

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประจำปี 2553

เรื่อง
แอลกอฮอล์เซนเซอร์ที่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีตกตะกอนไอเคมี
ด้วยความร้อน
CNT Alcohol Sensor by Thermal Chemical Vapor Deposition

โดย

รศ. ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

RCH

TK

4871. 15

F5

๐๗๗๗๐

เลขหมู่..... 114474

เลขทะเบียน..... 20 ส.ค. 2554

วัน,เดือน,ปี.....

๑๘๘๑๗๕๔

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์และการประยุกต์เป็นตัวตรวจจับแอลกอฮอล์ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทำด้วยวิธีวิธีการตกตะกอนไอระเหยทางเคมี (CVD) โดยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีนี้สามารถสังเคราะห์ได้พื้นที่ฟิล์มที่มีขนาดใหญ่ และสังเคราะห์ได้หลายชิ้นงานในเวลาเดียวกัน ทำให้สะดวกในการไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ แหล่งจ่ายใช้แอลกอฮอล์และแก๊สไนโตรเจนทำให้ไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดีจากการตรวจสอบด้วย SEM ซึ่งยืนยันได้ว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ทำการศึกษการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์และผลของอุณหภูมิแวดล้อมที่มีต่อการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ และผลการให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการไล่ไอระเหยแอลกอฮอล์หลังการตรวจจับแอลกอฮอล์เพื่อการประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์เคมี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (ในการทดลองนี้คือ -5°C) ช่วยทำให้การตรวจจับแอลกอฮอล์ดีขึ้นมากกว่าที่อุณหภูมิที่สูงกว่า (85°C) โดยคิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 15.70 % ขณะที่อุณหภูมิที่มากกว่า (85°C) มีค่า 3.35 % นอกจากนี้การใช้ความร้อนช่วยไล่ความชื้นที่ฟิล์มยังช่วยให้การกลับคืนค่าความต้านทานทำได้เร็วและทำให้ได้ค่าความต้านทานมีค่าต่ำลงมีผลทำให้เมื่อนำไปตรวจจับแอลกอฮอล์ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีค่าสูงขึ้น จากการทดลองที่อุณหภูมิแวดล้อม -5°C และไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 85°C ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน 76.22 % และเวลาการตอบสนองเร็วกว่าที่อุณหภูมิห้อง

Abstract

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

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

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่
ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ นายอสุชล
แสงนวล และนายชลินทร์ สุทธิเนตร ที่มีส่วนช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณนางสาว
ศรีอรอนงค์ แสงจันทร์ นายสมคะเน คำพล และนายรัฐพงษ์ นาคาไชย ในการช่วยเหลือด้านต่างๆ

ขอขอบคุณทุกท่านมา ณ.ที่นี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญรูป | VII |
| สารบัญตาราง | XII |
| บทที่ 1 นาโนเทคโนโลยี คาร์บอนนาโนทิวส์และเครื่องมือวิเคราะห์ | 1 |
| 1.1 นาโนเทคโนโลยี | 1 |
| 1.1.1 กำเนิดของนาโนเทคโนโลยี | 2 |
| 1.1.2 ประโยชน์ของนาโนเทคโนโลยี | 2 |
| 1.1.3 นาโนเทคโนโลยีในประเทศไทย | 3 |
| 1.2 วัสดุการ์บอน | 4 |
| 1.2.1 คุณลักษณะของวัสดุการ์บอน | 4 |
| 1.2.2 โครงสร้างของคาร์บอน | 4 |
| 1.3 คาร์บอนนาโนทิวส์ | 6 |
| 1.3.1 การค้นพบคาร์บอนนาโนทิวส์ | 6 |
| 1.3.2 โครงสร้างและลักษณะการม้วนตัวของคาร์บอนนาโนทิวส์ | 7 |
| 1.3.3 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวส์ | 8 |
| 1.3.4 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวส์ | 11 |
| 1.3.5 การนำคาร์บอนนาโนทิวส์ไปใช้งาน | 12 |
| 1.4 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์ | 14 |
| 1.4.1 วิธี อาร์คด้วยไฟฟ้า (Arc Discharge) | 14 |
| 1.4.2 วิธี Laser Ablation | 16 |
| 1.4.3 วิธีการปลูกด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition (CVD)) | 17 |
| 1.5 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวส์ | 22 |
| 1.5.1 Root Growth | 22 |
| 1.5.2 Tip Growth | 23 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | |
|---|----|
| 1.6 เครื่องมือวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ | 25 |
| 1.6.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) | 25 |
| 1.6.2 การวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบ Energy Dispersive X-ray (EDX) | 29 |
| 1.6.3 การวิเคราะห์คุณภาพของธาตุด้วยเทคนิค Raman spectroscopy | 31 |
| 1.7 หลักการพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับเซนเซอร์เคมี | 35 |
| 1.8 แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor) | 37 |
| 1.8.1 ชรรวมชาติของแก๊สและคุณสมบัติทั่วไป | 37 |
| 1.8.2 โมเลกุลและไอออน (Molecules and Ions) | 37 |
| 1.8.3 กฎการรั่วไหลและการแพร่กระจายของแกรแฮม | 38 |
| 1.8.4 แก๊สที่มีความสำคัญต่อมนุษย์ | 38 |
| 1.8.5 หลักการตรวจวัดแก๊สแบบต่างๆ | 41 |
| บทที่ 2 วิธีการและเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างฐานรอง | 61 |
| 2.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน | 62 |
| 2.2 การสร้างชั้นฉนวนด้วยวิธีออกซิเดชัน (Oxidation) | 62 |
| 2.3 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และทำขั้วไฟฟ้าโดยการสปีดเตอริง | 63 |
| 2.4 การสร้างลวดลายโดยใช้หน้ากากป้องกัน | 65 |
| บทที่ 3 กระบวนการสร้างฐานรองและผลการสร้างฐานรอง | 68 |
| 3.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน | 68 |
| 3.2 การสร้างชั้นฉนวนหรือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยการออกซิเดชัน | 68 |
| 3.3 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีสปีดเตอริง | 70 |
| 3.4 การทำขั้วไฟฟ้าทองแดงโดยการสปีดเตอริง | 71 |
| บทที่ 4 การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์และผลการสังเคราะห์ | 78 |
| 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ | 78 |
| 4.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย CVD แบบความร้อน | 84 |
| 4.3 ผลการทดลอง | 85 |
| บทที่ 5 การทดลองนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์เป็นเซนเซอร์เคมีและผลการทดลอง | 88 |
| 5.1 การต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้วัดความต้านทาน | 89 |
| 5.2 การทดลองตรวจวัดแก๊ส | 90 |

สารบัญ (ต่อ)

| | |
|---|-----|
| 5.2.1 การนำไปทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล | 91 |
| 5.2.2 การนำไปทดลองตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (ทดลองเบื้องต้น) | 94 |
| 5.3 ผลการทดลองการตรวจวัดแก๊ส | 96 |
| 5.3.1 ผลการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่อุณหภูมิห้อง | 96 |
| 5.3.2 ผลการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลโดยการให้ความร้อน | 114 |
| ในระบบ | |
| 5.3.3 ผลการตอบสนองของตัวตรวจวัดจากการ เพิ่ม ลดอัตราการไหล | 118 |
| 5.4 ชนิดรอยสัมผัสและความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวกับกับโลหะ | 122 |
| 5.5 การนำอุปกรณ์ตรวจวัดมาประกอบเป็นวงจรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ | 124 |
| บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง | 126 |
| บรรณานุกรม | 127 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 อัณรูปของคาร์บอน (Amorphous carbon) | 4 |
| 1.2 โครงสร้างแบบกราไฟต์ (Graphite) | 5 |
| 1.3 โครงสร้างแบบเพชร (Diamond) | 5 |
| 1.4 โครงสร้างแบบบัคมิสเตอร์ฟูลเลอร์เร็น (Buckminster Fullerene) | 6 |
| 1.5 ซุมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) ชาวญี่ปุ่นผู้ค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 7 |
| 1.6 แสดงการม้วนตัวแบบต่าง | 8 |
| 1.7 แสดงมุมการม้วนตัวแบบต่างๆ | 9 |
| 1.8 คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังเดี่ยว (Single - walled Carbon Nanotube (SWNT)) | 10 |
| 1.9 คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบหลายผนัง (Multi - walled Carbon Nanotube (MWNT)) | 10 |
| 1.10 แสดงการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นช่องทางเดินกระแสในทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า | 13 |
| 1.11 แสดงการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์เคมี | 14 |
| 1.12 วิธี Arc Discharge | 15 |
| 1.13 วิธี Laser Ablation | 16 |
| 1.14 วิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) | 17 |
| 1.15 วิธี Thermal Chemical Vapor Deposition | 18 |
| 1.16 วิธี Vapor Phase Growth | 19 |
| 1.17 วิธี Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PE - CVD) | 19 |
| 1.18 วิธี High Pressure CO Disproportionate Process | 20 |
| 1.19 วิธี Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF - CVD) | 22 |
| 1.20 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบ Root Grow | 23 |
| 1.21 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบ Tip Growth | 24 |
| 1.22 ใคอะแกรมการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) | 26 |
| 1.23 ภาพถ่าย SEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 29 |
| 1.24 ใคอะแกรมการทำงานของเครื่อง ระบบ Energy Dispersive X - Ray (EDX) | 30 |
| 1.25 ภาพจาก EDX ขององค์ประกอบธาตุต่างๆ | 31 |
| 1.26 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่อง Raman Spectrometer | 32 |
| 1.27 ระดับพลังงานของ Rayleigh scattering, Stokes Raman Scattering และ anti Stokes Scattering | 33 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | |
|---|----|
| 1.28 กราฟรามานที่ได้จากการ์บอนนาโนทิวบ์ | 34 |
| 1.29 แสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบนระนาบแผ่นกราฟีนที่ผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 35 |
| 1.30 แสดงโมเดลการยึดเกาะโมเลกุลของแก๊สจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT | 35 |
| 1.31 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวโมเลกุลของแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว | 36 |
| 1.32 หลักการวัดค่าออกซิเจนที่ถูกละลายแบบเซลล์ของคลาร์ค | 42 |
| 1.33 หลักการวัดค่าออกซิเจนแบบเวอร์โคเนีย | 43 |
| 1.34 แสดงตัวอย่างของส่วนประกอบภายในหัวของเซนเซอร์แก๊ส | 45 |
| 1.35 ตัวอย่างของหัวเซนเซอร์วัดค่าออกซิเจน | 45 |
| 1.36 หลักการวัดออกซิเจนแบบลูกตุ้มแกว่ง | 46 |
| 1.37 แสดงหลักการวัดแก๊สแบบใช้รังสีอินฟราเรด | 52 |
| 1.38 เซนเซอร์แก๊ส | 53 |
| 1.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ในการส่งผ่านแก๊สต่อความยาวคลื่นที่ได้จากสเปกตรัมแก๊สบางอย่าง | 54 |
| 1.40 ตัวเซนเซอร์แบบฟิล์มหนา | 55 |
| 1.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการเปลี่ยนค่าความต้านทานของเซนเซอร์แก๊สแบบฟิล์มหนาต่อความเข้มข้นของแก๊สที่ปริมาณต่างๆ | 56 |
| 1.42 ตัวอย่างของวงจรตรวจจับการรั่วของแก๊ส LP | 58 |
| 1.43 การวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟ | 59 |
| 1.44 การแยกส่วนประกอบของแก๊สในกระบวนการโครมาโตแกรม | 60 |
| 2.1 โฟลว์ชาร์ทการสร้างฐานรอง | 61 |
| 2.2 แผ่นซิลิคอนขนาด 2.5 ซม. x 2.5 ซม. | 62 |
| 2.3 หลังจากการออกซิเดชัน ได้ชั้นออกไซด์หนาประมาณ 5000 อังสตรอม | 63 |
| 2.4 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิกเกิล) | 63 |
| 2.5 แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE - 210 ไดโอดสปีดเตอร์ | 64 |
| 2.6 รูปแบบของฐานรองที่เสร็จสมบูรณ์ รูป ก โครงสร้าง 1 รูป ข โครงสร้าง 2 | 65 |
| 2.7 การสร้างลวดลายด้วยวิธีหน้ากากป้องกัน | 66 |
| 2.8 ภาพถ่ายด้วย SME แสดงฐานรองบริเวณที่เคลือบด้วยนิกเกิลโดยวิธีหน้ากากป้องกัน | 67 |

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| | |
|---|----|
| 2.9 ภาพถ่ายจาก SME ของคาร์บอนนาโนทิวป์ตรงบริเวณขอบเขตของลวดลายวงกลม | 67 |
| 3.1 แผ่นซิลิคอนขนาด 2.5 x 2.5 ซม. หลังการทำความสะอาด | 68 |
| 3.2 แผ่นซิลิคอนก่อนและหลังการออกซิเดชัน | 69 |
| 3.3 เครื่องออกซิเดชันด้วยความร้อน | 70 |
| 3.4 ฐานรองก่อนและหลังเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล) แบบกลุ่มก้อน | 71 |
| 3.5 ภาพขยายหน้าฉากที่ใช้ในการสปีดเตอร์รี่ไฟฟ้า | 72 |
| 3.6 ภาพหน้าฉากที่ใช้ในการสปีดเตอร์รี่ไฟฟ้าโครงสร้างที่ 1 | 72 |
| 3.7 ภาพหน้าฉากที่ใช้ในการสปีดเตอร์รี่ไฟฟ้าโครงสร้างที่ 2 | 73 |
| 3.8 ฐานรองก่อนและหลังการสปีดเตอร์รี่รี่ไฟฟ้าโครงสร้างที่ 1 | 73 |
| 3.9 ฐานรองก่อนและหลังการสปีดเตอร์รี่รี่ไฟฟ้าโครงสร้างที่ 2 | 74 |
| 3.10 ภาพถ่ายของฐานรองที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว | 74 |
| 3.11 เครื่อง SPE - 210 ไดโอดสปีดเตอร์รี่ | 75 |
| 4.1 โครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโซน | 79 |
| 4.2 วงจรเตาความร้อนแบบสามโซน | 80 |
| 4.3 ภาพถ่ายเตาความร้อนที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์ | 82 |
| 4.4 อุณหภูมิของเตาความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อควอตซ์ | 83 |
| 4.5 แผนภาพเครื่อง CVD แบบความร้อน | 85 |
| 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด | 86 |
| 4.7 ภาพถ่ายอุปกรณ์เซนเซอร์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างเสร็จแล้ว | 87 |
| 5.1 รายละเอียดการต่อขั้วออกไปใช้งาน | 88 |
| 5.2 ระบบที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊ส | 91 |
| 5.3 การไล่อากาศออกจากครอบแก้ว | 92 |
| 5.4 เปิดวาล์ว 2 เพื่อให้ไอระเหยของเอทานอล | 92 |
| 5.5 การไล่อากาศออกจากครอบแก้ว | 93 |
| 5.6 เปิดวาล์ว 2 เพื่อให้ไอระเหยของเอทานอล | 94 |
| 5.7 การไล่อากาศออกจากครอบแก้ว | 95 |
| 5.8 เปิดวาล์ว 2 เพื่อให้แก๊สไฮโดรเจน | 95 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| | | |
|------|--|-----|
| 5.35 | กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดโอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 16 | 116 |
| 5.36 | กราฟแสดงคุณลักษณะของเซนเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ | 118 |
| 5.37 | กราฟแสดงคุณลักษณะของแก๊สเซนเซอร์ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อความเข้มข้นของแก๊ส | 119 |
| 5.38 | กราฟคุณลักษณะของแก๊สเซนเซอร์ แสดงผลของอุณหภูมิ | 119 |
| 5.39 | แสดงผลการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ต่อการเพิ่มอัตราการใช้ไฟ | 120 |
| 5.40 | แสดงผลผลการทดลองวัดในกระบวนการวัดที่เหมาะสม | 121 |
| 5.41 | แสดงผลผลการทดลองวัดในกระบวนการวัดที่เหมาะสม (2) | 122 |
| 5.42 | กราฟคุณลักษณะ I – V ของตัวตรวจวัดแก๊ส | 124 |
| 5.43 | วงจรแก๊สเซนเซอร์แสดงผลด้วยไดโอดเปล่งแสง | 125 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 แสดงคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิว์ชนิดผนังเดี่ยว เปรียบเทียบกับวัสดุอื่น | 11 |
| 1.2 แสดงค่า Resolution สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ | 25 |
| 1.3 เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของแก๊สหลายๆชนิดในอากาศที่สะอาดและแห้ง | 37 |
| 1.4 การแยกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (The Electromagnte Spectrum) | 49 |
| 1.5 ความยาวคลื่นต่ำสุดที่สามารถใช้ได้สำหรับสารละลายทั่วไป | 51 |
| 1.6 สภาพะการทำงานของตัวเซนเซอร์แก๊สแบบฟิล์มหนาของไซเมเร็ก | 54 |
| 1.7 ตัวอย่างของคุณลักษณะจำเพาะของตัวเซนเซอร์แก๊สรุ่นต่างๆ ของยี่ห้อ HEIMANN | 57 |
| 3.1 แสดงค่าความต้านทานของฐานรอง | 76 |
| 5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานก่อนการสังเคราะห์ หลังการสังเคราะห์และหลังการต่อขั้ว | 89 |
| 5.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีไม่มีการอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ก่อนการตรวจวัด | 99 |
| 5.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ก่อนการตรวจวัดด้วยอุณหภูมิ 50 องศา 25 นาที | 103 |
| 5.4 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ก่อนการตรวจวัดด้วยอุณหภูมิ 70 องศา 25 นาที | 106 |
| 5.5 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ก่อนการตรวจวัดด้วยอุณหภูมิ 85 องศา 25 นาที | 109 |
| 5.6 แสดงการเปรียบเทียบแต่ละแผ่นตัวอย่าง | 110 |
| 5.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคุณสมบัติต่างๆ ของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ | 113 |
| 5.8 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีให้ความร้อนในระบบวัด | 116 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

นาโนเทคโนโลยี และคาร์บอนนาโนทิวป์

1.1 นาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยีเป็นวิทยาการสมัยใหม่ที่มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว เกิดจากการบรรจบรวมของศาสตร์หลายสาขา เช่น อิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยาและวัสดุศาสตร์ แต่เป็นภาคที่เกี่ยวข้องในระดับนาโนเมตร ในช่วง 0.1-100 นาโนเมตร

การสร้างสรรคงานในระดับนาโนเมตรนั้น ต้องอาศัยความรู้และจินตนาการที่ลึกซึ้ง เพราะต้องนึกคิดถึงโครงสร้างของวัสดุในขนาดจิ๋ว หรือ จุลวิญญ นั่นคือ ต้องรู้จักอะตอม โมเลกุลและโครงสร้างของสสารต่างๆ เป็นอย่างดี และเครื่องมือที่ใช้ต้องมีความแม่นยำสูงมาก ๆ จึงจะตรวจผลงานนาโนเทคโนโลยีได้

“นาโน”เป็นภาษากรีกโบราณแปลว่า “คนแคระ” นาโนมักใช้ประกอบในหน่วยมาตรวัดต่างๆ โดยมีขนาดเท่ากับ พันล้านส่วน (สิบยกกำลังลบเก้า) เช่น 1 นาโนเมตร มีปริมาณเท่ากับ 1 ใน พันล้านส่วนของเมตร ดังนั้น นาโนเทคโนโลยีจึงหมายถึง เทคโนโลยีที่มีขนาดเล็กมาก ในระดับเป็นพันล้านส่วน ซึ่งอยู่ในระดับของอะตอมของสสารต่างๆ

นักวิทยาศาสตร์ทราบกันมานานแล้วว่า ถ่าน ถ่านหิน ใต้อินสอดำและเพชร นั้นมีองค์ประกอบอย่างเดียวกัน คือ คาร์บอน แต่มีความแตกต่างกันที่โครงสร้าง ที่ทำให้เพชรเป็นสสารที่แข็งที่สุด ขณะที่กราไฟต์ หรือใต้อินสอมีความอ่อน การจัดโครงสร้างของสสารที่ไม่เหมือนกันทำให้ชิปของคอมพิวเตอร์(Computer chip) แตกต่างจากทรายชายหาด ทั้งๆที่เป็นซิลิคอนธาตุเดียวกันและแม้แต่ในธรรมชาติ เซลล์มะเร็งกับเซลล์อวัยวะปกติ ก็มีโครงสร้างของเซลล์เหมือนกัน ต่างกันแต่เฉพาะการจัดเรียงอะตอมบางส่วนเท่านั้น

จากฐานความคิดดังกล่าวข้างต้น ทำให้นักวิทยาศาสตร์ หันมามองโมเลกุล หรืออนุภาคในขนาดใหญ่กว่าธาตุ อาจมองเห็นได้ว่า น้ำมันเบนซิน หรือน้ำมันดีเซล ก็เป็นสารกลุ่ม “ไฮโดรคาร์บอน”เช่นกัน จึงเป็นเหตุให้มีการคิดค้นเพิ่มเติม ทำให้มีการผลิตแก๊สโซฮอลและไบโอดีเซลขึ้นได้

ดีเอ็นเอ (DNA) ที่เป็นรหัสพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต ก็จัดเป็น โมเลกุลขนาดใหญ่ แต่อยู่ในระดับนาโน เป็นตัวบ่งชี้ถึงความมหัศจรรย์ของธรรมชาติ เพราะจากเซลล์เล็กๆของมนุษย์นั้นมีความแตกต่างกันไปทุกรูปนามและทำให้เกิดแนวทาง ผลิตสายพันธุ์สิ่งมีชีวิตใหม่ ที่คิดเฉพาะส่วนที่ดีไว้ที่เรียกว่าการตัดต่อยีน (GMD)

องค์ความรู้ที่ประมวลมาเป็น “นาโนเทคโนโลยี” มิใช่เกิดมาชั่วข้ามคืนแต่สร้างสม ประสพการณ์จากวิทยาการเดิม ในสาขาวิชาต่างๆ และนำมาทบทวนเป็นระบบ โดยเน้นเฉพาะเรื่อง ที่เกี่ยวกับมิติระดับนาโนเมตร ดังนั้นวิทยาการนาโนเทคโนโลยีจึงเป็นเวทีที่เปิดกว้างสำหรับ นักวิทยาศาสตร์และผู้ทำงานในแวดวงเทคโนโลยีสาขาต่างๆ สร้างนวัตกรรมใหม่ในระดับนาโนได้

1.1.1 กำเนิดของนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี เกิดขึ้นที่ห้องแล็บของซีร็อกซ์ ที่ชื่อว่า PARC (Xerox's Palo Alto Research Center) ซึ่งเป็นแหล่งต้นกำเนิด ของเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าด้านต่างๆ ของโลกในปัจจุบัน โมเสค (Mosaic) ซึ่งต่อมากลายเป็น เนทสเคป (Netscape) ก็เป็นตัวอย่างหนึ่ง โดยย้อนกลับไปเมื่อปี พ.ศ. 2519 นาย Ralphe Merkle กับบัณฑิตจากสแตนฟอร์ดจำนวนหนึ่งพัฒนาเทคโนโลยีเข้ารหัสใน คอมพิวเตอร์ ที่ต่อมาชื่อ พริตตี้กู๊ด ไพรวาซี (Pretty Good Privacy) ขึ้น ขณะเดียวกันก็ใช้เวลาว่าง จำลองสิ่งต่างๆ ในระดับโมเลกุลขึ้นมาโดยคิดว่าอุตสาหกรรมควรสร้างสิ่งต่างๆ มาจากระดับ โมเลกุล เพื่อให้ได้สิ่งที่ถูกต้องสมบูรณ์ อาทิ เครื่องมือผ่าตัดในปัจจุบันมีขนาดใหญ่เกินไป ถ้าเรา สามารถสร้างเครื่องมือที่มีขนาดเท่าโมเลกุล สามารถตัดสินใจเองได้ ด้วยคอมพิวเตอร์ระดับ โมเลกุลจะทำให้เราคิดเข้าไปในร่างกาย เพื่อรักษาโรคมะเร็ง ฆ่าแบคทีเรีย ไวรัสหรือกำจัดไขมัน อุดตันในเส้นเลือดได้แต่ความจริงความคิดนี้ได้ ถูกเผยแพร่มาตั้งแต่ปี พ.ศ.2502 แล้วโดย นักวิทยาศาสตร์ ชื่อ Richard P. Feynman แต่ใช้คำว่า Minimanufacturing ยิ่งกว่านั้น ในปี พ.ศ.2532 สถาบันโฟร์ไซท์ (Foresight Institute) ได้ตัดสินใจมุ่งเน้นวิจัยนาโนเทคโนโลยีอย่างจริงจังซึ่งสร้าง ความสงสัยและได้รับคำเยาะเย้ยจากผู้ที่ยังมองภาพไม่ออกพอสมควร แต่ทันทีที่เปิดสัมมนาขึ้น กลับมีนักวิทยาศาสตร์จากทั่วโลก เข้าร่วมกว่า 300 คน และในปี พ.ศ.2534 มีการค้นพบคาร์บอนนา โนทิวป์ ซึ่งคาดว่าจะสามารถนำมาทำอุปกรณ์ต่างๆ ได้ในอนาคตอันใกล้นี้ ทำให้นาโนเทคโนโลยี ได้รับความสนใจจากบุคคลทั่วไป และสื่อต่างๆ มากขึ้น

1.1.2 ประโยชน์ของนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีจากในหลากหลายสาขารวมเข้าด้วยกัน ซึ่ง สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในงานทางวัสดุศาสตร์ (nanomaterials) อิเล็กทรอนิกส์ (nanoelectronics) และวิทยาศาสตร์ชีวภาพ (nanobiotechnology) ก่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่ ได้รับการออกแบบและควบคุมตั้งแต่การจัดเรียง อะตอมหรือโมเลกุล ไปจนกลายเป็นชิ้นส่วน ขนาดใหญ่ ตัวอย่างหนึ่งของ nanomaterial ซึ่งปัจจุบันกำลังเป็นที่สนใจคือ "คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotube)" มีรูปร่างเป็นโครงตาข่ายของคาร์บอน ม้วนเชื่อมติดกันเป็นรูปทรงกระบอก ไม่ว่างกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงไม่กี่นาโนเมตร สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสายไฟจิ๋วในเครื่องใช้ไฟฟ้า (nano wire) ใช้ทอเป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูงและทนทานกว่าไหมเทียม เป็นต้น

ตัวอย่างทางด้าน nanoelectronics เช่น การผลิตเป็น ชิพความจำ (memory chip) ที่ใช้โมเลกุลของสารเป็นทรานซิสเตอร์ แทนที่จะเป็นซิลิคอนทรานซิสเตอร์ ดังที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน หรือแม้กระทั่งการผลิตหุ่นยนต์จิ๋วที่มีขนาดเท่าเม็ดเลือดแดง ซึ่งสามารถเข้าไปรักษาโรค ทำลายไขมันที่อุดตันในเส้นเลือด หรือมะเร็งเนื้อร้ายในจุดที่เราต้องการได้ โดยไม่ต้องใช้การผ่าตัดแต่อย่างใด เป็นต้น

ส่วนประโยชน์ที่ได้จาก nanobiotechnology ที่เห็นได้ชัดเจนและคาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการดำรงชีวิตของเราเป็นอย่างมาก คงได้แก่เทคโนโลยีทางการแพทย์และยา เช่น การทำวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) เพื่อสร้างอวัยวะ (เนื้อเยื่อหรือกระดูก) ขึ้นมาทดแทน อวัยวะส่วนที่เสื่อมสภาพไป การผลิตยาที่สามารถทำการรักษาเฉพาะจุด (drug target) เพื่อลดปัญหาการคือยา และผลข้างเคียงของยา การผลิต เซนเซอร์ชีวภาพ (biosensor) ที่สามารถวัดปริมาณสารต่างๆ ในเลือด ในปัสสาวะ หรือในสภาพแวดล้อมได้อย่างฉับไว หรือการผลิต "ดีเอ็นเอชิพ" ซึ่งจะใช้ร่วมกับข้อมูลชีวสาร สนเทศ (bioinformatics) เพื่อตรวจหาชิ้นที่ผิดปกติซึ่งอาจ ก่อให้เกิดโรคในอนาคต หรือเพื่อใช้เป็นข้อมูลพันธุกรรมพื้นฐานส่วนบุคคลในการรักษาพยาบาลยามเจ็บไข้ได้ป่วย ซึ่ง แพทย์จะสามารถสั่งยาที่ตอบสนองต่อร่างกายของผู้ป่วย ได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพ

1.1.3 นาโนเทคโนโลยีในประเทศไทย

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้ดำเนินงานจัดตั้งหน่วยงาน “ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ” ขึ้นภายใต้สังกัดสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ โดยคณะรัฐมนตรีได้ให้ความเห็นชอบแล้ว เมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2545 และมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนานาโนเทคโนโลยี 3 สาขาหลัก ได้แก่

1. นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ เช่น การพัฒนาอุปกรณ์รับรู้ชีวภาพ (Biosensor) การสร้างเครื่องส่งยารักษาโรคผ่านระบบท่อนาโน (nanotubes) การวิจัย ปรับปรุงโครงสร้างระดับโมเลกุลของยารักษาโรค
2. นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nano-electronics) เช่น การพัฒนาเครื่องจุลจักรกล การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ และเซลล์เชื้อเพลิง

3. วัสดุนาโน (nanomaterials) เช่น การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม การพัฒนาฟิล์มนาโนคอมโพสิต การผลิตจุลเมมเบรน และการผลิตเจลเพื่อใช้ในกิจการแพทย์และอุตสาหกรรมครีมนันแคดและเครื่องสำอาง

1.2 ธาตุคาร์บอน

1.2.1 คุณลักษณะของธาตุคาร์บอน

ธาตุคาร์บอนเป็นธาตุในหมู่ 4 ของตารางธาตุ มีการจัดเรียงอิเล็กตรอน 2s, 2s, 2p มีหลายไอโซโทป ไอโซโทปที่พบมากที่สุดคือ C12 มีคุณสมบัติคือ มีจุด Melting Point 3550 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น (Density) 2.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

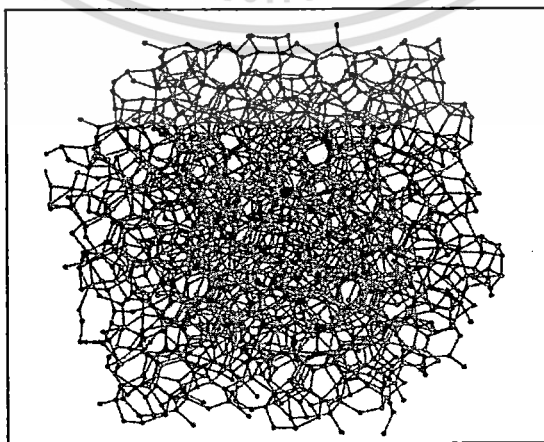
คาร์บอน (Carbon) เป็นธาตุหลักหนึ่งในสี่แห่งสิ่งมีชีวิต (ธาตุที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตบนโลกคือ ไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจนและออกซิเจน) สิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลก ถือได้ว่าเป็นสิ่งมีชีวิตในรูปแบบ Carbon-Based คือ มีคาร์บอนเป็นพื้นฐานของชีวิต หรือโมเลกุลที่เป็นสารอินทรีย์ทุกชนิดนั้น มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ คาร์บอนยังมีอยู่ในอาหารที่รับประทาน เสื้อผ้าที่สวมใส่ น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้กับรถยนต์และในสิ่งอื่นๆ อีกมากมาย ที่กล่าวมานี้เป็นเพียงบทบาทบางส่วนของคาร์บอนเท่านั้น เมื่ออยู่ในสภาพคาร์บอนบริสุทธิ์

1.2.2 โครงสร้างของคาร์บอน

คาร์บอนมีโครงสร้าง 4 แบบ ดังนี้

1.2.2.1 ออสถฐาน (Amorphous Carbon)

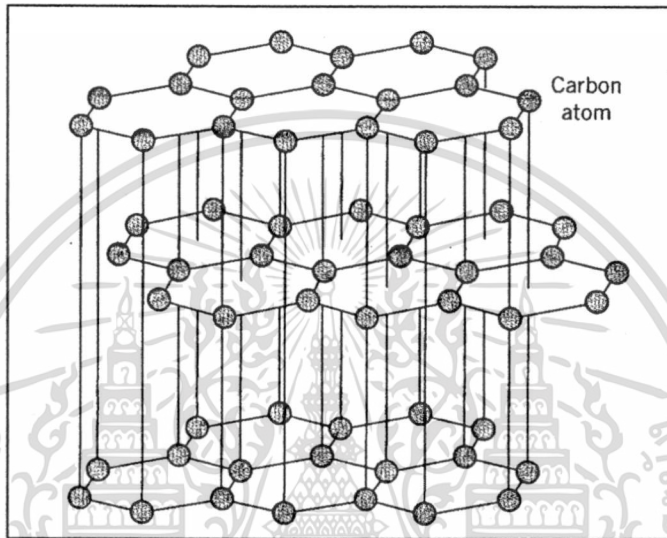
มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน อะตอมมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ไม่ซ้ำรูปแบบ เช่น เหมะควัน โดยทั่วไป มีลักษณะดังรูปที่ 1.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2.2 โครงสร้างแบบกราไฟต์ (Graphite)

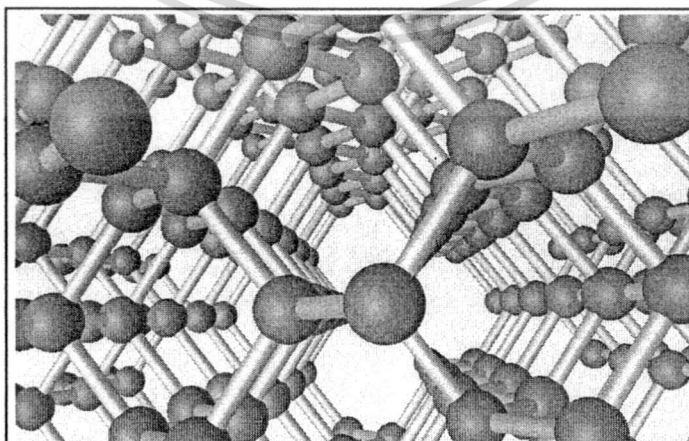
เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมซ้อนกันเป็นแผ่น เรียกว่าแผ่นกราฟีน (Grapheme) ซ้อนกันเป็นชั้นๆ เนื่องจากพันธะในแผ่นกราฟีนมีพันธะที่แข็งแรงมากแต่พันธะในระหว่างชั้นเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรงแผ่นกราฟีนในแต่ละชั้นจึงสามารถเลื่อนไปมาได้



รูปที่ 1.2 โครงสร้างแบบกราไฟต์ (Graphite)

1.2.2.3 โครงสร้างแบบเพชร (Diamond)

เพชรเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากที่สุด โครงสร้างแบบเพชรจะมีคาร์บอนเกาะเกี่ยวกันแน่นเป็นรูปทรง 3 มิติ

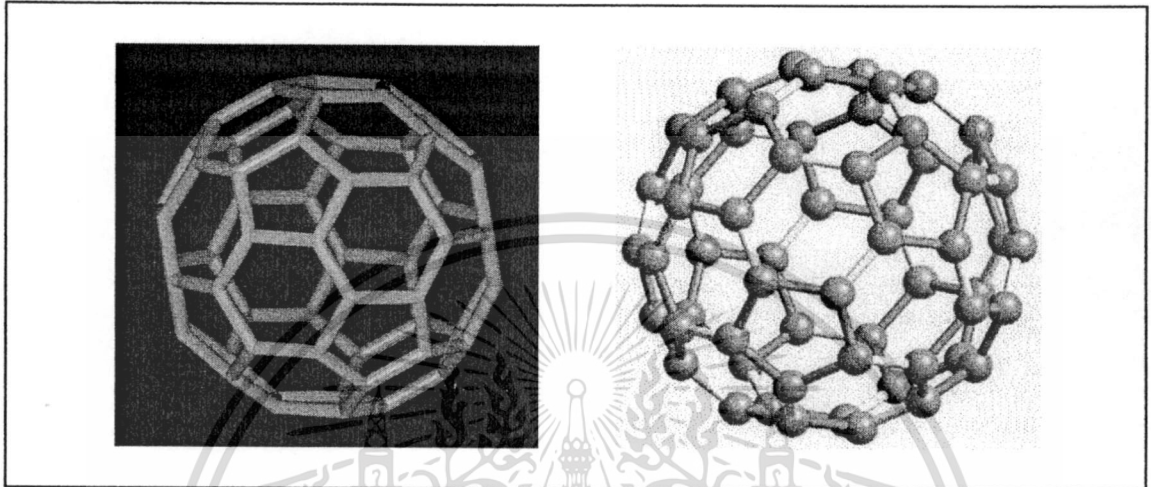


รูปที่ 1.3 โครงสร้างแบบเพชร (Diamond)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ในการศึกษาวิจัยและพัฒนา และผู้ดูแลเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2.4 โครงสร้างแบบบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน (Buckminster Fullerene)

เรียกอีกชื่อว่า บัคกี้บอล (Bucky Ball) เป็นโครงสร้างที่เพิ่งค้นพบไม่นานนี้ ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 60,70 หรือ 80 อะตอม (C60,C70,C80) ต่อกันเป็นทรงกลมเหมือนลูกฟุตบอล



รูปที่ 1.4 โครงสร้างแบบบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน (Buckminster Fullerene)

โครงสร้างอีกแบบหนึ่งของคาร์บอนคือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ รายละเอียดในหัวข้อต่อไป

1.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นอีกหนึ่ง โครงสร้างของคาร์บอน มีรูปร่างเป็น โครงดาข่ายม้วน ตัวเชื่อมติดกันเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับ 0.1 ถึง 100 นาโนเมตร มีคุณสมบัติที่แข็งแรงและเหนียวกว่าเหล็กกล้า สามารถนำไฟฟ้าหรือเป็นฉนวนก็ได้ ขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดเรียงตัวของอะตอม

1.3.1 การค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์

การค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์ ค้นพบในปี พ.ศ.2534 เกิดจากความบังเอิญที่ ซุมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) นักวิจัยจากห้องปฏิบัติการของบริษัท NEC ในญี่ปุ่น ขณะที่กำลังใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง ตรวจสอบเขม่าที่ได้จากการสังเคราะห์ฟูลเลอร์ีน โดยวิธี Arc-Evaporation แล้วพบว่าที่ขั้วคาโทดเกิดมีวัสดุโครงสร้างแบบกราฟไฟต์ที่เป็นทั้งอนุภาคนาโนและท่อนาโน ซึ่งเป็น โครงสร้างที่ไม่เคยมีผู้ใดสังเกตเห็นมาก่อน

ต่อมาทีมงานของอิจิมา สามารถสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวในปริมาณมาก โดยปรับสภาวะของการทำ Arc-Evaporation ท่อนาโนที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเป็นท่อกราฟไฟต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3-10 นาโนเมตร และมีความยาวในช่วง 1 ไมโครเมตร เป็นท่อซ้อนกัน 2-50 ชั้น เรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวป์แบบหลายผนัง (Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWNT))

จากนั้นในปี พ.ศ.2536 อิจิมาและนักวิจัยของบริษัทไอบีเอ็ม ชื่อ ดอน เบทูน (Don Bethune) ได้นำเสนอรายงานวิจัยว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียวได้ (โดยไม่ได้วิจัยร่วมกันแต่อย่างใด) โดยการเติมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อยในระหว่างการสังเคราะห์เพื่อป้องกันการม้วนตัวของแผ่นกราฟีนและป้องกันการเกิดฟูลเลอร์รีนขนาดเล็ก



รูปที่ 1.5 ซุมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) ชาวญี่ปุ่นผู้ค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์

1.3.2 โครงสร้างและลักษณะการม้วนตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดจากการม้วนตัวของแผ่นกราฟีนเป็นผนังของท่อและมีฝาปิดเป็นครึ่งทรงกลมที่ได้จากฟูลเลอร์เร็นซ์ C 60 หรือ C 70

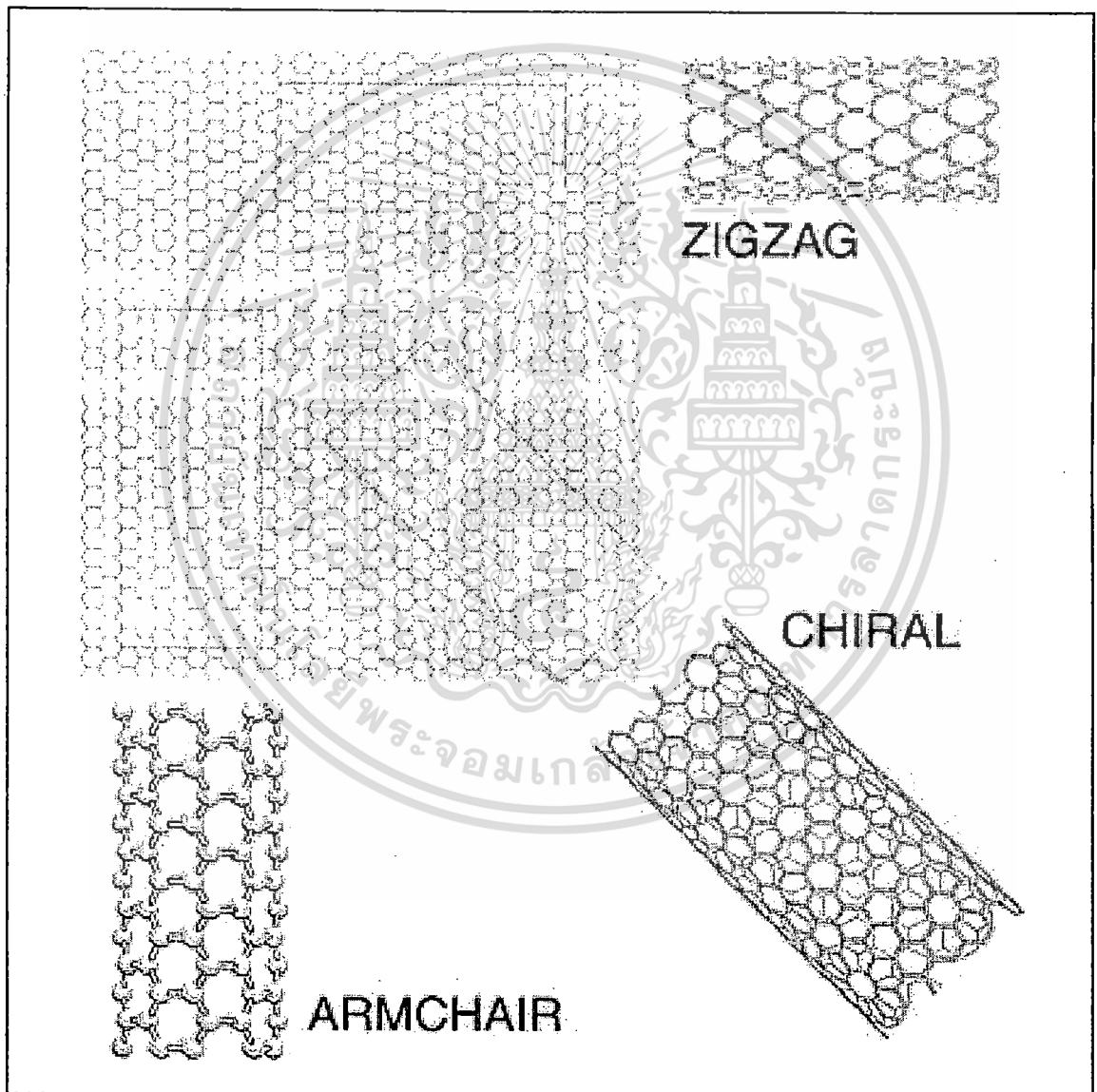
การม้วนตัวของแผ่นกราฟีน จะมีการม้วนตัวในทิศทางต่างๆ กัน เพื่อสร้างเป็นทรงกระบอกที่สมมาตร โดยแผ่นจะหมุนจนกระทั่งอะตอมของคาร์บอนมาบรรจบกันโดยเวกเตอร์จากอะตอมแรกไปยังอีกอะตอมหนึ่งเรียกว่า ไชรอลเวกเตอร์ (Chiral vector) ความยาวของไชรอลเวกเตอร์ จะมีขนาดเท่ากับเส้นรอบวงของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทิศทางของแกนนาโนทิวป์จะตั้งฉากกับไชรอลเวกเตอร์ ไชรอลเวกเตอร์นี้ทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์มีคุณสมบัติที่ต่างกันออกไป ตามลักษณะการม้วนตัว เช่นคุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางไฟฟ้า

ยกตัวอย่างกรณีที่เป็นการม้วนตัวในแนวอน $\theta = 0^\circ$ จะได้ท่อแบบ ซิกแซก (Zig-Zag) ถ้าม้วนตัว ทำมุม $\theta = 45^\circ$ จะได้ท่อแบบเก้าอี้วางแขน (Armchair)

สาเหตุที่คาร์บอนนาโนทิวป์มีความแข็งแรงมากมาจากธรรมชาติของการสร้างพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน ซึ่งเป็นสาเหตุเดียวกับที่เพชรเป็นของที่แข็งที่สุดในกรณีของเพชร

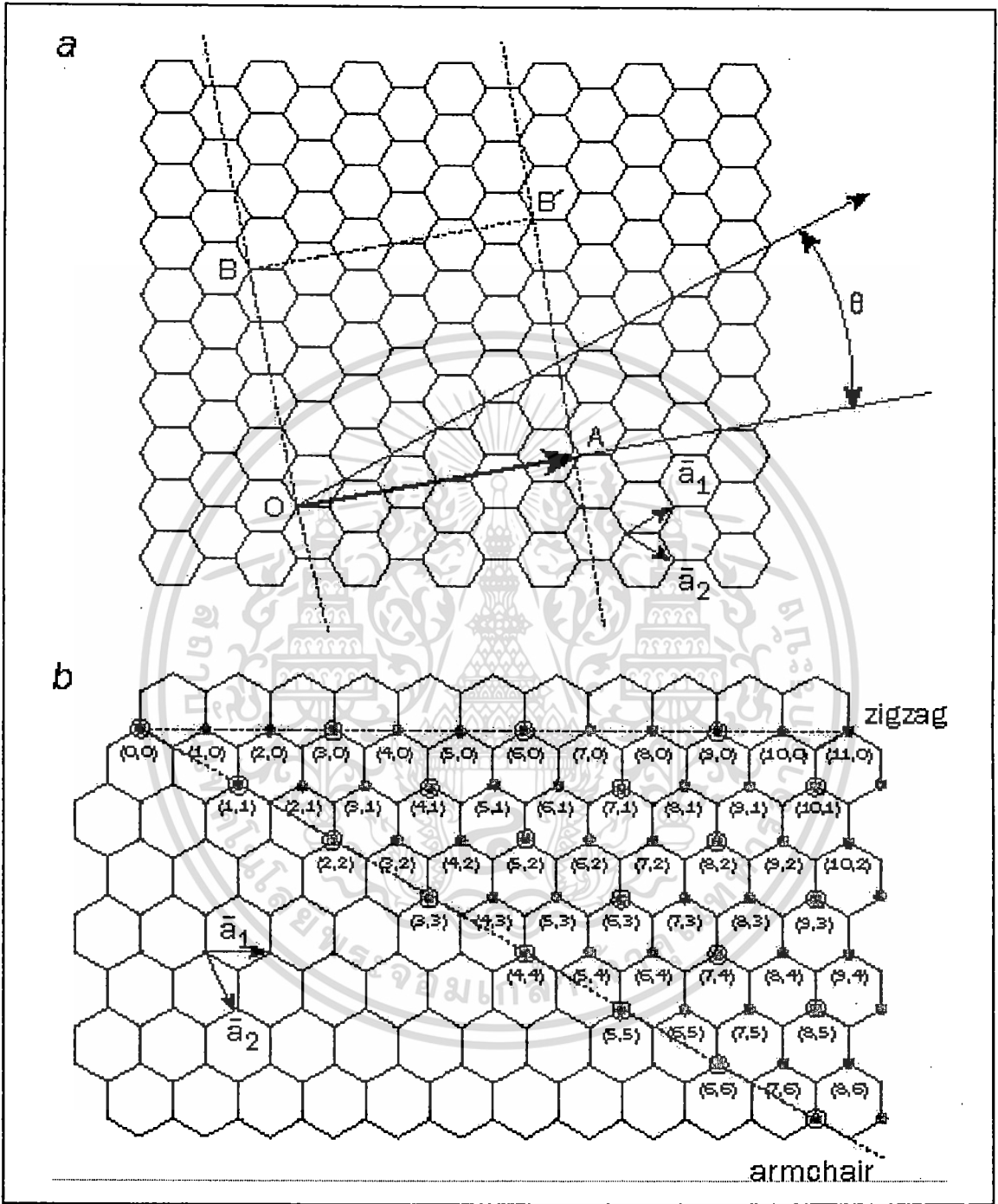
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานที่ควรตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประพันธ์ด้วยวิธีการใดๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมของคาร์บอนมีการเรียงตัวแบบพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม (Tetrahedral) ซึ่งมีแขนพันธะสี่แขนยื่นออกจากแต่ละอะตอม แต่ในกรณีของคาร์บอนนาโนทิวบ์อะตอมจะเรียงกันแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) โดยอะตอมคาร์บอนจะสร้างพันธะกับคาร์บอนรอบข้างเพียง 3 อะตอมเท่านั้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการสร้างพันธะของกราฟไฟต์ สาเหตุของการเรียงตัวแบบเป็นท่อยังไม่สามารถอธิบายได้ในปัจจุบัน แต่หนึ่งในสมมุติฐานคือมาจากการที่อะตอมแต่ละตัวมาทำพันธะต่อยอดที่ปลายท่อ



รูปที่ 1.6 แสดงการม้วนตัวแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



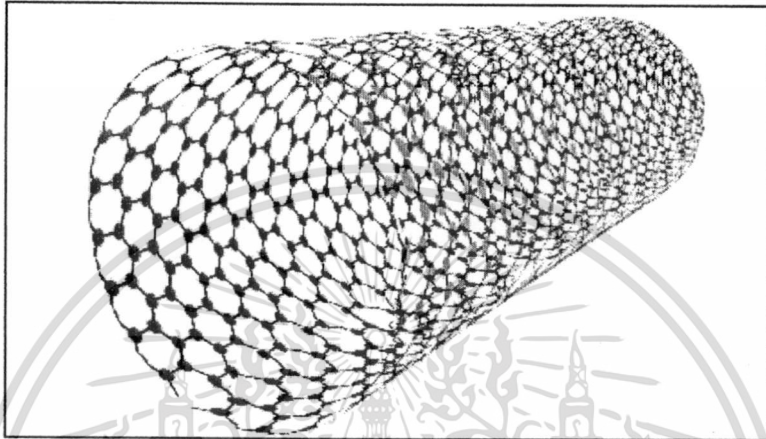
รูปที่ 1.7 แสดงมุมการม้วนตัวแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์

1.3.3.1 แบบผนังเดี่ยว (Single – walled Carbon Nanotube (SWNT))

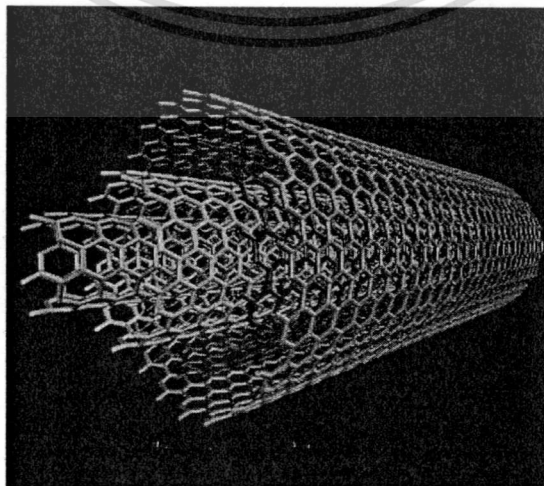
เป็นท่อกลวงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.4 – 2.0 นาโนเมตร มีคุณสมบัติที่ต่างกันไปตามแต่ลักษณะของการม้วนตัว



รูปที่ 1.8 คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังเดี่ยว (Single – walled Carbon Nanotube (SWNT))

1.3.3.2 แบบหลายผนัง (Multi – walled Carbon Nanotube (MWNT))

มีลักษณะเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังเดี่ยว ม้วนตัวซ้อนกันตั้งแต่ 2 ท่อขึ้นไป โดยมีแกนกลางร่วมกัน มีระยะห่างระหว่างท่อประมาณ 0.34 – 0.39 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับระยะห่างในแต่ละชั้นของแผ่นกราฟีนที่ซ้อนกันอยู่ในกราไฟต์ (0.355 นาโนเมตร) ความยาว ความสมบูรณ์ของการเรียงตัวและการม้วนตัว ไม่สามารถควบคุมอย่างแม่นยำได้ มีปริมาณจุดบกพร่องสูง ทำให้ความแข็งแรงต่ำกว่าท่อแบบผนังเดี่ยว



