด์วางอยู่บน Substrate ต่ออยู่กับขั้ว Electrode ตัวออกไซด์โลหะ ตัวเช่นดีบุกออกไซด์ (SnO_2) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นต้น ซึ่งจะถูกให้ความร้อนด้วย Heater เพื่อควบคุมอุณหภูมิและเป็นตัวช่วยในการทำ Deoxidizing



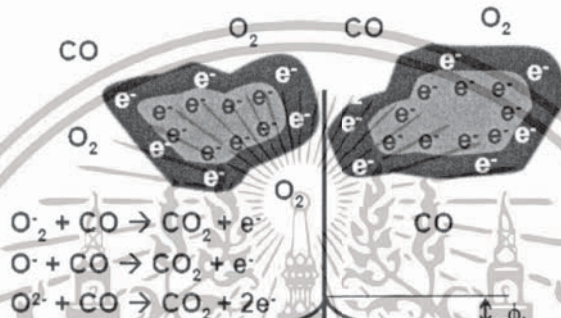
รูปที่ 2.14 โครงสร้างภายในของเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์

2.6.2 การทำงานของเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์

เซ็นเซอร์ก๊าซ ที่ใช้เป็นตัวตรวจวัดก๊าซที่สร้างจากออกไซด์ของโลหะเช่น ออกไซด์ของโลหะดีบุก (SnO_2) เมื่อผลึกออกไซด์ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง โมเลกุลของออกซิเจนจะไปเกาะตัวที่ผิวของผลึกออกไซด์โลหะด้วยประจุที่เป็นลบ (Negative charge) ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ผิวและประจุบวกอยู่ภายนอกดังแสดงแบบจำลองและสมการทางเคมีในรูปที่ 2.18 (ก) โมเลกุลของออกซิเจนสร้างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างผลึกออกไซด์โลหะซึ่งกีดขวางการไหลของอิเล็กตรอน จึงทำให้ความต้านทานของเซ็นเซอร์เพิ่มขึ้น เมื่อมีตัวอย่างที่ต้องการวัดผ่านเข้ามาทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง หรือทำให้เกิดการ Deoxidizing ขึ้น ทำให้เกิดการดึงออกซิเจนออกจากผิวของผลึกออกไซด์โลหะทำให้ความหนาแน่นประจุลบที่ผิวผลึกออกไซด์โลหะลดลง และทำให้ศักย์ไฟฟ้าซึ่งขวางการไหลของอิเล็กตรอนลดลงด้วย เป็นผลให้ความต้านทานของเซ็นเซอร์ลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)



(ก)



(ข)

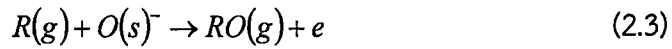
รูปที่ 2.15 (ก) แบบจำลองอธิบายศักติไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของออกไซด์โลหะขณะทำงานปกติ
 (ข) แบบจำลองอธิบายศักติไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของออกไซด์โลหะขณะวัดก๊าซ

สมการที่ (2.2) เป็นสมการเคมีอธิบายการทำงานของเซ็นเซอร์ขณะเซ็นเซอร์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในสถานะปกติออกซิเจนหนึ่งอะตอมจะจับอิเล็กตรอน (กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเซ็นเซอร์) เกิดเป็น O^- ซึ่งจะขวางการเดินทางของกระแสไฟฟ้า เป็นเหตุให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้น้อยลงหรืออีกนัยหนึ่งคือความต้านทานของเซ็นเซอร์สูงขึ้นเอง



แต่เมื่อมีก๊าซตัวอย่างใดๆ $R(g)$ ผ่านเข้ามาจะจับกับออกซิเจนเป็นผลให้มีการดึงออกซิเจนออกจากตัวเซ็นเซอร์ดังสมการที่ (2.3) จึงเป็นเหตุให้ O^- ที่ขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าลดลงเป็นเหตุให้กระแสไฟฟ้าไหลได้สูงขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งคือทำให้ความต้านทานของเซ็นเซอร์ลดลงนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

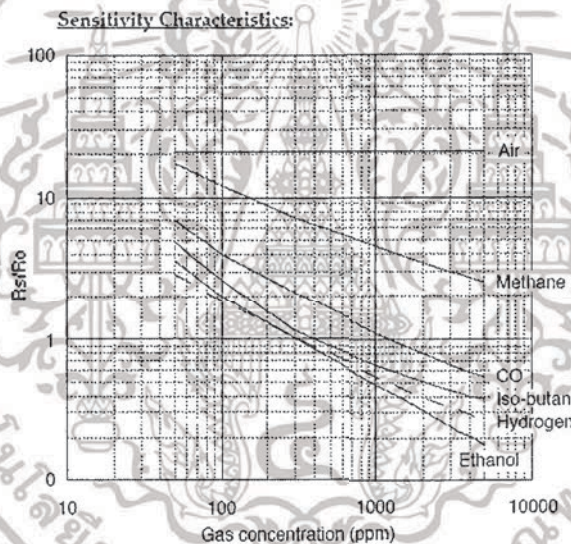


ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซ็นเซอร์ และความเข้มข้นของ Deoxidizing gas แสดงดังสมการที่ (2.4)

$$R_s = A[C]^{-\alpha} \quad (2.4)$$

โดยที่ R_s คือค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ A คือค่าคงที่ $[C]$ คือค่าความเข้มข้นของก๊าซ และ α คือความชันของกราฟความต้านทาน R_s

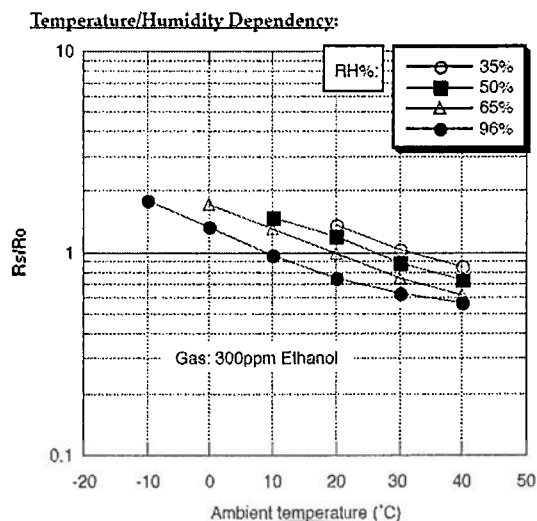
ความไวต่อความเข้มข้นของก๊าซสามารถอธิบายด้วยอัตราส่วนของความต้านทานของเซ็นเซอร์ขณะที่มีก๊าซเป้าหมาย R_s ต่อความต้านทานของเซ็นเซอร์ที่อยู่ในอากาศ R_0 ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซ็นเซอร์ต่อปริมาณของก๊าซ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเซ็นเซอร์และความชันที่มีผลต่อความไวของเซ็นเซอร์ แสดงดังรูปที่ 2.17

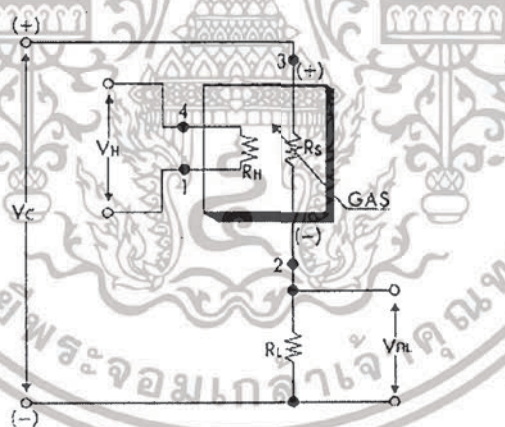
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเซ็นเซอร์และความชื้นที่มีผลต่อความไวของเซ็นเซอร์

2.6.3 วงจรของเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์

วงจรของเซ็นเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.18 จากวงจร V_H เป็นแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวทำความร้อน (Heater) เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้กับเซ็นเซอร์ให้คงที่เพื่อควบคุมความไวของเซ็นเซอร์ให้คงที่อีกทีหนึ่ง เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อความไวของเซ็นเซอร์



รูปที่ 2.18 วงจรพื้นฐานสำหรับก๊าซเซ็นเซอร์โลหะออกไซด์

ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$R_s = \left(\frac{V_C}{V_{RL}} - 1 \right) \times R_L \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์ใช้ไปสามารถหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$P_S = \frac{V_C^2 \times R_S}{(R_S + R_L)^2} \quad (2.6)$$

2.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis)

2.7.1 ความหมายของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

ในการทำวิจัยไม่ว่าจะเป็นวิจัยทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เศรษฐศาสตร์ เป็นต้น มักจะมีข้อมูลและตัวแปรจำนวนมาก ซึ่งทำให้เป็นการยากในการวิเคราะห์และสรุปผลโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าตัวแปรมีความสัมพันธ์กัน จึงมีแนวคิดที่จะลดจำนวนตัวแปรโดยให้ตัวแปรที่สร้างขึ้นใหม่มีความผันแปรหรือความแปรปรวนของตัวแปรเดิมไว้มากที่สุดและเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ก็เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ลดจำนวนตัวแปร

กระบวนการวิเคราะห์องค์ประกอบถือกำเนิดขึ้นมาในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 โดย Spearman แต่การวิเคราะห์องค์ประกอบในสมัยนั้นยังเป็นที่ยุ่งยากซับซ้อนและเสียเวลามากในการวิเคราะห์ ดังนั้น การวิเคราะห์องค์ประกอบจึงยังไม่เป็นที่แพร่หลายในหมู่นักวิจัยสมัยนั้น จนกระทั่งคอมพิวเตอร์ได้ถือกำเนิดขึ้นมาและตามมาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะช่วยเหลือในการวิเคราะห์องค์ประกอบ ดังนั้นการวิเคราะห์องค์ประกอบจึงได้แพร่หลายออกไปในหมู่นักวิจัยกันอย่างกว้างขวาง จุดมุ่งหมายในการวิเคราะห์องค์ประกอบมี 2 ประการคือ

1. เพื่อสำรวจหรือค้นหาตัวแปรแฝงที่ซ่อนอยู่ภายใต้ตัวแปรที่สังเกตหรือวัดได้ เรียกว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (Exploratory factor analysis)
2. เพื่อพิสูจน์ ตรวจสอบหรือยืนยันทฤษฎีที่ผู้อื่นค้นพบ เรียกว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory factor analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจจะใช้ในการสำรวจข้อมูล จำนวนองค์ประกอบอธิบายความแปรปรวนร่วมระหว่างตัวแปรเมื่อผู้วิจัยไม่มีหลักฐานอ้างอิงเพียงพอสำหรับเป็นกรอบของสมมติฐานเกี่ยวกับจำนวนขององค์ประกอบภายใต้ข้อมูลที่สอบวัดได้

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก [13] เป็นเทคนิคการลดจำนวนตัวแปรเทคนิคหนึ่ง โดยการสร้างเซตของตัวแปรใหม่ให้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรเดิม และเซตของตัวแปรใหม่จะมีรายละเอียดหรือข้อมูลของตัวแปรเดิม จำนวนตัวแปรใหม่จะต้องไม่เกินที่จำนวนตัวแปรเดิม นั่นคือ กรณีที่มีตัวแปรเดิม p ตัว ตัวแปรใหม่เท่ากับ m ตัว จะได้ว่า $m \leq p$

2.7.2 หลักการของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเป็นเทคนิคการลดจำนวนตัวแปรที่มีจำนวนมาก เช่น p ตัว โดยการสร้างตัวแปรใหม่ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรเดิม p ตัว และจะต้องสกัดเอาส่วนที่เป็นเอกลักษณ์ซึ่งรวมแล้วกับการเชิงเส้นเพื่อทำการคัดเอาส่วน เมื่อผู้รู้เห็นในแง่เชิงระเบียบขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือดึงรายละเอียดหรือค่าแปรปรวนจากตัวแปรเดิมมาไว้ในตัวแปรใหม่ให้มากที่สุด ในที่นี้จะใช้ PC_i แทนองค์ประกอบหลักที่ $i; i=1,2,\dots,p$ การสร้าง PC_i จะมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 การสร้าง PC_1 หรือตัวประกอบหลักที่ 1 ซึ่งเป็นตัวแปรใหม่ตัวแรก โดยให้ PC_1 เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรเดิมทั้ง p ตัว และจะต้องสกัดหรือดึงค่าความแปรปรวนจากตัวแปรทั้ง p ตัว มาไว้ใน PC_1 ให้มากที่สุด ซึ่งจะทำให้ PC_1 มีค่าความแปรปรวนมากที่สุด เมื่อเทียบกับ $PC_i; i=1,2,\dots,p$ โดยที่

$$PC_1 = w_{11}X_1 + w_{12}X_2 + \dots + w_{1p}X_p$$

หรือ $PC_1 = w'_1 x$ ที่ทำให้ $Var(w'_1 x)$ มีค่ามากที่สุด และ $w'_1 w_1 = 1$

ขั้นที่ 2 การสร้างองค์ประกอบหลักที่ 2 หรือ PC_2

PC_2 จะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรเดิม p ตัว และสกัดรายละเอียดหรือความแปรปรวนที่เหลือจาก PC_1 โดยจะต้องสกัดความผันแปรที่เหลือจาก PC_1 มาไว้ใน PC_2 ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และ PC_2 จะต้องไม่มีความสัมพันธ์กับ PC_1 หรือจะต้องตั้งฉาก (orthogonal) กับ PC_1

$$PC_2 = w_{21}X_1 + w_{22}X_2 + \dots + w_{2p}X_p$$

หรือ

$$PC_2 = w'_2 x \text{ ที่ทำให้ } Var(w'_2 x) \text{ มีค่ามากที่สุด}$$

โดยมีเงื่อนไข $w'_2 w_2 = 1, w'_1 w_2 = 0$ และ $Cov(w'_1 x, w'_2 x) = 0$

ขั้นที่ k การสร้างองค์ประกอบหลักที่ k หรือ PC_k

PC_k จะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรเดิม p ตัว และสกัดรายละเอียดหรือความแปรปรวนที่เหลือจาก $PC_1, PC_2, \dots, PC_{k-1}$ มาไว้ใน PC_k ให้มากที่สุด และ PC_k จะต้องไม่มีความสัมพันธ์กับ $PC_1, PC_2, \dots, PC_{k-1}$

โดยที่

$$PC_k = w_{k1}X_1 + w_{k2}X_2 + \dots + w_{kp}X_p$$

หรือ

$$PC_k = w'_k x \text{ ที่ทำให้ } Var(w'_k x) \text{ มีค่ามากที่สุด}$$

โดยมีเงื่อนไข $w'_k w_k = 1, w'_j w_k = 0 ; j \neq k$

$$\text{และ } Cov(w'_k x, w'_j x) = 0 \text{ สำหรับ } j < k$$

ขั้นที่ p การสร้างองค์ประกอบหลักที่ p หรือ PC_p

PC_p จะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรเดิม p ตัว โดย PC_p จะมีความผันแปรของตัวแปรเดิมที่เหลือจาก $PC_1, PC_2, \dots, PC_{p-1}$ และไม่มีความสัมพันธ์กับ $PC_1, PC_2, \dots, PC_{p-1}$

โดยที่

$$PC_p = w_{p1}X_1 + w_{p2}X_2 + \dots + w_{pp}X_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $PC_p = w'_p x$ ที่ทำให้ $Var(w'_p x)$ มีค่ามากที่สุด
 โดยมีเงื่อนไข $w'_p w_p = 1$, และ $Cov(w'_p x, w'_j x) = 0$ สำหรับ $j < p$
 ความผันแปรรวมของตัวแปรเดิม p ตัว = ความผันแปรของตัวประกอบหลัก p ตัว หรือ

$$Var(X_1) + Var(X_2) + \dots + Var(X_p) = Var(PC_1) + Var(PC_2) + \dots + Var(PC_p)$$

จากวิธีการข้างต้นจะทำให้ ค่าแปรปรวนของ PC_1 จะมากที่สุดและค่าแปรปรวนของ PC จะลดลงเรื่อยๆจนทำให้ค่าแปรปรวนของ PC_p ต่ำสุดหรือ $Var(PC_1) \geq Var(PC_2) \geq \dots \geq Var(PC_p)$
 ถ้าเวกเตอร์ตัวแปรสุ่ม $x' = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ ซึ่งมีเมตริกซ์ค่าแปรปรวนร่วม Σ และมีค่าไอเกน $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$ โดยเขียนตัวประกอบหลักให้อยู่ในรูปฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปร X_1, X_2, \dots, X_p คือ

$$\begin{aligned} PC_1 &= w'_1 x = w_{11}X_1 + w_{12}X_2 + \dots + w_{1p}X_p \\ PC_2 &= w'_2 x = w_{21}X_1 + w_{22}X_2 + \dots + w_{2p}X_p \\ &\vdots \\ PC_p &= w'_p x = w_{p1}X_1 + w_{p2}X_2 + \dots + w_{pp}X_p \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$Var(PC_i) = w'_i \Sigma w_i \quad ; \quad i=1,2,\dots,p$$

(2.8)

สำหรับความแปรปรวนร่วมของ PC_i และ PC_k คือ

$$Cov(PC_i, PC_k) = w'_i \Sigma w_k \quad ; \quad i \neq k \quad ; \quad k, i=1,2,\dots,p$$

(2.9)

โดยที่ PC_1, PC_2, \dots, PC_p เป็นตัวแปรใหม่หรือตัวประกอบหลัก p ตัว และ w_j เป็นสัมประสิทธิ์หรือน้ำหนักของตัวแปรเดิม X_j ที่มีต่อตัวประกอบหลัก PC_i โดยที่ PC_1, PC_2, \dots, PC_p ไม่มีความสัมพันธ์กัน PC_1 เป็นตัวแปรใหม่ตัวที่ 1 หรือตัวประกอบหลักที่ 1 ซึ่งฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรเดิม ซึ่งทำให้ค่าแปรปรวน $Var(PC_1) = w'_1 \Sigma w_1$ มีค่ามากที่สุด หรือ

$PC_1 =$ ฟังก์ชันเชิงเส้น $w'_1 x$ ที่ทำให้ $Var(w'_1 x)$ มีค่ามากที่สุด ซึ่งมี $w'_1 w_1 = 1$ หรือ

$$w'_1 w_1 = w_{11}^2 + w_{12}^2 + \dots + w_{1p}^2 = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PC_2 ฟังก์ชันเชิงเส้นที่ 2 ของ $X_1, X_2, \dots, X_p = w'_2 x$ ที่ทำให้ $Var(w'_2 x)$ มีค่ามากที่สุด โดยมีเงื่อนไขว่า $w'_2 w_2 = 1$ และ $Cov(w'_1 x, w'_2 x) = Cov(PC_1, PC_2) = 0$ หรือ PC_2 ไม่มีความสัมพันธ์กับ PC_1

PC_k ฟังก์ชันเชิงเส้นที่ k ของ $X_1, X_2, \dots, X_p = w'_k x$ ที่ทำให้ $Var(PC_k)$ มีค่ามากที่สุด โดยมีเงื่อนไขว่า $w'_k w_k = 1$ และ $Cov(w'_k x, w'_i x) = 0$ เมื่อ $i < k$ หรือ PC_k ไม่มีความสัมพันธ์กับ PC_i โดยที่ $i < k$

สรุปถ้าเวกเตอร์ $x' = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ ซึ่งมีเมทริกซ์ค่าแปรปรวนร่วม Σ ที่มีค่าไอเกนและเวกเตอร์ไอเกน $(\lambda_1, w_1), (\lambda_2, w_2), \dots, (\lambda_p, w_p)$ โดยที่ค่าไอเกน $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$ และเวกเตอร์ไอเกน $w' = (w_1, w_2, \dots, w_p)$ ถ้า $PC_1 = w'_1 x, PC_2 = w'_2 x, \dots, PC_p = w'_p x$ เป็นตัวประกอบหลัก p ค่า แล้วจะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^p Var(X_i) = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \dots + \sigma_{pp} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p = \sum_{i=1}^p Var(PC_i)$$

$$\therefore PC_k \text{ มีสัดส่วนของค่าแปรปรวน} = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^p \lambda_i}; \quad k=1, 2, \dots, p$$

เช่น ถ้า PC_1 มีสัดส่วนของค่าแปรปรวน = 0.7 หมายถึง PC_1 สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปร X_i 's ทั้งหมด 70% สำหรับค่าไอเกน $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ ของตัวประกอบหลัก PC_1, PC_2, \dots, PC_p ตามลำดับ โดยที่ ค่าไอเกนที่ $i(\lambda_i)$ จะเป็นค่าแปรปรวนร่วมของตัวประกอบหลักที่ $i(PC_i)$ ส่วนเวกเตอร์ไอเกนที่ $k(w_k)$ จะเป็นน้ำหนักของตัวแปรเดิมในตัวประกอบหลักที่ $k(PC_k)$

2.7.3 จำนวนองค์ประกอบหลัก

ดังได้กล่าวแล้วว่าเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเป็นการลดจำนวนตัวแปร p ตัวโดยที่ $m \leq p$ โดยตัวแปรใหม่หรือตัวประกอบหลักที่สร้างขึ้น คือ PC_1, PC_2, \dots, PC_m จะมีความแปรปรวนของตัวแปรเดิมให้มากที่สุด เช่น ถ้ามีตัวแปรเดิม 20 ตัว ($p \leq 20$) และค่าแปรปรวนทั้งหมด $= \sum_{i=1}^{20} Var(X_i)$ จะสามารถสร้างตัวแปรใหม่หรือตัวประกอบหลักได้ 20 ตัว แต่ถ้าพบว่าตัวประกอบ 3 ตัวแรกสามารถสกัดความแปรผันของตัวแปรเดิมได้ 80%

$$\text{หรือ} \quad \frac{Var(PC_1) + Var(PC_2) + Var(PC_3)}{\sum_{i=1}^{20} Var(X_i)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง PC_1 กับ X_1 และ X_2 เป็น 0.94126 และ 0.92684 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามาก ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า X_1 และ X_2 มีผลกระทบหรือมีอิทธิพลอย่างมาก ในการสร้าง PC_1 และค่า loading นี้จะเป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความหมายของตัวประกอบหลัก สำหรับค่า loading นอกจากจะคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แล้ว ยังสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (2.11)

$$l_{ij} = \frac{w_{ij}}{S_j} \sqrt{\lambda_i} \quad (2.11)$$

โดยที่ l_{ij} เป็น loading ของตัวแปรเดิมที่ $j(X_j)$ กับ ตัวประกอบหลักที่ $i(PC_i)$
 w_{ij} เป็น loading ของตัวแปรเดิมที่ j กับ ตัวประกอบหลักที่ $i(PC_i)$
 λ_i เป็นค่าไอเกนของตัวประกอบหลักที่ i (ค่าแปรปรวนของตัวประกอบหลักที่ $i(PC_i)$)
 S_j เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรเดิมที่ $j(X_j)$

2.7.5 ชนิดของข้อมูลในการสร้างตัวประกอบหลัก

ในการสร้างตัวประกอบในสมการที่ (2.7) เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์หรือน้ำหนัก (w_{ij}) ของตัวแปรเดิม โดยจะคำนวณจากเมตริกซ์ค่าแปรปรวนร่วม (Σ หรือ S) ซึ่งในกรณีดังกล่าวจะพบว่าถ้ามีแปรเดิมตัวใดตัวหนึ่งมีค่าแปรปรวนมากกว่าตัวแปรอื่นๆ มาก หรือกรณีที่ตัวแปรเดิมมีหน่วยที่แตกต่างกัน จะทำให้ตัวแปรที่มีค่าแปรปรวนมากมีส่วนในการสร้างตัวประกอบหลักมาก ในขณะที่ตัวแปรเดิมมีค่าแปรปรวนต่ำๆ แทบจะไม่มีผลต่อการสร้างตัวประกอบหลักเลย หรือกล่าวได้ว่าตัวประกอบหลักที่ได้จะขึ้นกับตัวแปรที่มีค่าแปรปรวนมากเท่านั้น กรณีที่ค่าแปรปรวนของตัวแปรเดิมต่างกันมากๆ ถ้าใช้เมตริกซ์ค่าแปรปรวนร่วมในการสร้างตัวประกอบหลัก จะทำให้

1. ตัวประกอบหลักตัวแรกๆ มีค่าแปรปรวนมาก เช่น PC_1 มีค่าแปรปรวนสูง ในขณะที่ PC อื่นๆ มีค่าแปรปรวนต่ำมาก
2. ตัวประกอบหลักจะเป็นตัวแทนของตัวแปรเดิมที่มีแปรปรวนมาก หรือกรณีที่ตัวแปรเดิมมีหน่วยต่างกันมาก การที่หน่วยต่างกันจะทำให้ค่าแปรปรวนต่างกันมากเช่นกัน

ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวแปรที่มีค่าแปรปรวนมากเป็นตัวแปรที่สำคัญในการสร้างตัวประกอบหลัก จึงควรปรับข้อมูลให้อยู่ในรูปมาตรฐาน (standardized) ก่อน หรือแทนที่จะใช้เมตริกซ์ค่าแปรปรวนหรือค่าแปรปรวนร่วม ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ หรือ R) การที่ใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ตัวอย่าง R จะทำให้ค่าไอเกน(แปรปรวน) และเวกเตอร์ค่าไอเกน (w_{ij}) เปลี่ยนไปจากเดิมที่ใช้เมตริกซ์ S

2.7.6 การพิจารณาจำนวนตัวประกอบหลักที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า จำนวนตัวประกอบหลักจะเท่ากับจำนวนตัวแปรเดิม คือ p ตัว แต่ตัวประกอบหลักตัวต่างๆ จะมีสัดส่วนความแปรปรวนต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ตัวแปรปรวนเดิมมีความสัมพันธ์กันมาก จะทำให้มีตัวประกอบหลักเพียงไม่กี่ตัวที่มีสัดส่วนความแปรปรวนสูง จึงมักมีคำถามว่าจำนวนตัวประกอบหลักควรจะมีกี่ตัวจึงเหมาะสม นอกจากนั้นวัตถุประสงค์หลักของการวิเคราะห์ตัวประกอบหลัก คือ การลดจำนวนตัวแปร ดังนั้น จำนวนตัวประกอบหลักจะต้องน้อยกว่าจำนวนตัวแปรเดิม แนวทางในการพิจารณาจำนวนตัวประกอบหลักมีดังนี้

1. พิจารณาจากร้อยละความแปรปรวนสะสม ถ้าร้อยละความแปรปรวนสะสมของตัวประกอบหลัก m ตัวแรก เป็นอย่างต่ำร้อยละ 80 ก็ควรให้จำนวนตัวประกอบหลักเท่ากับ m โดยที่ $m < p$ เช่น ถ้า $p=10$ และมีตัวประกอบหลักเพียง 3 ตัวแรก ที่ค่าสะสมของร้อยละของร้อยละของความแปรปรวนเป็น 82 ขณะที่ตัวประกอบหลักตัวที่ 4 มีร้อยละของความแปรปรวนเพียง 7.5 กรณีนี้จำนวนตัวประกอบหลักที่เหมาะสม คือ 3 (PC_1, PC_2, PC_3)

2. ใช้กราฟ scree ในการพิจารณาจำนวนตัวประกอบหลักที่เหมาะสม โดยการพล็อตค่าไอเกน การพิจารณากราฟ scree นั้น ถ้าตัวประกอบหลักตัวที่ $m+1, \dots, p$ หรือควรมีตัวประกอบหลัก m ตัวเท่านั้น

3. ให้พิจารณาค่าไอเกนหรือค่าแปรปรวนของตัวประกอบหลักแต่ละตัว ถ้าค่าแปรปรวนของตัวประกอบ

หลักตัวใดน้อยกว่าค่าแปรปรวนเฉลี่ย $\left(\frac{\sum_{i=1}^p \lambda_i}{p} \right)$ จะตัดทิ้ง

การใช้ค่าไอเกนหรือค่าแปรปรวนของตัวประกอบหลักสำหรับข้อมูลที่อยู่ในรูปมาตรฐานแล้ว การพิจารณาเฉพาะตัวประกอบหลักที่มีค่าไอเกนมากกว่าหนึ่งนั้นอาจทำให้จำนวนตัวประกอบหลักที่ได้มากหรือน้อยจนเกินไปดังนั้นควรใช้หลักเกณฑ์อื่นๆมารวมพิจารณาด้วย

2.7.7 ความหมายของตัวประกอบหลัก

ความหมายของตัวประกอบหลักควรจะอธิบายถึงความหมายตัวแปรเดิม เนื่องจากตัวประกอบหลักเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรเดิม ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าค่า loading จะเป็นค่าที่ใช้อธิบายความหมายของตัวประกอบหลักแต่ละตัว เนื่องจากค่า loading (I_{ij}) เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเดิมที่ $j(X_j)$ กับตัวประกอบหลักที่ $i(PC_i)$ การศึกษาว่าความหมายของตัวประกอบหลักควรเป็นความหมายของตัวแปรเดิมตัวใดบ้างนั้น ให้พิจารณาจากค่า loading ของตัวแปรเดิมตัวใดมีค่ามากกว่าความหมายของตัวประกอบหลักควรเป็นความหมายของตัวแปรนั้น โดยทั่วไปกำหนดว่า ถ้าค่า loading มากกว่าหรือเท่ากับ ± 0.5 จะพิจารณาความหมายของตัวแปรเดมนั้นให้เป็นความหมายของตัวประกอบหลัก

2.8 ค่าไอเกนและไอเกนเวกเตอร์ (Eigen value and eigen vector)

ในทางคณิตศาสตร์ไอเกนเวกเตอร์ของการแปลงเชิงเส้นนั้นต้องเป็นเมตริกซ์ที่ไม่ใช่เมตริกซ์ศูนย์ที่เมื่อนำไปใช้ในการแปลงนั้นจะเปลี่ยนระยะแต่ไม่เปลี่ยนทิศทาง สำหรับทุกไอเกนเวกเตอร์ของการแปลงเชิงเส้น จะมีค่าสเกลาร์ที่เรียกว่า ค่าไอเกน สำหรับเมตริกซ์นั้น ซึ่งกำหนดผลรวมไอเกนเวกเตอร์เป็นมาตราส่วนภายใต้การแปลงเชิงเส้น ตัวอย่างเช่น ค่าไอเกน เท่ากับ +2 หมายความว่าไอเกนเวกเตอร์มีความยาวและจุดเป็นเท่าตัวในทิศทางเดิม, ค่าไอเกนเท่ากับ +1 หมายความว่าไอเกนเวกเตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวและจุด, ในขณะที่ค่าไอเกนเท่ากับ -1 หมายความว่าไอเกนเวกเตอร์จะมีทิศทางผกกลับ ปริภูมิลักษณะเฉพาะ (Eigen space) ของการแปลงที่นำมา สำหรับค่าไอเกนเฉพาะส่วนเป็นเซตหรือผลการแม่เชิงเส้นของไอเกนเวกเตอร์ที่ความสัมพันธ์กับค่าไอเกนนี้ พร้อมทั้งเวกเตอร์ศูนย์หรือไม่มีทิศทาง

ในกรณีการแปลงเชิงเส้น $T: V \rightarrow V$ มี A เป็นเมตริกซ์การแปลงของ T ที่ทำให้ $T(v) = Av$ สำหรับทุก $v \in V$ ถ้ามีสเกลาร์ λ ที่ทำให้มีเวกเตอร์ v ที่ไม่เป็นเวกเตอร์ศูนย์ที่ทำให้ $Av = \lambda v$ แล้วจะทำให้การคำนวณง่ายขึ้น ซึ่งมีการประยุกต์ใช้ในหลายสาขา

กำหนดให้ A เป็นเมตริกซ์ขนาด $m \times n$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

และ v เป็นเวกเตอร์หลัก (Column vector) และ λ เป็นค่าคงที่ใดๆ โดยที่ทำได้

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_3 \end{bmatrix}$$

โดยที่ทำได้

$$Av = \lambda v$$

(2.39)

เมื่อ

A แทน ค่าเมตริกซ์

λ แทน เป็นค่าคงที่ใดๆ เป็นสเกลาร์

v แทน ค่าไอเกนเวกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกสเกลาร์ λ ที่ทำให้สมการมีคำตอบที่ไม่เป็นศูนย์ (Nontrivial solution) ว่า ค่าไอเกน (Eigen value) ของ A และเรียกเวกเตอร์ v ซึ่งเป็นคำตอบที่ไม่ใช่เวกเตอร์ศูนย์นั้นว่า ไอเกนเวกเตอร์ (Eigen vector) สำหรับ λ

ตัวอย่างเช่น $v = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$ เป็นไอเกนเวกเตอร์ สำหรับค่าไอเกน $\lambda = 3$ ของเมตริกซ์ $A = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 8 & -1 \end{bmatrix}$

หรือไม่

จะเห็นว่า
$$Av = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 8 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 6 \end{bmatrix}$$

และ
$$\lambda v = 3 \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 6 \end{bmatrix}$$

แสดงว่า
$$Av = \lambda v$$

ดังนั้น
$$v = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$$
 เป็นไอเกนเวกเตอร์ สำหรับค่าไอเกน $\lambda = 3$

ส่วนการหาค่าไอเกนของเมตริกซ์ A สามารถอธิบายโดยตัวอย่างต่อไปนี้

เมื่อกำหนดให้เมตริกซ์ $A = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 8 & -1 \end{bmatrix}$ จะสามารถหาค่าไอเกนได้ดังนี้

เมื่อ
$$Av = \lambda v$$

ดังนั้น
$$\begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 8 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

$$\lambda \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 8 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 8 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\left(\begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 8 & -1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda - 3 & 0 \\ -8 & \lambda + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ผลเฉลยไม่เป็นศูนย์ เมื่อ

$$\begin{vmatrix} \lambda - 3 & 0 \\ -8 & \lambda + 1 \end{vmatrix} = 0$$

$$(\lambda - 3)(\lambda + 1) - (-8)0 = 0$$

$$(\lambda - 3)(\lambda + 1) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = 3, -1$$

ดังนั้น ค่าไอเกนของเมตริกซ์ A มี 2 ค่า คือ $\lambda_1 = 3$ และ $\lambda_2 = -1$ โดยทั่วไปจากสมการ $Av = \lambda v$ จะเห็นว่า $v = 0$ ที่ทำให้สมการ เป็นจริงทุกๆ ค่าของ λ สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูป ระบบสมการเอกพันธ์ (Homogeneous system) คือ

$$(\lambda I - A)v = 0 \quad (2.40)$$

เมื่อ

A แทน ค่าเมตริกซ์

I แทน เมตริกซ์เอกลักษณ์

λ แทน เป็นค่าคงที่ใดๆ เป็นสเกลาร์

v แทน ค่าไอเกนเวกเตอร์

ซึ่งระบบสมการดังกล่าวจะมีผลเฉลยที่ไม่เป็นศูนย์เมื่อดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์ $\det(\lambda I - A) = 0$ มีสัมประสิทธิ์ไม่เป็น 0 นั่นคือ

$$|\lambda I - A| = 0 \quad (2.41)$$

ซึ่งสมการที่ (2.41) ใช้ในการหาค่าไอเกน เรียกว่า สมการแคแรกเตอร์ริสติก (Characteristic Equation) ของ A โดยการแก้สมการเพื่อหาค่าไอเกน λ ตามต้องการ ตัวอย่างเช่น เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

สมการแคแรกเตอร์ริสติก คือ

$$|\lambda I - A| = 0$$

$$\begin{vmatrix} \lambda - 3 & 0 - 2 \\ 0 - (-1) & \lambda - 0 \end{vmatrix} = 0$$

$$\begin{vmatrix} \lambda - 3 & -2 \\ 1 & \lambda \end{vmatrix} = 0$$

$$(\lambda - 3)\lambda - 1(-2) = 0$$

$$\lambda^2 - 3\lambda + 2 = 0$$

$$\lambda = 1, 2$$

ดังนั้น ค่าไอเกนของเมตริกซ์ A มี 2 ค่า คือ $\lambda_1 = 1$ และ $\lambda_2 = 2$

สรุป ถ้า A เป็นเมตริกซ์ขนาด $m \times n$ และ λ เป็นจำนวนจริงแล้วจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

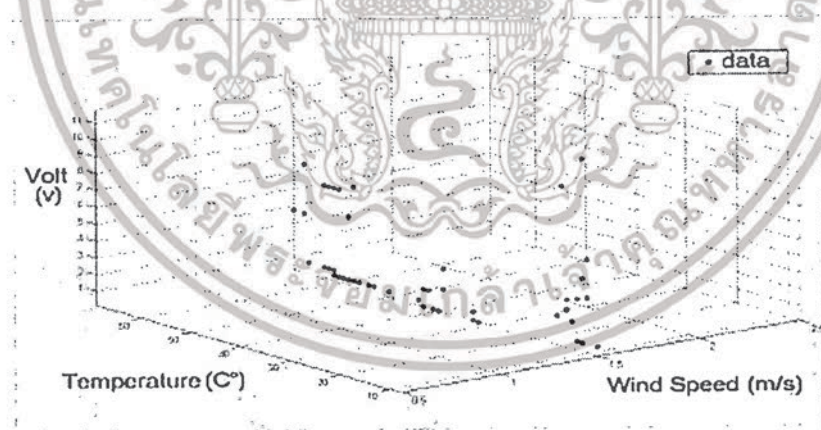
1. λ เป็นค่าไอเกนของเมตริกซ์ A
2. ระบบสมการ $(\lambda I - A)v = 0$ มีคำตอบที่ไม่เป็นเวกเตอร์ศูนย์
3. $|\lambda I - A| = 0$
4. มีเวกเตอร์ $v \neq 0$ ใน R ที่ทำให้ $Av = \lambda v$

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันจุกอเล็กทรอนิกส์มีการนำพัฒนานำไปใช้งานต่างๆ หลากหลาย ซึ่งส่วนใหญ่จะนิยมใช้เซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์เป็นเซ็นเซอร์รับกลิ่น เนื่องจากมีขนาดเล็กสะดวกที่จะนำเซ็นเซอร์หลายตัวต่อรวมกัน ทนทาน เชื่อถือได้และการต่อวงจรเพื่อนำสัญญาณเอาต์พุตไปประมวลผลต่อก็ทำได้ง่าย ซึ่งตัวอย่างงานวิจัยที่นำเซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์ไปใช้มีดังนี้

2.9.1 การเฝ้าระวังมลพิษทางอากาศ

งานวิจัยของ Iman Morsi [14] ได้นำก๊าซเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์จำนวน 5 ตัว คือ TGS 822, TGS 2442, TGS 813, TGS 4160 และ TGS 2600 มาต่อรวมกัน และยังมี การตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม เซ็นเซอร์ทั้งหมดควบคุมการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยนำจุกอเล็กทรอนิกส์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ตามท้องถนนต่างๆ ในเมืองเปรียบเทียบกับ โดยใช้เทคนิคการถดถอยเชิงเส้นโค้งเพื่อหาความสัมพันธ์ในความเป็นไปได้ในการเตือนระดับมลพิษโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลข้อมูล

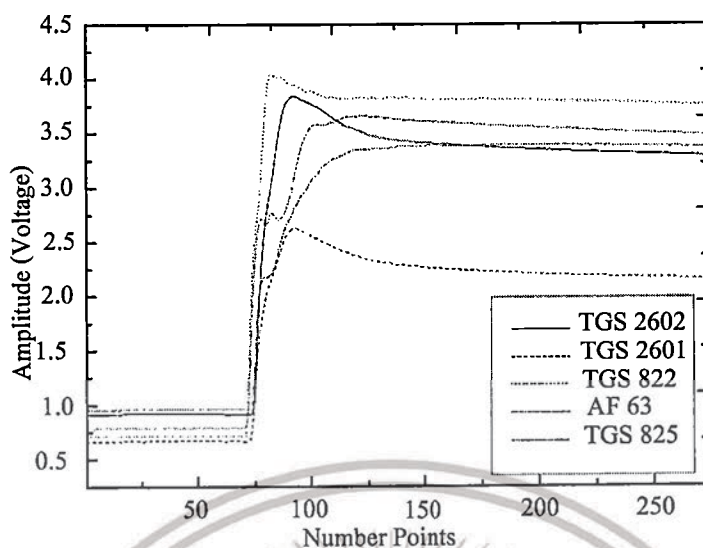


รูปที่ 2.19 ข้อมูลระดับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่บันทึกได้จากเซ็นเซอร์หลายๆ ตัว

2.9.2 การจำแนกตัวอย่างกลิ่นน้ำหอม

งานวิจัยของรุ่งโรจน์ เมาลานนท์ [12] ได้ใช้ก๊าซเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์จำนวน 5 ตัว คือ TGS2620 TGS2610 TGS822 TGS825 และ AF63 ตรวจวัดกลิ่นน้ำหอมกับแอลกอฮอล์ซึ่งได้การเปลี่ยนแปลงสัญญาณของก๊าซเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

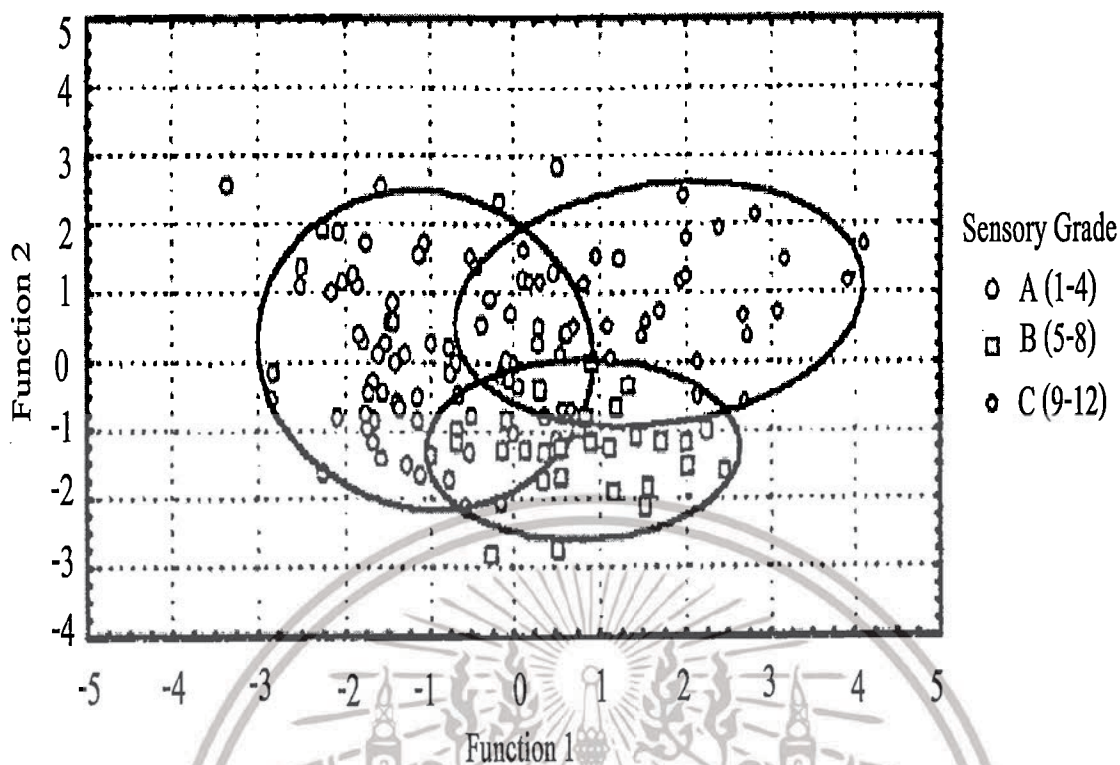


รูปที่ 2.20 สัญญาณการเปลี่ยนแปลงของก๊าซเซ็นเซอร์ตรวจวัดน้ำหอม [12]

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้เทคนิคPCA ในการจำแนกกลิ่นการทดลองได้คัดเลือกตัวอย่างน้ำหอมทั้งหมด 2 กลิ่น สารโพรพานอลและเอทานอล ซึ่งเอทานอลเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่พบในน้ำหอมและโพรพานอลใช้เป็นสารเปรียบเทียบสำหรับผลการทดลอง

2.9.3 การจำแนกคุณภาพเนื้อสัตว์

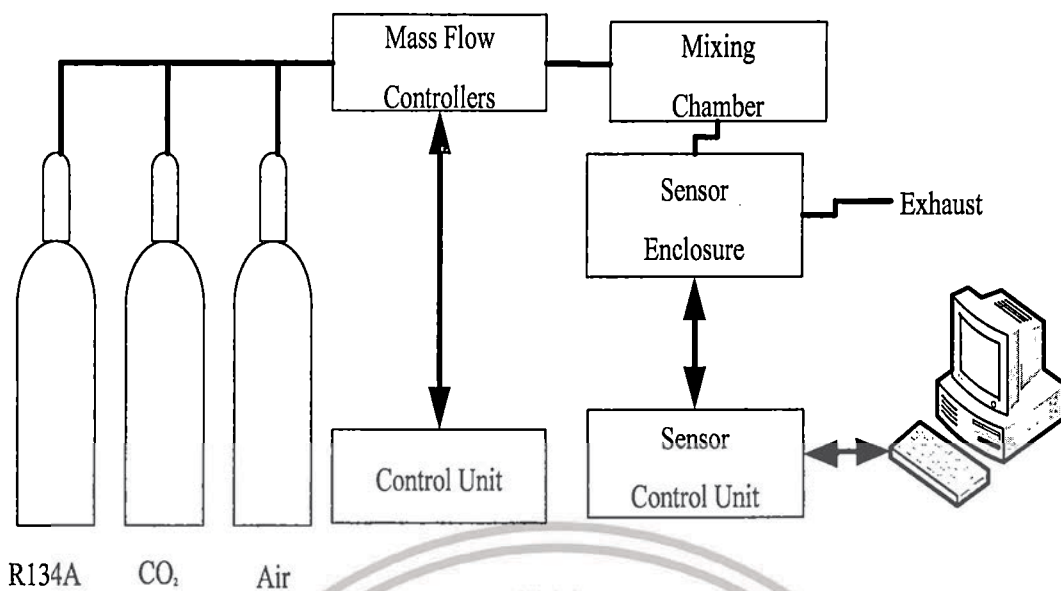
งานวิจัยของ Chen Cunshec และคณะ [15] ใช้ก๊าซเซ็นเซอร์จำนวน 6 ตัว คือ MQ136, MQ 137, MQ 138, MQ 139, MQ 140 และ MQ 141 ตรวจวัดกลิ่นเนื้อสัตว์เพื่อดูคุณภาพ เนื่องจากการใช้เทคนิคเทคนิคประสาทสัมผัสตรวจสอบที่ใช้อยู่เกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย ซึ่งจะใช้งบใช้อิเล็กทรอนิกส์ตมกลิ่นเนื้อที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดวิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์มัลติเพล็กซ์คริมิแนนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.21



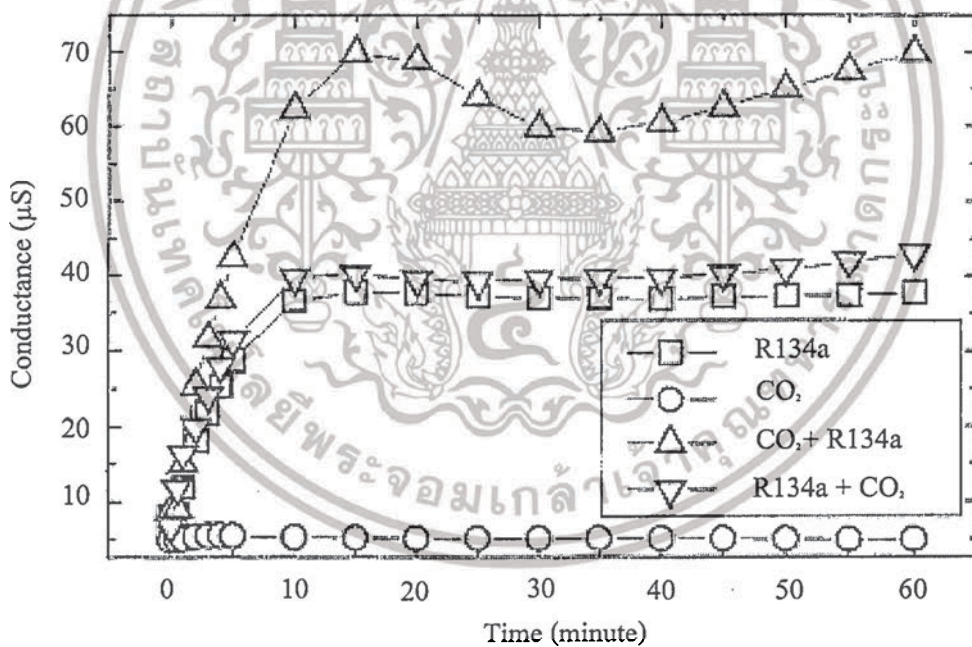
รูปที่ 2.21 ผลการจำแนกเนื้อสัตว์ตามระดับอุณหภูมิต่างๆ ด้วยเทคนิค MDA

2.9.4 การจำแนกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับก๊าซอื่นๆ

งานวิจัยของ Frederic Sarry และ Martine Lumbreras [16] ได้นำก๊าซเซ็นเซอร์จำนวน 3 ตัว คือ TGS800, TGS813 และ TGS832 มาต่อกันเป็นอาร์เรย์ มาใช้ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็น R134a และสารผสมของก๊าซทั้งสอง ซึ่งเป็นสารก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกเป็นสาเหตุของปัญหาโลกร้อนและการวิเคราะห์ข้อมูลหลังการตรวจวัดจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักและการวิเคราะห์มิติเปิดดิสคริมิแนนต์ ซึ่งมีการทำงานระบบและผลการตรวจวัดที่ได้ ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ระบบจุ่มอิเล็กทรอนิกส์สำหรับจำแนกก๊าซต่างๆ โดยใช้เซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์



รูปที่ 2.23 ผลการตรวจวัดแสดงเป็นค่าความนำที่วัดได้จากเซ็นเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีของคาร์บอน

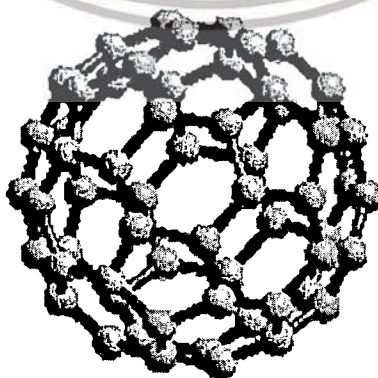
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการ์บอนนาโนทิวบ์ เริ่มตั้งแต่รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการต่างๆ ลักษณะการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางกลของท่อคาร์บอน ตลอดจนการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ซึ่งจะขอกกล่าวตามลำดับดังต่อไปนี้

3.1 รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน

คาร์บอนเป็นส่วนประกอบของสสารต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอาหาร อากาศ เครื่องนุ่งห่ม และน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น ทั้งยังมีบทบาทอย่างมากต่อมนุษย์ เนื่องจากองค์ประกอบครึ่งหนึ่งของสสารที่เป็นของแข็งในร่างกายมนุษย์ คือ คาร์บอน ดังนั้นคาร์บอนจึงเป็นหนึ่งในธาตุสำคัญหลักๆ ของมนุษย์ คาร์บอน เป็นธาตุลำดับที่ 6 ในตารางธาตุ มีเลขอะตอมเท่ากับ 6 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 12 และมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในอะตอม แบบ $1s^2 2s^2 2p^2$ สำหรับโครงสร้างของคาร์บอนนั้นสามารถพบได้หลายแบบ โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ชนิดหลักๆ ดังนี้^[14]

3.1.1 โครงสร้างแบบศูนย์มิติ

มีลักษณะเป็นก้อนเล็กมากจนอาจถือได้ว่าเป็นจุดที่ไม่มีมิติหรือศูนย์มิติเรียกว่าฟูลเลอร์ีนส์ (Fullerenes) หรือบัคกี้บอล ซึ่งส่วนใหญ่คาร์บอนที่พบจะอยู่ในรูปของคาร์บอนหกสิบ (C_{60}) โดยแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้งหมด 60 อะตอม มาจับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ทำให้ได้รูปทรงเป็นแบบก้อนทรงกลมกลวงคล้ายลูกตะกั่วหรือลูกบอลขนาดจิ๋ว

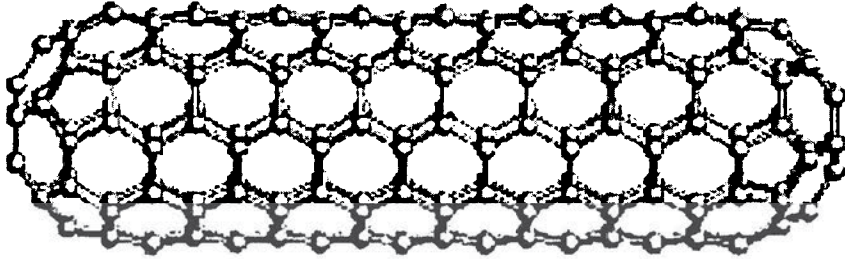


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของคาร์บอนหกสิบ (C_{60})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 โครงสร้างแบบหนึ่งมิติ

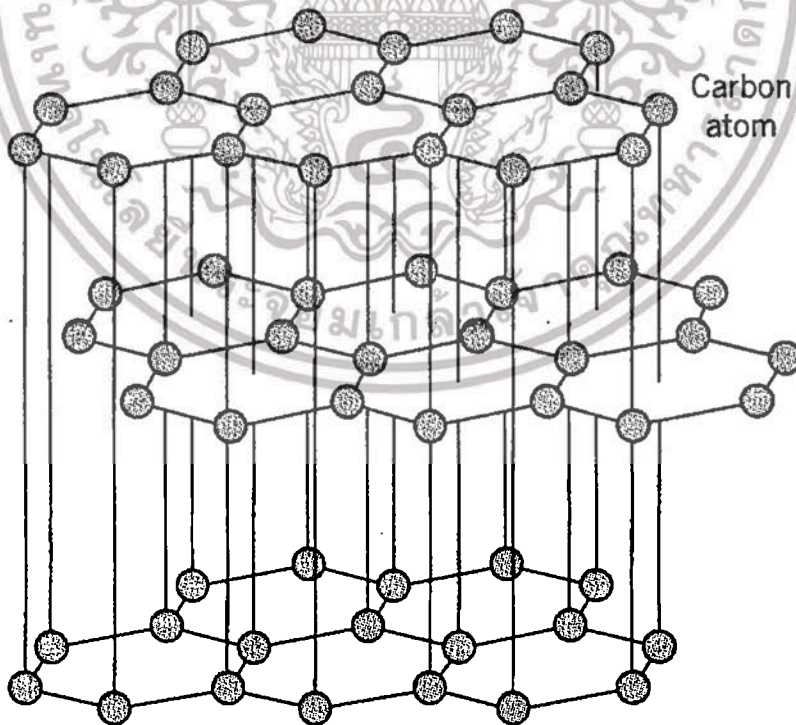
มีลักษณะเป็นแผ่นคล้ายกับแผ่นกราฟไฟต์ม้วนตัวเป็นท่อที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากจนทำให้ดูเหมือนเป็นเส้นยาวในแนวหนึ่งมิติ เรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์

3.1.3 โครงสร้างแบบสองมิติ

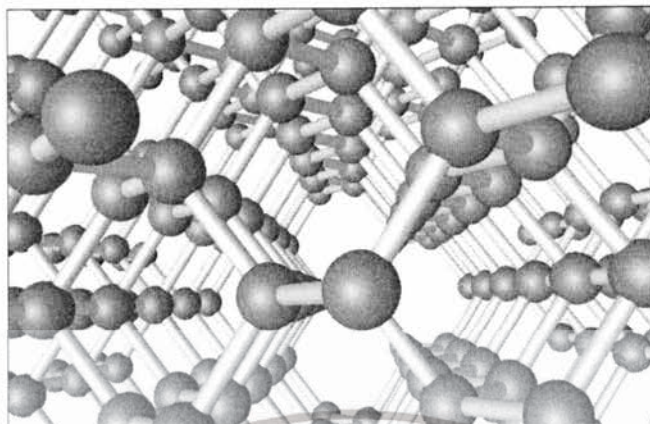
มีลักษณะเป็นแผ่นที่วางซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ และยึดระหว่างชั้นเข้าด้วยกันด้วยแรงที่ต่ำกว่าพันธะโควาเลนต์ ซึ่งก็คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals force) คาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบนี้ นิยมนำมาทำเป็นไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ และใช้เคลือบวัสดุเพื่อป้องกันการเกิดสนิม



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของแกรไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 โครงสร้างแบบสามมิติ

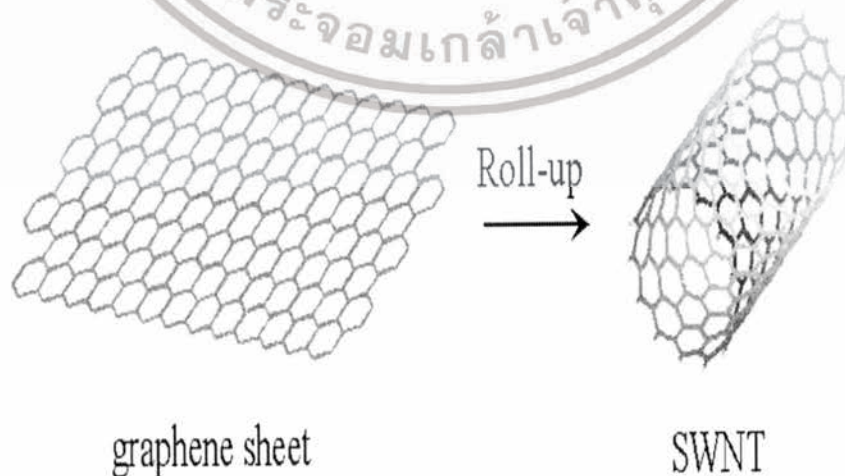


รูปที่ 3.4 โครงสร้างแบบเพชร (Diamond).

เป็นโครงสร้างที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนทั้งหมดเกาะยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงที่สุด เช่นเดียวกับกับพันธะของ เพชร ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความสวยงามและแข็งแรงที่สุด นิยมนำมาใช้เป็นหัวตัดและเจาะวัสดุต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.4^[17]

3.2 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes; CNTs)

ท่อนาโนคาร์บอนจะประกอบด้วยหน่วยย่อยเล็กๆ (โครงสร้างของอะตอมคาร์บอนจำนวน 6 อะตอมมาจัดเรียงตัวกันเป็นวงแหวนรูปหกเหลี่ยม) จำนวนมากมายมาจัดเรียงตัวกันเป็นผนังท่อ ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima)^[11] ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีลักษณะเหมือนกับแผ่นแกรไฟต์ที่ม้วนเป็นท่อแสดงดังรูปที่ 2.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นาโนเมตรจนถึงหลายสิบนานาเมตร^[14] โดยอะตอมคาร์บอนเหล่านี้ต่างเชื่อมต่อกันแบบ sp^2 ^[15, 18] และสามารถแบ่งท่อนาโนคาร์บอนออกเป็นสองชนิด คือ



รูป 3.5 ลักษณะพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes; SWNTs)

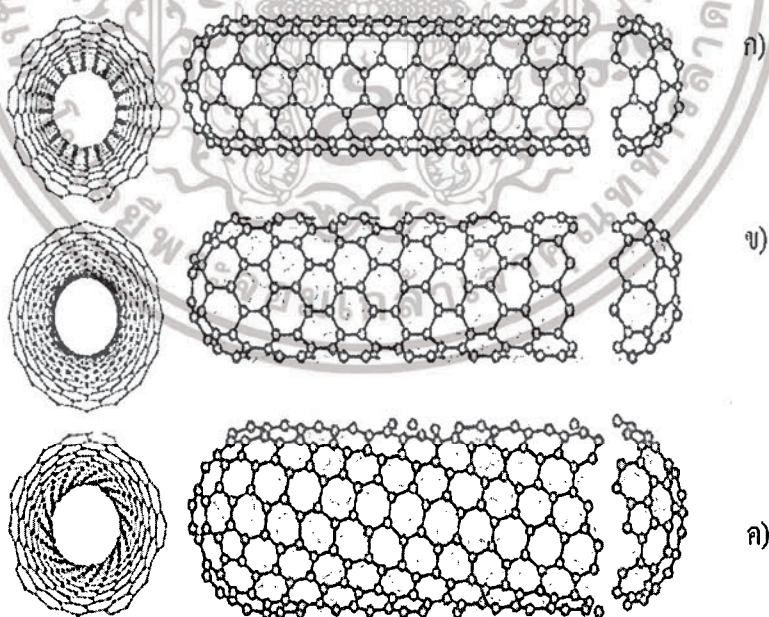
คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังเดี่ยวมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 รูปแบบ ซึ่งแต่ละแบบได้แสดงดังในรูปที่ 3.6

โดยมีดัชนี (n, m) เป็นตัวบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยกำหนดให้เวกเตอร์ผลลัพท์ของผลรวมเวกเตอร์ $n + m$ คือ เส้นรอบวงของคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังแสดงในรูป 3.7

ถ้า $m = n$ จะได้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Armchair (n, n) ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0, 0)$ ไปพบกับตำแหน่ง (n, n) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 30 องศา ดังแสดงในรูป 3.8

ถ้า $m = 0$ จะได้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Zig-zag $(n, 0)$ ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0, 0)$ ไปพบกับตำแหน่ง $(n, 0)$ มีขนาดมุม θ เท่ากับ 0 องศา ดังแสดงในรูป 3.8

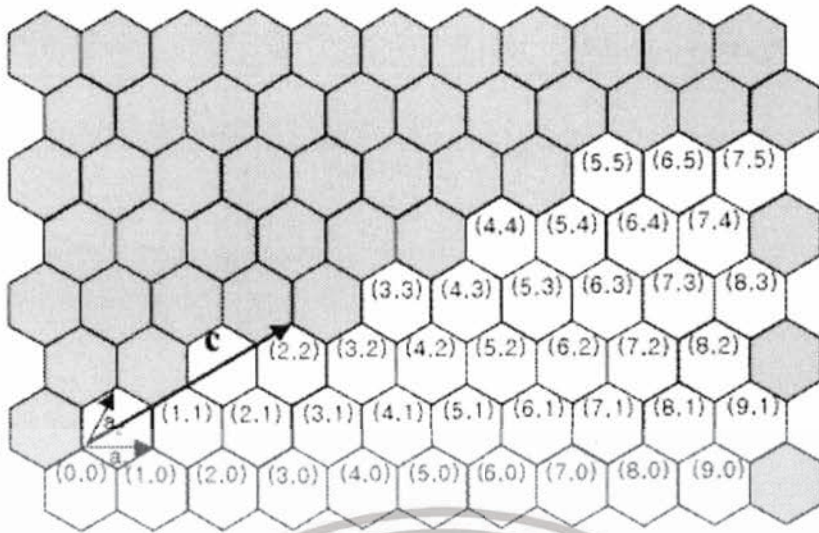
ถ้า $m \neq n$ จะได้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Chiral (n, m) ซึ่งแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง $(0, 0)$ ไปพบกับตำแหน่ง (n, m) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 0-30 องศา ดังแสดงในรูป 3.8



รูปที่ 3.6 แบบโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ดัชนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน



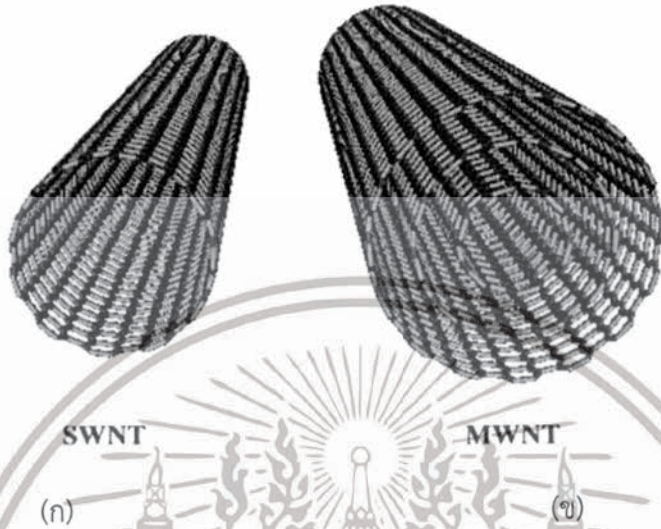
รูปที่ 3.8 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวในรูปแบบต่างๆ

3.2.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes;

MWNTs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้นจะมีลักษณะคล้ายกับแบบผนังชั้นเดียวแต่จะมีจำนวนชั้นในการเกิดที่มากกว่าซ้อนทับกันหลายๆชั้น รูปที่ 3.9 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังเดียวกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น



รูปที่ 3.9 ภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์

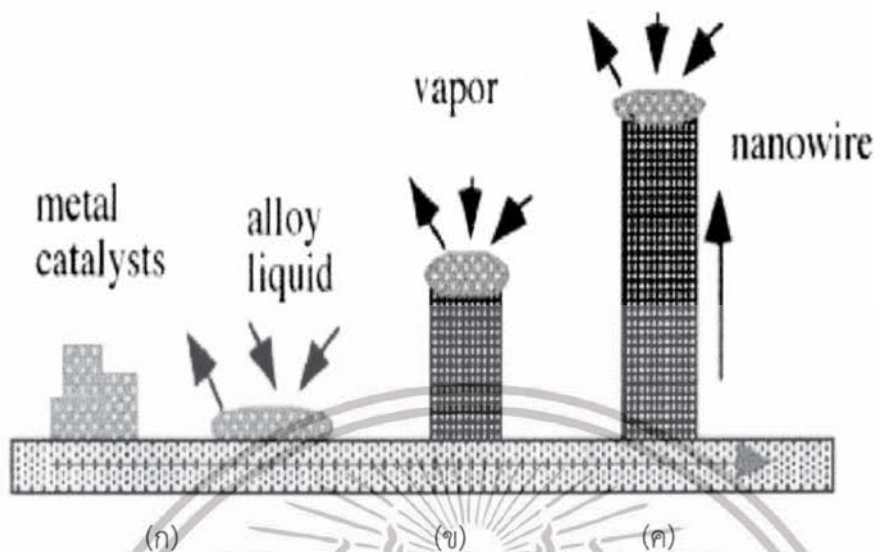
(ก) คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังชั้นเดียว; (ข) คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น

3.3 ทฤษฎีการเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวบ์

การเติบโตของวัสดุนาโนโครงสร้าง 1 มิติ (one-dimensional nanostructures) ได้แก่ ท่อนาโน (nanotubes) เส้นใยนาโน (nanofibers) และเส้นนาโน (nanowires) นั้นมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกของวัสดุนาโนนั้นๆ ซึ่งเกิดจากกระบวนการนิวเคลียสเอชัน (nucleation) และการเจริญเติบโตของสารจากสถานะก๊าซ (Vapor) ของเหลว (Liquid) หรือ ของแข็ง (Solid) เมื่อความเข้มข้นของอะตอม ไอออน หรือนิวเคลียสของสารมีมากพอ จะเกิดการไหลไปรวมกันที่นิวเคลียส (Nuclei) และเกิดกระบวนการนิวเคลียสเอชันเจริญเติบโตเป็นวัสดุนาโนโครงสร้าง 1 มิติขึ้นนั่นเอง โดยจะเรียกกลไกการเติบโตนี้ว่า กลไก VLS (Vapor-Liquid-Solid mechanism; VLS Mechanism) สำหรับการเติบโตของคาร์บอนนาโนทิวบ์โดยอาศัยกลไก VLS นี้ อธิบายได้โดย เมื่อโลหะคตะไลต์ (metal catalyst) ที่อยู่ในสถานะของแข็ง เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลว และเมื่อให้แหล่งกำเนิดคาร์บอนที่อยู่ในสถานะก๊าซไหลเข้ามา โลหะคตะไลต์ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวจะเป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอน โดยอะตอมคาร์บอนจะตกสะสมและแพร่ (diffuse) เข้าไปในผิวโลหะคตะไลต์ ทำให้เกิดโลหะผสมระหว่างคาร์บอนและโลหะคตะไลต์ที่อยู่ในสถานะของเหลว (alloy liquid) ขึ้น และเมื่ออะตอมคาร์บอนตกสะสมและแพร่มากขึ้นจนอิ่มตัวอย่างสุดขีด จะทำให้เกิดการตกตะกอนของอะตอมคาร์บอนที่ผิวรอบบริเวณรอยต่อพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของของแข็งและโลหะผสมที่เป็นของเหลว (solid-alloy liquid interface) เป็นโดมของฟูลเลอร์รีนส์ (fullerene dome) และสร้างตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ในที่สุด ดังแสดงในรูป 3.10



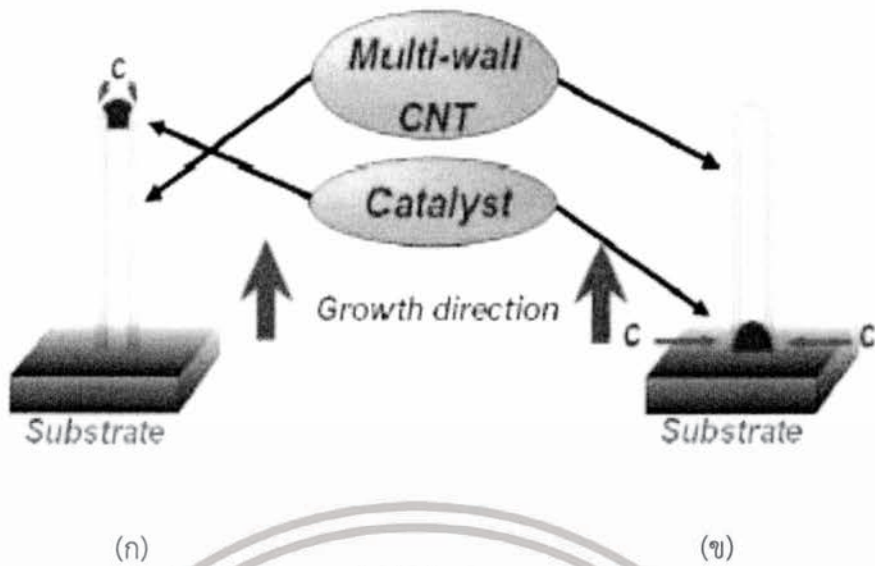
รูปที่ 3.10 การสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบ VLS mechanism^[22] แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

- (ก) Alloying เป็นขั้นตอนที่โลหะคละละลายได้รับความร้อนและมีไอของอะตอมคาร์บอนมาตกสะสมกลายเป็นโลหะผสมที่อยู่ในสถานะของเหลว
- (ข) Nucleation เป็นขั้นตอนที่ไอของอะตอมคาร์บอนเกิดการตกสะสมที่บริเวณผิวรอยต่อ ระหว่างของแข็งและโลหะผสมที่เป็นของเหลว
- (ค) Axial growth เป็นขั้นตอนการเจริญเติบโตเป็นท่อนาโน

โดยรูปแบบการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบ Base growth และ Tip growth^[23] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างโลหะคละไลต์กับแผ่นฐานรอง (substrate) ถ้าอันตรกิริยาระหว่างโลหะคละไลต์กับฐานรองอ่อน (Weak substrate-catalyst interaction) การของท่อนาโนคาร์บอนจะเป็นแบบ Tip growth โดยโลหะคละไลต์จะอยู่ด้านบนของปลายท่อ ดังแสดงในรูป 3.11 (ก) แต่ถ้าอันตรกิริยาระหว่างโลหะคละไลต์กับฐานรองแข็งแรง (Strong substrate-catalyst interaction) การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนจะเป็นแบบ Base growth โดยโลหะคละไลต์จะอยู่ด้านล่างของท่อ ดังแสดงในรูป 3.11 (ข)

โดยความสมบูรณ์ผลึกของท่อนาโนคาร์บอนนั้นขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของอนุภาคโลหะคละไลต์ อุณหภูมิ และองค์ประกอบของก๊าซที่ใช้ระหว่างการสร้างตัวของท่อ ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนนั้นสามารถควบคุมได้จากขนาดของโลหะคละไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน
(ก) แบบ Tip growth และ (ข) แบบ Base growth

3.4 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

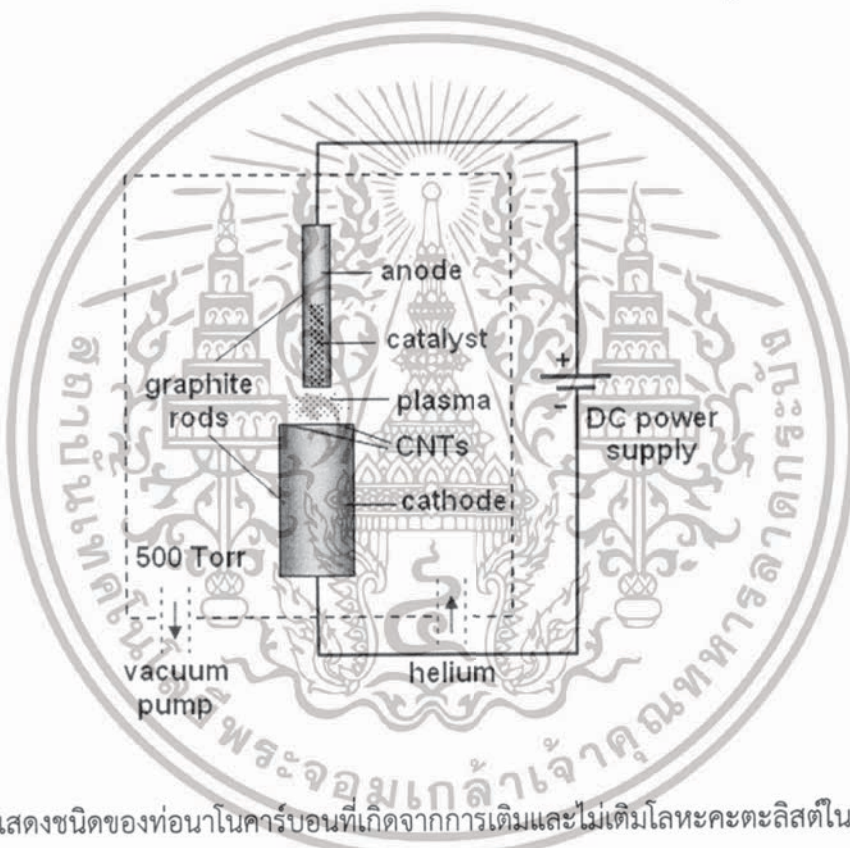
การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนนั้นสามารถทำได้มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีต่างก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป ทั้งในด้านขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณ และความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ โดยสามารถแบ่งวิธีการสังเคราะห์หลักๆ ได้ดังนี้

3.4.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge)

วิธีอาร์คดิสชาร์จนั้นในช่วงแรกจะเป็นวิธีที่ใช้สังเคราะห์ฟูลเลอร์รีนส์ หรือ C_{60} ซึ่งต่อมาก็ได้มีการนำมาสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมและรู้จักกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่าที่มีการรับรองผลมาจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีนี้ จะทำได้ด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 50-120 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 18-40 โวลต์ ตกคร่อมระหว่างแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่มีระยะห่างระหว่างแท่งประมาณ 1 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม และอาร์กอน เป็นต้น ที่ความดันต่ำระหว่าง 50-700 มิลลิเมตรปรอท ความร้อนสูงที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจะทำให้เกิดสถานะพลาสมาขึ้น ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นตรงบริเวณกลางขั้วของแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ

คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่แตกต่างกันจากการศึกษาพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้นั้นขึ้นอยู่กับของผสมระหว่างก๊าซฮีเลียมและอาร์กอน เนื่องจากก๊าซฮีเลียมและอาร์กอนมีสัมประสิทธิ์ของการแพร่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(diffusion coefficient) และ สมบัติการนำความร้อน (thermal conductivity) ที่แตกต่างกัน ทำให้มีผลต่อความเร็วในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ส่งผลให้ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีขนาดที่แตกต่างกันไป ซึ่งการควบคุมขนาด ความยาว และปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้นั้น อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของการเกิดสถานะพลาสมาและยังสามารถกำหนดชนิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้โดยผสมโลหะบางชนิดเข้าไปในแท่งแกรไฟต์เช่น เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ เป็นโลหะคะตะไลต์เพื่อช่วยให้เกิดการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียว อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเขม่าที่ประกอบด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์และโลหะคะตะไลต์ที่ผสมอยู่ในแท่งแกรไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ ซึ่งอาจมีความจำเป็นต้องทำการแยกโลหะคะตะไลต์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ออกจากกันก่อนนำไปใช้ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับประเภทของการนำไปใช้งาน

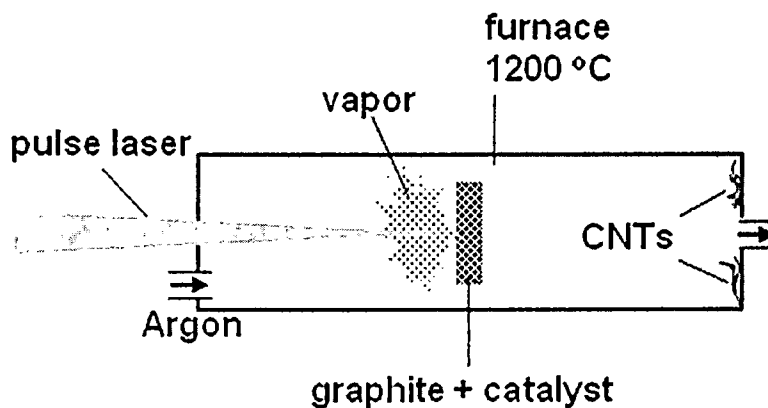


รูปที่ 3.12 แสดงชนิดของท่อคาร์บอนที่เกิดจากการเติมและไม่เติมโลหะคะตะไลต์ในกระบวนการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนโดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ

3.4.2 วิธีระเหด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Ablation)

การสังเคราะห์ท่อคาร์บอนด้วยวิธีระเหด้วยแสงเลเซอร์นี้ ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1995 โดยกลุ่มของ Smalley ที่ Rice University วิธีนี้จะใช้แสงเลเซอร์ที่ความเข้มแสงสูง (อาจเป็นห้วง (Pulse)) หรือ ความยาวคลื่นต่อเนื่อง (Continuous)) ยิงไปยังเป้าซึ่งเป็นแกรไฟต์ ภายใต้สภาวะบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม และอาร์กอน เป็นต้น ที่ความดันต่ำประมาณ 500 มิลลิเมตรปรอท ในเตาเผาอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ไร้อนจะขยายตัวและเย็นลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเทคนิคนี้จะคล้ายกับวิธีอาร์คดิสชาร์จตรงที่จะผสมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ เป็นโลหะคะตะไลต์เพื่อช่วยให้เกิดการสร้างท่อคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อประโยชน์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์

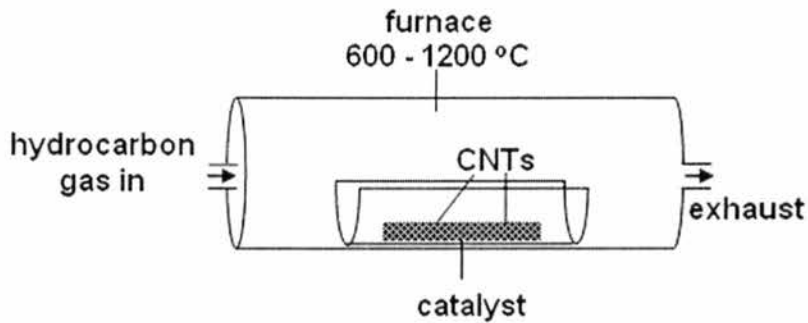
3.4.3 วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD)

เป็นวิธีที่ให้ความร้อนแก่ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน โดยก๊าซที่นิยมใช้คือ มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอะเซทิลีน (C_2H_2) หรือใช้แอลกอฮอล์ที่ระเหยได้ง่าย เช่น เมทานอล (methanol) และเอทานอล (ethanol) เป็นต้น โดยความร้อนที่นิยมใช้ในการแยกโมเลกุลของก๊าซให้แตกตัวเป็นอะตอมคาร์บอนคือ พลาสมาหรือขดลวดความร้อน ซึ่งวิธีนี้ต้องอาศัยโลหะค้ำตะไลต์ เช่น นิเกิล เหล็ก และโคบอลต์ เป็นตัวช่วยในการสร้างท่อนาโนคาร์บอน และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนอยู่ที่ประมาณ 650-900 องศาเซลเซียส ซึ่งวิธีนี้สามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้โดยการควบคุมขนาดของโลหะค้ำตะไลต์และอัตราการไหลของก๊าซ ข้อดีของวิธีนี้ คือ สามารถทำได้ทั้งในบรรยากาศปกติและบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม และอาร์กอน เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ในปริมาณมากและมีความบริสุทธิ์สูงอีกด้วย ซึ่งวิธีการตกสะสมไอเคมีมีหลายเทคนิคด้วยกัน คือ

(1) กระบวนการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition; Thermal CVD) ^[3]

วิธีนี้จะใช้ เหล็ก นิเกิล โคบอลต์ หรือโลหะผสมของทั้งสามชนิดนี้ เป็นตัวค้ำตะไลต์เคลือบบนแผ่นฐานรอง ทำการเตรียมโลหะค้ำตะไลต์ให้มีขนาดเล็กลงด้วยการนำไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูอริก (HF) จากนั้นนำโลหะค้ำตะไลต์ที่ผ่านการเตรียมให้มีขนาดเล็กลงแล้วมาใส่ในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 600-1200 องศาเซลเซียส โดยมีก๊าซไฮโดรคาร์บอน (C_2H_2) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนและแอมโมเนีย ดังรูปที่ 3.14

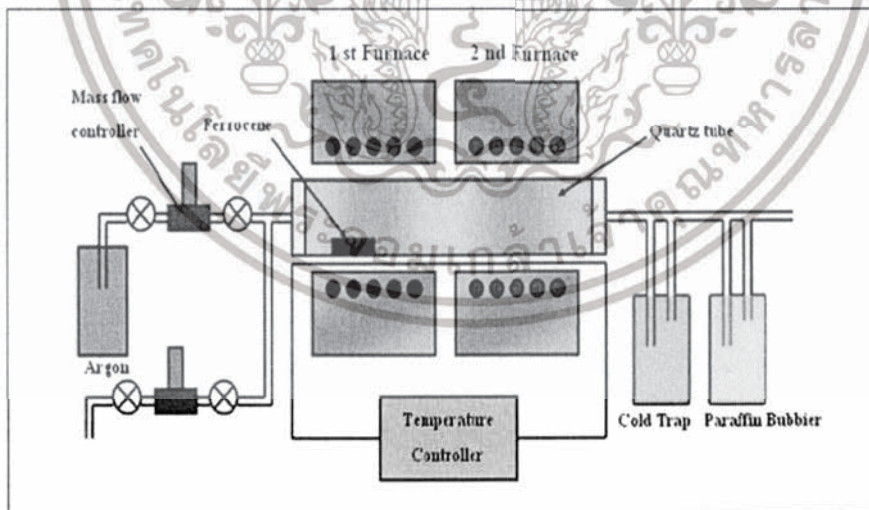
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยกระบวนการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน

(2) วิธีการเติบโตแบบแบ่งเฟส (Vapor Phase Growth)

วิธีนี้จะมีเตาเผา 2 เตา โดยที่เตาเผาแรกจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเตาเผาที่สอง และมีโลหะคะตะลิสต์วางอยู่ เมื่อปล่อยก๊าซไฮโดรคาร์บอนเข้าเตา ก็จะพาไอของโลหะคะตะลิสต์ที่ระเหยออกมาแล้วไปรวมตัวกันที่เตาเผาที่สอง และจัดเรียงตัวกันเป็นท่อนาโนคาร์บอนขึ้น ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนั้นจะทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน และท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้นมีทั้งชนิดผนังชั้นเดียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 นาโนเมตร และชนิดผนังหลายชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70-100 นาโนเมตร ดังรูป 3.15

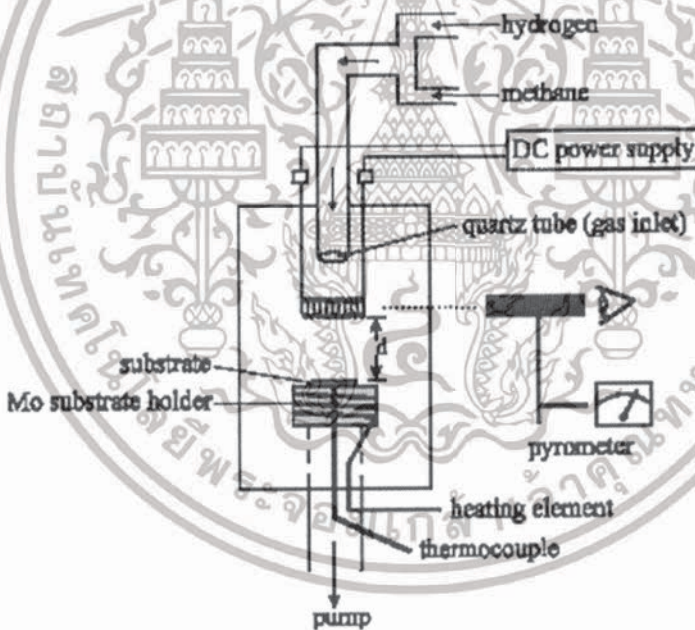


รูปที่ 3.15 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีการเติบโตแบบแบ่งเฟส

(3) แบบขดลวดความร้อน Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน (Hot filament CVD) นี้ ซึ่งจะมีหลักการคล้ายกับวิธีเทอร์มอลวิธีชีวิต เพียงแต่จะใช้ขดลวดความร้อน (filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกับแก๊ส วิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อนนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและ ในเชิงพาณิชย์ หลักการคือใช้ไฟฟ้ากระแสสูงจ่ายให้ขดลวดความร้อน เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวดภายในห้องปฏิบัติการ (Chamber) โดยในห้องปฏิบัติการจะมีแก๊สที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน เช่นไฮโดรเจนของแอลกอฮอล์ อะซิโตน หรือมีเทน เป็นต้น ไหลผ่านเข้ามาภายในห้องปฏิบัติการ ลวดความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1600–2000°C ทำให้อะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆ แยกตัวออกจากโมเลกุลของแก๊สและไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้เตรียมไว้บนแผ่นฐานรอง โดยแผ่นฐานรองจะอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 550 – 900°C ทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นของเหลวและจับตัวกับคาร์บอนที่ตกลงมาเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็น เหล็ก (Fe) โคบอล (Co) หรือ นิกเกิล (Ni) ซึ่งหาได้ง่าย



รูปที่ 3.16 วิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน (Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD))

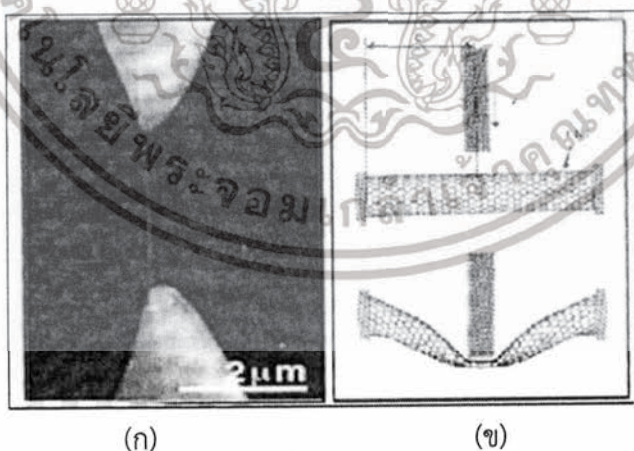
3.5 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

3.5.1 สมบัติเชิงกล

เพชรซึ่งรู้กันดีว่ามีความแข็งแกร่งมากด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของกราฟิ์แต่นั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราฟิตมีความแข็งแรงมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังกล่าว รวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์แข็งแรงเพชรและกราฟิต

ค่าความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีค่าสูงถึง 1 เทอราปาสคาล(TPa) หรือ 1000กิกะปาสคาล (GPa) คงเป็นที่สงสัยว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์เล็กจิ๋วขนาดนั้นจะวัดได้อย่างไร วิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นนี้ทำได้หลายวิธีเช่น โดยอาศัย Thermal vibration หรือใช้ scanning force microscopy ไปงอคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยยึดปลายหนึ่งไว้แล้ว วัดการสั่นสะเทือนในสนามไฟฟ้าและมีการใช้ atomic force microscopy (AFM) จับคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทั้งสองข้างแล้วดึงจนขาดเพื่อหาความต้านทานแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 3.17(ก) ความแข็งแรงของ คาร์บอนนาโนทิวบ์ 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 3.17(ข) ภาพแสดงการยืดหยุ่นที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ขณะที่มีการวัดมาชนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง



รูปที่ 3.17 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์

(ก) ภาพถ่าย SEM ของ CNT ที่อยู่ระหว่างปลายสองด้านของ AFM เพื่อวัดค่าความต้านทานแรงดึง

(ข) ภาพแสดงการยืดหยุ่นที่ดีของ CNT ขณะที่มีการวัดมาชนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

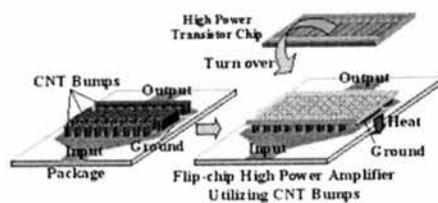
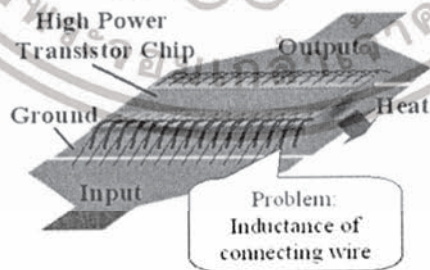
3.5.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มัดหนึ่งของคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 A/cm² ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง 10^6 A/cm² นอกจากนี้แล้ว คุณสมบัติทางไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของคาร์บอนนาโนทิวบ์ คือ สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ในสภาวะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า เช่นจะกระตุ้น Phosphors ที่วางไว้ห่าง 1 mm จะใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว molybdenum ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสภาวะสุญญากาศ

3.5.3 คุณสมบัติทางความร้อน



รูปที่ 3.19 ใช้ท่อนาโนคาร์บอนมาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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 3.19 เป็นการนำคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดีของท่อนาโนคาร์บอนมาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิปที่ใช้งานกำลังสูง

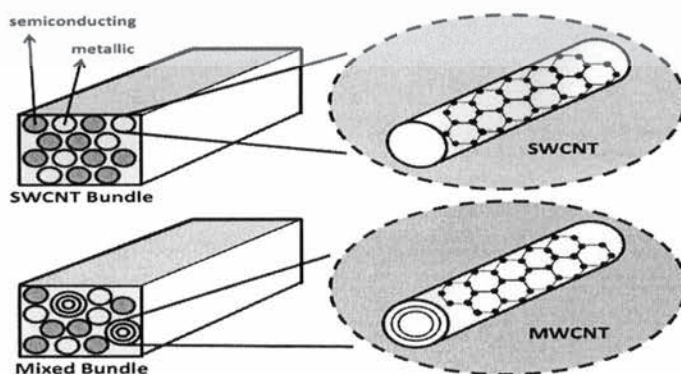
3.6 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน

คุณสมบัติพิเศษของท่อนาโนคาร์บอนดังได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ จึงมีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ คือ



รูปที่ 3.20 แสดงภาพรวมการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้

3.6.1 ตัวเก็บพลังงาน (energy storage)



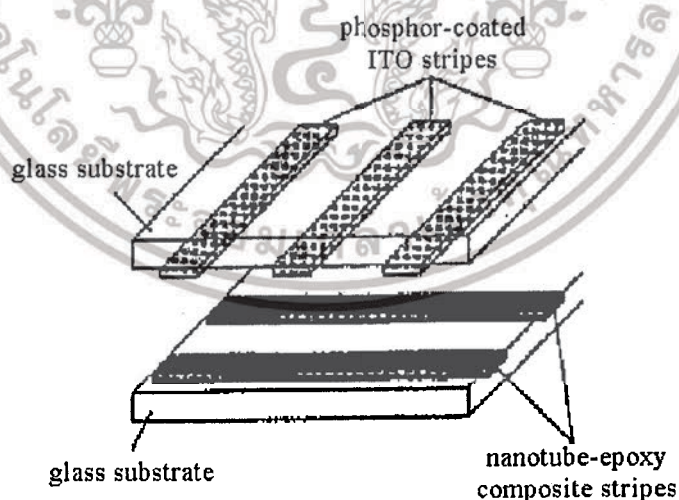
รูปที่ 3.21 แสดงภาพการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาสร้างเป็นตัวเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่ทำจาก แกรไฟต์ วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และเส้นใยคาร์บอน นิยมนำมาใช้ในแบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cells) และการประยุกต์ทางขั้วไฟฟ้าเคมี ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้า โดยจาก ideal Nernstian behavior ^[3] พบว่า ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราการถ่ายเทอิเล็กตรอนมากที่สุด ดังนั้นจึงมีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้เป็นตัวเก็บพลังงาน เช่น เป็นตัวเก็บไฮโดรเจน (Hydrogen storage) เป็นตัวสอดแทรกของแบตเตอรี่ชนิดประจุเทียม(Lithium intercalation)และเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดขั้วไฟฟ้าเคมี(Electrochemical super capacitors) เป็นต้น

3.6.2 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 3.22 แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนในจอแสดงภาพแบบแบนของ Northwestern University

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกนำมาใช้งานในด้านนี้ เนื่องจากมีรูปร่างที่สามารถขยายออกได้ (Elongated shape) จึงทำให้สนามไฟฟ้าที่ได้มีค่ามากขึ้นไปด้วย (large field amplification) อีกทั้งยังนำไฟฟ้าได้ดี ขนาดเล็ก พลังงานที่แผ่ออกมาจึงมีค่าน้อย และสารอื่นๆ ทำปฏิกิริยาด้วยได้ยาก แต่ปัญหาของการใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นอุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันก็ยังคงมีอยู่ โดยจะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของการนำไฟฟ้าและการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (conductivity and emission stability)

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

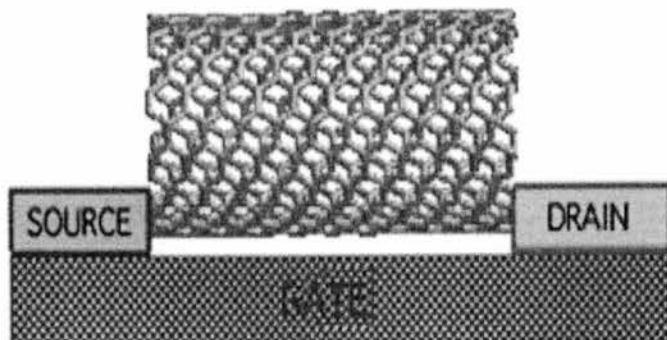


รูปที่ 3.23 (ก) แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนของบริษัท Samsung ขนาด 4.5 นิ้ว และ (ข) 5 นิ้ว

3.6.3 ทรานซิสเตอร์ (transistors)

ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนาม (field-effect transistor; FET) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น สวิตช์สามขา สามารถสร้างขึ้นจากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำเพียง หนึ่งเส้นมาวางบนขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว โดยเมื่อใส่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าไปยังขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นเกต (Gate electrode) จะทำให้ท่อนาโนคาร์บอนถูกสวิตช์จากสถานะที่นำไฟฟ้า (Conducting state) ไปยังสถานะที่ไม่นำไฟฟ้า (insulating state) ได้ โดยสามารถนำทรานซิสเตอร์ดังกล่าวมาใช้งานพร้อมๆ กันได้ โดยจะทำหน้าที่คล้ายกับสวิตช์ลอจิก (logical switch) ในคอมพิวเตอร์นั่นเอง

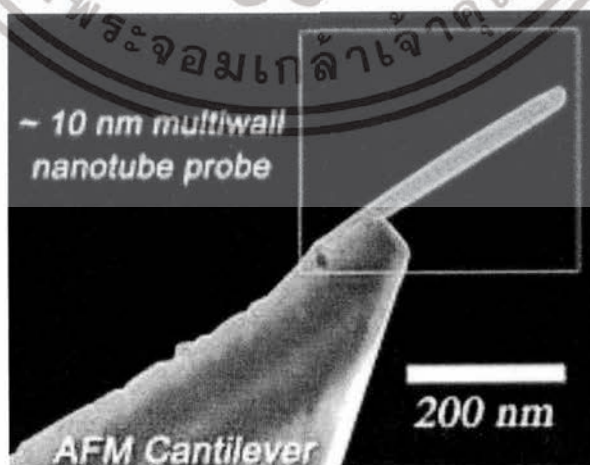
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของการประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวในทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนาม

3.6.4 โพรบวัดนาโนและนาโนเซนเซอร์ (Nanoprobes and Nanosensors)

โพรบวัดของกล้องจุลทรรศน์แบบเข็มกวาด (Scanning Probe Microscopes, SPMs) เช่น กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดทันเนลลิง (scanning tunneling microscopy, STM) ต้องการโพรบวัดที่มีขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง ทำให้มีการนำเอาท่อนาโนคาร์บอนมาใช้เป็นโพรบวัด ทั้งนี้เพราะท่อนาโนคาร์บอนมีค่าโมดูลัสของของยังและความยืดหยุ่นสูง ทำให้มีข้อได้เปรียบกว่าโพรบวัดที่ทำจากซิลิคอนซิลิคอนไนไตรด์ และโลหะชนิดอื่นๆ ในแง่ของความมีเสถียรภาพและความคงทน เนื่องจากไม่ได้รับกระเทือนอย่างรุนแรงจากพื้นผิว และที่สำคัญท่อนาโนคาร์บอนยังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงมาถึง 1.2 นาโนเมตร จึงเป็นการลดปัญหาในเรื่องขีดจำกัดมมโคเนและรัศมีความโค้งของปลายโพรบวัด เช่น กรวัดดีเอ็นเอ เป็นต้น ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนจึงเหมาะสำหรับทำโพรบวัดเพื่อเพิ่มความสามารถแยกแยะ (resolution) ให้กับกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้



รูปที่ 3.25 แสดงโพรบวัดท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของ

NASA Ames Research Center เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.5 เ้าขนาดนาโน (Nanotemplates)

เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีช่องว่างภายในท่อที่เล็กมากและมีแรงในการดึงดูดภายในท่อสูง (capillary forces) ทำให้สามารถบรรจุก๊าซและของเหลวภายในท่อนาโนคาร์บอนได้ เช่น มีการเติมสารลงไปในท่อนาโนคาร์บอนเพื่อสร้างเส้นนาโน (nanowires) ทำให้สามารถศึกษาสมบัติแบบเปียก (wetting characteristic) ของท่อนาโนคาร์บอนได้ โดยการเติมก๊าซหรือของเหลวลงในท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวนั้นจะมีความยากมากกว่าท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น เพราะว่ามีขนาดที่เล็กกว่านั่นเอง แต่ปัญหาที่พบโดยทั่วไป คือ ท่อนาโนคาร์บอนส่วนใหญ่จะเป็นแบบปลายปิด จึงต้องทำการเปิดปลายท่อนำไปใช้ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีอย่างง่าย ๆ เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ซึ่งสร้างแหตาข่าย (pentagons) ที่อยู่บริเวณยอดปลายปิดของท่อ จะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าบริเวณด้านข้าง ดังนั้นตรงส่วนที่เป็นบริเวณยอดของท่อจะถูกเอาออกไป ในขณะที่ด้านข้างของท่อยังคงอยู่

3.6.6 วัสดุผสม (composite materials)

ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็ง (stiffness) และมีความยืดหยุ่นสูงมาก ดังนั้นจึงถูกนำไปใช้กับการปรับปรุงโครงสร้างในวัสดุต่างๆ เช่น การเสริมแรง (reinforcements) ในวัสดุผสมที่ต้องการความแข็งแรงสูง ทนทาน และน้ำหนักเบา แต่การทดลองที่บอกว่าการเติมท่อนาโนคาร์บอนในวัสดุผสมดีกว่าการเติมเส้นใยคาร์บอนยังมีไม่มากนัก เนื่องจากปัญหาที่พบในการนำท่อนาโนคาร์บอนไปทำเป็นวัสดุผสมมีหลายอย่าง เช่น ปัญหาของการสร้างรอยต่อ (interface) ระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีพื้นผิวที่เรียบและมีขนาดที่ใกล้เคียงกับห่วงโซ่ของพอลิเมอร์ (polymer chain) ปัญหาต่อมาคือ การที่ท่อนาโนคาร์บอนส่วนมากมักจะอยู่กันเป็นกลุ่มก้อนทำให้เกิดการเลื่อนไปมาได้ง่าย เนื่องจากการที่ท่อนาโนคาร์บอนมาอยู่ใกล้กันจะมีแรงกระทำต่อกันเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมาก ทำให้การรับแรงทำได้น้อยกว่าการอยู่แบบเส้นเดี่ยวจากเหตุผลดังกล่าว ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวมีความแข็งแรงกว่าท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยการแก้การอยู่เป็นกลุ่มของท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำได้โดยการทำให้แตกและการทำให้กระจุกกระจาย (disperse) เป็นต้น แต่ข้อดีของการใช้ท่อนาโนคาร์บอนการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ในวัสดุผสมนั้น คือ เพิ่มความเหนียว (toughness) ของวัสดุผสม โดยท่อนาโนคาร์บอนจะดูดกลืนพลังงานเอาไว้ขณะมีการยืดหยุ่นเกิดขึ้นขึ้น และจากการที่ท่อนาโนคาร์บอนมีความหนาแน่นน้อย ทำให้เพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าและยังทนทานต่อแรงกดต่างๆ อีกด้วย

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ เช่น การเติมพอลิเมอร์ที่สามารถตอบสนองต่อแสงได้ (Photoactive polymers) เช่น PPV (poly-p-phenylenevinylene) ด้วยท่อนาโนคาร์บอนพบว่ามีการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าอย่างมาก แต่มีสูญเสียผลของการตอบสนองต่อแสง (photoluminescence) และผลของการตอบสนองทางไฟฟ้า (electro-luminescence) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น อีกทั้งวัสดุผสมที่ได้ยังมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย สำหรับวัสดุผสมระหว่างท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์นั้นถูกนำไปใช้ในหลายสาขา เช่น งานด้านชีวเคมี คือใช้เป็นเยื่อเลือกผ่านของโมเลกุลหรือใช้เป็นที่ปลูกเซลล์กระดูก (osteointegration) เป็นต้น

ปัจจุบันบริษัท Babolat ของฝรั่งเศสได้นำเร็กเก็ต VS Nanotube Power ออกจำหน่ายเป็นครั้งแรกในปี 2002 โดยทำจากวัสดุผสมระหว่างแกรไฟต์กับท่อนาโนคาร์บอน ทำให้เร็กเก็ตมีความทนทานสูงมาก ในขณะที่น้ำหนักเบาลง การตีลูกมีพลังเพิ่มมากขึ้น และลดอาการเกร็งของกล้ามเนื้อของนักเทนนิสได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.26 เร็กเก็ต VS Nanotube Power ของ Babolat

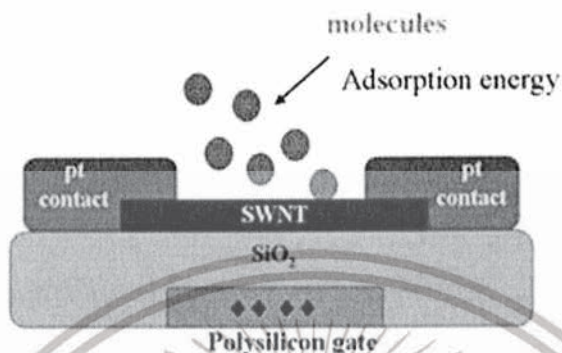
ในอนาคตท่อนาโนคาร์บอนจะเข้ามามีบทบาทเพิ่มขึ้น ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ วัสดุผสม เซนเซอร์ ยานพาหนะ ตลอดจนถึงยานขนส่งอวกาศ ซึ่งจะประกอบไปด้วยวัสดุ อุปกรณ์ ที่มีเทคโนโลยีขั้นสูงบรรจุอยู่ ทำให้สามารถอำนวยความสะดวกและตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้มากขึ้น

3.6.7 งานทางด้านเซนเซอร์ (Sensors)

การที่คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถทำให้อยู่ในรูปของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) โดยที่สารกึ่งตัวนำนี้สามารถตอบสนองต่อสารพวกอัลคาไลน์ ฮาโลเจนและแก๊สต่างๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นสารกึ่งตัวนำ Semiconducting Carbon Nanotube จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ดีขึ้นอย่างมาก ทำให้เซนเซอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ นี้มีความไวมากขึ้น ซึ่งก็มีการพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัด Cytochrome C, Methane, Krypton และ โมเลกุลของ Alkyl amine แบบสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น แต่การประยุกต์ใช้ Semiconducting Carbon Nanotube เป็นเซนเซอร์แบบนี้มีปัญหา คือ

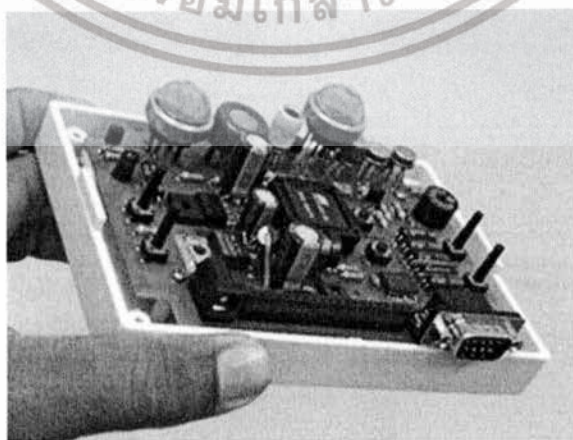
เอไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สามารถแยกชนิดของแก๊สที่ความเข้มข้นต่ำได้และยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิและความเร็วแก๊สที่ไหลผ่าน ทำให้ขาดความสามารถเชิงจำเพาะหรือคัดเลือกเฉพาะที่เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเซนเซอร์



รูปที่ 3.27 แสดงการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์เคมี

คาร์บอนนาโนทิวบ์ในรูปของเซนเซอร์ส่วนมากจะอยู่ในรูปของงานวิจัยขั้นนี้มุ่งเน้นที่จะใช้ประโยชน์จากนาโนเทคโนโลยี ในการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซขนาดเล็กที่มีความไวในการรับรู้สูง ท่อคาร์บอนขนาดนาโนจะถูกสังเคราะห์ขึ้นในรูปแบบต่างๆ ด้วยกระบวนการทางเคมี โดยท่อคาร์บอนขนาดนาโนที่ได้มานั้นจะถูกนำไปใช้ร่วมกับสารประกอบอื่นๆ เช่น ฟิล์มบางโลหะ, โพลีเมอร์ ฯลฯ ในการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซ เซนเซอร์ที่สร้างขึ้นได้รับการวิเคราะห์คุณสมบัติการรับรู้กับก๊าซต่างๆ หลายชนิด เช่น ก๊าซมีเทน (methane) แอลกอฮอล์ (alcohol) เป็นต้น คุณสมบัติเด่นของเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น คือ มีความไวในการรับรู้สูง และมีอุณหภูมิในการทำงานต่ำ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในงานตรวจวัดก๊าซได้หลากหลายรูปแบบ อีกทั้งมีต้นทุนต่ำเมื่อมีการนำไปผลิตเชิงพาณิชย์

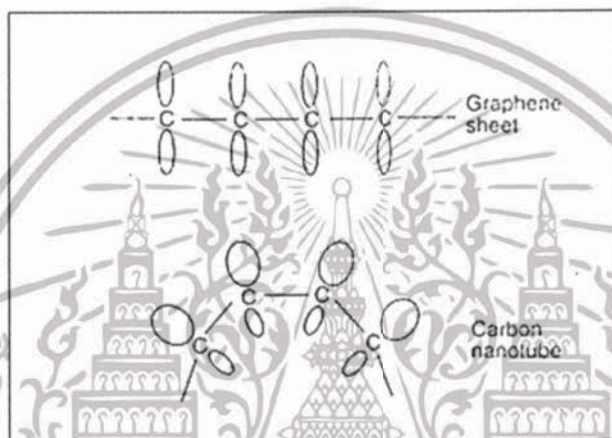


รูปที่ 3.28 หัววัดแก๊สที่สร้างจากคาร์บอนนาโนทิวบ์และวงจรการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

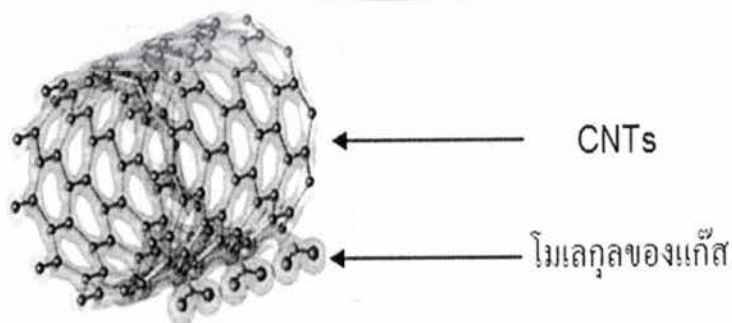
3.7 หลักการพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับเซนเซอร์

ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) เกิดจากการถ่ายประจุจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง เซลล์ไฟฟ้าเคมีอันหนึ่งจึงต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วจึงเกิดเป็นวงจรปิดได้ ประจุที่ถ่ายเทในชั้นตัวอย่างอาจเป็นทั้งอิเล็กตรอนหรือโฮลหรือทั้งสองอย่าง แผ่นกราฟีนที่ประกอบกันเป็นผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีลักษณะโค้ง อิเล็กตรอนจึงสามารถเปลี่ยนรูป จากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เป็นการกระจายตัวอย่างไม่สมดุลทั้งด้านในท่อและนอกท่อ คาร์บอนนาโนทิวบ์ทรงกระบอก (cylindrical sheet) ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.29 แสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบนระนาบแผ่นกราฟีนที่ผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์

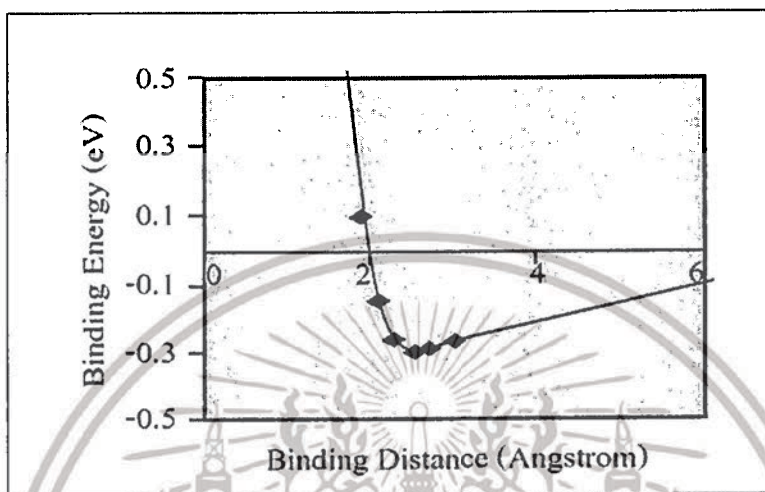
เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการผิดรูปด้านนอกท่อ จึงมีเฉพาะ π - Electron ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าเคมี คาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นกับโมเลกุลของแก๊ส CO_2 , NO_2 , NH_3 , O_2 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ เป็นต้น โดยมีโมเลกุลของการยึดเกาะโมเลกุลของแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.30 แสดงโมเดลการยึดเกาะโมเลกุลของแก๊สจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังการยึดเกาะ (Binding Energy) ของโมเลกุลแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว จะเป็นฟังก์ชันกับระยะทางจากโมเลกุลของแก๊สถึงคาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งจากการคำนวณกับโมเลกุลแก๊สของ NO_2 ที่มีโครงสร้างการยึดเหนี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว ตามโมเดลรูปที่ 3.30 จะมี adsorption Energy ประมาณ 0.3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.31 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ NO_2 กับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว

จากกราฟพบว่าโมเลกุลของแก๊สที่กล่าวข้างต้นมีการแพร่ที่สูงบนพื้นผิวคาร์บอนนาโนทิวบ์จากการวิเคราะห์ด้วยความหนาแน่นอิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่า ประจุอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากอะตอมคาร์บอนกับโมเลกุลของแก๊ส จะถูกจ่ายหรือดึงจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำให้มีประจุพาหะ (Carrier) มากขึ้นหรือลดลง ทำให้การนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวและชนิดหลายผนัง เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามลำดับ ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีทั่วไปเขียนได้ดังนี้

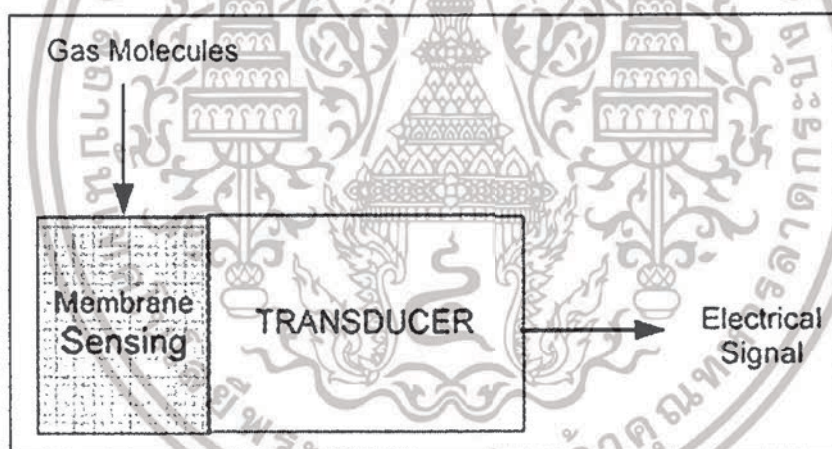


เมื่อ δ คือ ตัวเลขแสดงจำนวนประจุที่ถูกจ่ายระหว่างเกิดปฏิกิริยา

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างอะตอมและกลไกการผิดรูป (Mechanical deformation) คุณสมบัติทั้งสองทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เหมาะที่จะนำมาเป็นเซนเซอร์แก๊ส

3.8 แก๊สเซ็นเซอร์ (Gas sensor)

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



รูปที่ 3.32 อุปกรณ์แก๊สเซ็นเซอร์จำพวกทรานสดิวเซอร์

แก๊สเซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์จำพวกทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่ง ใช้สำหรับตรวจจับแก๊สพิษ และการตรวจจับแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ในยานยนต์ โรงงานอุตสาหกรรม บ้านเรือน ตลอดจนที่ต่างๆ แล้วทำการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าตามคุณสมบัติที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งแก๊สเซ็นเซอร์ก็ทำงานเช่นเดียวกันคือ ทำหน้าที่ตรวจจับหรือทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแก๊สที่ต้องการวัด แล้วเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สที่ตรวจจับได้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.1 คุณสมบัติทั่วไปของแก๊สเซ็นเซอร์

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

3.8.2 แก๊สที่มีความสำคัญต่อมนุษย์

ก่อนจะทำการวัดหรือตรวจจับแก๊ส ต้องมีความเข้าใจคุณสมบัติและความสำคัญของแก๊สที่จะตรวจวัดก่อน ต่อไปจะเป็นตัวอย่างแก๊สที่มีความสำคัญ ซึ่งมีผลต่อมนุษย์

3.8.2.1 แก๊สตระกูลคาร์บอน (Carbon Species)

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

1. คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส นอกจากนี้มันยังมีพิษอีกด้วย เพราะว่ามันจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในฮีโมโกลบิน (Hb) ในเส้นเลือดของมนุษย์ คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเป็นฐานประมาณ 80% ของ CO ในบรรยากาศมาจากรถยนต์ ส่วนการใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น การใช้ออกซิเจนในการถลุงเหล็กจากแร่ เป็นต้น

2. คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่ช่วย

ให้ติดไฟ CO₂ เป็นแก๊สเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 78°C และที่ความดัน 1 atm CO₂ จะเป็นของแข็ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าจะเป็นของเหลว CO_2 เป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของถ่านหิน น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ หรือเชื้อเพลิงที่มีฐานของคาร์บอน CO_2 เป็นแก๊สที่ช่วยในการดำรงชีพของมนุษย์ ใช้ในอุตสาหกรรม การผลิตเครื่องตีและในเครื่องดับเพลิง ขณะที่สารอาหารในร่างกายมนุษย์ไม่ทำงานผลผลิตของ CO_2 บางส่วนจะช่วยให้ความเป็นกรดของเลือดเหมาะสม ความผิดพลาดหนึ่งของกลไกการหายใจของมนุษย์คือ การสะอึก วิธีการรักษาคือ ให้หายใจเข้าออกถึงกระดากเพื่อสร้างระดับ CO_2 เข้าไปในปอด CO_2 จะเข้าไปเป็นตัวกระตุ้นให้หยุดการสะอึก แต่หากมีระดับของ CO_2 ในร่างกายสูงเกินไปก็ไม่มีประโยชน์ โดยหากหายใจ CO_2 ในอากาศที่เกินกว่า 10% อาจทำให้คนหมดสติ และหากรับ CO_2 ที่ระดับสูงต่อเนื่องไปอีก อาจทำให้การหายใจล้มเหลวและตายในที่สุด

3.8.2.2 มีเทน (Methane)

เป็นรูปแบบหนึ่งของสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนไฮโดรเจน (ไฮโดรคาร์บอน) เป็นส่วนประกอบ มีสูตรทางเคมีเป็น CH_4 เกิดจากธรรมชาติจากการเน่าเปื่อยทับถมในหนองบึง หรือการสลายตัวของ โปรตีน มีเทนเป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ แต่ติดไฟได้และให้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เช่นเดียวกับ อีเทน โพรเพน และบิวเทน

3.8.4.3 เบนซีน (Benzene)

มีสูตรเคมี C_6H_6 เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีกลิ่นและติดไฟง่าย เป็นพวกริงคอมปาวด์ ใช้ละลาย ไขมันและสารอินทรีย์ต่างๆ และใช้สังเคราะห์สารเคมีมากมายหลายชนิด

3.8.4.4 ไฮโดรเจน (Hydrogen)

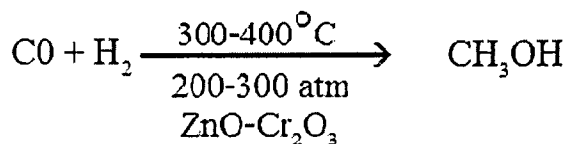
ส่วนประกอบที่เห็นส่วนใหญ่ของไฮโดรเจนคือ น้ำ พบอยู่ในน้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ในอนาคต จะถูกนำมาใช้ทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิง ไฮโดรเจนมีอยู่ที่อุณหภูมิห้องแต่สามารถจะเปลี่ยนไปเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ปฏิกริยาระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจนสามารถนำมาทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิงได้ ไฮโดรเจนนั้นสามารถถูกติดไฟได้ง่ายและได้รับความเชื่อใจให้ถูกเลือกเป็นเชื้อเพลิง ในอนาคตสำหรับรถยนต์และอากาศยาน ปฏิกริยาของมันจะทำให้ผลิตน้ำออกมา เป็นผลให้ไม่เกิดมลภาวะ ไฮโดรเจนมีสูตรเคมีคือ H_2

3.8.4.5 แอลกอฮอล์ต่างๆ

1. เมทานอล หรือเมทิลแอลกอฮอล์มีสูตรเคมีคือ CH_3OH ได้จากการสลายตัวของไม้ โดยให้

ความร้อนกับไม้ที่อุณหภูมิสูงและปราศจากอากาศ จากการเตรียมเมทิลแอลกอฮอล์ดังกล่าวให้เรียกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกชื่อหนึ่งว่า “Wood alcohol” ในปัจจุบันเมทิลแอลกอฮอล์ผลิตได้จากกระบวนการไฮโดรจีเนชันของคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้คะตะลิสต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันสูง



เมทิลแอลกอฮอล์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีพิษอย่างรุนแรง (highly toxic) การบริโภคเมทิลแอลกอฮอล์จำนวนมากทำให้ตายได้ ถ้าร่างกายได้รับในปริมาณที่ไม่มากพอก็อาจทำให้ตาบอดได้ พิษของเมทิลแอลกอฮอล์จะได้รับจากการสูดดมไอระเหยหรือได้รับการสัมผัสกับผิวหนัง ดังนั้นการใช้เมทิลแอลกอฮอล์จึงต้องระมัดระวังอย่าง

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



กระบวนการหมักจะไม่สามารถผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์มากกว่า 12 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ เพราะว่ายีสต์จะตายก่อนที่ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์จะสูงถึงค่าดังกล่าว ดังนั้นการที่จะผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นของเอทิลแอลกอฮอล์สูงจะต้องใช้กระบวนการกลั่น เช่น บรันดี วิสกี้ เอทิลแอลกอฮอล์นอกจากใช้ทำเครื่องดื่มแล้วยังสามารถใช้เป็นตัวทำละลายและเป็นตัวทำปฏิกิริยาในการเตรียมสารอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเอทิลแอลกอฮอล์ได้แก่ การเจือจางในหรือเป็นส่วนผสมของยา การทำพลาสติก แล็กเกอร์และเครื่องสำอาง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงรถยนต์ได้อีกด้วย โดยในแก๊สโซลีนจะผสมเอทิลแอลกอฮอล์ประมาณ 10% แอลกอฮอล์ที่บริสุทธิ์ 100% จะถูกเรียกว่า “แอลกอฮอล์สัมบูรณ์” (absolute alcohol)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 สามารถดมและกตการหายใจได้อย่างรุนแรง แต่มักไม่ก่อภาวะเลือดเป็นกรดอย่างรุนแรง (high gap metabolic acidosis) แบบเมทิลแอลกอฮอล์

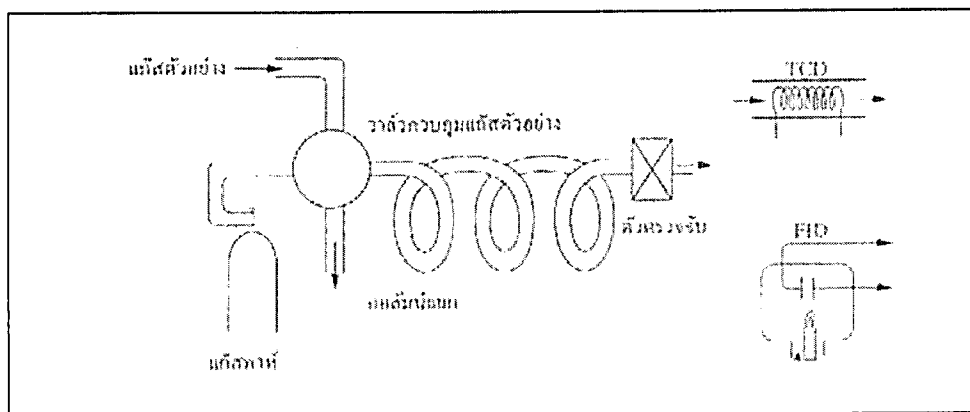
4. Phenylethane มีจุดหลอมเหลว ที่ -95°C มีจุดเดือด ณ 136.2°C เป็นของเหลวที่ใส ไม่มีสี สามารถละลายได้ ด้วย ethanol, benzene, diethyl ether เป็นส่วนผสมใช้ในการผลิต styrene ผลิตภัณฑ์ใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม และในอุตสาหกรรม ปิโตรเคมี และเอทิลเบนซีน มีโอกาสถูกปลดปล่อยออกมาในกระบวนการเผาไหม้ เช่น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

3.9 หลักการวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟี (Process Gas Chromatography: PGC)

หลักการวัดแก๊สแบบนี้ใช้หลักการโครมาโตกราฟีที่แสดงได้ดังรูปที่ 3.43 ส่วนประกอบของแก๊สต่างๆ สามารถแสดงได้โดยโครมาโตแกรม ดังรูป 3.43 เมื่อแก๊สต่างๆ ถูกฉีกเข้าไป ด้านในแก๊สพาร์ท ก็จะถูกพาเข้าสู่คอลัมน์เพื่อแยกแก๊ส หลังจากนั้นก็จะใช้ TCD หรือ FID หรือตัวตรวจจับอื่นๆ เพื่อตรวจจับแก๊สต่างๆ ตามแต่ลักษณะงาน

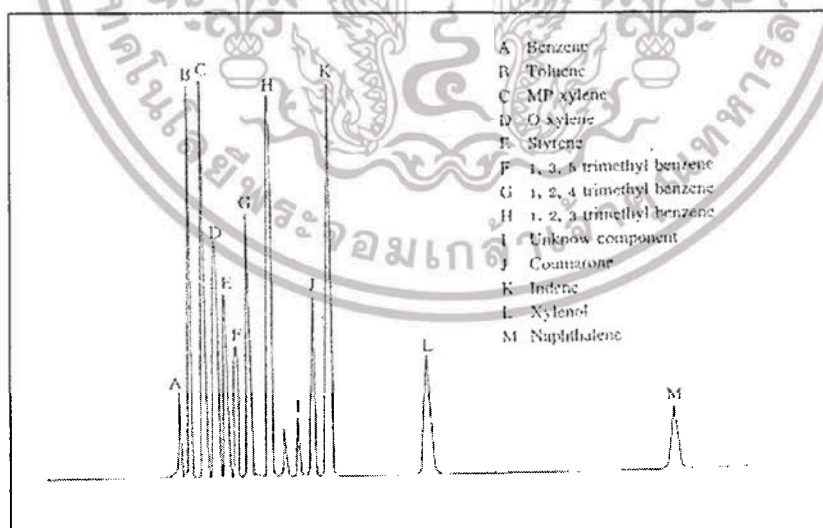
ข้อควรจำในการวัดแก๊สด้วยวิธีนี้คือ

1. หลักการวัดแบบ TCD จะใช้ในการวัดแก๊สที่เป็นอนินทรีย์ ส่วนหลักการ FID จะใช้สำหรับวัดไฮโดรคาร์บอน
2. การเลือกคอลัมน์แยกแก๊สต้องใช้เทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง ๆ
3. ต้องรักษาอุณหภูมิของคอลัมน์ให้คงที่อย่างมาก



รูปที่ 3.33 การวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟ

จากหลักการที่ผ่านมามีทั้งหมด จะเห็นว่าในการจะวัดแก๊สหรือตัวแปรใดๆ ต้องศึกษาคุณสมบัติที่เป็นไปได้ทางเคมีและฟิสิกส์ของมัน เพื่อให้สามารถนำหลักการดังกล่าวมาดัดแปลงให้เป็นตัวแปรทางไฟฟ้า ยังมีเซนเซอร์หลายประเภทที่ยังไม่ได้พัฒนาไปมากมาย เช่นการเซนเซอร์รสชาติอาหาร กลิ่นและรส หรือการค้นหาวัสตุที่จะนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งนับเป็นสิ่งสำคัญ เพราะประเทศไทยมีอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก จึงน่าจะมีความวิทยาศาสตร์ หรือวิศวกรรมหรือองค์กรใดๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งมีศักยภาพ ได้ประดิษฐ์หรือพัฒนาในส่วนดังกล่าวเพื่อจะให้ออกให้เกิดผลประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 3.34 การแยกส่วนประกอบของแก๊สในกระบวนการโครมาโตแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

กระบวนการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์

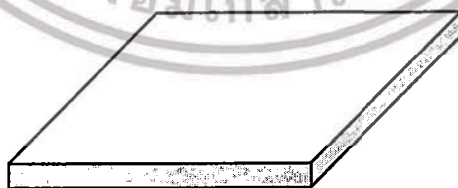
ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองที่ประกอบด้วยโลหะคะตะไลต์ที่ใช้โลหะนิกเกิลเป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ และโลหะทองแดงที่ใช้ทำเป็นขั้วเพื่อการต่อใช้งาน โดยโลหะทั้งสองใช้วิธีการสปัตเตอร์ลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 5000Å ตลอดจนการนำฐานรองที่ได้นำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการตกสะสมไอเคมี ซึ่งเป็นแบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition) และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical vapor deposition) และนอกจากนั้นยังได้อธิบายถึงรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดลองนี้ด้วย

4.1 การสร้างแผ่นฐานรอง

4.1.1 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ต้องทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนที่ใช้เป็นฐานรองก่อนเพื่อให้ ฝุ่น เศษโลหะ และไขมัน ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวหลุดออกไปก่อนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีขั้นตอน ดังนี้

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน



รูปที่ 4.1 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
3. จุ่ม DI 1 แก้วจนสะอาด
4. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ต้มในกรด Nitric (HNO₃) 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
6. จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
7. ต้มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที (กรด Nitric ละลายในน้ำร้อนได้ดี)
8. จุ่มในน้ำ DI 2 แก้วจนสะอาด
9. เป่าแห้งด้วยก๊าซ N₂
10. Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที
11. จุ่มใน DI 2 แก้วจนสะอาด
12. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

แผ่นซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้วจะเข้ากระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อควบคุมไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในเนื้อสารซิลิคอน ชั้นฉนวนหรือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์สร้างจากการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) โดยการให้แผ่นซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ซิลิคอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นซิลิคอน การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีด้วยกัน 2 วิธี

1. การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของออกซิเจนบริสุทธิ์กับซิลิคอนใช้อุณหภูมิประมาณ 900° ถึง 1100°C อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงดังสมการ 4.1 วิธีนี้ได้ออกไซด์ที่มีคุณภาพดีสำหรับการเป็นฉนวน แต่อัตราการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ช้ามาก

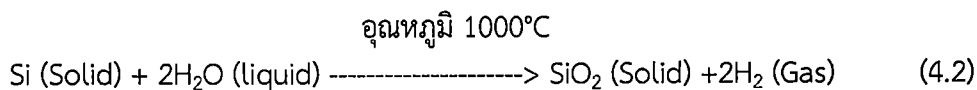
อุณหภูมิ 1000°C



2. การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation)

การออกซิเดชันแบบชื้นใช้อะตอมออกซิเจนที่ได้จากการแตกตัวของไอน้ำในการทำปฏิกิริยากับซิลิคอนใช้อุณหภูมิประมาณ 900° ถึง 1100°C อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงดังสมการ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

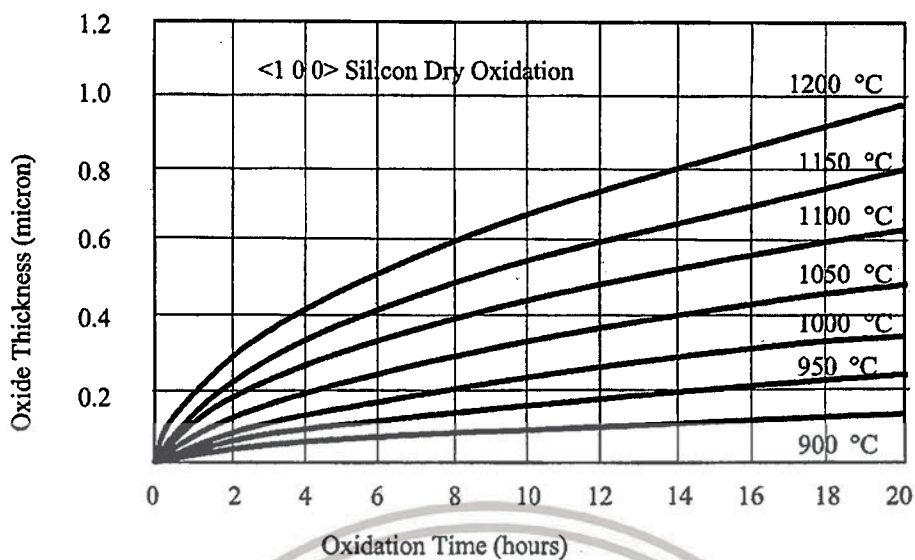


การสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบชั้นนี้จะทำให้เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้ง เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่าอะตอมของออกซิเจนบริสุทธิ์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส ทำให้การเกิดชั้นออกไซด์ทำได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันแบบชั้นนี้คือ มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ต่ำกว่าแบบแห้ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยาแบบแห้งมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชั้น และการออกซิเดชันแบบชั้นนี้จะได้ชั้นออกไซด์ที่มีสภาพผลึกไม่สมบูรณ์ คือเกิดการบิดเบือนของผลึก (Crystal dislocation) หรือเกิดรูพรุนขึ้น ข้อดีของวิธีนี้คือมีอัตราการเกิดออกไซด์สูงกว่าแบบแห้งมาก