รูปที่ 1.9 คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบหลายผนัง (Multi – walled Carbon Nanotube (MWNT))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของเจ้าของเอกสารทุกฉบับที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ การคัดลอกหรือการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารถือเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์และจะดำเนินการฟ้องดำเนินคดีตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

1.3.4 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์

ทราบกันมานานแล้วว่าเพชรมีความแข็งแรงมาก เนื่องจากโครงสร้างตาข่าย 3 มิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มี 4 ตำแหน่ง ในกราฟิต์คาร์บอนอะตอมหนึ่งจะมีพันธะกับ 3 อะตอมในระนาบเดียวกันที่เหลืออีก 1 พันธะ จะจับยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราฟิต์หรือในแผ่นกราฟีนจะมีความแข็งแรงมากกว่าเพชร แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงสามารถเลื่อนไหลได้ พันธะบนผนังท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ก็มีลักษณะคล้ายแผ่นกราฟีนและพันธะของคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์แข็งแรงกว่าเพชรและกราฟิต์

ค่าความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ของคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่าสูงถึง 1 เทอราปาสคาล สามารถนำความร้อนได้ดีมากตามแนวยาวของท่อ แต่ก็เป็นฉนวนความร้อนได้ดีมากเช่นกันตามแนวขวางของท่อ

ตารางที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังเดี่ยว เปรียบเทียบกับวัสดุอื่น

| คุณสมบัติ | คาร์บอนนาโนทิวป์ ชนิดผนังเดี่ยว | เปรียบเทียบกับวัสดุอื่น |
|---|---|--|
| เส้นผ่านศูนย์กลาง | 0.6 - 1.8 นาโนเมตร | เส้นผม 50 - 200 ไมโครเมตร |
| ความหนาแน่น | 1.33 - 1.40 g/cm^3 | อะลูมิเนียม 2.7 g/cm^3 |
| ความทนแรงดึง | 45×10^9 ปาสคาล | Steel alloy 2×10^9 ปาสคาล |
| ความยืดหยุ่น | สามารถโค้งงอและ คืนสภาพได้ดี | ไฟเบอร์ที่ทำจากโลหะหรือคาร์บอน จะเกิดรอยแยกที่เกรนบอนด์ (grain bondary) เมื่อเกิดการงอ |
| การนำไฟฟ้าสูงสุด | $10^9 A/cm^2$ | ทองแดง $10^6 A/cm^2$ |
| การปล่อยอิเล็กตรอน ด้วยสนามไฟฟ้าที่ ความห่าง 1 ไมโครเมตร จากฟอสเฟอรั ในสุญญากาศ | ใช้ศักดาไฟฟ้า 1 - 3 ไมโครเมตร | โมลิบดีนัม (Molybdenum) 50 - 100 โวลต์ |
| การนำความร้อน (300°K) | ประมาณ 6000 W/mK | เพชร 3320 W/mK |
| เสถียรภาพเชิงอุณหภูมิ | ในสุญญากาศถึง 2500°C ในอากาศได้ถึง 750°C | ไอซีอินเตอร์คอนเนคตลสายที่ 600 - 1000°C |

1.3.5 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปใช้งาน

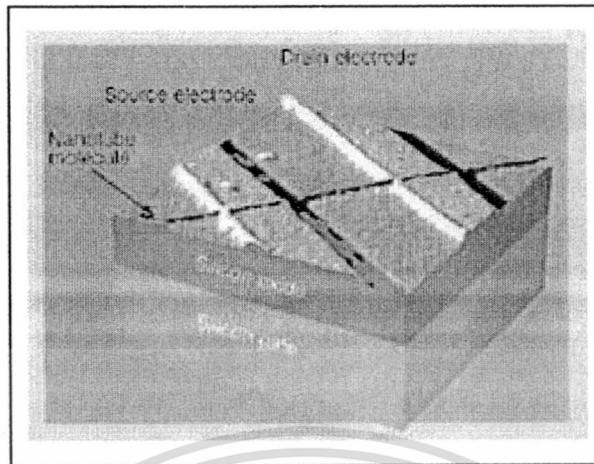
จากคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีความโดดเด่นหลายประการ เป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำมีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นดี มีเสถียรภาพสูง สามารถจับยึดกับโมเลกุลของแก๊สได้ดี จึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายด้าน ดังเช่น

1. งานทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์

การที่จะก้าวเข้าสู่ยุคนาโนอิเล็กทรอนิกส์นั้น ต้องลดขนาดชิ้นส่วนอุปกรณ์ลง 10 ถึง 1,000 เท่าจากเดิมที่เป็น ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ขนาดของชิ้นส่วนเป็นไมโครเมตร) ดังนั้นต้องมีการลดขนาดของชิ้นส่วนอุปกรณ์ของอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นขนาดระดับนาโนเมตร ทั้งทรานซิสเตอร์ ไดโอด รีเลย์และลอจิกเกตต้องเปลี่ยนใหม่ เช่น ทรานซิสเตอร์ที่เป็นซิลิกอนเซมิคอนดักเตอร์ จากเดิมมีขนาดระดับไมครอน ต้องหันมาใช้โครงสร้างโมเลกุลอินทรีย์ (Organic Molecules) หรืออนินทรีย์ (Inorganic) ในระดับนาโน มีการใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นช่อง (Channel) ให้อิเล็กตรอนผ่านระหว่างซอส - เดรน (Source-Drain) อิเล็กโทรดสำหรับทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field-Effect Transistor (FET)) ดังลักษณะในรูปที่ 1.10 โดยสามารถเปิด/ปิดสวิตช์ด้วย Voltage Gate ตามปกติ แต่สิ่งที่แตกต่างจากซิลิกอน FETs ทั่วไป คือ ขนาดและการนำไฟฟ้าผ่านคาร์บอนนาโนทิวป์ สูงมากกว่าถึง 1 ล้านเท่าด้วยกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าและให้ความเร็วสัญญาณนาฬิกา (Clock Speed) ในระดับสูงกว่าถึง 1 teraHz รวมถึงการสร้างลอจิกเกตด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์ (CNT-FETs) โดยมีการได้ปด้วยสารเพื่อที่จะเติมหรือเอาอิเล็กตรอนออกทำให้ได้ n-type หรือ p-type เกิดขึ้น

ถึงแม้จะสามารถสร้างอุปกรณ์เหล่านั้นได้ในระดับนาโน แต่สิ่งที่ยากกว่าคือการเชื่อมต่อ (Wire) อุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกันเพื่อจะปฏิบัติการเชิงคณิตศาสตร์หรือลอจิกได้ จึงเกิดแนวคิดที่ต้องทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ เป็นทั้งตัวเชื่อมและเป็นอุปกรณ์ในตัวเดียวกัน อย่างไรก็ตามสิ่งนี้ยังไม่รวมถึงในระดับโครงสร้างของระบบวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์หรือระบบการทำงานอิสระอื่นๆ

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นการจะจัดเรียงอนุภาคของคาร์บอนนาโนทิวป์ให้ได้ตามต้องการนั้นเป็นสิ่งที่ยาก แต่ได้มีรายงานออกมาว่าสามารถใช้ลำแสงเลเซอร์สองเส้นทำงานคล้ายตะเกียบคือ จะจับและเคลื่อนย้ายอนุภาคของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ตามต้องการ ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า Optical Trapping จึงคาดว่าน่าจะสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาใช้ในการสร้างไมโครชิพที่มีความไวสูงและใช้พลังงานต่ำได้ในอนาคต



รูปที่ 1.10 แสดงการใช้คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นช่องทางเดินกระแสในทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (FET)

2. นำไปเป็นส่วนผสมของวัสดุอื่นๆ เพื่อให้เกิดคุณสมบัติที่ตรงตามความต้องการมากขึ้น องค์การนาซา (NASA) สามารถสังเคราะห์คอมโพสิตของ SWNT-polyimide ที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพทั้งความแข็งแรง การทนอุณหภูมิและการนำไฟฟ้า ซึ่งทั้งหมดนี้มีความสำคัญมากสำหรับวัสดุประกอบเครื่องบินและยานอวกาศ กล่าวคือ คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถช่วยเสริมความแข็งแรง (Reinforce) ของวัสดุเดิมให้มากยิ่งขึ้น น้ำหนักเบาและสามารถสร้างได้หลายรูปแบบได้แก่ ฟิล์มบาง ไฟเบอร์ โฟม สารเคลือบและผง เป็นต้น

ปัจจุบันมีการผลิตวัสดุคอมโพสิตของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ปริมาณมาก อาทิเช่น พลาสติกเสริมคาร์บอนนาโนทิวป์ เช่น เสริมใน Ethylene Tetrafluoroethylene หรือ Polyvinylidene Fluoride เพื่อนำมาใช้ในรถยนต์ ใช้เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติที่ทนต่อสารเคมี ทนต่อการหลุดลอก รวมถึงป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ได้มากขึ้น

3. งานทางด้านทางการแพทย์

ในทางการแพทย์แนวคิดสำคัญที่จะใช้ประโยชน์จากคาร์บอนนาโนทิวป์ คือการที่ท่อนาโนนี้สามารถเข้าถึงโครงสร้างในระดับเซลล์ได้ นั่นคือสามารถใช้เป็นหัววัด (Probe) ตรวจวัดหรือใช้เป็นปิเปตขนาดเล็กลittleมากสำหรับปลดปล่อยสารหรือโมเลกุล (Ultrasmall Pipette) เข้าสู่เซลล์เป้าหมายได้ อันหลังนี้คือศักยภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ ในการขนถ่ายและปลดปล่อยยาเข้าสู่อวัยวะเป้าหมาย (Targeted Drug Delivery)

4. ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

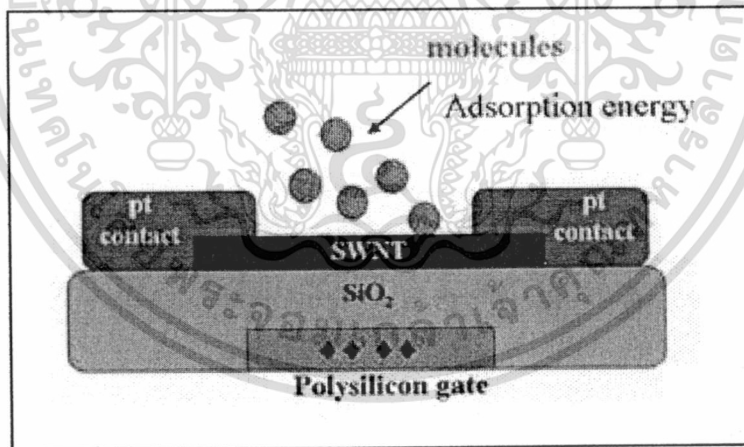
เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์ มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวน้อยมากๆ เอกส(ค่า Aspect-ratio สูง) ทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีเสถียรภาพที่ดีและทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถย่อยอิเล็กทรอนิกส์ได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าต่ำ จึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ในอุปกรณ์เช่น จอแสดงผล หลอดไฟฟ้า ประหยัดพลังงานแหล่งกำเนิด X-ray ขนาดเล็กและแหล่งกำเนิดไมโครเวฟขนาดเล็ก

5. งานทางด้านเซนเซอร์เคมี (Chemical sensors)

การที่คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถทำให้อยู่ในรูปของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) โดยที่สารกึ่งตัวนำนี้สามารถตอบสนองต่อสารพวกอัลคาไลน์ ฮาโลเจนและแก๊สต่างๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อเป็น Semiconducting Carbon Nanotube จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ดีขึ้นอย่างมาก ทำให้เซนเซอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ นี้มีความไวมากขึ้น ซึ่งก็มีการพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัด Cytochrome C, Methane, Krypton และ โมเลกุลของ Alkylamine แบบสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น

แต่การประยุกต์ใช้ Semiconducting Carbon Nanotube เป็นเซนเซอร์แบบนี้มีปัญหา คือไม่สามารถแยกชนิดของแก๊สที่ความเข้มข้นต่ำได้และยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิและความเร็วแก๊สที่ไหลผ่าน ทำให้ขาดความสามารถเชิงจำเพาะหรือคัดเลือกเฉพาะที่เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเซนเซอร์



รูปที่ 1.11 แสดงการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์เคมี

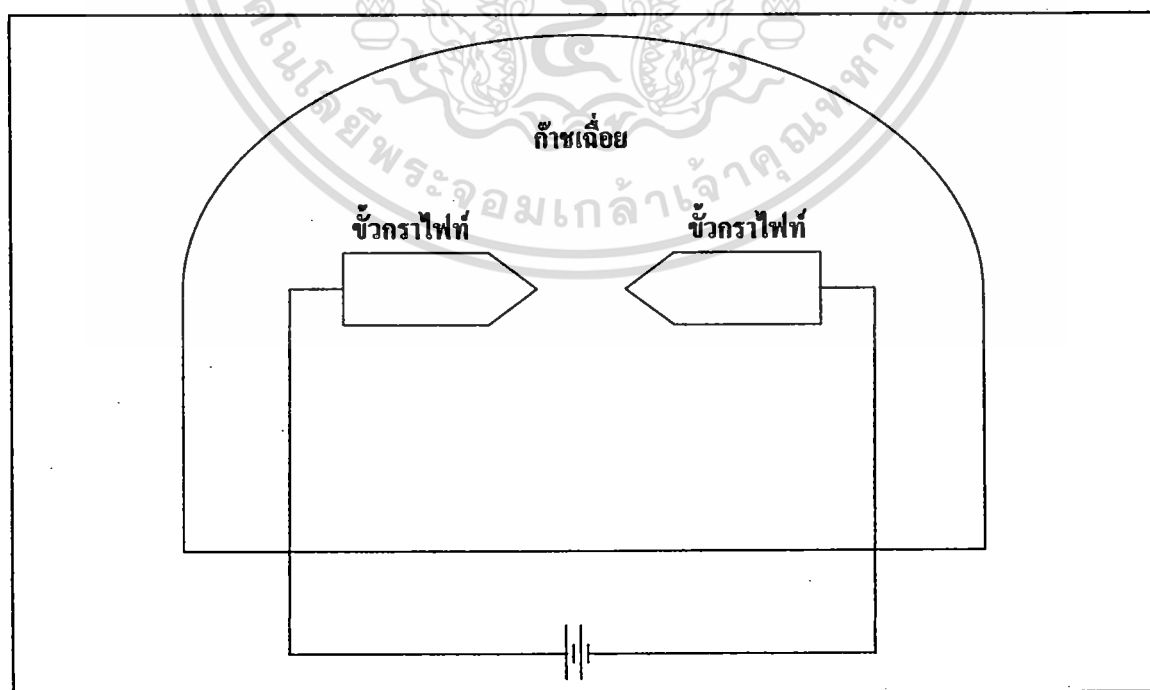
1.4 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

1.4.1 วิธี อาร์คด้วยไฟฟ้า (Arc Discharge)

วิธี อาร์คด้วยไฟฟ้า (Arc discharge) เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยการอาร์คที่ปลายทั้ง 2 ของแท่งกราไฟต์(หรือแท่งคาร์บอน) 2 แท่ง ภายในระบบซึ่งเป็นบรรยากาศของแก๊สเฉื่อยเช่น ฮีเลียม (Helium) ผสมกับอาร์กอน (Argon) หรือไนโตรเจนเหลวที่ความดันต่ำโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสูงเพื่อไปอาร์คแท่งกราไฟต์ ทำให้บริเวณที่ถูกอาร์คมีอุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ เกาะอยู่บนบางส่วนของแท่งกราไฟต์ ที่หลุดกระเด็นออกมาและรอบบริเวณแท่งกราไฟต์ที่ถูกอาร์ค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมระหว่าง แก๊สฮีเลียมกับ แก๊สอาร์กอน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่และการนำความร้อนมีค่าต่างกัน จึงมีผลกระทบกับความเร็วในการแพร่ของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

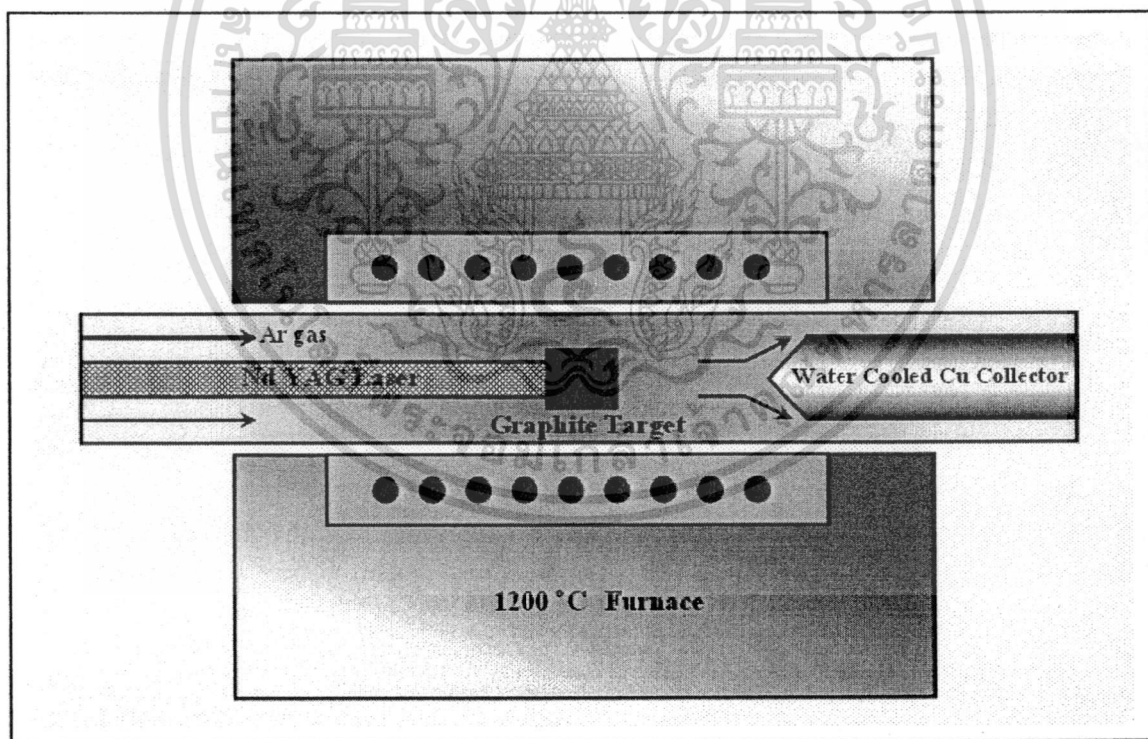
การเย็นตัวของแท่งคาร์บอนและอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เป็นผลให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ มีขนาดต่างกันออกไปไม่สม่ำเสมอ วิธีอาร์คด้วยไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.12 และด้วยวิธีการนี้ ยังสามารถที่จะเลือกให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้ ให้เป็นชนิดผนังเดี่ยว (SWCNTs) หรือชนิดหลายผนัง (MWCNTs) โดยหากต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นชนิด ผนังเดี่ยว ก็สามารถใช้แท่งกราไฟต์ ที่เจือด้วยอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก (Fe), โคบอลต์ (Co), นิกเกิล (Ni) หรือ โมลิบดีนัม (Mo) ที่ขั้วแอโนดและถ้าต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นชนิดหลายผนัง ก็สามารถใช้แท่งกราไฟต์บริสุทธิ์ เท่านั้น ก็พอ ไม่จำเป็นต้องผสมโลหะตัวเร่งก็ได้ ซึ่งเป็นข้อดีของวิธีนี้ ด้วยวิธีอาร์คด้วยไฟฟ้านี้ จะทำให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ไม่สะอาด ปะปนกับเขม่า โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาและอะตอมคาร์บอนที่มีรูปร่างไม่แน่นอน จึงต้องผ่านการแยกให้เหลือเฉพาะคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งจะยุ่งยากและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ยังมีคุณภาพต่ำอยู่คือจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอสั้นบ้างยาวบ้าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 1.12 วิธีอาร์คด้วยไฟฟ้า (Arc Discharge) ห้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2 วิธี Laser Ablation

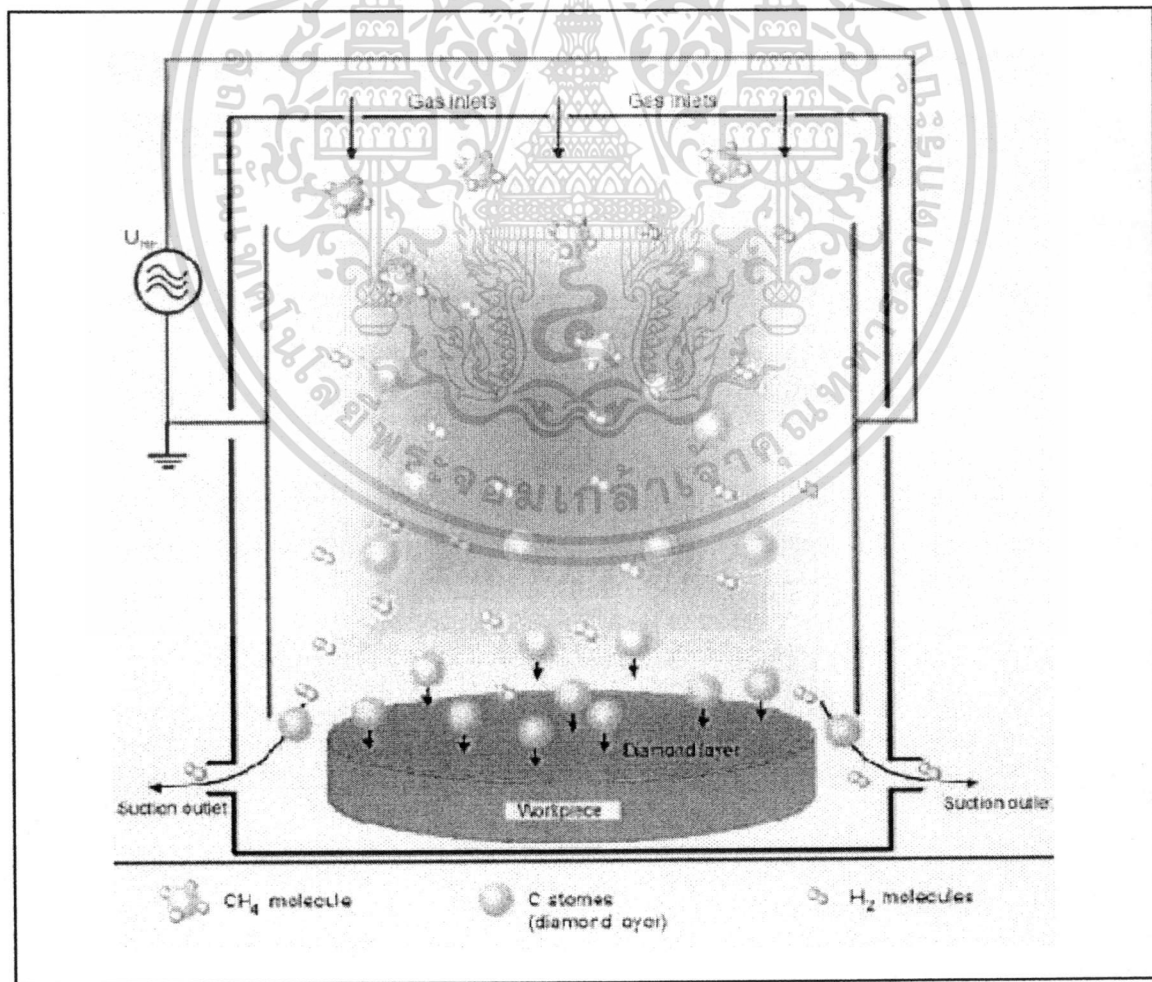
ในปี พ.ศ.2538 ทีมวิจัยของ Prof. Smalley ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยการใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูง หลักการคือใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูงยิงไปที่เป้าหมายซึ่งเป็นแท่งกราไฟต์ที่อยู่ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิประมาณ 1200°C ภายในเป็นบรรยากาศของแก๊สฮีเลียมหรือแก๊สอาร์กอน ทำให้แท่งกราไฟต์ระเหยออกเป็นไอของคาร์บอนโดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะมี 2 ชนิดคือ พัลส์เลเซอร์ (pulsed laser) และเลเซอร์ต่อเนื่อง (continuous laser) สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง พัลส์เลเซอร์และเลเซอร์ต่อเนื่อง คือ พัลส์เลเซอร์ต้องใช้ความเข้มของแสงสูงมากแต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่องส่วน เลเซอร์ต่อเนื่องนั้น จะใช้ความเข้มแสงน้อยกว่า แต่จะยิงเลเซอร์ไปที่เป้าหมายอย่างต่อเนื่องปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีมากกว่า 70 % และมีความบริสุทธิ์สูงมากส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ได้จะอยู่ในช่วง 1-2 nm เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงจึงนิยมใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดซิงเกิลวอลล์เท่านั้น วิธี Laser Ablation ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 วิธี Laser Ablation

1.4.3 วิธีการปลูกด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition (CVD))

วิธีการสังเคราะห์แบบการปลูกด้วยไอเคมีหรือซีวีดี (Chemical Vapor Deposition (CVD)) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ทั้งชนิดที่เป็นผนังชั้นเดียวและผนังหลายชั้น มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ สามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก โดยใช้หลักการของกระบวนการการแยกแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น แก๊สมีเทน เอทิลแอลกอฮอล์ อะซีโตน เป็นต้น) และสามารถเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือพลาสมา (Plasma) เข้าช่วย อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ดังแสดงในรูปที่ 1.14 ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่ต้องการบนวัตถุได้และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ วิธีซีวีดี ยังสามารถแยกย่อยตามความแตกต่างของวิธีการแยกแก๊สและวิธีการเตรียม โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาออกเป็น 5 วิธีใหญ่คือ

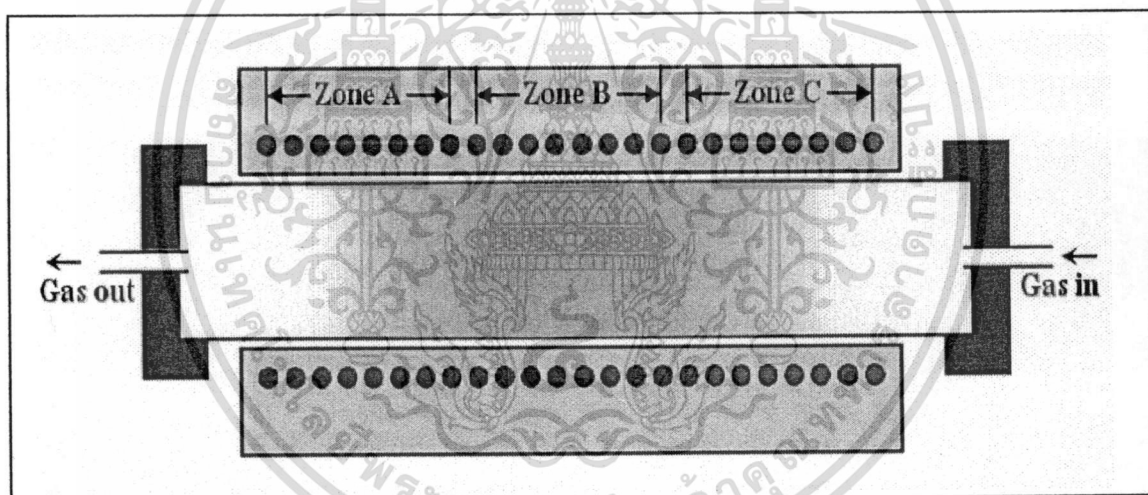


รูปที่ 1.14 วิธีการปลูกด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition (CVD))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักหอสมุดกลางพระจอมเกล้าลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

1.4.3.1 วิธีเทอร์มอลซีวีดี (Thermal Chemical Vapor Deposition)

วิธีเทอร์มอลซีวีดี ที่แสดงในรูปที่ 1.15 เป็นวิธีในกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการเตรียมชั้นออกไซด์ของซิลิคอน (Si) และเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันเนื่องจากสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ทั้งชนิดผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้น ใช้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เหล็ก (Fe), โคบอล (Co), นิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo) หรืออัลลอยของโลหะเหล่านี้ โดยส่วนมาก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 13 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 30-40 นาโนเมตร เมื่อความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 2-3 นาโนเมตร จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อประมาณ 1 นาโนเมตร คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีความยาวอยู่ในช่วง 0.6-4 นาโนเมตร

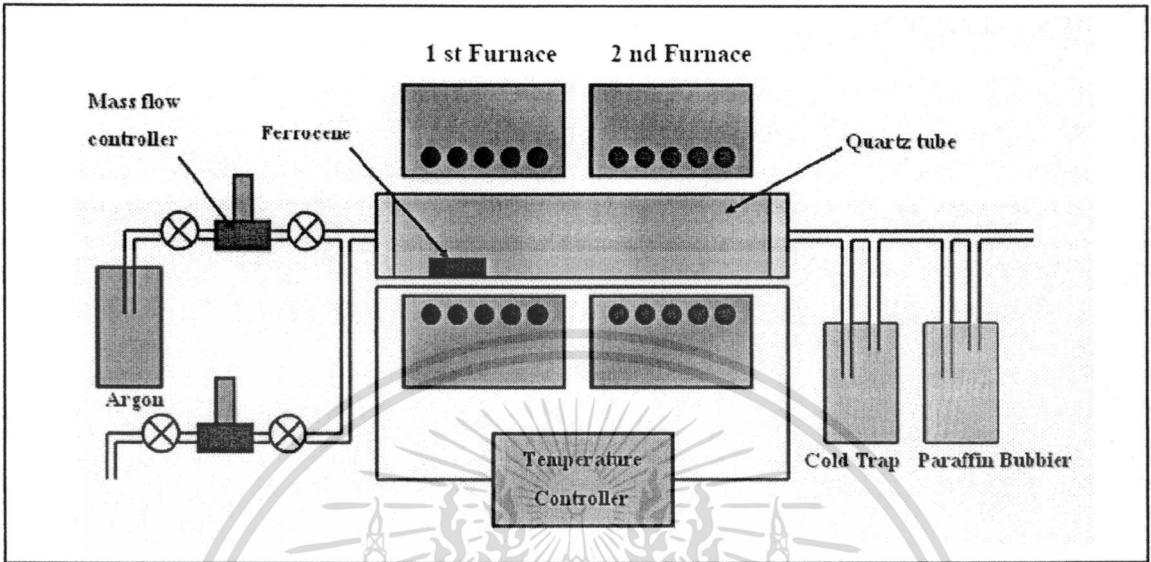


รูปที่ 1.15 วิธีเทอร์มอลซีวีดี (Thermal Chemical Vapor Deposition)

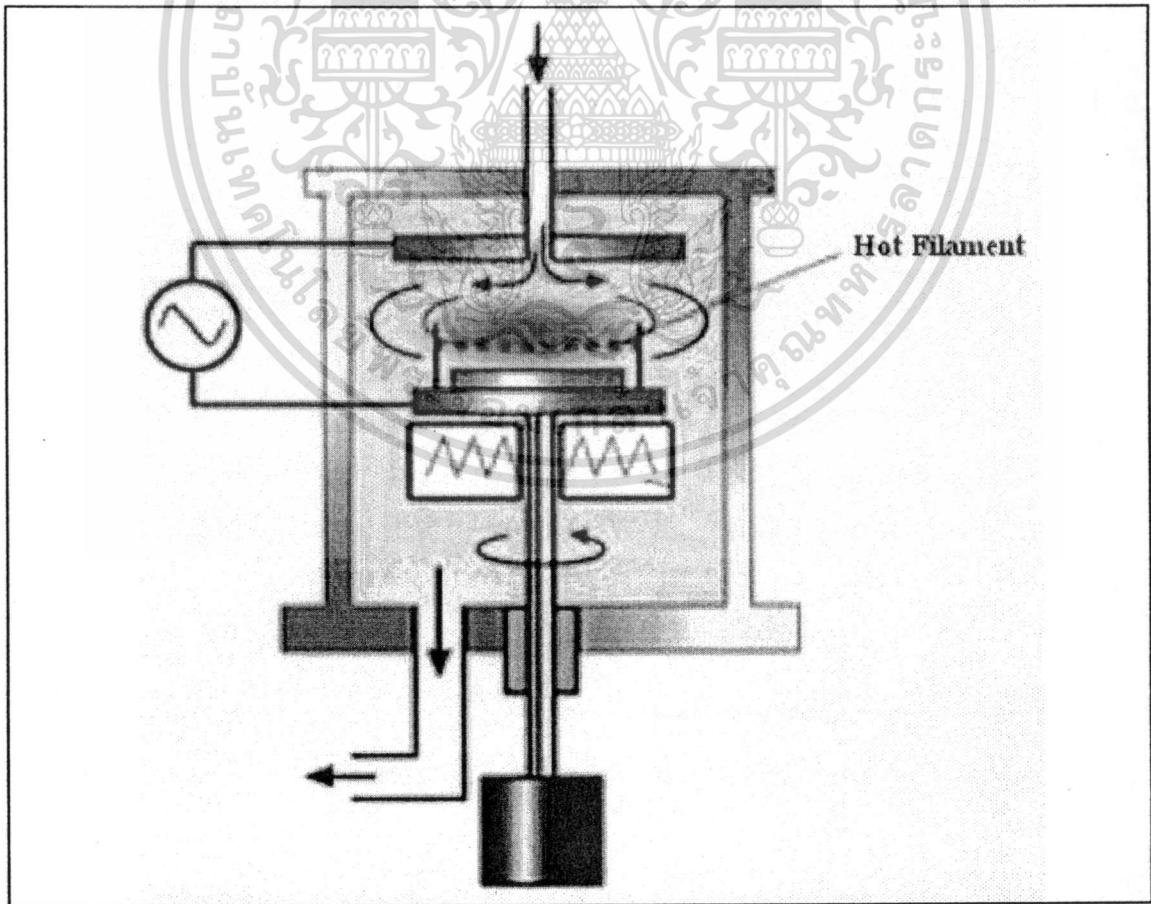
1.4.3.2 วิธี Vapor Phase Growth

จากรูปที่ 1.16 เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแก๊สของโลหะ เช่น Ferrocene ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ครั้งละเป็นจำนวนมากๆ และทิวป์ที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาวมาก (มากกว่า 20 μm) และมีความบริสุทธิ์มากกว่า 80 % แต่เนื่องจากวิธีนี้มักจะใช้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายจึงต้องระมัดระวังอย่างมากนอกจากนี้วิธีนี้ยังยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.16 วิธี Vapor Phase Growth



รูปที่ 1.17 วิธี Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PE-CVD)

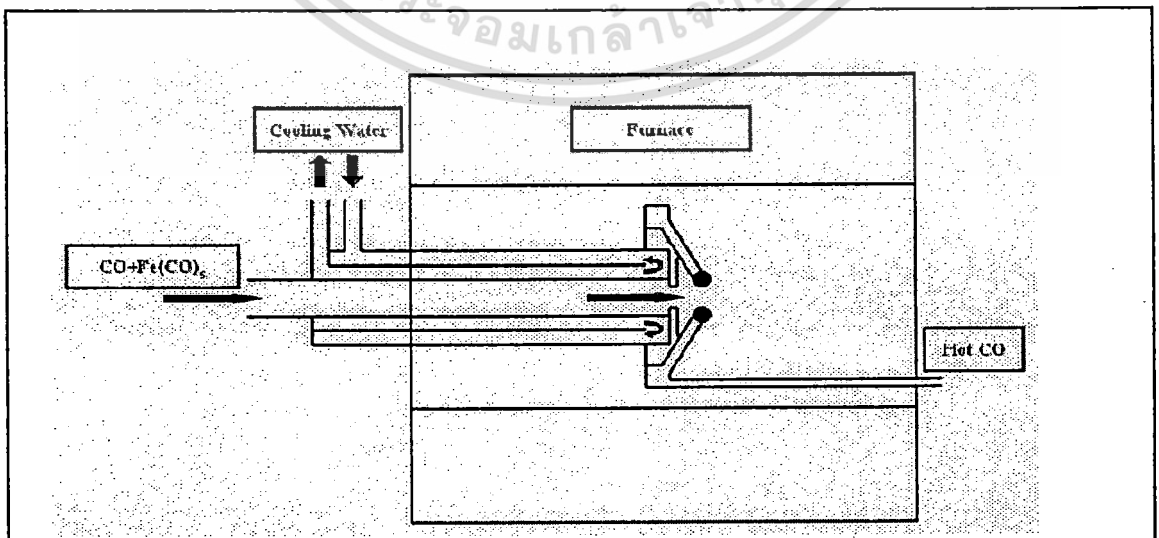
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.3.3 วิธี Plasma enhanced Chemical Vapor Deposition (PE-CVD)

วิธีพลาสมาซีวีดี (Plasma CVD) เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C โลหะตัวเร่งที่ใช้คือ เหล็ก (Fe), นิกเกิล (Ni) และ โคบอลต์ (Co) นอกจากนี้ วิธีนี้ยังเป็นวิธีที่สามารถกำหนดทิศทางการเกิดของทิวบ์ให้ทิวบ์ตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดหลายผนัง ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิดผนังเดี่ยวได้ แต่ปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวได้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 1.17

1.4.3.4 วิธี High Pressure CO Disproportionate Process

วิธีนี้จะคล้ายกับวิธี Vapor phase growth คือใช้แก๊สของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon source) แล้วปล่อยให้เข้ามาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซโลหะ เช่น Ferrocene, $\text{Fe}(\text{CO})_5$ จนเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังอันตรายจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เนื่องจากเป็นอันตรายต่อร่างกายอย่างยิ่ง ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ การควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นทำได้ยาก แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จะเป็นชนิดผนังเดี่ยว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างเล็กและมีปริมาณที่มาก โดยที่ขนาดของท่อเล็กสุดอยู่ที่ประมาณ 0.7 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อได้เล็กที่สุด โดยมีขนาดเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 1.1 นาโนเมตร มีความบริสุทธิ์ประมาณ 80 % และมีสิ่งเจือปนน้อย ดังแสดงรูปที่ 1.18



รูปที่ 1.18 วิธี High Pressure CO Disproportionate Process

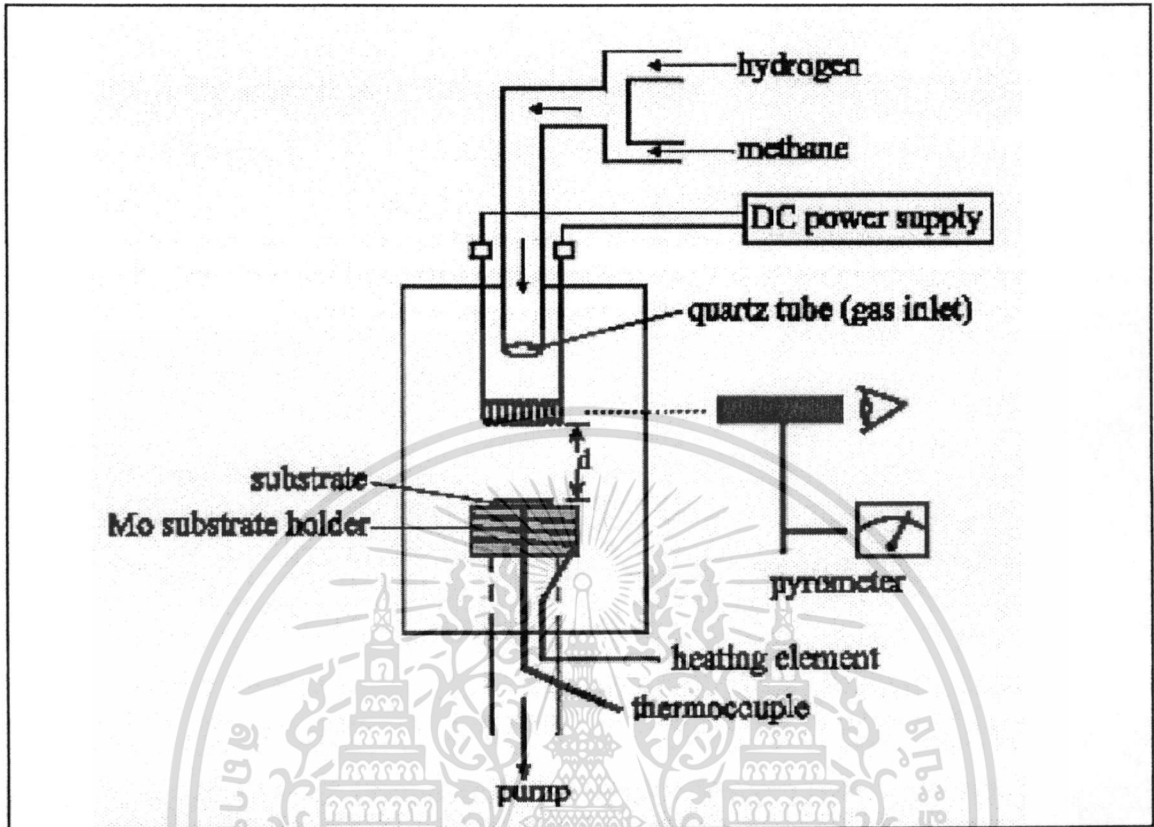
1.4.3.5 วิธี Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD)

จากรูปที่ 1.19 วิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อน (Hot filament CVD) นี้ ซึ่งจะมีหลักการคล้ายกับวิธีเทอร์มอลซีวีดี เพียงแต่จะใช้ขดลวดความร้อน (filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกับแก๊ส วิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อนนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและในเชิงพาณิชย์ หลักการคือใช้ไฟฟ้ากระแสสูงจ่ายให้ขดลวดความร้อน เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวด มีฐานรองสำหรับวางแผ่นตัวอย่าง ใช้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) หรือ นิกเกิล (Ni) ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา (Chamber) จะมีท่อนำแก๊สซึ่งเป็นแก๊สที่มีการบอบเป็นส่วนประกอบเช่น ไอรอะเหยของแอลกอฮอล์ อะซิโตน หรือมีเทน เป็นต้นไหลผ่านเข้ามาภายในระบบ ความร้อนจากขดลวดความร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ 1600–2000°C ซึ่งทำให้มีอุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วงประมาณ 550 – 750°C อุณหภูมิสูงจะทำให้อะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆ แยกตัวออกจากโมเลกุลของแก๊สและไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้เตรียมไว้บนแผ่นตัวอย่าง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์

ในการสังเคราะห์แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน วิธีเทอร์มอลซีวีดี จะเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันเนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ทั้งชนิดผนังเดี่ยวและหลายผนัง ส่วน PE-CVD นั้นสามารถสังเคราะห์ ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400°C) แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนมากจะเป็นชนิดหลายผนังเท่านั้น ส่วนวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อน นั้นมีหลักการเดียวกันกับวิธีเทอร์มอลซีวีดี เพียงแต่ใช้ขดลวด ที่มีอุณหภูมิสูงในการแยกแก๊สเท่านั้น ข้อดีของวิธีนี้คือง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ แต่โดยส่วนมากแล้วคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้ยังมีคุณภาพที่ต่ำ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น ความดันภายในระบบ ชนิดของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิฐานรองหรืออัตราการไหลของแก๊สที่เป็นแหล่งกำเนิดสารประกอบคาร์บอน เป็นต้น ส่วนวิธี Vapor Phase Growth นั้น ใช้แก๊สของโลหะ เช่น Ferrocene, $Fe(CO)_5$ ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก สองวิธีหลังนี้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ละจำนวนมากได้ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถควบคุมทิศทางและตำแหน่งของทิวบ์ได้ง่ายนักและก๊าซที่ใช้ส่วนมากเป็นก๊าซที่มีพิษ (เช่น CO เป็นต้น)

ปริญญาณิพนธ์นี้ ศึกษาสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อน (HF-CVD) โดยใช้ไอรอะเหยของเอทานอลเป็นสารแหล่งกำเนิดคาร์บอนใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวนำพา อัตราส่วนของไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่ายต่อไฮโดรเจนรวมประมาณ 10 % โดยปริมาตร ขดลวดความร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 2000°C ทำให้ได้อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วงประมาณ 550-750°C โดยสังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศ ใช้ซิลิคอนเป็นฐานรอง ใช้เหล็กเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.19 วิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน (Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD))

1.5 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์

กลไกของการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ในปัจจุบันยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่แน่ชัดได้ว่าเกิดลักษณะใด ซึ่งจะทราบได้ในช่วงระหว่างที่คาร์บอนนาโนทิวป์ก่อตัวขึ้น ลักษณะการก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ จะสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ

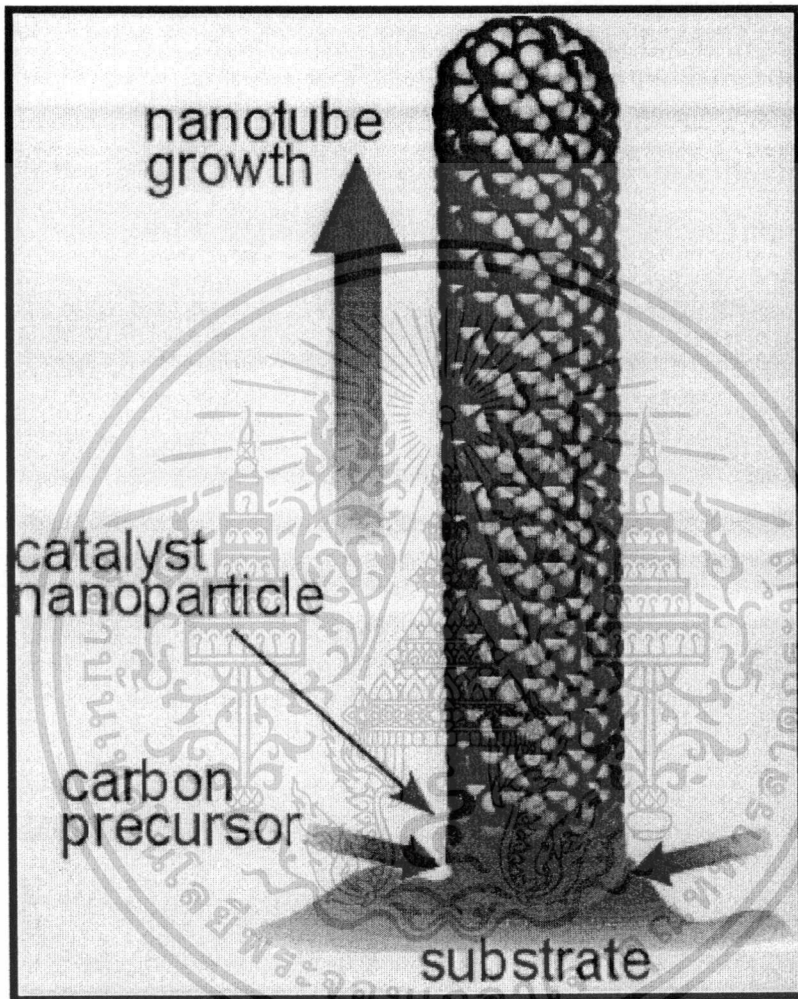
- 1) กลไกการเกิดแบบ Root Growth
- 2) กลไกการเกิดแบบ Tip Growth

1.5.1 Root Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ดังแสดงในรูปที่ 1.20 อธิบายได้คือที่อุณหภูมิสูงพอเหมาะ จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon source) และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาและเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าอุณหภูมิด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่งและก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิว์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา



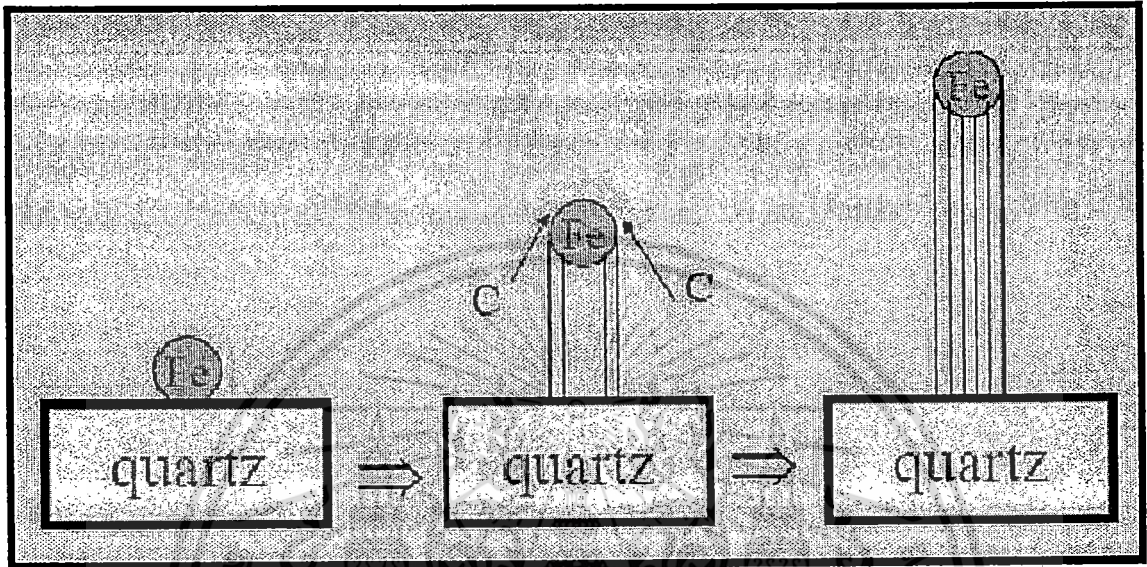
รูปที่ 2.20 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิว์แบบ root grow

1.5.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิว์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิว์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้มีโลหะตัวเร่งอยู่ที่ปลายทิว์ ดังแสดงในรูปที่ 1.21 อธิบายได้คือ ที่อุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนและอุณหภูมิสูงจะทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมากจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งและเนื่องจากอุณหภูมิด้านบนของโลหะตัวเร่งสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิด้านล่าง จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งตกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่งและก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.21 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Tip Growth

จากกลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ทั้ง 2 ลักษณะ จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีจุดหลอมที่ต่ำ เพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลวและโลหะตัวเร่งควรมีความสามารถในการละลายคาร์บอนที่ดี เพื่อให้อะตอมคาร์บอนสามารถละลายในโลหะตัวเร่งได้จำนวนมากๆ

1.6 เครื่องมือวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

เนื่องจากการศึกษาด้านนาโนเทคโนโลยีเป็นการศึกษาเกี่ยวกับสิ่งที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร ในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือซึ่งสามารถเข้าถึงสิ่งเล็กๆ มากๆ เหล่านี้ได้ ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบแสงมีขีดจำกัดในกำลังขยายเนื่องจากการแทรกสอดของแสง ดังตารางที่ 1.2 จะแสดงค่า Resolution สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ

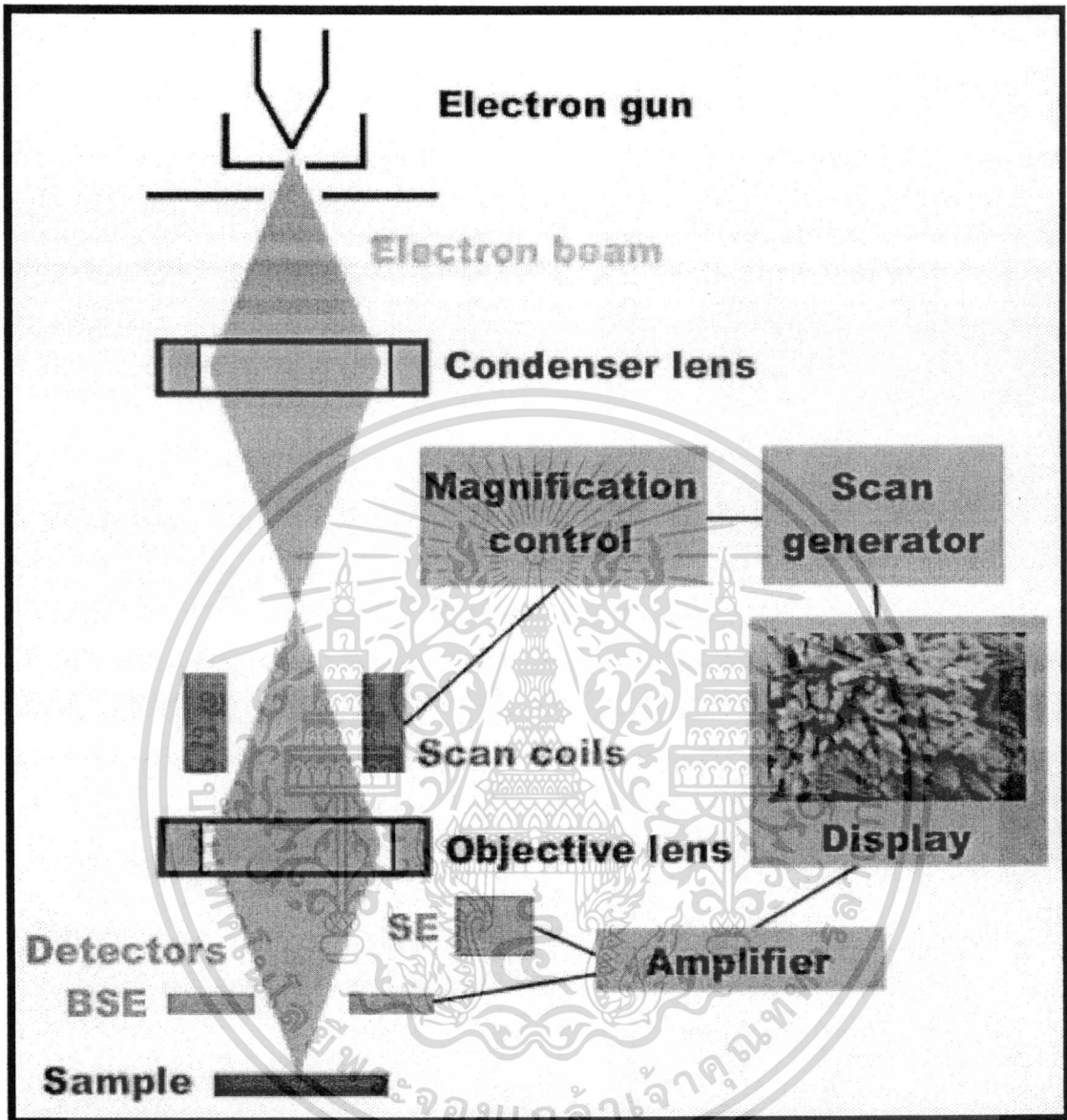
ตารางที่ 1.2 แสดงค่า Resolution สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ

| เทคนิค | ข้อจำกัด | Resolution |
|--|---------------------------|------------------|
| คา | เรตินา | 70,000 อังสตรอม |
| กล้องจุลทรรศน์แบบแสง | การเลี้ยวเบนของแสง | 3,000 อังสตรอม |
| กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน | 30 อังสตรอม |
| กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน | การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน | 1 อังสตรอม |
| กล้องจุลทรรศน์แบบ field ion | ขนาดอะตอม | 3 อังสตรอม |
| near-field scanning probe microscopies | ขนาด "aperture" | 0.1-100 อังสตรอม |

จากตารางที่ 1.2 จะเห็นได้ว่า งานวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยี มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติ ขนาดและความบริสุทธิ์ ซึ่งประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สำหรับวิเคราะห์ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์ EDX สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ บนฐานรองและ Raman Spectroscopy สำหรับวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์

1.6.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope (SEM))

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 1.22 จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่าน Condenser lens เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก จากนั้น ลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสโดย Objective lens ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาและกราดในระนาบ xy หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกแปลงเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพต่อไป



รูปที่ 1.22 ไคอะแกรมการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

1.6.1.1 องค์ประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบสำคัญ คือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และเลนส์อิเล็กตรอน แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญของ SEM โดยทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สามารถผลิตกระแสจำนวนมาก วัสดุที่ใช้ทำปืนอิเล็กตรอนนี้ต้องมีเสถียรภาพสูง ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญมี 3 ตัวได้แก่ ขนาดของลำอิเล็กตรอน ณ จุดตกกระทบ ปริมาณกระแส ณ จุดตกกระทบ และมุมคอนเวอร์เจนต์ ภาคตัดขวางของลำอิเล็กตรอนที่ส่งออกไปต้องเป็นจุดที่เล็กๆ ในปัจจุบันมีปืนอิเล็กตรอนที่นิยมใช้งานอยู่ 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่ ก๊าซแคโทดร้อน ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ลวดทังสเตน (Tungsten Filament) เป็นอิเล็กตรอนชนิดนี้เป็นแบบที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกและไม่ต้องการสภาพสุญญากาศ ใช้หลักการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากความร้อน หรือเรียกว่าแบบเทอร์มิออนิกอิมิชชัน (Thermionic emission)

2. ผลึก LaB6 (Lanthanum Hexaboride Crystal) เป็นอิเล็กตรอนชนิดนี้ทำจากทังสเตน ใช้หลักการทำงานแบบเทอร์มิออนิกอิมิชชัน เช่นเดียวกัน แต่สามารถให้ความสว่าง (Brightness) สูงกว่า 10 เท่า มีอายุการทำงานนานกว่า แต่มีข้อเสียคือ ราคาแพง และต้องการสภาพการทำงานที่เป็นสุญญากาศที่พิเศษ

3. แหล่งกำเนิดแบบโคลดฟิลด์อีมิชชัน (Cold Field Emission Source) แหล่งกำเนิดชนิดนี้ทำจากทังสเตนเช่นกัน แต่ใช้หลักการทำงานของการทะลุผ่านกำแพงศักย์แบบควอนตัม (Quantum tunneling) และสามารถให้ความสว่างสูงมาก ทำงานที่อุณหภูมิห้อง

4. แหล่งกำเนิดแบบช็อตคีย์ฟิลด์อีมิชชัน (Schottky Field Emission Source) แหล่งกำเนิดชนิดนี้ ใช้หลักการทำงานของการทะลุผ่านกำแพงศักย์แบบควอนตัม เช่นเดียวกัน แต่ต่างกันตรงที่ป็นอิเล็กตรอนชนิดนี้ ทำจากทังสเตน ที่เคลือบด้วย ZnO และต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1800°K เลนส์อิเล็กตรอนเนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุลบ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะมีแรงกระทำกับล่ออิเล็กตรอน ดังนั้นเราสามารถใช้หลักการนี้ในการโฟกัสล่ออิเล็กตรอนได้ ซึ่งเราจะเรียกเครื่องมือที่สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับ โฟกัสล่ออิเล็กตรอนนี้ว่า Condenser lens โดยจะประกอบด้วยขั้วแม่เหล็กสองขั้วและอาศัยคลวดทองแดงสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเมื่อให้กระแสไฟฟ้า กลางเลนส์แม่เหล็กจะมีช่องสำหรับให้ล่ออิเล็กตรอนผ่าน แรงแม่เหล็กจะบีบล่ออิเล็กตรอนไปโฟกัสที่จุดโฟกัส ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้น ทำหน้าที่โฟกัสล่ออิเล็กตรอนให้ไปตกกระทบที่ผิวของวัตถุเป้าหมายโดยมีคอยล์กวาดภาพ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดล่ออิเล็กตรอนบนผิววัตถุอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) เมื่อล่ออิเล็กตรอนพุ่งเข้าชนชิ้นงานจะถ่ายเทพลังงานให้อะตอมในสารตัวอย่าง ซึ่งหากพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน เนื่องจากโอกาสการเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิที่พุ่งชนสามารถเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงาน หากอิเล็กตรอนปฐมภูมิสามารถแทรกผ่านชิ้นงานได้ลึก โอกาสเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิก็จะน้อยลง ดังนั้นอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนใหญ่จะเกิดจากบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron Detector) จะเลือกเฉพาะสัญญาณที่ต้องการ เนื่องจากบริเวณผิวจะมีสัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอะตอมของชิ้นงานและอิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนหลายชนิดหากสัญญาณที่ต้องการนำไปสร้างภาพคืออิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอน

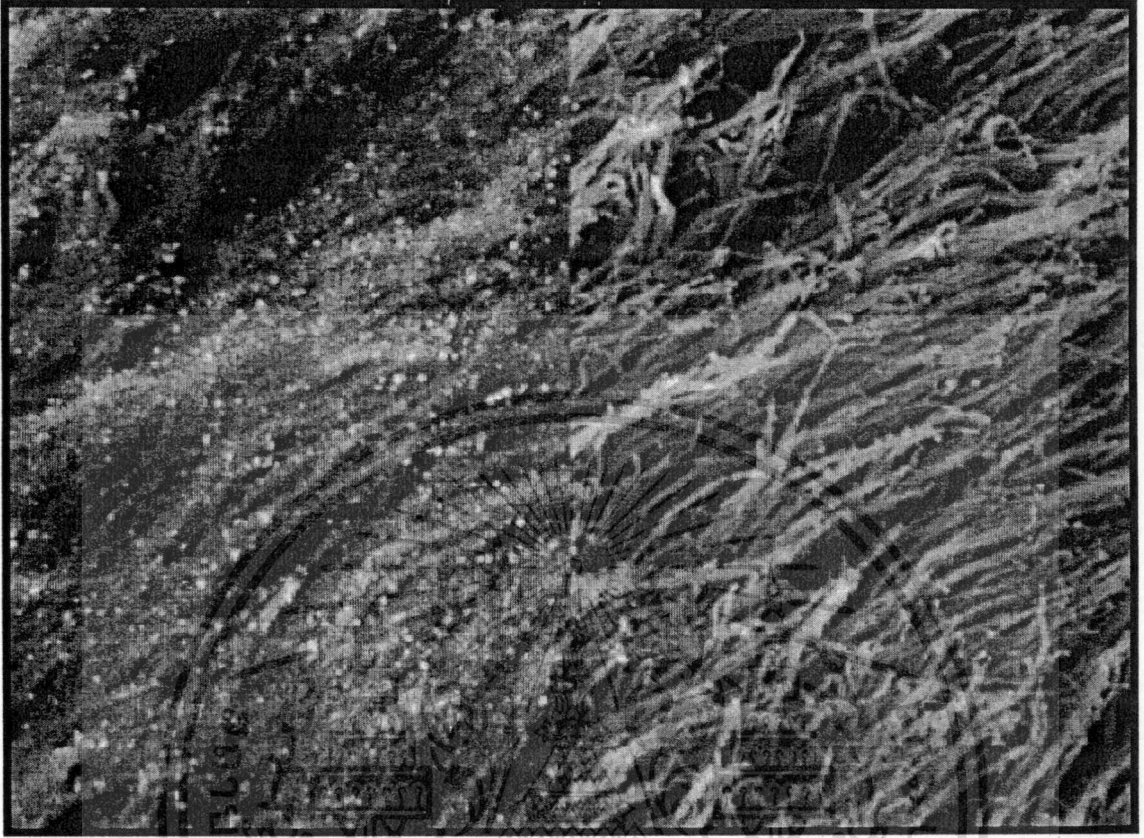
ทุติยภูมิ จะถูกดึงด้วยสนามฟ้าจากหัววัดสัญญาณ ซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะมีพลังงานต่ำจึงเคลื่อนที่อยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนเข้าสู่หัววัดสัญญาณจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชน Scintillator (ทำมาจาก CaF_2) ทำให้เกิดโฟตอน ซึ่งจะถูกส่งไปตาม Light guide เพื่อเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและนำไปขยายสัญญาณต่อไป

1.6.1.2 การเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบผิวชิ้นงานจะทำให้เกิดผลจากอันตรกิริยาต่างๆภายในระบบ หัววัดสัญญาณจะตรวจวัดสัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้น เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิหรือ Backscatter electron และนำสัญญาณไปแสดงออกบนจอ Cathode Ray Tube (CRT) โดย SEM จะมีระบบชุด Scanning coil ซึ่งเป็นขดลวดที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของชิ้นงาน ซึ่งสัญญาณที่ควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนนี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงตำแหน่งบนจอภาพแบบจุดต่อจุด ปริมาณของสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมความสว่างบนจอ รูปที่ 1.23 เป็นภาพตัวอย่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เนื่องจากพื้นที่ในการกราดลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงานมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่แสดงผลบนจอภาพ ดังนั้นเราจะได้กำลังขยายของกล้อง SEM คือ

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่แสดงผลบน CRT}}{\text{พื้นที่กราดลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงาน}}$$

สำหรับความละเอียดของภาพจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการกราดลำอิเล็กตรอน ถ้าใช้ความเร็วในการกราดมีค่าสูงก็จะทำให้ภาพมีความละเอียดต่ำ และหากใช้ความเร็วในการกราดลำอิเล็กตรอนต่ำก็จะทำให้ภาพมีความละเอียดสูง ซึ่งเราสามารถควบคุมความเร็วของการกราดลำอิเล็กตรอนด้วยอุปกรณ์ Scanning coil



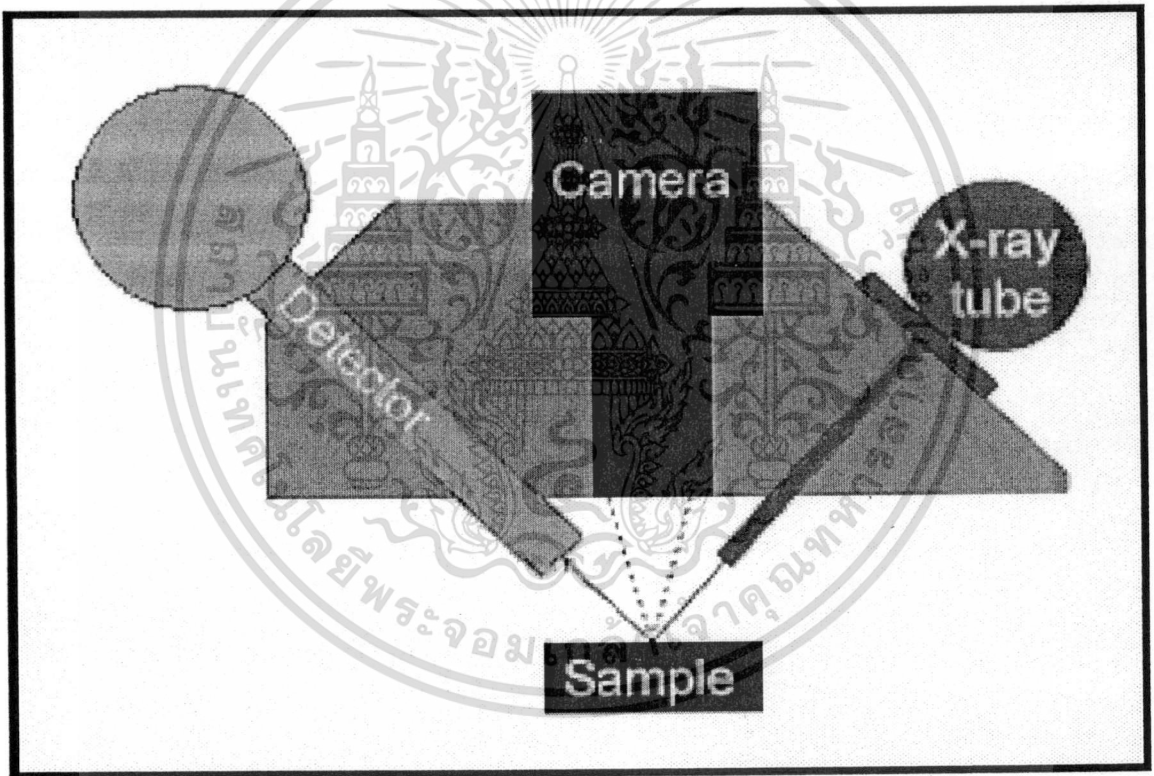
รูปที่ 1.23 ภาพถ่าย SEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์

1.6.2 การวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบ Energy Dispersive X-ray (EDX) จากสัญญาณ X-Ray EDX หรือ EDS เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้วงองค์ประกอบของธาตุ ในของแข็งและของเหลวโดยการฉายด้วยรังสีเอกซ์ เพื่อวิเคราะห์การกระจายของพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ได้จากอะตอมของชิ้นงาน โดยจะแสดงความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้บนแกนตั้งและแสดงค่าพลังงานบนแกนนอน เป็นค่าพลังงานที่ได้จากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้าสู่วงในซึ่งจะมีความเฉพาะเจาะจงของอะตอมแต่ละธาตุ ในการวิเคราะห์ ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ จะถูกฉายด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานปลดปล่อย รังสีเอกซ์ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละธาตุออกมา จากนั้น Energy dispersive detector จะตรวจสอบสเปกตรัมของรังสีที่ถูกปล่อยออกมาแล้วนำไปแสดงผลต่อไป

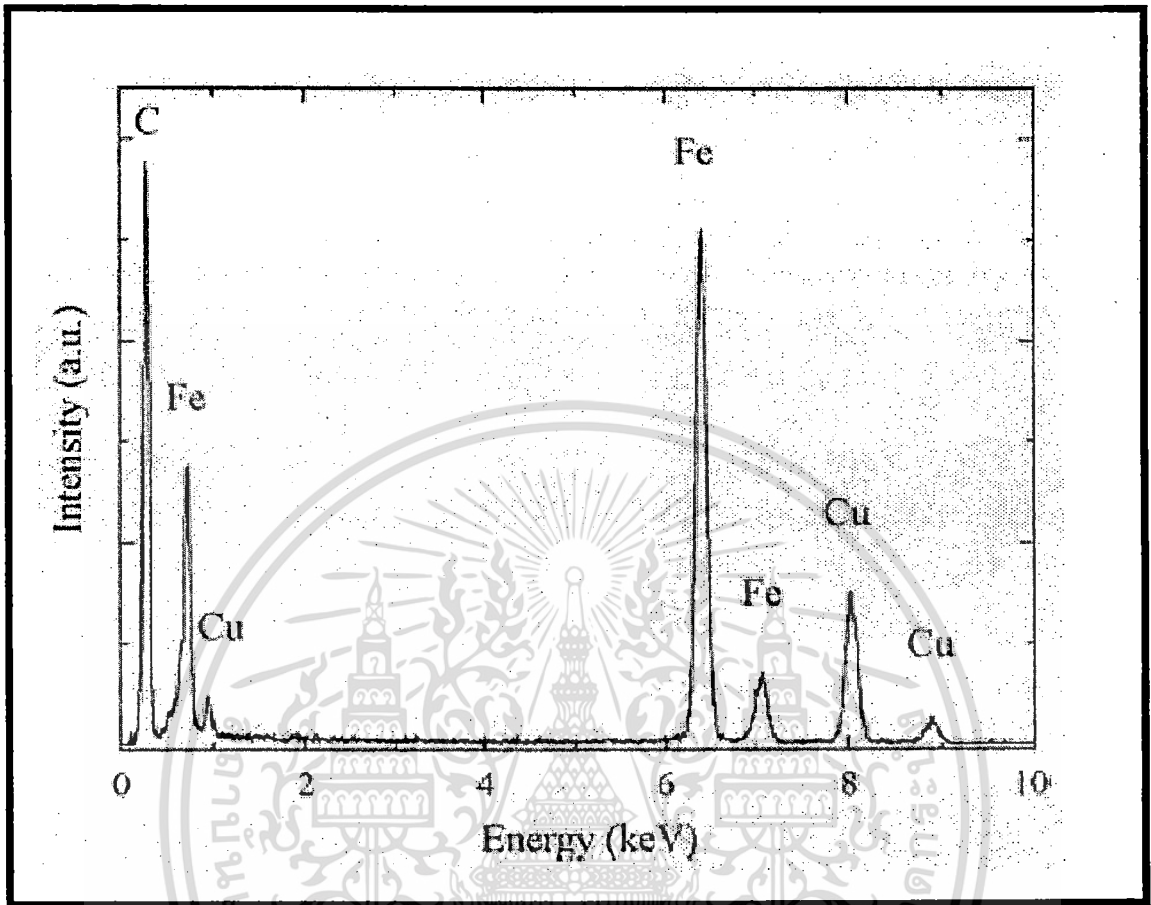
1.6.2.1 หลักการทำงานของ Energy Dispersive X-Ray (EDX)

รูปที่ 1.24 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องระบบ Energy dispersive X-ray เมื่อรังสีเอกซ์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
กระทบชิ้นงานจะมีอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนชั้นใน เนื่องจากรังสีเอกซ์มีพลังงานมากกว่าพลังงานยึด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานจนดับและหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้เกิดที่ว่างในวงโคจร หลังจากนั้นอิเล็กตรอนตัวอื่นที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ อิเล็กตรอนวงนอกนี้ เรียกว่า Relaxation และอะตอมจะปล่อยรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละอะตอมออกมาในระดับพลังงานที่สูงกว่าจะตกเข้าไปแทนที่และปลดปล่อยพลังงาน ผลของพลังงานนี้จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าหลุดออกไป เรียกว่า Auger electron ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายที่ได้จากกระบวนการ Auger emission โดยรังสีเอกซ์จะทำให้อิเล็กตรอนตัวแรกหลุดออกไปจากวงใน ทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนตัวที่สอง รูปที่ 1.25 เป็นภาพถ่ายตัวอย่างจาก EDX ขององค์ประกอบธาตุต่างๆ



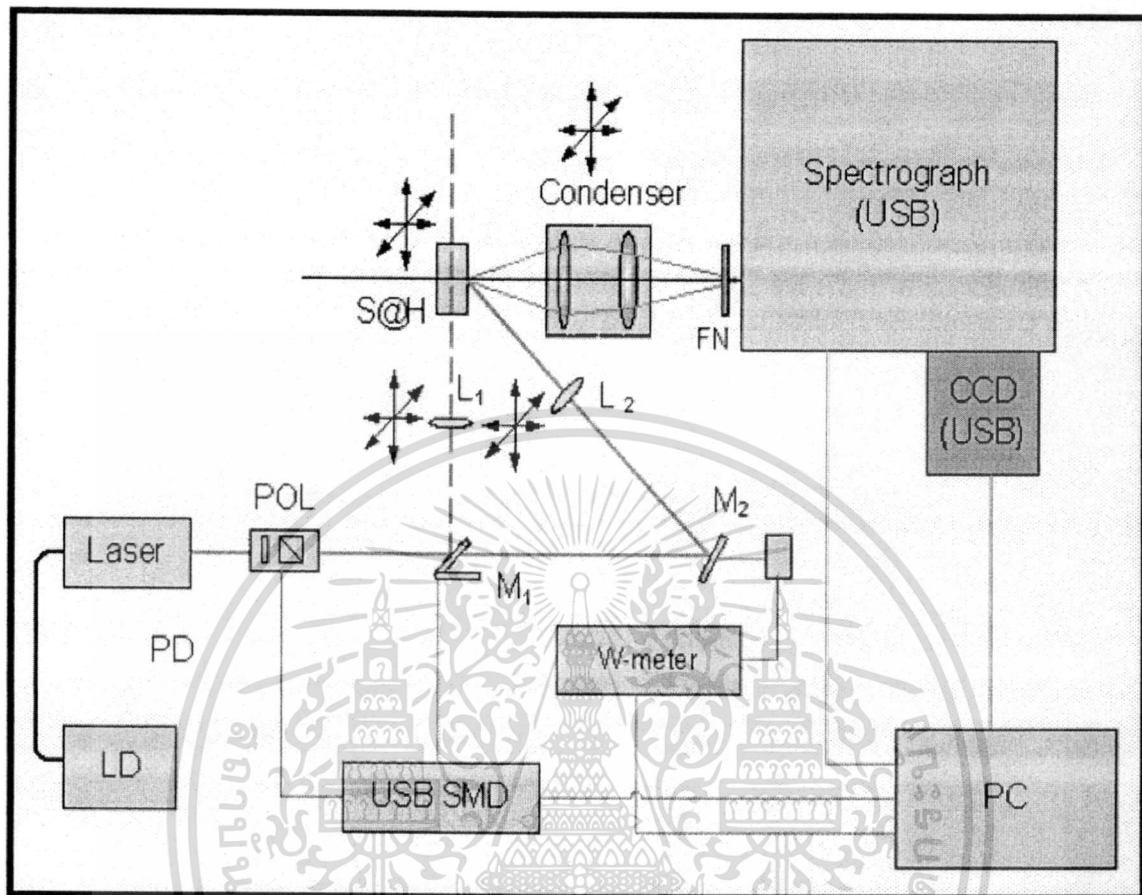
รูปที่ 1.24 ไคอะแกรมการทำงานของเครื่อง ระบบ Energy Dispersive X-Ray (EDX)



รูปที่ 1.25 ภาพจาก EDX ขององค์ประกอบธาตุต่างๆ

1.6.3 การวิเคราะห์คุณภาพของธาตุด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

Raman Spectroscopy เป็นรูปแบบหนึ่งของ Vibration Spectroscopy เช่นเดียวกับ Infrared (IR) Spectroscopy แต่แถบอินฟราเรดเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ส่วนแถบรามานเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยน ความเป็นขั้วได้ (polarizability) มีหลายกรณีที่การทรานซิชันเกิดขึ้นได้ในกรณีของรามาน แต่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีของอินฟราเรด



รูปที่ 1.26 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่อง Raman Spectrometer

รูปที่ 1.26 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของเครื่อง Raman Spectrometer โดยทั่วไป เครื่อง Raman Spectrometer จะมีส่วนประกอบพื้นฐาน 3 ส่วน คือ ส่วนเลเซอร์ ส่วนของ Probe และ ส่วน Spectrograph

Laser: เลเซอร์จะถูกใช้ในระบบของ Raman Spectrometer เนื่องจากเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว

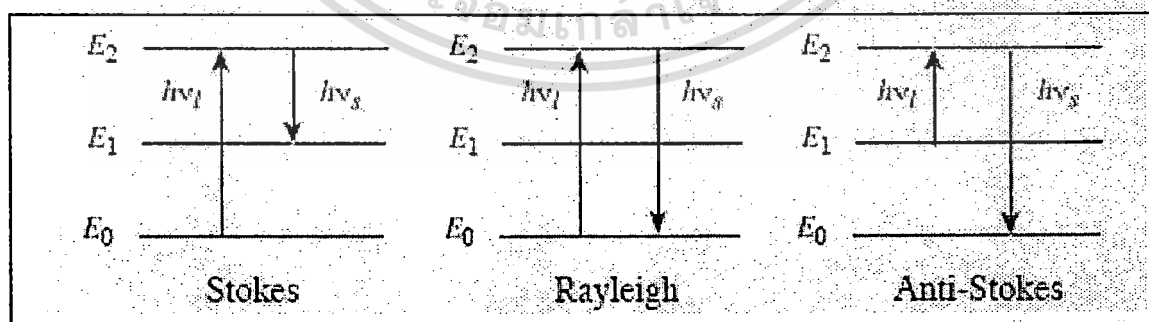
Probe: โพรบจะทำหน้าที่วัดปริมาณของโฟตอนที่กระเจิงออกมา โดยกรอง Rayleigh scatter และสัญญาณอื่นๆ ออกไป แล้วส่ง Raman scatter ไปยัง spectrograph มี Probe บางชนิดที่ทำหน้าที่โฟกัสลำแสงเลเซอร์ซึ่งตกกระทบชิ้นงานด้วย

Spectrograph: เมื่อ Spectrograph ได้รับ Raman scatter ก็จะส่งต่อผ่านเกรตติงเพื่อแยกตามความถี่ แล้วส่งต่อไปยัง detector ซึ่งจะทำการบันทึกความเข้มของ Raman scatter ในแต่ละค่าความยาวคลื่น ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้จะนำมา เขียนลักษณะของ Raman Spectrum

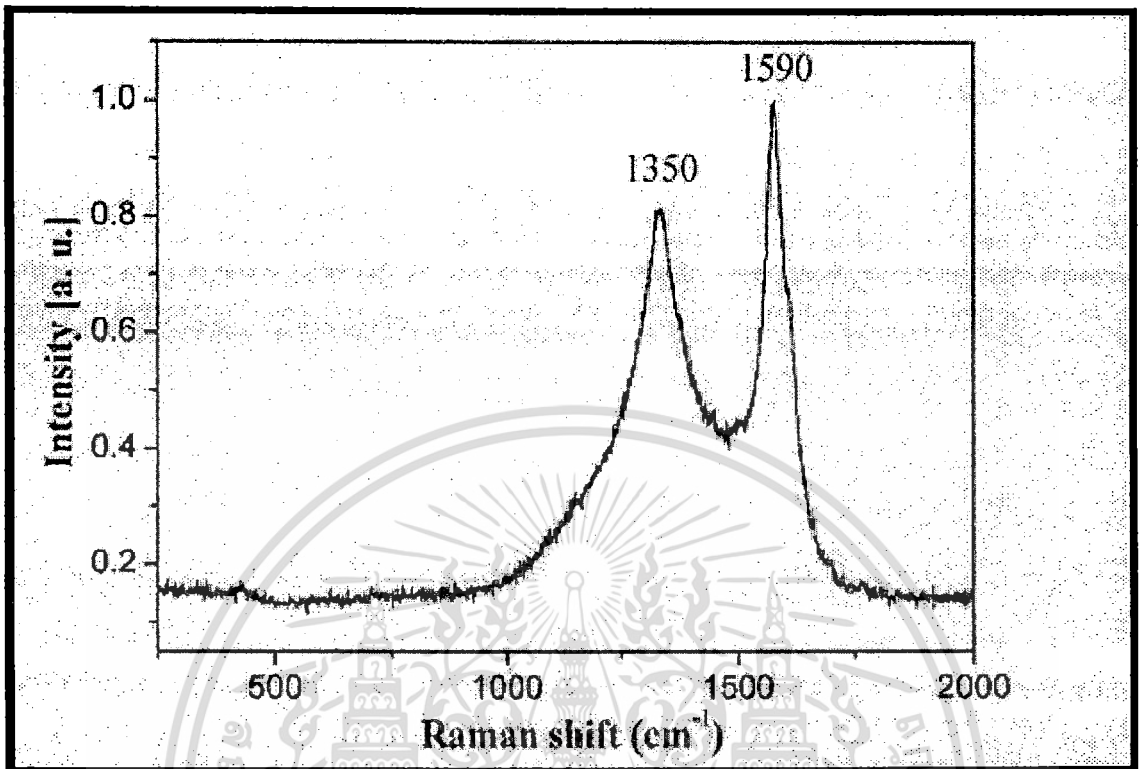
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.3.1 หลักการทำงานของ Raman Spectroscopy

เมื่อลำแสงกระทบสารตัวอย่าง โฟตอนจะถูกดูดกลืนและกระเจิงออกมา ส่วนใหญ่โฟตอนที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่ตกกระทบ เรียกส่วนนี้ว่า Rayleigh scatter ซึ่งอิเล็กตรอนจะกลับสู่ระดับพลังงานเดิม ก่อนที่จะได้รับการกระตุ้นจากโฟตอน แต่มีโฟตอนบางส่วน (ประมาณ 1 ใน 10⁷) ที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นเปลี่ยนไป โฟตอนที่มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปนี้เรียกว่า Raman scatter โฟตอนที่เป็น Raman scatter นี้ ส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นมากกว่า ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (Stokes shift) แต่ก็มีส่วนน้อยที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (anti-Stokes shift) Raman scattering ทั้งสองแบบ อิเล็กตรอนจะไม่ได้กลับมาสู่ระดับพลังงานเดิม Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนสูงกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น ส่วน anti-Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น Stokes scattering จะมีปริมาณมากกว่า anti-Stokes scattering จากรูปที่ 1.27 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering แต่ละกรณี โฟตอนที่ตกกระทบจะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า (virtual state) เมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ก็จะปล่อยโฟตอนออกมาสเปกตรัมแบบรามานจะเป็นกราฟระหว่าง ความเข้มของรังสีรามานที่กระเจิงออกมา เทียบกับความถี่ที่แตกต่างออกไปจากความถี่ของแสงตกกระทบ (นิยมใช้หน่วยของเลขคลื่น, cm^{-1}) ซึ่งความแตกต่างของความถี่นี้จะเรียกว่า Raman Shift ค่าที่ใช้ในการสร้างกราฟนิยมใช้ความถี่ในย่านของ Stokes รูปที่ 1.28 เป็นตัวอย่างของกราฟรามานที่ได้จากการ์บอนนาโนทิวป์



รูปที่ 1.27 ระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering



รูปที่ 1.28 กราฟรามานที่ได้จากคาร์บอนนาโนทิวป์

โดยทั่วไปแล้ว ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยเทคนิครามาน มีความถี่ที่สนใจอยู่ 3 ย่านคือ

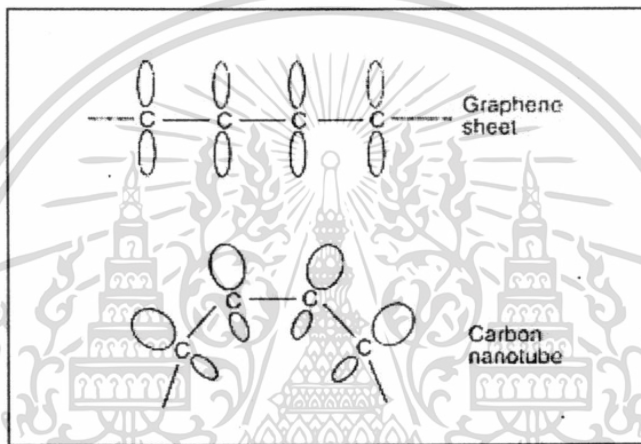
1) ความถี่ที่อยู่ในช่วง $<200 \text{ cm}^{-1}$ จะเรียกย่านความถี่นี้ว่า RBM (radial breathing mode) หากมีความถี่ในช่วงนี้เกิดขึ้น แสดงว่าเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว

2) ความถี่เฉลี่ยประมาณ 1340 cm^{-1} เรียกว่าย่าน D-Band ซึ่งเป็นย่านที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีพันธะไม่สมบูรณ์หรือมี Defect ในย่านนี้ ไม่ควรจะมีค่าสูงของพีคมากนัก เพราะเป็นย่านที่แสดงถึงความไม่สมบูรณ์หรือมีสิ่งเจือปนที่อยู่ในรูปแบบของผลึกที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น

3) ความถี่เฉลี่ยประมาณ $1500 - 1600 \text{ cm}^{-1}$ เรียกว่าย่าน G-Band ซึ่งเป็นย่านที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีพันธะสมบูรณ์ ในส่วนของพีคที่แสดงถึงความบริสุทธิ์นั้น ความกว้างของแถบ G-band ยังบ่งบอกถึงคุณสมบัติการเป็นตัวนำที่ดีหรือสารกึ่งตัวนำของคาร์บอนนาโนทิวป์อีกด้วย ดังนั้น การวิเคราะห์คุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ จะหาได้จากการนำค่าพื้นที่ใต้กราฟของพีค G มาหารกับพีค D หรืออัตราส่วนของ $I(G)/I(D)$ ซึ่งค่าที่มากจะแสดงถึงความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์

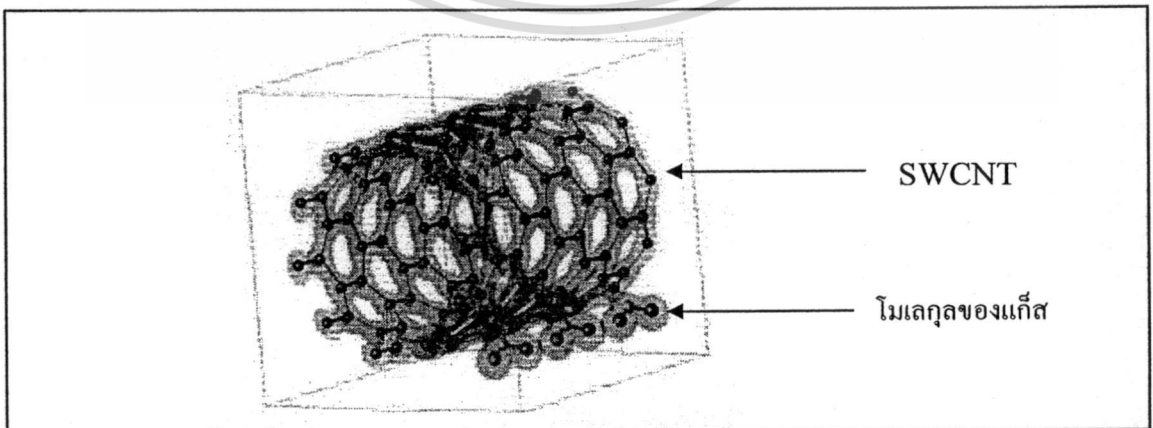
1.7 หลักการพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับเซนเซอร์เคมี

ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) เกิดจากการถ่ายประจุจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง เซลล์ไฟฟ้าเคมีอันหนึ่งจึงต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วจึงเกิดเป็นวงจรปิดได้ ประจุที่ถ่ายเทในชั้นตัวอย่างอาจเป็นทั้งอิเล็กตรอนหรือโฮลหรือทั้งสองอย่าง แผ่นกราฟีนที่ประกอบกันเป็นผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีลักษณะโค้ง อิเล็กตรอนจึงสามารถเปลี่ยนรูป จากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เป็นการกระจายตัวอย่างไม่สมดุลทั้งด้านในท่อและนอกท่อ คาร์บอนนาโนทิวบ์ทรงกระบอก (cylindrical sheet) ดังแสดงในรูปที่ 1.29



รูปที่ 1.29 แสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบน ระนาบแผ่นกราฟีนที่ผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์

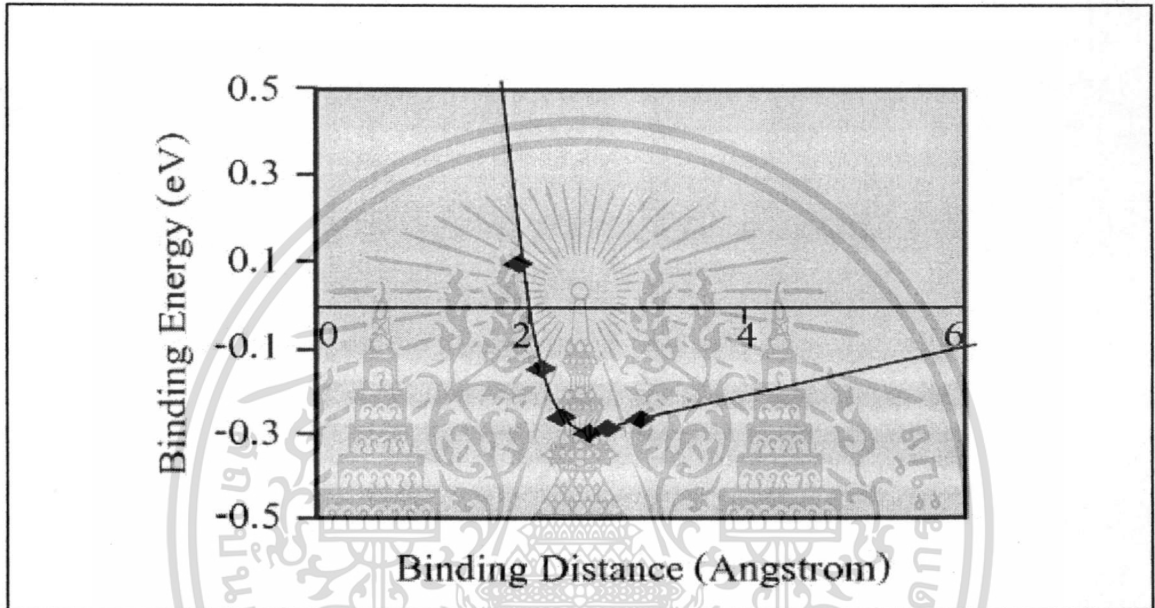
เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการผิดรูปด้านนอกท่อ จึงมีเฉพาะ π - electron ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าเคมี คาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นกับโมเลกุลของแก๊ส $CO_2, NO_2, NH_3, O_2, C_2H_5OH$ เป็นต้น โดยมีโมเลกุลของการยึดเกาะ โมเลกุลของแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังแสดงในรูปที่ 1.30



รูปที่ 1.30 แสดง โมเดลการยึดเกาะ โมเลกุลของแก๊สจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT

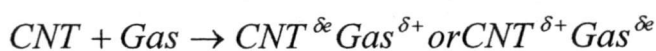
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังการยึดเกาะ (Binding Energy) ของโมเลกุลแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว จะเป็นฟังก์ชันกับระยะทางจากโมเลกุลของแก๊สถึงคาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งจากการคำนวณกับโมเลกุลแก๊สของ NO_2 ที่มีโครงสร้างการยึดเหนี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว ตามโมเดลรูปที่ 2.30 จะมี adsorption Energy ประมาณ 0.3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 1.31



รูปที่ 1.31 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ NO_2 กับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว

พบว่าโมเลกุลของแก๊สที่กล่าวข้างต้นมีการแพร่ที่สูงบนพื้นผิวคาร์บอนนาโนทิวบ์ จากการวิเคราะห์ด้วยความหนาแน่นอิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่า ประจุอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากอะตอมคาร์บอนกับโมเลกุลของแก๊ส จะถูกถ่ายหรือดึงจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำให้มีประจุพาหะ (carrier) มากขึ้นหรือลดลง ทำให้การนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวและชนิดหลายผนัง เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามลำดับ ปฏิริยาไฟฟ้าเคมีทั่วไปเขียนได้ดังนี้



เมื่อ δ คือ ตัวเลขแสดงจำนวนประจุที่ถูกถ่ายระหว่างเกิดปฏิริยา

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นอยู่กับ โครงสร้างอะตอมและกลไกการผิดรูป (Mechanical deformation) เป็นสำคัญ คุณสมบัติทั้งสองทำให้ คาร์บอนนาโนทิวบ์เหมาะที่จะเป็นเซนเซอร์ประสิทธิภาพสูงเนื่องจากไวต่อสารเคมีและไวต่อความกดดันทางกลและกายภาพอย่างมาก

1.8 แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor)

โลกของเราประกอบไปด้วยแก๊สหลายชนิด บางชนิดถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมและบางชนิดก็มีผลโดยตรงต่อสภาวะแวดล้อมการดำรงอยู่ของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่างๆ จึงต้องการวัดและควบคุมเพื่อให้แก๊สในส่วนต่างๆ ของกระบวนการในอุตสาหกรรมเป็นไปตามกระบวนการที่ต้องการ เพื่อความปลอดภัยของสิ่งมีชีวิตต่างๆ

จากความจำเป็นข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาการในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณแก๊สต่างๆ และใช้ในงานหลายด้าน เช่น การตรวจจับปริมาณออกซิเจนในเตาเผาเพื่อให้การลุกไหม้ของเปลวไฟเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การวัดปริมาณออกซิเจนในระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำอยู่ในค่าที่ปลอดภัยต่อการบริโภค หรือการวัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากท่อไอเสียของเครื่องยนต์สันดาปเพื่อควบคุมให้เกิดมลภาวะทางอากาศต่ำที่สุด เป็นต้น

1.8.1 ธรรมชาติของแก๊สและคุณสมบัติทั่วไป

ธรรมชาติของแก๊สได้ถูกค้นพบมาเป็นเวลากว่า 300 ปีแล้ว พบว่า อากาศที่ไม่มีมลภาวะที่ระดับน้ำทะเลจะมีแก๊ส (หรือธาตุ) ต่างๆ มากมาย ดังตารางที่ 1.3 ซึ่งพบว่าจะมีไนโตรเจน (N_2) อยู่ราว 78 % แก๊สออกซิเจน (O_2) อยู่ประมาณ 21 % ที่เหลือเป็นแก๊สอาร์กอนส่วนใหญ่ราว 1% และก็มีจำนวนของแก๊สต่างๆ เช่น CO_2 และ H_2O (ในรูปของไอน้ำ) อยู่เล็กน้อย

ตารางที่ 1.3 เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของแก๊สหลายๆ ชนิดในอากาศที่สะอาดและแห้ง

| แก๊ส | เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร | แก๊ส | เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร | แก๊ส | 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 | 0.00000002 |
| Ne | 0.0018 | CO | 0.00001 | | |
| He | 0.00052 | Xe | 0.000008 | | |

1.8.2 โมเลกุลและไอออน (Molecules and Ions)

แก๊สที่มีสมบัติและจำนวนของอะตอมที่แน่นอนเฉพาะตัว จะเรียกว่า “โมเลกุล” ทั้งอะตอมเดี่ยวและ โมเลกุลที่สามารถได้รับอนุภาคจากตัวอื่นหรือเปลี่ยนไปเป็นอนุภาคอื่น เรียกว่า “ไอออน”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุล (Molecules) คือ อะตอมจำนวนหนึ่งที่ต้องเข้าด้วยกันกลายเป็นอนุภาคที่เล็กที่สุดของสาร ที่รักษาส่วนประกอบและคุณสมบัติของสารนั้นไว้ โมเลกุลจึงเป็นการรวมตัวทางเคมีของอะตอมหนึ่งตัวหรือมากกว่า แต่แก๊สเฉื่อยซึ่งไม่รวมตัวกับธาตุใดๆ จะไม่ใช่โมเลกุล เราจะเรียกอนุภาคที่เล็กที่สุดของแก๊สเฉื่อยว่า อะตอม พบว่าในอุณหภูมิสูงๆ โมเลกุลจะแยกตัวออกจากกันอยู่ในรูปของอะตอม

สารไอออน (Ionic Substances) นอกจากอะตอมและโมเลกุล ยังมีอนุภาคชนิดที่ 3 ที่เกิดในสารโดยเรียกอนุภาคนี้ว่า “ไอออน” คือ อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่สามารถนำประจุไฟฟ้าได้

1.8.3 กฎการรั่วไหลและการแพร่กระจายของแกรแฮม (Graham's Law of Effusion and Diffusion)

การเคลื่อนที่ของอนุภาคแก๊สตรวจนับได้ 2 วิธีด้วยกัน

1. การรั่วไหล (Effusion) คือ การผ่านของแก๊สที่สามารถผ่านสิ่งกีดขวางที่มีรู เช่น ลูกโป่งที่บรรจุฮีเลียมเมื่อตั้งไว้นานจะมีขนาดไม่เท่าเดิมเนื่องจากมีฮีเลียมบางส่วนที่เล็ดลอดออกไปจากโครงสร้างธรรมชาติของยางที่ใช้ทำ

2. การแพร่กระจาย (Diffusion) หากมีใครก็ตามที่สามารถดมหรือรับรู้กลิ่นของฮีเลียมที่รั่วไหลออกมาจากข้อแรกได้ นั่นก็คือ เกิดการแพร่กระจายของแก๊สนั่นเอง

ก. อัตราการรั่วไหลและการแพร่กระจาย โมเลกุลของแก๊สที่แตกต่างกันจะเคลื่อนที่ที่อัตราแตกต่างกัน โมเลกุลที่เบากว่าจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าโมเลกุลที่หนักกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่า แก๊สไฮโดรเจนที่บรรจุในลูกโป่งจะเล็ดลอดออกมาได้เร็วกว่าแก๊สฮีเลียมและ เล็ดลอดออกมาได้เร็วกว่าแก๊สไนโตรเจน

ข. กฎของแกรแฮม กล่าวว่าการรั่วไหลของแก๊สจะแปรผกผันกับรากที่สองของมวลโมลาร์ ตามกฎของแกรแฮม อัตราการรั่วไหล (r) ของแก๊สสองตัวที่อุณหภูมิและความดันเดียวกันจะสัมพันธ์กันดังสมการ

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{\sqrt{MM_2}}{\sqrt{MM_1}}$$

1.8.4 แก๊สที่มีความสำคัญต่อมนุษย์

ก่อนจะทำการวัดหรือตรวจนับแก๊ส ต้องมีความเข้าใจคุณสมบัติและความสำคัญของแก๊สที่จะตรวจวัดก่อน ต่อไปจะเป็นตัวอย่างแก๊สที่มีความสำคัญ ซึ่งมีผลต่อมนุษย์

1.8.4.1 ออกซิเจน (Oxygen)

ออกซิเจน เป็นธาตุที่มีอยู่มากบริเวณเปลือกโลก แม้กระทั่งน้ำประกอบด้วยออกซิเจนถึง 88.9 % ของมวล แร่ส่วนใหญ่ก็ประกอบด้วยออกซิเจนที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกซิเจน ซึ่งเมื่อรวมกับธาตุอื่นๆ แล้วก่อให้เกิดรูประบบประกอบใหม่ที่เรียกว่า “ออกไซด์” แก๊สออกไซด์ ได้แก่ $\text{CO}_2, \text{CO}, \text{N}_2\text{O}_4, \text{N}_2\text{O}_3, \text{NO}_2, \text{NO}, \text{N}_2\text{O}, \text{SO}_2, \text{F}_2\text{O}, \text{Cl}_2\text{O}_2, \text{ClO}_2$ และ Cl_2O (อยู่ที่ตำแหน่งด้านขวาบนของตารางธาตุ)

ออกซิเจนในอากาศจะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ตัวมันเองจะไม่ติดไฟ แต่ช่วยให้ไฟติด ออกซิเจนในเชิงพาณิชย์ทำได้โดยการกลั่นจากอากาศแต่ก็มีจำนวนน้อย หรือไม่ก็หาจากสถานะที่บริสุทธิ์มาก นั่นคือ การแยกด้วยไฟฟ้าของสารละลายที่เป็นของเหลว หรือโดยการใช้ความร้อนแยก (Oxidation, peroxide) หรือ เกลือออกไซด์ (oxide salt)

บทบาทของออกซิเจนต่อความปลอดภัยของมนุษย์มีตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจน เช่น ผลกระทบ Atmospheric anoxia ที่ขาดออกซิเจนอันเนื่องจากการขึ้นไปที่สูง หรืออยู่ในที่ที่มีออกซิเจนน้อย เป็นต้น ตัวอย่างนี้คือ ภาวะในการขาดออกซิเจนเนื่องจากกลไกต่างๆ ของมนุษย์

นอกจากนี้อันตราย จากออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสูง อาจจะทำให้เกิดการลุกไหม้ จึงไม่ควรให้ออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสูงอยู่ใกล้เปลวไฟ หรือในทางการรักษาผู้ป่วยพบว่าการใช้ ออกซิเจนที่มีความดันสูง อาจจะทำให้เกิดอาการชักได้ และเชื่อว่าออกซิเจนจะมีพิษต่อเอ็นไซม์ในสมอง นอกจากนี้ภาวะ Retrolental hyperplasia ในทารกซึ่งทำให้ตาบอด เป็นอาการแทรกซ้อนจากการรักษาด้วยออกซิเจนที่สำคัญด้วย ดังนั้น ในทางการพยาบาลจึงต้องมีการควบคุมความกดดันและความเข้มข้นของออกซิเจนตามความเหมาะสมของแต่ละกรณี

ส่วนบทบาทของแก๊สออกซิเจนเบื้องต้นในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การสร้างวงจรรวม การทำเหล็ก งานเชื่อม งานรักษาสิ่งแวดล้อม การบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

1.8.4.2 แก๊สตระกูลคาร์บอน (Carbon Species)

คาร์บอน มีอยู่ด้วยกัน 2 รูปที่เป็นแก๊สออกไซด์ซึ่งมีความเสถียรคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

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

ออกซิเจนมีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตบนโลก การขาดออกซิเจนจะส่งผลต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตได้ทันที การขาดออกซิเจนอาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ เช่น การขาดการถ่ายเทของอากาศ การขาดการไหลเวียนของเลือด การขาดการหายใจ เป็นต้น การขาดออกซิเจนอาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ เช่น การขาดการถ่ายเทของอากาศ การขาดการไหลเวียนของเลือด การขาดการหายใจ เป็นต้น การขาดออกซิเจนอาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ เช่น การขาดการถ่ายเทของอากาศ การขาดการไหลเวียนของเลือด การขาดการหายใจ เป็นต้น

1.1 ระดับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่กำหนดให้มีได้สถานประกอบการ

ระดับควบคุมการสัมผัสคาร์บอนมอนอกไซด์ในสถานประกอบการ ให้อยู่ในระดับความเข้มข้นไม่เกิน 35 พีพีเอ็ม Time Weighted Average, TWA โดยอาศัยการวัดด้วยเครื่องมือวัดคาร์บอนมอนอกไซด์ชนิด hopcalite

ระดับคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ผู้ปฏิบัติการสัมผัสต้องไม่เกิน 200 พีพีเอ็ม เป็นอันตราย ถ้าพบระดับสูงกว่านี้ต้องสั่งหยุดการทำงานและเมื่อระดับเกิน 500 พีพีเอ็ม ให้รีบอพยพคนออกจากสถานที่นั้นโดยทันที

2. คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่ช่วยให้ติดไฟ CO_2 เป็นแก๊สเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า -78°C ที่ความดัน 1 atm CO_2 จะเป็นของแข็งมากกว่าจะเป็นของเหลว CO_2 เป็นผลมาจากการไหม้ที่สมบูรณ์ของถ่านหิน น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ หรือเชื้อเพลิงที่มีฐานของคาร์บอน CO_2 เป็นแก๊สที่ช่วยในการดำรงชีพของมนุษย์ ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดื่มและในเครื่องดับเพลิง ขณะที่สารอาหารในร่างกายมนุษย์ไม่ทำงาน ผลผลิตของ CO_2 บางส่วนจะช่วยให้ความเป็นกรดของเลือดเหมาะสม ความผิดปกติหนึ่งของกลไกการหายใจของมนุษย์คือ การสะอึก วิธีการรักษาคือ ให้หายใจเข้าออกถุงกระดาษเพื่อสร้างระดับ CO_2 เข้าไปในปอด CO_2 จะเข้าไปเป็นตัวกระตุ้นให้หยุดการสะอึก แต่หากมีระดับของ CO_2 ในร่างกายสูงเกินไปก็ไม่มีประโยชน์ โดยหากหายใจ CO_2 ในอากาศที่เกินกว่า 10% อาจทำให้คนหมดสติ และหากรับ CO_2 ที่ระดับสูงต่อเนื่องไปอีก อาจทำให้การหายใจล้มเหลวและตายในที่สุด