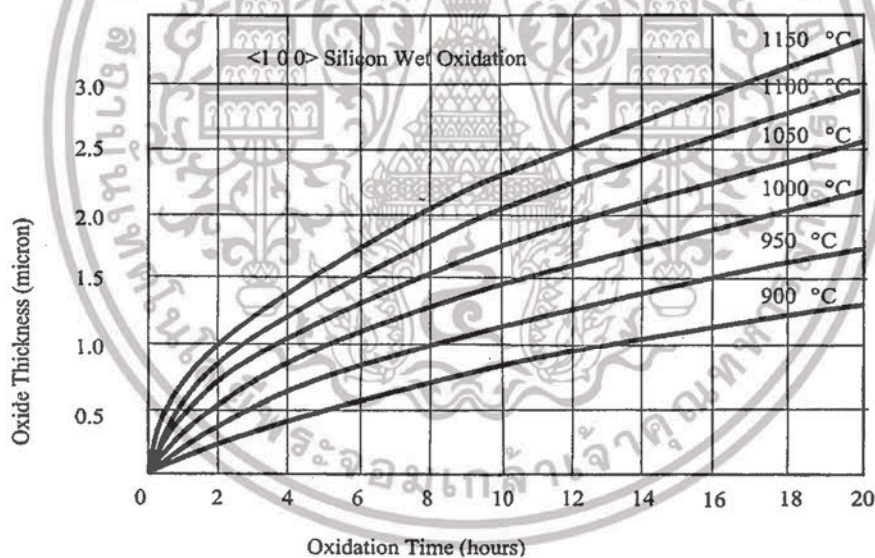
การทดลองนี้ใช้การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แบบ Dry-Wet-Dry ที่ 1.5-1.5-1.5 ชั่วโมง ในการออกซิเดชันแบบแห้งใช้อุณหภูมิประมาณ 1100°C อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 1200 ml/min ส่วนการออกซิเดชันแบบชั้นใช้อุณหภูมิประมาณ 1100°C อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 1000 ml/min เพื่อให้เกิดชั้นออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 5000 \AA สตรอม ก่อนนำไปเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป

การหาความหนาของชั้นออกไซด์

ความหนาของชั้นซิลิคอนออกไซด์สามารถคำนวณหาความหนาได้จากกราฟ Thermal Oxidation ได้จากกราฟรูปที่ 4.2 และ 4.3 โดยใช้การเทียบกันระหว่อกุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.2 แสดงการคำนวณการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้ง



รูปที่ 4.3 แสดงการคำนวณการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้น

นอกจากนี้ยังสามารถหาความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้จากการพิจารณาคุณสมบัติของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จากการสะท้อนแสงฟลูออเรสเซนซ์ซึ่งสีแต่ละสีที่สะท้อนออกมาเป็นตัวบ่งบอกถึงความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ดังตามตารางที่ 4.1

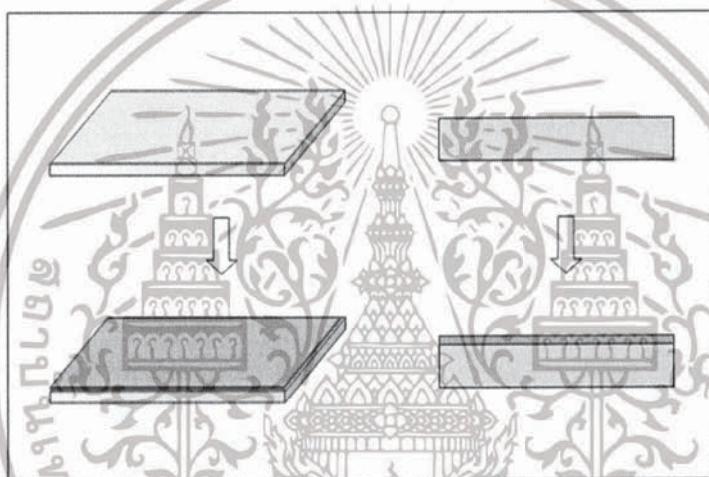
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆ กัน

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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแผ่นซิลิคอนด้านที่ไม่ได้มีการขัดมันเมื่อมีการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แล้ว ก็ไม่สามารถมองเห็นสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ถึงความเปลี่ยนแปลง แต่ด้านที่มีการขัดมันเมื่อทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีของแผ่นซิลิคอน สีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นจะหมายถึงความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างได้ซึ่งดูได้จากตารางที่ 4.1 และจากเงื่อนไขของการทดลองที่ต้องการใช้ความหนาที่อยู่ในช่วงประมาณ 5000 \AA สีของชั้นออกไซด์ที่ได้จึงมีสีน้ำเงินเขียว รูปที่ 4.4 เป็นการแสดงถึงแผ่นซิลิคอนก่อนทำการออกซิเดชันและหลังการออกซิเดชัน



รูปที่ 4.4 แผ่นซิลิคอนก่อนและหลังการออกซิเดชัน

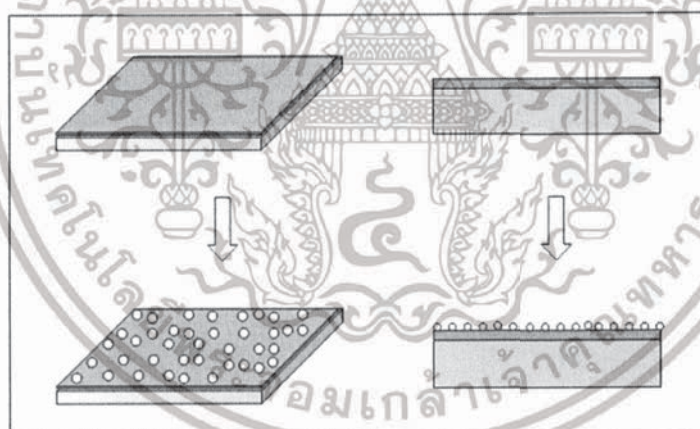


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 เตาความร้อนที่ใช้ในการออกซิเดชัน

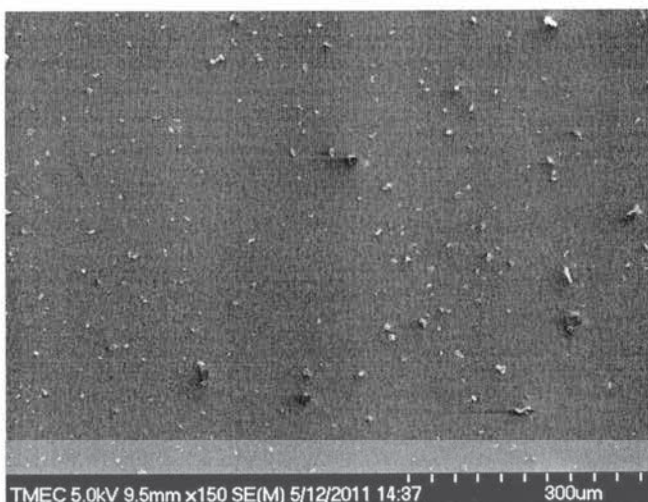
4.1.2 การเคลือบโลหะคะตะไลต์ (Catalyst)

การเคลือบโลหะคะตะไลต์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ในการทดลองนี้ใช้โลหะนิเกิล (Ni) เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบลงบนฐานรองแบบกลุ่มก้อน (Cluster) เพื่อให้ตัวของอุปกรณ์ขาดจากกันทางไฟฟ้า (นิเกิลเป็นโลหะและนำไฟฟ้า) เนื่องจากต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ขณะตรวจวัดแอลกอฮอล์ จึงต้องการให้กระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่บนคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังนั้นการสเปคเตอร์จะใช้เวลาในการสเปคเตอร์ 30 วินาที ความดันภายใน Chamber ประมาณ 2×10^{-6} Torr ใช้เครื่องอาร์เอฟไดโอดสเปคเตอร์ ใช้ความถี่ 13.65 MHz ภายในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน (Ar) โลหะนิเกิลที่ได้จะกระจายเป็นจุดๆเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองซึ่งดูได้จากรูป 4.6 รูปที่ 4.7 เป็นภาพถ่าย SEM ของการเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล)



รูปที่ 4.6 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

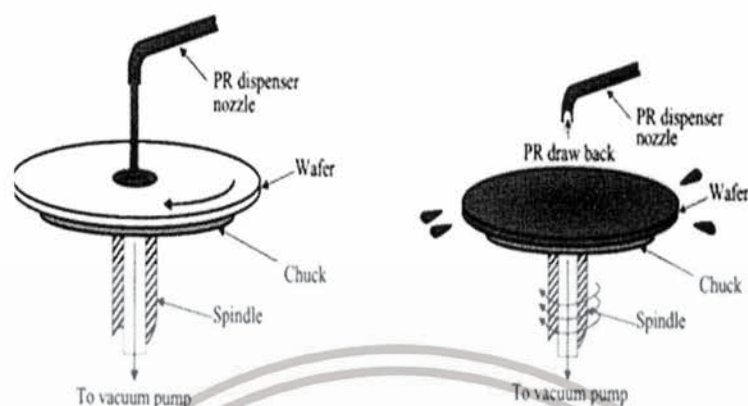


รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของการเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล)

4.1.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นขั้นตอนการถ่ายแบบตัวอย่างจากกระจกมาส์กไปยังผิวหน้าของแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีการเคลือบโลหะคะตะไลต์แล้ว ซึ่งกระบวนการนี้ต้องทำในห้องที่มีความสะอาดเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่แผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ โดยเริ่มต้นด้วยการนำแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบโลหะคะตะไลต์แล้วมาทำความสะอาดและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120°C ใช้เวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นที่จับอยู่ที่แผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ จากนั้นเคลือบพื้นผิวฐานรองด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ 5214.E (เพราะต้องการความหนาของฟิล์ม 5000 อังสตรอม) ด้วยวิธีสปินเนอร์ (spinner) เพื่อต้องการพื้นผิวของน้ำยาไวแสงที่เรียบเป็นแบบฟิล์มบางและมีความหนาของน้ำยาไวแสงที่เท่ากันทุกจุด การสปินเนอร์จึงต้องทำด้วยกันสองส่วน ส่วนแรกใช้ความเร็วรอบ 500 รอบ/วินาที ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงที่หยดไว้บนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์กระจายตัวไปทั่วแผ่นฐานรอง และส่วนที่สองใช้ความเร็วรอบ 3000 รอบ/วินาที ใช้เวลาประมาณ 30 วินาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงที่เป็นส่วนเกินที่กระจายตัวอยู่บนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์นั้นถูกเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบที่สูงจนทำให้น้ำยาไวแสงที่เป็นส่วนเกินกระเด็นหลุดออกไปและส่วนที่เหลือจะกระจายตัวออกไปโดยรอบเป็นฟิล์มบางและเรียบสม่ำเสมอตามที่ต้องการ ซึ่งความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาไวแสงด้วย รูปที่ 4.8 ได้อธิบายถึงการสปินเนอร์นี้ โดยขั้นตอนระหว่างการเคลือบน้ำยาไวแสงนี้ต้องระวังฝุ่นละอองอย่างมากจึงต้องทำในห้องที่สะอาดหรือ Clean Room และเมื่อเคลือบน้ำยาไวแสงเสร็จแล้ว

ต้องนำไปอบที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อต้องการให้น้ำยาไวแสงที่เกาะอยู่บนแผ่นฐานรองแห้งสนิทและยึดเกาะกับแผ่นฐานรองได้ดี ขั้นตอนนี้เรียกว่า Prebake



รูปที่ 4.8 เคลือบพื้นผิวฐานรองด้วยน้ำยาไวแสง

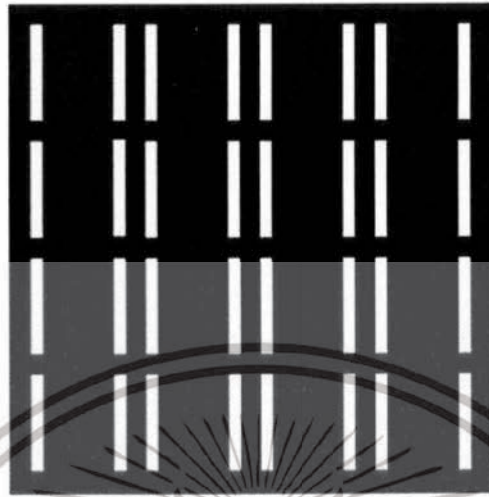


รูปที่ 4.9 เครื่องสปรินเนอร์ที่ใช้ในศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์

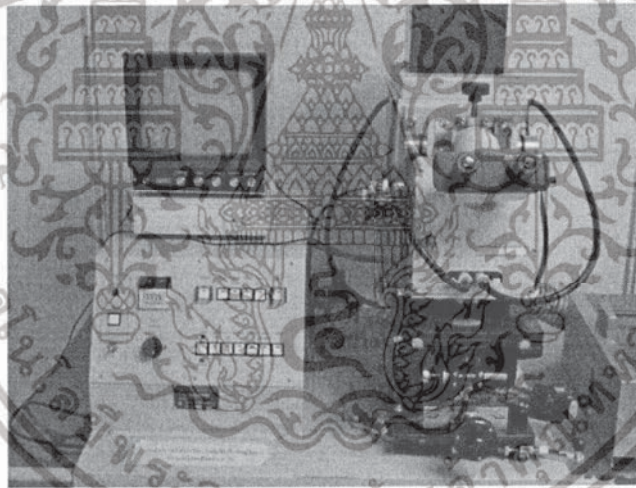
จากนั้นทำการถ่ายแบบลงบนฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยการฉายแสงอุลตราไวโอเลต (UV) ผ่านกระจกต้นแบบหรือกระจกมาสก์ (Photo mask) ที่ออกแบบไว้แล้ว และมีการจัดมาสก์ที่ตรงกับบริเวณที่ต้องการจะถ่ายแบบขั้นตอนนี้เรียกว่า Mask Alignment แสงที่ฉายผ่านกระจกต้นแบบจะทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลายจะไม่ทะลุผ่าน ดังนั้นส่วนที่แสงทะลุผ่านไปได้จะทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง (ส่วนสีขาวของรูปที่ 4.10) คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงจะเปลี่ยนไป จากนั้นนำแผ่นที่ฉายแสงแล้วมาทำการ Development คือการสร้างลวดลายด้วยน้ำยา Developer น้ำยาไวแสงชนิดบวกเมื่อทำการ develop แล้ว น้ำยาไวแสงส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายไป ส่วนที่ไม่ถูกแสงจะยังคงอยู่ จากนั้นทำการ Post bake คือการอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 85°C เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา 10 นาที เพื่อให้ส่วนที่เป็นชั้นฟิล์มแห้งและยึดเกาะติดกับแผ่นฐานรองแน่นยิ่งขึ้น ก่อนนำไปทำการสปีดเตอร์ขั้วโลหะไฟฟ้า



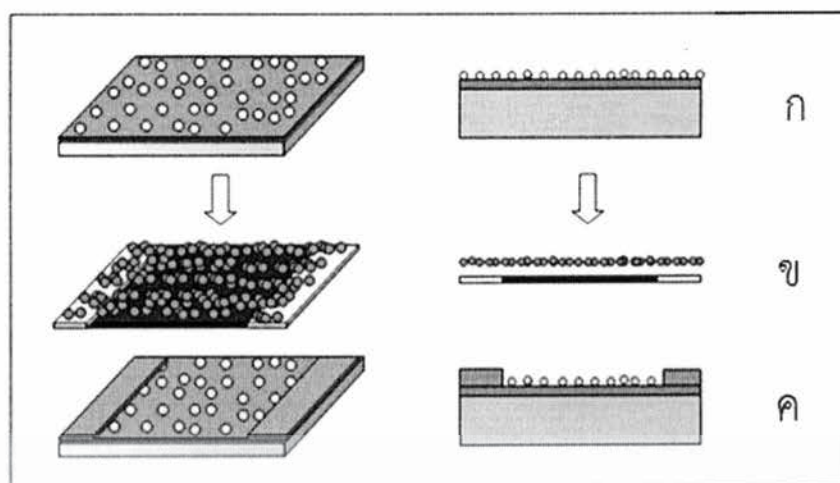
รูปที่ 4.10 ภาพหน้ากาก (Mask) ที่ใช้ในการสปีดเตอร์ขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.11 ภาพของเครื่อง Mask Aligners

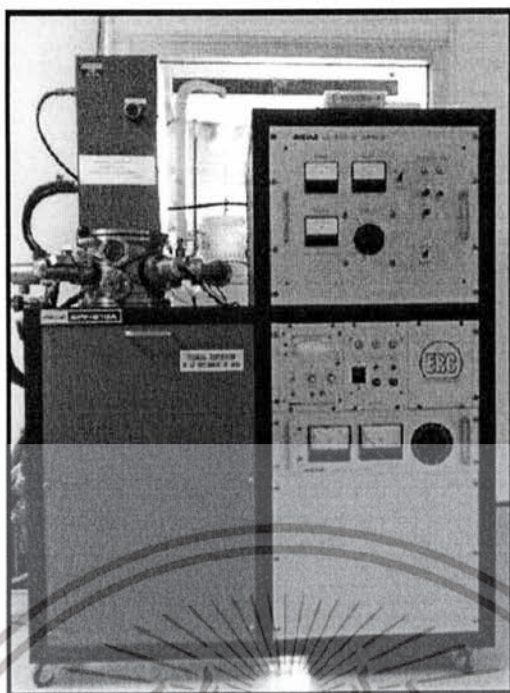
4.1.4 การทำขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 (ก) แผ่นฐานรองที่ทำการสปีดเตอร์โลหะนิเกิลแล้ว (ข) แผ่นฐานรองที่ทำการสปีดเตอร์โลหะทองแดงที่มีการเปิดมาร์คแล้ว (ค) แผ่นฐานรองที่ทำการลอกน้ำยาไวแสงออกแล้ว

การทำขั้วไฟฟ้าเพื่อต่อใช้งานจะใช้โลหะทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า สร้างโดยการสปีดเตอร์เป็นแบบฟิล์มบาง (Thin film) ลงบนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบนิเกิลแล้ว โดยบังคับให้เกิดตรงบริเวณที่ต้องการคือตรงบริเวณที่เราเปิดของขอน้ำยาไวแสงไว้แล้ว โลหะทองแดงก็จะเกิดเป็นฟิล์มบางตรงบริเวณที่เราต้องการจากขั้นตอนที่ผ่านมา ซึ่งในการสปีดเตอร์นี้ใช้เวลาในการสปีดเตอร์ 3 นาที ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr ใช้เครื่องอาร์เอฟไดโอดสปีดเตอร์ ใช้ความถี่ 13.65 MHz ภายในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน (Ar) โลหะทองแดงที่ได้จะเกาะตัวกันเป็นฟิล์มบางทั่วทั้งแผ่นฐานรองซึ่งดูได้จากรูป 4.12 จากนั้นทำการเอาน้ำยาไวแสงที่ทำหน้าที่เป็นมาร์สและทองแดงที่อยู่บนน้ำยาไวแสงออกให้เหลือไว้เฉพาะส่วนที่เราต้องการโดยการนำเอาแผ่นฐานรองมาแกว่งในอะซิโตน อะซิโตนจะทำการกัดเซาะฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ติดกับแผ่นฐานรองแล้วยกทองแดงที่ติดอยู่ด้านบนของฟิล์มน้ำยาไวแสงหลุดออกไปด้วยเหลือไว้เฉพาะทองแดงที่ติดอยู่บนแผ่นฐานรองเรียกขั้นตอนนี้เรียกว่าการลอกน้ำยาไวแสงด้วยวิธี lift off



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายของเครื่องสปีเตอร์ริงสำหรับเคลือบคตะไลต์และข้าวโลหะ

4.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

การทดลองในครั้งนี้จะกล่าวถึงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมีซึ่งเป็นแบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition) และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical vapor deposition) จุดประสงค์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ การสังเคราะห์จะกระทำบนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีการสปีเตอร์ริงนิเกิลไว้แล้ว โดยใช้เอทานอลเป็นสารแหล่งจ่ายคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์และใช้แก๊สเฉื่อยเป็นตัวนำพาสารแหล่งจ่ายคาร์บอน

หลักการที่ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์คือ เมื่อไอระเหยของสารแหล่งจ่ายคาร์บอนได้รับความร้อนสูงจะทำให้อะตอมของคาร์บอนแตกตัวออกมาจากโมเลกุลของสารแหล่งจ่ายคาร์บอน (เอทานอล) คาร์บอนที่แตกตัวจะไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาบนฐานรองเกิดการจัดรูปใหม่เป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์

4.2.1 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเทอร์มอลชีวิติ (Thermal Chemical Vapor Deposition)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ก๊าซไนโตรเจน
2. Regulator สำหรับปรับแรงดันก๊าซและการบอกปริมาณก๊าซในถัง
3. Flow meter สำหรับควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ
4. สารแหล่งจ่ายคาร์บอน (เอทานอล)
5. เตาความร้อนซีวีดีแบบสามโซน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. หลอดทดลองสำหรับใส่สารแหล่งจ่าย
8. ขวดรูปชมพู่สำหรับเช็คก๊าซที่ไหลออกสู่ระบบ
9. ฐานรองสำหรับนำมาทำการทดลอง (ซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยนิเกิลและมีลวดลาย)
10. แผ่นกระเบื้องสำหรับเป็นโบทนำแผ่นฐานรองเข้าไปในเตา
11. แท่งแก้วสำหรับดันฐานรองเข้าไปในเตา



รูปที่ 4.14 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ที่อนาโนคาร์บอน
(ก) Flow meter ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (ข) ถังก๊าซไนโตรเจน

4.2.1.2 ขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์ที่อนาโนคาร์บอน

(1) เปิดเตาความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เตาความร้อนที่ใช้ทดลองเป็นเตาความร้อนแบบสามโซนซึ่งจะช่วยในการควบคุมอุณหภูมิมีความคงที่และแม่นยำ จากนั้นใช้แท่งแก้วดันโบทที่มีแผ่นฐานรองที่เตรียมไว้เข้าไปในเตาโดยวางแผ่นฐานรองไว้ที่ปากเตาเป็นเวลา 5 นาที เพื่อไม่ให้โบทและแผ่นฐานรองเกิดการการขยายตัวอย่างฉับพลันและเกิดการแตกได้เมื่อได้รับความร้อนสูงในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

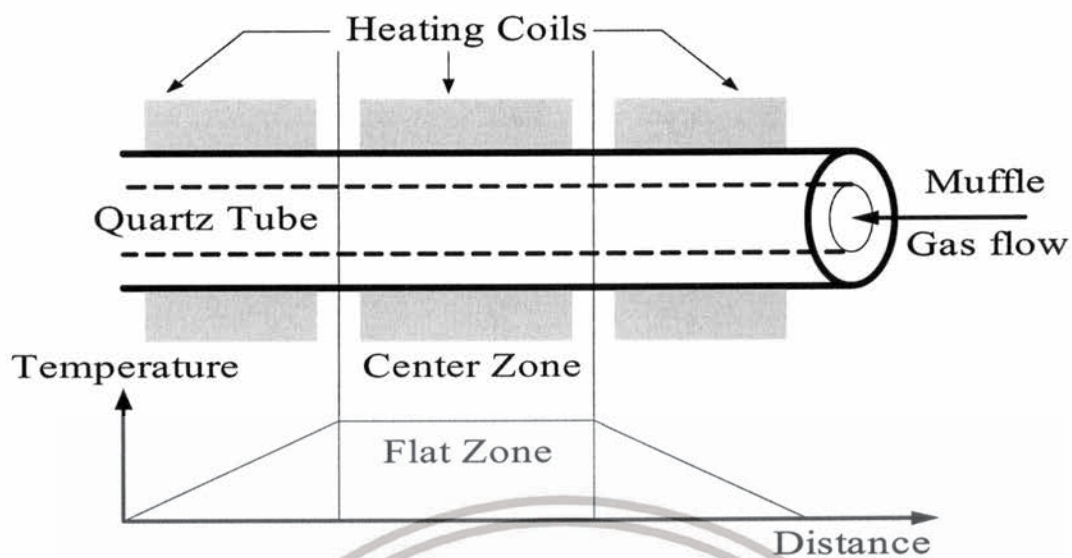
ขณะที่แผ่นฐานรองอยู่กลางเตา เพราะฉะนั้นจึงให้แผ่นฐานรองได้ทำการปรับอุณหภูมิก่อนจะดันเข้าไปกลางเตา เมื่อโบทและแผ่นฐานรองปรับความร้อนได้แล้วจึงค่อยๆดันแผ่นฐานรองจนถึงกลางเตา โดยใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 5 -10 นาที

(2) ปิดปากท่อควอทซ์ที่ใช้เป็นห้องปฏิบัติการให้สนิท แล้วจึงปรับอุณหภูมิของเตาความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ และเปิดแก๊สไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.2 cc/min เข้าไปในเตาความร้อนเพื่อไล่อากาศออกจากเตาไม่ให้เกิดการออกซิไดซ์เมื่อทำการจ่ายเอทานอล ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที และในขณะเดียวกันนี้จะทำการตรวจเช็คข้อต่อรวมทั้งสายยางที่ใช้เป็นท่อลำเรียงเอทานอลเข้าไปยังเตาเพื่อไม่ให้เกิดรอยรั่ว

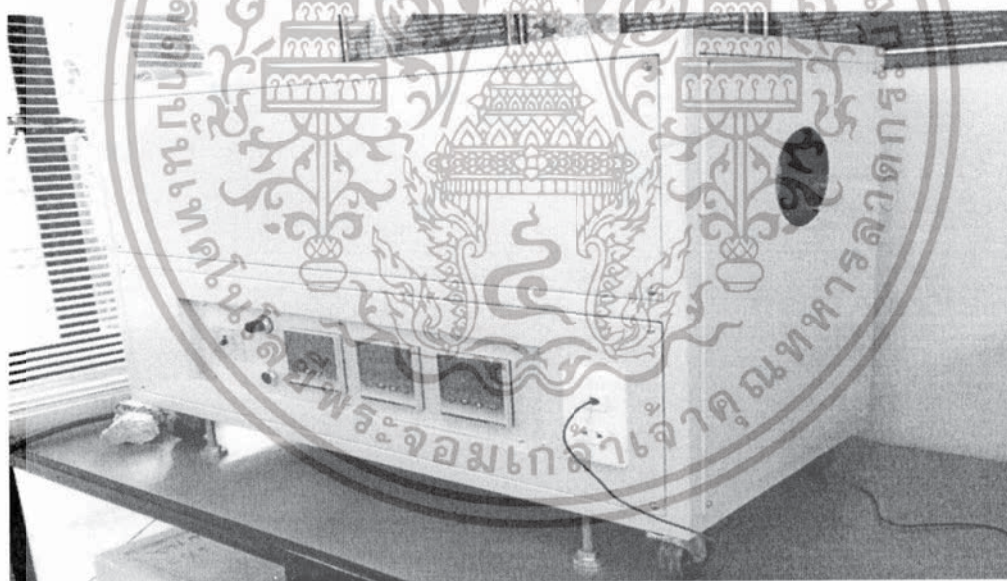
(3) เมื่ออุณหภูมิของเตาความร้อนมีอุณหภูมิตามที่ต้องการในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แล้วให้ปรับสวิทซ์การจ่ายแก๊สไนโตรเจนไหลผ่านสารแหล่งจ่ายคาร์บอน (เอทานอล) เพื่อนำไอระเหยของสารแหล่งจ่ายคาร์บอนเข้าไปยังเตาที่ใช้เป็นห้องปฏิบัติการโดยมีอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตามความต้องการที่จะทดลอง (0.3 และ 0.5 cc/min) เวลาที่ใช้ในการทดลองคือ 5 นาที

(5) เมื่อจ่ายสารแหล่งจ่ายคาร์บอนครบตามเวลาที่ต้องการแล้วให้ปรับสวิทซ์ของแก๊สไนโตรเจนที่ไหลผ่านสารแหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นการไหลที่ไม่มีสารแหล่งจ่ายโดยมีอัตราการไหล 0.2 cc/min พร้อมทั้งปรับอุณหภูมิของเตาเทอร์มอลให้เหลือ 500 องศาเซลเซียส

(6) ปิดก๊าซไนโตรเจน จากนั้นเปิดฝาท่อควอทซ์แล้วจึงค่อยๆ ดึงแผ่นฐานรองที่มีคาร์บอนนาโนทิวบ์อยู่ด้านบนออกจากห้องปฏิบัติการช้าๆใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที เมื่อแผ่นฐานรองมาถึงปากเตาให้ทิ้งไว้ที่ปากเตา 5 นาทีก่อนจะนำออกจากเตาความร้อนเพื่อไม่ให้แผ่นฐานรองเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็วจนแผ่นฐานรองแตกและเพื่อไม่ให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ติดอยู่บนแผ่นฐานรองเกิดการร้อนเมื่ออุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องปล่อยให้แผ่นฐานรองและคาร์บอนนาโนทิวบ์ค่อยๆปรับอุณหภูมิลงก่อน เมื่อถึงขั้นตอนนี้ก็สิ้นสุดกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์



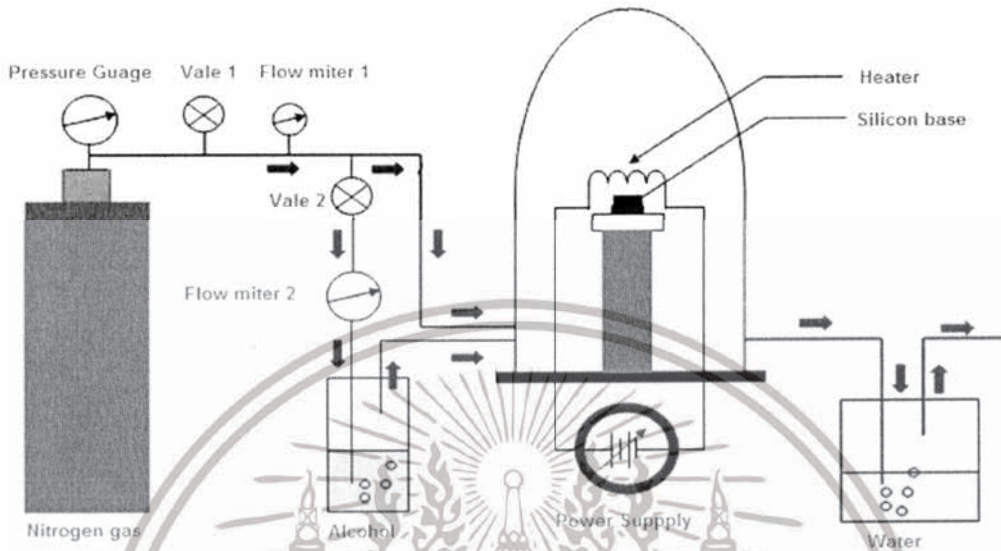
รูปที่ 4.15 โครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโซน



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายเตาความร้อนแบบสามโซนที่ใช้ในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical vapor deposition)



รูปที่ 4.17 ภาพแสดงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

1. ท่อควอตซ์ที่ใช้เป็นห้องทำปฏิกิริยา
2. เอทานอลใช้เป็นสารแหล่งจ่ายคาร์บอน
3. ขดลวดทังสเตนใช้เป็นขดลวดความร้อน
4. แก๊สไฮโดรเจน
5. Regulator วัตต์การไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่หัวถัง
6. Flow meter วัตต์การไหลของแก๊สนำพาที่ผ่านแหล่งจ่ายคาร์บอน
7. วาล์วสำหรับปรับอัตราการไหล
8. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า
9. พัดลมระบายความร้อน
10. แผ่นฐานรองที่เตรียมไว้ในบ่อที่
11. ปีกเกอร์สำหรับใส่น้ำเปล่า, สายยางและข้อต่อต่างๆ
12. Thermocouple

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

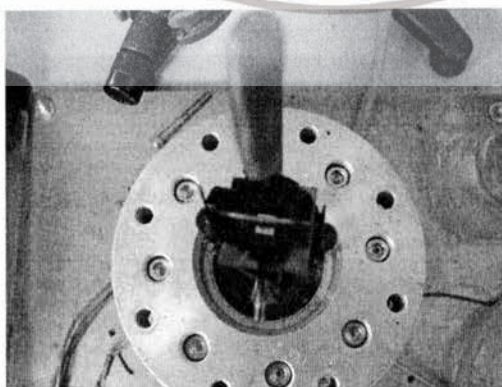
ขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

(1) วางแผ่นฐานรองลงบนฐานรองของเครื่องสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้อยู่ตรงกลางของขดลวดที่จะใช้เป็นตัวให้ความร้อนในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์และให้มีระยะห่างจากแผ่นฐานรองถึงขดลวดประมาณ 0.5 เซนติเมตร จากนั้นปิดห้องปฏิบัติการให้สนิทแล้วให้ทำการตรวจเช็คข้อต่อรวมถึงสายต่างๆ ก่อนการเปิดแก๊สไฮโดรเจน รวมถึงสายไฟฟ้าที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้ามายังเครื่องสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ และสาย Thermocouple ที่ใช้วัดอุณหภูมิในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์



รูปที่ 4.18 ฐานรองภายในห้องปฏิบัติการของเครื่องสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ติดตั้ง

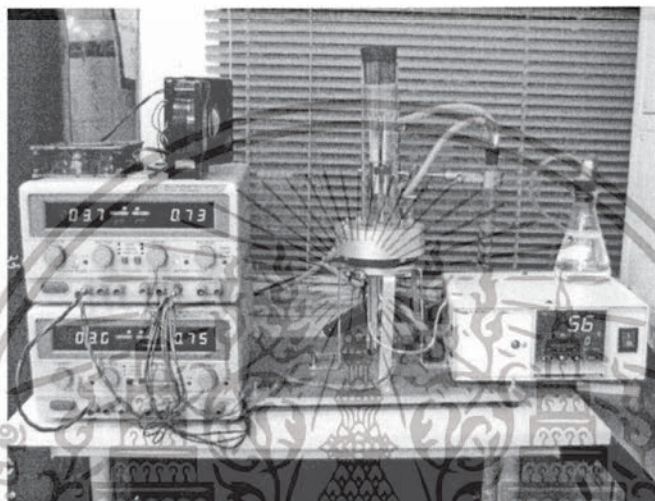
(2) เมื่อตรวจสอบอย่างมั่นใจแล้วขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนการไล่อากาศออกจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนที่มีอัตราการไหลประมาณ 150 cc/min โดยใช้เวลา 15 นาที สาเหตุที่ต้องทำการไล่อากาศเนื่องจากในการสังเคราะห์ต้องใช้ความร้อนสูงจากขดลวดประกอบกับแก๊สนำพา คือแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่ติดไฟ ดังนั้น จึงต้องทำการไล่อากาศที่มีส่วนผสมของแก๊สออกซิเจนซึ่งช่วยให้ไฟติดออกก่อนเพื่อป้องกันอันตรายจากการลุกไหม้หรือการระเบิดของท่อควอตซ์



รูปที่ 4.19 แผ่นฐานรองที่ติดตั้งภายในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) ปรับอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนให้ลดลงเหลือ 100 cc/min (วัดได้ที่ Regulator) จากนั้นเปิดพัดลมระบายความร้อนแล้วเริ่มให้ความร้อนแก่ห้องปฏิกิริยาโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดความร้อน ขดลวดความร้อนจะทำการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงมาเป็นพลังงานความร้อน การปรับความร้อนนั้นให้ค่อยๆเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวด เพื่อป้องกันการขาดของขดลวดที่เกิดจากการขยายตัวอย่างฉับพลันเมื่อขดลวดมีความร้อนสูงจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้น อุณหภูมิที่ได้สามารถดูได้จาก Thermocouple



รูปที่ 4.20 การให้ความร้อนแก่ห้องปฏิกิริยา

(4) เมื่อได้อุณหภูมิตามที่ต้องการในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แล้ว ให้จ่ายไอระเหยของสารแหล่งจ่ายคาร์บอนเข้าไปยังห้องปฏิกิริยาโดยการปรับควาให้แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนไหลผ่านเอทธานอลด้วยอัตราการไหล 10 cc/min ตามเวลาที่ต้องการทดลอง



รูปที่ 4.21 การปรับการให้ความร้อนแก่ห้องปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

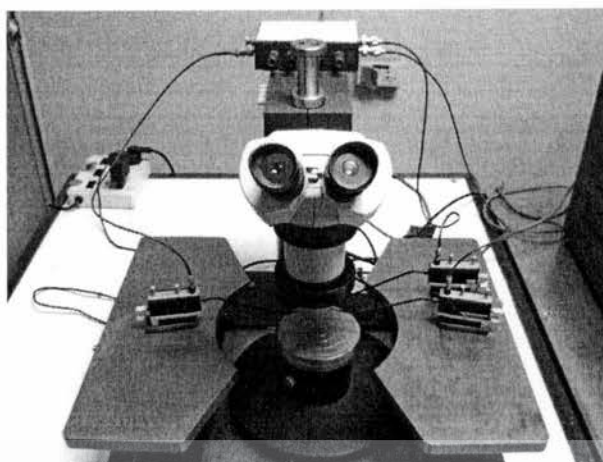
(5) เมื่อสังเคราะห์เสร็จสิ้นแล้วให้หยุดการจ่ายสารแหล่งจ่ายคาร์บอนแล้วค่อยๆลดกระแสไฟฟ้าลงอย่างช้าๆ เพื่อให้อุณหภูมิในห้องปฏิบัติการค่อยๆลดลง เมื่อห้องปฏิบัติการเย็นลงแล้วให้ปิดแก๊สไฮโดรเจน รอจนระบายแก๊สออกจากห้องปฏิบัติการหมดก่อนแล้วจึงปิดพัดลมระบายความร้อนเป็นอันเสร็จสิ้นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อน

4.3 เครื่องมือในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวป์

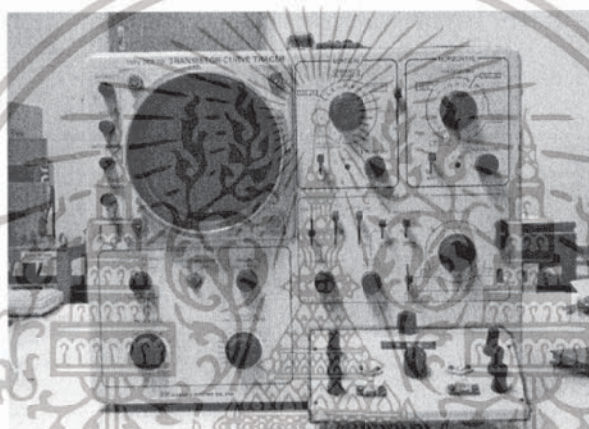
4.3.1 ชนิดรอยสัมผัสและความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวป์กับโลหะ

คาร์บอนนาโนทิวป์ก็คือธาตุคาร์บอนที่มีการจับตัวเป็นรูปท่อ ธาตุคาร์บอนเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ 4 ของตารางธาตุ เป็นหมู่เดียวกับซิลิคอนจึงมีคุณสมบัติเป็นกึ่งตัวนำไฟฟ้า ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์อาจเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี หรือ ชนิดเอ็น ก็ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยในการสังเคราะห์ และรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวป์กับโลหะ อาจเกิดได้ทั้งแบบ รอยสัมผัสแบบเรคตีไฟร์ และรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

จากการค้นคว้า งานวิจัยต่างๆ พบว่าส่วนใหญ่ คาร์บอนนาโนทิวป์ทั้งแบบผนังเดี่ยวและแบบหลายผนัง มี work function ระหว่าง 4.7 ถึง 5 eV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับธาตุคาร์บอน จากการวิจัยในเรื่อง Contact Resistance Properties Of Metal - Nanotube Interfaces ของ California Institute of Technology ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยทดลองกับโลหะ 5 ชนิด คือ Ti, Pd, Pt, Cu และ Au ผลคือ Ti ให้ค่าความต้านทานรอยสัมผัสที่ต่ำที่สุดและเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก โดยโลหะชนิดอื่นๆ มีความต้านทานรอยสัมผัสมากขึ้นตามลำดับดังนี้ Pd Pt Cu Au และยังมีงานวิจัยของ Institute of Physics Academia Sinica Tapei ที่กล่าวว่า Cr เป็นโลหะที่ให้คุณสมบัติรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ดีที่สุด คือมีความต้านทานรอยสัมผัสที่ต่ำ (ช่วงเป็นกิโลโอห์ม ที่อุณหภูมิห้อง) เป็นโอห์มมิกคอนแทค ผลกระทบจากอุณหภูมิต่ำ ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กต่ำ และเหมาะสมที่จะเป็นอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นส่วนประกอบ



รูปที่ 4.22 โฟโตมิเตอร์

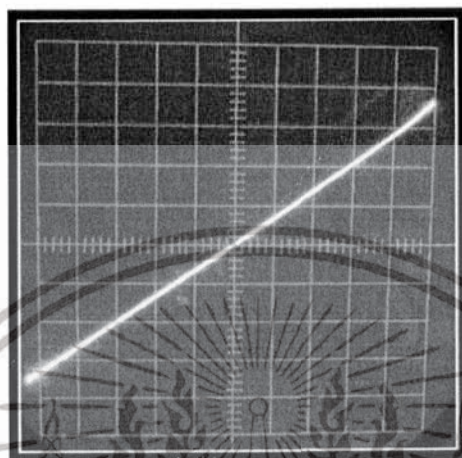


รูปที่ 4.23 เครื่อง Curve Tracer

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาว่ารอยสัมผัสเป็นแบบโอห์มมิกคอนแทคหรือเรกติไฟร์นั้น จึงได้ทำการทดลอง โดยนำตัวตรวจวัดแก๊สที่ต่อชั่วเสิร์จสมบูรณ์แล้วมาทำการวัดกราฟคุณลักษณะ $I - V$ ด้วยเครื่อง Curve Tracer รูปที่ 4.24 เป็นผลของการทดลองวัดรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ซึ่งผลการวัดทุกๆ แผ่น ตัวอย่างเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกทั้งสิ้น โดยมีความชันหรือความต้านทานแตกต่างกันออกไป



รูปที่ 4.24 กราฟคุณลักษณะ $I - V$ ของตัวตรวจวัดแก๊ส

4.3.2 ระบบการวัดแอลกอฮอล์

ระบบการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์แสดงได้ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งการวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ จะกระทำในระบบปิดภายในห้องปฏิบัติการหรือ Chamber ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิจากตัวควบคุม อุณหภูมิระหว่าง -5 ถึง 100 °C ใช้ไนโตรเจนเหลวและ heater ในการควบคุม โดยอุณหภูมิห้อง ปฏิภาณนี้จะเป็นอุณหภูมิแวดล้อมในการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ ในห้องปฏิบัติการจะมีที่ยึดหัว เซนเซอร์อยู่ภายในสำหรับยึดอุปกรณ์ขณะทำการวัด ส่วนด้านล่างของที่ยึดเซนเซอร์จะมีขดลวด ทั้งสแตนเลสสำหรับให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในกรณีที่ต้องการไล่ความชื้นที่ผิวฟิล์ม บางหลังการดูดซับไอแอลกอฮอล์ขณะทำการวัดโดยความร้อนที่ให้ความควบคุมได้จากค่าไฟฟ้ากระแส ตรงที่ป้อนให้ขดลวดจากแหล่งจ่ายพลังงานภายนอกห้องปฏิบัติการ

ในการทดลองทุกครั้งก่อนที่เซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์จะถูกนำไปวัดในห้องปฏิบัติการหรือ Chamber จะต้องทำการอบไล่ความชื้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์เบื้องต้นที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงนำไปติดตั้งภายในห้องปฏิบัติการ ก่อนทำการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์จะทำการไล่ อากาศภายในห้องปฏิบัติการด้วยแก๊สไนโตรเจนผ่านวาล์ว V1 และมีเตอร์ควบคุมการไหลของแก๊ส F1 แก๊สไนโตรเจนจะเข้าแทนที่อากาศในห้องปฏิบัติการ Chamber ไล่อากาศออกมาภายนอกโดยมีน้ำดัก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ โดยน้ำจะทำหน้าที่เป็นวาล์วปิดกั้นอากาศภายนอกไม่ให้เข้าไปภายในและทำหน้าที่เจือจางแก๊สที่เหลือจากห้องปฏิบัติการให้ละลายในน้ำก่อนที่จะออกสู่บรรยากาศภายนอก