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานสิ่งแวดล้อม ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกใช้เป็นตัวบอกระดับคุณภาพของอากาศในห้อง ถ้าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องมากเกินไป (อยู่ที่ระดับไม่เกิน 1000 ppm) จะทำให้รู้สึกว้าว "อบอ้าวและอับ" คุณภาพของอากาศในห้องที่ไม่ดีเป็นเหตุให้เกิดอาการ โรคอ่อนล้า สูญเสียสมาธิและเจ็บป่วยและเป็นเหตุให้เกิดความไม่สบาย

1.8.4.3 มีเทน (Methane)

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

1.8.4.4 เบนซีน (Benzene)

มีสูตรเคมี C_6H_6 เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีกลิ่นและติดไฟง่าย เป็นพวงรีวงคอมปาวด์ ใช้ละลายไขมันและสารอินทรีย์ต่างๆ และใช้สังเคราะห์สารเคมีมากมายหลายชนิด

1.8.4.5 เมทานอลและเอทานอล (Methanol and Ethanol)

1. เมทานอล หรือเรียกว่าแอลกอฮอล์ไม้ เมทิลแอลกอฮอล์ หรือคาร์บินอลเป็นของเหลวที่ไม่มีสี ติดไฟง่าย ผสมกับน้ำได้ดี เป็นพิษต่อประสาทโดยตรง กินไม่ได้ อาจทำให้ตาบอดได้ เมื่อเป็นของเหลวจะเดือดกลายเป็นไอที่ 65°C เมทานอลใช้เป็นตัวทำละลายของสารอินทรีย์ต่างๆ และใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันเบนซินได้เป็นตัวทำละลายวัสดุอินทรีย์ เช่น เซลลูลอสและวานิช ใช้ทำพลาสติก กาวเรซินและกรดอะเซติก

2. เอทานอล หรือเอทิลแอลกอฮอล์ ระเหยกลายเป็นไอที่ 78°C เป็นของเหลวที่ไม่มีสี ไม่ติดไฟไม่เป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากรับประทานเข้าไปมากๆ ใช้เป็นตัวทำละลายและเป็นตัวทำปฏิกิริยาในการเตรียมสารอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากอีธานอลได้แก่ การเจือจางในส่วนผสมของยาทำพลาสติก เหล้า แอลกอฮอล์และเครื่องสำอาง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงรถยนต์ได้อีกด้วย โดยในแก๊สโซลีนจะผสมอีธานอลประมาณ 10% แอลกอฮอล์ที่บริสุทธิ์ 100% จะถูกเรียกว่า “แอลกอฮอล์สัมบูรณ์” (absolute alcohol)

1.8.4.6 ไฮโดรเจน (Hydrogen)

ส่วนประกอบที่เห็นส่วนใหญ่ของไฮโดรเจนคือ น้ำ พบอยู่ในน้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ในอนาคตจะถูกนำมาใช้ทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิง ไฮโดรเจนมีอยู่ที่อุณหภูมิต่ำแต่สามารถจะเปลี่ยนไปเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจนสามารถนำมาทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิงได้ ไฮโดรเจนนั้นสามารถถูกติดไฟได้ง่ายและได้รับความเชื่อใจให้ถูกเลือกเป็นเชื้อเพลิงในอนาคตสำหรับรถยนต์และอากาศยาน ปฏิกิริยาของมันจะทำให้ผลิตน้ำออกมา เป็นผลให้ไม่เกิดมลภาวะ

1.8.5 หลักการตรวจวัดแก๊สแบบต่างๆ

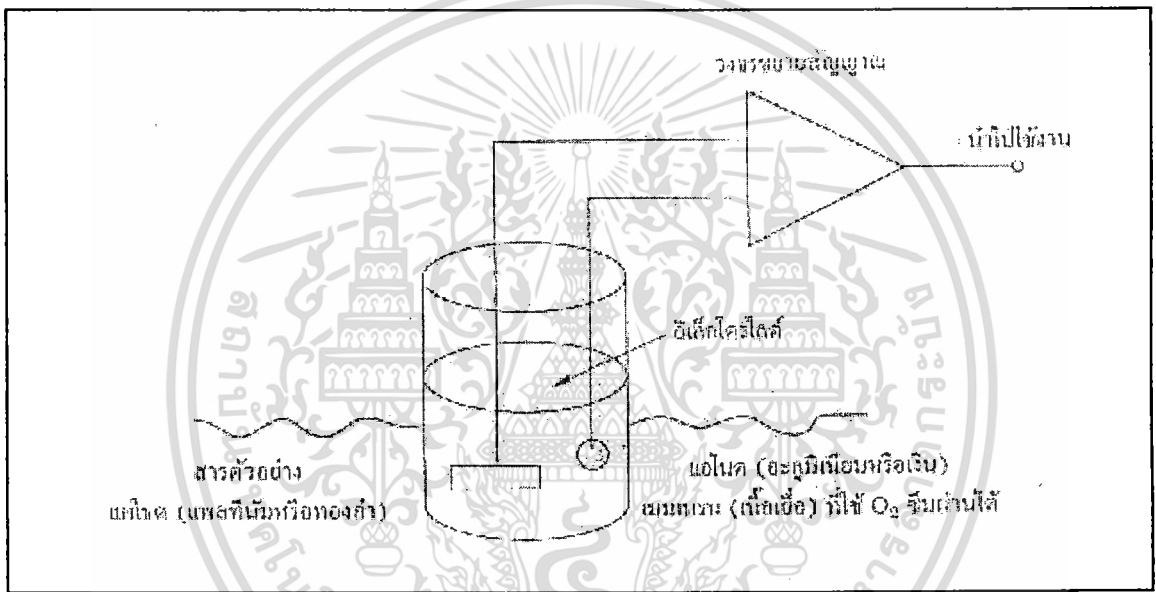
เราพบว่าส่วนมากการวัดปริมาณแก๊สในอุตสาหกรรมแทบทุกชนิด จะใช้หลักการทางไฟฟ้าทั้งสิ้น ดังนั้นเราจึงต้องรู้คุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวของมัน ซึ่งพอจะแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

1.8.5.1 การวัดปริมาณออกซิเจนที่ถูกละลาย (Dissolve Oxygen)

หลักการนี้ใช้สำหรับการวัดแก๊สออกซิเจนแบบ polarographic โดยใช้เซลล์ของคลาร์ค จากรูปที่ 2.32 การวัดค่าแบบนี้อาศัยการสลายตัวของออกซิเจน (การลดออกซิเจน) ที่เกิดขึ้นที่แคโทดซึ่งเป็นโลหะ ออกซิเจนที่อยู่ในกลุ่มแก๊สที่ต้องการวัดจะถูกทำให้ผ่านเนื้อเยื่อ เพื่อทำให้มันไปอยู่ในรูปของเซลล์ O_2 ที่อิเล็กโทรด หลังจากนั้นมันจะซึมเข้าไปอยู่ในเนื้อเยื่อชั่วระยะเวลาหนึ่ง

เมื่อการวัดทั้งสองนี้ อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนสามารถอ่านค่าได้ การวัดแบบนี้ต้องป้อนศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งเข้าไปในโพลารोगราฟอเล็กโตรด เพื่อทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้จะเปลี่ยนการนำไฟฟ้าของ สารละลายอเล็กโตรไลต์ ศักย์ไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเฉพาะกับออกซิเจน เกิด กระแสไฟฟ้าที่ไหลแปรผันตรงกับปริมาณออกซิเจนในสารละลายนั้น ในการวัดแบบโพลารोगราฟดังกล่าว จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเอาต์พุตคงที่ออกมาค่าหนึ่งอันเนื่องจากอเล็กโตรด DO ที่ หมักซึ่งจัดเป็นกระบวนการสเตอริไลซ์แล้วทำให้เกิดค่าความร้อนและกลายเป็นค่าความต้านทาน ไปในที่สุด



รูปที่ 1.32 หลักการวัดค่าออกซิเจนที่ถูกละลายแบบเซลล์ของคลาร์ก

ถ้าแก๊สที่วัดมีออกซิเจนเข้มข้นน้อยกว่า 50% จะใช้วิธีการสอบเทียบค่ากับออกซิเจน ในห้อง อากาศในห้องจะมีออกซิเจนอยู่ 20.93% แต่ถ้าต้องการวัดออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสูงกว่า นี้ ต้องทำการสอบเทียบกับออกซิเจนที่ 100% แต่ในการวัดค่าแบบดังกล่าว ต้องระวังและ บำรุงรักษาเนื้อเยื่อของอเล็กโตรดและสารที่เป็นอเล็กโตรไลต์ เพื่อให้ผลของการวัดมีค่าแม่นยำ

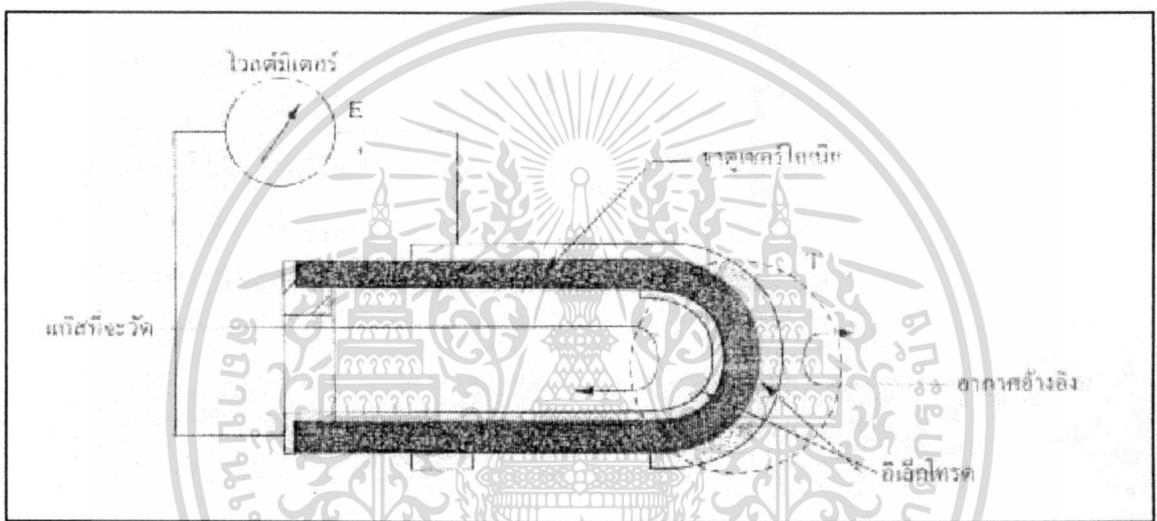
สำหรับวงจรใช้งาน ตามความจริงอเล็กโตรดของคลาร์กก็คือเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย แคโทดคือ แพลทินัมและแอโนดคืออะลูมิเนียม เมื่อศักดาไฟฟ้าเพิ่มขึ้นก็ทำให้กระแสเพิ่มขึ้น แต่ จะมีช่วงหนึ่งที่เรียกว่า plateau voltage range คือช่วงที่กระแสไฟฟ้าจะไม่เพิ่มไปตามศักดาไฟฟ้า แต่จะเพิ่มตามแรงดึงในเซลล์ ในวงจรดังกล่าวจึงต้องมีแบตเตอรี่เป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ต่อ ร่วมกับอเล็กโตรดและด้านแอโนด โดยมีเนื้อเยื่อที่จะยอมให้ออกซิเจนแพร่ผ่าน เมื่อออกซิเจน

ออกแพร่ผ่านมันก็จะทำปฏิกิริยากับแคโทดให้ไฮดรอกไซด์ไอออนออกมา ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อควรจำในการวัดออกซิเจนแบบเซลล์ของคลาร์ก

1. เนื้อเยื่อ O_2 ที่สกปรกจะเป็นเหตุให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่า
2. หากว่าเราใช้ถังความดันจะต้องใช้การสมดุลความดัน
3. สารตัวอย่างที่จะวัดต้องมีการไหลอยู่เสมอ

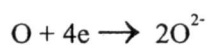
1.8.5.2 หลักการวัดออกซิเจน (O_2) โดยอาศัยหลักการของเซอร์โคเนีย



รูปที่ 1.33 หลักการวัดค่าออกซิเจนแบบเซอร์โคเนีย

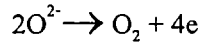
จากรูปที่ 1.33 หลักการวัดออกซิเจนแบบดังกล่าวมีหลักการทำงานดังนี้ ที่อุณหภูมิสูงๆ เซอร์โคเนีย (Zirconia) ซึ่งเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็ง จะแสดงค่าความนำด้วยไอออนของออกซิเจน โดยมีอิเล็กโทรดแพลทินัมต่อสัมผัสอยู่กับเซอร์โคเนียทั้งด้านในและด้านนอก เมื่อมีความเข้มข้นของออกซิเจนบางส่วนเพิ่มขึ้น การเคลื่อนตัวของออกซิเจนนี้จะผ่านไปยังอิเล็กโทรดของเซอร์โคเนียอีกอันหนึ่ง โมเลกุลของออกซิเจนจะได้รับอิเล็กตรอนมาจากไอออนออกซิเจนระหว่างด้านนอกและด้านในของท่อเซอร์โคเนียที่ถูกทำให้ร้อน ที่จุดนี้อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของโมเลกุลออกซิเจน ปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความดันย่อยของออกซิเจน

ทางด้านข้างอิ อิเล็กโทรดซึ่งมีความดันย่อยของออกซิเจนสูง จะมีสมการเคมีเป็น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนทางด้านที่จะวัดค่าอิเล็กโทรดซึ่งมีความดันย่อยของออกซิเจนต่ำ มีสมการเคมีเป็น



เราสามารถนำสมการของ Nernst เพื่ออธิบายการคำนวณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยวัดจากค่า E ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองเป็น

$$E = - \frac{RT}{nF} \log \frac{P_x}{P_a}$$

| | | |
|-------|-------|---|
| เมื่อ | R | = ค่าคงที่ของแก๊ส |
| | T | = อุณหภูมิสัมบูรณ์ |
| | F | = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ |
| | P_x | = ความเข้มข้นออกซิเจนบนเซอร์โคเนียของแก๊สด้านที่จะวัด (%) |
| | P_a | = ความเข้มข้นออกซิเจนบนเซอร์โคเนียของอากาศอ้างอิง (%) |

ตัวอย่างเช่นถ้าเราใช้เซอร์โคเนียเบอร์ Z021 (ข้อมูลจากบริษัท โยโกกาว่า จำกัด) ซึ่งอุณหภูมิของเซลล์มีค่าเป็น 750° แรงเคลื่อนจากสมการ จะมีค่าเป็น

$$E = -50.74 \log \frac{P_x}{P_a}$$

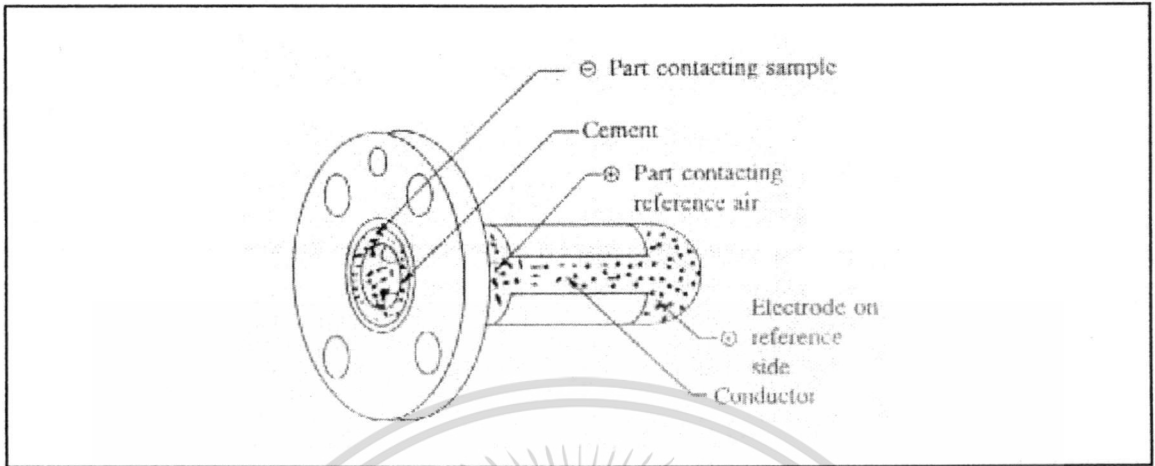
แรงเคลื่อน E ที่ได้อยู่ในหน่วย มิลลิโวลต์

ในทางกลับกัน เราสามารถหาค่าความเข้มข้นบนเซอร์โคเนียของแก๊สด้านที่ทำการวัดได้ดังนี้

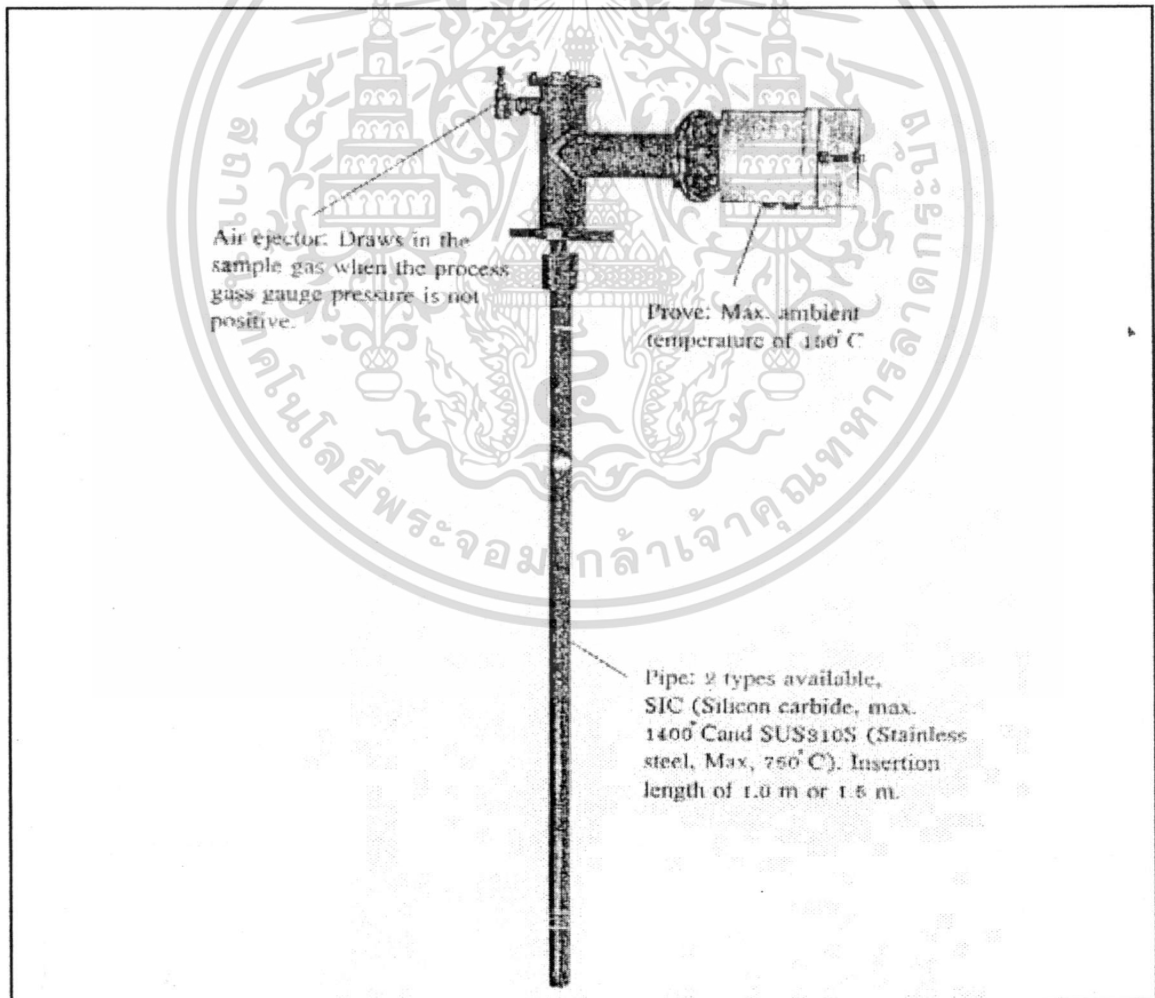
$$P_x = P_a \cdot 10^{\frac{E}{50.74}}$$

หลักการของการเซนเซอร์แบบนี้ ใช้งานกันแพร่หลายกับการวิเคราะห์แก๊ส O_2 ของปล่องไฟท่อदानในจะอยู่ร่วมกับออกซิเจน ส่วนท่อด้านนอกจะสัมผัสกับแก๊สตัวอย่างที่ต้องการวัด ยานในการวัดโดยใช้หลักการแบบนี้จะอยู่ในช่วง 0.1 – 20 % ในรูปที่ 1.35 จะแสดงลักษณะทางกายภาพของหัวตรวจวัดส่วนในรูปที่ 1.34 จะแสดงหัววัดที่ใช้งานจริงในทางอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.34 แสดงตัวอย่างของส่วนประกอบภายในหัวเซนเซอร์แก๊ส



รูปที่ 1.35 ตัวอย่างของหัวเซนเซอร์วัดค่าออกซิเจน

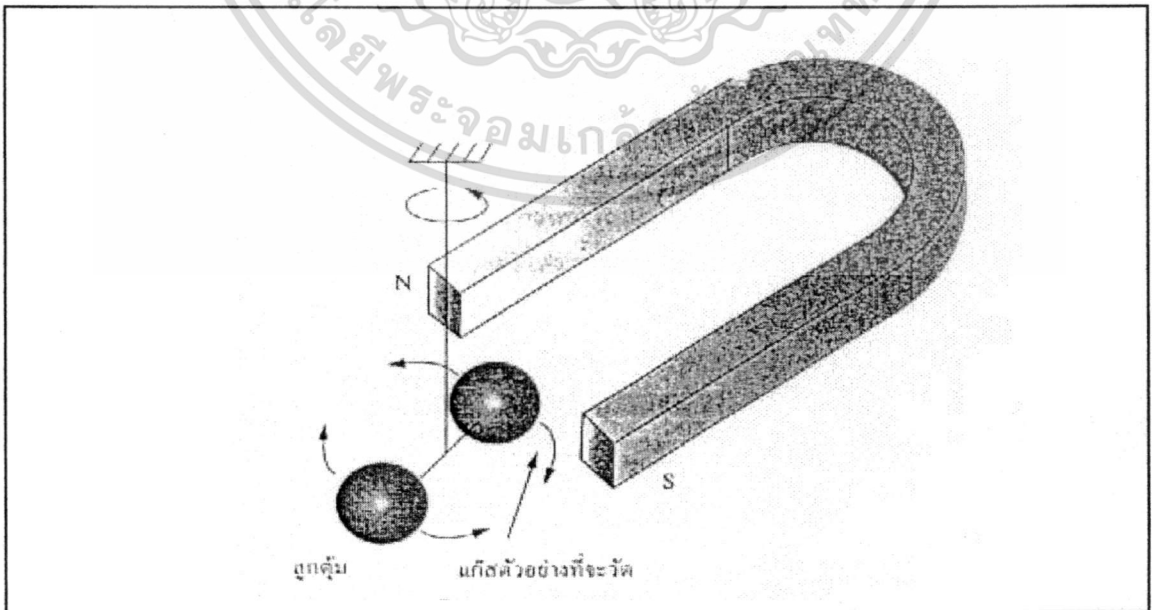
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อควรจำในการวัดออกซิเจนแบบเซอร์โคเนีย

1. ขณะที่มีการเซนเซอร์จะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 600°C
2. การวัดแก๊สที่สามารถลุกติดไฟได้เช่น ไฮโดรเจน อาจจะทำให้การวัดเกิดความผิดพลาดได้
3. แรงดันทางค่านเอาต์พุต จะเป็นสัดส่วนแบบลอการิทึมกับความหนาแน่นของออกซิเจน

1.8.5.3 หลักการวัดออกซิเจนแบบลูกตุ้มแกว่ง (Dumbbell Type)

หลักการการวัดออกซิเจนแบบนี้จะอาศัยคุณสมบัติคือ แก๊สออกซิเจนจะไม่เหมือนแก๊สอื่นตรงที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง จึงทำให้ออกซิเจนสามารถจะถูกดึงเข้าไปยังสนามแม่เหล็กได้ ส่วนแก๊สอื่นๆ จะมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อนๆ หลักการวิเคราะห์แก๊สแบบนี้จึงถูกเรียกว่า Paramagnetic analyzer มีหลักการทำงานดังนี้คือ เมื่อนำลูกตุ้มเหล็กที่ทำจากโรเดียม (Rhodium) ไปแขวนห้อยระหว่างแม่เหล็กค้ำงด้าวดังรูปที่ 1.36 ลูกตุ้มจะถูกดูดเข้าหาแม่เหล็กโดยออกซิเจนที่มีอยู่ ถ้าเราป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับเข้าไปเพื่อทำให้ออกซิเจนอยู่ในตำแหน่งสมดุล กระแสไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าก็จะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของออกซิเจน ดังนั้นเราจึงสามารถตรวจจับออกซิเจนได้จากความแตกต่างของแรงบิดที่เกิดขึ้น ย่านการวัดที่สามารถวัดได้นี้จะอยู่ในช่วง 1.0 – 20 %



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 1.36 หลักการวัดออกซิเจนแบบลูกตุ้มแกว่ง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าการวัดออกซิเจนด้วยวิธีนี้จะมีความแม่นยำสูง แต่ก็มีข้อเสียตรงที่

1. ความเร็วในการไหลของแก๊สที่วัด ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดให้
2. เครื่องมือมีโอกาสที่จะได้รับอันตรายและเสียหายง่าย
3. ความไวต่อน้ำในอากาศ มีโอกาสทำให้การวัดผิดพลาด
4. ใช้เวลาในการวัดนาน

1.8.5.4 การวัดแก๊สโดยใช้หลักการของรังสีอินฟราเรด

ก่อนที่จะเข้าหลักการในการเซนเซอร์แก๊สแบบดังกล่าวนี้ ต้องเข้าใจกระบวนการคุณสมบัติทางวิทยาศาสตร์ในการวิเคราะห์สเปกตรัมและคุณสมบัติของคลื่นแสงก่อนพอสมควร

1. คุณสมบัติของแก๊สต่อการสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) การวิเคราะห์คลื่นแสง เป็นการวัดและศึกษาผลกระทบของพลังงานที่อยู่ในสารใดๆ ซึ่งทำให้เราสามารถวิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติของอินทรีย์เคมีได้ นักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อว่า แมกซ์ แพลงค์ (Max Planck) เป็นบุคคลที่ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนของแสง และความถี่ของมัน สมการพื้นฐานของพลังงานโฟตอนที่สัมพันธ์กับความถี่ (f) กำหนดได้เป็น

$$E = hf \quad (2.1)$$

เมื่อ h = ค่าคงที่ของแพลงค์ = 6.6242×10^{-34} J.s
 f = ความถี่ของแสง (s^{-1})

หรือความสัมพันธ์อีกสมการจะได้ว่า

$$\lambda f = c \quad (2.2)$$

เมื่อ λ = ความยาวคลื่น
 c = ความเร็วแสง = 2.998×10^8 m/s

หากแทนค่า $f = \frac{c}{\lambda}$ จากสมการที่ (2.2) ลงในสมการที่ (2.1) ก็จะได้

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hc \sigma \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ σ = จำนวนคลื่น (รูปคลื่น / ซม. หรือ cm^{-1})

ในสมการที่ (2.1) และ (2.2) พลังงานที่ได้จะอยู่ในรูปของ จูลน์ / โฟตอน หรือ จูลน์ / โมล สมการนี้สามารถปรับปรุงใหม่ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$E = N_0 hf = hc \sigma = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.4)$$

เมื่อ N = ตัวเลขอะโวกาโดร = 6.023×10^{23} /mol

เทคนิคในการวัดการสเปกตรัมแสง ส่วนใหญ่จะใช้โดยนักเคมีอินทรีย์ที่อาศัยผลกระทบในการฉายรังสีกับสสาร ในการดูดกลืนรังสีของสสารจะมีผลโดยทำการ “กระตุ้น” สสารและการแผ่รังสีจะเป็นผลทำให้เกิด “ความเฉื่อย” ของสสาร ธรรมชาติของปฏิกิริยาดังกล่าวนี้นั้นขึ้นอยู่กับพลังงานที่ฉายรังสีและความยาวคลื่นในการดูดกลืนการฉายรังสี การกระตุ้นนี้อาจทำให้เกิดพลังงานได้ในหลาย ๆ ระดับเช่น ระดับนิวเคลียร์ พลังงานระดับไฟฟ้าของอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานระดับสันสะเทือน หรือพลังงานระดับต่ำ

ในงานอินทรีย์เคมีจะใช้การสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต - แสงที่มองเห็นได้ เพื่อวัดสสารละลายซึ่งจะทำให้เกิดการแข่งกันดูดกลืนการแผ่รังสีของอากาศและตัวทำละลาย ซึ่งจำกัดเวลาเพื่อให้ได้ความยาวคลื่นที่ประมาณ 200 นาโนเมตร ส่วนความยาวคลื่นที่สั้นกว่านี้ (หรือเรียกว่า “ความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตหนัก” หรือความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตสุญญากาศ) ต้องทำการวัดในสุญญากาศ โดยปกติการแผ่รังสีแสงในช่วงที่เห็นได้โดยตามนุษย์ซึ่งเห็นได้จากสีรุ้งจะมีช่วงความยาวคลื่นที่แคบมาก ๆ ประมาณ 350 นาโนเมตร (ม่วง) ถึงประมาณ 800 นาโนเมตร (สีแดง) กรแยกรังสีอัลตราไวโอเล็ต - แสงที่สามารถมองเห็นได้นี้ ถูกใช้ประโยชน์เพื่อหาโครงสร้างโมเลกุลทางไฟฟ้า ความยาวคลื่นที่ซึ่งดูดกลืนสูงสุดจะสามารถบอกรายละเอียดของจำนวนโมเลกุลสารอินทรีย์ได้ ในการแยกรังสีอัลตราไวโอเล็ต - แสงที่สามารถมองเห็นได้นี้ บางครั้งจะเรียกว่า “การวัดการสเปกตรัมทางไฟฟ้า”

ตารางที่ 1.4 การแยกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (The Electromagnet Spectrum)

| ชนิดของการแผ่รังสี | ความถี่ (Hz) | จำนวนคลื่น (cm^{-1}) | ความยาวคลื่น (m) | พลังงาน (kJ / mol) | การส่งผ่านโมเลกุล |
|--------------------|---|------------------------------------|---|---------------------|-----------------------------|
| γ - ray | $\geq 10^{19}$ | $\geq 10^{19}$ | $\leq 10^{-11}$ | $\leq 10^7$ | พลังงานระดับนิวเคลียร์ |
| X - ray | $10^{17} - 10^{19}$ | $10^7 - 10^9$ | $10^{-9} - 10^{-11}$ | $10^5 - 10^7$ | ละอองของแก๊นอิเล็กตรอน |
| Vacuum - UV | $1.5 \times 10^{15} - 3 \times 10^{15}$ | $5 \times 10^4 - 10^5$ | $1 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-7}$ | 600 - 1200 | วาเลนซ์อิเล็กตรอน |
| UV | $9 \times 10^1 - 1.5 \times 10^{15}$ | $3 \times 10^4 - 5 \times 10^{10}$ | $2 \times 10^{-7} - 2.5 \times 10^{-7}$ | 360 - 600 | ระดับพลังงาน |
| Visible | $4 \times 10^{14} - 9 \times 10^{14}$ | $1 \times 10^4 - 3 \times 10^4$ | $3.5 \times 10^{-7} - 8 \times 10^{-7}$ | 120 - 360 | (HOMOLUMO) |
| Infrared | $2 \times 10^{13} - 1.5 \times 10^{14}$ | 625 - 5000 | $2 \times 10^{-6} - 1.6 \times 10^{-5}$ | 7 - 60 | การสั่นสะเทือนของโมเลกุล |
| Microwave | $3 \times 10^8 - 3 \times 10^{10}$ | 0.01 - 1 | 0.01 - 1 | $10^{-4} - 10^{-2}$ | การหมุนของโมเลกุล |
| Radiofrequency | $\approx 10^6 - 10^8$ | $10^3 - 10^5$ | 1 - 100 | $10^{-5} - 10^{-7}$ | รีโซแนนซ์แม่เหล็กนิวเคลียร์ |

2. ความเข้มข้นสูงสุด การพิจารณาตามกฎของเบียร์ - แลมบอร์ต และความสมมาตรจุดสูงสุดแต่ละจุดในการสแกตริงของแสงอัลตราไวโอเล็ต - แสงที่มองเห็นได้ ยังสามารถจะกำหนดจากความหนาแน่นได้อีกด้วย ค่าดังกล่าวนี้สัมพันธ์กับตัวประกอบสามตัวด้วยกันคือ ความเข้มข้นของสารประกอบในสารละลาย ความหนาของสารตัวอย่างและประสิทธิภาพที่ซึ่งโครโมฟอร์ดูดกลืนแสง ความหนาแน่นในการดูดกลืนของสารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นไปตามกฎของเบียร์ - แลมบอร์ต ซึ่งกล่าวว่าความหนาแน่นของการดูดกลืน จะวัดได้จากหน่วยของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่ภายนอกได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการดูดกลืนได้ ดังนั้นความสามารถในการดูดกลืนได้ ก็จะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย และความหนาแน่นของมัน เราสามารถใช้กฎของเบียร์ – แลมเบอร์ต์ เขียนแสดงเป็นสมการคือ

$$A = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_t} \right) = \epsilon \cdot c \cdot l$$

| | | |
|-------|------------|---|
| เมื่อ | A | = ความสามารถในการดูดกลืน |
| | I_0 | = ความเข้มข้นของแสงที่เกิดขึ้นบนสารตัวอย่าง |
| | I_t | = ความเข้มข้นของแสงที่ส่งมาจากสารตัวอย่าง |
| | C | = ความเข้มข้นโมลาร์ของสารตัวอย่าง |
| | l | = ความหนา (หรือความยาวของทางเดิน) |
| | ϵ | = ค่าคงที่ของทั้งสารประกอบและการส่งผ่านเฉพาะในปัญหานั้น ๆ |

ค่า ϵ นี้บางครั้งเรียกว่า “สัมประสิทธิ์การดูดกลืนโมลาร์” เพื่อความสะดวกและคล่องตัวจึงไม่ค่อยแสดงหน่วยดังกล่าวนี้

การดูดกลืนโมลาร์ของการส่งผ่านอนุภาคเป็นตัววัดประสิทธิภาพการส่งผ่านของอนุภาคว่าดูดกลืนการแผ่รังสีได้ได้อย่างไร หากมีประสิทธิภาพต่ำหมายความว่า การส่งผ่านของอิเล็กตรอนระหว่างวงโคจรไม่สมมาตรกัน

เทคนิคในการวัดการสเปกตรัมของสารอินทรีย์สมัยใหม่ แยกได้ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ กลุ่มแรก คือ “เทคนิคแบบไม่ทำลาย” ซึ่งคุณสมบัติของ โมเลกุลจะไม่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากที่ทำการวัดการสเปกตรัม ส่วนกลุ่มที่สองคือ “เทคนิคแบบทำลาย” โดยโมเลกุลที่นำเข้ามาทดสอบจะถูกทำลายหลังจากที่ผ่านการวัดแล้ว

เทคนิคในการสเปกตรัมของสารอินทรีย์แบบไม่ทำลายยังแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

1. เทคนิคแบบ NMR (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy) การวัดแบบนี้จะบอกรายละเอียดของโครงสร้างและรายละเอียดกลุ่มหน้าที่ของโมเลกุล ใช้การแผ่รังสีคลื่นความถี่วิทยุเพื่อการสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ที่ 50 ถึง 500 MHz ตรงกับช่วงพลังงานที่ประมาณ 0.02 ถึง 0.2 kJ/mol) กับสารที่ต้องการวัด

2. เทคนิคแบบ IR (Infrared Spectroscopy) ปัจจุบันใช้มากขึ้นเรื่อย ๆ แบบนี้จะบอกรายละเอียดหน้าที่และโครงสร้างรอบๆ ด้านที่แน่นของโมเลกุล หรือสิ่งแวดล้อมรอบๆ ตัวมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้ควรนำความรู้ที่ได้ไปใช้เพื่อพัฒนาตัวเองและสังคมต่อไป

ใช้ความยาวคลื่นประมาณ 2 ถึง 16 ไมโครเมตร (625 ถึง 5000 cm^{-1} ตรงกับช่วงพลังงานประมาณ 7.5 ถึง 60 kJ/mol)

3. เทคนิคแบบ Ultraviolet – visible Spectroscopy (UV - vis) ยังคงเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของสารประกอบระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่งขอบเขตความยาวคลื่นของช่วงอัลตราไวโอเล็ตที่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งครอบคลุมกับงานทางอินทรีย์เคมีอยู่ในช่วงจาก 200 ถึง 800 นาโนเมตร (ช่วงของพลังงานประมาณ 150 ถึง 600 kJ/mol)

เทคนิคการตรวจวัดแบบทำลายโมเลกุลจะไม่กล่าวในที่นี้

ความยาวคลื่นต่ำสุดที่สามารถใช้กับสารละลายปกติส่วนใหญ่ ด้วยวิธีการแยกความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต – แสงที่สามารถมองเห็นได้เป็น ดังตารางที่ 1.5 สารละลายที่เจือด้วยคลอรีน (ซึ่งอยู่ด้านล่างของเส้นประ) เทอมของความยาวคลื่นที่ใช้มีความใกล้เคียงกันมากกว่าสารละลายที่ไม่ได้เจือด้วยคลอรีน

ตารางที่ 1.5 ความยาวคลื่นต่ำสุดที่สามารถใช้ได้สำหรับสารละลายทั่วไป

| สารละลาย | ความยาวคลื่น (นาโนเมตร) |
|---------------------|-------------------------|
| อีธานอล | 204 |
| เมธานอล | 203 |
| น้ำ | 191 |
| ไซโคลเฮกเซน | 195 |
| อะเซโตไนไตร | 190 |
| เฮกเซน | 201 |
| อีเทอร์ | 215 |
| เมธิลีนคลอไรด์ | 220 |
| โคลโรฟอร์ม | 237 |
| คาร์บอนเตตระคลอไรด์ | 257 |

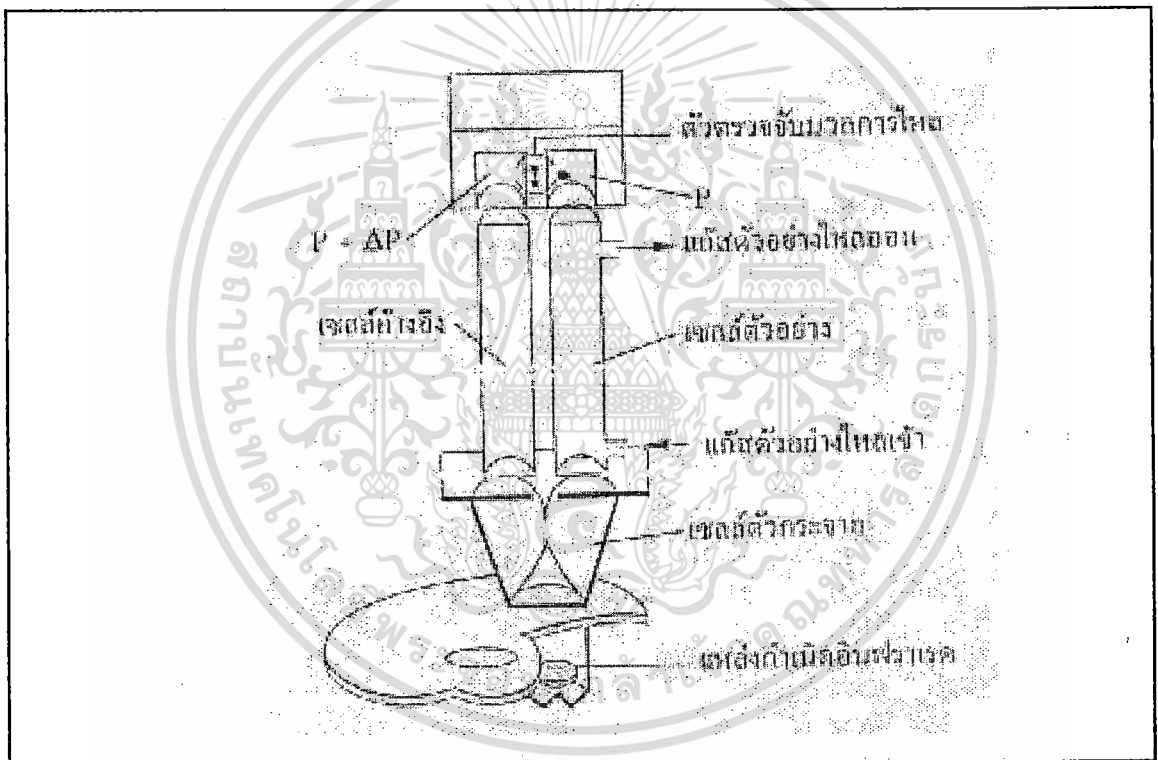
ส่วนที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นตัวเซนเซอร์ที่ใช้เทคนิคในการวัดด้วยการสเปกตรัมของแผ่รังสีอินฟราเรด

1. วัดการสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรด (Infrared Spectroscopy) การแผ่รังสีแบบอินฟราเรด เป็นการกระตุ้นโมเลกุลและอิออนให้ไปสู่ระดับพลังงานต้นสะท้อน ใช้งานกันอย่าง

ออกสโตรนเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากในการสเปกตรัมสารอินทรีย์ ซึ่งจะตรงกับความยาวคลื่นประมาณ 2 ถึง 16 ไมโครเมตร (ช่วงความยาวคลื่น 625 ถึง 5000cm^{-1}) พลังงานระดับนี้จำเป็นต้องให้โมเลกุลเกิดการ “สั่น” และ ดูดกลืนการแผ่รังสีอินฟราเรดโดยโมเลกุลที่รวมกลุ่มกัน การวัดการสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรด ดังกล่าว บ่อยครั้งจะถูกเรียกว่า “การวัดการสเปกตรัมแบบต้นสะเทือน”

หลักการวัดแก๊สแบบนี้จะใช้รังสีอินฟราเรดที่ไม่กระจาย : NDIR หรือเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าไพโรอิเล็กทริกอินฟราเรดเซนเซอร์ เราพบว่ารังสีอินฟราเรดจะมีคุณสมบัติในการดูดกลืนแก๊ส แต่ละอย่างที่พิเศษออกไป จึงใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติข้อนี้ในการวัดแก๊สต่าง ๆ เครื่องมือที่ใช้วัด แสดงดังรูปที่ 1.37



รูปที่ 1.37 แสดงหลักการวัดแก๊สแบบใช้รังสีอินฟราเรด

ตัวอย่างของอุปกรณ์เซนเซอร์ที่ใช้หลักการแบบนี้ เป็นของยี่ห้อ HEIMANN ดังแสดงในรูปที่ 1.38 ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และ FET source follower โดยทำการซีลลงในตัวถังแบบ TO-5 พร้อมกับตัวกรองแสง คุณลักษณะในการกรองแสงของตัวกรองแสง จะเป็นการกำหนดย่านวัดและย่านในการวิเคราะห์แก๊ส ซึ่งครอบคลุมการดูดกลืนในช่วงการสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรด โดยปกติการตรวจวัดแบบนี้สามารถแยกแยะแก๊สและสารประกอบได้หลายชนิด เช่น แอลกอฮอล์ ฟีนอล ไฮโดรเจน หรือสารประกอบอื่นๆ หลังจากนั้น จึงเอาผลออกสำรับเป็นเอกสารที่ส่งวนเวียนเกี่ยวกับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะผิดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการดูดซับการแผ่รังสีที่อยู่ในรูปของความถี่หรือความยาวคลื่นมาแยกแยะและวิเคราะห์แก๊สตัวเซนเซอร์ที่ยกตัวอย่างนี้เหมาะสมสำหรับการวัดและวิเคราะห์แก๊ส CO CO₂ NO หรือ HC ข้อได้เปรียบในการวัดแบบนี้คือตัวเซนเซอร์ไม่ต้องสัมผัสกับแก๊สที่จะวัด

ช่วงในการสเปกตรัมรังสีอินฟราเรดที่น่าสนใจของสารอินทรีย์ อยู่ระหว่างความถี่ 4000 cm⁻¹ ถึง 650 cm⁻¹ หรืออาจพิจารณาจากการดูดกลืนรังสีตามหลักการเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านและความยาวคลื่นในการสเปกตรัมของแก๊สต่าง ๆ รูปที่ 1.39 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งเป็นช่วงใช้งานของผลิตภัณฑ์เซนเซอร์แก๊สบริษัท HEIMANN ที่ค่าต่าง ๆ

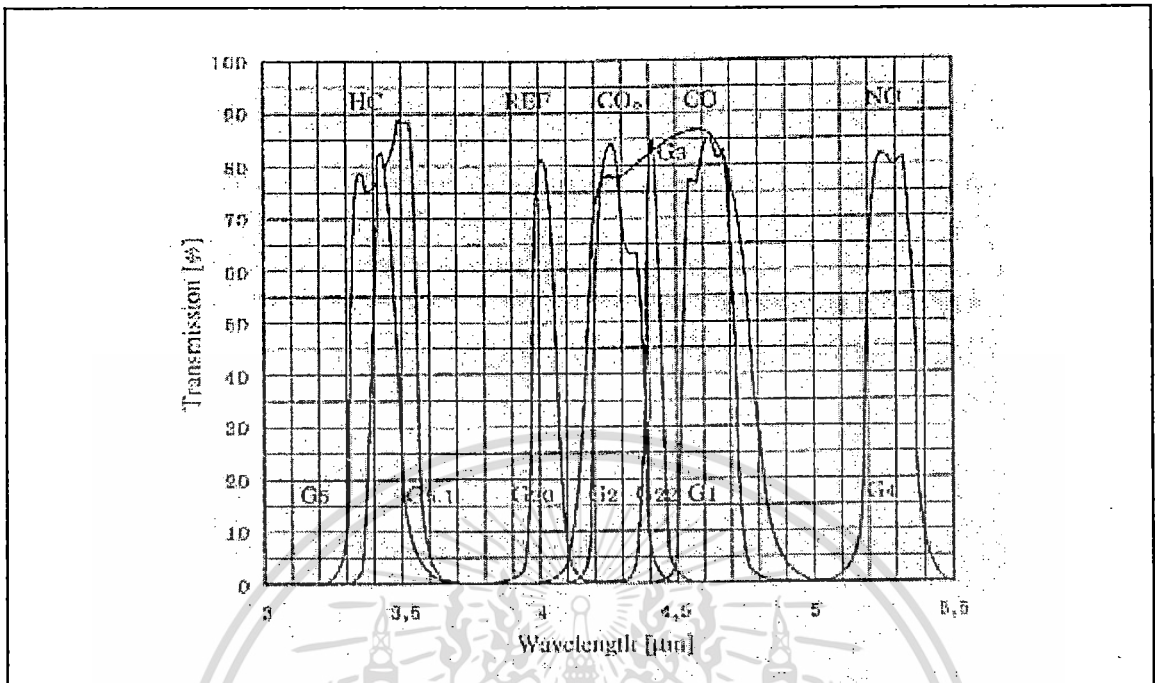


รูปที่ 1.38 เซนเซอร์แก๊ส

ข้อควรจำในการวัดแก๊สแบบนี้คือ

1. หลักการวัดแบบนี้ไม่สามารถวัดแก๊ส H₂ O₂ N₂ ๑ ได้
2. ไม่เหมาะที่จะวัดไฮโดรคาร์บอนที่มี C มาก ๆ
3. ต้องมีเทคนิคพิเศษในการวัดแก๊สที่มีไอน้ำอยู่ด้วยจำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ในการส่งผ่านแก๊สต่อความยาวคลื่นที่ได้จากการสเปกตรัมแก๊สบางอย่าง

1.8.5.5 หลักการเซนเซอร์แก๊ส โดยวิธีฟิล์มหนา (Thick Film Gas Sensor)

ตัวเซนเซอร์แก๊สแบบนี้ใช้หลักการ “ฟิล์มหนาของไซแมเร็ก” เป็นแก๊สเซนเซอร์ชนิดใหม่ที่ใช้หลักการของสารกึ่งตัวนำ ตัวเซนเซอร์แบบนี้จะไม่เหมือนแบบโคตรงที่มีกระบวนการพิมพ์ลงบนระหว่างชั้นบางๆ ของฟิล์ม

ตัวเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการตรวจจับ กลุ่มไวด้วยฟิล์มเซรามิกซึ่งมีรูให้แก๊สรั่วซึมได้หลังจากนั้นจึงให้ความร้อนอย่างรวดเร็วบนตัวตรวจจับแก๊ส โดยที่ทั้งตัวเซนเซอร์และตัวทำความร้อนจะถูกฝังไว้บนชั้นบางๆ นี้อย่างแน่นหนา เพื่อป้องกันการสั้นสะเทือนและการช็อก

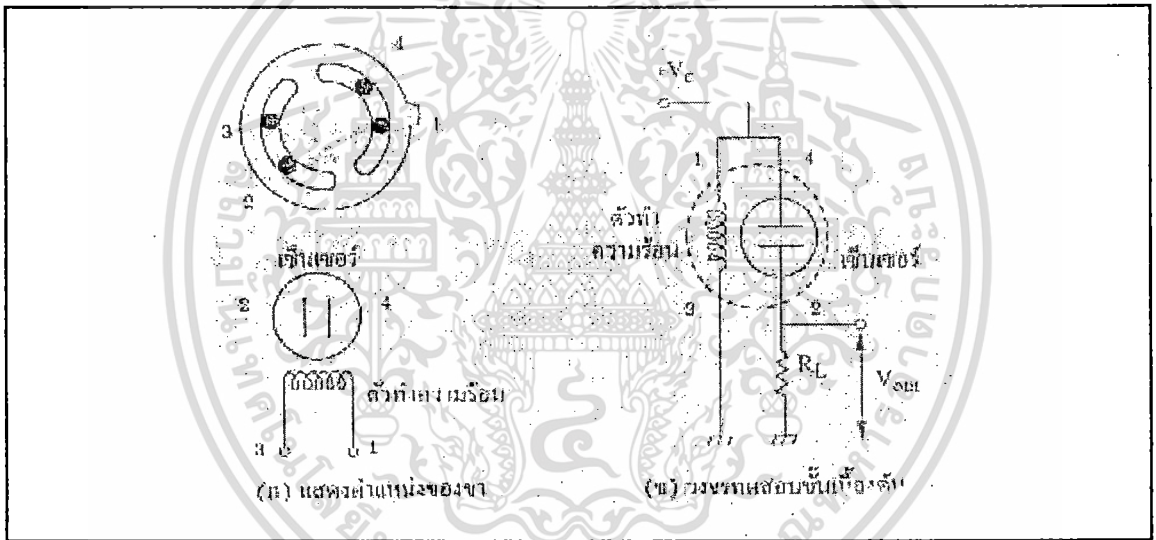
ตารางที่ 1.6 สภาวะการทำงานของตัวเซนเซอร์แก๊สแบบฟิล์มหนาของไซแมเร็ก

| ตัวแปร | พิกัด |
|---|--|
| อุณหภูมิการปฏิบัติงาน | $-10^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C}$ |
| อุณหภูมิที่สะสม | $-30^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}$ |
| ตัวต้าน โหลด , RL | เปลี่ยนแปลงได้ |
| อัตราการบริโภคกำลังของตัวเซนเซอร์ , P_s | $\leq 15\text{ mW}$ |
| อัตราแรงดันทำงานของวงจร , V_c | AC หรือ DC 5 V (สูงสุด 12 V) |
| อัตราแรงดันทำงานของตัวทำความร้อน | AC หรือ DC 5 V \pm 12 V |

ตัวเซนเซอร์แก๊สแบบนี้ทำมาจากออกไซด์ของสารกึ่งตัวนำ มีหลักการทำงานงานคือ ตัวเซนเซอร์จะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 350° C เมื่อมันรับแก๊สเข้าไป ออกซิเจนก็จะถูกดูดเข้าไปบนผิวของฟิล์มเพื่อใช้ในการเผาไหม้ ทำให้มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าค่าหนึ่ง