เมื่อต้องการวัดการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ทำการปิดวาล์ว V1 และเปิดวาล์ว V2 ให้แก๊สไนโตรเจนโดยควบคุมปริมาณแก๊สผ่านมิเตอร์ควบคุมการไหลแก๊ส F2 ลงไปยังสารละลายแอลกอฮอล์ ไนโตรเจนจะนำพาไอระเหยแอลกอฮอล์ผ่านฟองแก๊สไนโตรเจนไปยังห้องปฏิบัติการหรือ Chamber โดยจะทำสลับกันเป็นวงรอบการวัด ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงถูกแสดงผ่านจอมอนิเตอร์ที่เวลาจริงและบันทึกเก็บไว้เป็นข้อมูลอย่างต่อเนื่อง

เมื่อไอระเหยแอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนนาโนทิวบ์ค่าความต้านทานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าสูงสุดและเริ่มอ้อมตัวเรียกค่าความต้านทานสูงสุดที่เริ่มอ้อมตัวว่า R_{MAX} จากนั้นจะหยุดให้ไอระเหยแอลกอฮอล์โดยปิดวาล์ว V2 และเปิดวาล์ว V1 ให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้าไปในห้องปฏิบัติการหรือ Chamber เพื่อไล่ไอระเหยแอลกอฮอล์ในห้องปฏิบัติการออกไป ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนถึงค่าต่ำสุดเรียกว่า R_{MIN} เป็นค่าความต้านทานฐาน ซึ่งจะครบหนึ่งรอบการวัด และจะทำการวัดรอบใหม่ต่อไป ค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในรอบการวัดแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง $\Delta R\%$ โดยสามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานสูงสุดและต่ำสุดในรอบการวัดดังสมการที่ 1

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



รูปที่ 4.25 แผนภาพระบบการวัดแอลกอฮอล์ภายในห้องเซ็นเซอร์แลป

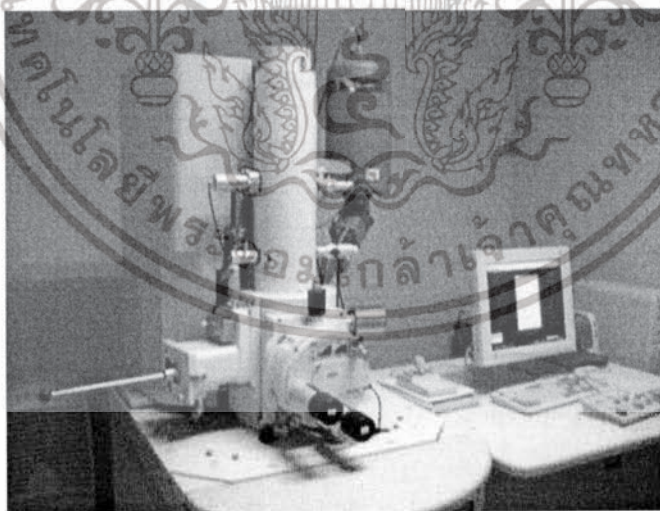
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของศูนย์วิจัยคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติหรือ TMEC เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ cold cathode field emission มีความแยกชัดสูงในระดับ 1.5 นาโนเมตร ที่ 15 กิโลโวลต์ (kV) ควบคุมการทำงานด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์สามารถบันทึกภาพถ่ายไมโครกราฟได้ ติดตั้งพร้อมหัววัดอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (secondary electron detector) หัววัดอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับหลัง (backscattered electron detector) และเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDS)

โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

- (1) นำเทปคาร์บอนติดเข้ากับแท่งทองเหลือง
- (2) นำชิ้นงานมาติดบริเวณเทปคาร์บอนให้แน่น
- (3) ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของสารตัวอย่างที่กำลังขยายต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- (4) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ของชิ้นงานด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDS)



รูป 4.26 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

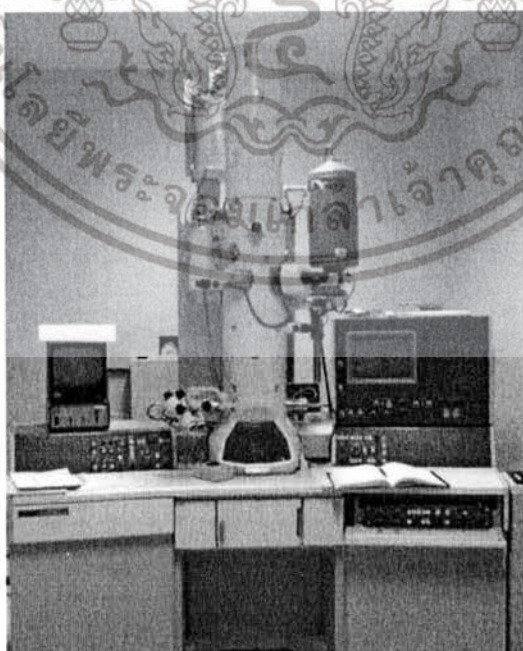
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของศูนย์วิจัยคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติหรือ TMEC เครื่องมือที่ใช้ศึกษาองค์ประกอบและลักษณะโครงสร้างจุลภาคภายในของตัวอย่าง โดยอาศัยการให้แสงอิเล็กตรอนทะลุผ่านสารตัวอย่างที่บางมาก สามารถทำงานได้ทั้งแบบ transmission mode และ scanning-transmission mode อีกทั้งยังสามารถศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (electron diffraction pattern) ของสารตัวอย่างได้ พร้อมติดตั้งเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDS) และโทรทัศน์ที่ติดกล้องมุมกว้าง (wide angle TV camera) เพื่อช่วยในการโฟกัสภาพที่กำลังขยายสูง

โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

- (1) นำชิ้นงานใส่หลอดทดลอง
- (2) ใส่อะซิโตนในหลอดทดลอง
- (3) ทำการสั่นสารละลายด้วยเครื่องอัลตราโซนิค เพื่อให้ท่อนาโนคาร์บอนหลุดออกจากแผ่นซิลิกอน และกระจายตัวได้ดี หรือใช้ใบมีดโกนขูดออกเบาๆ
- (4) ตูดสารละลายขึ้นมาแล้วหยดลงบน holly copper grid และนำไปฝังโคมไฟให้แห้ง
- (5) นำชิ้นงานไปถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค และ ถ่ายภาพ electron diffraction pattern



รูปที่ 4.27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 เครื่องรามาน (Raman Spectrometer)

เครื่องรามานเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์วัสดุ โดยอาศัยหลักการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) ของแสงโดยผลึกหรือโมเลกุลที่ย่านความถี่ตั้งแต่ UV (ultraviolet) ถึง NIR (near infrared) ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความถี่อันเนื่องมาจากการที่ผลึกหรือโมเลกุลได้รับหรือสูญเสียพลังงานอย่างใดอย่างหนึ่ง จากการทรานสิชัน (transition) ระหว่างชั้นพลังงานของการสั่นหรือการหมุน (phonon-phonon scattering) ซึ่งจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับ Raman mapping, microscopy และ spectroscopy โดยบอกรายละเอียดต่างๆ ของวัสดุได้แก่ องค์ประกอบ (composition) พันธะเคมี (bonding) โครงสร้าง (structure) เฟส (phase) การบอกตำแหน่ง (localization) ขนาด (size) ความเครียดเหนี่ยวนำ (induced stress) และกลไกของปฏิกิริยา (reaction mechanism) เป็นต้นสำหรับการศึกษาโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่องรามานนั้น จะสามารถหาอัตราส่วนระหว่างความเข้ม (Intensity) ของพีค D-band (disorder-induced vibrational mode) และ G-band (the in-plane stretching mode) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของโครงสร้างผลึกและความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ว่ามีสารปนเปื้อน (impurities) มากน้อยเพียงใด อีกทั้งยังสามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวได้อีกด้วย



รูปที่ 4.28 เครื่องรามาน (Raman Spectrometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองแบ่งเป็นสองส่วนได้แก่ส่วนการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งอยู่ในตอนที่ 1 และตอนที่ 2 ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนนาโนทิวบ์เซนเซอร์ซึ่งอยู่ในตอนที่ 3

ตอนที่ 1 ระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์

5.1.1 คำนำ

จมูกอิเล็กทรอนิกส์คือการเลียนแบบการรับรู้กลิ่นของสิ่งมีชีวิต จมูกของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติจะรับรู้กลิ่นได้โดยเมื่อมีอนุภาคของกลิ่นฟุ้งไปในอากาศ เมื่อไปกระทบกับ ต่อมรับรู้กลิ่นในโพรงจมูก ต่อมรับรู้กลิ่นจะมีอยู่จำนวนมากซึ่งแต่ละชนิดจะมีการตอบสนองต่อกลิ่นแต่ละแบบที่แตกต่างกันไปเมื่อ ต่อมรับรู้กลิ่นตอบสนองต่อกลิ่นต่างๆนั้นแล้วก็จะส่งสัญญาณไฟฟ้าเคมีไปยังสมองสมองจะทำการประมวลผลโดยการเปรียบเทียบกับกลิ่นที่เคยจดจำได้ในอดีตจากความทรงจำนำมาประมวลผลเทียบเคียง จึงแยกแยะได้ออกว่าเป็นกลิ่นอะไรจำนวนของต่อมรับรู้กลิ่นในโพรงจมูกนั้นมีจำนวนมหาศาลเทียบกับเซนเซอร์ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นได้ในปัจจุบัน การที่จะเลียนแบบการทำงานของจมูกจริงๆ จึงเป็นการยากที่จะทำได้ละเอียดอ่อนเท่ากับจมูกและสมองของสิ่งมีชีวิตอีกทั้งเซลล์สมองของสิ่งมีชีวิตก็มีจำนวนมากมายมหาศาลที่จะใช้ประมวลผลในการแยกแยะกลิ่นต่างๆ จมูกอิเล็กทรอนิกส์จึงยังอยู่ในขั้นเริ่มต้นที่จะต้องพัฒนาอีกต่อไป โดยประโยชน์ของจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาใช้กันก็จะมี การตรวจสอบคุณภาพอาหาร การจำแนกผลิตภัณฑ์เปียร์ การจำแนกกลิ่นน้ำหอมว่าแท้หรือไม่ผลิตมาจากแหล่งใด การจำแนกไขมันหรือเนื้อสัตว์เพื่อดูว่ามาจากแหล่งการผลิตจากที่ใด ใช้จำแนกผู้ป่วยโรคมะเร็งปอดจากลมหายใจ และใช้ตรวจหาวัตถุระเบิดในสนามบิน เป็นต้น เนื่องจากการค้นคว้าวิจัยโดยใช้ และจำแนกด้วย จมูกอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีเซนเซอร์รับรู้กลิ่นเป็นแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์หลายตัวต่อรวมกัน ควบคู่กับการวิเคราะห์ข้อมูลหลังการตรวจวัดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในเรื่องการพัฒนาจมูกอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์มีการดำเนินการดังนี้

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยจมูกอิเล็กทรอนิกส์แบบต่าง ๆ และวิธีการนำไปใช้งาน
2. ศึกษางานวิจัยจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เซนเซอร์ชนิด สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์
3. ศึกษางานวิจัยที่ใช้จมูกอิเล็กทรอนิกส์ในการวัดเครื่องดื่มประเภทที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาองค์ประกอบของสารต่างที่มีอยู่ในเครื่องต้มแอลกอฮอล์
5. ศึกษาวิธีวิเคราะห์ข้อมูลแบบต่างๆ ที่ใช้กันในงานจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์
6. ออกแบบระบบจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์แบบใช้เซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์มาต่อร่วมกัน (Array sensor)
7. ทดลองใช้จุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์ลงวัดเครื่องต้มแอลกอฮอล์
8. หาค่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ตอบสนองสูงสุดของแต่ละเซนเซอร์
9. นำสัญญาณที่ได้มาอยู่ในรูปของเมตริกซ์
10. นำเมตริกซ์การตอบสนองของเซนเซอร์มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis :PCA)
11. สรุปผลการทดลอง

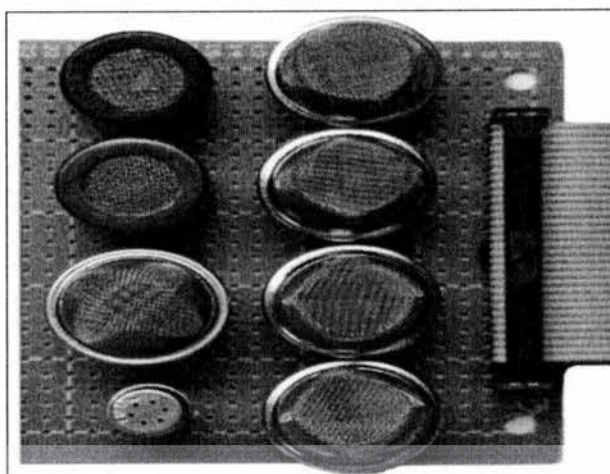
5.1.2 การออกแบบจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์

จากการศึกษาเซนเซอร์โลหะออกไซด์ชนิดต่างทำที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั้งหมดพบว่าชนิดที่นำมาใช้งานในจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์มีเพียงเซนเซอร์ที่ตอบสนองต่อก๊าซได้ดีได้เพียงบางกลุ่มเท่านั้นโดยเราเลือกมาใช้งานดังตารางที่ 5.1.1

ตารางที่ 5.1.1 เซนเซอร์ก๊าซที่นำมาใช้และชนิดของก๊าซ

ตัวที่	รุ่น	ชนิดก๊าซที่ตรวจจับ
1	MQ 2	General Combustible
2	MQ 3	Alcohol
3	MQ 4	Natural, Methane
4	MQ 6	LPG, Propane
5	MQ 7	Carbon Monoxide
6	TGS2600	Air Contaminants
7	TGS2602	Air Contaminants

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

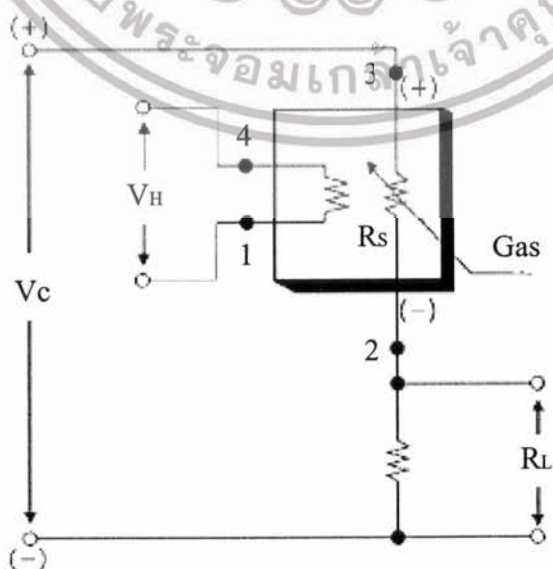


รูปที่ 5.1.1 เซนเซอร์จุ่มอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการตรวจวัดเครื่องตีมแอลกอฮอล์

จากนั้นนำจุ่มอิเล็กทรอนิกส์ไปทดสอบวัดเครื่องตีมแอลกอฮอล์ จากนั้นจะทำการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่เอาต์พุตของทุกเซ็นเซอร์และนำค่าที่ได้จัดเรียงในรูปเมตริกซ์ เนื่องจากวัดเครื่องตีมแอลกอฮอล์เบียร์สด 3 ชนิด ทำการวัดซ้ำ 5 ครั้งและตรวจวัดโดยใช้เซนเซอร์ 7 ตัว ทำให้ได้เมตริกซ์ข้อมูลขนาด 15×7 หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก เพื่อผลการจำแนก ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

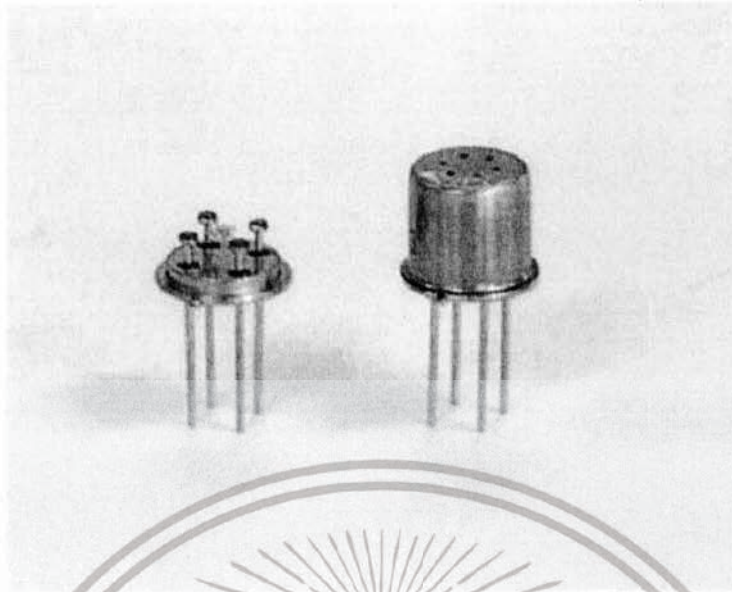
5.1.2.1 การออกแบบก๊าซเซ็นเซอร์อาร์เรย์

โดยทั่วไปแก๊สเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์จะมีการต่อวงจรใช้งานที่มีลักษณะคล้ายกัน คือ มีแรงดันไฟจ่ายให้กับวงจร VC เป็นแรงดันไปกระแสตรงค่าไม่เกิน 5V และ แรงดันที่จ่ายกับ Heater (VH) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) หรือไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) แรงดัน 5.0 V

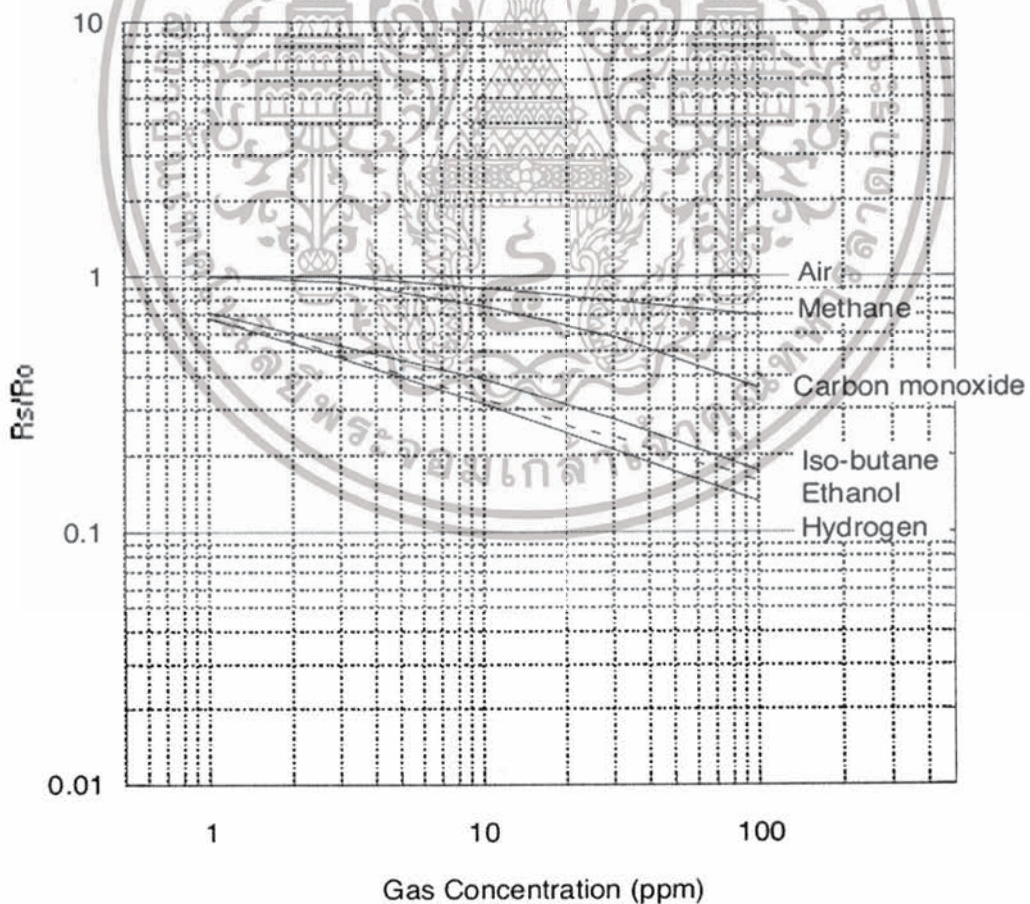


รูปที่ 5.1.2 วงจรของแก๊สเซ็นเซอร์ที่พร้อมใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1.3 ตัวอย่างก๊าซเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์ รุ่น TGS 2600



รูปที่ 5.1.4 ความต้านทานตอบสนองต่อไอสารเคมีต่างๆต่อความต้านทานในอากาศ R_s/R_o

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของเซ็นเซอร์ TGS 2600 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์สามารถหาได้จากสมการที่ (5.1.1)

$$R_S = \left(\frac{V_C}{V_{RL}} - 1 \right) \times R_L \quad (5.1.1)$$

จากสมการที่ (5.1.1) เราจะนำไปใช้คำนวณหาค่าความต้านทานโหลด (R_L) ที่จะนำไปใช้ต่อในวงจรและกำลังงานไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์ใช้ไปสามารถหาได้จากสมการที่ (5.1.2)

$$P_S = \frac{V_C^2 \times R_S}{(R_S + R_L)^2} \quad (5.1.2)$$

ซึ่งเราจะได้รุ่นของแก๊สเซ็นเซอร์ที่จะใช้สร้างเป็นจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น แรงดันที่จ่ายให้วงจร (V_C), แรงดันที่จ่ายให้กับ Heater (V_H), ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ (R_S), ค่าความต้านทานของ Heater (R_H), กำลังที่ใช้ของ Heater (P_H) ของเซ็นเซอร์ทั้ง 7 ตัว ดังตารางที่ 5.1.3

ตารางที่ 5.1.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าและความต้านทานของแก๊สเซ็นเซอร์ต่างๆ ที่ใช้งาน

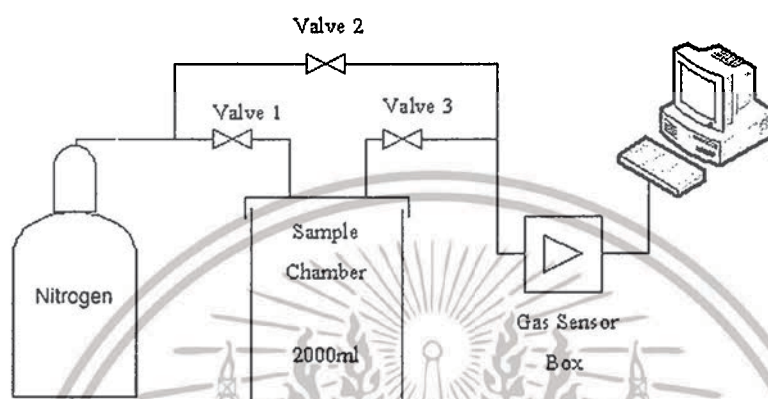
รุ่น	แรงดัน V_C (V)	แรงดัน V_H (V)	R_S (K Ω)	R_H (Ω)	P_H (mW)
TGS 2602	5.0 ± 0.2	5.0 ± 0.2	10-100	59.0	280
TGS 2600	5.0 ± 0.2	5.0 ± 0.2	10-90	83.0	210
MQ 2	5.0 ± 0.1	5.0 ± 0.1	3-30	33.0 ± 3.0	800
MQ 3	5.0 ± 0.1	5.0 ± 0.1	1-8	33.0 ± 3.0	750
MQ 4	5.0 ± 0.1	5.0 ± 0.1	10-60	33.0 ± 3.0	750
MQ 6	5.0 ± 0.1	5.0 ± 0.1	2-20	33.0 ± 3.0	900
MQ 7	5.0 ± 0.1	5.0 ± 0.1	2-20	33.0 ± 3.0	350

ทำการทดสอบการทำงานของวงจรและต่อสายสัญญาณเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ทุกตัวเพื่อนำสัญญาณบันทึกผลการวัด ลงคอมพิวเตอร์โดยใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล ด้วยอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ USB Multifunction รุ่น NI USB-6211 ของบริษัท National Instrument

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2.2 การออกแบบระบบการทำงาน

ระบบการตรวจวัดของจุ่มก๊อสิเล็ททรอนิกส์ มีหลักการทำงานคล้ายๆ กับการทำงานจริงของจุ่มก๊อสิเล็ท คือ จะต้องมีการนำกลิ่นหรือไอระเหยจากสารชนิดต่างๆ มาสัมผัสตัวรับรู้กลิ่นในที่นี้เรา จะใช้การพัดพาของก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาห้กลิ่นหรือสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่อยู่ในเครื่องต้ม แอลกอฮอล์เข้าสู่เซ็นเซอร์รับกลิ่นทั้ง 7 ตัว ซึ่งไดอะแกรมการทำงานของระบบตรวจวัดเป็นดังรูปที่ 5.1.5



รูปที่ 5.1.5 ไดอะแกรมการทำงานของจุ่มก๊อสิเล็ททรอนิกส์

จากไดอะแกรมการทำงานของระบบจุ่มก๊อสิเล็ททรอนิกส์ในรูปที่ 5.1.5 จะเห็นว่าประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ ระบบการควบคุมการไหลของก๊าซซึ่งมีไนโตรเจนเป็นก๊าซพาห้, ชุดแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์ต่อร่วมกันแบบอาร์เรย์และระบบการบันทึกสัญญาณ ซึ่งมีตารางการควบคุมการไหลของก๊าซดังตารางที่ 5.1.2

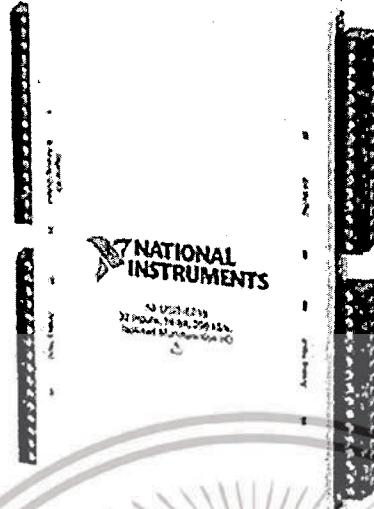
ตารางที่ 5.1.2 วิธีควบคุมการเปิดปิด

วาล์วตัวที่ 1	วาล์วตัวที่ 2	วาล์วตัวที่ 3	การทำงาน
ปิด	เปิด	ปิด	ไล่สารตกค้าง
เปิด	ปิด	เปิด	ตรวจวัดสารตัวอย่าง

5.1.2.3 การบันทึกผลการทดลอง

ส่วนระบบการบันทึกสัญญาณพัฒนาบนโปรแกรม NI LabVIEW โดยทำงานร่วมกับ Multifunction I/O รุ่น NI USB-6211 ของ National Instrument ทำหน้าที่เป็น Data acquisition และควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว ดังรูปที่ 5.1.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1.6 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ NI USB Multifunction รุ่น NI USB-6211

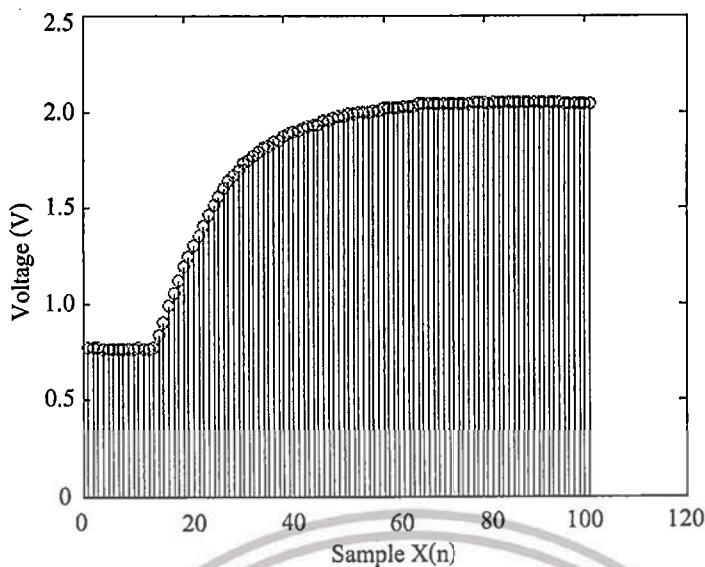
โดยการสุ่มตัวอย่างหรือ Sampling ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องหรือดิจิทัล $x(n)$ จากสัญญาณต่อเนื่อง $x(t)$ โดยอาศัยความถี่ในการซึก (Sampling rate หรือ Sampling frequency) ซึ่งจะได้สัญญาณ $x(n)$ เป็น

$$x(n) \cong x(nT) \quad (5.1.4)$$

เมื่อ T คือคาบของการสุ่มตัวอย่าง
เมื่อพิจารณาระดับของการ Quantization (Q) ข้อมูลจะได้

$$x(n) \cong Q(x(nT)) \quad (5.1.5)$$

สัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างจะเป็นดังรูปที่ 5.1.7



รูปที่ 5.1.7 สัญญาณจากการสุ่มตัวอย่าง

จากนั้นหาค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณ (Signal) ของเซ็นเซอร์แต่ละตัว ดังสมการที่ (5.1.6) และ (5.1.7)

$$x_{(\max)} = \text{Max}(x(n)) \quad (5.1.6)$$

$$x_{(\min)} = \text{Min}(x(n)) \quad (5.1.7)$$

เมื่อได้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณก็จะมาคำนวณหาผลต่าง ดังสมการที่ (5.1.8) ซึ่งจะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของสัญญาณ

$$x_{(dif)} = \text{Max}(x(n)) - \text{Min}(x(n)) \quad (5.1.8)$$

โปรแกรมที่ใช้บันทึกสัญญาณจากการวัด โดยมีช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างทุก 1 วินาที หรือ มีค่า Sampling rate เท่ากับ 1 Hz

5.1.3 การดำเนินการทดลอง

การทดสอบใช้จุ่มกอิเล็กทรอนิกส์วัดเครื่องตีมแอลกอฮอล์เมื่อเราได้ออกแบบและประกอบชุดทดลองเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเตรียมตัวอย่าง ซึ่งจะใช้เปียร์สตร 3 สูตรส่วนการทำงานของจุ่มกอิเล็กทรอนิกส์ก่อนทำการตรวจวัด เมื่อเริ่มเปิดสวิทช์ระบบและเปิดวาล์วถึงแก๊สไนโตรเจนซิเจนจะต้องใช้เวลาเริ่มต้น (Initial) ประมาณ 10 นาที เพื่อให้ตัวทำความร้อน (Heater) ของก๊าซเซ็นเซอร์ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันความชื้นที่เกิดจากตัวอย่างรบกวนการทำงานของระบบเพื่อให้การทำงานคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Stable) และปล่อยก๊าซไนโตรเจนเพื่อไล่สารตกค้างและสิ่งสกปรกต่างๆ ที่มาเกาะตัวเซ็นเซอร์ขณะที่ไม่ได้ใช้งาน

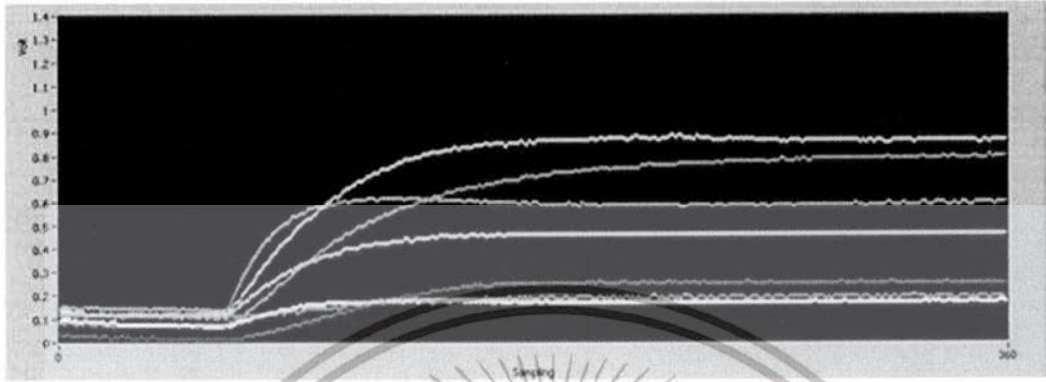
ซึ่งในตอนน้ระบบพร้อมทำการตรวจวัดตัวอย่างแล้ว เราจึงนำใส่ในภาชนะขนาด 2000 ml ซึ่งมีการปิดสนิท หลังจากนั้นวาล์วตัวที่ 1, 3 อยู่ในสถานะปิดและวาล์วตัวที่ 2 อยู่ในสถานะเปิดให้ไนโตรเจนไหลผ่านแก๊สเซ็นเซอร์โดยตรงเพื่อดูค่าคงที่ของระดับสัญญาณต่ำสุดขณะก่อนตรวจวัดตัวอย่าง เพื่อจะใช้ในการคำนวณระดับการเปลี่ยนแปลงสัญญาณในการตรวจวัด ซึ่งสัญญาณของแต่ละเซ็นเซอร์ก็จะเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ สัญญาณของแก๊สเซ็นเซอร์ทุกตัวจะอยู่ใกล้ศูนย์ มีค่าแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซเซ็นเซอร์ต่อก๊าซไนโตรเจนของแต่ละตัว และเมื่อเวลาการทดสอบผ่านไป 1 นาที ระบบก็จะปิดวาล์วตัวที่ 2 และเปิดวาล์วตัวที่ 1, 3 เพื่อให้ก๊าซพาห้ นำสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่อยู่ในเปียร์สดีไฮลเข้าสู่กล่องเซ็นเซอร์อาร์เรย์ทั้ง 7 ตัว เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ตัวอย่างไหลเข้าสู่เซ็นเซอร์อาร์เรย์จนมีระดับสัญญาณที่สูงสุดแล้ว จากนั้นเมื่อครบเวลา 6 นาที ของการตรวจวัดตัวอย่างระบบจะทำการปิดวาล์วตัวที่ 1, 3 และเปิดวาล์วตัวที่ 2 เป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้ก๊าซไนโตรเจนไล่เอาตัวอย่างที่ตกค้างภายในระบบออกไป ซึ่งจะทำให้ระดับสัญญาณกลับมาคงที่ค่าเดิมเท่ากับก่อนการตรวจวัดตัวอย่างอีกครั้ง โดยสามารถเขียนเป็นตารางการทำงานของระบบและรูปสัญญาณที่ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1.5 ลำดับขั้นตอนและช่วงเวลาในการทดลอง

ลำดับ	ช่วงเวลา (นาที)	เวลาที่ใช้ (นาที)	การทำงาน
1	เริ่มต้น	-	เปิดวาล์วไนโตรเจน
2	0-10	10	ระบบเริ่มต้นการทำงาน
3	10	-	เริ่มบันทึกสัญญาณ
4	10-11	1	ปิดวาล์วตัวที่ 1,3 และเปิดวาล์วตัวที่ 2
5	11-16	5	เปิดวาล์วตัวที่ 1,3 และปิดวาล์วตัวที่ 2
6	16-18	2	ปิดวาล์วตัวที่ 1,3 และเปิดวาล์วตัวที่ 2
7	18 ขึ้นไป	-	ทดสอบตัวอย่างถัดไป
8	จบการทดลอง	2	ปิดวาล์วตัวที่ 1,3 และเปิดวาล์วตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ตรวจวัดได้จากการวัดเรอาน์ทิกโดยใช้โปรแกรม NI LabVIEW ซึ่งเราสามารถดูการเปลี่ยนแปลงสัญญาณตลอดการทดลอง 6 นาที เพื่อดูการตอบสนองของเซ็นเซอร์แต่ละตัว ซึ่งจะให้การผลแตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของเซ็นเซอร์ตัวนั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1.8



รูปที่ 5.1.8 สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปแรงดันต่อเวลาวินาทีของแก๊สเซ็นเซอร์ทั้ง 7 ตัว

จากรูปที่ 5.1.8 เป็นสัญญาณเอาต์พุตของก๊าซเซ็นเซอร์ทั้ง 7 ตัว โดยเส้นสีขาวจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ TGS 2602, เส้นสีแดงจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ TGS 2600, เส้นสีเขียวจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ MQ 2, เส้นสีฟ้าจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ MQ 3, เส้นสีเหลืองจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ MQ 4, เส้นสีม่วงจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ MQ 6, และเส้นสีส้มจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ MQ 7 จะเห็นว่าช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นทดสอบจนถึงหนึ่งนาทีระดับสัญญาณของระบบคงที่เข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากในระบบมีเฉพาะก๊าซไนโตรเจนและเมื่อเวลาต่อมาระบบจะทำการเปิดวาล์วให้สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่อยู่ในเบียร์สดไหลเข้าสู่เซ็นเซอร์ โดยการพาห้ของก๊าซไนโตรเจนจะเห็นว่าระดับสัญญาณค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นจนเริ่มคงที่ ระบบจะทำการตรวจวัดไปจนครบเวลา 6 นาที จนจบการทดลอง

แล้วหลังจากนั้นจะทำการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของสัญญาณที่เอาต์พุตของเซ็นเซอร์ทั้ง 7 ตัว โดยใช้สมการที่ (5.1.8) ในการหาค่าต่ำสุดซึ่งเกิดในช่วงนาทีแรกก่อนมีสารตัวอย่างเข้ามาและค่าสูงสุดของสัญญาณ ซึ่งเกิดขณะในช่วงมีสารตัวอย่างเข้ามาในระบบมากที่สุด จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อัดเป็นรูปเมตริกซ์ โดยเวกเตอร์ของข้อมูลชุดที่ 1 จะเป็นแถวที่ 1 ของเมตริกซ์ เวกเตอร์ของข้อมูลชุดที่ 2 จะเป็นแถวที่ 2 ของเมตริกซ์ จนถึงเวกเตอร์ของข้อมูลชุดที่ n จะเป็นแถวที่ n ของเมตริกซ์

5.1.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อได้เมตริกซ์ข้อมูลจากการคำนวณผลการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของก๊าซเซ็นเซอร์แล้ว ขั้นตอนต่อมาจะเป็นการนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเพื่อจำแนกเครื่องดื่มแอลกอฮอล์เบียร์สดแต่ละสูตรซึ่งขั้นตอนแรกเริ่มด้วยการนำข้อมูลมาเรียงให้อยู่ในรูปเมตริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเราจะให้ผลการวัดเครื่องตี๋มแอลกอฮอล์ในแต่ละสูตรอยู่เป็นแถวที่ 1 ถึง แถวที่ n ส่วนคอลัมน์ที่ 1 ถึง คอลัมน์ที่ 7 จะเป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้วัด ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

ขั้นตอนการวิเคราะห์การทดลอง

1. คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของเซ็นเซอร์
2. สร้างเมตริกซ์ของข้อมูล
3. วิเคราะห์สัญญาณจากเมตริกซ์ข้อมูลโดยใช้ โปรแกรม MATLAB
4. สร้างกราฟวิเคราะห์ความสัมพันธ์

การวิเคราะห์เราจะเริ่มตั้งแต่การใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการเรียนรู้แบบไม่มีการสอนดูการจำแนกขั้นต้นว่าสามารถถึงความสัมพันธ์ของเมตริกซ์ข้อมูลของตัวแปร $PCA1$ และ $PCA2$ ได้มากกว่าร้อยละ 80 เพื่อดูว่าการจำแนกดีหรือไม่

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคองค์ประกอบหลัก

ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA เมื่อเราได้สร้างเมตริกซ์ข้อมูลแล้ว จากนั้นหาเมตริกซ์ค่าแปรปรวนร่วม (Covariance matrix) ด้วยสมการที่ (5.1.9), (5.1.10), (5.1.11), (5.1.12) และ (5.1.13) ตามลำดับ

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i^{(k)} \quad i=1,2,\dots,m. \quad (5.1.9)$$

$$x^{(j)} \leftarrow x^{(j)} - \bar{x} \quad i=1,2,\dots,n. \quad (5.1.10)$$

$$x_i^{(k)} \quad k=1,2,\dots,n. \text{ and } x_j^{(k)} \quad k=1,2,\dots,n. \quad (5.1.11)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n x_i^{(k)} x_j^{(k)} \quad (5.1.12)$$

โดยที่

\bar{x}_i แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลเมตริกซ์ X ในแต่ละหลัก

$x^{(j)}$ แทน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเมตริกซ์ข้อมูล

s_{ij} แทน เมตริกซ์ของความแปรปรวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ลบด้วยค่าเฉลี่ยของทุกคอลัมน์ เมื่อจัดรูปแบบข้อมูลแล้วคำนวณหา Covariance เมตริกซ์ด้วยสมการที่ (5.1.14)

$$S(X) = \frac{1}{n-1} xx^T \quad (5.1.13)$$

$$XX^T = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x^{(k)} - \bar{x})(x^{(k)} - \bar{x})^T \quad (5.1.14)$$

ขั้นตอนต่อมาหาค่าไอเกนและเวกเตอร์ไอเกนของเมตริกซ์ความแปรปรวนที่ได้จากสมการที่ (5.1.14) ซึ่งค่าเมตริกซ์เวกเตอร์ไอเกนที่ได้จะนำไปสร้างตัวแปรใหม่ ดังนี้

$$\begin{aligned} PC_1 = w_1' &= w_{11}X_1 + w_{12}X_2 + \dots + w_{1n}X_n \\ PC_2 = w_2' &= w_{21}X_1 + w_{22}X_2 + \dots + w_{2n}X_n \\ PC_n = w_n' &= w_{n1}X_1 + w_{n2}X_2 + \dots + w_{nn}X_n \end{aligned} \quad (5.1.15)$$

เมื่อ เป็นตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นมีจำนวนสูงสุดเท่ากับจำนวนขนาดของเมตริกซ์ความแปรปรวน โดยจะสามารถดึงความสัมพันธ์ของตัวแปรเดิมเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ซึ่งพิจารณาจากค่าไอเกนที่ได้ของเมตริกซ์ความแปรปรวนซึ่งจะเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยเช่นกัน โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาจากร้อยละของค่าไอเกนสะสมของตัวประกอบหลังค่าไอเกนตัวแรกเป็นอย่างไร ร้อยละ 80 เช่น มีจำนวนตัวแปรใหม่ $n = 7$ ตัว แต่มีสัดส่วนค่าไอเกนสะสม 2 ตัวแรกร้อยละ 84 ในกรณีนี้เราจะสามารถใช้ตัวแปรใหม่และแทนตัวแปรเดิมทั้งหมดได้ ผลลัพธ์จากเทคนิค PCA จะได้ค่าไอเกนและเวกเตอร์ไอเกน โดยข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ขั้นตอนสุดท้ายคือการแปลงเพื่อแสดงเป็นภาพฉายโดยจะเลือกแกนจากเวกเตอร์ไอเกนที่มีการกระจายสูงสุดและมีค่าอธิบายความสัมพันธ์ได้มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 80 ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นตัวแปรใหม่ $PCA1$, $PCA2$ และ $PCA3$ ทั้งตัวแปรสามารถแสดงเป็นภาพฉายได้ในรูปแบบ 2 มิติ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับชุดข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์ เพื่อนำไปใช้ต่อไป

ผลการทดลองระบบจุมุกอิเล็กทรอนิกส์ตอนที่ 2

5.2.1 คำนำ

การทำงานของจุมุกอิเล็กทรอนิกส์มีขั้นตอนการทำงานที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ การตรวจวัดสารประกอบที่ระเหยง่าย และการวิเคราะห์หรือประมวลผลการตรวจวัด ซึ่งการตรวจวัดจะได้ผลที่ดีจะขึ้นอยู่กับ การออกแบบและเลือกก๊าซเซ็นเซอร์ที่จะนำมาใช้กับตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัด ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวตัวอย่างและทำการเลือกก๊าซเซ็นเซอร์ที่เหมาะสม เนื่องจากข้อจำกัดของการตอบสนองทางเคมีของก๊าซเซ็นเซอร์มีบางชนิดที่มีการผลิตขึ้นมาจำหน่าย ส่วนในเทคนิคในการวิเคราะห์ผลการทดลองมีหลายเทคนิค ซึ่งแต่ละเทคนิคก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นเทคนิคมีข้อดีที่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว

5.2.2 ผลการทดลองจุมุกอิเล็กทรอนิกส์วัดเครื่องต้มแอลกอฮอล์เปียร์สด

ในการทดลองเป็นการนำก๊าซเซ็นเซอร์จำนวน 7 ตัวทำงานร่วมกันทำการตรวจวัดสารประกอบที่ระเหยง่ายที่อยู่ในเครื่องต้มแอลกอฮอล์เปียร์สด ซึ่งหลังจากการตรวจวัดสารตัวอย่างแล้วนำมาทำการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของเซ็นเซอร์แต่ละตัว โดยผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์จากสมการที่ 5.2.1 เมื่อผ่านวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Dividers) ก็จะกลายมาอยู่ในรูปของแรงดันดังสมการที่ (5.2.2)

$$\Delta R\% = \frac{R_{MAX} - R_{MIN}}{R_{MIN}} \times 100 \quad (5.2.1)$$

$$x_{(dir)} = Max(x(n)) - Min(x(n)) \quad (5.2.2)$$

เราจะได้ค่าแรงดันตอบสนองของเซ็นเซอร์แต่ละตัวกับตัวอย่างเครื่องต้มแอลกอฮอล์เปียร์สด ซึ่งหลังจากคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดจะได้ดังตารางที่ 5.2.1

ตารางที่ 5.2.1 แรงดันตอบสนองของเซ็นเซอร์แต่ละตัวต่อเครื่องตีเมล็ดแอลกอฮอล์เปียร์สดในจมูก
อิเล็กทรอนิกส์

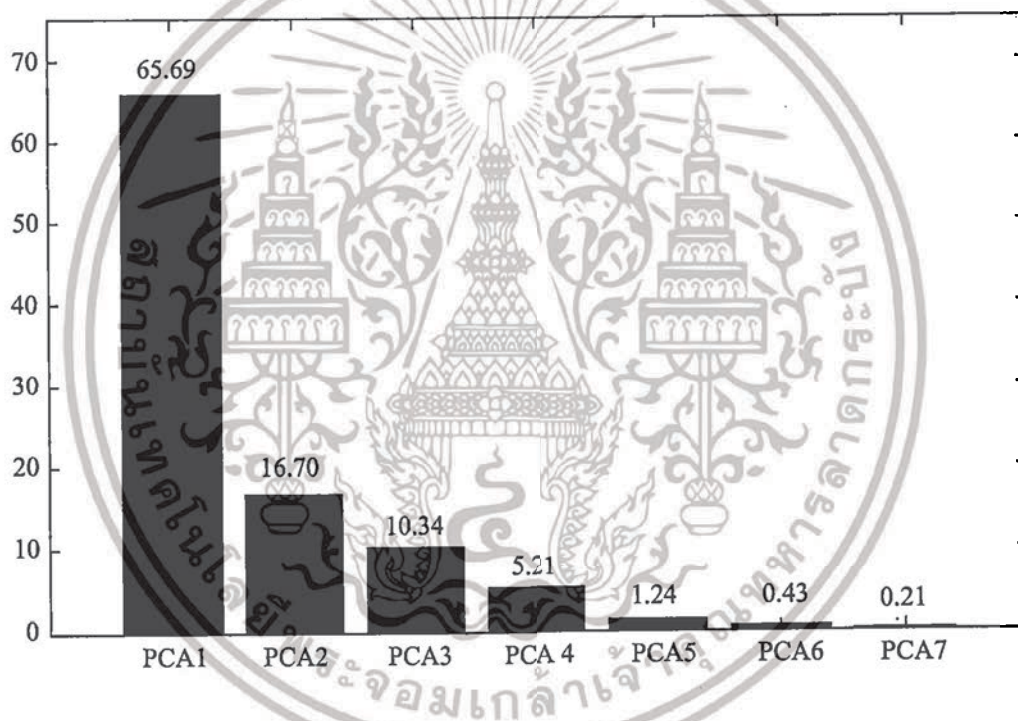
ครั้งที่	MQ 2 (V)	MQ 3 (V)	MQ 4 (V)	MQ 6 (V)	MQ 7 (V)	TGS2600 (V)	TGS2602 (V)
สูตรที่ 1							
1	0.589	0.241	0.112	0.184	0.071	1.019	0.246
2	0.548	0.225	0.092	0.204	0.071	1.101	0.224
3	0.618	0.24	0.095	0.235	0.075	1.03	0.235
4	0.589	0.26	0.112	0.184	0.081	0.953	0.26
5	0.674	0.245	0.102	0.306	0.082	1.19	0.275
สูตรที่ 2							
1	0.245	0.113	0.061	0.152	0.041	0.459	0.072
2	0.296	0.133	0.061	0.041	0.071	0.52	0.113
3	0.286	0.113	0.061	0.092	0.062	0.469	0.102
4	0.183	0.113	0.071	0.041	0.051	0.449	0.082
5	0.215	0.123	0.081	0.031	0.051	0.439	0.143
สูตรที่ 3							
1	0.143	0.082	0.061	0.011	0.03	0.51	0.377
2	0.133	0.062	0.071	0.011	0.03	0.61	0.377
3	0.174	0.097	0.056	0.021	0.046	0.68	0.398
4	0.183	0.113	0.071	0.041	0.051	0.449	0.382
5	0.23	0.133	0.081	0.035	0.057	0.474	0.302

จากตารางที่ 5.2.1 จะนำข้อมูลที่ได้นี้มาเขียนในรูปเมตริกซ์ขนาด 15×7 เพื่อนำไปวิเคราะห์การจำแนกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อถึงความสัมพันธ์ของเซ็นเซอร์ทั้ง 7 ตัวมาที่มีเป็นตัวแปรใหม่ คือ ตัวแปร $PCA1-PCA7$ ซึ่งแต่ละตัวก็จะมี ความสามารถดึงเอาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แตกต่างกัน คือ ตัวแปร $PCA1$ จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงความสัมพันธ์มากที่สุดและจะลดลงเรื่อยๆ จนตัวแปร $PCA7$ ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงความสัมพันธ์น้อยที่สุดตารางที่ 5.2.2 และรูปที่ 5.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2.2 เปอร์เซ็นต์ของตัวแปรใหม่ที่สกัดจากข้อมูลเชิงทฤษฎี

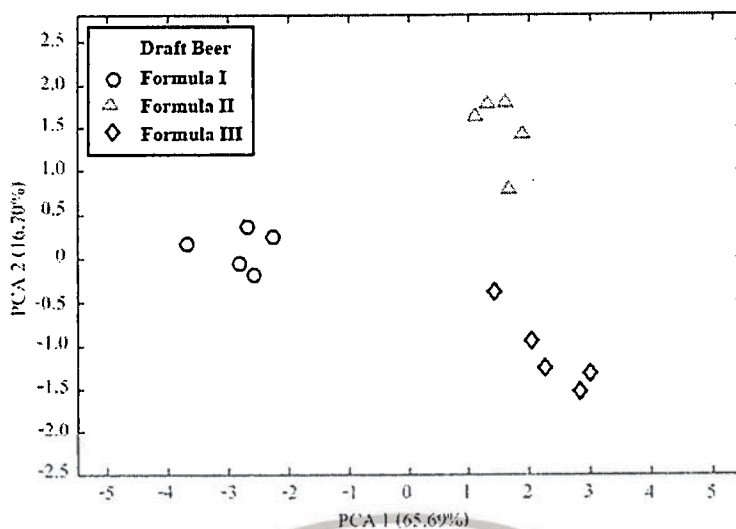
ตัวแปรใหม่	เปอร์เซ็นต์การดึงความสัมพันธ์	เปอร์เซ็นต์สะสม
PCA1	65.69	65.69
PCA2	16.70	82.39
PCA3	10.34	92.73
PCA4	5.21	97.94
PCA5	1.42	99.36
PCA6	0.43	99.79
PCA7	0.21	100



รูปที่ 5.2.1 เปอร์เซ็นต์การดึงความสัมพันธ์ข้อมูลเชิงทฤษฎีของตัวแปรใหม่

ซึ่งจากตารางที่ 5.2.2 จะเห็นว่า ตัวแปร *PCA1* มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงความสัมพันธ์ของเมตริกซ์ข้อมูลเท่ากับ 65.69 ส่วนตัวแปร *PCA2* มีค่าเท่ากับ 16.70 ซึ่งทั้งสองตัวแปรให้ผลรวมการดึงความสัมพันธ์เท่ากับ 82.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าร้อยละ 80 ดังนั้นเราสามารถถือเอาตัวแปร *PCA1* และ *PCA2* เป็นตัวแทนของทั้ง 7 ตัวแปรได้ ตามหลักการพิจารณาตัวประกอบหลักที่เหมาะสม เราสามารถดูความสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปรโดยการนำไปพล็อตกราฟเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา ดังรูปที่ 5.2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2.2 การจำแนกของจุ่มกือเล็กทรอนิกส์หลังการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA

5.2.3 สรุปผลการทดลองจุ่มกือเล็กทรอนิกส์วัดเครื่องดื่มแอลกอฮอล์เบียร์สด

การวิจัยจุ่มกือเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ในการแยกแยะเครื่องดื่มแอลกอฮอล์เบียร์สดเราได้ทดลองนำก๊าซเซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์จำนวน 7 ตัว มาต่อร่วมกัน และนำไปตรวจวัดสารตัวอย่างเบียร์สด หลังจากนั้นนำผลที่ได้มาสร้างเป็นเมตริกซ์ข้อมูลและใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเพื่อดูการจำแนกข้อมูลพบว่า สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็น 3 กลุ่มได้อย่างชัดเจน โดยข้อที่ควรพิจารณาในการคัดเลือกก๊าซเซ็นเซอร์ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้วัดสารประกอบต่าง ๆ นั้นนอกจากการศึกษาสารตัวอย่างว่ามีองค์ประกอบอะไรบ้างแล้ว ก็ต้องหาเซ็นเซอร์ที่ตอบสนองต่อสารนั้นให้เหมาะสม และก็ยังต้องนำมาใช้ทดสอบกับสารนั้นจริง ๆ ว่าเหมาะสมในการแยกแยะได้จริงหรือไม่ เพราะสารตัวอย่างที่นำมาวัดมักมีสารประกอบต่าง ๆ จำนวนมากหลายชนิด อาจจะทำให้เซ็นเซอร์ตอบสนองเท่า ๆ กันซึ่งทำให้ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างได้

ตอนที่ 3 การทดลองและผลการทดลองคาร์บอนนาโนทิวบ์เซนเซอร์

ในตอนนี้จะกล่าวถึงผลของการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกัน 2 วิธี คือการสังเคราะห์แบบกระบวนการตกสะสมไอเคมีแบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition) และการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical Vapor Deposition) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จะสังเคราะห์ด้วยเงื่อนไขที่เหมือนกัน คือ อุณหภูมิความร้อนที่แผ่นฐานรองเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ และอัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยที่นำพาไอระเหยของสารตั้งต้นของคาร์บอนเข้ามายังห้องปฏิกิริยาในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ผลที่ได้จากการสังเคราะห์ทั้งสองวิธีจะนำมาทำการเปรียบเทียบถึงลักษณะของผิวหน้าของการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ รวมไปถึงการเรียงตัวหรือการจัดระเบียบของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) จากนั้นจะนำมาทำการต่อชั่วโมงใช้งานเพื่อทดสอบการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์มาเป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อมีการดูดซับแอลกอฮอล์เพื่อทดสอบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์จากกระบวนการใดให้คุณสมบัติในการเป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ที่ดี ซึ่งแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทดลองคือ เอทานอลและเมทานอล เซนเซอร์ที่ดีที่ได้จากการเปรียบเทียบจะนำไปทดสอบตรวจวัดแอลกอฮอล์ชนิดอื่นๆ เพื่อดูถึงผลการตอบสนองของเซนเซอร์ที่มีต่อแอลกอฮอล์แต่ละชนิดด้วย

นอกจากนี้ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในขณะที่ใช้งานเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของแอลกอฮอล์ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองการวัดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศา อุณหภูมิห้อง 25 องศา และที่อุณหภูมิ 85 องศา เพื่อที่จะหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการนำเซนเซอร์มาใช้งานให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

5.3.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

5.3.1.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition)

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์จะสังเคราะห์ลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีการเคลือบโลหะคะตะไลต์ไว้แล้ว ซึ่งในทดลองนี้ใช้โลหะนิกเกิลเป็นโลหะคะตะไลต์ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน เตาความร้อนที่ใช้งานจะเป็นแบบเตาความร้อนสามโซน การใช้งานจะอยู่ที่กลางเตาหรือช่วงแพลตโซน เพื่อที่จะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่แม่นยำในการใช้งาน อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีด้วยกัน 3 อุณหภูมิคือ 600, 650 และ 750 °C ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที และใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นของคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยมีอัตราการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

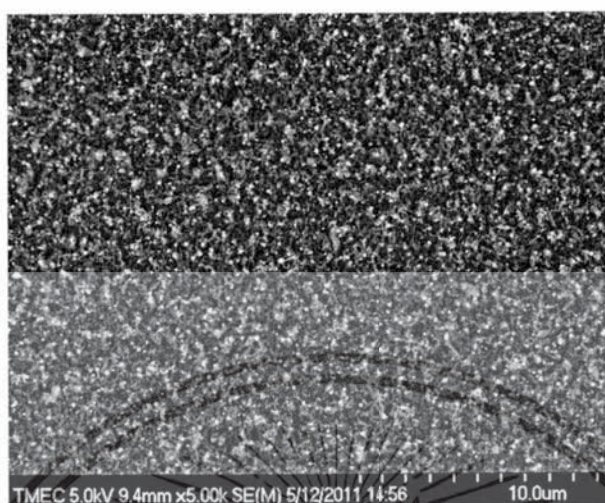
ของแก๊สเฉื่อยในการนำพาไอระเหยของเอทานอลเป็น 0.3 และ 0.5 cc/min เพื่อศึกษาถึงลักษณะการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ความหนาแน่น การจัดระเบียบของท่อคาร์บอน รวมไปถึงภาพรวมของโครงสร้างทั่วไปของการกระจายตัวของท่อคาร์บอนที่ได้ก่อนจะนำมาประยุกต์เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ ซึ่งเงื่อนไขและสัญลักษณ์ในการสังเคราะห์ได้นำเสนอไว้แล้วในตารางที่ 5.3.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.3.1 เงื่อนไขการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

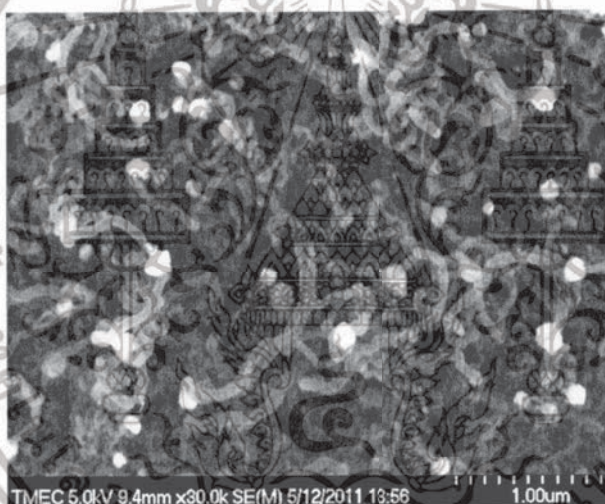
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (cc/min)	สัญลักษณ์ (T-t-cc/min)
5	600	0.3	T600-5-0.3
		0.5	T600-5-0.5
	650	0.3	T650-5-0.3
		0.5	T650-5-0.5
	700	0.3	T700-5-0.3
		0.5	T700-5-0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไซ อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: T600-5-0.3



(ก)



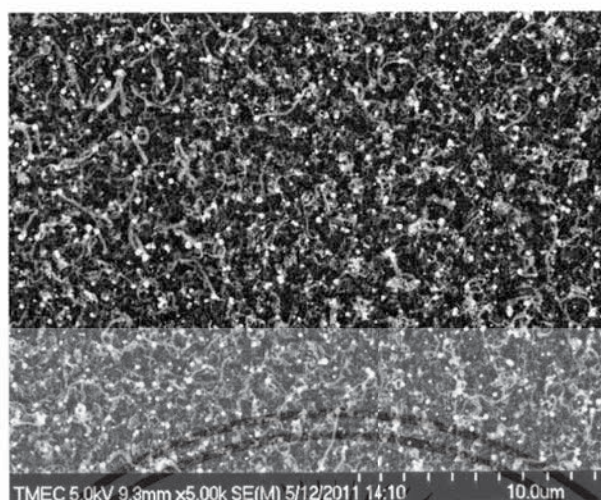
(ข)

รูปที่ 5.3.1 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไซ T600-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

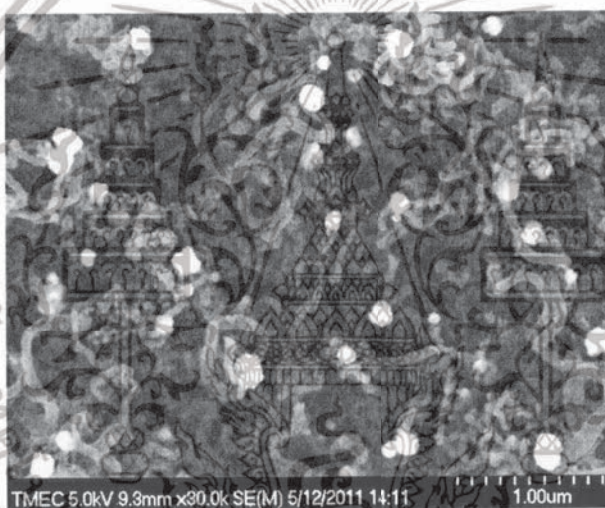
จากรูปที่ 5.3.1(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบน จะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.1(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอน ไม่ได้มีการจัดระเบียบเป็นเส้นตรง แต่มีการเกิดท่อคาร์บอนที่มีเส้นโค้งงอและจับตัวกันเป็นกระจุกหรือกลุ่มก้อนในบางพื้นที่ และบางพื้นที่ก็เกิดเป็นช่องว่างเป็นโหลงสามารถมองเห็นได้ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไซ อุณหภูมิ-เวลา-อัตราไหล: T600-5-0.5



(ก)



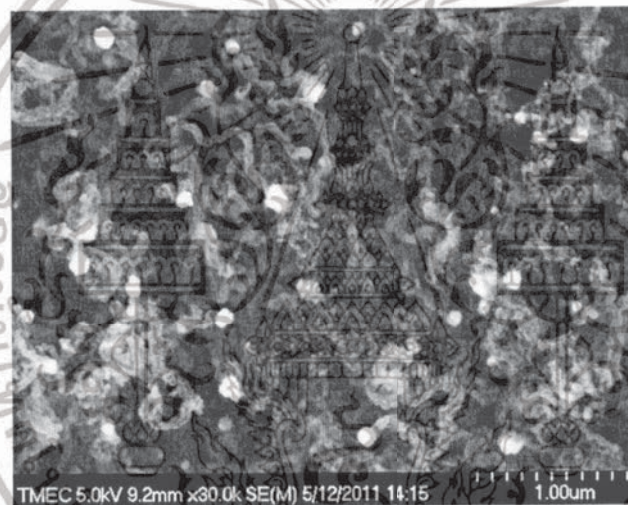
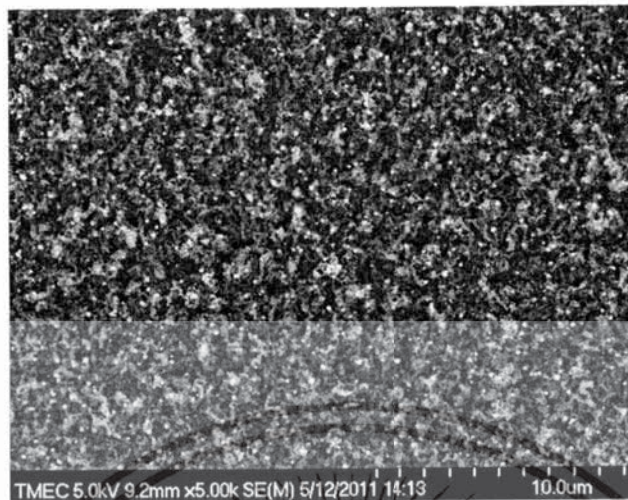
(ข)

รูปที่ 5.3.2 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไซ T600-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.2(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบน จะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.2(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอน ไม่ได้มีการจัดระเบียบเป็นเส้นตรง แต่มีการเกิดท่อคาร์บอนที่มีเส้นโค้งงอและจับตัวกันเป็นกระจุกหรือกลุ่มก้อนในบางพื้นที่ และบางพื้นที่ก็เกิดเป็นช่องว่างเป็นโพลกคล้ายกับรูปที่ 5.3.1 แต่การกระจุกตัวจะมีความหนาน่ากว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจือไน อุดมภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: T650-5-0.3

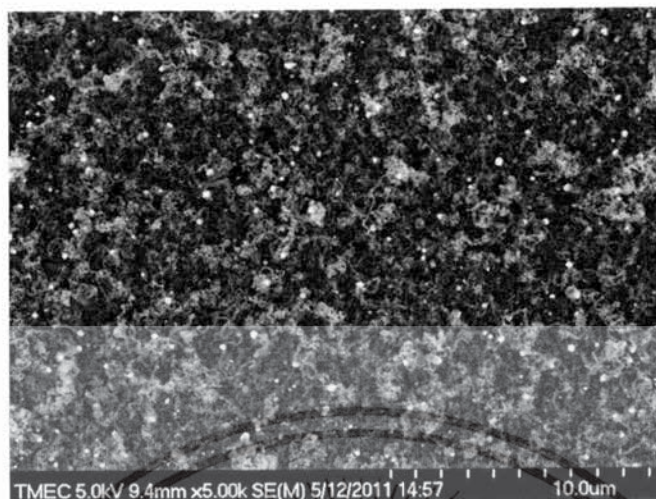


รูปที่ 5.3.3 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเจือไน T650-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

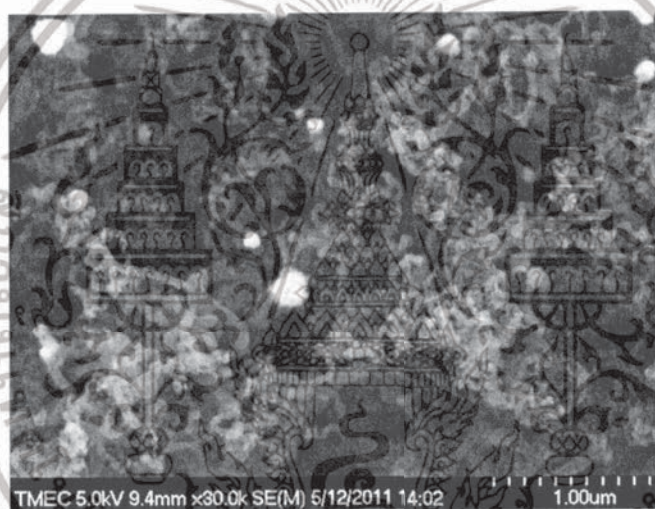
จากรูปที่ 5.3.3(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบน จะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.3(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอนจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งงอและจับตัวกันเป็นกระจุกหรือกลุ่มก้อนอย่างหนาแน่น โฟงหรือช่องว่างจะมีขนาดแคบกว่าการสังเคราะห์ของการทดลองที่ผ่านมา ความยาวของท่อในการยึดตรงค่อนข้างน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไซ อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: T650-5-0.5



(ก)



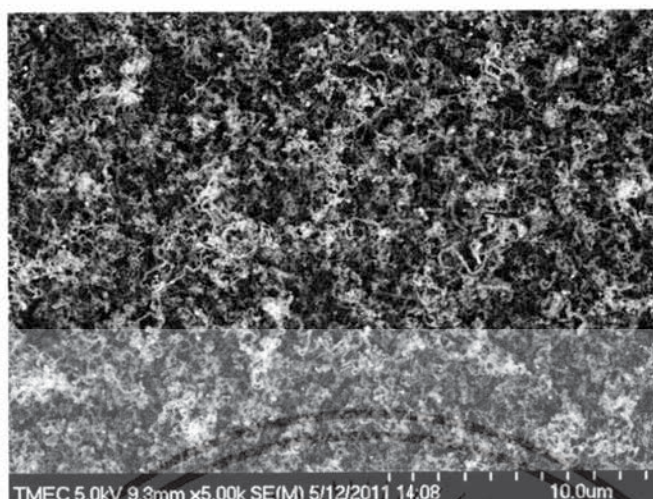
(ข)

รูปที่ 5.3.4 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไซ T650-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

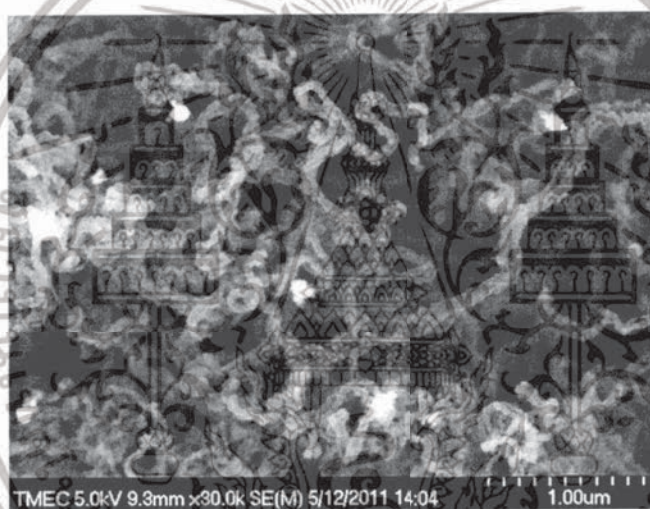
จากรูปที่ 5.3.4(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนซ้อนทับกันอย่างหนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.4(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่าลักษณะการเกิดท่อคาร์บอนคล้ายกับรูปที่ 5.3.1 คือแต่ละเส้นของท่อคาร์บอนจะมีการกระจุกตัวเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มก้อนที่หนาแน่นมาก ทำให้โพรงหรือช่องว่างภายในจะมีขนาดเล็ก แต่ช่องว่างนี้จะมีขนาดที่เล็กกว่ารูปที่ 5.3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจือไน อนุหภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: T700-5-0.3



(ก)



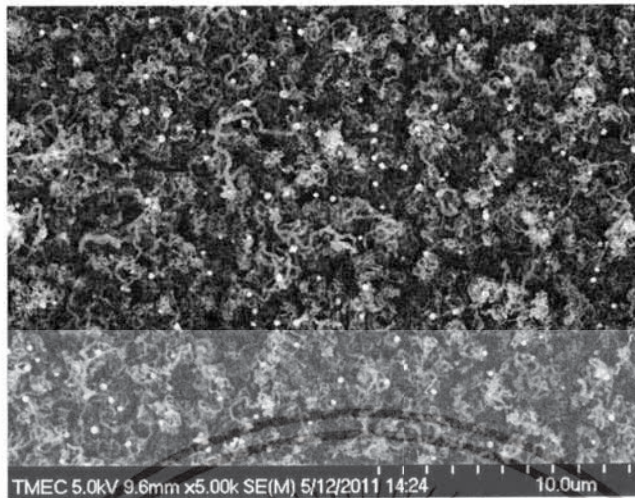
(ข)

รูปที่ 5.3.5 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเจือไน T700-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

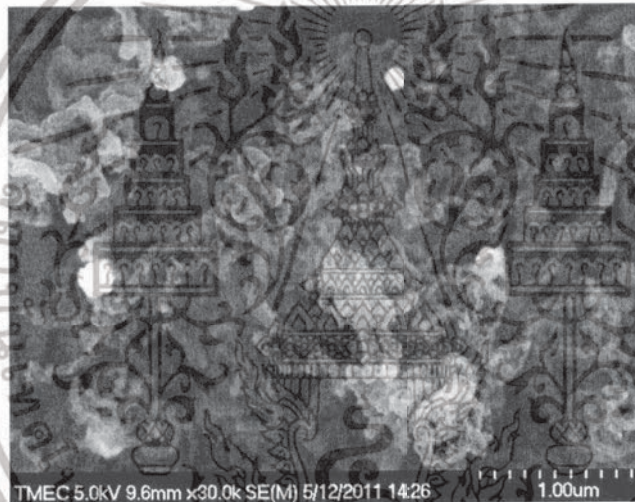
จากรูปที่ 5.3.5(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบน จะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และ รูปที่ 5.3.5(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้นมีการขดตัวไปมาไม่ได้เป็นเส้นตรง การวางตัวแต่ละเส้นซ้อนข้างที่จะมีระยะห่างที่ใกล้เคียงกันไม่กระจุกตัวเป็นกลุ่มก้อน ช่องว่างหรือโพรงจึงมีน้อยและมีขนาดใกล้เคียงกัน ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละเส้นเมื่อมองด้วยตาเปล่ามีขนาดที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการไหล: T700-5-0.5



(ก)

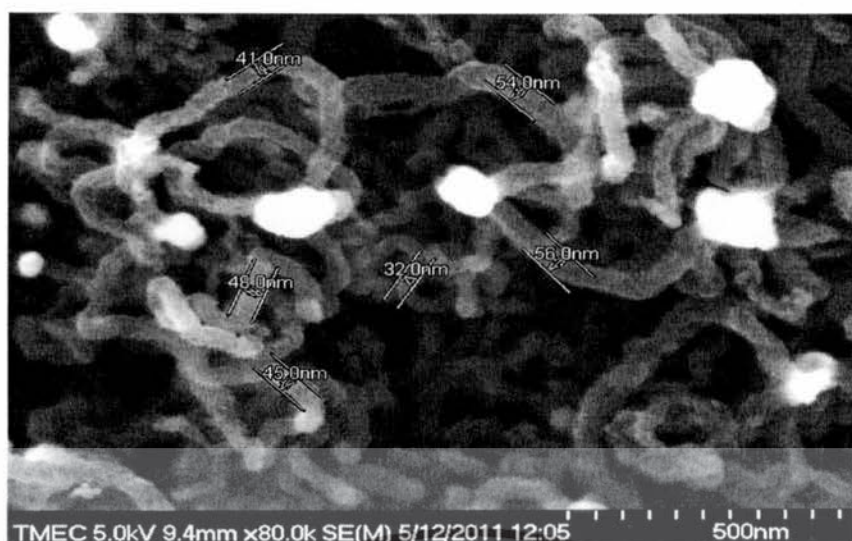


(ข)

รูปที่ 5.3.6 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข T700-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.6(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบน จะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และ รูปที่ 5.3.6(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า การเกิดท่อ คาร์บอนจะมีการขดหรือการกระจุกตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ว่างตัวไปมาคล้ายกับรูปที่ 5.3.4 แต่ จะมีขนาดของกลุ่มก้อนที่ใหญ่กว่าเล็กน้อย ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละเส้นก็ใกล้เคียงกันเมื่อมอง ด้วยตาเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3.7 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้
(ก) ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของคาร์บอนนาโนทิวป์

จากรูปที่ 5.3.7(ก) เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 80,000 เท่าพบว่า ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดที่ไม่เท่ากันวางตัวกระจายซ้อนทับกันจนเต็มพื้นที่ ซึ่งขนาดของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในช่วง 32.0-56.0 nm การวางตัวที่ไม่เป็นระเบียบทำให้ก่อกองช่องว่างหรือโพรง และจากรูปที่ 5.3.7(ข) เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 80,000 เท่าแบบภาพตัดขวางพบว่า ความหนาของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดจากการซ้อนทับกันจะมีความหนาหรือความสูงที่ไม่เท่ากันทั้งแผ่น ความหนาของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในช่วง 4.31 um - 5.38 um และที่ปลายของท่อคาร์บอนจะสังเกตเห็นจุดสีขาวของโลหะคตะโลสตันนิเกิลที่ใช้เป็นตัวดักจับคาร์บอนในการเกิดเป็นท่อคาร์บอน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ในครั้งไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะการเกิดแบบ Tip growth คือ โลหะคะตะไลสต์ที่มีการหลอมเหลว จะทำหน้าที่จับอะตอมคาร์บอน คาร์บอนที่โดนดักจับจะแทรกตัวลงไปด้านล่างแล้วสร้างพันธะต่อกัน เมื่อเกิดการสะสมอะตอมของคาร์บอนนี้มากขึ้นจึงสามารถดันโลหะคะตะไลสต์ขึ้นมาอยู่ด้านบนของปลายท่อ

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition) พบว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนบนฐานรองที่เคลือบด้วยโลหะคะตะไลต์นิเกิลได้ โดย พื้นผิวด้านบนของคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่เรียบสม่ำเสมอ แต่จะมีการกระจายตัวซ้อนทับกันเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรอง และทุกเงื่อนไขในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะไม่มี การเรียงตัวของท่อคาร์บอนเป็นเส้นตรงที่มีระเบียบแต่จะเกิดการโค้งงอขนาดของท่อคาร์บอน และบางส่วนมีการเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มก้อนที่แน่นอนวางซ้อนทับกันจนทำให้ในบางจุดเกิดเป็นโพรงหรือช่องว่างตรงกลางซึ่งไม่มีคาร์บอนนาโนทิวบ์อยู่ ซึ่งจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทุกเงื่อนไขซ้อนข้างจะเป็นไปในทางเดียวกัน และจากการทดลองจะเห็นว่าเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลไอระเหยของเอทานอล 0.3 cc/min คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นมากกว่าเงื่อนไขอื่นดังแสดงดังรูปที่ 4.1 และที่เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการไหลไอระเหยเอทานอลที่ 0.5 cc/min มีขนาดของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ขนาดใหญ่กว่าเงื่อนไขอื่น

5.3.1.2 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical Vapor Deposition)

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์จะสังเคราะห์ลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีการเคลือบโลหะคะตะไลต์ไว้แล้ว ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้โลหะนิเกิลเป็นโลหะคะตะไลต์ โดยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อนได้อธิบายไว้อย่างละเอียดแล้วในบทที่ 3 และเพื่อการศึกษาการเปรียบเทียบของการเกิดของท่อคาร์บอน ดังนั้นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อนจึงมีการสังเคราะห์ที่มีเงื่อนไขที่เหมือนกันกับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน ซึ่งมีการใช้ความร้อนที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยกัน 3 อุณหภูมิคือ 600, 650 และ 750 °C ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที และใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นของคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยมีอัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยในการนำพาไอระเหยของเอทานอลเป็น 0.3 และ 0.5 cc/min เพื่อศึกษาถึงลักษณะการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ความหนาแน่น การจัดระเบียบของท่อคาร์บอน รวมไปถึงภาพรวมของโครงสร้างทั่วไปของการกระจายตัวของท่อคาร์บอนที่ได้ก่อนจะนำมาประยุกต์เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ ซึ่งเงื่อนไขและสัญญาณลักษณะในการสังเคราะห์ได้นำเสนอไว้แล้วในในตารางในในตารางที่ 5.3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

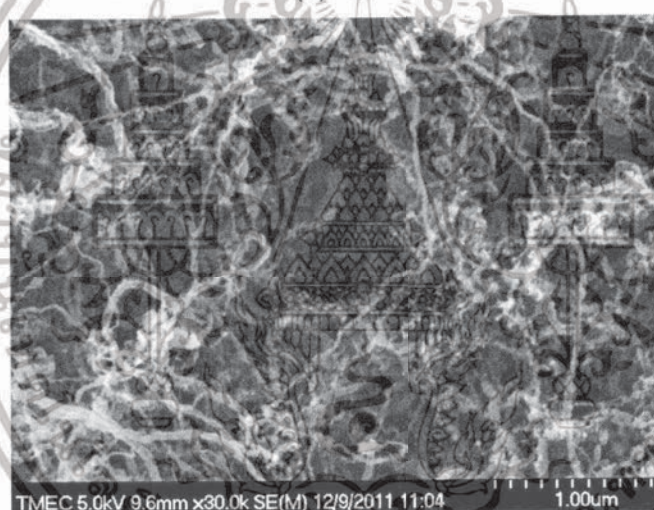
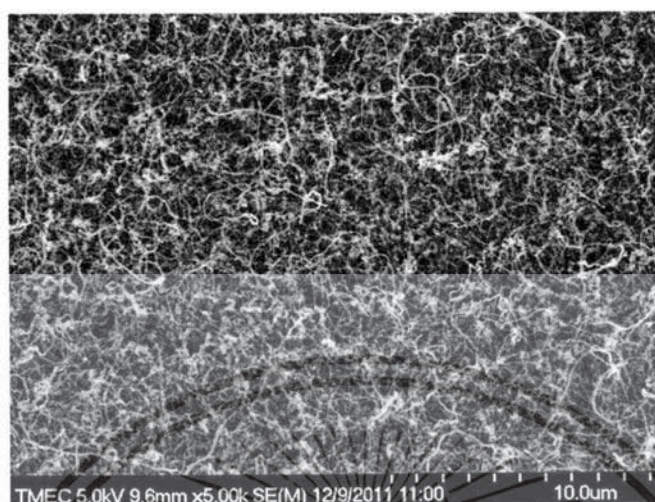
ตารางที่ 5.3.2 เงื่อนไขการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

เวลา (นาทื)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (cc/min)	สัญลักษณ์ (T-t-cc/min)
5	600	0.3	H600-5-0.3
		0.5	H600-5-0.5
	650	0.3	H650-5-0.3
		0.5	H650-5-0.5
	700	0.3	H700-5-0.3
		0.5	H700-5-0.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: H600-5-0.3

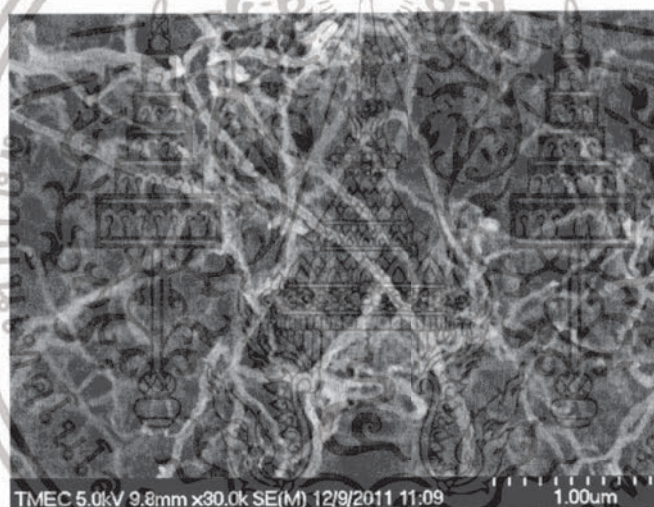
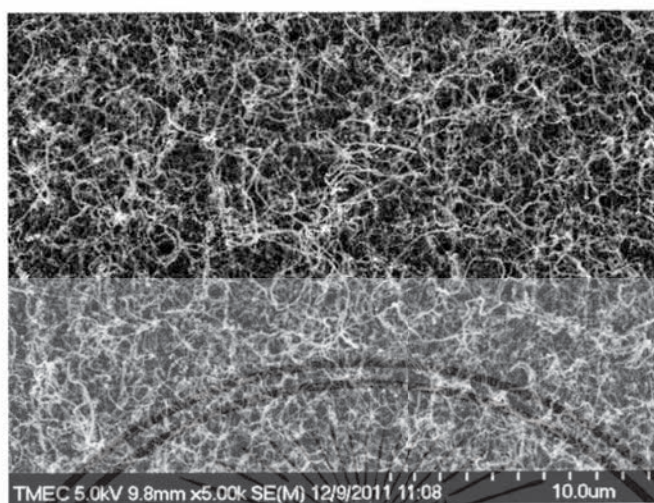


รูปที่ 5.3.8 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข H600-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.8(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบน จะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.8(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่า พบว่าลักษณะของท่อคาร์บอนที่ได้จะมีความยาวและเป็นเส้นตรงที่มีการวางตัวที่เป็นระเบียบมากกว่าการสร้างแบบเตาความร้อน ความยาวของท่อคาร์บอนก็มีการยึดตัวยาวกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน การจับตัวเป็นกลุ่มก้อนเพียงเล็กน้อย แต่มีโพรงหรือช่องว่างบ้างในบางบริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: H650-5-0.5

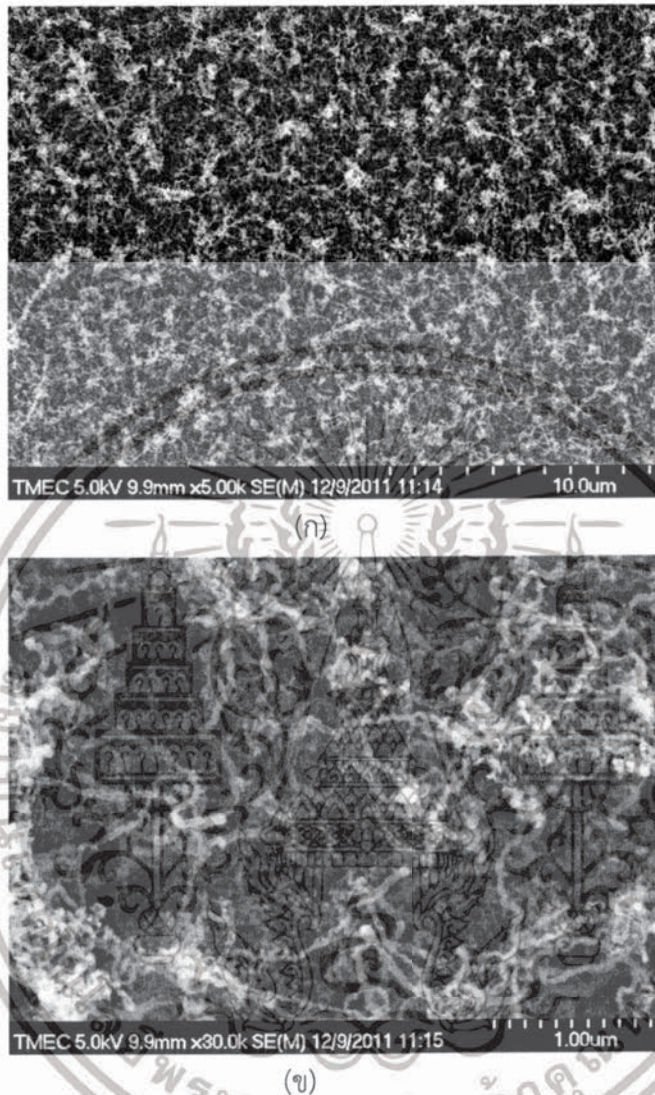


รูปที่ 5.3.9 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข H600-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.9(ก) ภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.9(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่า พบว่าลักษณะของท่อคาร์บอนที่ได้จะมีการวางตัวที่เป็นระเบียบและมีทิศทางซ้อนข้างจะไปในทิศทางเดียวกันมากกว่าการสร้างแบบเตาความร้อน ท่อคาร์บอนที่ได้จะมีความยาวความยาวและซ้อนข้างเป็นเส้นตรง มีช่องว่างระหว่างท่อคาร์บอนเพียงเล็กน้อย ไม่ค่อยมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: H650-5-0.3

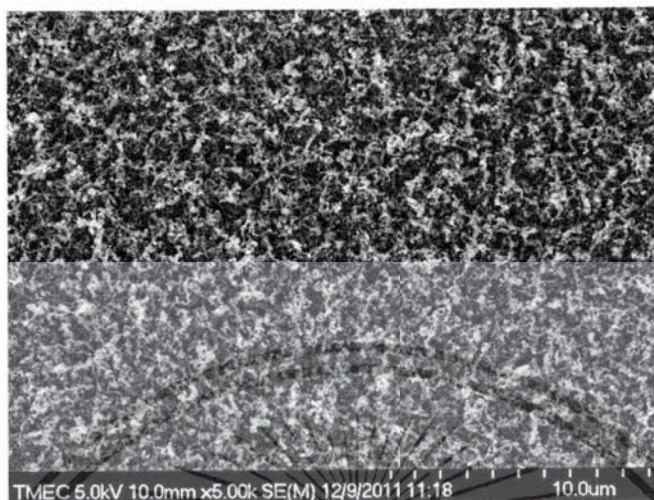


รูปที่ 5.3.10 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข H650-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