การดัดคร่อมของค่าความต้านทานดังกล่าวสามารถนำมาคาดคะเนและพล็อตเพื่อหาค่าการทำซ้ำได้ ดังนั้นหากใช้วงจรที่มีความเหมาะสม ก็สามารถจํานาค่าความต้านทานดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เป็นวงจรเตือนภัย หรือประยุกต์ให้สามารถอ่านค่าออกโดยระบบทางแสงได้

จากรูปที่ 1.40 (ข) เป็นวงจรทดสอบเพื่อนำไปใช้งาน ส่วนในรูปที่ 1.40 (ข) เมื่อ ขา 1 และขา 3 ต่อเข้าไปยังตัวทำความร้อน ขา 2 และ ขา 4 จะต่อเข้ากับส่วนของเซนเซอร์ ซึ่งเซนเซอร์ในตัวอย่างนี้จะถูกกำหนดให้ใช้แรงเคลื่อนคงที่ 5 โวลต์



รูปที่ 1.40 ตัวเซนเซอร์แบบฟิล์มหนา

เมื่อตัวเซนเซอร์ตรวจพบแก๊ส ค่าความต้านทานของตัวเซนเซอร์ก็จะลดลงทันที โดยที่ค่าความต้านทานของตัวเซนเซอร์ (R_s) ดังกล่าวนี้อาจคำนวณได้จากแรงเคลื่อนทางด้านเอาต์พุต (V_{out}) ดังสูตรด้านล่างต่อไปนี้

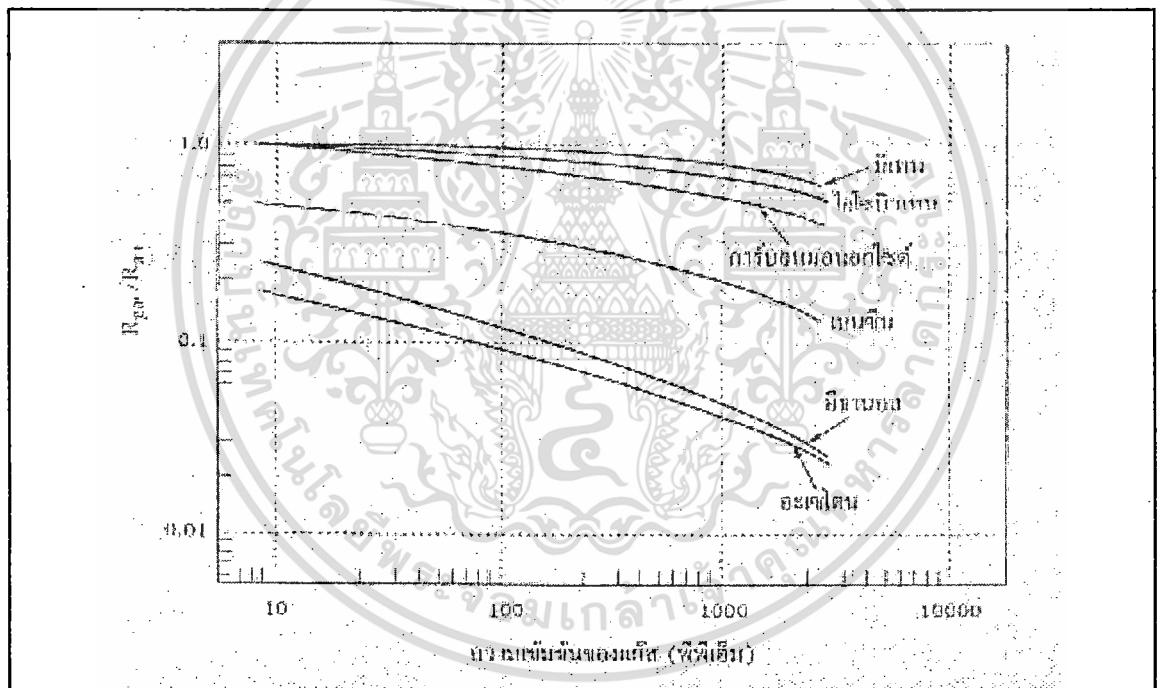
$$R_s = \frac{V_s - V_{out}}{V_{out}} R_L$$

ให้สังเกตว่าความไวของตัวเซนเซอร์ จะกำหนดด้วยอัตราส่วน (R_{GAS} / R_{AIR}) นั่นคือค่าของความต้านทานเซนเซอร์ในขณะที่อากาศมีแก๊ส (R_{GAS}) ต่อกับค่าความต้านทานของเซนเซอร์ที่อากาศบริสุทธิ์ (R_{AIR}) ที่ปราศจากแก๊สชนิดอื่น ๆ

กำลังสูญเสียที่ตัวเซนเซอร์ จะสามารถหาได้จาก

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

เมื่อ R_S = ความต้านทานของตัวเซนเซอร์



รูปที่ 1.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการเปลี่ยนค่าความต้านทานของเซนเซอร์แก๊สแบบฟิล์มหนาต่อความเข้มข้นของแก๊สที่ปริมาณต่าง ๆ

ในรูปที่ 1.41 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สต่าง ๆ ชนิดต่อความไวในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ หากเราสามารถรักษาอากาศให้บริสุทธิ์ได้ ค่าความต้านทานเนื่องจากอากาศบริสุทธิ์ก็จะมีค่าคงที่ ดังนั้นหากมีแก๊สที่จะทำการวัดไหลเข้ามา ความไวที่ได้จากความเข้มข้นของแก๊สที่จะวัดนั้นก็เปลี่ยนแปลง ผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว มีผล
 อกให้แรงเคลื่อนที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงเคลื่อนทางต้านเอาต์พุตในรูปที่ 1.40 เปลี่ยนแปลงไปด้วย
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อควรจำในการใช้งานตัวเซนเซอร์แบบฟิล์มหนา

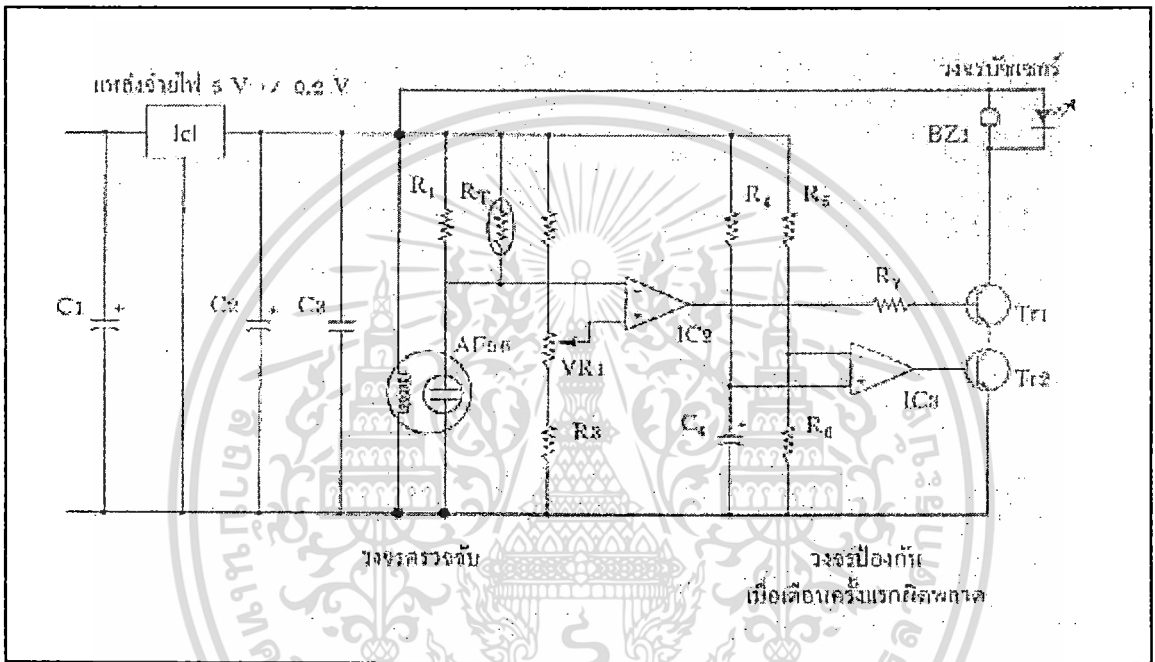
1. หลีกเลี่ยงใช้ตัวเซนเซอร์แล้วปล่อยให้ไวกายได้ความชื้นสูงเป็นระยะเวลานาน ต้องใช้เวลาระยะหนึ่งเพื่อให้คุณสมบัติของมันถึงจุดที่มีความเสถียรภาพเสียก่อน
2. อุณหภูมิตัวเรือนของตัวเซนเซอร์แก๊ส จะถูกทำให้ร้อนด้วยตัวทำความร้อนโดยมีค่าเป็น 30°C ถึง 40°C ซึ่งจะสูงกว่าอุณหภูมิห้องในขณะที่กำลังปฏิบัติงาน
3. ต้องวัดคุณสมบัติของตัวเซนเซอร์แก๊ส หลังจากที่ใช้ปฏิบัติงานมาแล้วมากกว่า 24 ชั่วโมง เพื่อดูความเสถียรภาพของตัวเซนเซอร์
4. คุณสมบัติของตัวเซนเซอร์แก๊สที่ได้ดังกล่าว จะต้องทำการวัดในบริเวณที่อากาศสะอาดปราศจากแก๊สรบกวนอื่นๆ

ตารางที่ 1.7 ตัวอย่างของคุณลักษณะจำเพาะของตัวเซนเซอร์แก๊สรุ่นต่างๆ ของยี่ห้อ HEIMANN

| ชื่อชนิด | AF10 | AF20 | AF30 | AF33 | AF35 | AF50 | AF56 | AF63 | AF63P |
|-----------------------------|---|-------------------|-----------|------|------|---------------------|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| แก๊สที่ตรวจจับ | ไฮโดรเจน | คาร์บอนมอนอกไซด์ | ควันทูหรี | | | มีเทน | แก๊ส LP (โพรเพน, บิวเทน) | ไอของแก๊สโซลีนที่มีแอลกอฮอล์ทอลลูอิน | เอทานอลที่เป็นของเหลว |
| ย่านการตรวจจับ | 10 ppm – 1000 ppm | 50 ppm – 2000 ppm | | | | 500 ppm – 10000 ppm | 500 ppm – 10000 ppm | 100 ppm – 5000 ppm | |
| การสูญเสียกำลัง (mW) สูงสุด | 530 | 780 | 535 | 680 | 530 | 690 | 690 | 680 | |
| อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับ | ออกไซด์ของสารกึ่งตัวนำ | | | | | | | | |
| วัสดุขา | นิกเกิลอัลลอย | | | | | | | | |
| โลหะที่เคลส | ไนลอน 66 | | | | | | | | พีพีเอส |
| ตัวป้องกันไฟ | ตะแกรงทำจากสแตนเลสสตีล (SUS 316) ขนาด 100 mesh 2 ชั้น | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลทางเทคนิคดังกล่าวนี้ได้จากการวัดตามสภาวะของอากาศบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ $50 \pm 5\%$ แรงดันที่จ่ายให้วงจร 5 ± 0.05 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าที่ตัวทำความร้อน 5 ± 0.05 โวลต์ ค่าความต้านทานโหลด 5 กิโลโอห์ม – 10 กิโลโอห์ม $\pm 1\%$ เวลาในการทำความร้อนล่วงหน้ามากกว่า 48 ชั่วโมง แต่หากไม่ตรงกับภาวะดังกล่าวนี้ ก็จะได้ค่าที่แตกต่างกันออกไป



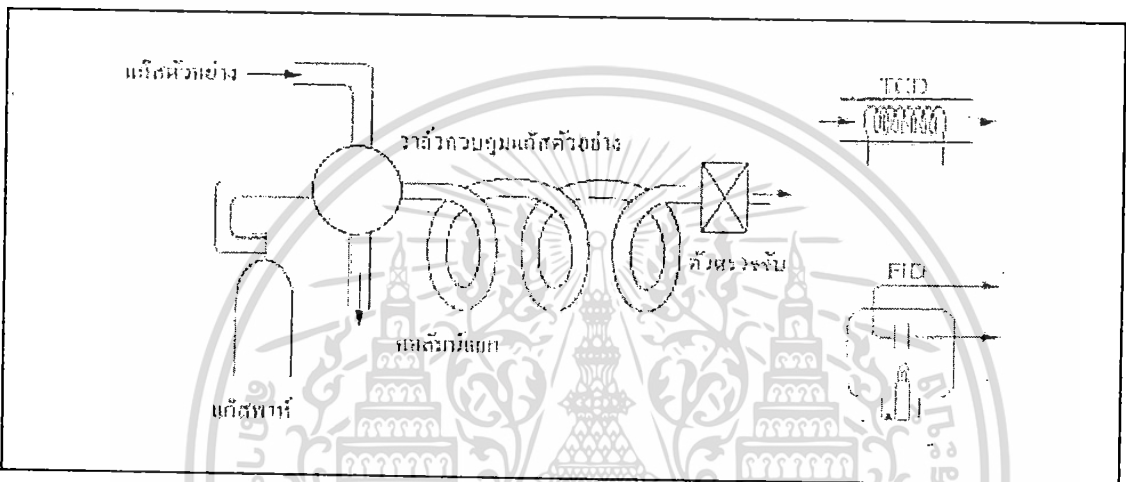
รูปที่ 1.42 ตัวอย่างของวงจรตรวจจับการรั่วของแก๊ส LP

วงจรรูปที่ 1.42 นี้แสดงหลักการพื้นฐานในการตรวจจับแก๊ส โดยใช้ตัวเซนเซอร์แก๊สแบบฟิล์มหนาเยื่อ HEIMANN รุ่น AF56 ปกติตัวเซนเซอร์ที่ใช้ในวงจรนี้ จะสามารถตรวจจับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน อีธานอล โพรเพน และไอโซบิวเทน ซึ่งแสดงผลเมื่อมีระดับการรั่วของแก๊สโดยตัวบ่งชี้เซอร์ ในวงจรดังกล่าวนี้ สามารถปรับความไวในการตรวจจับได้โดยตัวต้านทาน VR1 ความไวในการตรวจจับไว้ในวงจร หมายถึงหากเราเลือกวัดแก๊สตัวใดตัวหนึ่ง เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ จะต้องมีการปรับตัวต้านทาน VR1 เพื่อเลือกที่จะให้ไซเรนดังที่ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์มากหรือน้อย หรือกล่าวได้อีกอย่างว่า ให้การตรวจจับมีปฏิกิริยาต่อแก๊สที่ต้องการวัดซ้ำหรือเร็วเท่าใดนั่นเอง

1.8.5.6 หลักการวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟ (Process Gas Chromatograph)

PGC

หลักการวัดแก๊สแบบนี้ใช้หลักการโครมาโตกราฟที่แสดงได้ดังรูปที่ 1.43 ส่วนประกอบของแก๊สต่างๆ สามารถแสดงได้โดยโครมาโตแกรม ดังรูป 1.43 เมื่อแก๊สต่างๆ ถูกฉีกเข้าไป ด้านในแก๊สพาร์ ก็จะถูกพาเข้าไปสู่คอลัมน์เพื่อแยกแก๊ส หลังจากนั้นก็จะใช้ TCD หรือ FID หรือตัวตรวจจับอื่นๆ เพื่อตรวจจับแก๊สต่างๆ ตามแต่ลักษณะงาน



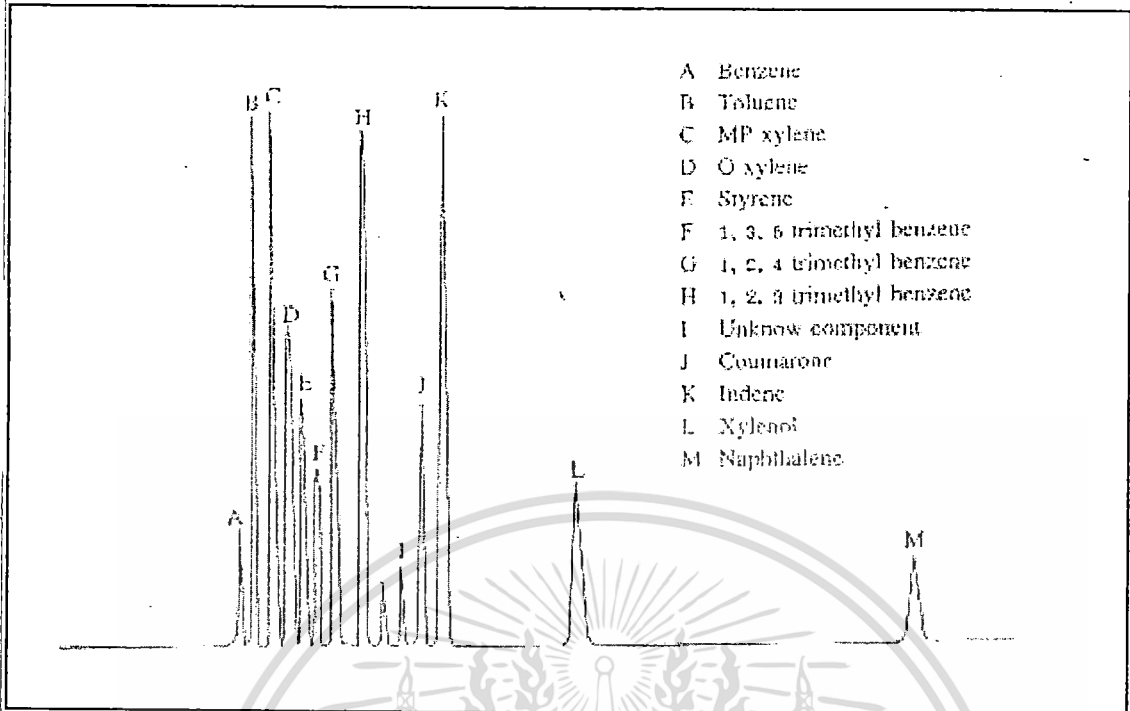
รูปที่ 1.43 การวัดแก๊สในกระบวนการแบบ โครมาโตกราฟ

ข้อควรจำในการวัดแก๊สด้วยวิธีนี้คือ

1. หลักการวัดแบบ TCD จะใช้ในการวัดแก๊สที่เป็นอินทรีย์ ส่วนหลักการ FID จะใช้สำหรับวัดไฮโดรคาร์บอน
2. การเลือกคอลัมน์แยกแก๊สต้องใช้เทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงๆ
3. ต้องรักษาอุณหภูมิของคอลัมน์ให้คงที่อย่างมาก

จากหลักการที่ผ่านมาทั้งหมด จะเห็นว่าในการจะวัดแก๊สหรือตัวแปรใดๆ ต้องศึกษาคุณสมบัติที่เป็นไปได้ทางเคมีและฟิสิกส์ของมัน เพื่อให้สามารถนำหลักการดังกล่าวมาดัดแปลงให้เป็นตัวแปรทางไฟฟ้า ยังมีเซนเซอร์หลายประเภทที่ยังไม่ได้พัฒนาไปมากมาย เช่นการเซนเซอร์รสชาติอาหาร กลิ่นและรส หรือการค้นหาวัสตูที่จะนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งนับเป็นสิ่งสำคัญ เพราะประเทศไทยมีอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก จึงน่าจะมีนักวิทยาศาสตร์ หรือวิศวกร หรือองค์กรใด ๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งมีศักยภาพ ได้ประดิษฐ์หรือพัฒนาในส่วนดังกล่าวเพื่อจะให้ออกให้เกิดผลประโยชน์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.44 การแยกส่วนประกอบของแก๊สในกระบวนการโครมาโตแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วิธีการและเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างฐานรอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างฐานรอง, รวมถึงหลักการและเครื่องมือต่างๆ ที่นำมาใช้ในการสร้าง ตั้งแต่การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน การสร้างชั้นฉนวน การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา การทำขั้วไฟฟ้า ต่อไปจะแสดงขั้นตอนการสร้างฐานรองเป็นโฟลว์ชาร์ท (Flow chart)



รูปที่ 2.1 โฟลว์ชาร์ทการสร้างฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน กำจัดฝุ่น กำจัดเศษโลหะและไขมันต่างๆ



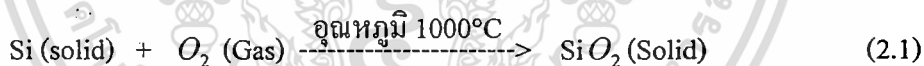
รูปที่ 2.2 แผ่นซิลิคอนขนาด 2.5 ซม. x 2.5 ซม.

2.2 การสร้างชั้นฉนวนด้วยวิธีออกซิเดชัน (Oxidation)

เพื่อควบคุมไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในเนื้อสารซิลิคอน ชั้นฉนวนหรือซิลิคอนไดออกไซด์ จะสร้างจากการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) โดยการให้แผ่นซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูง มี 2 วิธี คือ

1. การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation)

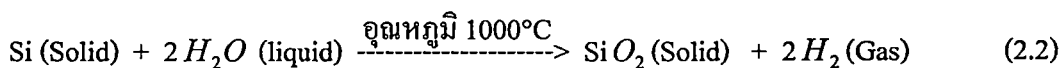
เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ กับซิลิคอน ใช้อุณหภูมิประมาณ 900°C ถึง 1100°C อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงดังสมการ 2.1



วิธีนี้ให้ออกไซด์ที่มีคุณภาพดี แต่อัตราการเกิดช้ามาก

2. การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation)

ต่างจากการออกซิเดชันแบบแห้งคือ จะใช้ไอน้ำในการทำปฏิกิริยาร่วมกับออกซิเจนด้วย เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน อะตอมของซิลิคอนจึงทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่าอะตอมออกซิเจนบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว ผลคือจะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้ง แสดงได้ดังสมการ 2.2



วิธีนี้ให้ออกไซด์ที่มีคุณภาพด้อยกว่าแบบแห้ง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแบบแห้งมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชื้น การออกซิเดชันแบบชื้นจะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ที่มีสภาพผลึกเอกสารถือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สมบูรณ์ คือเกิดการบิดเบือนของผลึก (Crystal dislocation) หรือเกิดรูพรุนขึ้น ข้อดีของวิธีนี้คือมีอัตราการเกิดสูงกว่าแบบแห้งมาก

ปริญญานิพนธ์นี้ จะใช้การออกซิเดชันแบบ แห้ง 1.5 ชม. ชั้น 1.5 ชม. และแห้ง 1.5 ชม. ในการออกซิเดชันแบบแห้งจะใช้อุณหภูมิประมาณ 1100°C อัตราการไหลของออกซิเจน 1200 cc/min ส่วนการออกซิเดชันแบบชื้นใช้อุณหภูมิประมาณ 1100°C อัตราการไหลของออกซิเจน 1100 cc/min เพื่อให้เกิดชั้นออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 5000 อังสตรอม จากนั้นนำไปเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป



รูปที่ 2.3 หลังจากการออกซิเดชัน ได้ชั้นออกไซด์หนาประมาณ 5000 อังสตรอม

2.3 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และทำขั้วไฟฟ้าโดยการสปีดเตอร์ริง

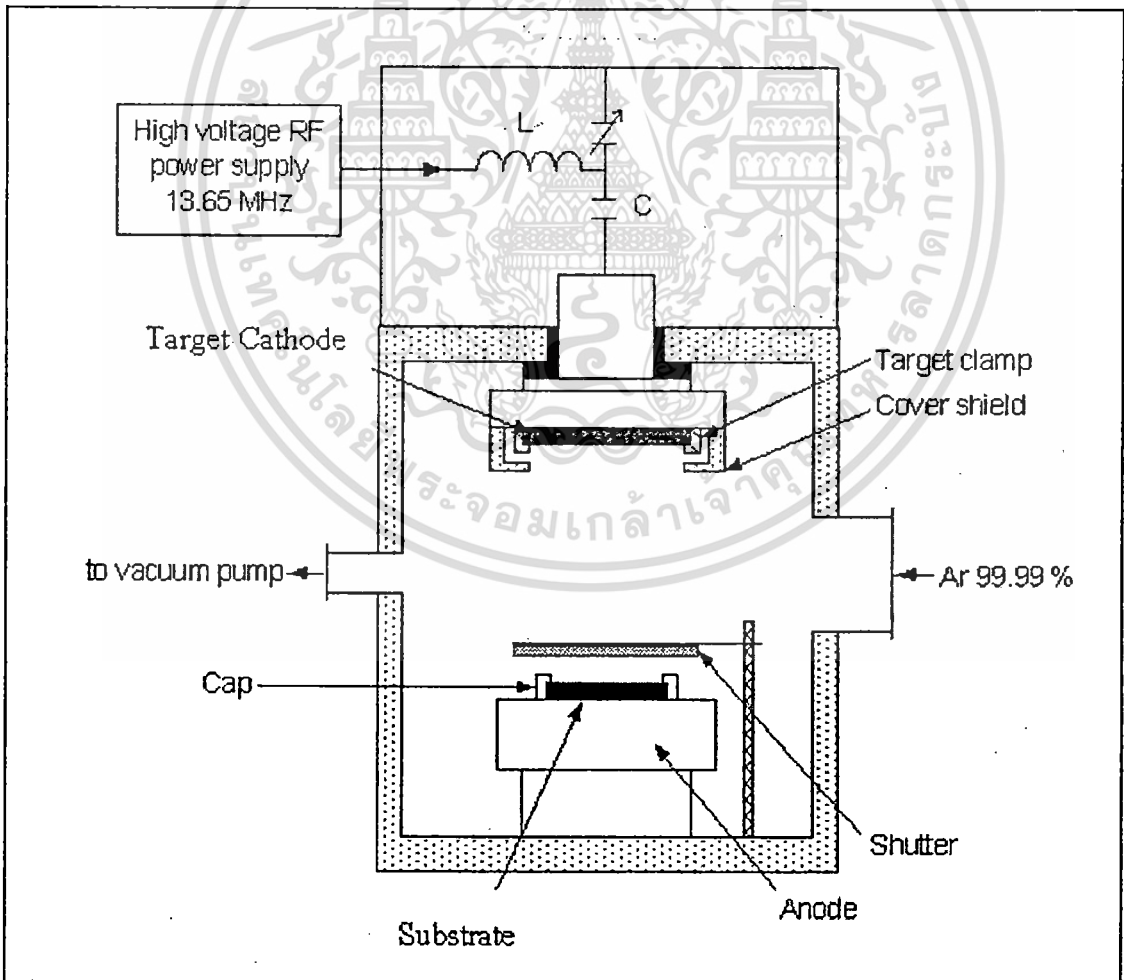
เพื่อเคลือบ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปบนฐานรองเพื่อให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้นิกเกิล (Ni) เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เคลือบลงไปบนฐานรองเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) เพื่อให้ขั้วของอุปกรณ์ขาดจากกันทางไฟฟ้า (นิกเกิลเป็นโลหะและนำไฟฟ้า) เนื่องจากต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ขณะตรวจวัดแก๊ส จึงต้องการให้กระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนเคลื่อนอยู่บนคาร์บอนนาโนทิวบ์



รูปที่ 2.4 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิกเกิล)

อีกจุดประสงค์หนึ่งเพื่อทำขั้วไฟฟ้าเพื่อต่อออกไปใช้งาน โดยใช้ทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า สปีดเตอร์ริงเป็นแผ่นบาง (Thin film) ลงไปที่ด้านข้างของฐานรอง ทั้ง 2 ข้าง ในการเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาและทำขั้วไฟฟ้าจะใช้เครื่อง SPE - 210 ไดโอดสปีดเตอร์ริงในการสร้าง

ส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปีดเตอร์ ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งมีความถี่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (13.65 MHz), แหล่งจ่ายแก๊ส, ห้องสปีดเตอร์ (sputtering chamber), และปั๊มสุญญากาศ (rotary and diffusion pump) ภายในห้องสปีดเตอร์ประกอบด้วย ขั้วคาโทด (cathode) ขั้วแอโนด (anode) และชัตเตอร์ (shutter) โดยแผ่น Target เป็นเป้าถูกติดไว้กับขั้วคาโทด การสปีดเตอร์เกิดจากการป้อนกำลัง RF ผ่านวงจรแมทซิ่งเข้าสู่ห้องสปีดเตอร์ซึ่งอยู่ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออน เกิดเป็นพลาสมาขึ้นมาในบริเวณระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด เนื่องจากขั้วแอโนดต่ออยู่กับผนังห้องสปีดเตอร์ ทำให้พื้นที่ของขั้วแอโนดมากกว่าขั้วคาโทด จึงเกิดการเหนี่ยวนำขั้วคาโทดให้มีศักย์เป็นลบและดึงดูดไอออนบวกในพลาสมาให้พุ่งเข้าชนโดยนิเกิลที่ขั้วคาโทด ทำให้อะตอมของ Target กระเด็นออกมาและสะสมบนผิวฐานรองแผ่นตัวอย่างซึ่งวางที่ขั้วแอโนด จะเกิดเป็นฟิล์มโลหะเคลือบอยู่บนฐานรอง



รูปที่ 2.5 แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปีดเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทนี้จะศึกษาผลจากขนาดพื้นที่ของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ในการตรวจวัดแก๊ส ดังนั้นจึงออกแบบฐานรองเป็น 2 โครงสร้าง คือ

1. ให้มีขนาดของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ขนาด กว้าง 21 มม. ยาว 25 มม. คือมีพื้นที่ 525 ตารางมิลลิเมตร ดังรูป 2.6 ก
2. ให้มีขนาดของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ขนาด กว้าง 5 มม. ยาว 25 มม. คือมีพื้นที่ 125 ตารางมิลลิเมตร ดังรูป 2.6 ข



รูปที่ 2.6 รูปแบบของฐานรองที่เสร็จสมบูรณ์ รูป ก โครงสร้าง 1 รูป ข โครงสร้าง 2

ในขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้าต้องมีการใช้หน้ากาก (Mask) ในการสร้างด้วย เนื่องจากต้องการเลือกสร้างฟิล์มทองแดงในบริเวณที่ต้องการให้เป็นขั้วไฟฟ้าเท่านั้น การสร้างลวดลายโดยวิธีใช้หน้ากากป้องกัน (Shadow mask) มีดังนี้

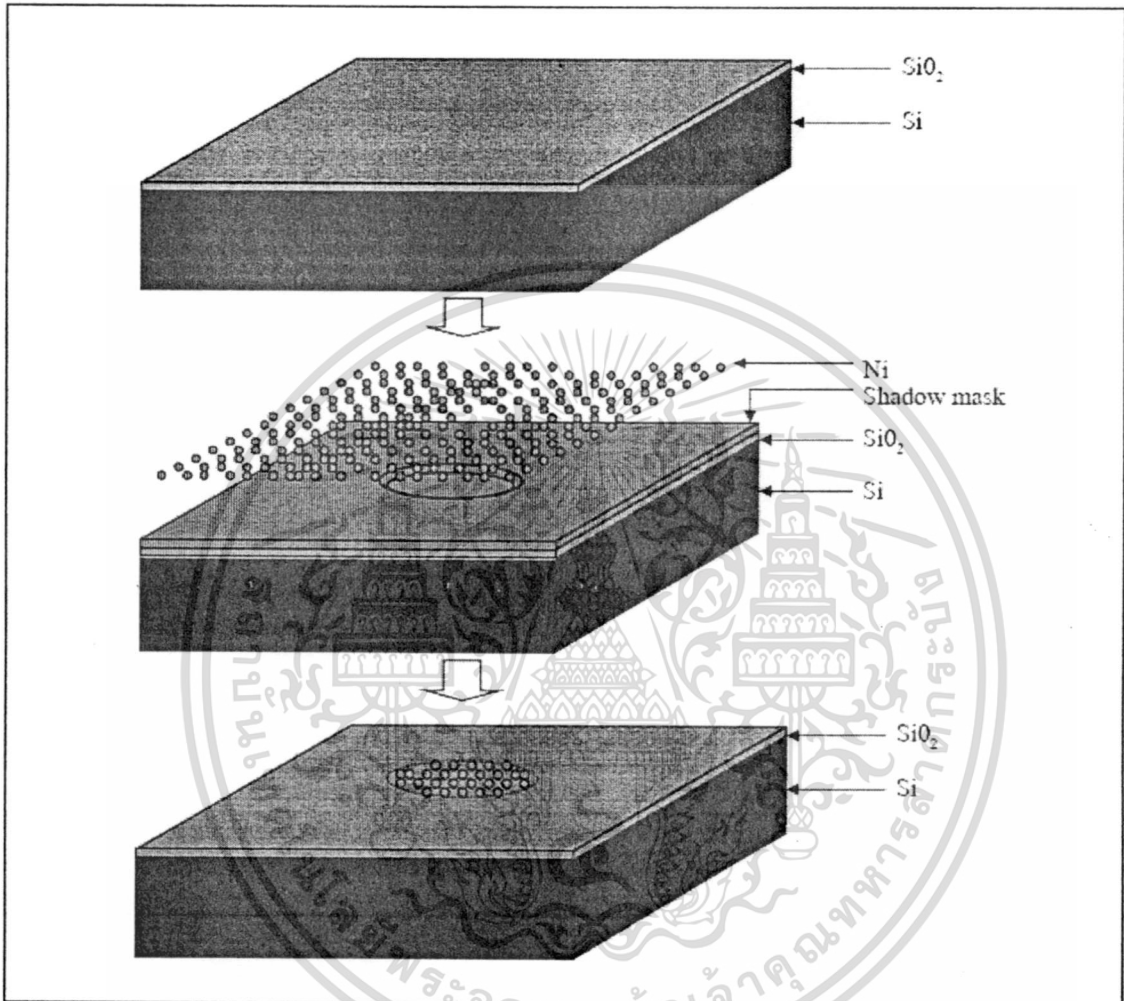
2.4 การสร้างลวดลายโดยใช้หน้ากากป้องกัน

ใช้ในการสร้างลวดลายลงบนฐานรอง วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ง่าย เพียงแค่ประกบแผ่นหน้ากากกับฐานรองแล้วนำไปสเป็คเตอรืงตามปกติ แสดงวิธีการแสดงดังรูปที่ 2.7

ในรูปที่ 2.7 เป็นตัวอย่างการสร้างลวดลายเป็นรูปวงกลม ลงบนแผ่นฐานรองชนิดคอนไดออกไซด์โดยการนำหน้ากากมาประกบกับฐานรองแล้วสเป็คเตอรืงนิเกิลลงไป เมื่อนำหน้ากากออก ก็จะได้ลวดลายนิเกิลเป็นวงกลมตามรูปแบบของหน้ากาก วิธีนี้มีข้อดีก็คือทำได้ง่าย รวดเร็ว ไม่ยุ่งยากเหมือนกับการสร้างลวดลายด้วยวิธีโฟโตลิโธกราฟี แต่ก็มีข้อเสียคือลวดลายที่ได้ไม่คมชัด เนื่องจากในการสเป็คเตอรืงจะมีอนุภาคของนิเกิลบางส่วนเล็ดลอดเข้าไปในบริเวณขอบหน้ากากได้ เพราะอนุภาคของนิเกิลมีขนาดเล็กมาก ทำให้ลวดลายไม่คมชัด รวมถึงเมื่อนำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แล้วจะมีขอบเขตที่ไม่คมชัด แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.8 และ 2.9

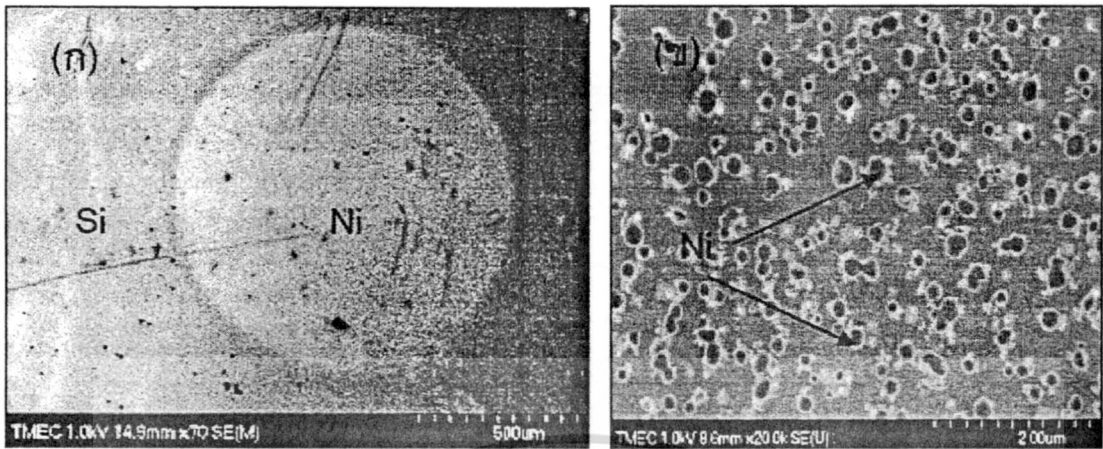
เนื่องจากจุดประสงค์ของปริญญาโทนี้คือการสร้างเซนเซอร์เคมีคือแก๊สเซนเซอร์ที่ต้องการพื้นที่ในการรับแก๊สมากเพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวป์ในการตรวจวัดแก๊สเบื้องต้น จึงไม่มีความจำเป็นจะต้องใช้การสร้างลวดลายที่ละเอียด

หรือขนาดเล็กมากๆ และไม่ต้องการความคมชัดของลวดลายมาก วิธีการสร้างลวดลายด้วยหน้ากากป้องกันจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เพื่อความรวดเร็วในการสร้าง



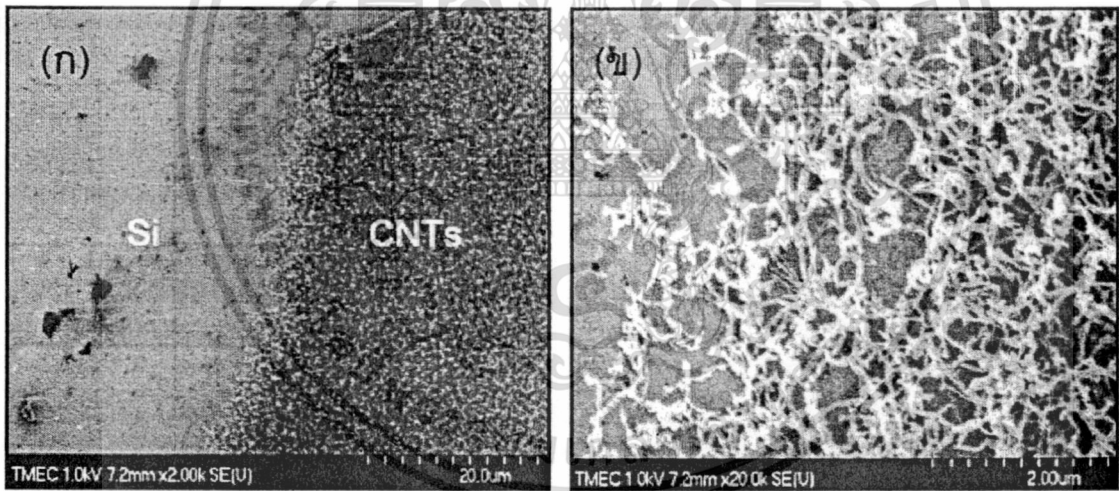
รูปที่ 2.7 การสร้างลวดลายด้วยวิธีหน้ากากป้องกัน (Shadow mask)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ภาพขยายด้วย SEM แสดงฐานรอบบริเวณที่เกิดลึบด้วยนิเกิล โดยวิธีหน้ากากป้องกัน

- (ก) กำลังขยายต่ำ
- (ข) กำลังขยายสูง



รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายจาก SEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ตรงบริเวณขอบเขตของลวดลายวงกลม

- (ก) ที่กำลังขยายต่ำ
- (ข) ที่กำลังขยายสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการสร้างฐานรองและผลการสร้างฐานรอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างฐานรองโดยละเอียด ตามขั้นตอนตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ตั้งแต่การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน ไปจนถึงการสร้างขั้วไฟฟ้า

3.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

หลังจากตัดแผ่นซิลิกอนเป็นแผ่นขนาด 2.5×2.5 ซม. แล้วนำไปทำความสะอาด โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ต้มในกรด HNO_3 10 นาที
2. ต้มในน้ำ DI จำนวน 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที
3. จุ่มในน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วย N_2
4. ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
5. อัลตราโซนิกด้วยอะซิโตน 5 นาที
6. จุ่มในน้ำ DI จำนวน 2 แก้ว แล้วเป่าด้วย N_2



รูปที่ 3.1 แผ่นซิลิกอนขนาด 2.5×2.5 ซม. หลังการทำความสะอาด

3.2 การสร้างชั้นฉนวนหรือชั้นซิลิกอนไดออกไซด์โดยการออกซิเดชัน

เมื่อทำความสะอาดผิวหน้าแล้ว ต่อไปจะสร้างชั้นฉนวนโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยความร้อน มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นซิลิกอนเข้าเครื่องออกซิเดชัน การนำแผ่นซิลิกอนเข้าเครื่องออกซิเดชันจะต้องค่อยๆ เลื่อนแผ่นซิลิกอนเข้าไปในเตา เพื่อให้แผ่นซิลิกอนมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างช้าๆ เนื่องจากเตามีอุณหภูมิที่สูงมาก

2. สร้างชั้นฉนวนด้วยวิธีการออกซิเดชันแบบแห้ง ใช้อุณหภูมิ $1100^\circ C$ เป็นเวลา 1.5 ชม.

อัตราการไหลของออกซิเจน 1200 cc/min งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

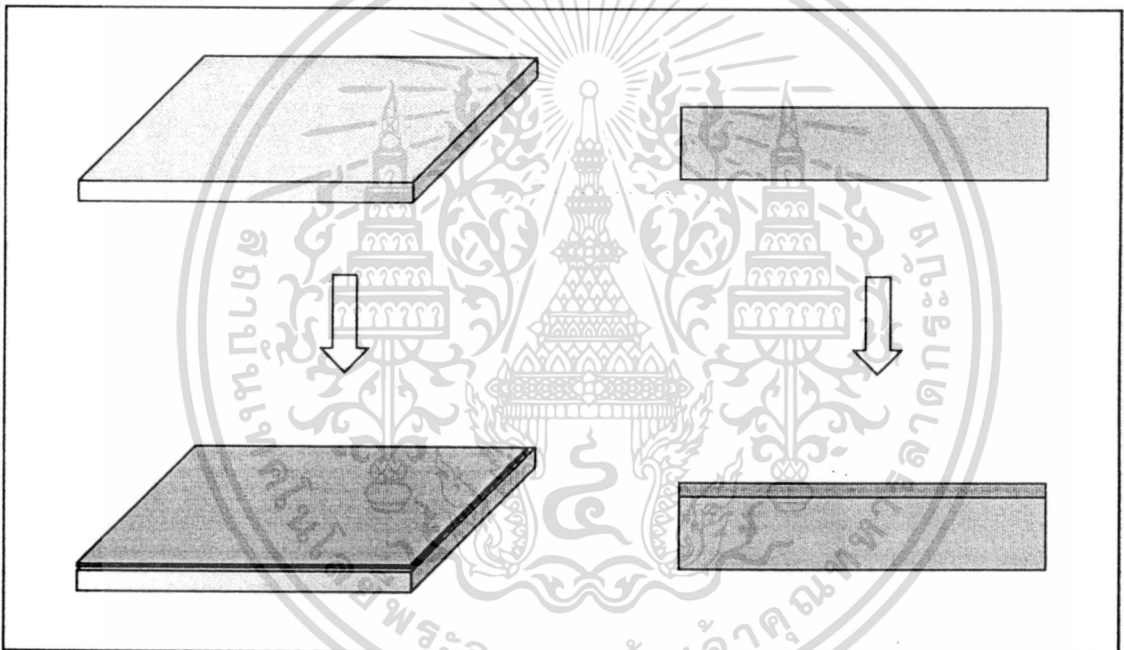
3. สร้างชั้นฉนวนด้วยวิธีออกซิเดชันแบบขึ้น ใช้อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1.5 ชม.
อัตราการไหลของออกซิเจน 1100 cc/min

4. สร้างชั้นฉนวนด้วยวิธีออกซิเดชันแบบแห้ง ใช้อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1.5 ชม.
อัตราการไหลของออกซิเจน 1100 cc/min

5. การนำแผ่นซิลิกอนออกจากเตาจะต้องค่อยๆ เลื่อนออกมา เหมือนในการนำเข้าไปเพื่อ
ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเร็วเกินไป

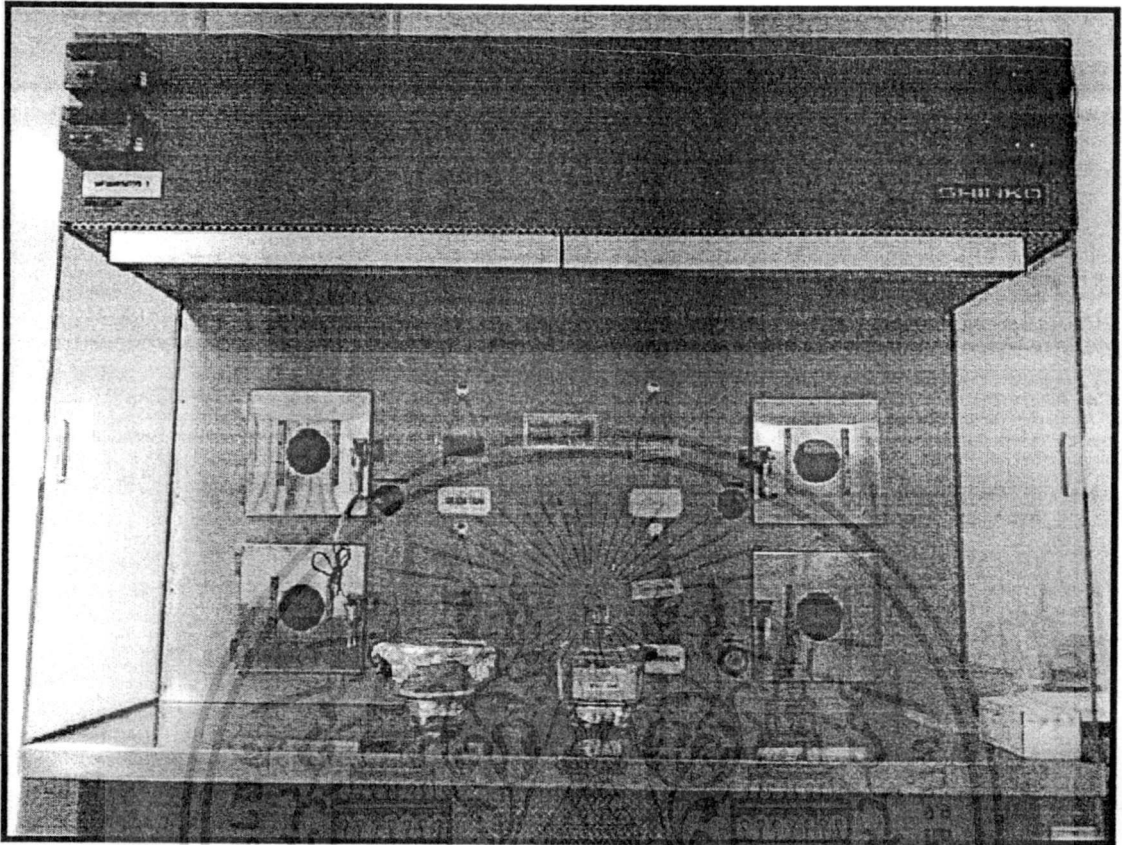
ผลที่ได้จากขั้นตอนนี้คือ ชั้นฉนวนหรือซิลิกอนไดออกไซด์ความหนาประมาณ 5000

อังสตรอม



รูปที่ 3.2 แผ่นซิลิกอนก่อนและหลังการออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่องออกซิเดชันด้วยความร้อน

3.3 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

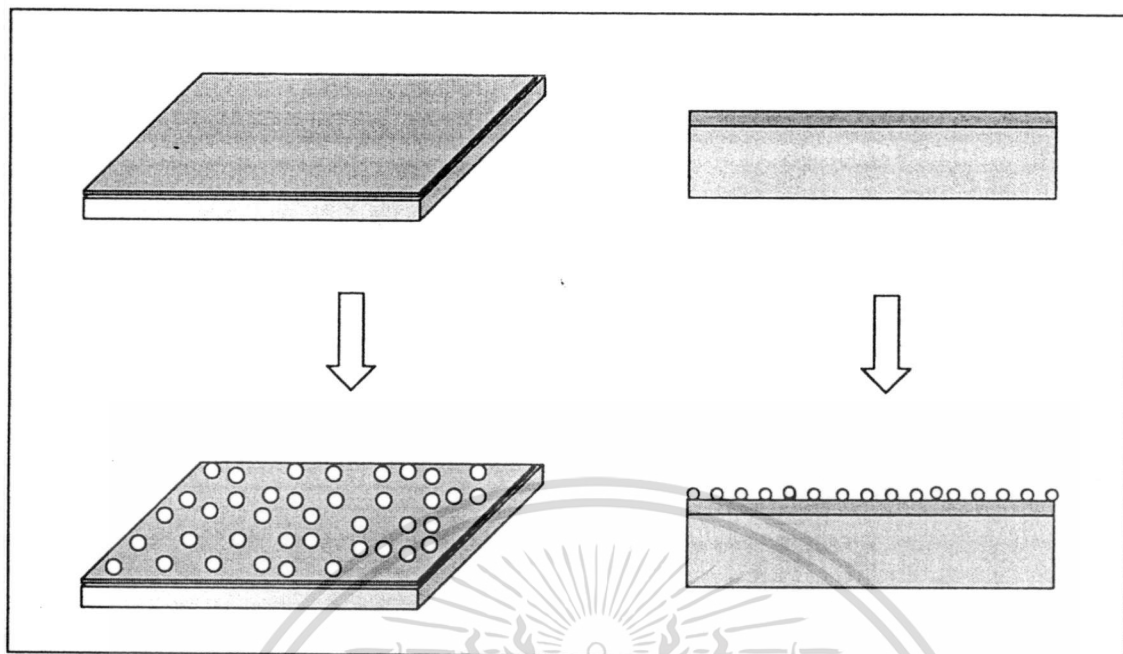
เพื่อเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นฟอยล์ (Foil) มาหุ้มที่ฐานรองของเครื่องเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกหรือสารตกค้าง
2. วางฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ ลงบนฟอยล์
3. ใส่แผ่นชัตเตอร์ (Shutter)
4. ใส่แผ่นเป้าหมาย (Target) แล้วปิดฝาเครื่อง
5. ให้แก๊สอาร์กอนเป็นเวลา 5 ชม.

6. สปัตเตอร์ นิเกิดลงบนฐานรองเป็นกลุ่มก้อนโดยการเปิดชัตเตอร์เป็นเวลา 30 วินาที ความดันในขณะนั้นประมาณ 2×10^{-6} Torr

7. นำฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ออก ดูดอากาศออกจากเครื่องเพื่อนำอนุภาคที่ตกค้างออก

ผลคือได้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล) เคลือบเป็นกลุ่มก้อนอยู่บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ เอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ฐานรองก่อนและหลังเคลือบ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล) แบบกลุ่มก้อน

3.4 การทำขั้วไฟฟ้าทองแดงโดยการสปีดเตอร์ริง

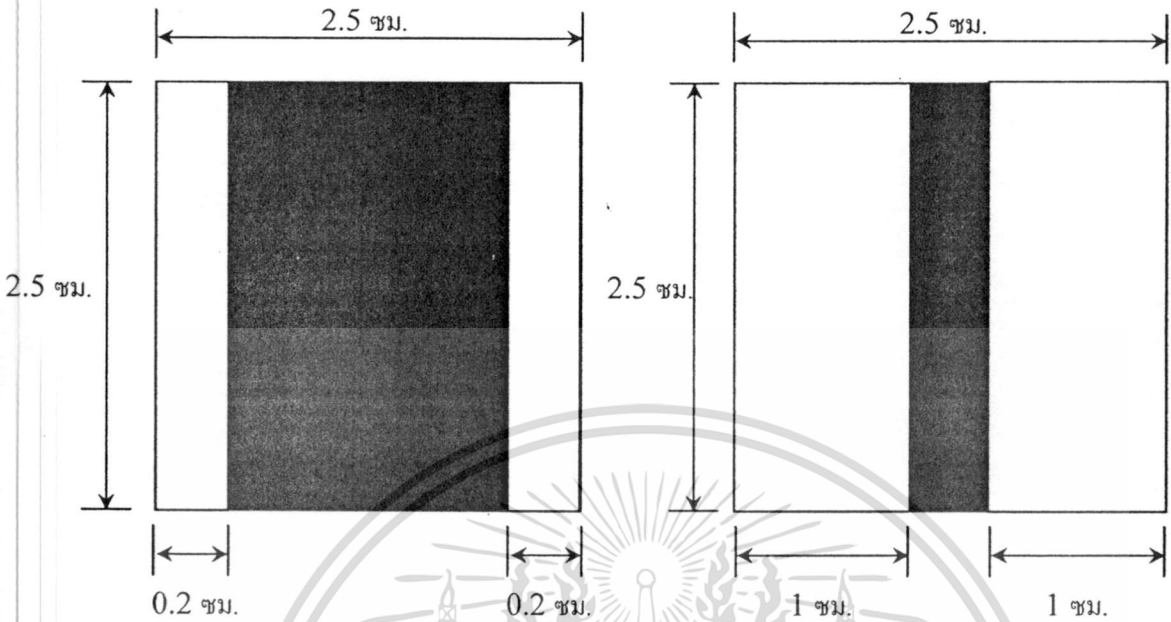
เพื่อเคลือบทองแดงที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าและเลือกเคลือบที่บริเวณด้านข้างเท่านั้น โดยใช้การสร้างลวดลายบนฐานรองด้วยวิธีหน้ากากป้องกัน (Shadow mask) มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นฟอยล์ (Foil) มาหุ้มที่ฐานรองของเครื่องเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกหรือสารตกค้าง
2. ประกบหน้ากาก (Shadow mark) กับฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์
3. วางฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ ลงบนฟอยล์
4. ใส่แผ่นชัตเตอร์ (Shutter)
5. ใส่แผ่นเป้าทองแดง (Target) แล้วปิดฝาเครื่อง
6. ให้แก๊สอาร์กอนเป็นเวลา 5 ชม.

7. สปีดเตอร์ นิเกิลลงบนฐานรองเป็นแผ่นบางโดยการเปิดชัตเตอร์เป็นเวลา 90 วินาที ความดันในขณะนั้นประมาณ 2×10^{-6} Torr

8. เอาฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ออก ดูดอากาศออกจากเครื่องเพื่อลดอนุภาคที่ตกค้างออก

ผลคือได้ขั้วไฟฟ้าเป็นทองแดงเคลือบเป็นแผ่นบางอยู่บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ บริเวณด้านข้างทั้งสองด้าน

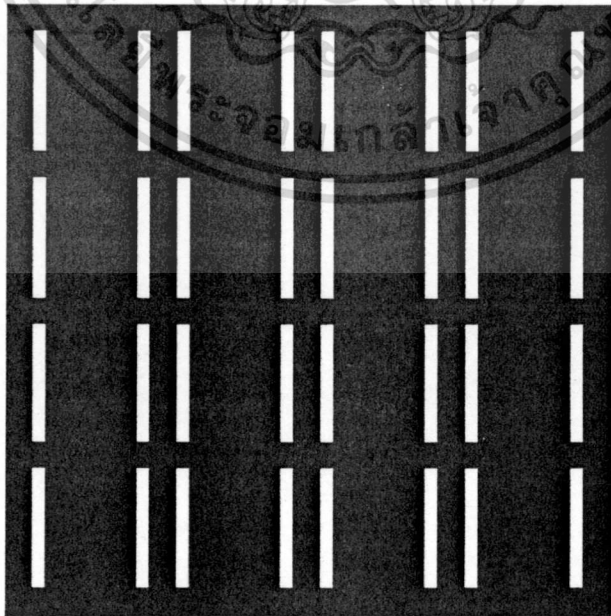


(1)

(2)

รูปที่ 3.5 ภาพขยายหน้ากาก (Mask) ที่ใช้ในการสปีดเตอร์ซ์ไฟฟ้า จะมี 2 โครงสร้าง คือ

- (1) แบบขนาดพื้นที่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ 525 ตารางมิลลิเมตร
- (2) แบบขนาดพื้นที่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ 125 ตารางมิลลิเมตร

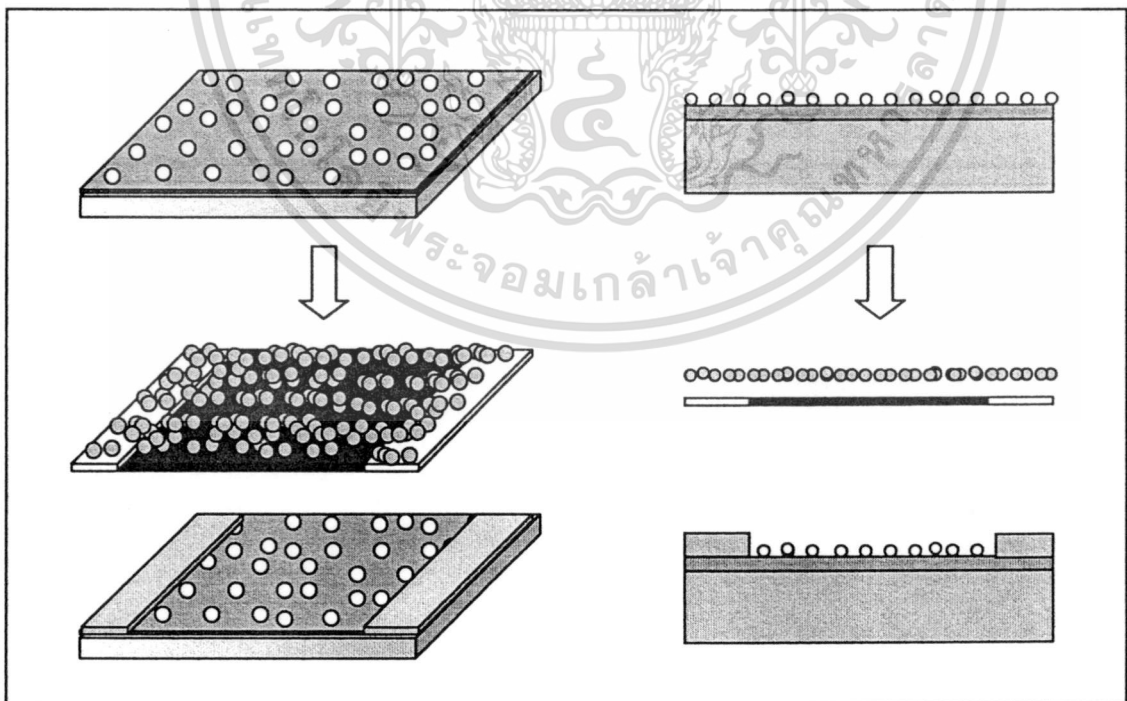


รูปที่ 3.6 ภาพหน้ากาก (mask) ที่ใช้ในการสปีดเตอร์ซ์ไฟฟ้า โครงสร้าง 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

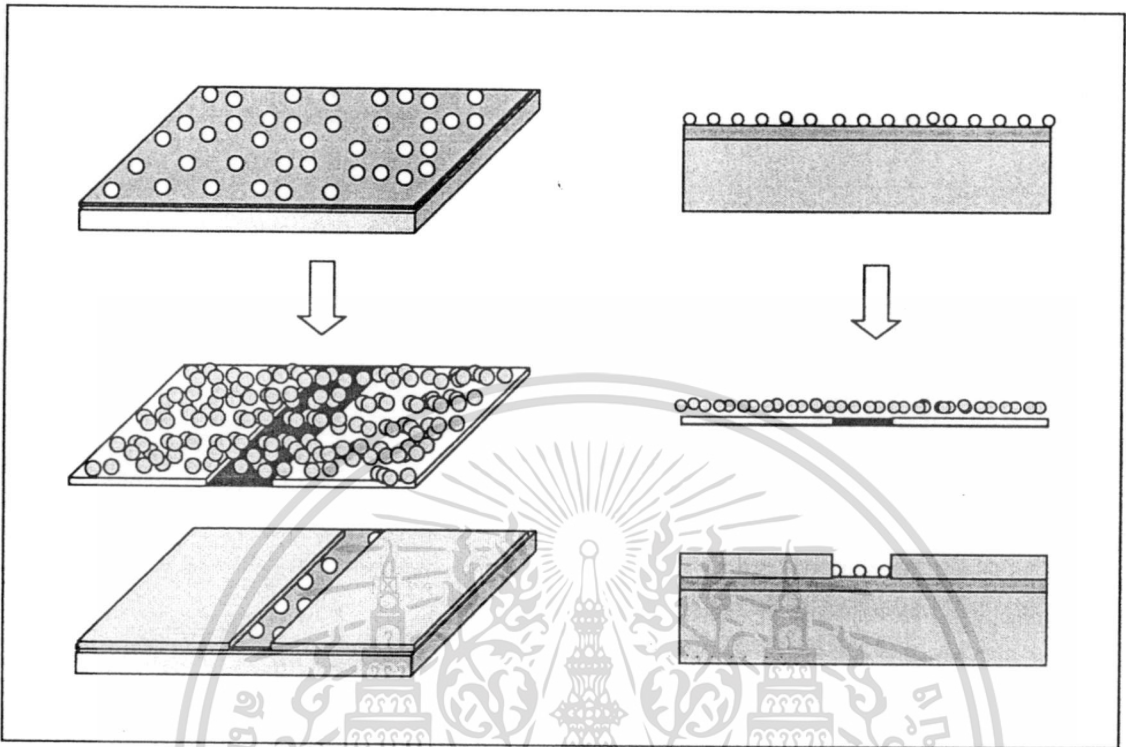


รูปที่ 3.7 ภาพหน้ากาก (mask) ที่ใช้ในการสปีดเตอร์ขั้วไฟฟ้า โครงสร้าง 2

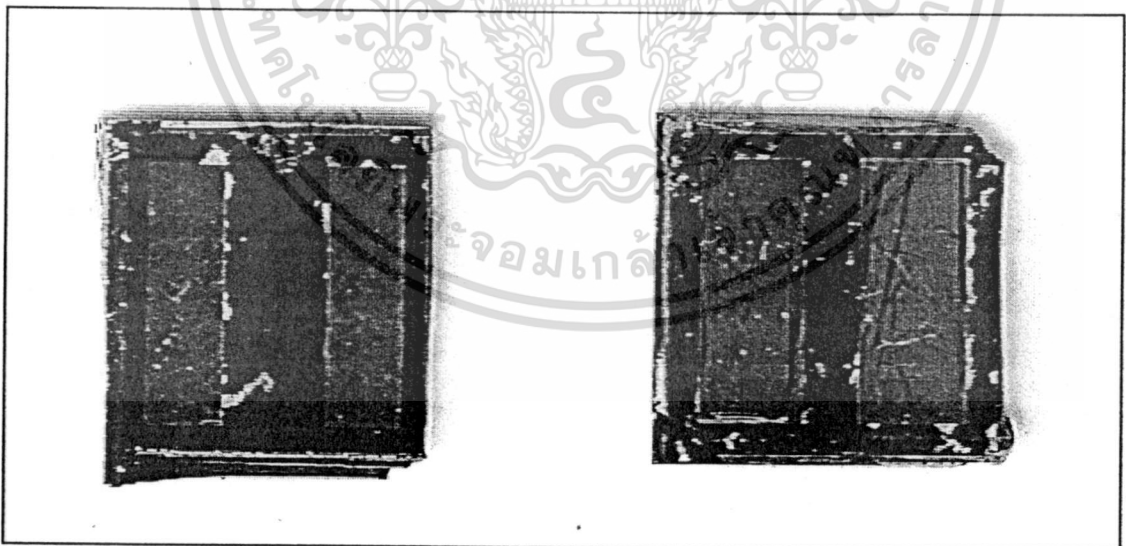


รูปที่ 3.8 ฐานรองก่อนและหลังการสปีดเตอร์ขั้วไฟฟ้าโครงสร้างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 งานรองก่อนและหลังการสัปดาห์ตอรั้ง ขั้วไฟฟ้าโครงสร้างที่ 2



ก

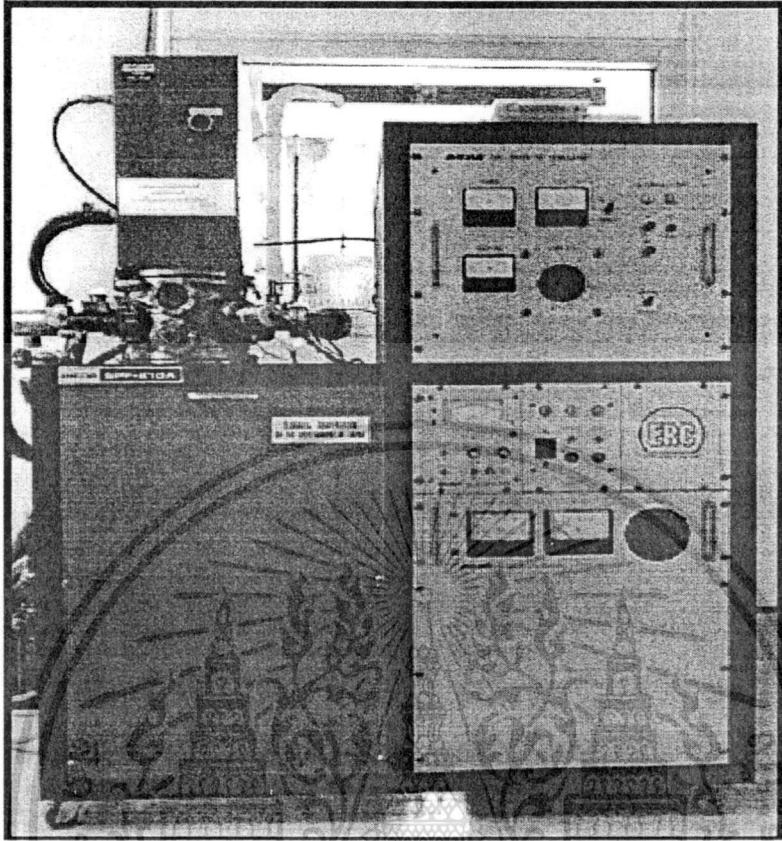
ข

รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายของงานรองที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

(ก) โครงสร้างแบบที่ 1

(ข) โครงสร้างแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 เครื่อง SPE - 210 ไดโอดสปีดเตอร์

ฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นตัวต้านทาน ซึ่งเมื่อวัดค่าความต้านทานระหว่างขั้วทั้งสองด้วยโอห์มมิเตอร์ได้ค่าความต้านทานดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความต้านทานของฐานรอง

| ลำดับ | ค่าความต้านทาน (โอห์ม) | โครงสร้างที่ |
|-------|------------------------|--------------|
| 1 | 17.4 | 1 |
| 2 | 12.5 | 1 |
| 3 | 12.6 | 1 |
| 4 | 15.1 | 1 |
| 5 | 16.6 | 1 |
| 6 | 15.2 | 1 |
| 7 | 14.7 | 2 |
| 8 | 7.3 | 2 |
| 9 | 12.7 | 2 |
| 10 | 10 | 2 |
| 11 | 12.3 | 2 |
| 12 | 17.6 | 2 |
| 13 | 5 | 2 |
| 14 | 22.6 | 2 |
| 15 | 7.6 | 2 |
| 16 | 16.4 | 2 |

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นว่า แม้ว่าจะทำการสปีดเตอริงโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิเกิลที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเป็นแบบกลุ่มก้อนเพื่อให้ขาดจากกันทางไฟฟ้าแล้วก็ตาม แต่เมื่อทดลองวัดค่าความต้านทานกลับพบว่ากลุ่มก้อนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถนำไฟฟ้าได้โดยมีค่าความต้านทานอยู่ในช่วง 5 -23 โอห์ม ซึ่งผิดกับที่คาดหมายไว้ว่าเมื่อสปีดเตอริงแบบกลุ่มก้อนแล้วกลุ่มก้อนของนิเกิลจะไม่นำไฟฟ้าเมื่อวัดค่าความต้านทานจะต้องได้ค่าความต้านทานเป็น กิโลโอห์มหรือเมกะโอห์ม ทั้งนี้อาจเกิดจากการในขั้นตอนการสปีดเตอริงมีการเปิดชุดเตอรัมนเกินไปทำให้อนุภาคของนิเกิลอยู่ใกล้กันมากหรือหนาแน่นมากเกินไปทำให้เกิดปรากฏการณ์กระแสทะลุอุโมงค์ (Tunneling current) เป็นเหตุให้กลุ่มก้อนของนิเกิลสามารถนำไฟฟ้าได้ อีกเหตุผลหนึ่งคือ การสปีดเตอริงนั้น อะตอมของนิเกิลที่ถูกชน จะตกลงมาแบบสุ่ม (Random) ดังนั้นกลุ่มก้อนของนิเกิลจะไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมัครสอบทั่วทั้งแผ่นดิน เป็นเหตุให้มีเส้นทางเดินของอิเล็กทรอนิกส์ จากชั่วถึงชั่วได้ในขั้นตอนต่อไปจะ
นำฐานรองที่ได้ไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ แสดงรายละเอียดในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์และผลการสังเคราะห์

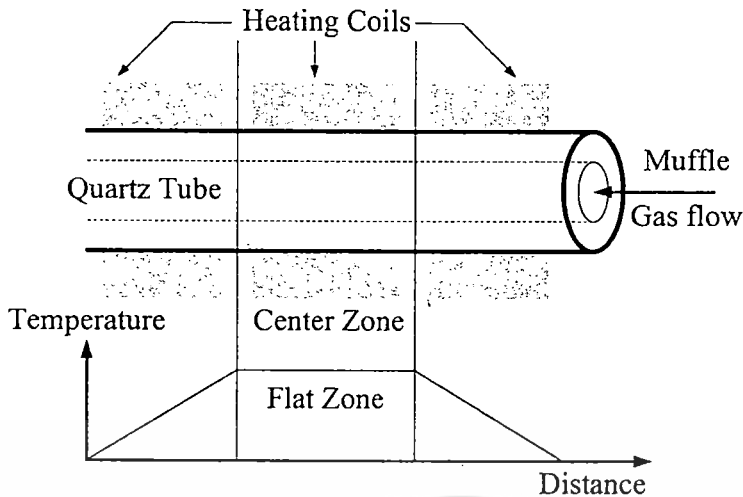
ในบทนี้กล่าวถึงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการตกตะกอน ไอเคมีด้วยความร้อน

(Thermal chemical vapor deposition) เพื่อที่นำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ การสังเคราะห์ กระทำบนฐานรองซิลิคอน ไดออกไซด์ ใช้เอทานอลเป็นสารแหล่งจ่ายคาร์บอนและซีแก๊สใน โครเจนเป็น ตัวนำพาสารแหล่งจ่ายคาร์บอน โดยวิธี CVD แบบความร้อนเป็นการประยุกต์เอาความร้อนแบบสาม โชนที่ ได้รับการสนับสนุน โครงการก่อนหน้านี้นี้มาเป็นเครื่องสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบ CVD แบบความร้อน เครื่อง CVD แบบความร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างเที่ยงตรง แหล่งจ่ายสารเจือ ไม่มีมลพิษซึ่งจะ แตกต่างจาก CVD แบบทั่วไปที่มักจะมีแหล่งจ่ายที่เป็นแก๊สพิษ มีอันตรายต่อการระเบิด เนื่องจากระบบที่ใช้ นี้ไม่มีสารพิษใดๆ จึงสามารถทำงานที่ความดันบรรยากาศ เป็นการสะดวกอย่างยิ่งในการใช้งาน ระบบ CVD แบบความร้อนสามารถสร้างพื้นที่ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ขนาดใหญ่ และสามารถสร้างครั้งละ มากๆได้ในเวลาเดียวกัน คุณภาพคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดีนำไปใช้งานทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีราคาต่ำใช้จ่ายถูกในการใช้งานแต่ละครั้ง เครื่องมีราคาถูกเพราะประกอบขึ้น เอง

4.1 เครื่อง CVD แบบความร้อน

4.1.1 เตาความร้อนแบบสามโชน

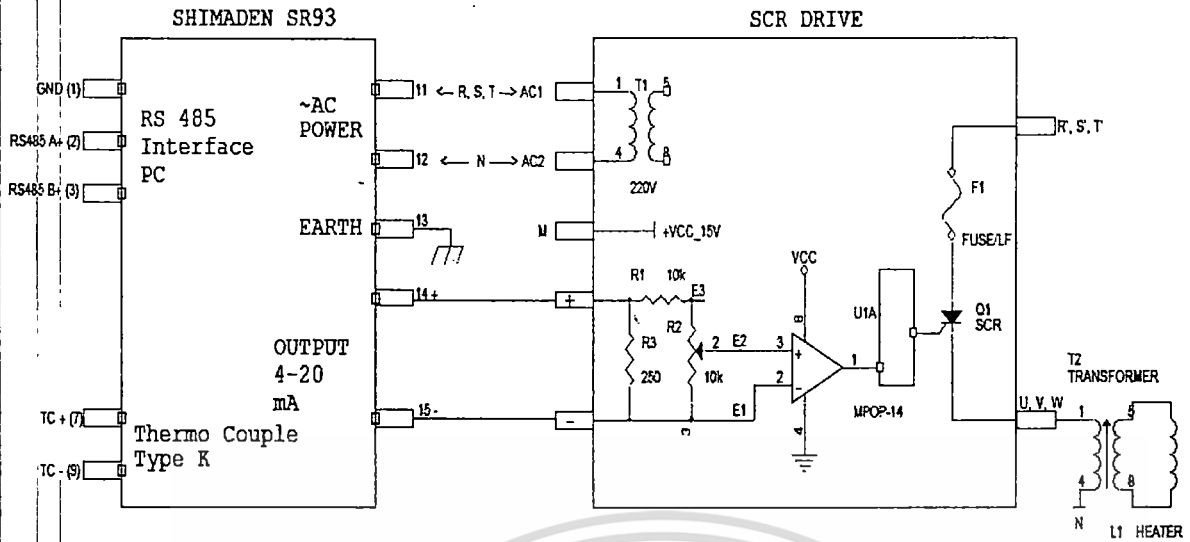
เครื่อง CVD แบบความร้อนอาศัยพลังงานความร้อนแตกตัวสารตั้งต้นที่ปกติเป็นสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอน พลังงานความร้อนปกติจะได้จากขดลวดความร้อน เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิมีความ เที่ยงตรงสูงเตาความร้อนจึงเป็นแบบสาม โชนที่มีขดลวดความร้อนแยกอิสระจากกันสามส่วนคือ ตอนต้น ตอนกลางและตอนปลาย แผนผัง โครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโชนแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ความร้อนที่ใช้



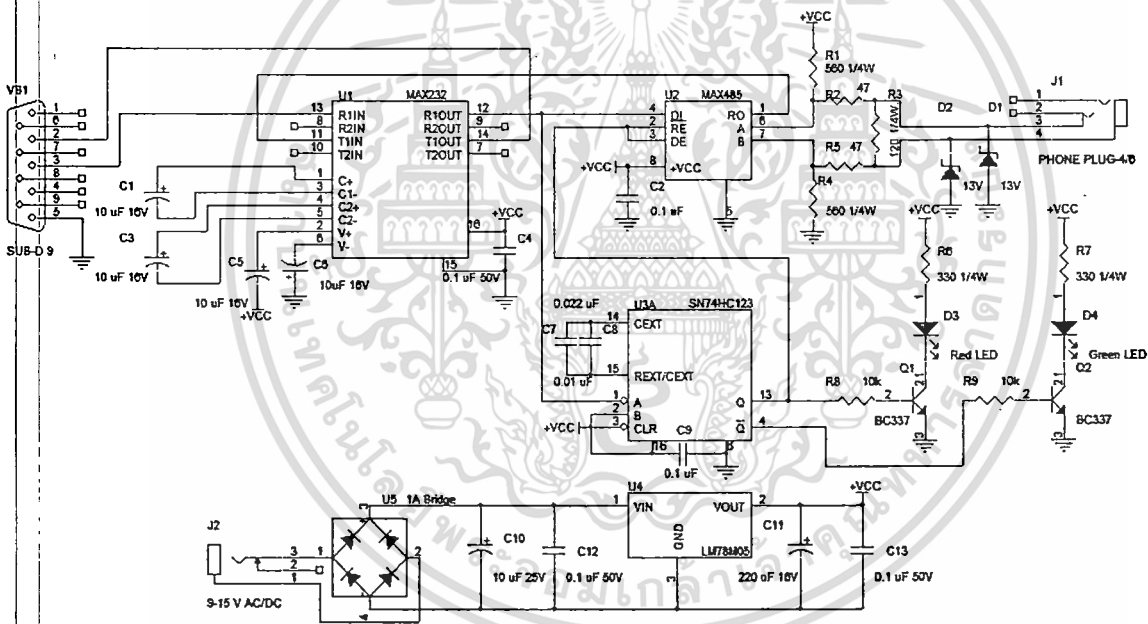
รูปที่ 4.1 โครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโซน

ในกระบวนการสังเคราะห์มีค่าสูงอยู่ในช่วง $750 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นจึงใช้ท่อควอตซ์เป็นส่วนหนึ่งของห้องปฏิบัติการ ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังรูปที่ 1 แสดงโครงสร้างแบบแนวนอน (ท่อควอตซ์วางในแนวนอน) อุณหภูมิของหลอดความร้อนทั้งสามตั้งให้มีค่าเท่ากัน อุณหภูมิส่วนปลายท่อทั้งสองจะมีค่าลดชันขึ้นจากค่าอุณหภูมิห้องและจะมีค่าคงที่ที่บริเวณกึ่งกลางท่อที่เรียกว่า flat zone ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเที่ยงตรงมาก $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสามารถใช้ในกระบวนการ CVD แบบความร้อนได้ อุณหภูมิที่คงที่จะทำให้ปฏิกิริยามีค่าคงที่และสม่ำเสมอในการสร้างฟิล์มบางวงจรเตาความร้อนแบบสามโซนแบ่งได้เป็นสามภาค ได้แก่ ภาคกำลัง, ภาคควบคุมและภาคเชื่อมต่อกับพอร์ต RS485 ดังรูปที่ 4.2 แสดงรายละเอียดวงจรภาคต่างๆ ของเตาความร้อนแบบสามโซน โดยวงจรภาคกำลังมีหน้าที่จ่ายกระแสแก่หลอดความร้อน ซึ่งใช้ไฟสามเฟสป้อนให้แก่ตัวขับ SCR ไปยังหม้อแปลงแบบสเต็ปดาวน์และต่อไปยังขดหลอดความร้อน การปรับขนาดกระแสและแรงดันทำผ่านมอดูลทริก SCR จากวงจรควบคุมอีกทีหนึ่งวงจรภาคควบคุมใช้วงจรควบคุม SHIMADEN SR93 ไปควบคุมตัวขับ SCR การควบคุมสามารถควบคุมได้ทั้งแบบ manual ซึ่งเป็นแบบลูปเปิด และแบบอัตโนมัติซึ่งเป็นแบบลูปปิดการตั้งค่าอุณหภูมิสามารถตั้งค่าได้ทั้งสองทางคือผ่านทางพอร์ต RS485 ผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์หรือตั้งค่าจากหน้าปัดวงจรควบคุมโดยตรงได้อีกทางหนึ่ง ในการควบคุมแบบลูปปิดการควบคุมอุณหภูมิทำได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างค่าที่ตั้งไว้กับค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ ถ้าค่าที่อ่านได้มีค่าน้อยกว่าค่าอุณหภูมิที่ต้องการวงจรควบคุมก็จะส่งคำสั่งไปยังวงจรขับ SCR ทำงาน และเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ วงจรควบคุมจะส่งคำสั่งไปยังวงจรขับ SCR ให้หยุดทำงาน ผลของอุณหภูมิจะถูกติดตามและบันทึกเก็บค่าไว้ สำหรับวงจรการเชื่อมต่อกับ RS485 เพื่อใช้สำหรับสั่งการควบคุมจากหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



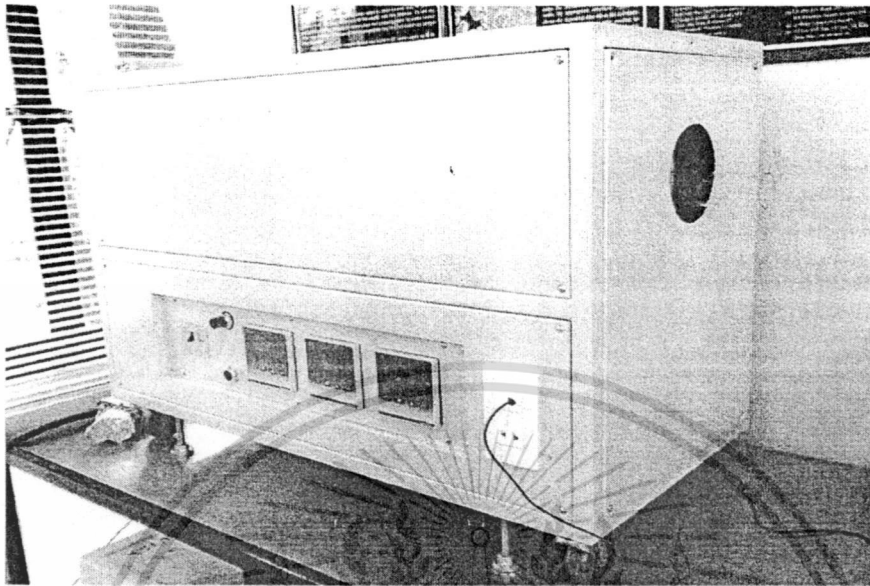
RS485 Interface Circuit

(ค)

รูปที่ 4.2 วงจรเตาความร้อนแบบสาม โชน (ต่อ)

(ข) วงจรควบคุม และ (ค) วงจรเชื่อมต่อ RS 485

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายเตาความร้อนที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

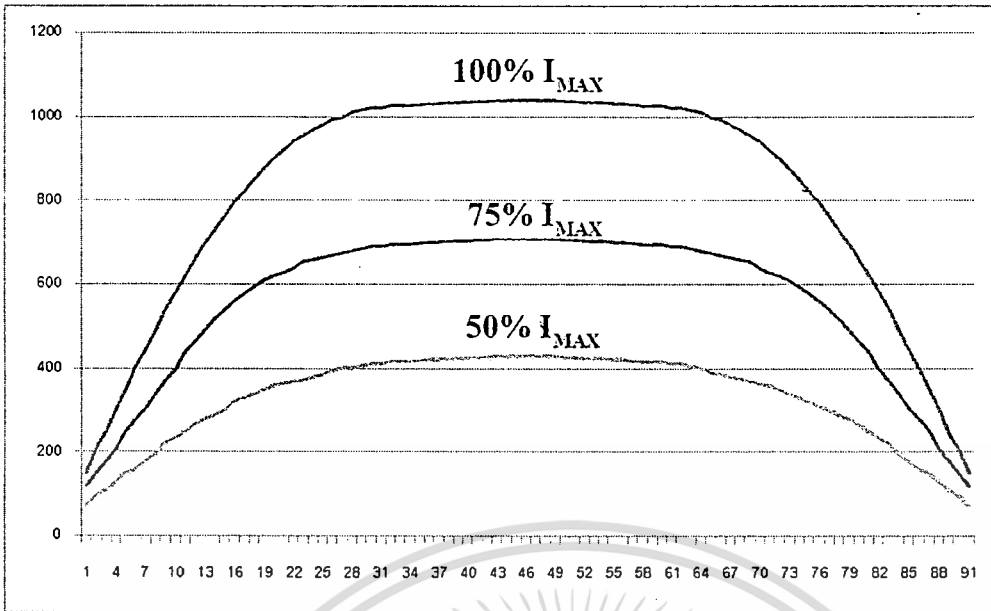
4.1.2 คุณสมบัติเตาความร้อนแบบสามโซน

การทดสอบเตาความร้อนกระทำในสองลักษณะได้แก่ การทดสอบแบบเปิดลูบและแบบปิดลูบ การทดสอบแบบเปิดลูบกระทำในรูปการป้อนการควบคุมการป้อนกระแสคงที่ที่แก่ขดลวด โดยทำการทดสอบในรูปการป้อนกระแสเป็นสัดส่วนกับค่ากระแสสูงสุด โดยการทดสอบนี้กระทำที่สามเงื่อนไขด้วยกันคือที่ 50%, 75% และ 100% ของค่ากระแสสูงสุด ส่วนการทดสอบแบบปิดลูบจะเป็นการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อเตามีอุณหภูมิกงที่จะทำการวัดอุณหภูมิเตาที่ตำแหน่งต่างๆ

ผลการทดสอบทั้งสองแบบแสดงดังในรูปที่ 4.4 โดยรูปที่ 4.4 (ก) เป็นการทดสอบแบบเปิดลูบ โดยการตั้งค่ากระแสที่ต่างๆจะสังเกตเห็นว่าช่วงอุณหภูมิกงที่จะแบนราบ และอุณหภูมิจุดสูงสุดของเตามีค่าประมาณ 1000 °C ส่วนในรูปที่ 4.4 (ข) เป็นการทดสอบแบบปิดลูบโดยตั้งค่าอุณหภูมิกงที่ที่ 750 °C จากการทดลองพบว่าที่ตรงบริเวณ flat zone จะมีอุณหภูมิกงที่ที่ 750 °C จากการทดลองทั้งสองมีค่าช่วง flat zone ประมาณ 30 เซนติเมตร ในส่วนใกล้ปากเตาค่าอุณหภูมิจจะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจากค่าที่อุณหภูมิกงที่ยังอุณหภูมิกงที่อย่างสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

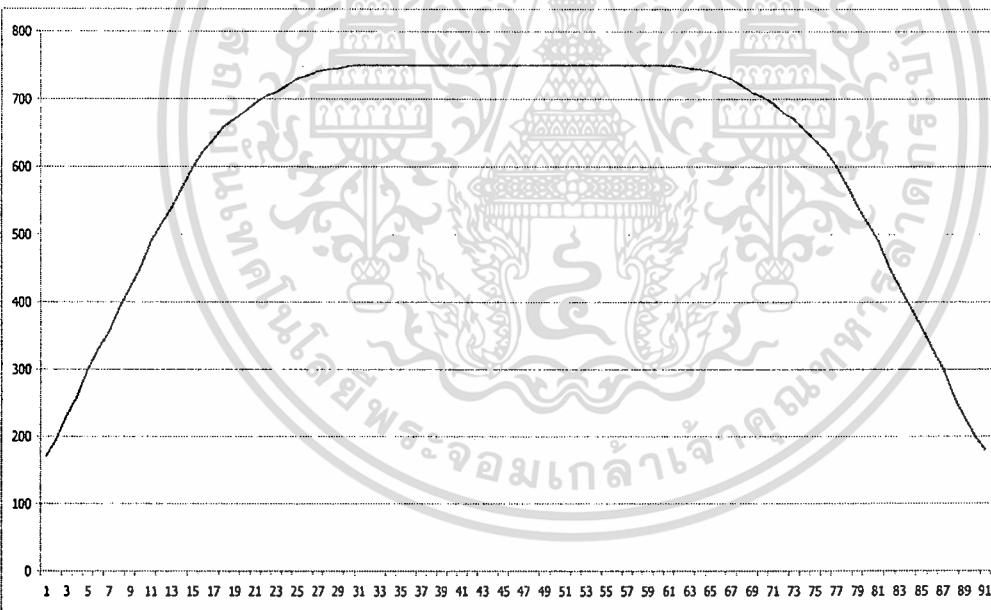
อุณหภูมิ (°C)



ความยาวของท่อควอตซ์ (cm)

(ก)

อุณหภูมิ (°C)



ความยาวของท่อควอตซ์

(ข)

รูปที่ 4.4 อุณหภูมิของเตาความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อควอตซ์

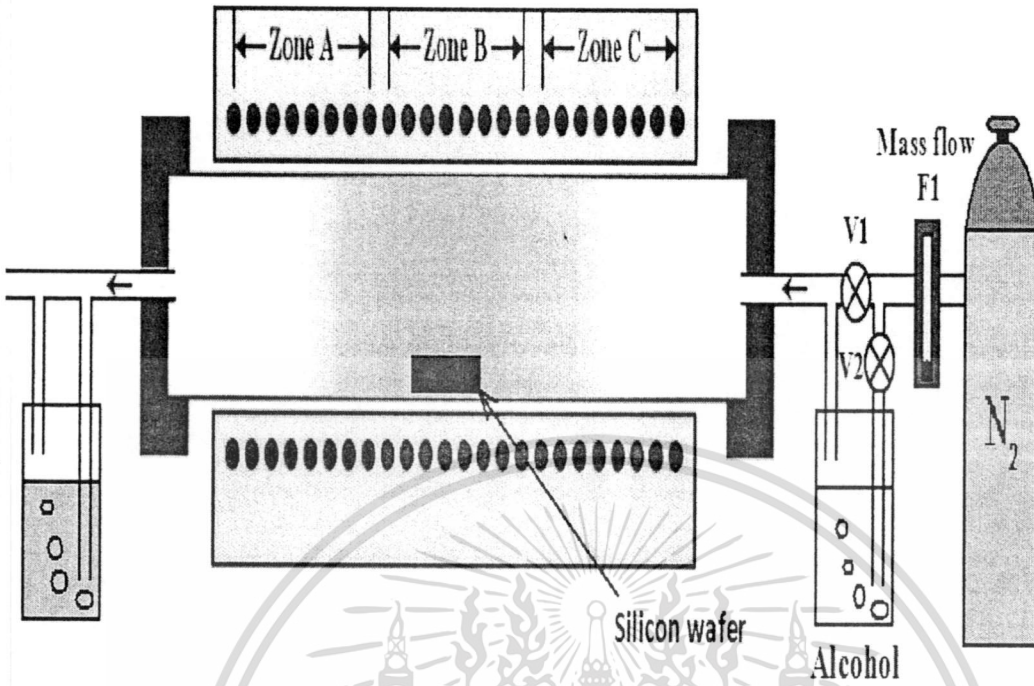
(ก) แบบเปิดรูป และ (ข) แบบปิดรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2. การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย CVD แบบความร้อน

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย CVD แบบความร้อน อาศัยหลักการที่ว่าความร้อนจะทำให้สารประกอบที่เป็นแหล่งจ่ายตั้งต้นของสารที่ต้องการสังเคราะห์แตกตัวและก่อตัวใหม่เป็นสารที่ต้องการบนแผ่นฐานที่เตรียมสภาพพื้นผิวไว้อย่างเหมาะสม โดยแผ่นฐานจะต้องมีอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงจะทำให้เกิดการก่อตัวของวัสดุที่ต้องการ ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สารตั้งต้นจะต้องเป็นสารประกอบคาร์บอนซึ่งโดยมากสารตั้งต้นจะมีสถานะเป็นแก๊สหรือไอระเหย ในการสังเคราะห์นี้ใช้แอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นและใช้แก๊สเฉื่อยไนโตรเจนเป็นตัวนำพาไอแอลกอฮอล์ รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างเครื่อง CVD แบบความร้อน โดยปลายด้านหนึ่งของท่อควอตซ์ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแก๊สไนโตรเจนและแอลกอฮอล์ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งมีระดับน้ำเป็นตัวดักจับแก๊สที่เหลือจากปฏิกิริยาและเป็นตัวป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกไหลเข้าไปในท่อควอตซ์

กระบวนการสังเคราะห์เริ่มต้นจากตั้งค่าอุณหภูมิเตาที่ 500°C เมื่ออุณหภูมิเตาคงที่แล้วใส่แผ่นฐานที่เตรียมจากซิลิกอน ไดออกไซด์ที่มีโลหะหนักเคลือบเป็นเม็ดเล็กๆ กระจายตัวทั้งแผ่นด้วยวิธีการสปีเตอร์มีหน้าที่เป็นตัวคะตะไลต์ในการสังเคราะห์ นำแผ่นฐานไว้ที่กลางเตาและปรับค่าอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในการทดลองนี้ใช้ค่าตั้งแต่ $650-750^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ตลอดช่วงในขณะที่ปล่อยแก๊สไนโตรเจนผ่านมิเตอร์ F1 ผ่านวาล์ว V1 ด้วยอัตราการไหล 0.2 ลิตรต่อนาที เมื่ออุณหภูมิเตาคงที่ที่อุณหภูมิดังกล่าวปิดวาล์ว V1 และเปิดวาล์ว V2 และปรับมิเตอร์ F1 ให้แก๊สไนโตรเจนไหลผ่านวาล์ว V2 ที่อัตราการไหล 0.3 - 0.5 ลิตรต่อนาที ไนโตรเจนจะนำพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไปในท่อควอตซ์ และใช้เวลาในการสังเคราะห์ในช่วง 5-10 นาที หลังจากนั้นปิดวาล์ว V2 และเปิดวาล์ว V1 ปรับอัตราการไหล 0.2 ลิตรต่อนาที ตั้งค่าอุณหภูมิเตาตกลงที่ 500°C แล้วนำแผ่นฐานออกจากเตาเพื่อนำไปตรวจสอบต่อไป

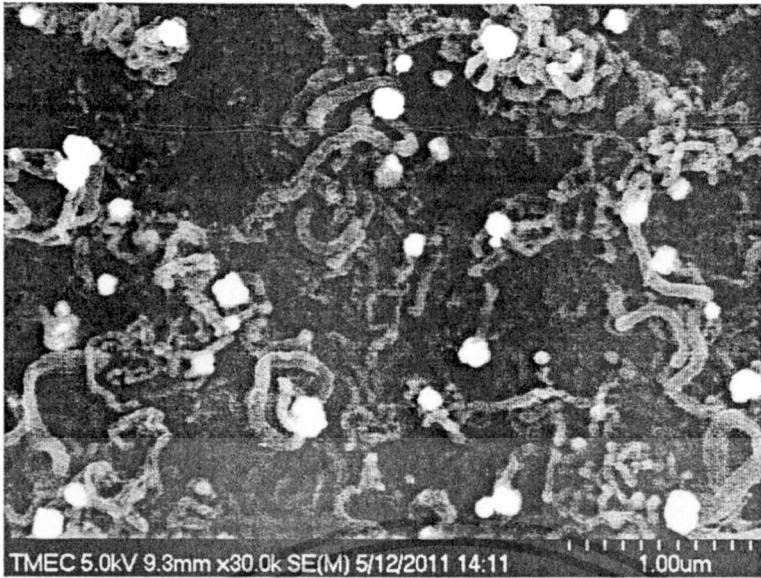


รูปที่ 4.5 แผนภาพเครื่อง CVD แบบความร้อน

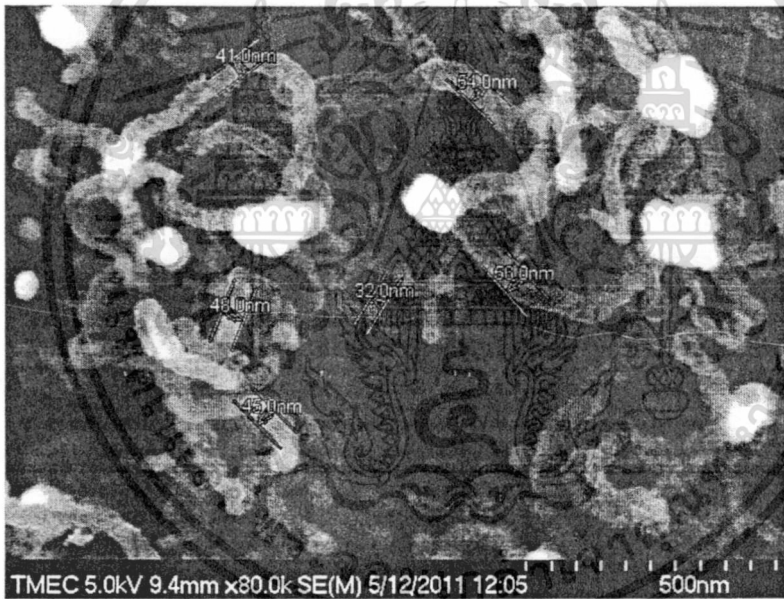
4.3. ผลการทดลอง

ผลการตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่อัตราขยายแตกต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 สังเกตเห็นว่าวัสดุที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นท่อยาวขนาดเล็กจำนวนมากไม่เป็นวัสดุที่แน่นทึบ เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติวัสดุที่ได้เป็นคาร์บอน ซึ่งสารที่สังเคราะห์ได้นั้นเป็นโครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ ในรูปสังเกตเห็นว่าโลหะนิเกิลที่เป็นตัวคะตะไลต์อยู่ด้านบนของฟิล์มบาง โดยรูปที่ 4.6 (ก) แสดงให้เห็นท่อ-คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่กำลังขยายสามหมื่นเท่า ส่วนรูปที่ 4.6 (ข) แสดงให้เห็นขนานเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคาร์บอนที่กำลังขยายแปดหมื่นเท่า ซึ่งมีขนาดประมาณ 30-50 นาโนเมตร และรูปที่ 4.6 (ค) เป็นภาพตัดขวางที่กำลังขยายหนึ่งหมื่นเท่า แสดงให้เห็นถึงความหนาของฟิล์มคาร์บอน-นาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากรูปพบว่าค่าความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วง 4-5 ไมโครเมตร ลักษณะของฟิล์มบางคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดขึ้นกระจายตัวเต็มพื้นที่แผ่นฐานรอง โครงสร้างอุปกรณ์เซนเซอร์เป็นแบบตัวต้านทานโดยมีขั้วไฟฟ้าเป็นทองแดงสองขั้วสำหรับใช้งาน รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างเสร็จแล้ว โดยมีขั้วทองแดงสำหรับใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



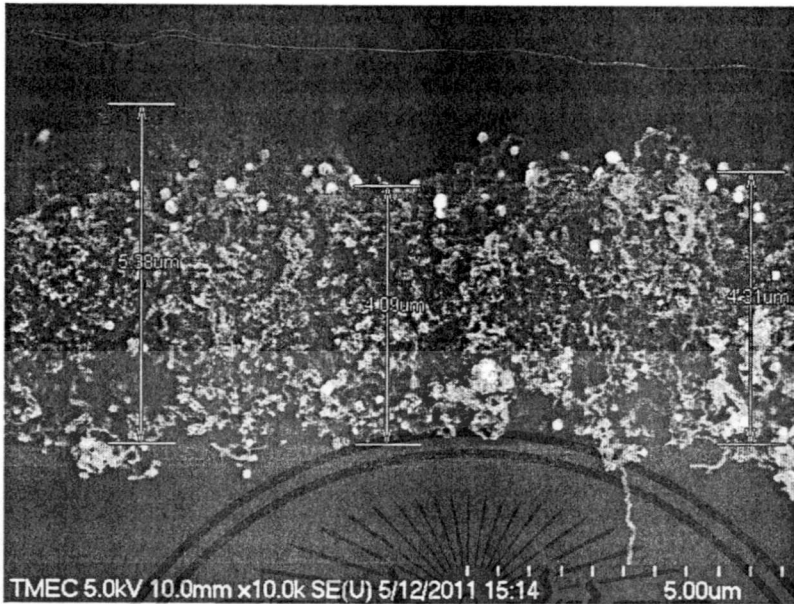
(ข)

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM : Scanning Electron Microscope)

(ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 3 หมื่นเท่า, (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 8 หมื่นเท่า และ

(ค) ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 1 หมื่นเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM : Scanning Electron Microscope)

- (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 3 หมื่นเท่า, (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 8 หมื่นเท่า และ
(ค) ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 1 หมื่นเท่า



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายอุปกรณ์เซนเซอร์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ และผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จากบทที่ 4 มาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์เคมี โดยนำมาทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล จุดประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวป์โดยสังเกตจากค่าความต้านทานที่จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตรวจพบแก๊สที่ปล่อยเข้ามาในระบบวัด โดยจะศึกษาการตรวจวัดแก๊สด้วยกัน 3 กรณี คือ

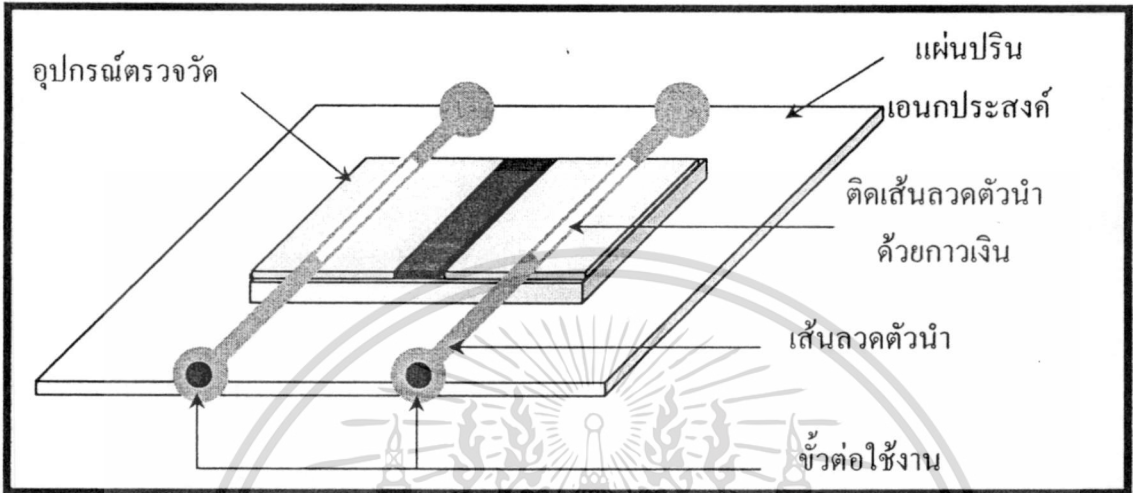
1. ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในระบบวัด โดยทำการตรวจวัดที่อุณหภูมิห้องและให้ความร้อนในระบบวัด
2. ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในการอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ก่อนนำเข้าสู่ระบบวัด
3. ศึกษาถึงผลของขนาดพื้นที่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ในการตรวจวัดแก๊ส

ในการตรวจวัดนั้นจำเป็นที่จะต้องทราบชนิดของแก๊สตั้งต้นในระบบและต้องเป็นบรรยากาศของแก๊สชนิดเดียวเท่านั้น เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์ยังขาดคุณสมบัติทางกายภาพประเภทของแก๊ส จึงทำการทดลองในอากาศปกติไม่ได้ เพราะคาร์บอนนาโนทิวป์จะทำปฏิกิริยากับแก๊สชนิดต่างๆ ในอากาศ ทำให้ไม่สามารถทราบได้เลยว่าขณะนั้นคาร์บอนนาโนทิวป์ทำปฏิกิริยากับแก๊สชนิดใดอยู่ ดังนั้นในการทดลองจะใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตั้งต้น เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สเฉื่อย โดยจะต้องไล่อากาศหรือแก๊สอื่นๆ ออกจากระบบก่อนเป็นเวลา 20 นาที และถือว่าค่าความต้านทานของเซนเซอร์ที่เวลา 20 นาที นี้เป็นค่าความต้านทานตั้งต้น (R_0) แล้วจึงปล่อยแก๊สที่ต้องการตรวจวัดเข้าไป ในการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลใช้อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ประมาณ 400 ซีซีต่อนาทีและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนผ่านเอทานอลเพื่อนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล ประมาณ 200 ซีซีต่อนาที

ผลการทดลองการตรวจวัดจะแสดงในรูปกราฟความต้านทานและเวลา ซึ่งจะแสดงผลพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อคาร์บอนนาโนทิวป์เมื่อทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของแก๊ส

5.1 การต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้วัดความต้านทาน

จุดประสงค์เพื่อต่อขั้วไฟฟ้าจากขั้วทองแดงบนฐานรอง เพื่อใช้วัดค่าความต้านทาน



รูปที่ 6.1 แสดงรายละเอียดการต่อขั้วออกไปใช้งาน

ในบทที่ 5 หลังจากสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบนฐานรองแล้วจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนแปลง (จากตารางที่ 5.3) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนเปลี่ยนจากการเคลื่อนไปบนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยามาเคลื่อนอยู่บนผนังของคาร์บอนนาโนทิวแทน เมื่อนำมาต่อขั้วใช้งานและทดสอบวัดค่าความต้านทานอีกครั้งก็พบว่าค่าความต้านทานได้เปลี่ยนแปลงไปอีกแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานก่อนการสังเคราะห์ หลังการสังเคราะห์และหลังการต่อขั้ว

| ลำดับ | ค่าความต้านทาน ก่อนสังเคราะห์ (โอห์ม) | ค่าความต้านทาน หลังสังเคราะห์ (โอห์ม) | ค่าความต้านทาน หลังต่อขั้ว (โอห์ม) | โครงสร้างที่ |
|-------|---|---|--|--------------|
| 1 | ไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิว | | | |
| 2 | 12.5 | 370.3k | 506.5k | 1 |
| 3 | 12.6 | 206 | 167.2 | 1 |
| 4 | 15.1 | 3.078k | 5.94k | 1 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานก่อนการสังเคราะห์ หลังการสังเคราะห์ และหลังการต่อข้อ