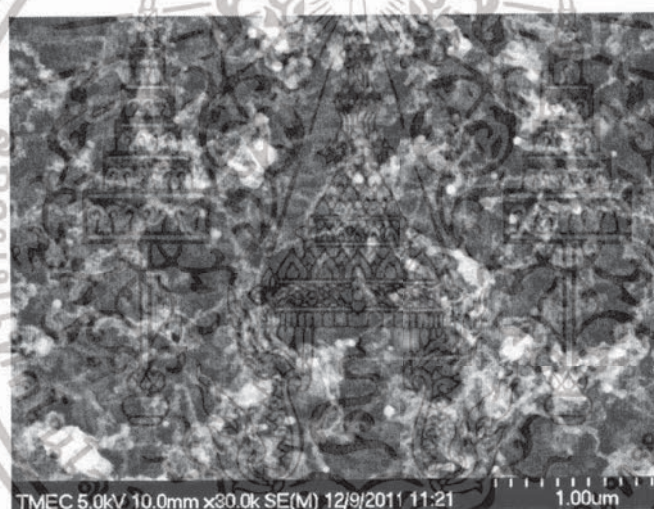
จากรูปที่ 5.3.10(ก) ภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเติมพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.10(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่า พบว่าลักษณะของท่อคาร์บอนที่ได้ไม่มีการวางตัวอย่างเป็นระเบียบและมีการขดระจุกตัวกันเป็นแบบกลุ่มก้อนอย่างหนาแน่น มีขนาดความยาวของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้สั้นมาก บางพื้นที่ก็เป็นช่องว่างที่ไม่มีท่อคาร์บอนอยู่ เนื่องจากการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่เป็นแบบกลุ่มก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการไหล: H650-5-0.5



(ก)



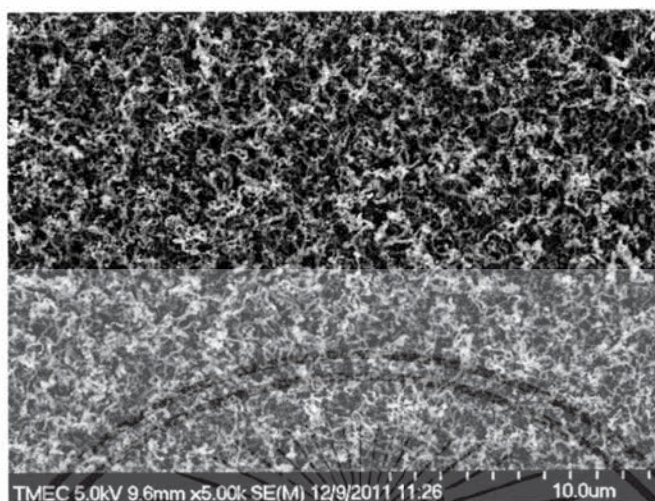
(ข)

รูปที่ 5.3.11 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข H650-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

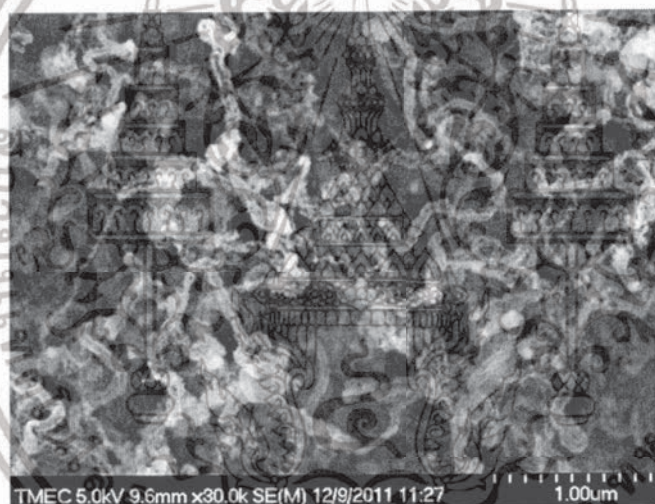
จากรูปที่ 5.3.2(ก) ภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.2(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่า เพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอนไม่ได้มีการจัดระเบียบเป็นเส้นตรง มีการขดตัวกันเป็นกระจุกกลุ่มก้อนเล็กๆอย่างหนาแน่นเต็มพื้นที่แทบไม่มีช่องว่าง และระหว่างกลุ่มก้อนของคาร์บอนจะมีท่อคาร์บอนเชื่อมต่อกันระหว่างกลุ่มก้อนนั้น ขนาดของท่อคาร์บอนที่เชื่อมต่อนี้จะมีขนาดที่เล็กมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: H700-5-0.3



(ก)



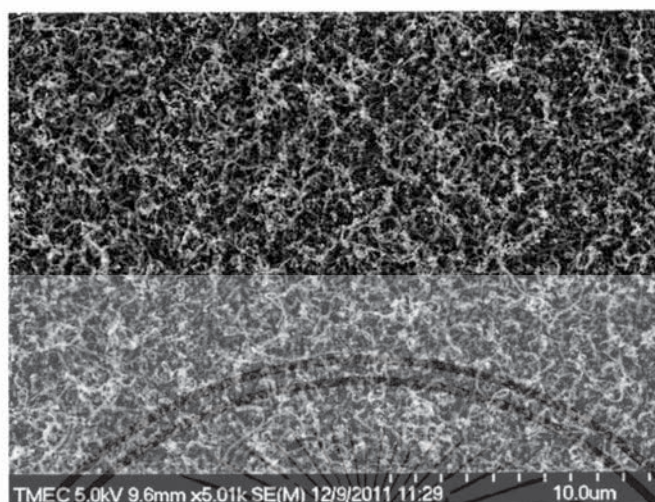
(ข)

รูปที่ 5.3.12 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข 700-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

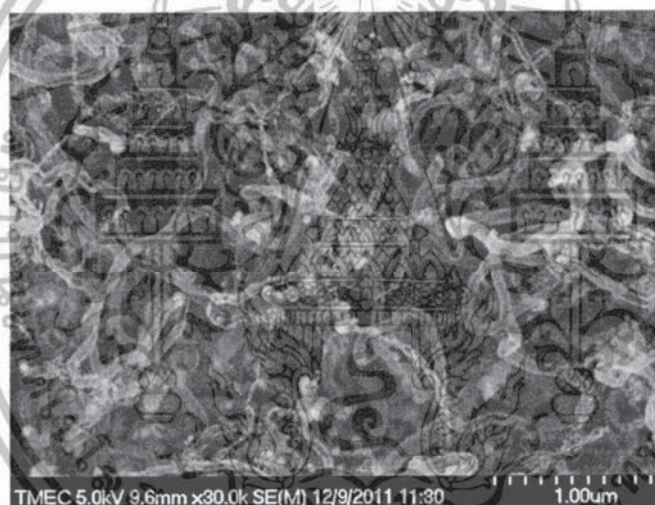
จากรูป 5.3.2(ก) ภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.2(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอนไม่ได้มีการจัดระเบียบเป็นเส้นตรง แต่มีการเกิดท่อคาร์บอนที่มีลักษณะที่เป็นเส้นโค้งงอ มีการจับตัวกันเป็นกระจุกหรือกลุ่มก้อนซ้อนซ้อนกันน้อย แต่จะมีการกระจายตัวแบบไร้ทิศทาง มีช่องว่างน้อยเพราะการกระจายตัวของท่อคาร์บอนที่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: H700-5-0.5



(ก)

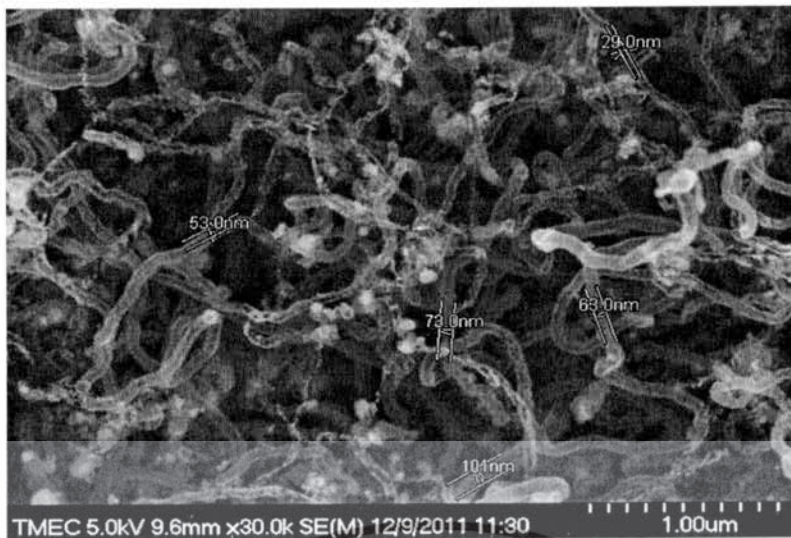


(ข)

รูปที่ 5.3.13 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข H700-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.2(ก) ภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.2(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอนไม่ได้มีการจัดระเบียบเป็นเส้นตรง การวางตัวจะกระจายกระจายแต่ละระยะห่างของแต่ละเส้นของท่อคาร์บอนค่อนข้างจะมีความห่างที่เท่าๆกัน ไม่มีการจับกันเป็นกลุ่มก้อน ช่องว่างภายในพื้นที่มีน้อยมากเกิดจากการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของท่อคาร์บอนนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3.14 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ (ก) ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของท่อนาโนคาร์บอน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองที่เคลือบด้วยโลหะคะตะไลต์นิเกิลได้ และจากภาพถ่าย SEM ที่ 5,000 เท่า พื้นผิวด้านบนของคาร์บอนนาโนทิวป์ไม่เรียบ แต่มีการกระจายตัวของท่อคาร์บอนเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรอง และจากภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าจะเห็นได้ว่าทุกเงื่อนไขในการสังเคราะห์ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้มีการเรียงตัวไม่เป็นเส้นตรงมีการโค้งงอ แต่ท่อคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดความยาวของท่อมากกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน จะมีช่วงของการยึดตัวให้เป็นเส้นตรงค่อนข้างเป็นเส้นตรงมากกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน จะมีการกระจายตัวมากกว่าการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน และจากการทดลองจะเห็นว่าทุกๆเงื่อนไขการสังเคราะห์จะได้ขนาดของเส้นผ่าน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์กลางมีขนาดที่เล็กกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน ซึ่งดูได้จากรูปที่ 5.3.14(ก) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดที่ไม่เท่ากันซึ่งอยู่ในช่วง 29.0-104 nm และจากรูป 5.3.14(ข) เป็นภาพถ่าย SEM ภาพตัดขวาง พบว่าความสูงของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดการซ้อนทับกันอยู่ในช่วง 4.17-5.99 μm และที่ปลายของท่อคาร์บอนที่ได้จะสังเกตเห็นจุดสีขาวที่ปรากฏนั้นคือ โลหะคะตะไลต์นิเกิล ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อนทุกเงื่อนไข เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะการเกิดแบบ Tip growth คือ โลหะคะตะไลต์ที่มีการหลอมเหลวจะทำหน้าที่จับอะตอมคาร์บอน คาร์บอนที่โดนดักจับจะแทรกตัวลงไปด้านล่างแล้วสร้างพันธะต่อกัน เมื่อเกิดการสะสมอะตอมของคาร์บอนมากขึ้นจึงสามารถดันโลหะคะตะไลต์ขึ้นมาอยู่ด้านบนของปลายท่อแบบเดียวกันกับการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน

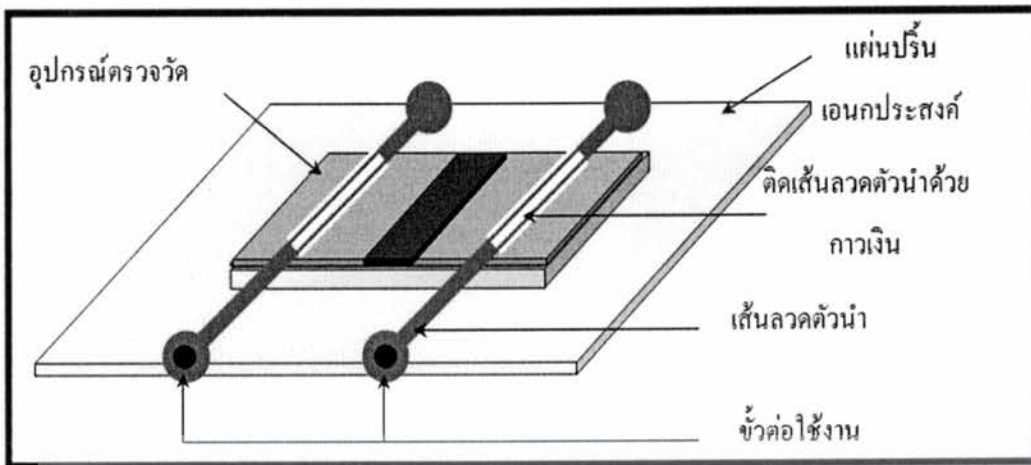
สรุปผลการเปรียบเทียบจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งสองแบบ

ภาพโดยรวมของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งสองแบบผลที่ได้จะมีความแตกต่างกันในลักษณะของท่อคาร์บอน โดยการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อนท่อคาร์บอนที่ได้จะมีการยึดตัวตรงกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน รวมไปถึงการกระจายตัวของท่อคาร์บอนที่มีการกระจายตัวได้สม่ำเสมอ เพราะมีการเกาะกลุ่มหรือการขดตัวเป็นกระจุกที่น้อยกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน ขนาดของท่อคาร์บอนที่ได้โดยภาพรวม ท่อคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อนจะมีขนาดที่โตกว่าแบบขดลวดความร้อน แต่ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งสองแบบนี้จะมีการเกิดท่อคาร์บอนที่เหมือนกันทั้ง 2 แบบคือการเกิดแบบ Tip growth โดยมีโลหะคะตะไลต์เกาะอยู่ตรงส่วนปลายของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้

5.3.2 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปใช้เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์

5.3.2.1 การต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้วัดความต้านทาน

การใช้งานคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์นั้น จะใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเคมีของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อมีการดูดซับแอลกอฮอล์ จึงจำเป็นต้องมีขั้วต่อออกมาใช้งาน 2 ขั้วและควรมีความแข็งแรงพอในการใช้งาน ดังนั้นแผ่นฐานรองที่มีคาร์บอนนาโนทิวบ์จะประกอบติดกับแผ่นปรินเอนกประสงค์เพื่อความแข็งแรงและสะดวกในการใช้งาน ส่วนขั้วใช้งานจะใช้การ Bonding ลวดตัวนำกับขั้วทองแดงด้วยกาวเงิน ดังรูปที่ 5.3.15 และเซนเซอร์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วพร้อมใช้งานจะแสดงในรูปที่ 5.3.16



รูปที่ 5.3.15 แสดงรายละเอียดการต่อขั้วออกไปใช้งาน



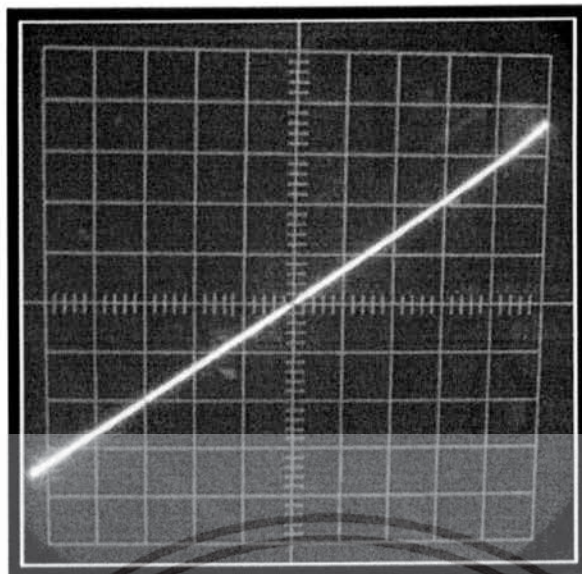
รูปที่ 5.3.16 คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต่อขั้วใช้งานแล้ว

5.3.2.2 ความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ

คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ประกอบเป็นเซนเซอร์เรียบร้อยแล้วจะทำการตรวจวัดความเป็นโอห์มมิกของรอยสัมผัสระหว่างขั้วใช้งานกับฟิล์มคาร์บอนที่เราสังเคราะห์ได้ การใช้งานของเซนเซอร์จะใช้ในลักษณะเดียวกันกับการวัดต้านทานหรือตัว Resistance โดยค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเคมีเมื่อคาร์บอนดูดซับแอลกอฮอล์ ดังนั้นจึงมีจำเป็นความจำเป็นอย่างมากที่จะให้รอยสัมผัสเป็นแบบโอห์มมิกคอนแทกมากกว่าการเป็นแบบเรกติไฟร์เพื่อให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเซนเซอร์ได้สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน

ในการพิจารณาว่ารอยสัมผัสเป็นแบบโอห์มมิกหรือเรกติไฟร์นั้น ผู้จัดทำได้ตรวจวัดรอยสัมผัสของเซนเซอร์ทั้งที่ไม่ได้ต่อขั้วใช้งานและหลังจากที่มีการต่อขั้วเสร็จสมบูรณ์แล้วมาวัดกราฟคุณลักษณะ $I - V$ ด้วยเครื่อง Curve Tracer ผลที่ได้พบว่าเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกทั้งก่อนการต่อขั้วใช้งานและหลังต่อขั้วใช้งาน และผลการวัดเซนเซอร์ทุกๆตัวที่สังเคราะห์ได้เป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกทั้งสิ้น โดยมีความชันหรือความต้านทานแตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานเดิมของคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ และอาจรวมกับค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นหลังจากมีการต่อขั้วใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



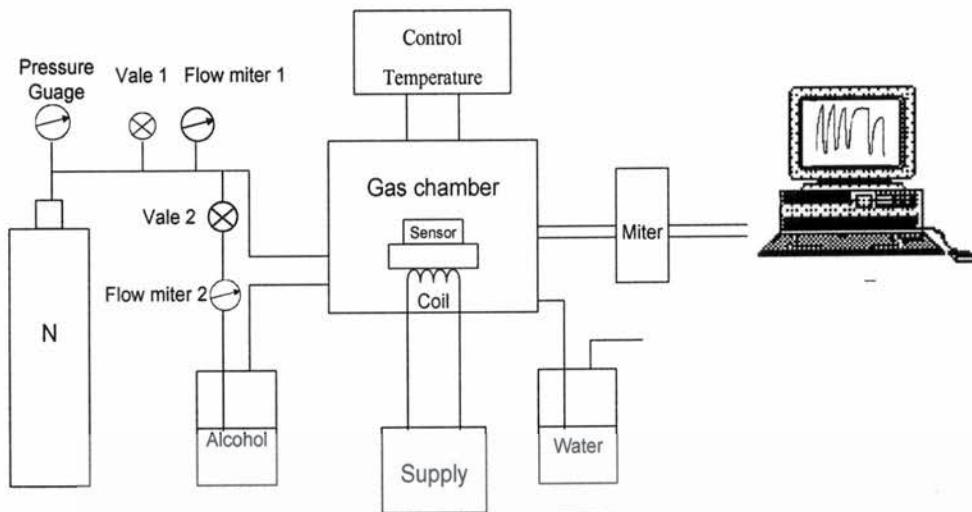
รูปที่ 5.3.17 กราฟคุณลักษณะ I - V เซนเซอร์แอลกอฮอล์ที่ทำการต่อวงจรเรียบร้อยแล้ว

5.3.3 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ของเซนเซอร์จากคาร์บอนนาโนทิวบ์

ระบบการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์แสดงได้ดังรูปที่ 5.3.18 ซึ่งการวัดไอระเหยแอลกอฮอล์จะกระทำในระบบปิดภายในห้องปฏิบัติการหรือ Chamber ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิจากตัวควบคุมอุณหภูมิระหว่าง -5-100 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิห้องปฏิริยานี้จะเป็นอุณหภูมิแวดล้อมในการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ ในห้องปฏิริยาจะมีที่ยึดหัวเซนเซอร์อยู่ภายในสำหรับยึดอุปกรณ์ขณะทำการวัด ส่วนด้านล่างของที่ยึดเซนเซอร์จะมีขดลวดทั้งสแตนเลสสำหรับให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในกรณีที่ต้องการไล่ความชื้นที่ผิวฟิล์มหลังการดูดซับไอแอลกอฮอล์ขณะทำการวัด โดยความร้อนที่ให้อาจจะมีการควบคุมจากค่ากระแสที่ป้อนให้ขดลวดจากแหล่งจ่ายพลังงานภายนอกห้องปฏิริยา

ก่อนทำการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์จะทำการไล่อากาศในห้องปฏิริยาด้วยแก๊สไนโตรเจนผ่านวาล์ว V1 และมิเตอร์ควบคุมการไหลของแก๊ส F1 แก๊สไนโตรเจนจะเข้าแทนที่อากาศในห้องปฏิริยา Chamber ไล่อากาศออกมาภายนอกโดยมีน้ำดักอยู่ โดยน้ำจะทำหน้าที่เป็นวาล์วปิดกั้นอากาศภายนอกไม่ให้เข้าไปภายในและทำหน้าที่เจือจางแก๊สที่เหลือจากห้องปฏิริยาให้ละลายในน้ำก่อนที่จะออกสู่บรรยากาศภายนอก เมื่อต้องการวัดการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ทำการปิดวาล์ว V1 และเปิดวาล์ว V2 ให้แก๊สไนโตรเจนโดยควบคุมปริมาณแก๊สผ่านมิเตอร์ควบคุมการไหลแก๊ส F2 ลงไปยังสารละลายแอลกอฮอล์ ไนโตรเจนจะนำพาไอระเหยแอลกอฮอล์ผ่านฟองแก๊สไนโตรเจนไปยังห้องปฏิริยาหรือ Chamber โดยจะทำสลับกันเป็นวงรอบการวัด ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงถูกแสดงผ่านจอมอนิเตอร์ที่เวลาจริงและบันทึกเก็บไว้เป็นข้อมูลอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

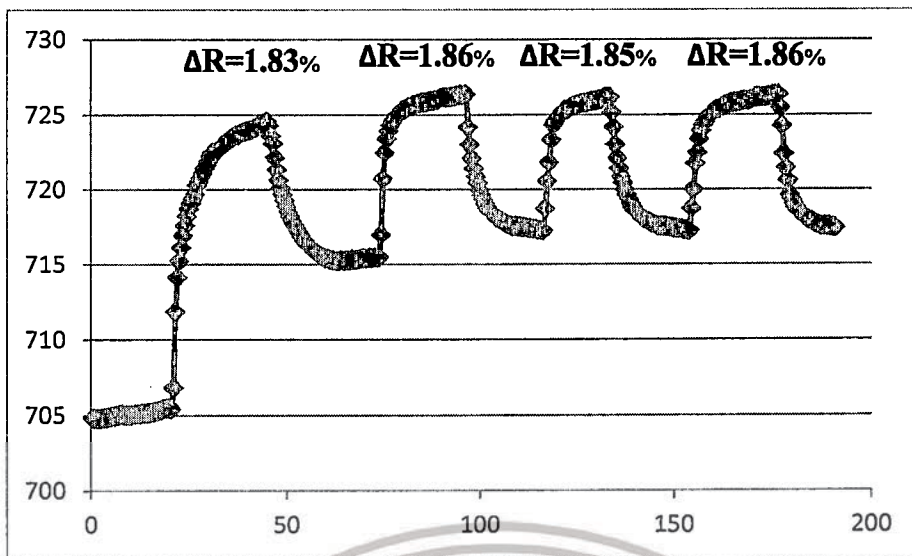


รูปที่ 5.3.18 แสดงแผนภาพระบบการวัดแอลกอฮอล์

5.3.3.1 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition)

จากรูปที่ 5.3.19 เป็นการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล โดยการทดลองใช้เซนเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบเตาความร้อน การตรวจวัดจะกระทำตามหัวข้อที่ 5.3.3 จากรูปที่ 5.3.18 เวลา 0-15 นาที เป็นการไล่อากาศภายในห้องปฏิกิริยาโดยใช้แก๊สเฉื่อยไนโตรเจน เพื่อไล่อากาศภายในออกจากห้องปฏิกิริยา พบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ช่วงเวลา 15-50 นาที เป็นการนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้ามาภายในห้องปฏิกิริยา พบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์มีการดูดซับไอแอลกอฮอล์อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการจ่ายไอแอลกอฮอล์ก่อนที่จะดูดซับได้ช้าลงเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว หลังจากเกิดการอิ่มตัวในนาที่ที่ 50 จึงหยุดจ่ายไปแอลกอฮอล์ โดยมีการใช้แก๊สไนโตรเจนช่วยไล่อัลกอฮอล์พบว่า คาร์บอนที่ดูดซับไอแอลกอฮอล์อยู่นั้นได้ปล่อยไอแอลกอฮอล์ออกมาบางส่วน ค่าความต้านทานจึงไม่กลับมาที่ค่าเริ่มต้น เมื่อทำการทดลองซ้ำในไซเคิลที่ 2-4 พบว่าการทำงานของเซนเซอร์ก็สามารถทำงานได้เช่นเดิมจากการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 1.83 %, 1.86%, 1.85% และ 1.86 % ตามลำดับ

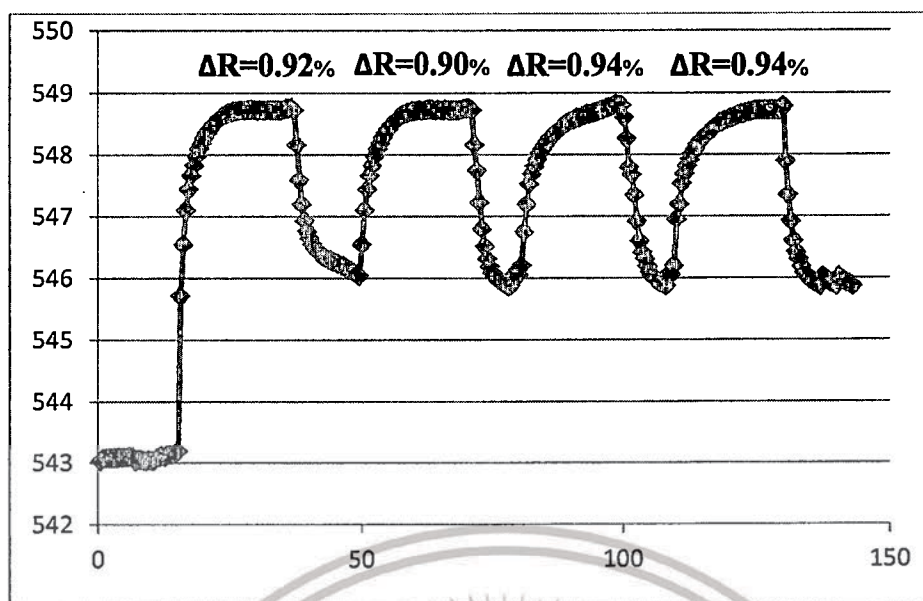
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน

จากรูปที่ 5.3.20 เป็นการทดลองแบบเดียวกับรูปที่ 5.3.19 แต่เป็นการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเมทานอล โดยการทดลองใช้เซนเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน จากรูป ที่เวลา 0-15 นาที เป็นการไล่อากาศภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้แก๊สเฉื่อยไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศภายในออก พบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ช่วงเวลา 15-25 นาที เป็นการนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้ามาภายในห้องปฏิบัติการ พบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีการดูดซับไอแอลกอฮอล์อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการจ่ายไอแอลกอฮอล์ก่อนที่จะดูดซับได้ช้าลงเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว หลังจากเกิดการอิ่มตัวในนาที่ที่ 25 จึงหยุดจ่ายไปแอลกอฮอล์ โดยมีการใช้แก๊สไนโตรเจนช่วยไล่ไอแอลกอฮอล์พบว่า คาร์บอนที่ดูดซับไปแอลกอฮอล์ได้ปล่อยไอแอลกอฮอล์ออกมาบางส่วน ค่าความต้านทานจึงไม่กลับมาที่ค่าเดิม แล้วทำการทดลองซ้ำในไซเคิลที่ 2-4 พบว่าการทำงานของเซนเซอร์ก็สามารถทำงานได้เช่นเดิม ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของ เมทานอล เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้ อยู่ในช่วง 0.92%, 0.90%, 0.94% และ 0.94 % ของการตรวจวัดเมทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

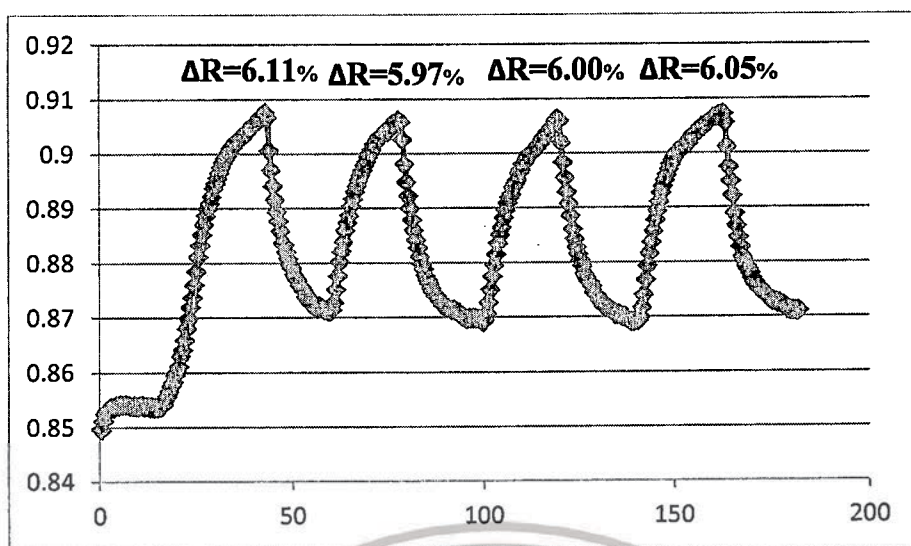


รูปที่ 5.3.20 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน

5.3.3.2 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical Vapor Deposition)

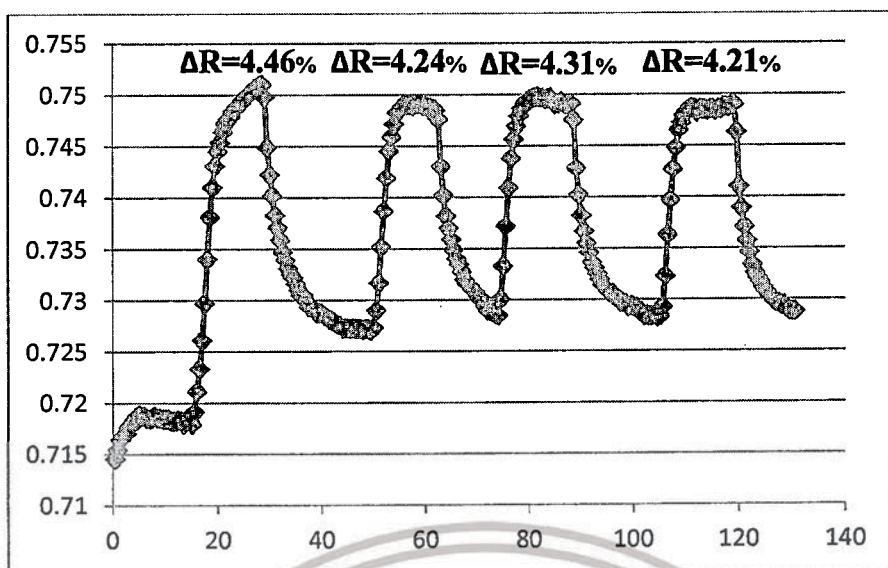
การทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล โดยการทดลองใช้เซนเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อน การตรวจวัดจะกระทำตามหัวข้อที่ 5.3.3 จากรูปที่ 4.19 เวลา 0-15 นาที เป็นการไล่อากาศภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้แก๊สเฉื่อยไนโตรเจน เพื่อไล่อากาศภายในออก พบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ช่วงเวลา 15-40 นาที เป็นการนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้ามาภายในห้องปฏิบัติการ พบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์มีการดูดซับไอแอลกอฮอล์อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการจ่ายไอแอลกอฮอล์ก่อนที่จะดูดซับได้ช้าลงเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว หลังจากเกิดการอิ่มตัวในนาที่ที่ 40 จึงหยุดจ่ายไปแอลกอฮอล์ โดยมีการใช้แก๊สไนโตรเจนช่วยไล่ไอแอลกอฮอล์พบว่า คาร์บอนที่ดูดซับไปแอลกอฮอล์ได้ปล่อยไอแอลกอฮอล์ออกมาบางส่วน ค่าความต้านทานจึงไม่กลับมาที่ค่าเดิม แล้วทำการการทดลองซ้ำในไซเคิลที่ 2-4 พบว่าการทำงานของเซนเซอร์ก็สามารถทำงานได้เช่นเดิม ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของ เอทานอลได้ดีโดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้ อยู่ในช่วง 6.11 % 5.97 % , 6% และ 6.05% ของการตรวจวัดเอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.21 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลมีสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน

ผลทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลจากรูปที่ 5.3.21 โดยการทดลองใช้เซนเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อน การตรวจวัดจะกระทำตามหัวข้อที่ 5.3.3 จากรูปเห็นได้ว่าช่วงของการไล่อากาศออกจะมีการปรับตัวของคาร์บอนเล็กน้อยก่อนเข้าสู่จุดพร้อมใช้งาน เมื่อทำการจ่ายไอแอลกอฮอล์เข้ามา คาร์บอนก็สามารถดูดซับไปของแอลกอฮอล์แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของความต้านทานตามทดลองข้างต้น และเมื่อหยุดจ่ายไปแอลกอฮอล์คาร์บอนที่ทำการดูดซับไปแอลกอฮอล์ ก็จะปล่อยไอแอลกอฮอล์ออกเพื่อกลับไปยังสภาพเดิม แต่การกลับคืนสภาพเดิมนั้นไม่สามารถกลับไปสู่ค่าเดิมได้ เนื่องจากมีการฝังตัวของแอลกอฮอล์บางส่วนในตัวของคาร์บอน ดังเช่นการทดลองที่ผ่านมา และเมื่อทำการทดลองซ้ำในไซเคิลถัดไปคาร์บอนก็สามารถทำงานได้ตามปกติเหมือนการทดลองข้างต้นด้วย ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของเมทานอล เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 4.46% 4.24%, 4.31% และ 4.21% ของการตรวจวัดเมทานอล



รูปที่ 5.3.22 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลมีสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน

จากกราฟที่ได้สามารถอธิบายได้จากสมการไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) เกิดจากการถ่ายประจุจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง เซลล์ไฟฟ้าเคมีอันหนึ่งจึงต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วจึงเกิดเป็นวงจรปิดได้ ประจุที่ถ่ายเทในชั้นตัวอย่างอาจเป็นทั้งอิเล็กตรอนหรือโฮลหรือทั้งสองอย่าง แผนกราฟที่ประกอบกันเป็นผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีลักษณะโค้ง อิเล็กตรอนจึงสามารถเปลี่ยนรูป จากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เป็นการกระจายตัวอย่างไม่สมดุลทั้งด้านในท่อและนอกท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ทรงกระบอก (cylindrical sheet) เมื่อโมเลกุลของแอลกอฮอล์ที่มีการแพร่สู่พื้นผิวคาร์บอนนาโนทิวบ์ ประจุอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากอะตอมคาร์บอนกับโมเลกุลของแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นแรงของแรงวาเลนซ์ อิเล็กตรอนจะถูกจ่ายหรือดึงจากคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นจะขึ้นกับค่าของอิเล็กโตรเนกาติวิตี ถ้าคาร์บอนมีค่ามากกว่าก็จะดึงอิเล็กตรอนให้เองเอียงมาทางด้านคาร์บอน ทำให้มีประจุพาหะ (Carrier) มากขึ้น ทำให้การนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เพิ่มขึ้น แต่ถ้าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีน้อยกว่า อิเล็กตรอนก็就会被ดึงไปทางโมเลกุลของแอลกอฮอล์ทำให้การนำไฟฟ้าต่ำลง ซึ่งทำให้มีค่าความต้านทานมากขึ้น ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีทั่วไปเขียนได้ดังนี้



เมื่อ δ คือ ตัวเลขแสดงจำนวนประจุที่ถูกจ่ายระหว่างเกิดปฏิกิริยา

จากการเปรียบเทียบการทำงานในการตรวจวัดระหว่างการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างแบบเตาความร้อนกับแบบขดลวดความร้อน จะเห็นได้ว่าเซนเซอร์ที่ได้จากการสร้างแบบขดลวดความร้อนนั้น จะมีการดูดซับไอระเหยของแอลกอฮอล์ได้ดีกว่าการสร้างแบบเตาความร้อนเนื่องจากในการสร้างแบบขดลวดความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในการแตกตัวของสารตั้งต้นในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์มีอุณหภูมิที่สูงกว่าการสร้างแบบเตาความร้อนทำให้การแตกตัวของสารตั้งต้นได้สมบูรณ์กว่า และเมื่อคาร์บอนที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

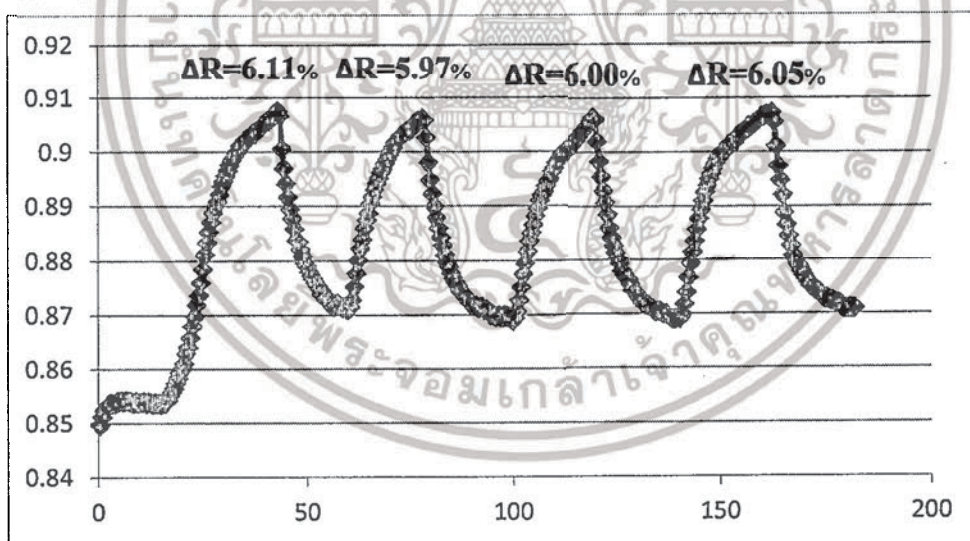
แตกตัวมาเจอกับคะตะไลต์ที่เป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอนในการฟอร์มตัวการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำให้การเกิดท่อคาร์บอนมีเส้นที่ตรงกว่าและมีการจัดระเบียบที่ดีกว่า การสร้างแบบเตาความร้อนดังนั้น การดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์จะทำได้ดีกว่ารวมทั้งการคืนสภาพเดิมเมื่อหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ ด้วย และด้วยเหตุผลนี้จึงนำไปใช้ในการทำลองต่อไป

5.3.3.3 ผลการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆด้วยเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เป็นการทดลองวัดไอระเหยของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆที่มีคุณสมบัติและโครงสร้างภายในที่แตกต่างกันเพื่อจะศึกษาถึงการทำงานของเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นว่าสามารถทำการตรวจวัดแอลกอฮอล์แล้วมีผลทางการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไร ในการทดลองนี้ได้ทำการตรวจวัดไอแอลกอฮอล์ด้วยกัน 8 ชนิด และกระบวนการทดลองจะกระทำตามข้อที่ 5.3.3 โดยการทดลองวัดแอลกอฮอล์แต่ละชนิดจะใช้เซนเซอร์ตัวเดียวกันทั้งการทดลอง

(1) ผลการตรวจจับเอทานอล

ผลจากการทดลองตรวจวัดไอของเอทานอลพบว่าสามารถตรวจวัดไอของเอทานอลผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาบอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของแอลกอฮอล์ได้ทั้งเอทานอลได้ดี โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้ อยู่ในช่วง 6.11 % 5.97 % 6% และ 6.05% ของการตรวจวัดเอทานอล

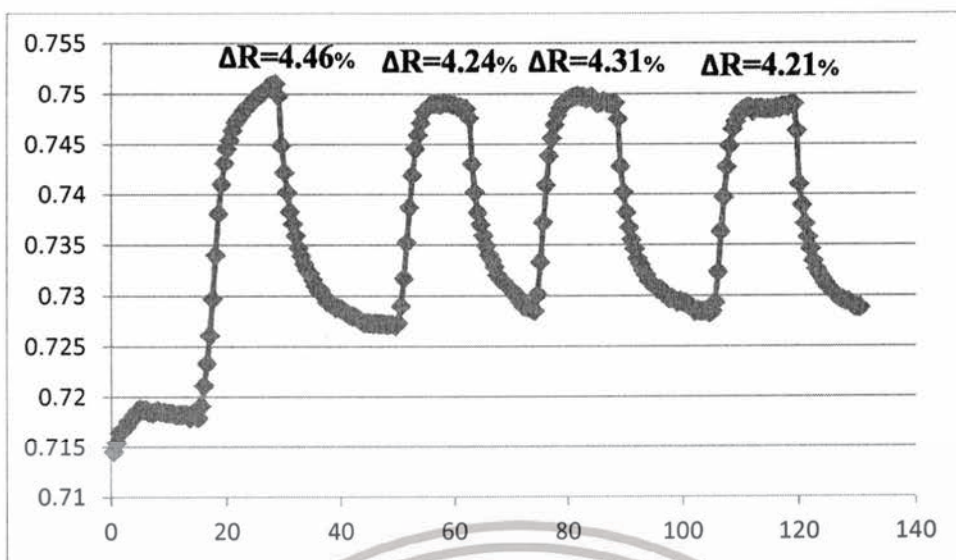


รูปที่ 5.3.23 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

(2) ผลการตรวจจับเมทานอล

ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาบอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของเมทานอล เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 4.46 % 4.24% 4.31% และ 4.21% ของการตรวจวัดเมทานอล

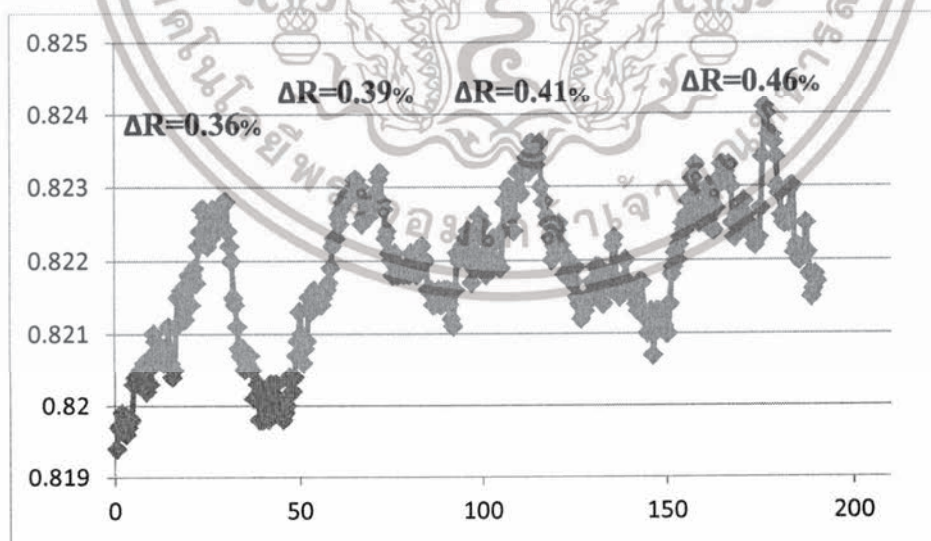
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.24 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