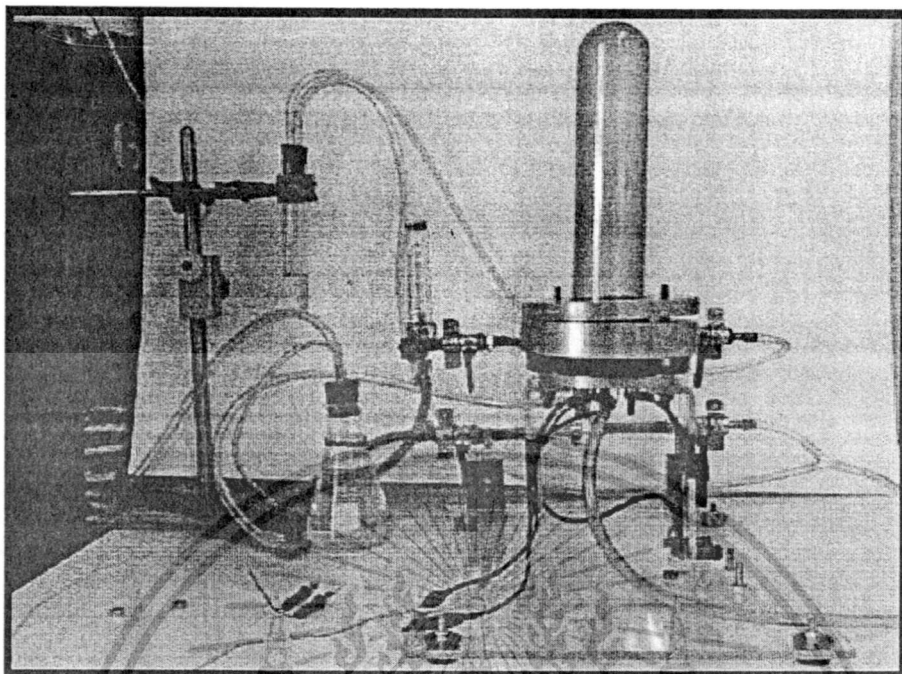
| ลำดับ | ค่าความต้านทาน ก่อนสังเคราะห์ (โอห์ม) | ค่าความต้านทาน หลังสังเคราะห์ (โอห์ม) | ค่าความต้านทาน หลังต่อข้อ (โอห์ม) | โครงสร้างที่ |
|-------|---|---|---|--------------|
| 5 | 16.6 | 28 | 54.7 | 1 |
| 6 | 15.2 | 321.2 | 716 | 1 |
| 7 | 14.7 | 326.4 | 1.22k | 2 |
| 8 | 7.3 | 307.77 | 488.2 | 2 |
| 9 | 12.7 | 750 | 505 | 2 |
| 10 | ไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ | | | |
| 11 | 12.3 | 3.5k | 16.64k | 2 |
| 12 | 17.6 | 1.3k | 275k | 2 |
| 13 | ไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ | | | |
| 14 | 22.6 | 370 | 1.26k | 2 |
| 15 | 7.6 | 20.06k | 150k | 2 |
| 16 | 16.4 | 5.60k | 7.97k | 2 |

จากตารางที่ 5.1 พบว่าหลังต่อข้อค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนไป โดยมีค่ามากขึ้น เนื่องจากสาเหตุที่ค่าความต้านทานที่รอยสัมผัส มีการเปลี่ยนแปลง โดยจะอธิบายถึงสาเหตุดังกล่าวในข้อ 5.4

5.2 การทดลองตรวจวัดแก๊ส

ทำการทดลองตรวจวัดแก๊ส คือ ไอระเหยของเอทานอล และ ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในระบบวัด ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในการอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ก่อนนำเข้าสู่ระบบวัด ศึกษาถึงผลของขนาดพื้นที่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดแก๊ส มีการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงระบบที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊ส

5.2.1 การนำไปทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

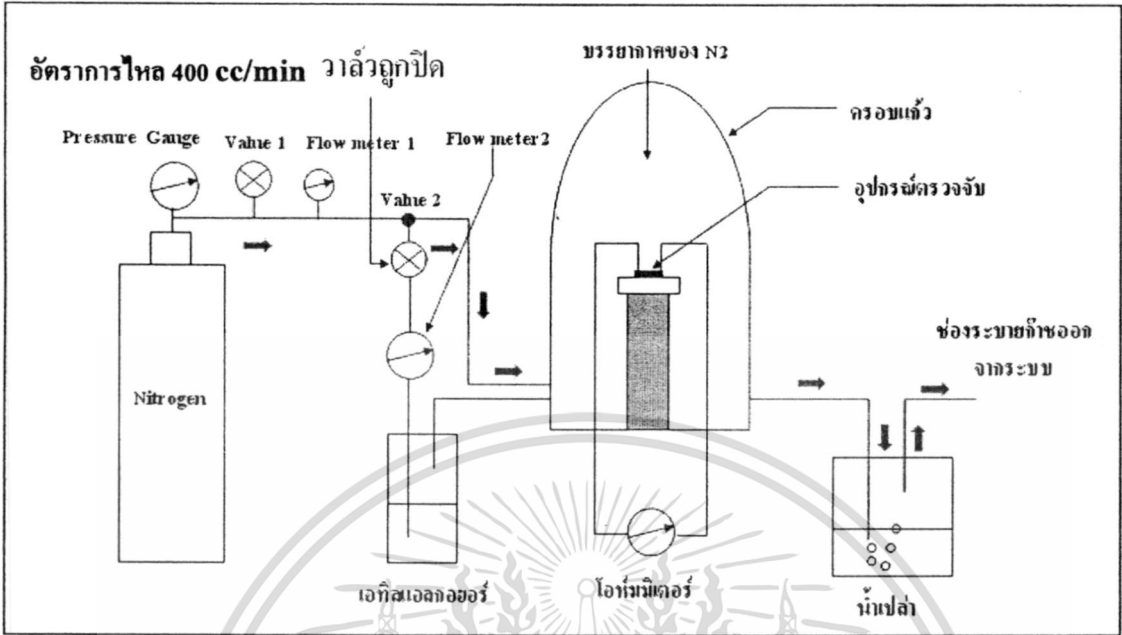
เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อทำปฏิกิริยากับไอระเหยของเอทานอล โดยจะทำการทดลอง 2 ลักษณะ คือ

5.2.1.1 ทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่อุณหภูมิห้อง

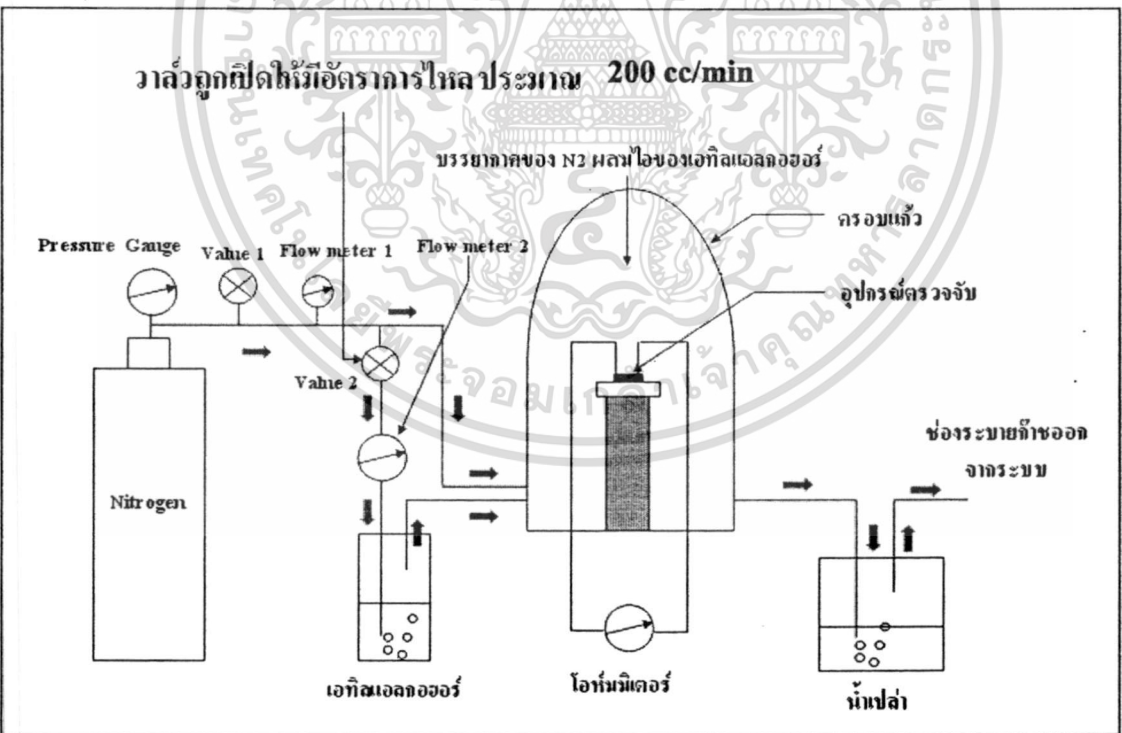
1. ขั้นตอนการไล่อากาศออกจากระบบวัดโดยปล่อยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 20 นาที ดังรูปที่ 5.3 เปิดวาล์ว 1 และปิดวาล์ว 2 ให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้าไปในระบบอย่างเดียว โดยมีอัตราการไหลประมาณ 400 ซีซีต่อนาที ใช้เวลา 20 นาที เพื่อให้บรรยากาศภายในครอบแก้วเป็นแก๊สไนโตรเจนเท่านั้น

2. เมื่อครบ 20 นาทีแล้วให้สังเกตค่าความต้านทานของอุปกรณ์ตรวจวัด จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งนั่นคือค่าความต้านทานในขณะที่ยังคาร์บอนนาโนทิวบ์ทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนจะถือว่าค่าความต้านทานค่านี้เป็นค่าตั้งต้น (R_0) ต่อไปให้ไอระเหยของเอทานอล โดยการเปิดวาล์ว 2 แก๊สไนโตรเจนจะไหลไป 2 ทิศทางและนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้าสู่ ครอบแก้ว ด้วยอัตราการไหลประมาณ 200 ซีซีต่อนาที บรรยากาศในครอบแก้วในขณะนั้นจะประกอบไปด้วยแก๊สไนโตรเจนและไอระเหยของเอทานอล สังเกตและบันทึกค่าความต้านทานซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 การไล่ก๊าซออกจากครอบแก้ว



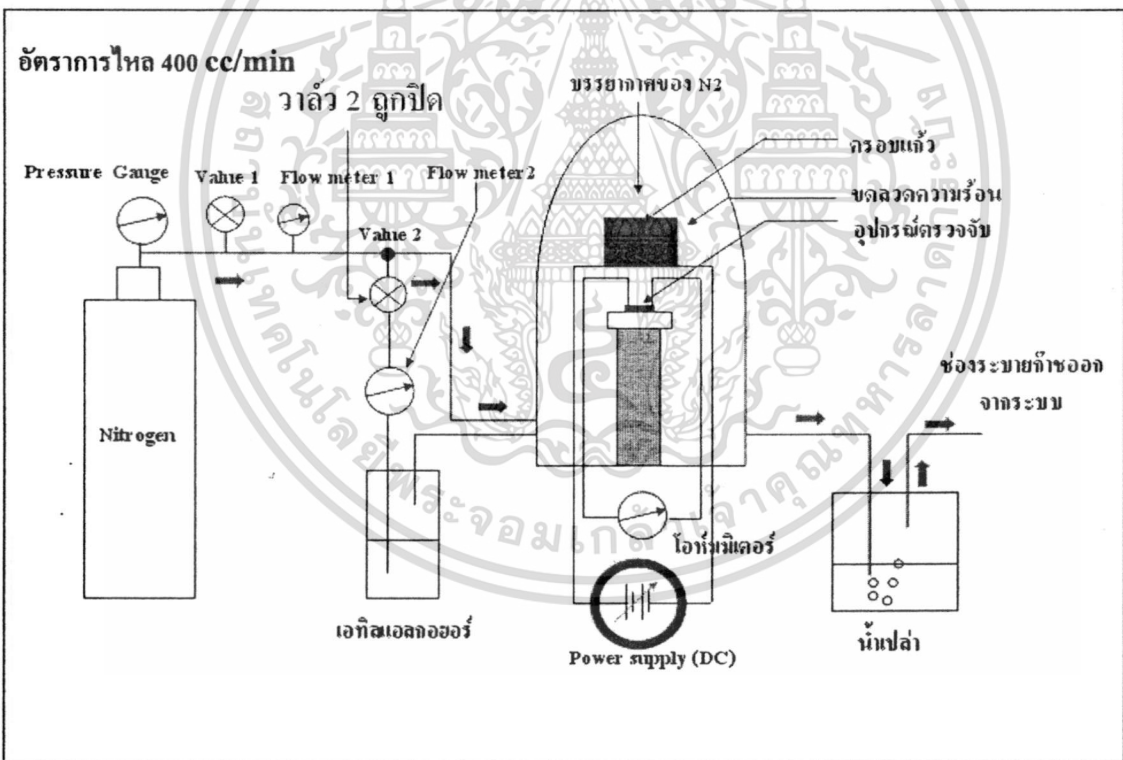
รูปที่ 5.4 เปิดวาล์ว 2 เพื่อให้ไอระเหยของเอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อให้ไอระเหยของเอทานอลจนอุปกรณ์ตรวจวัดมีค่าความต้านทานคงที่ค่าหนึ่งแล้วต่อไปจะทำซ้ำอีกครั้งเพื่อศึกษาว่าอุปกรณ์ตรวจวัดมีคุณสมบัติในการตรวจซ้ำเหมือนเดิมหรือไม่ โดยการหยุดจ่ายไอระเหยของเอทานอลด้วยการปิดวาล์ว 2 แล้วปล่อยให้ค่าความต้านทานคงที่อีกครั้งหนึ่งจึงเริ่มให้ไอระเหยของเอทานอลอีกครั้งด้วยการเปิดวาล์ว 2

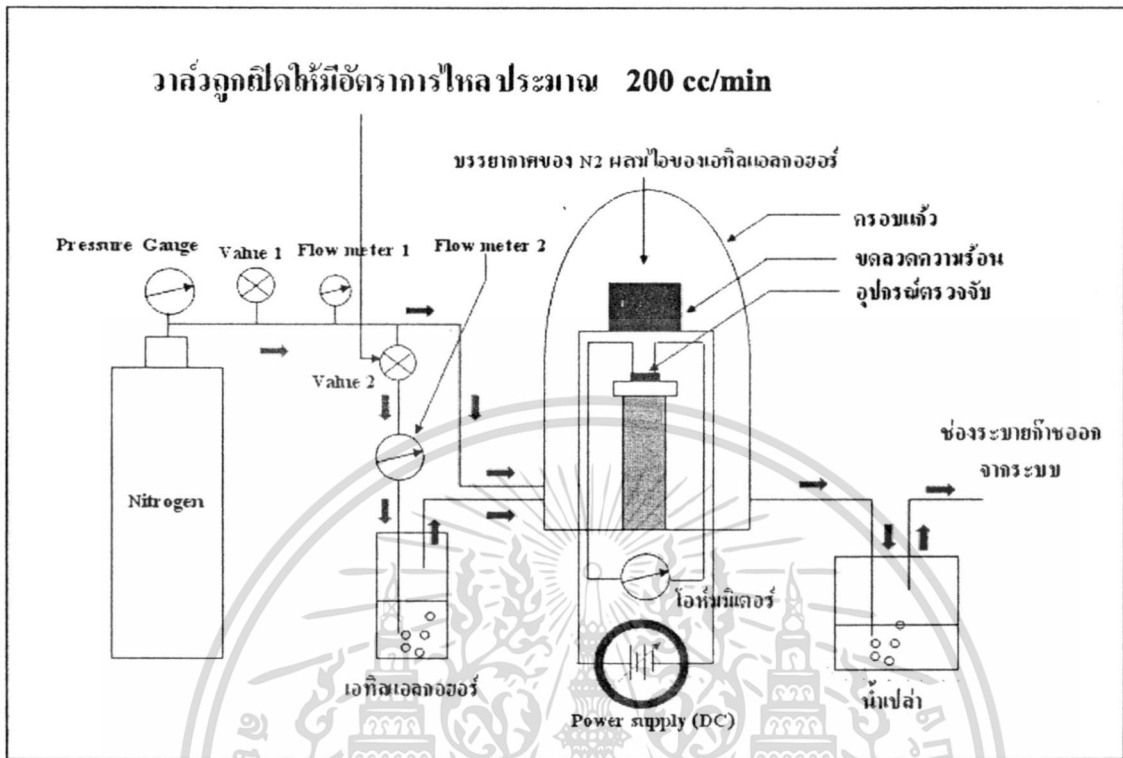
5.2.1.2 ทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลโดยให้ความร้อนในระบบวัด

เพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่อการตรวจวัด โดยกระทำเหมือนข้อ 5.2.1.1 แต่มีการให้ความร้อนในระบบโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวด โดยให้กำลังงานกับขดลวดประมาณ 15 วัตต์ หรือมีอุณหภูมิประมาณ 50 – 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.5 การไล่อากาศออกจากครอบแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.2.2 การนำไปทดลองตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (ทดลองเบื้องต้น)

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจน โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

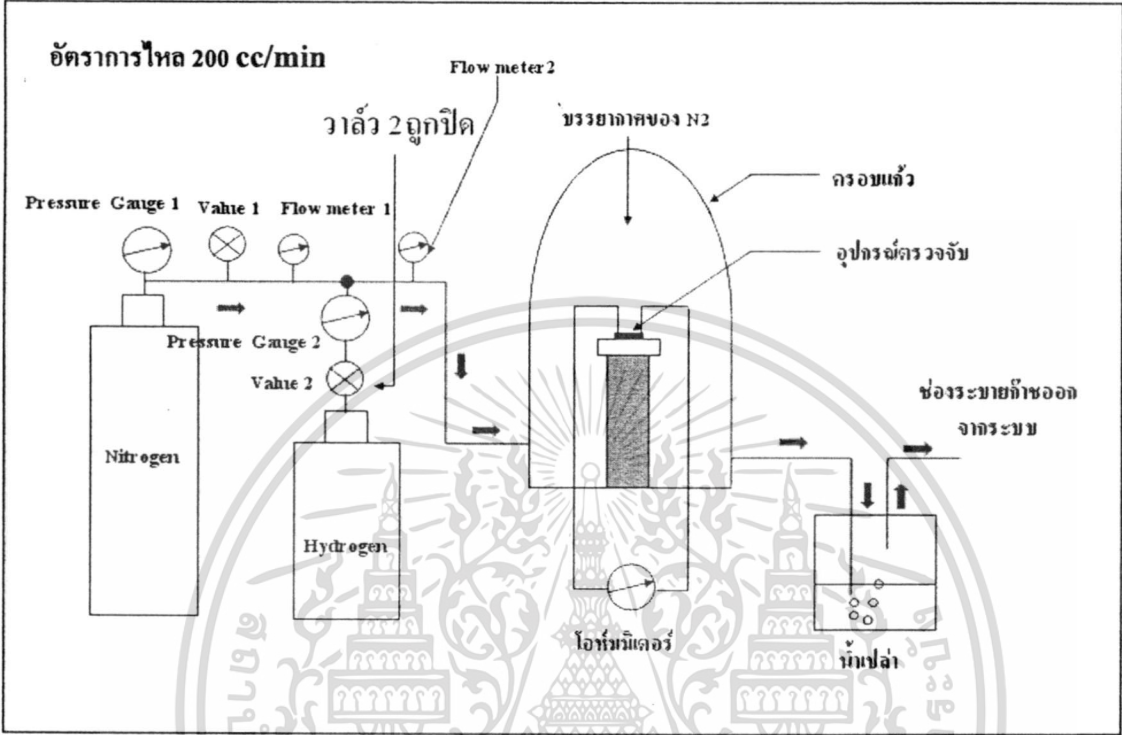
5.2.2.1 ทดลองตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิห้อง

1. ขั้นตอนการไล่อากาศออกจากระบบวัดโดยปล่อยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 20 นาที ดังรูปที่ 5.7 เปิดวาล์ว 1 และปิดวาล์ว 2 ให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้าไปในระบบอย่างเดียว ใช้เวลา 20 นาที อัตราการไหลประมาณ 200 ซีซีต่อนาที เพื่อให้บรรยากาศภายในครอบแก้วเป็นแก๊สไนโตรเจนเท่านั้น

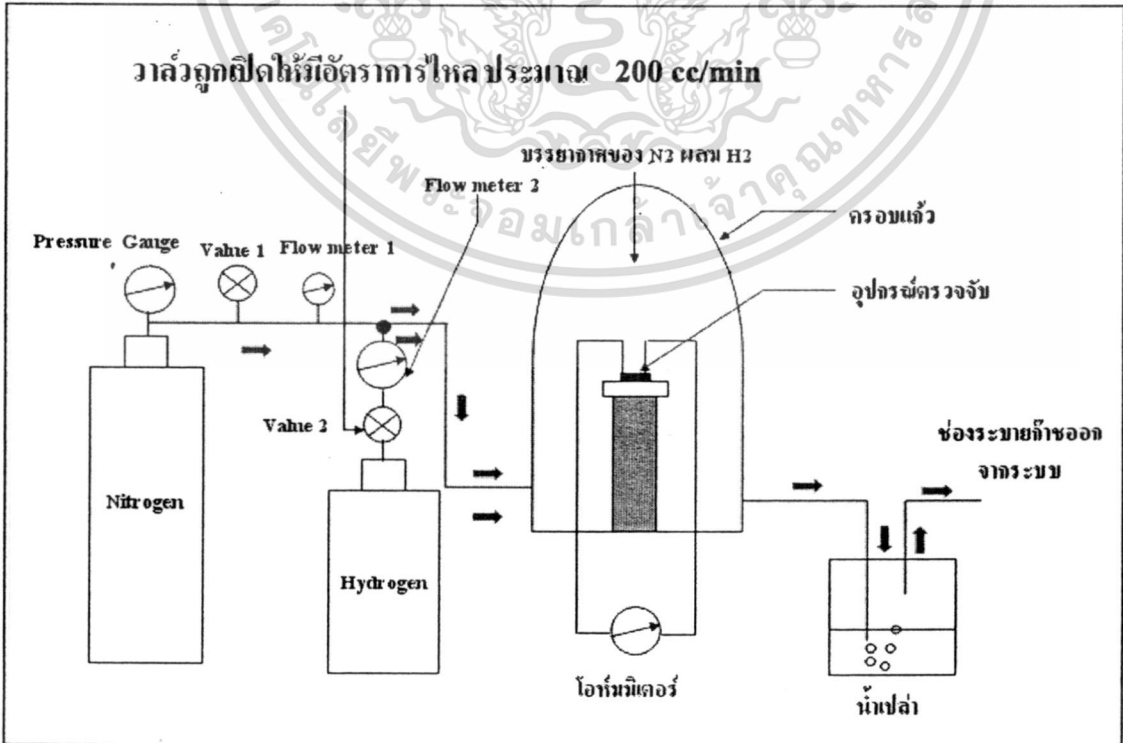
2. เมื่อครบ 20 นาทีแล้วให้สังเกตค่าความต้านทานของอุปกรณ์ตรวจวัด จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งนั่นคือค่าความต้านทานในขณะที่คาร์บอนนาโนทิวบ์ทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนจะถือว่าค่าความต้านทานค่านี้เป็นค่าตั้งต้น (R_0) ต่อไปให้แก๊สไฮโดรเจน โดยการเปิดวาล์ว 2 โดยให้มีอัตราการไหลประมาณ 200 ซีซีต่อนาที บรรยากาศภายในครอบแก้วในขณะนั้นจะประกอบไปด้วยแก๊สไนโตรเจนและแก๊สไฮโดรเจน สังเกตและบันทึกค่าความต้านทานซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไป

3. เมื่อให้แก๊สไฮโดรเจนจนอุปกรณ์ตรวจวัดมีค่าความต้านทานคงที่ค่าหนึ่งแล้ว ต่อไปจะทำการซ้ำอีกครั้งเพื่อศึกษาว่าอุปกรณ์ตรวจวัดมีคุณสมบัติในการตรวจซ้ำเหมือนเดิมหรือไม่ โดยการไม่ทำการวัดใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หยุดจ่ายแก๊สไฮโดรเจนด้วยการปิดวาล์ว 2 แล้วปล่อยให้ค่าความดันทานคงที่อีกครั้งหนึ่งจึงเริ่มให้แก๊สไฮโดรเจนอีกครั้งด้วยการเปิดวาล์ว 2



รูปที่ 5.7 การไล่ก๊าซออกจากกรอบแก้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดลองการตรวจวัดแก๊ส

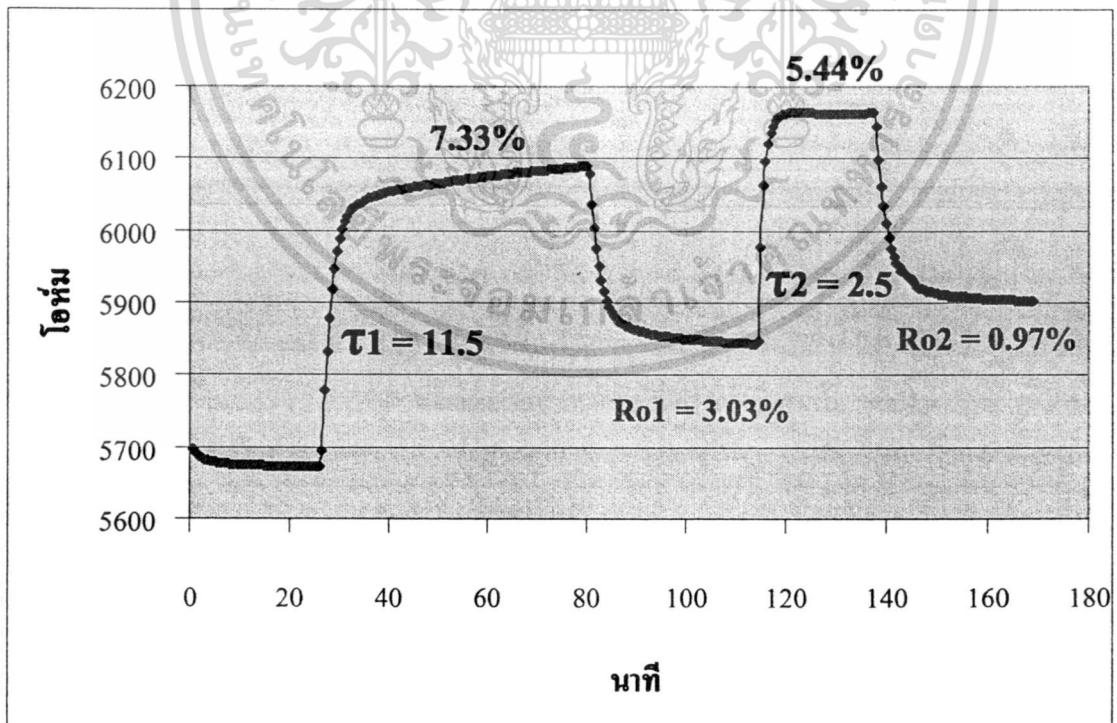
หลังจากทำการทดลองโดยมีขั้นตอนแสดงดังข้อ 5.2 แล้ว ต่อไปจะแสดงผลการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทธานอลในรูปกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อเวลา โดยให้ค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เป็นค่าความต้านทานตั้งต้น (R_0) และค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวตรวจวัดขณะตรวจพบไอระเหยของเอทธานอล เป็นค่าความต้านทาน R_s

5.3.1 ผลการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทธานอลที่อุณหภูมิห้อง

ในการทดลองจะมีการอบตัวตรวจวัดเพื่อไล่ความชื้นหรือธาตุแปลกปลอมอื่นๆ ที่ตกค้างอยู่ในฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่สามารถระเหยเป็นไอที่ อุณหภูมิ 50 – 85 องศาเซลเซียส ด้วยอุณหภูมิ ดังนี้คือ ไม่มีการอบตัวตรวจวัด, อบที่อุณหภูมิ 50,70,85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที

5.3.1.1 ผลการทดลองการตรวจวัดไอระเหยของเอทธานอลที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่มีการอบตัวตรวจวัดก่อนนำเข้าสู่ระบบวัด

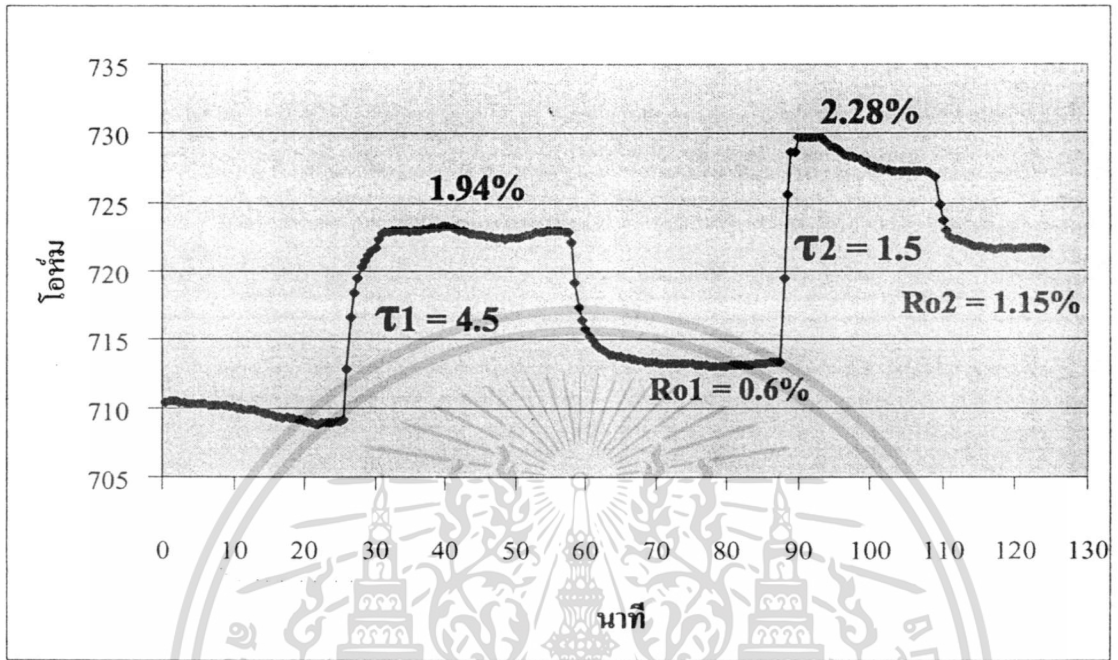
1. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 4 โครงสร้างที่ 1



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอล แผ่นตัวอย่างที่ 4

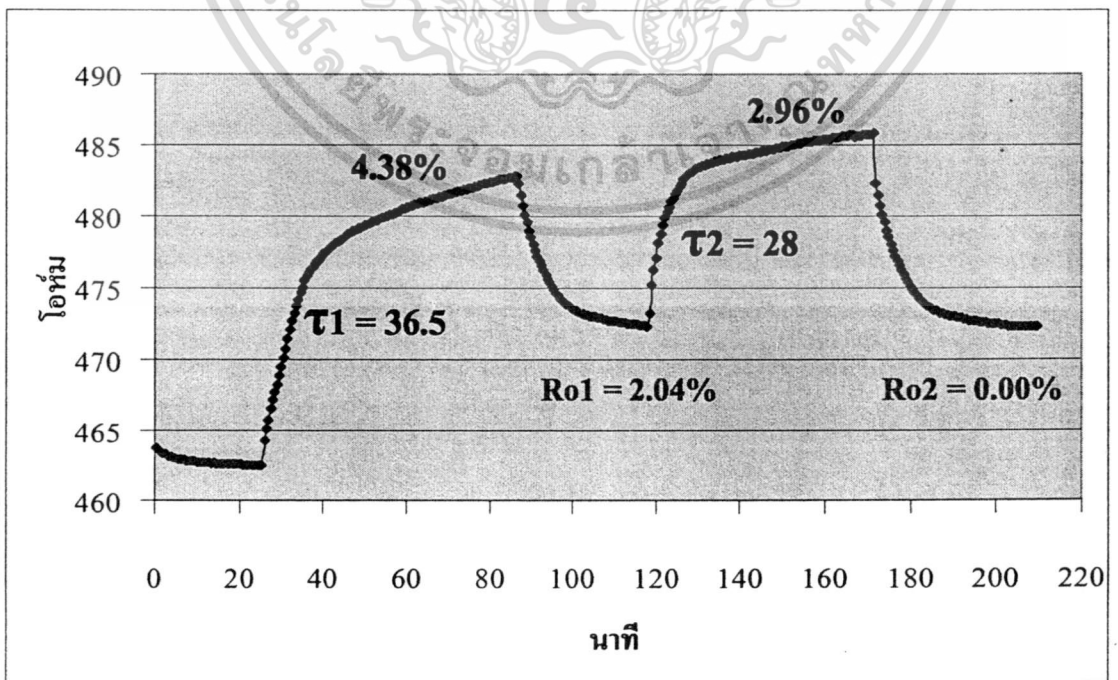
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 6 โครงสร้างที่ 1



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 6

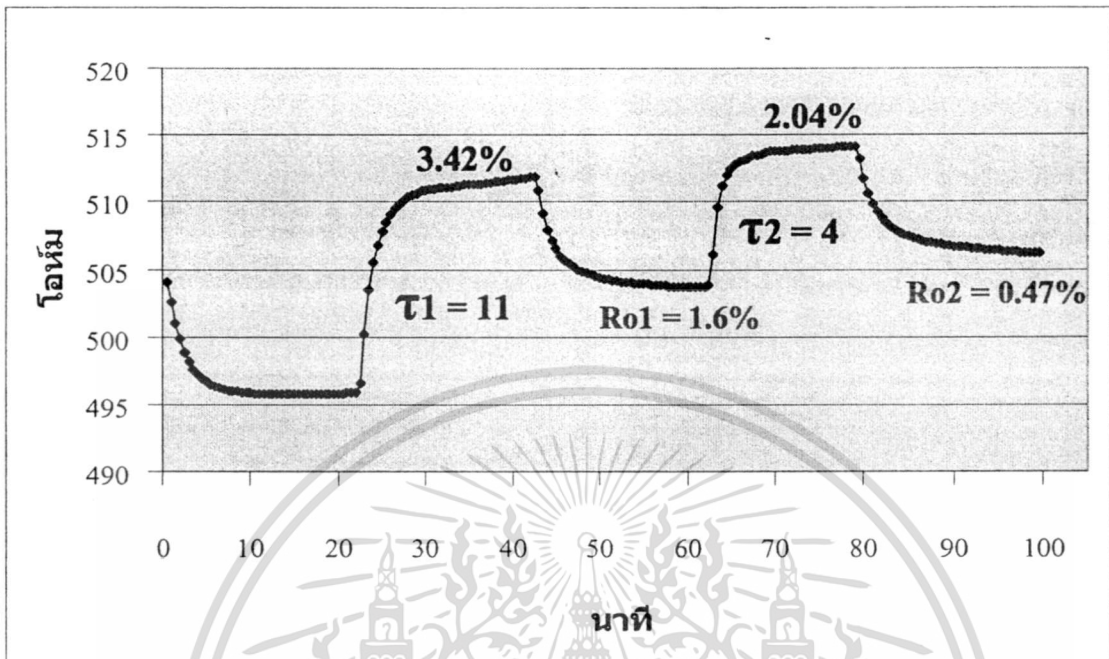
3. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 8 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8

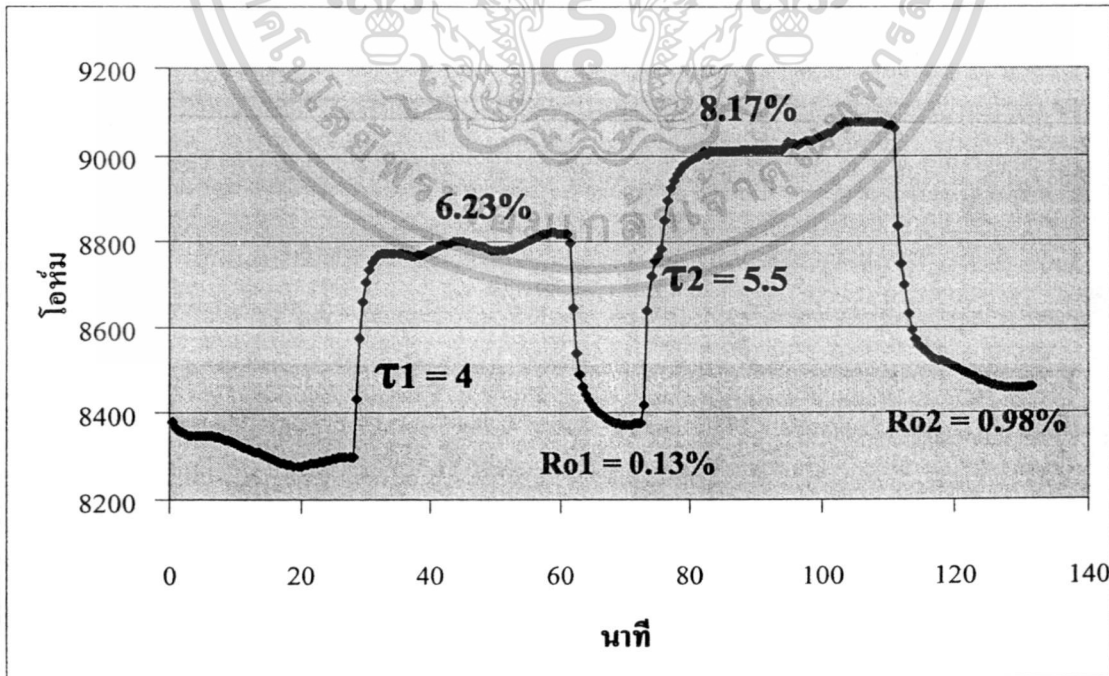
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ นพเอกวิทย์ วัฒนวิทย์ และ นพ.ดร.สุวิทย์ วัฒนวิทย์ ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 9 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดโอะระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 9

5. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 16 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดโอะระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้เปรียบเทียบได้ง่ายจะแสดงข้อมูลเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีไม่มีการอบฟิล์มคาร์บอนนาโน ทิวก่อนการตรวจวัด

| แผ่นตัวอย่าง | โครงสร้าง | เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง | | เวลาการเปลี่ยนแปลง 0 - 90% | | เปอร์เซ็นต์ส่วนต่าง Ro | |
|--------------|-----------|---------------------------|------------|----------------------------|----------|------------------------|------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | τ_1 | τ_2 | Ro1 | Ro2 |
| 4 | 1 | 7 | 5.44 | 11.5 | 2.5 | 3.03 | 0.97 |
| 6 | 1 | 1.94 | 2.28 | 4.5 | 1.5 | 0.6 | 1.15 |
| 8 | 2 | 4.38 | 2.96 | 36.5 | 28 | 2.04 | 0 |
| 9 | 2 | 3.42 | 2.04 | 11 | 4 | 1.6 | 0.47 |
| 16 | 2 | 6.23 | 8.17 | 4 | 5.5 | 0.93 | 0.98 |
| ค่าเฉลี่ย | | 4.66 | 8.17 | 13.5 | 8.3 | 1.64 | 0.71 |
| หน่วย | | % | % | นาทีก | นาทีก | % | % |

จากตารางที่ 5.2 พบว่ากรณีไม่มีการอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 ในช่วง 1 - 7% ค่าเฉลี่ย 4.66% มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานครั้งที่ 2 ในช่วง 2 - 8% ค่าเฉลี่ย 8.17 % เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 - 90 % ครั้งที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 4 - 36 นาที ค่าเฉลี่ย 13.5 นาที เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 - 90 % ครั้งที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 - 28 นาที ค่าเฉลี่ย 8.3 นาที ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 1 0.6 - 3 % ค่าเฉลี่ย 1.64 % ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 2 0.0 - 0.98 % ค่าเฉลี่ย 0.71 %

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยโดยรวม คุณสมบัติของเซนเซอร์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 มากกว่าครั้งที่ 2 เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 - 90 % ครั้งที่ 1 มีเวลามากกว่าครั้งที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 1 มีค่ามากกว่าครั้งที่ 2 และเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 2 มีค่าต่ำประมาณ 0 %

ในส่วน โครงสร้างของแผ่นตัวอย่างที่ออกแบบให้มีความต่างกันนั้นไม่มีส่งผลใดๆ ถ้าพิจารณาในด้านโครงสร้างจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นแบบสุ่ม ไม่เห็นค่าความแตกต่างอย่างชัดเจน

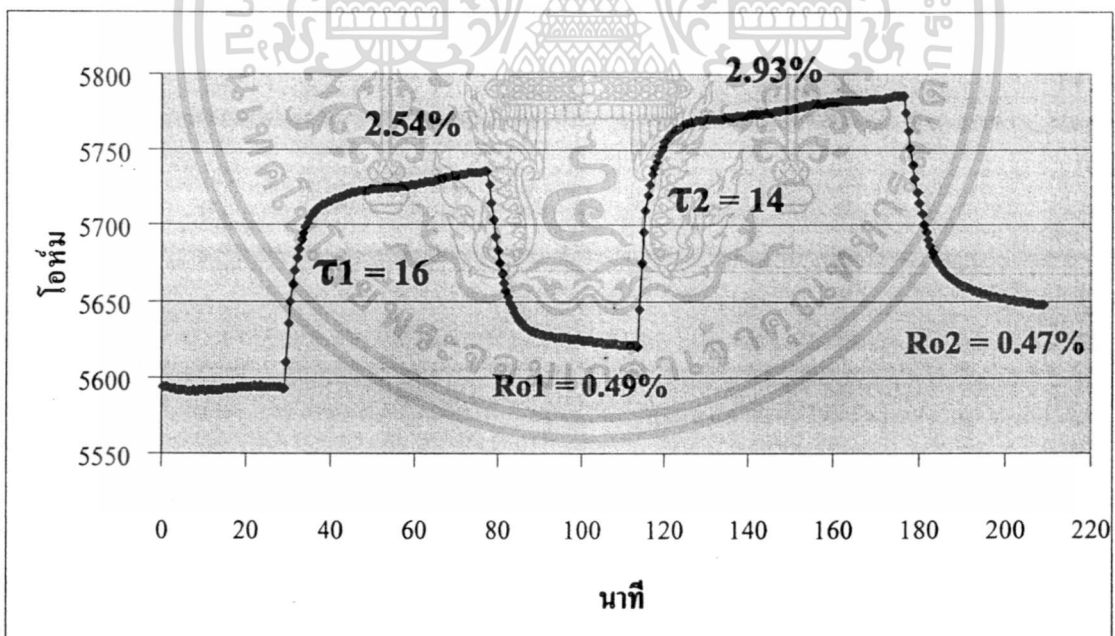
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องมาจากขนาดของทั้ง 2 โครงสร้างมีความต่างกันน้อยเกินกว่าที่จะส่งผลและปัจจัยตัวแปรต่างๆ ในการสังเคราะห์ยังไม่สามารถควบคุมได้อย่างถูกต้องแน่นอน

5.3.1.2 ผลการทดลองการตรวจวัดไธระเหยของเอทธานอลที่อุณหภูมิห้องโดยอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 25 นาที ก่อนนำเข้าสู่ระบบวัด

การทดลองในหัวข้อนี้ผู้ทดลองได้ทำการทดลองเป็นลำดับแรกเพื่อพิจารณาการตอบสนองของแผ่นตัวอย่างต่างๆ แผ่น เนื่องจากเป็นอุณหภูมิปานกลางของการทดลอง จากนั้นจึงคัดเลือกแผ่นตัวอย่างที่สมบูรณ์มากที่สุดเพื่อนำไปทำการทดลองในหัวข้อ 6.3.1.1 ที่ผ่านมา และ 6.3.3.3 ถึง 6.3.2 โดยการคัดเลือกจะพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน สภาพฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเกตจากตาเปล่า ซึ่งสามารถคัดเลือกได้ 5 แผ่นตัวอย่าง คือ แผ่นตัวอย่างที่ 4,6,8,9,16 ซึ่งในส่วนนี้จะแสดงเฉพาะแผ่นตัวอย่างที่ได้ถูกคัดเลือกเท่านั้น

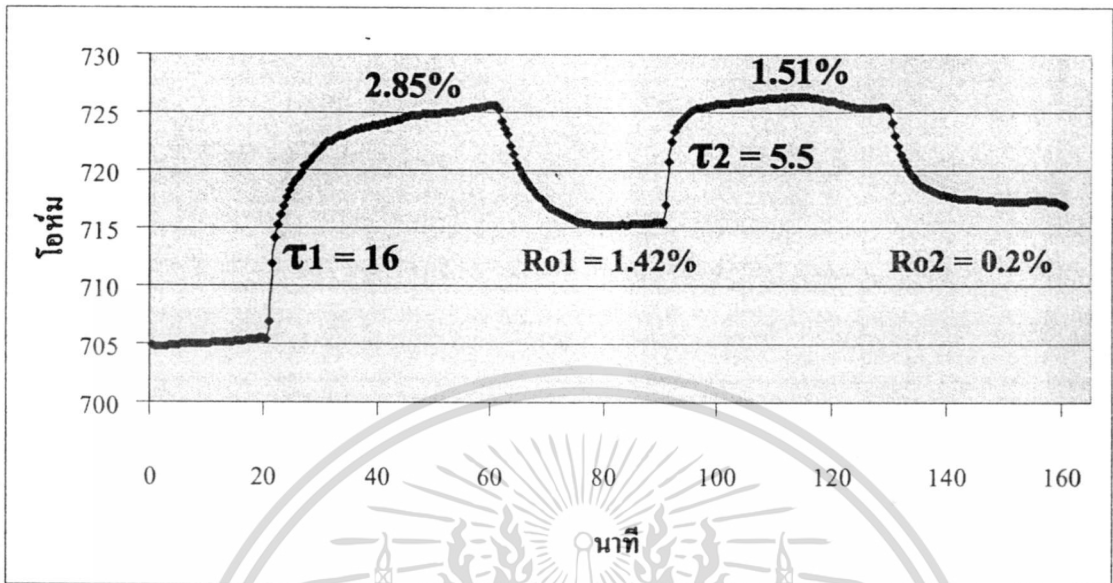
1. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 4 โครงสร้างที่ 1



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไธระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 4

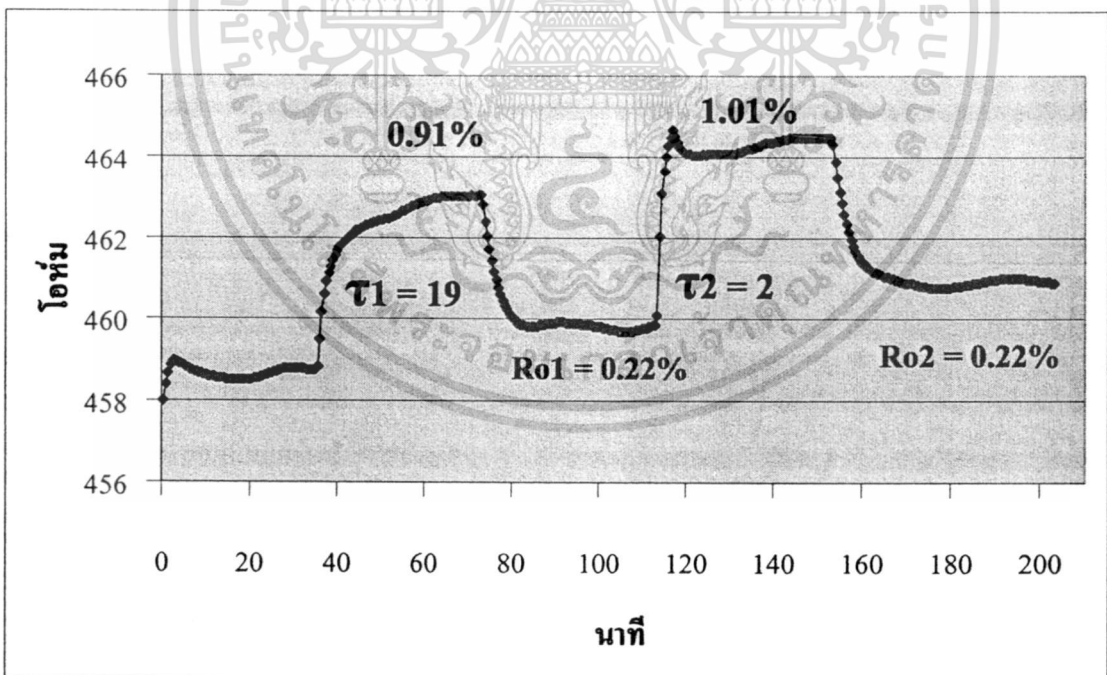
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 6 โครงสร้างที่ 1



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 6

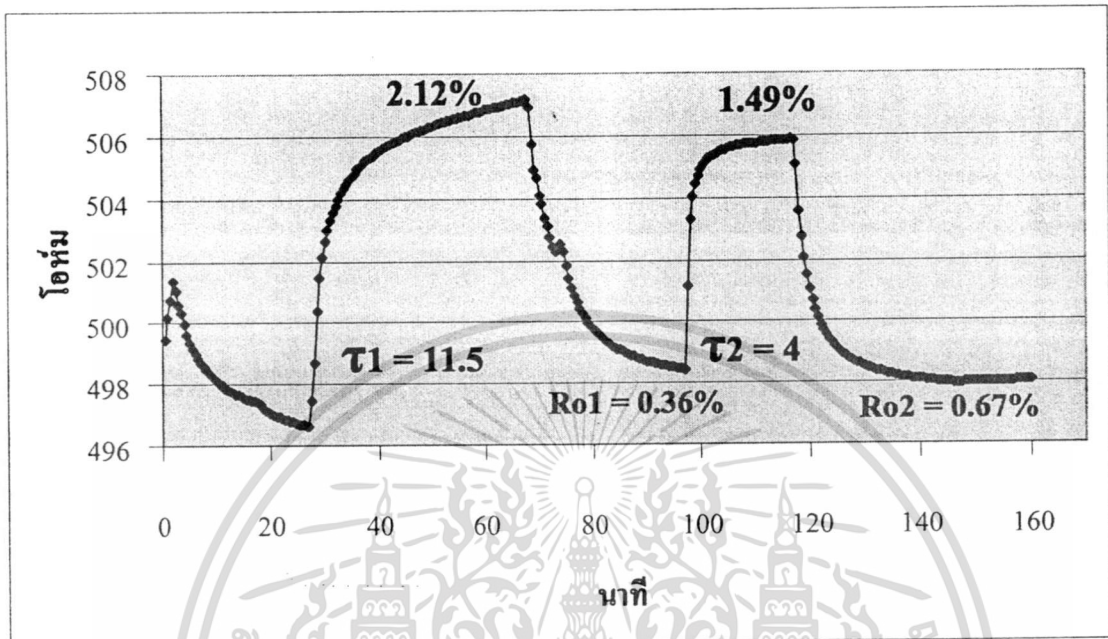
3. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 8 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8

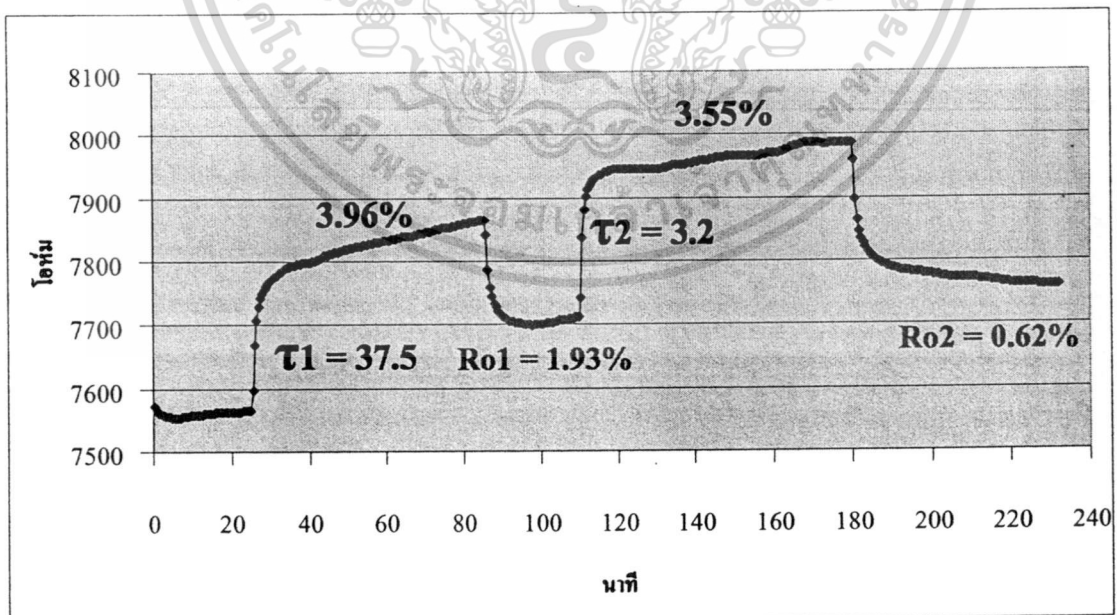
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 9 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอร่ะเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 9

5. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 16 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอร่ะเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 16