(3) ผลการตรวจจับเอมมิลแอลกอฮอล์

ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของ Amyl alcohol ได้แต่จากรูปจะเห็นได้ว่าการทำงานของคาร์บอนจะไม่มีประสิทธิภาพมากนักเมื่อเทียบกับการวัดเอทานอลหรือเมทานอล แต่กราฟก็ยังคงเป็นรูปของไซเคิลที่มีแนวโน้มว่าสามารถทำงานเป็นเซนเซอร์ได้ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 0.36 % , 0.39% , 0.41% และ 0.46% ของการตรวจวัด

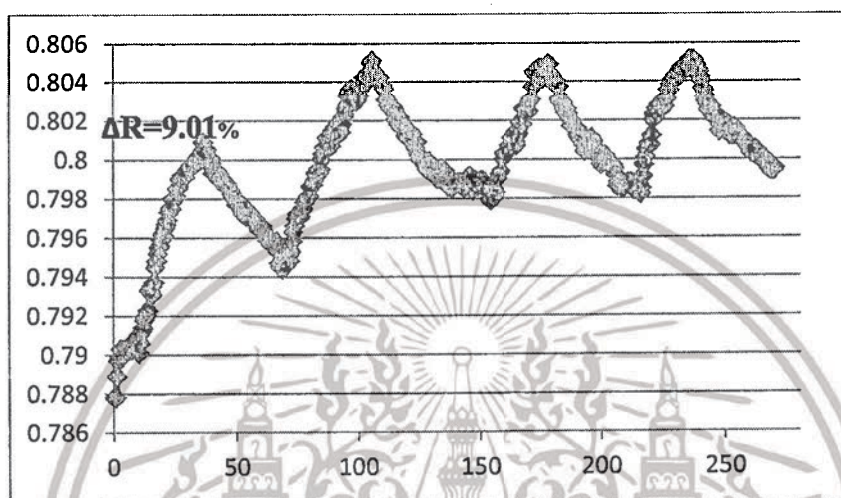


รูปที่ 5.3.25 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) ผลการตรวจจับเบรานอลแอลกอฮอล์

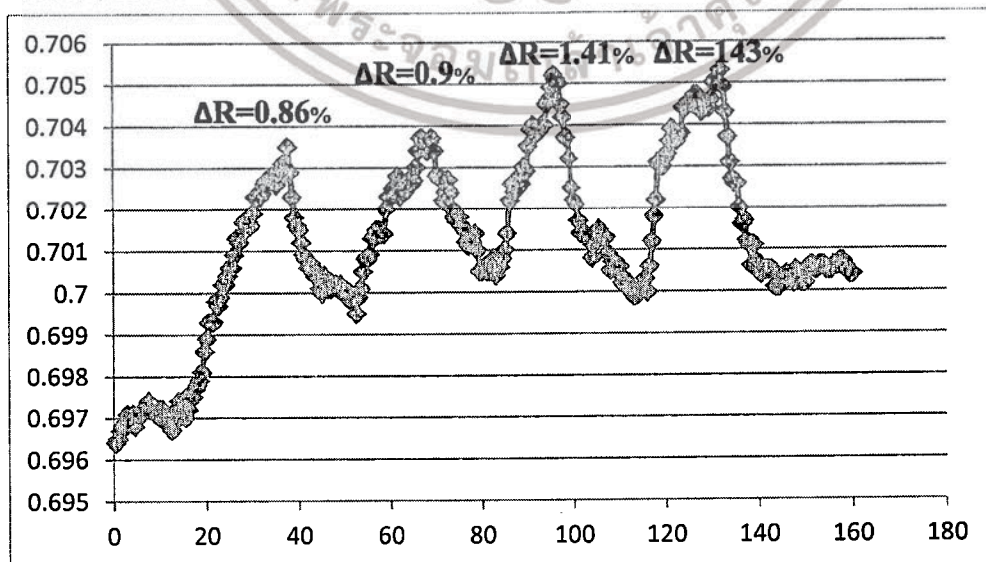
ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของ Bethanal alcohol ลักษณะของกราฟจะคล้ายๆกับเอทานอลและเมทานอล เพราะเป็นแอลกอฮอล์กลุ่มเดียวกันคือ โครงสร้างภายในจะเรียงต่อกันในแบบอนุกรมทำให้คุณสมบัติจึงคล้ายกับเอทานอลและเมทานอล เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 9.01 % , 11.11% , 11.08% และ 11.08% ของการตรวจวัดเมทานอล



รูปที่ 5.3.26 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

(5) ผลการตรวจจับTert-batanal

ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของTert-batanal การทำงานของคาร์บอนก็ยังสามารถทำงานได้ลักษณะของกราฟซ้อนข้างจะไม่เสถียรภาพมากนัก ซึ่งจะมีการฟอตจุดซ้ำของกราฟแต่ก็มีแนวโน้มไปในทางที่ดี เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 0.86 % , 0.9% , 1.41% และ 1.43%

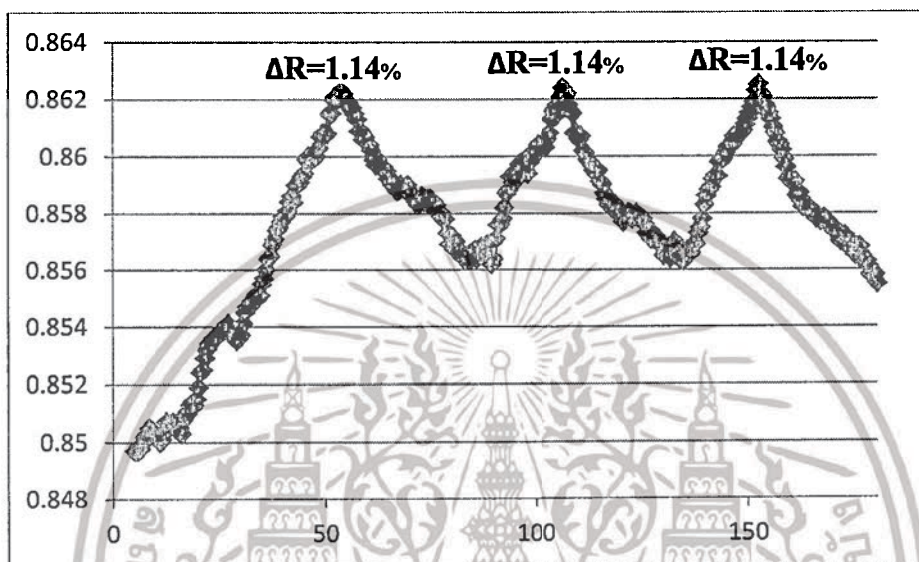


รูปที่ 5.3.27 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นว่าประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6) ผลการตรวจจับSec-betanal

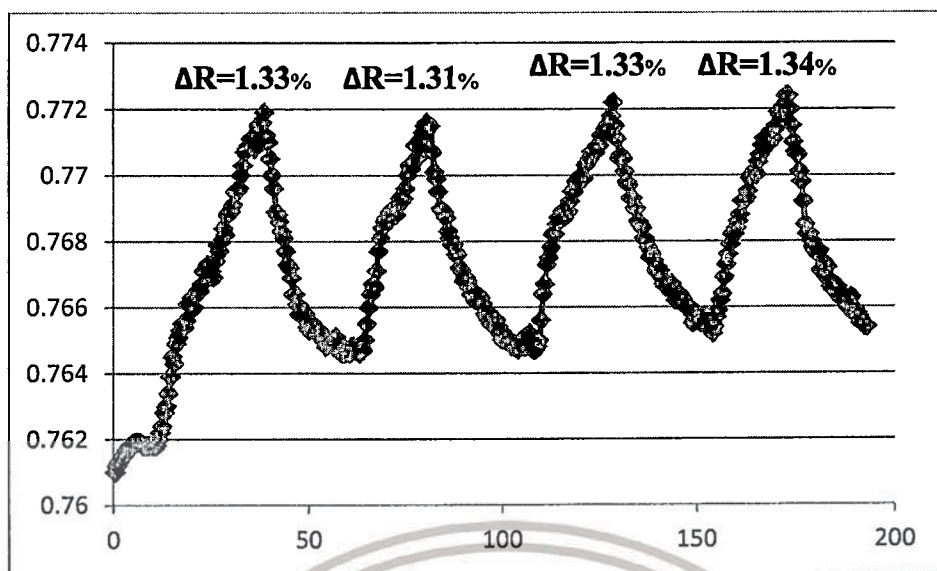
ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาบอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของ Sec-betanal ได้ แต่กลับไม่มีการอ้อมตัวหรืออ้อมตัวซ้ำมาก ในการทดลองจึงหยุดจ่ายไอของ Ses-betanal แล้วดูผลการคืนสภาพเดิมซึ่งคาร์บอนก็สามารถทำงานได้เช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 4.46 % , 4.24% , 4.31% และ 4.21%



รูปที่ 5.3.28 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

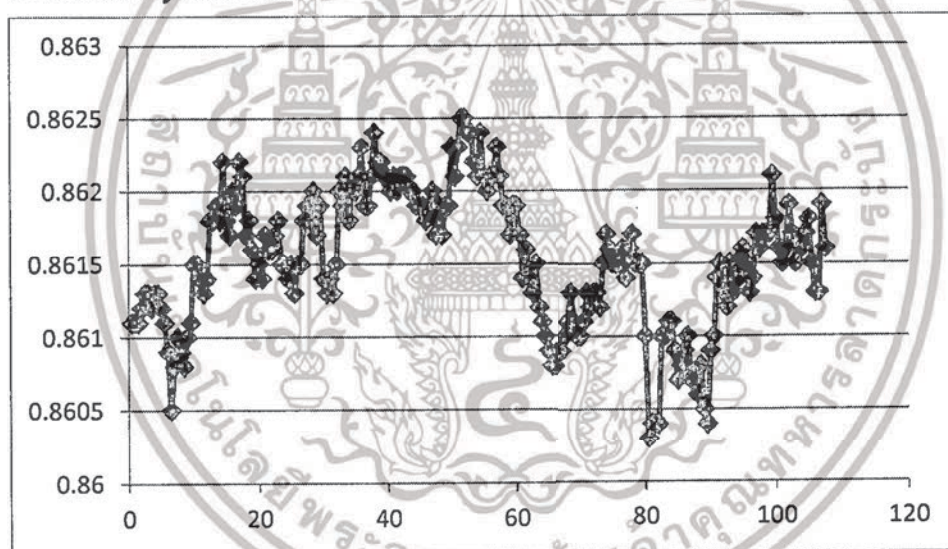
(7) ผลการตรวจจับ2-propanal, iso propyl alcohol

ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาบอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของ 2-propanal, iso propyl alcohol ลักษณะของกราฟจะคล้ายๆกับเอทานอลและเมทานอล เพราะเป็น แอลกอฮอล์กลุ่มเดียวกันคือ โครงสร้างภายในจะเรียงต่อกันในแบบอนุกรมทำให้คุณสมบัติจึงคล้ายกับเอทานอลและเมทานอล เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 1.33 % , 1.31% , 1.33% และ 1.34% ของการตรวจวัดเมทานอล



รูปที่ 5.3.29 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

(8) ผลการตรวจจับ Cyclohexanal



รูปที่ 5.3.30 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

ผลการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นไม่สามารถตรวจวัดไอระเหยของ Cyclohexanal เหมือนกับการทดลองข้างต้น จากกราฟคาร์บอนจะมีการจับและปล่อยไอของ Cyclohexanal อย่างรวดเร็วทำให้ลักษณะของกราฟไม่เป็นไซเคิลตามที่ต้องการ

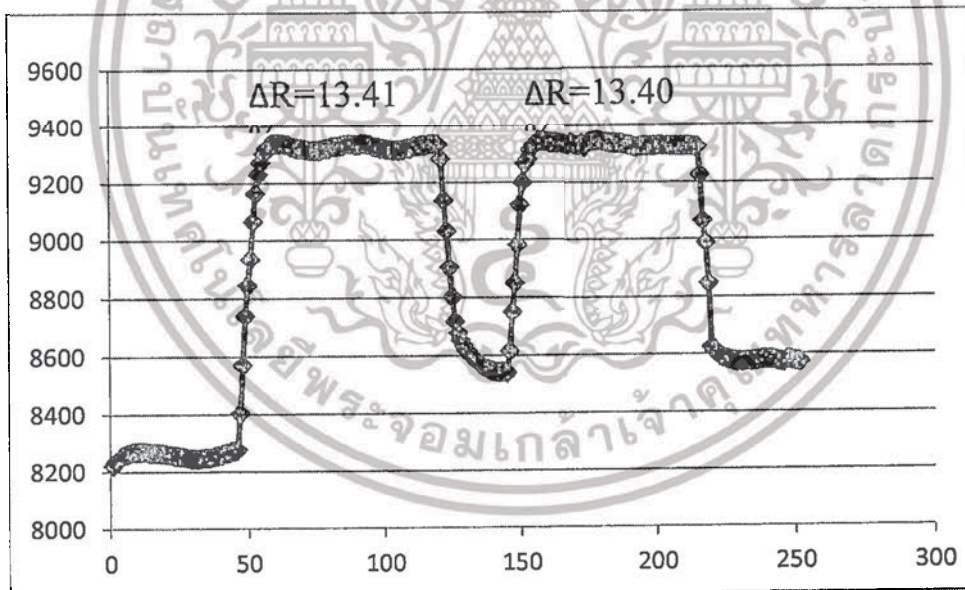
ผลจากการทดลองการวัดไอระเหยของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆพบว่า เซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถตรวจจับไอระเหยได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่ได้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างหรือพันธะของแอลกอฮอล์ตัวนั้นๆ โครงสร้างที่ง่ายเช่น methyl alcohol, ethyl alcohol, n-propyl alcohol สามารถที่จะแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ง่ายเพราะเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน เหมือนกับ sec-butanol alcohol, tert-butanol alcohol, Bethanol alcohol, Amyl alcohol ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าการแลกเปลี่ยนจึงเอกลสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดได้ยากกว่า ส่วน cyclohexanal alcohol, โครงสร้างจะต่างไปจากทุกตัว โครงสร้างจะอยู่ในรูปวงแหวนและมีความเสถียรภาพในตัวเองสูงมาก คาร์บอนนาโนทิวบ์จึงไม่สามารถตรวจจับได้หรือตรวจจับได้น้อยมากซึ่งดูได้จากรูปที่ 5.3.30

5.3.3.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์

5.3.3.4.1 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้อง 25°C

การทดลองเริ่มจากปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber เพื่อไล่อากาศประมาณ 50 นาที จะสังเกตเห็นว่าช่วงนี้ค่าความต้านทานมีค่าคงที่ ค่าความต้านทานนี้จะป็นค่าความต้านทานเริ่มต้นของการทดลอง R_{MIN} หลังจากนั้นจะเริ่มรอบการวัดโดยปล่อยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber จะสังเกตค่าความต้านทานจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นและอิมิตัวที่ค่า R_{MAX} จากนั้นก็จะหยุดจ่ายไอระเหยของแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาเพื่อไล่อากาศในห้องปฏิบัติการออกไป ซึ่งค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะลดลงเข้าสู่ R_{MIN} อีกครั้งเรียกว่าหนึ่งรอบการวัด และจะเริ่มการวัดในรอบต่อไปในลักษณะเดิม ผลจากการทดลองตรวจวัดเมื่อเซนเซอร์อิมิตัวได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็น 13.41% และ 13.40%



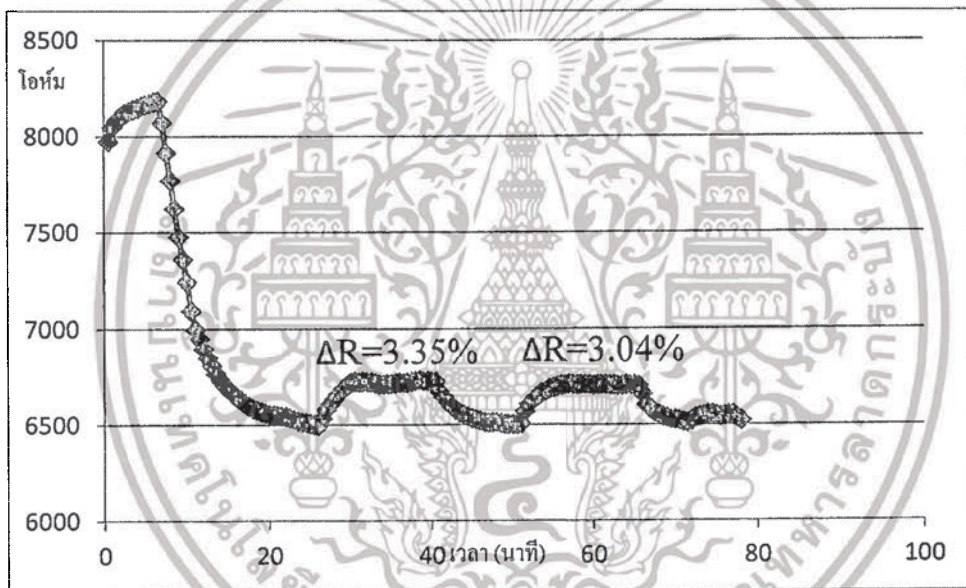
รูปที่ 5.3.31 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 25°C

5.3.3.4.2 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 85°C

การทดลองเริ่มจากปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber เพื่อไล่อากาศประมาณ 10 นาที จะสังเกตเห็นว่าช่วงนี้ค่าความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่ค่าอิมิตัวค่าหนึ่ง หลังจากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 85 °C ค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเริ่มลดลงซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นคุณสมบัติของสารประเภทสารกึ่งตัวนำที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งจะตรงข้ามกับโลหะแสดงว่าฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้แสดงคุณสมบัติไปทางสารกึ่งตัวนำมากกว่าโลหะ ค่าความต้านทานจะลดลงและเริ่มอ้อมตัวซึ่งเราจะให้ค่าต่ำสุดเริ่มต้นเป็น R_{MIN} หลังจากนั้นจะเริ่มรอบการวัดโดยปล่อยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber จะสังเกตค่าความต้านทานจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นและอ้อมตัวที่ค่า R_{MAX} จากนั้นก็จะหยุดจ่ายไอระเหยของแอลกอฮอล์และปล่อยให้ไนโตรเจนเข้ามาเพื่อไล่อากาศในห้องปฏิบัติการออกไป ซึ่งค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะลดลงเข้าสู่ R_{MIN} อีกครั้งเรียกว่าหนึ่งรอบการวัด และจะเริ่มการวัดในรอบต่อไปในลักษณะเดิม

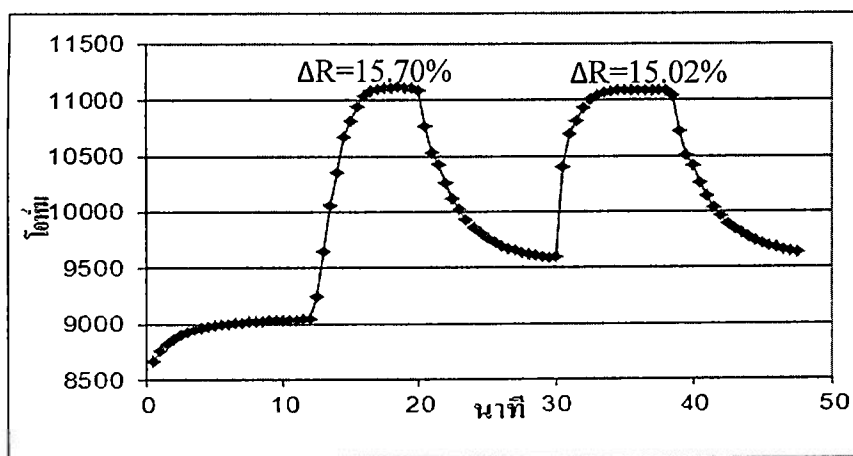
ผลจากการทดลองแสดงค่าความต้านทานของคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อไอระเหยแอลกอฮอล์กับเวลาจากการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 3.35% และ 3.04% ในรอบการวัดที่หนึ่งและสองตามลำดับ ค่าของ R_{MIN} ที่ได้จากการทดลองก็กลับมาค่าเดิม



รูปที่ 5.3.32 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 85°C

5.3.3.4.3 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ -5 °C

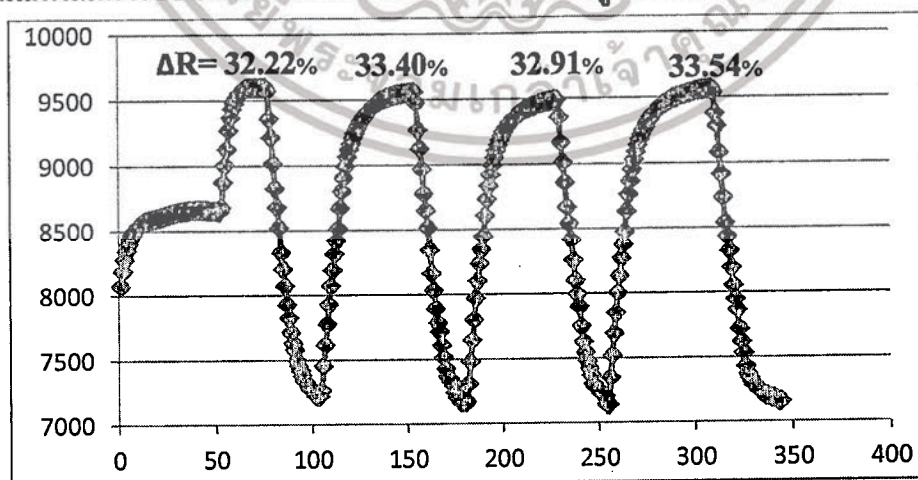
ทำการทดลองในทำนองเดียวกับหัวข้อ 5.3.4.2 โดยเปลี่ยนค่าอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber เป็น -5°C ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.3.33 ในช่วงประมาณ 12 นาทีแรกเป็นช่วงที่ให้แก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ -5 °C หลังจากนั้นเริ่มรอบการวัดโดยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไป ค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีค่ามากขึ้นเข้าสู่ค่าอ้อมตัวการสูงสุด R_{MAX} ต่อไปหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์และปล่อยให้ไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ ช่วงนี้ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าอ้อมตัว ให้ค่าต่ำสุดของรอบการวัดนี้เป็น R_{MIN} และทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3.33 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวกับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ -5°C

เริ่มวัดรอบการวัดต่อไปอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 15.70 % และ 15.02 % ในรอบการวัดที่หนึ่งและที่สองตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 5.3.1 พบว่าที่อุณหภูมิแวดล้อมต่ำ (-5°C) แอลกอฮอล์ถูกดูดซับได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง (85°C) สังเกตจากค่า $\Delta R\%$ เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของคาร์บอน เมื่อตัวของคาร์บอนมีอุณหภูมิที่ต่ำ คาร์บอนจะสามารถดูดซับไอระเหยของแอลกอฮอล์ได้ดีกว่าตอนที่ตัวของคาร์บอนมีอุณหภูมิที่สูง ดังนั้นเมื่อคาร์บอนสามารถดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ได้ดีหรือมากกว่า การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานจึงมีมากกว่าการทดลองที่อุณหภูมิสูง

5.3.3.4.4 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ 25°C และมีการให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืนสภาพหลังการดูดซับแอลกอฮอล์



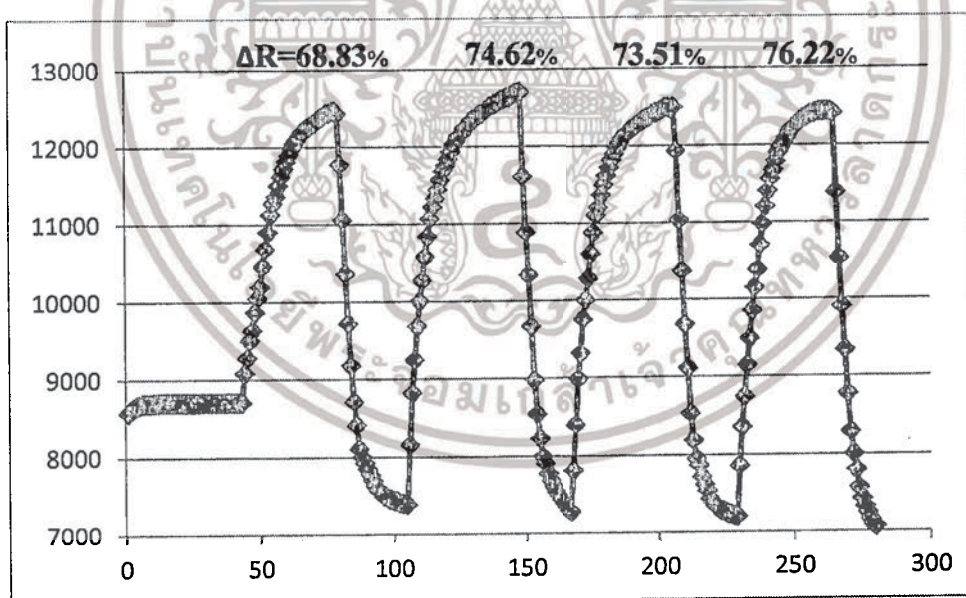
รูปที่ 4.34 ผลการตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวกับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber 25°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืนสภาพความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองตอนนี้จะทำการทดลองคล้ายกับตอนที่ 5.3.4.2 และ 5.3.4.3 แต่ให้อุณหภูมิห้อง ปฏิกริยา Chamber อยู่ที่อุณหภูมิห้อง 25 °C และเพิ่มขั้นตอนการให้ความร้อนแก่เซนเซอร์เฉพาะใน ครึ่งหลังของรอบการวัดในขณะที่หยุดการให้ไอระเหยแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้อง ปฏิกริยา การให้ความร้อนถูกควบคุมจากหลอดความร้อนด้านล่างที่ยึดเซนเซอร์ในห้องปฏิกริยาโดยให้ แหล่งจ่ายพลังงานภายนอกแก่หลอด ในการทดลองนี้ความร้อนที่ให้มีค่าอุณหภูมิประมาณ 85 °C ผล การทดลองที่ได้แสดงได้ในรูปที่ 5.3.34

จากผลการทดลองเมื่อคาร์บอนมีการดูดซับไอแอลกอฮอล์ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่า ความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 32.22% 33.40 %, 32.91 % และ 33.54 % ในรอบการวัดหนึ่งถึงสี่ ตามลำดับ จะเห็นว่าการให้ความร้อนช่วยไล่ความชื้นในช่วงการคืนสภาพจะทำให้คาร์บอนสามารถมี พื้นที่ในการดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ได้มากขึ้นและส่งผลให้ค่าความไวของอุปกรณ์(Sensitivity) ใน การทดลองมีค่าสูงขึ้นด้วย และจากการทดลองเมื่อใช้ความร้อนช่วยไล่ความชื้นในการคืนสภาพให้หมด ไปแล้วยังทำให้คาร์บอนสามารถดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ได้มากขึ้นด้วย

5.3.3.4.5 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิกริยา -5°C และมีการให้ ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืนสภาพหลังการดูดซับแอลกอฮอล์



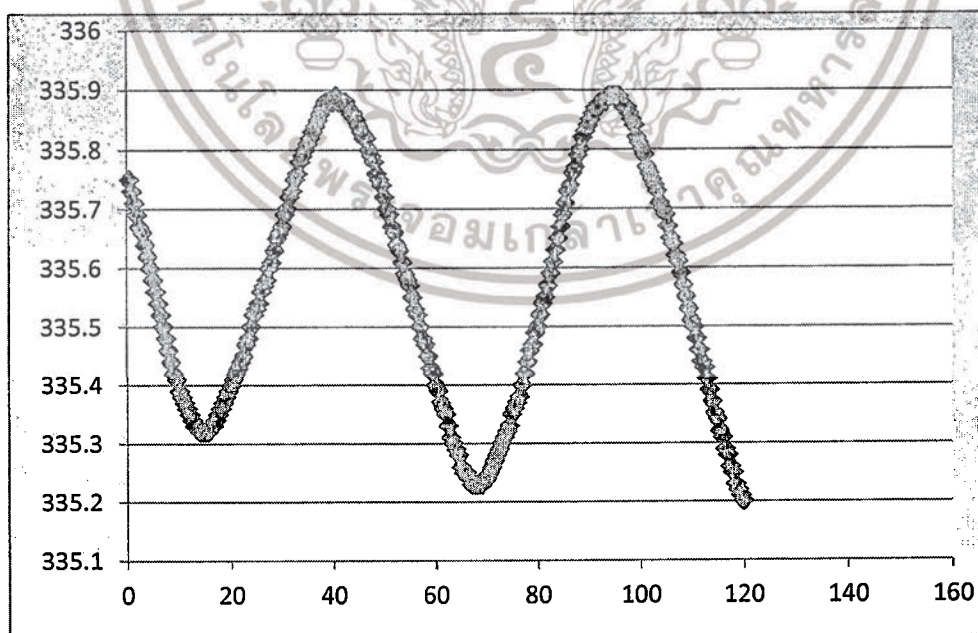
รูปที่ 5.3.35 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิกริยา Chamber -5°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืน สภาพความต้านทาน

การทดลองตอนนี้จะมีการทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 5.3.4.2 และ 5.3.4.3 คือให้อุณหภูมิ แวดล้อมห้องปฏิกริยาเป็น -5°C และให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่อุณหภูมิ 85°C เฉพาะใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครึ่งหลังของรอบการวัดในขณะที่หยุดการให้ไอระเหยแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ ความเย็นจะช่วยให้การดูดซับแอลกอฮอล์ดีขึ้นและความร้อนจากหลอดความร้อนที่ให้กับเซนเซอร์จะช่วยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ถูกดูดซับระเหยออกได้มากขึ้นเพื่อช่วยในการคืนสภาพได้เร็วขึ้นและทำให้ผลต่างระหว่าง R_{MAX} และ R_{MIN} มีค่าเพิ่มมากขึ้น ผลการทดลองจากรูปที่ 5.3.35 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่าเท่ากับ 68.83%, 74.62 %, 73.51 % และ 76.22% ของรอบการวัดที่หนึ่งถึงสี่ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเย็นจะช่วยให้คาร์บอนสามารถดูดซับไอแอลกอฮอล์ได้ดีขึ้น และความร้อนที่ใช้จะช่วยให้ไอแอลกอฮอล์ที่ติดอยู่กับคาร์บอนหลุดไปเมื่อต้องการการวัดซ้ำ เมื่อนำความร้อนและความเย็นมาประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมจะทำให้การทำงานของเซนเซอร์คาร์บอนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

5.3.4 ผลการตอบสนองกับสารประกอบแอลกอฮอล์เปียร์สด

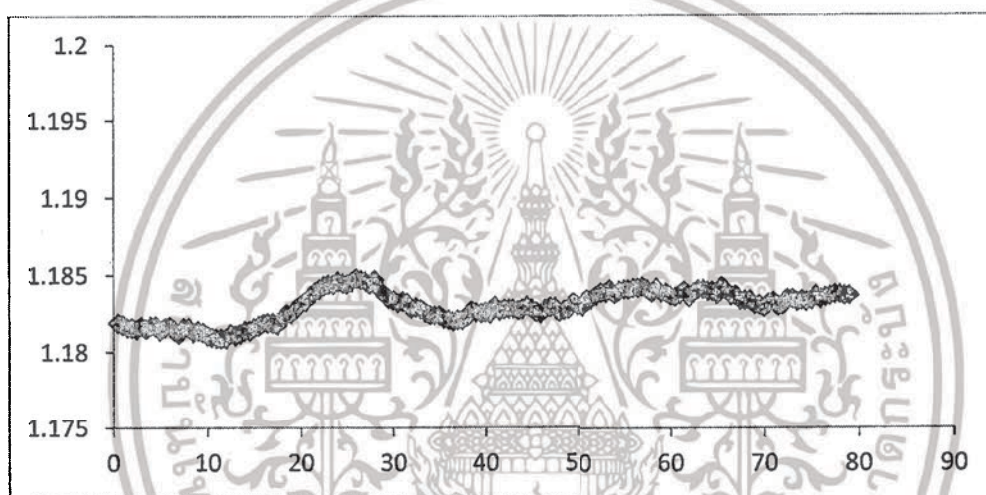
ในตอนนี้จะนำหัวเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ไปทดสอบกับเปียร์สดในท้องตลาด โดยใช้ระบบการวัดและขั้นตอนการวัดเกี่ยวกับการวัดสารแอลกอฮอล์ในตอนก่อนหน้านี้นี้ ผลตอบสนองที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3.36 จากรูปเป็นค่าความต้านทานที่ได้รับไอระเหยแอลกอฮอล์ของเปียร์สด ปรากฏว่าค่าความต้านทานไม่มีการตอบสนองหรือแปรค่าตามค่าไอระเหยของสารละลายไม่ว่าในช่วงการวัดที่มีไอระเหยแอลกอฮอล์และในช่วงแก๊สไนโตรเจน ค่าสัญญาณที่แกว่งขึ้นลงไปมาเป็นสัญญาณรบกวนที่ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณไอระเหยแอลกอฮอล์แต่อย่างใด ซึ่งแตกต่างจากการวัดสารละลายตระกูลแอลกอฮอล์ข้างต้น



รูปที่ 5.3.36 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์กับเปียร์สดในท้องตลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าน้ำในเบียร์มีมีผลต่อการตอบสนองของค่าความต้านทานที่ผิวของคาร์บอนนาโนหรือไม่ เราทำการทดลองกับสารเอทิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำเป็นส่วนผสม ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.3.37 จากกราฟค่าความต้านทานไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับปริมาณไอระเหยแอลกอฮอล์ ซึ่งมีความแตกต่างกันมากกับการวัดเอทิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์แสดงให้เห็นว่าความชื้นจากน้ำมีผลต่อการตอบสนองค่าความต้านทานฟิล์มบางคาร์บอนนาโนทิวป์เป็นอย่างมาก และจากผลการทดลองที่ได้ทำให้ไม่สามารถที่จะนำเอาหัวเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ไปใช้งานกับหัวเซนเซอร์อื่นในห้องตลาดได้ ทำให้เป็นข้อจำกัดอย่างยิ่งที่จะนำหัววัดคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้กับสารละลายแอลกอฮอล์ที่มีน้ำเป็นส่วนผสม



รูปที่ 5.3.37 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์กับเอทิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำเป็นส่วนผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปการวิจัย

จากที่ได้ทำการสร้างหัวเซนเซอร์ที่อนาโนคาร์บอน การพัฒนาระบบจุ่มกอลลีเล็ททรอนิกส์ และการทดสอบในการแยกแยะเปปรีด์สในท้องตลาดจำนวนสามชนิดสามารถสรุปได้ดังนี้

ในส่วนของหัววัดเซนเซอร์ที่ทำการสร้างขึ้นเองมีอยู่ด้วยกันสองวิธี คือวิธีลดความร้อนที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวนำพาไอระเหยแหล่งจ่ายแอลกอฮอล์และวิธีที่ใช้เตาความร้อนที่ใช้ไนโตรเจนเป็นตัวนำพาไอระเหยแหล่งจ่ายแอลกอฮอล์ ซึ่งทั้งสองวิธีสามารถที่สร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ได้เป็นอย่างดี วิธีแบบลดความร้อนสะดวกในการทำความร้อนที่เร็วกระบวนการสร้างสั้น วิธีเตาความร้อนใช้เวลาและการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าแต่เหมาะที่จะสร้างปริมาณมาก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาทำการตรวจจับสารระเหยตระกูลแอลกอฮอล์กลับมีความแตกต่างกันมาก เช่นเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ใช้ไฮโดรเจนในระบบลดความร้อนให้การตอบสนองต่อไอระเหยแอลกอฮอล์ได้ดีโดยมีค่าความต้านทานของฟิล์มมีค่ามากขึ้น ส่วนฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ใช้ไนโตรเจนเป็นตัวนำพาไอระเหยแอลกอฮอล์ในระบบเตาความร้อนจะตอบสนองต่อการตรวจจับสารประเภทแอลกอฮอล์ได้ไม่ดีเท่ากับแบบแรก ดังนั้นแก๊สในกระบวนการสร้างมีความสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างเซนเซอร์และมีผลต่อการตรวจจับแอลกอฮอล์ เราสามารถเพิ่มค่าความไวของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเซนเซอร์ได้จากอุณหภูมิของตัวเซนเซอร์ลดอุณหภูมิแวดล้อม ตัวอุณหภูมิเซนเซอร์ที่มากกว่าอุณหภูมิห้องจะช่วยไล่ความชื้นที่ฟิล์มบางทำให้สามารถตรวจจับได้ดีขึ้น ส่วนอุณหภูมิแวดล้อมที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องจะทำให้การดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ของฟิล์มดีขึ้นทำให้ค่าความไวตรวจจับดีขึ้นอย่างมากซึ่งมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับเซนเซอร์ในท้องตลาดที่มักจะมีตัวให้ความร้อนกับฟิล์มเพื่อการตรวจจับที่ดีขึ้น ในขั้นตอนสุดท้ายทำการทดสอบกับเปปรีด์สในท้องตลาด ปรากฏว่าเซนเซอร์ไม่สามารถตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์จากเปปรีด์สได้ และเมื่อทดสอบกับสารแอลกอฮอล์ที่มีน้ำเป็นส่วนผสมแม้เพียงเล็กน้อย เซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ไม่สามารถตรวจจับแอลกอฮอล์ได้เช่นกัน ดังนั้นความชื้นจากน้ำมีผลอย่างสูงในการตรวจจับแอลกอฮอล์ แต่เซนเซอร์ในท้องตลาดประเภทออกไซด์ของโลหะปรากฏว่ายังสามารถตอบสนองได้ ดังนั้นเป็นข้อจำกัดในการใช้งานของเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ จึงยังไม่สามารถนำไปใช้งานร่วมกับเซนเซอร์ในท้องตลาดในที่นี้

ในส่วนของระบบจุ่มกอลลีเล็ททรอนิกส์ใช้เซนเซอร์แก๊สประเภทออกไซด์ของโลหะในท้องตลาดร่วมกัน เจ็ดตัวเป็นกลุ่มในรูปแบบแอเรย์ซึ่งเซนเซอร์ที่นำมาใช้จะต้องมีคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อสารประเภทแอลกอฮอล์ ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการประมวลผลแบบการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทำการทดสอบการแยกแยะเบียร์สดในท้องตลาดสามชนิดที่แตกต่างกันในองค์ประกอบ ผลจากการทดสอบระบบจุ่มอิเล็กทรอนิกส์สามารถที่จะแยกแยะเบียร์สดได้อย่างถูกต้องและชัดเจน ซึ่งสามารถที่จะนำไปประยุกต์กับสารไอระเหยแอลกอฮอล์อื่นๆได้ หรือนำไปประยุกต์ในรูปแบบควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตได้เช่นกัน ส่วนในการที่จะนำเอาเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์มาใช้งานร่วมกับระบบจุ่มอิเล็กทรอนิกส์ยังไม่สามารถทำได้ในขณะนี้ เพราะว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถตอบสนองแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ได้แต่ไม่สามารถตอบสนองสารละลายแอลกอฮอล์ที่มีน้ำเป็นส่วนผสมได้ซึ่งแตกต่างกับเซนเซอร์แบบออกไซด์ของโลหะ

ปัญหาอุปสรรคในการทำวิจัยอีกอย่างได้แก่ ในตอนปลายปีงบประมาณได้มีปัญหาอุทกภัยครั้งใหญ่ของประเทศ มีผลกระทบวงกว้างทำให้การวิจัยต้องสะดุดหยุดลงในช่วงดังกล่าว จึงทำให้มีการล่าช้าเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหลังจากเหตุการณ์ดังกล่าวก็สามารถดำเนินการวิจัยต่อจนลุล่วง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติในการสนับสนุนการวิจัยนี้จนลุล่วง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1]. พิศิษฐ์ สิงห์ใจ. “ท่อนาโนคาร์บอนเทคโนโลยีแห่งศตวรรษที่ 21” Industrial Technology Review (เมษายน 2543): 98-100ข
- [2]. W.S.M. Bride, “Synthesis of Carbon Nanotubes by Chemical Vapour Deposition (CVD)”, Williamsburg, Virginia (April 2001)
- [3]. “Nanotubes basics” [Online]. Available http://ipewww.epf.ch/gr_buttet/Manips/Nanotubes (17 August 2005)
- [4]. “The Role of Natural Graphite in Electronics Cooling” [Online]. Available http://www.electronics-cooling.com/html/2001_august_techbrief.html (10 July 2005).
- [5]. “WHAT’S ALL THE FUSS ABOUT DIAMONDS?” [Online] Available http://www.gemnation.com/base?processor=getPage&pageName=fuss_about_diamonds (15 October 2005)
- [6]. Sumio Iijima, “Helical microtubules of graphitic carbon”, Nature, 354: 56-58, (1991).
- [7]. M. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P. Eklund, R. Saito, “Carbon Nanotubes”, Physics World: 33-38, (1999)
- [8]. “Carbon nanotube” [Online]. Available <http://www.nanotech-now.com/nanotube-buckyball-sites.htm> (14 October 2005)
- [9]. Z.F. Ren, Z.P. Huang, J.H. Wang, M.P. Siegal, P.N. Provencio, Science 282(1998) 1105
- [10]. 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).
- [11]. C.N. Rao, B.C. Satishkumar, A. Govindaraj, Manashi Nath, “Nanotubes”, CHEM.PHYS.CHEM, 2: 78-105, (2001).
- [12]. C.N. Rao, B.C. Satishkumar, A. Govindaraj, Manashi Nath, “Nanotubes”, CHEM.PHYS.CHEM, 2: 78-105, (2001)
- [13]. 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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14]. ท่อนาโนคาร์บอน - วิกิพีเดีย th.wikipedia.org/wiki/ท่อนาโนคาร์บอน
- [15]. C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapell, S. Lefrant, Nature 388 (1997) 756
- [16]. “Carbon Nanotube Bumps for Thermal and Electric Conduction in Transistor” Taisuke Iwai, Yuji Awano (Manuscript received April 9, 2007)
- [17]. P.M. Ajayan, “Application of Carbon Nanotubes”, Applied Physics, 80: 391-425, (2001)
- [18]. Exploring Carbon Nanotube Bundle Global Interconnects for Chip Multiprocessor Applications Sudeep Pasricha, Nikil Dutt, Fadi J. Kurdahit (2009 22nd International Conference on VLSI Design)
- [19]. “Applications of Carbon Nanotubes” Pulickel M. Ajayan, Otto Z. Zhou P400
- [20]. “A prototype five-inch carbon nanotube” [Online]. Available <http://www.npl.co.uk/annualreview/2001/page09-seeing-the-future-part1.html> (24 May 2004).
- [21]. “Carbon Nanotubes” [Online]. Available <http://www.ipt.arc.nasa.gov/carbonnano.html> (19 August 2005)
- [22]. “CNT: Center for Nanotechnology” [Online]. Available <http://www.ipt.arc.nasa.gov/nanopencil.html> (4 December 2005).
- [23]. A. Badzian, T. Badzian, E. Breval, A. Piotrowski, Thin Solid Film 398 (2001) 170
- [24]. I. Sayago, E. Lafuente, M.C. Horrillo, W.K. Maser, A.M. Benito, R. Navaro, E.P. Urriolabeitia, M.T. Martinez, Gutierrez, Synthetic Metal 148 (2005) 15
- [25]. J. Suehiro, G. Hiroshi, W. Ding, M. Hara, Sens. Actuators B (2004)
- [26]. “ผลิตภัณฑ์นาโนเทคโนโลยี” [Online] [Available http://www.nanotec.or.th/nanotec/index.php?leftmenu=nanotechnology&index=product](http://www.nanotec.or.th/nanotec/index.php?leftmenu=nanotechnology&index=product) (4 January 2006).
- [27]. ชลินทร์ สุทธิเนตร, อัสสุชล แสงนวล, ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “เซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอน สำหรับจุ่มอิเล็กโทรนิคส์เพื่อการตรวจสอบเบียร์สด” การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาครั้งที่ 13, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2555.
- [28] Paisan Doungjak, Electronic nose. Center of Complex Systems, School of Science, Walailak University & Center of Nanoscience and Nanotechnology, Faculty of Science, Mahidol University. (Online) Available : <http://nanotech.sc.mahidol.ac.th> (20 March 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้