เพื่อให้เปรียบเทียบได้ง่ายจะแสดงข้อมูลเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ 6.3
 เอกสารฉบับนี้เผยแพร่โดยมูลนิธิส่งเสริมศิลปวัฒนธรรมแห่งสุนทรภู่เพื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์
ก่อนการตรวจวัดด้วยอุณหภูมิ 50 องศา 25 นาที

| แผ่น ตัวอย่าง | โครงสร้าง | เปอร์เซ็นต์การ เปลี่ยนแปลง | | เวลาการเปลี่ยนแปลง 0 - 90% | | เปอร์เซ็นต์ส่วนต่าง Ro | |
|------------------|-----------|-------------------------------|------------|-------------------------------|----------|---------------------------|------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | τ_1 | τ_2 | Ro1 | Ro2 |
| 4 | 1 | 2.54 | 2.93 | 16 | 14 | 0.49 | 0.47 |
| 6 | 1 | 2.85 | 1.51 | 16 | 5.5 | 1.42 | 0.2 |
| 8 | 2 | 0.91 | 1.01 | 19 | 2 | 0.22 | 0.22 |
| 9 | 2 | 2.12 | 1.49 | 11.5 | 4 | 0.36 | 0.07 |
| 16 | 2 | 3.96 | 3.55 | 37.5 | 32 | 1.93 | 0.62 |
| ค่าเฉลี่ย | | 2.52 | 2.00 | 20 | 11.5 | 1.05 | 0.38 |
| หน่วย | | % | % | นาที | นาที | % | % |

จากตารางที่ 5.3 พบว่ากรณีไม่มีการอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 ในช่วง 0.91 – 3.96% ค่าเฉลี่ย 2.52% มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานครั้งที่ 2 ในช่วง 1.01 – 3.55% ค่าเฉลี่ย 2.00 % เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 16 – 37.5 นาที ค่าเฉลี่ย 20 นาที เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 2 – 32 นาที ค่าเฉลี่ย 11.5 นาที ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 1 0.36 – 1.93 % ค่าเฉลี่ย 1.05% ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 2 0.07 – 0.62 % ค่าเฉลี่ย 0.38 %

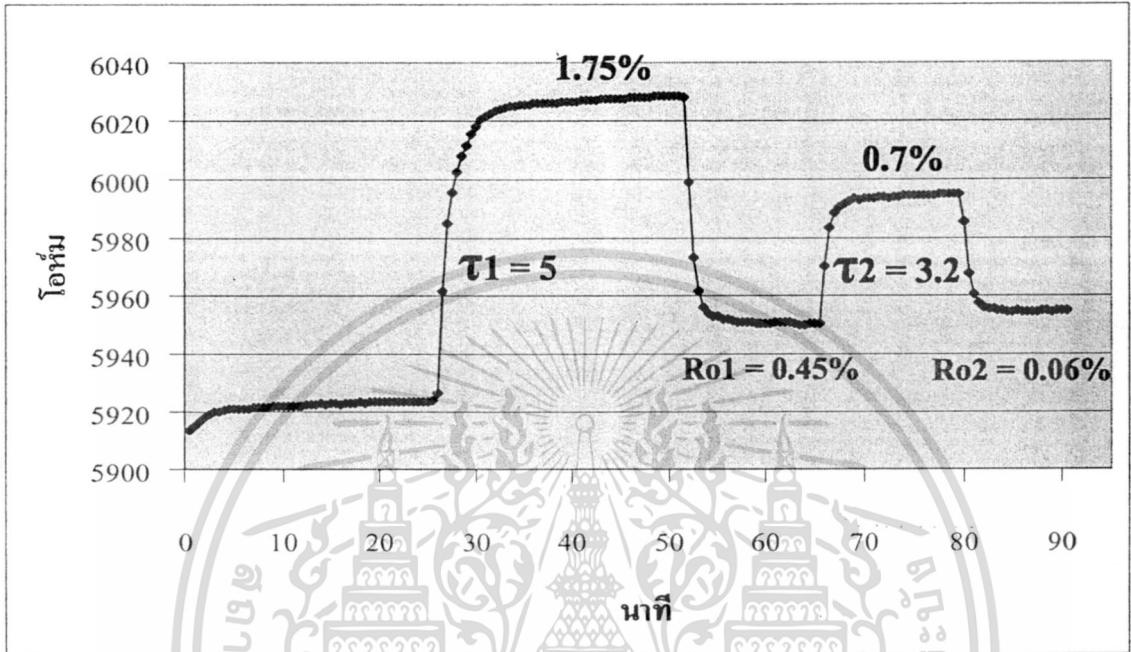
เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยโดยรวม คุณสมบัติของเซนเซอร์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 มากกว่าครั้งที่ 2 เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 1 มีเวลามากกว่าครั้งที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 1 มีค่ามากกว่าครั้งที่ 2 และเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 2 มีค่าต่ำประมาณ 0 %

ในส่วนโครงสร้างของแผ่นตัวอย่างที่ออกแบบให้มีความต่างกันนั้น ไม่มีส่งผลใดๆ ถ้าพิจารณาในด้านโครงสร้างจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นแบบสุ่ม ไม่เห็นค่าความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากขนาดของทั้ง 2 โครงสร้างมีความต่างกันน้อยเกินกว่าที่จะส่งผลและปัจจัยตัวแปรต่างๆ ในการสังเคราะห์ยังไม่สามารถควบคุมได้อย่างถูกต้องแน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

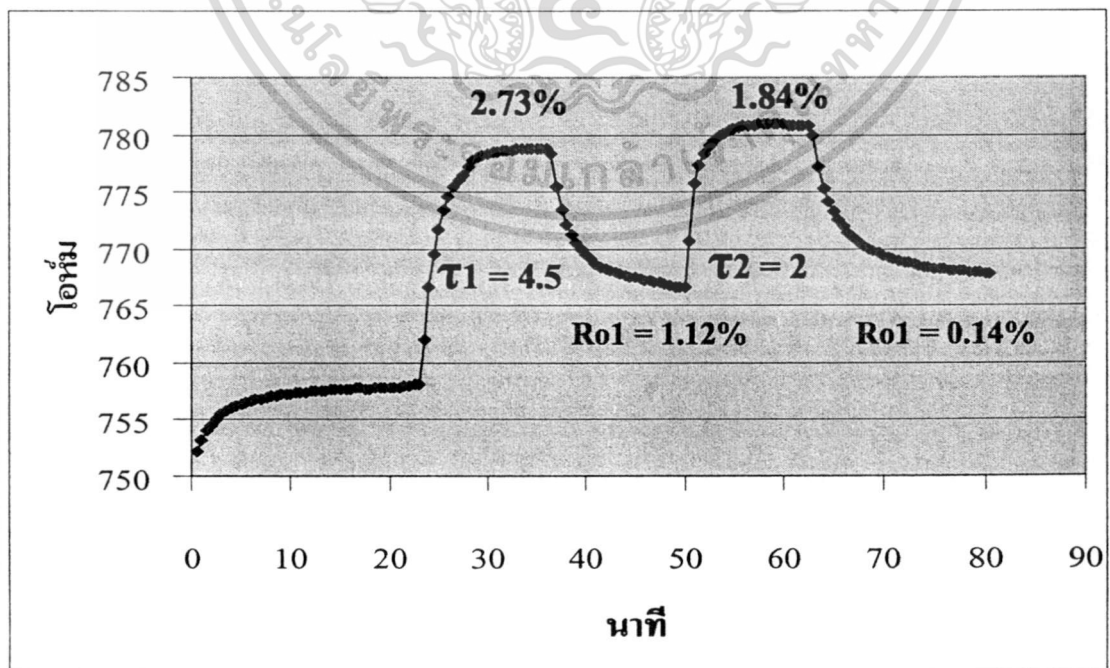
5.3.1.3 ผลการทดลองการตรวจวัดไอระเหยของเอทธานอลที่อุณหภูมิห้องโดยอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 25 นาที

1. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 4 โครงสร้างที่ 1



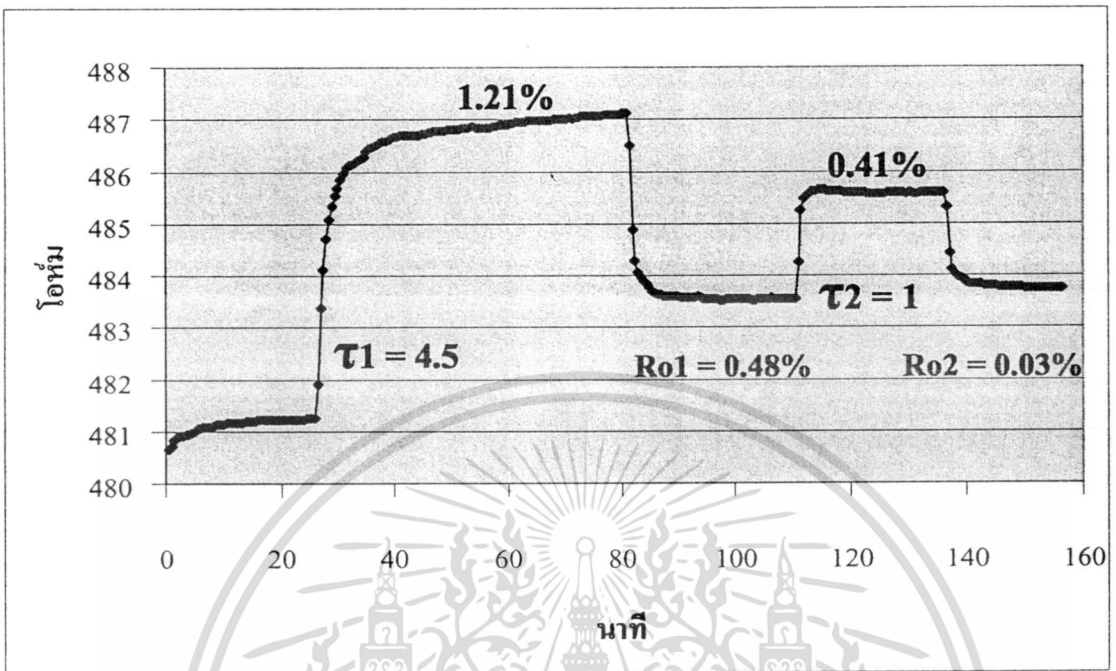
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 4

2. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 6 โครงสร้างที่ 1



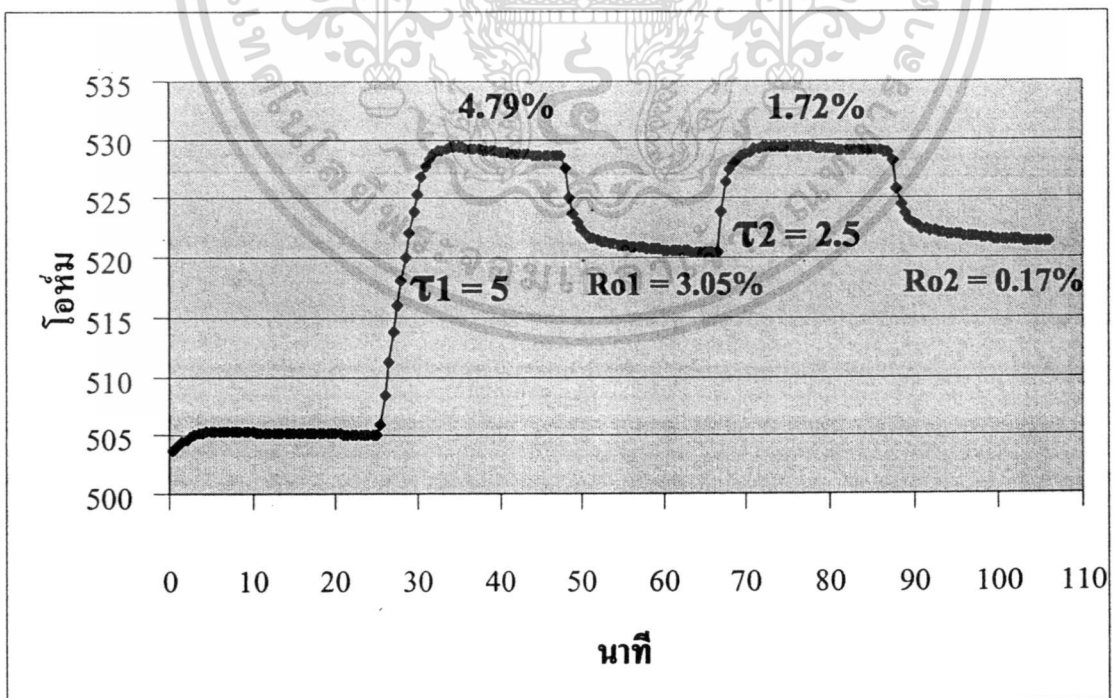
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 6 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 8 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.21 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8

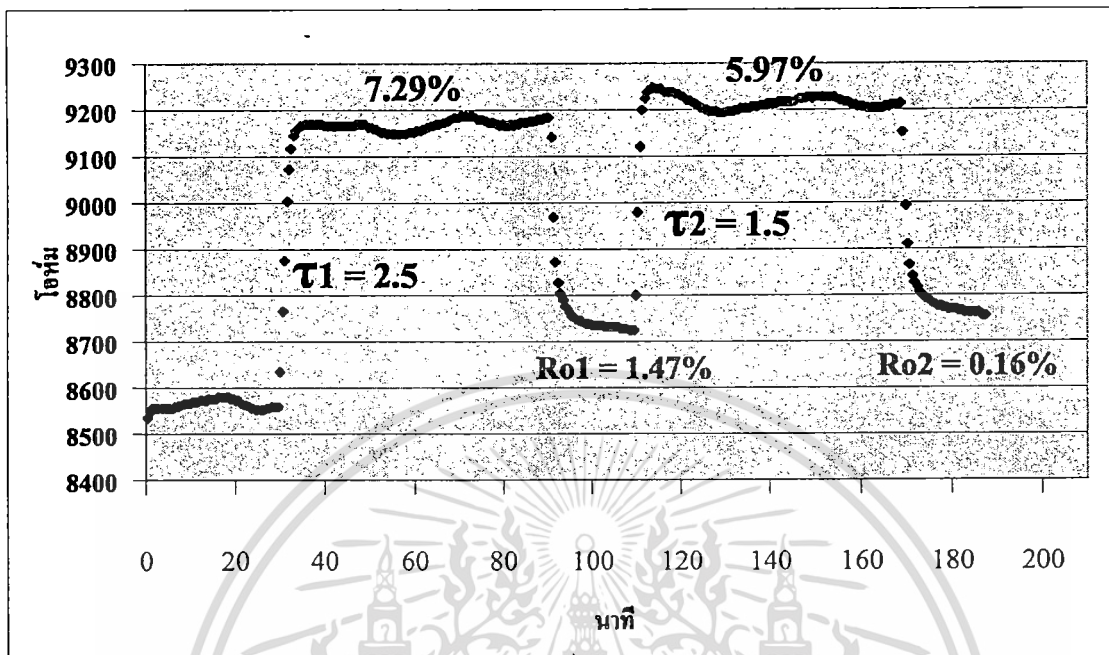
4. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 9 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 16 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 16

เพื่อให้เปรียบเทียบได้ง่ายจะแสดงข้อมูลเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณียอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ ก่อนการตรวจวัดด้วยอุณหภูมิ 70 องศา 25 นาที

| แผ่นตัวอย่าง | โครงสร้าง | เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง | | เวลาการเปลี่ยนแปลง 0 - 90% | | เปอร์เซ็นต์ส่วนต่าง Ro | |
|--------------|-----------|---------------------------|------------|----------------------------|----------|------------------------|------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | τ_1 | τ_2 | Ro1 | Ro2 |
| 4 | 1 | 1.75 | 0.7 | 5 | 2 | 0.45 | 0.06 |
| 6 | 1 | 2.73 | 1.84 | 4.5 | 2 | 1.12 | 0.14 |
| 8 | 2 | 1.21 | 0.41 | 4.5 | 1 | 0.48 | 0.03 |
| 9 | 2 | 4.79 | 1.72 | 5 | 2.5 | 3.05 | 0.17 |
| 16 | 2 | 7.29 | 5.97 | 2.5 | 1.5 | 1.92 | 0.38 |
| ค่าเฉลี่ย | | 3.76 | 2.2 | 4.25 | 1.75 | 1.47 | 0.16 |

เอกสารนี้เป็นหน่วยที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

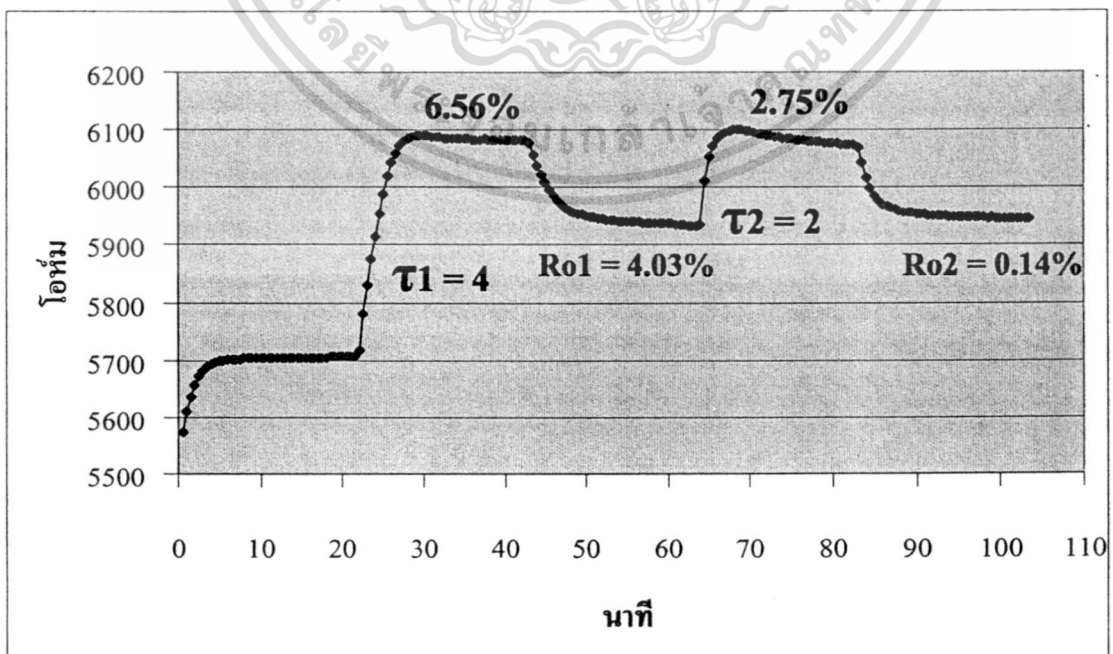
จากตารางที่ 5.4 พบว่ากรณีไม่มีการอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 ในช่วง 1.21 – 7.29% ค่าเฉลี่ย 3.76% มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานครั้งที่ 2 ในช่วง 0.7 – 5.97% ค่าเฉลี่ย 2.2 % เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 2.5 – 5 นาที ค่าเฉลี่ย 4.25 นาที เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 1 – 2.5 นาที ค่าเฉลี่ย 1.75 นาที ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 1 0.45 – 1.92 % ค่าเฉลี่ย 1.47% ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 2 0.03 – 0.38 % ค่าเฉลี่ย 0.16 %

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยโดยรวม คุณสมบัติของเซนเซอร์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 มากกว่าครั้งที่ 2 เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 1 มีเวลามากกว่าครั้งที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 1 มีค่ามากกว่าครั้งที่ 2 และเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 2 มีค่าประมาณ 0 %

ในส่วนโครงสร้างของแผ่นตัวอย่างที่ออกแบบให้มีความต่างกันนั้นไม่มีส่งผลใดๆ ถ้าพิจารณาในด้านโครงสร้างจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นแบบส้อม ไม่เห็นค่าความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากขนาดของทั้ง 2 โครงสร้างมีความต่างกันน้อยเกินกว่าที่จะส่งผลและปัจจัยตัวแปรต่างๆ ในการสังเคราะห์ยังไม่สามารถควบคุมได้อย่างถูกต้องแน่นอน

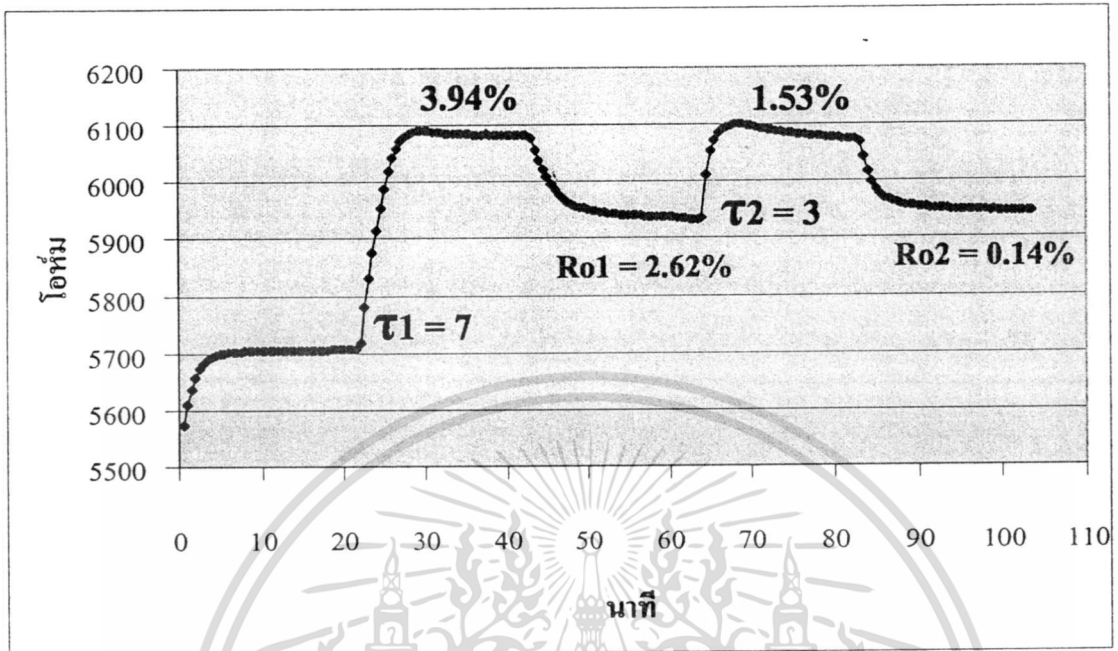
5.3.1.4 ผลการทดลองการตรวจวัดไอร่เหยของเอทานอลที่อุณหภูมิห้องโดยอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 25 นาที

1. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 4 โครงสร้างที่ 1



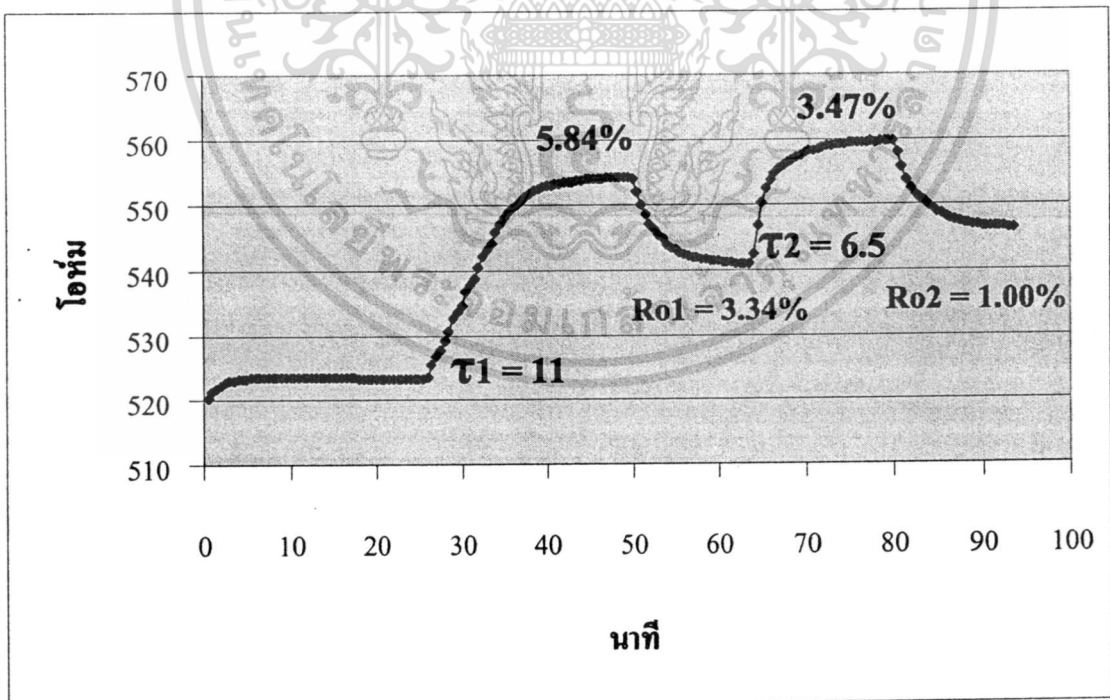
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอร่เหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 4 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 8 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.25 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดโอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8

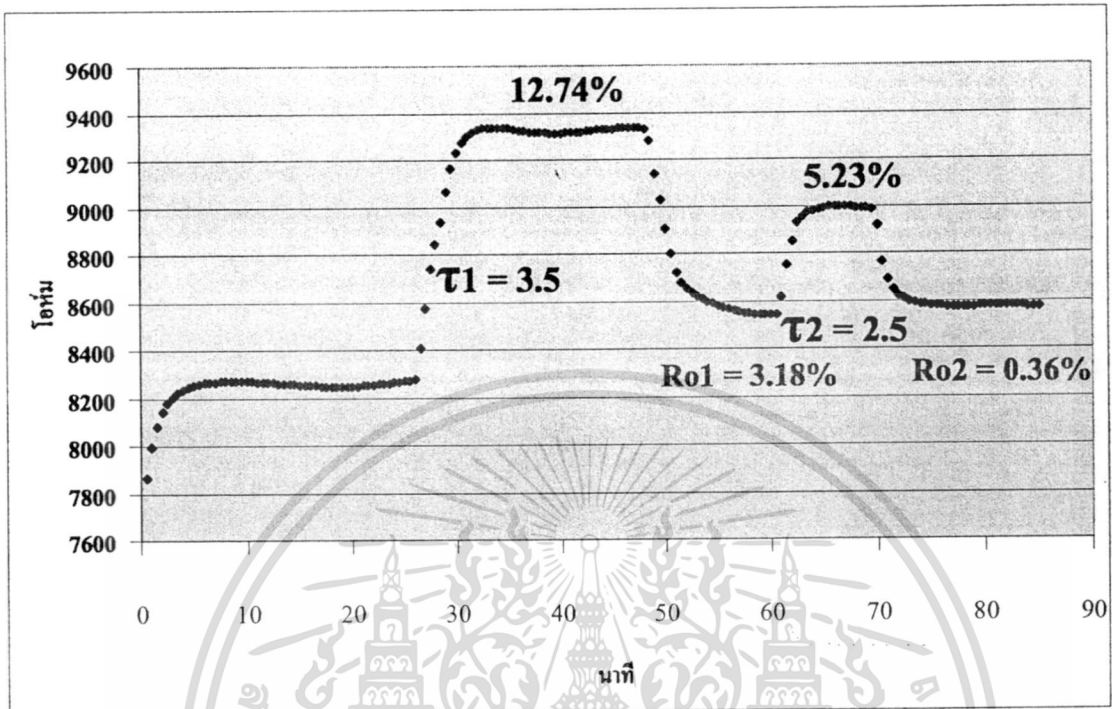
3. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 9 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.26 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดโอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 16 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอล
แผ่นตัวอย่างที่ 16

เพื่อให้เปรียบเทียบได้ง่ายจะแสดงข้อมูลเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์
ก่อนการตรวจวัดด้วยอุณหภูมิ 85 องศา 25 นาที

| แผ่น ตัวอย่าง | โครงสร้าง | เปอร์เซ็นต์การ เปลี่ยนแปลง | | เวลาการเปลี่ยนแปลง 0 - 90% | | เปอร์เซ็นต์ส่วน ต่าง Ro | |
|------------------|-----------|-------------------------------|------------|-------------------------------|----------|----------------------------|------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | τ_1 | τ_2 | Ro1 | Ro2 |
| 4 | 1 | 6.56 | 2.75 | 4 | 2 | 4.03 | 0.14 |
| 8 | 2 | 3.94 | 1.53 | 7 | 3 | 2.62 | 0.14 |
| 9 | 2 | 5.84 | 3.47 | 11 | 6.5 | 3.34 | 1.00 |
| 16 | 2 | 12.74 | 5.23 | 3.5 | 2.5 | 3.18 | 0.36 |
| ค่าเฉลี่ย | | 7.74 | 3.17 | 4.83 | 2.5 | 3.27 | 0.21 |
| หน่วย | | % | % | นาที | นาที | % | % |

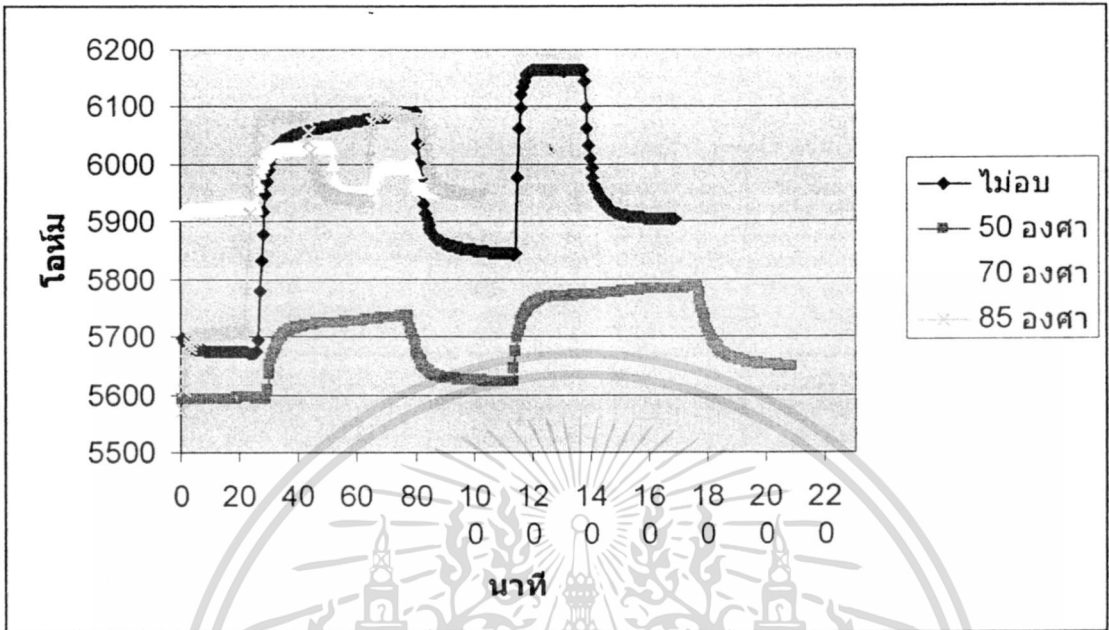
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปจะเปรียบเทียบในแต่ละแผ่นตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ และพิจารณาแนวโน้มของข้อมูลดังตารางที่ 5.6

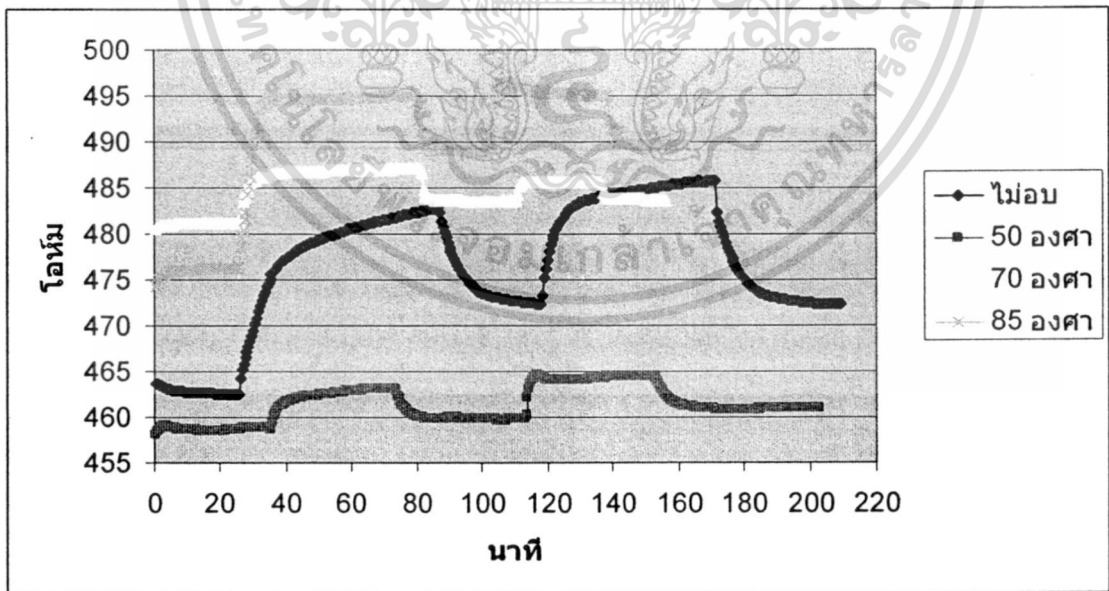
ตารางที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบแต่ละแผ่นตัวอย่าง

| แผ่นตัวอย่าง | อุณหภูมิในการอบ | เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง | | เวลาการเปลี่ยนแปลง 0 - 90% | | เปอร์เซ็นต์ส่วนต่าง Ro | |
|--------------|-----------------|---------------------------|------------|----------------------------|------------|------------------------|-------------|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | τ_1 | τ_2 | Ro1 | Ro2 |
| 4 | 0 | 7 | 5.44 | 11.5 | 2.5 | 3.03 | 0.97 |
| | 50 | 2.54 | 2.93 | 16 | 14 | 0.49 | 0.47 |
| | 70 | 1.75 | 0.7 | 5 | 2 | 0.45 | 0.06 |
| | 85 | 6.56 | 2.75 | 4 | 2 | 4.03 | 0.14 |
| 6 | 0 | 1.94 | 2.28 | 4.5 | 1.5 | 0.6 | 1.15 |
| | 50 | 2.85 | 1.51 | 16 | 5.5 | 1.42 | 0.2 |
| | 70 | 2.73 | 1.84 | 4.5 | 2 | 1.12 | 0.14 |
| 8 | 0 | 4.38 | 2.96 | 36.5 | 28 | 2.04 | 0 |
| | 50 | 0.91 | 1.01 | 19 | 2 | 0.22 | 0.22 |
| | 70 | 1.21 | 0.41 | 4.5 | 1 | 0.48 | 0.03 |
| | 85 | 3.94 | 1.53 | 7 | 3 | 2.62 | 0.14 |
| 9 | 0 | 3.42 | 2.04 | 11 | 4 | 1.6 | 0.47 |
| | 50 | 2.12 | 1.49 | 11.5 | 4 | 0.36 | 0.07 |
| | 70 | 4.79 | 1.72 | 5 | 2.5 | 3.05 | 0.17 |
| | 85 | 5.84 | 3.47 | 11 | 6.5 | 3.34 | 1.00 |
| 16 | 0 | 6.23 | 8.17 | 4 | 5.5 | 0.93 | 0.98 |
| | 50 | 3.96 | 3.55 | 37.5 | 32 | 1.93 | 0.62 |
| | 70 | 7.29 | 5.97 | 2.5 | 1.5 | 1.92 | 0.38 |
| | 85 | 12.74 | 5.23 | 3.5 | 2.5 | 3.18 | 0.36 |
| | หน่วย | % | % | นาที | นาที | % | % |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

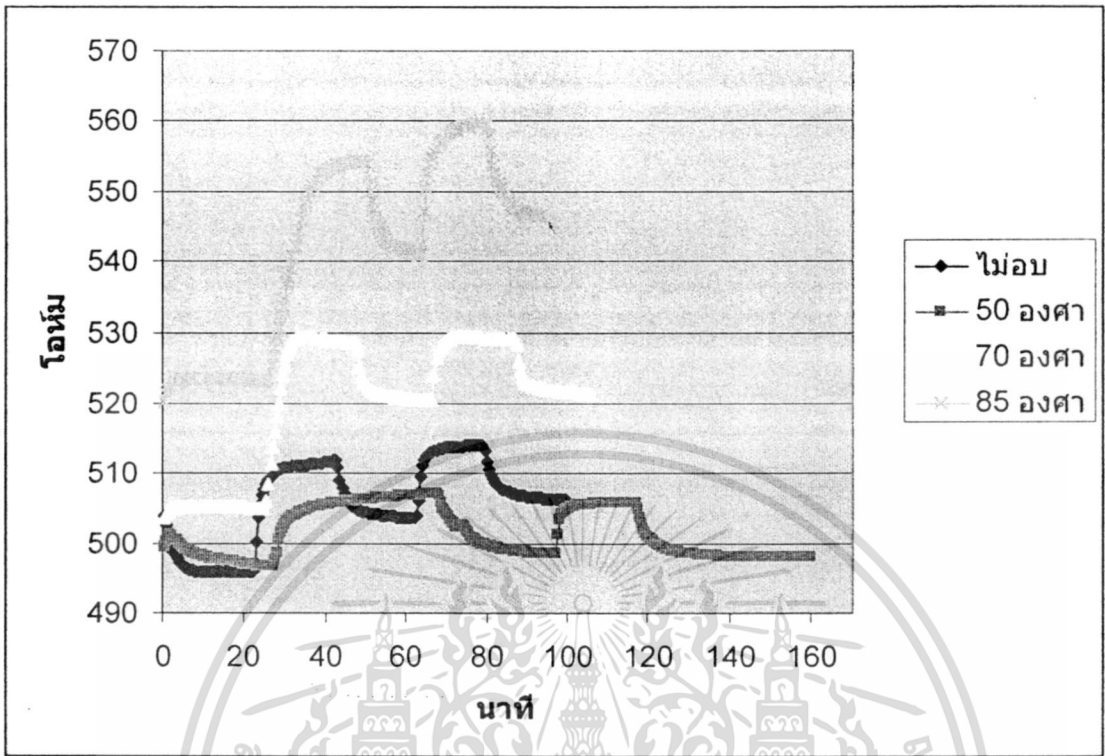


รูปที่ 5.28 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาที่อุณหภูมิการอบต่างๆ ของแผ่นตัวอย่างที่ 4

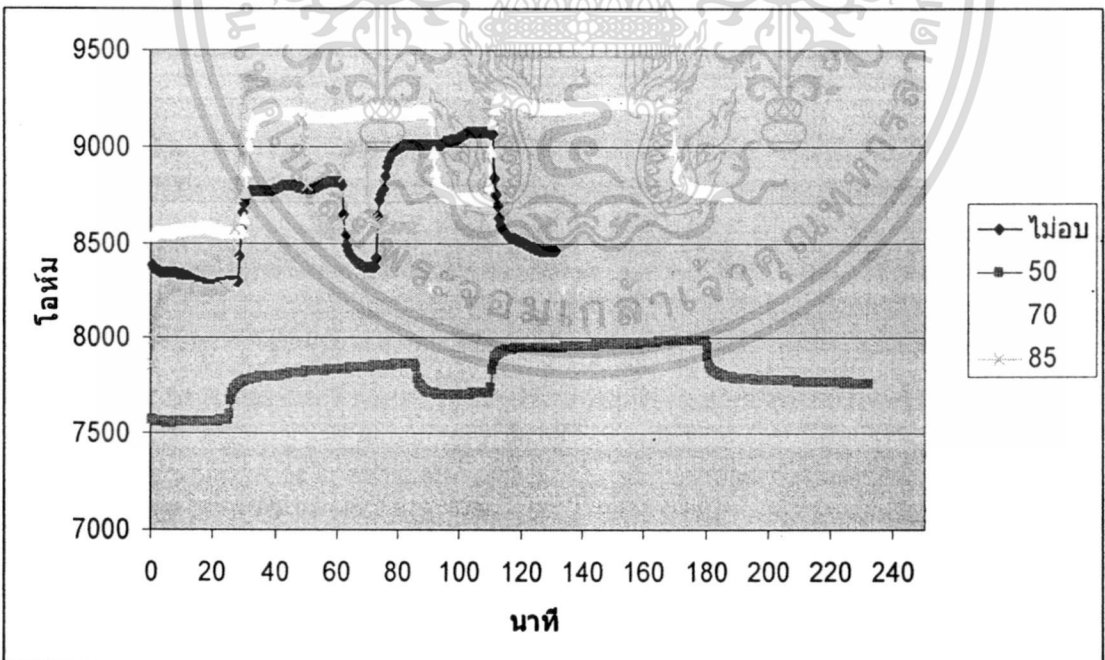


รูปที่ 5.29 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาที่อุณหภูมิการอบต่างๆ ของแผ่นตัวอย่างที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาที่อุณหภูมิการอบต่างๆ ของแผ่นตัวอย่างที่ 9



รูปที่ 5.31 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาที่อุณหภูมิการอบต่างๆ ของแผ่นตัวอย่างที่ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคุณสมบัติต่างๆ ของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

| อุณหภูมิ | เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง | | เวลาการเปลี่ยนแปลง 0 - 90% | | เปอร์เซ็นต์ส่วนต่าง Ro | |
|--------------|---------------------------|------------|----------------------------|----------|------------------------|------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | τ_1 | τ_2 | Ro1 | Ro2 |
| ไม่มีการอบ | 4.66 | 8.17 | 13.5 | 8.3 | 1.64 | 0.71 |
| 50 | 2.52 | 2.00 | 20 | 11.5 | 1.05 | 0.38 |
| 70 | 3.76 | 2.2 | 4.25 | 1.75 | 1.47 | 0.16 |
| 85 | 7.74 | 3.17 | 4.83 | 2.5 | 3.27 | 0.21 |
| องศาเซลเซียส | % | % | นาที | นาที | % | % |

จากข้อมูลในตารางที่ 5.6 และ 5.7 จะเห็นแนวโน้มได้ เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละแผ่นตัวอย่าง ซึ่งสรุปได้ 3 กรณี ดังนี้คือ

1. เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 จะมากกว่า ครั้งที่ 2 เนื่องจากเมื่อทำการตรวจวัดครั้งแรก โหมดลูลของเอทานอลบางส่วนยังคงติดอยู่กับคาร์บอนนาโนทิวบ์ทำให้ค่าความต้านทานตั้งต้นในครั้งที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานในครั้งที่ 2 จึงต่ำกว่า เมื่อพิจารณาพบว่ามีค่าเป็นไปแบบสุ่มตั้งต้นจากตารางจึงไม่สามารถสรุปได้ว่ากรณีใดจะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานสูงที่สุด ซึ่งเซนเซอร์แต่ละตัวจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวต่างกันออกไป แต่จากการค้นคว้าแล้วคาร์บอนจะมีความต้านทานสูงที่อุณหภูมิต่ำๆ จึงพอจะสรุปได้ว่าในขณะที่วัดไม่ว่าจะมีการอบที่กรณีใดๆ ก็ตามควรให้ตัวเซนเซอร์เย็นตัวลงก่อนทำการวัด

2. เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 - 90 % ครั้งที่ 1 จะใช้เวลานานกว่าครั้งที่ 2 และกรณีการอบด้วยอุณหภูมิ 70 - 85 องศาเซลเซียสจะมีค่าเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 - 90 % น้อยกว่ากรณีอื่นๆ

3. ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างความต้านทานตั้งต้น ครั้งที่ 1 จะมีความต่างมากกว่าครั้งที่ 2 นั่นคือ ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างความต้านทาน จะมีค่าคงที่หรือลดเพิ่มเพียงเล็กน้อยในการวัดครั้งที่ 2 เป็นต้นไป เนื่องจากโหมดลูลของแก๊สบางส่วนยังเกาะอยู่ที่คาร์บอนนาโนทิวบ์ทำให้ค่าความต้านทานตั้งต้นมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากขณะนั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์ทำปฏิกิริยากับ โหมดลูลของแก๊สที่เกาะอยู่บางส่วนนั้นอยู่ก่อนแล้ว และจะมีค่าต่ำ ในกรณีการอบที่อุณหภูมิ 50 - 70 องศาเซลเซียส

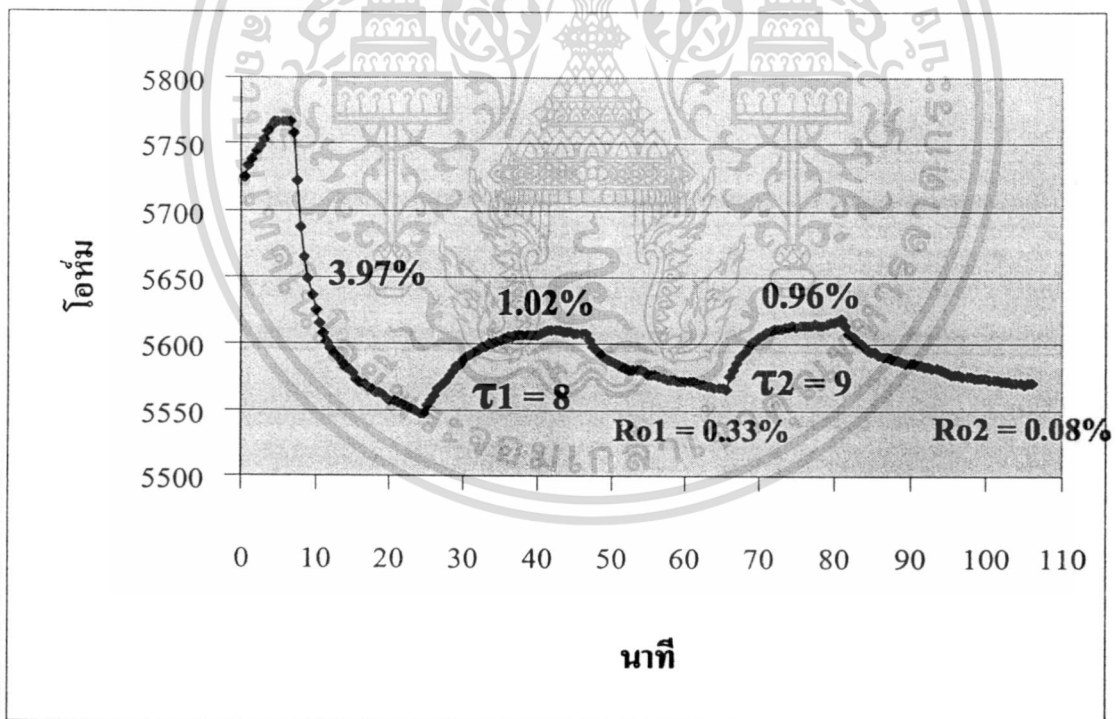
จาก 3 กรณีดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปใช้งานเป็นแก๊สเซนเซอร์นั้น ควรอบตัวตรวจวัดก่อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะให้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0 – 90% ต่ำ และให้ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างความต้านทานตั้งต้น ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ต่ำ และควรปล่อยให้เซนเซอร์เย็นตัวลงก่อนทำการวัด จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างความต้านทานที่สูง

5.3.2 ผลการทดลองตรวจวัดไอรยะเหยของเอทธานอลโดยการให้ความร้อนในระบบ

คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนเรียงตัวเป็นรูปท่อ ดังนั้นคุณสมบัติทางไฟฟ้าจึงมีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งคาร์บอนจะมีความนำไฟฟ้าดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นั่นคือเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีค่าความต้านทานต่ำลง ในหัวข้อนี้จะนำคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แปรตามอุณหภูมิของคาร์บอนมาทำการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของเซนเซอร์ โดยให้อุณหภูมิในระบบวัดโดยให้กำลังงานแก่ขดลวดประมาณ 15 วัตต์ ทำให้มีอุณหภูมิภายในระบบวัดประมาณ 50 - 60 องศาเซลเซียส และก่อนทำการวัดจะอบตัวตรวจวัดด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

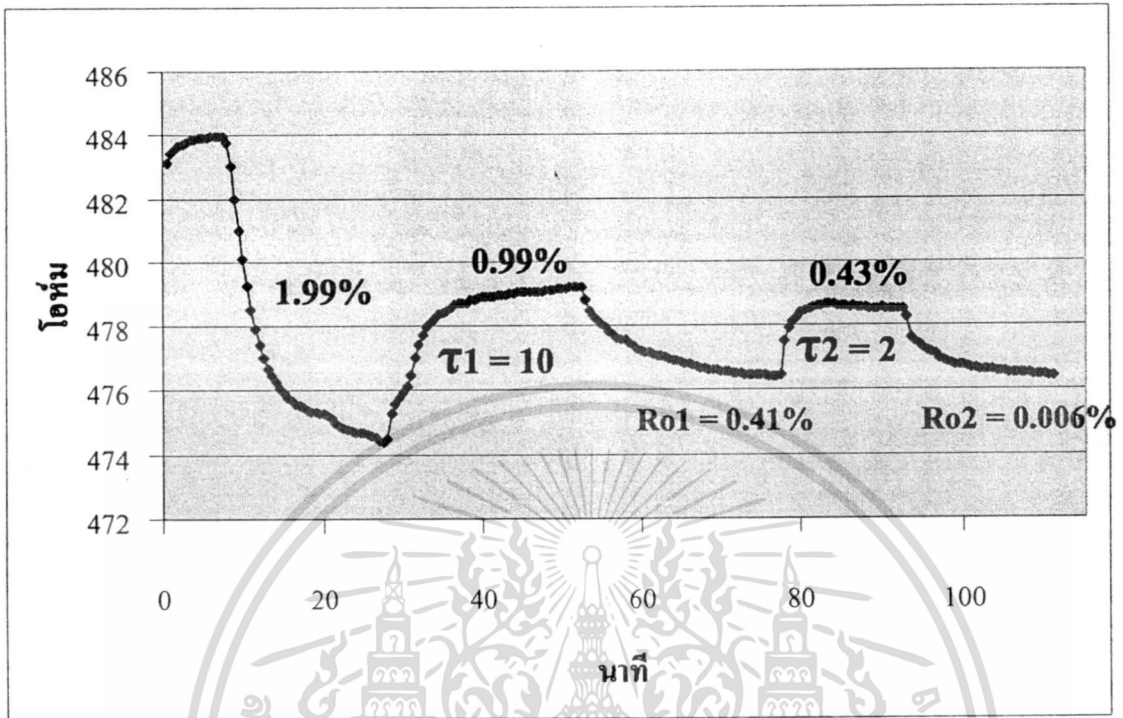
1. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 4 โครงสร้างที่ 1



รูปที่ 5.32 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอรยะเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 4

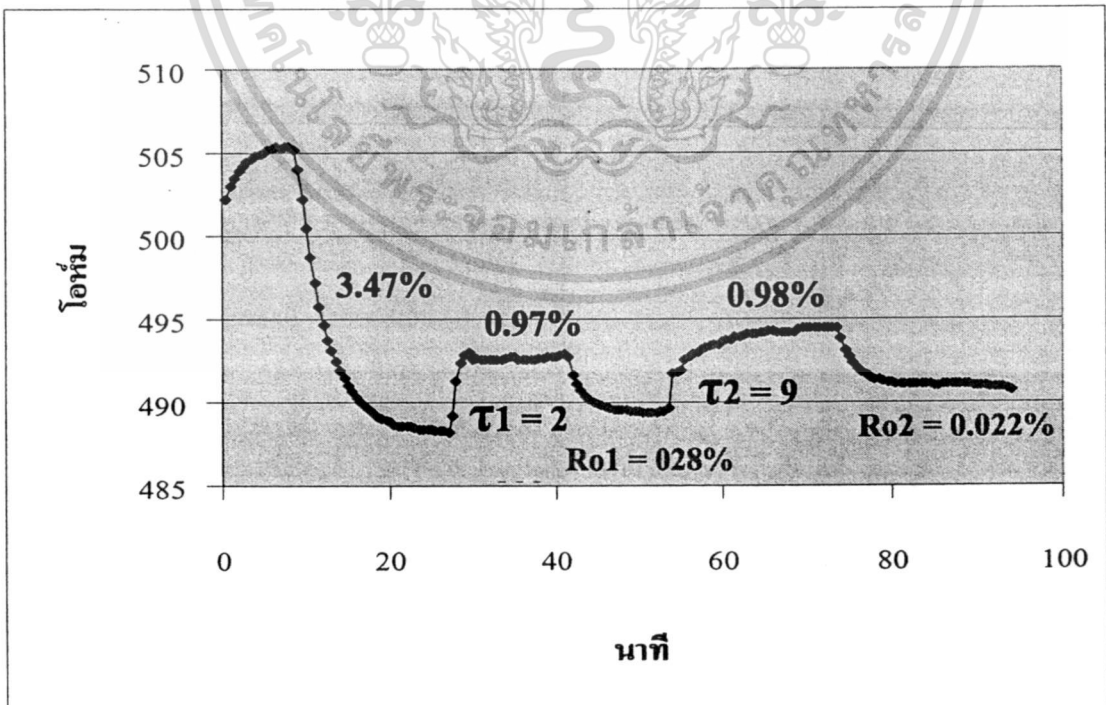
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 8 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.33 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8

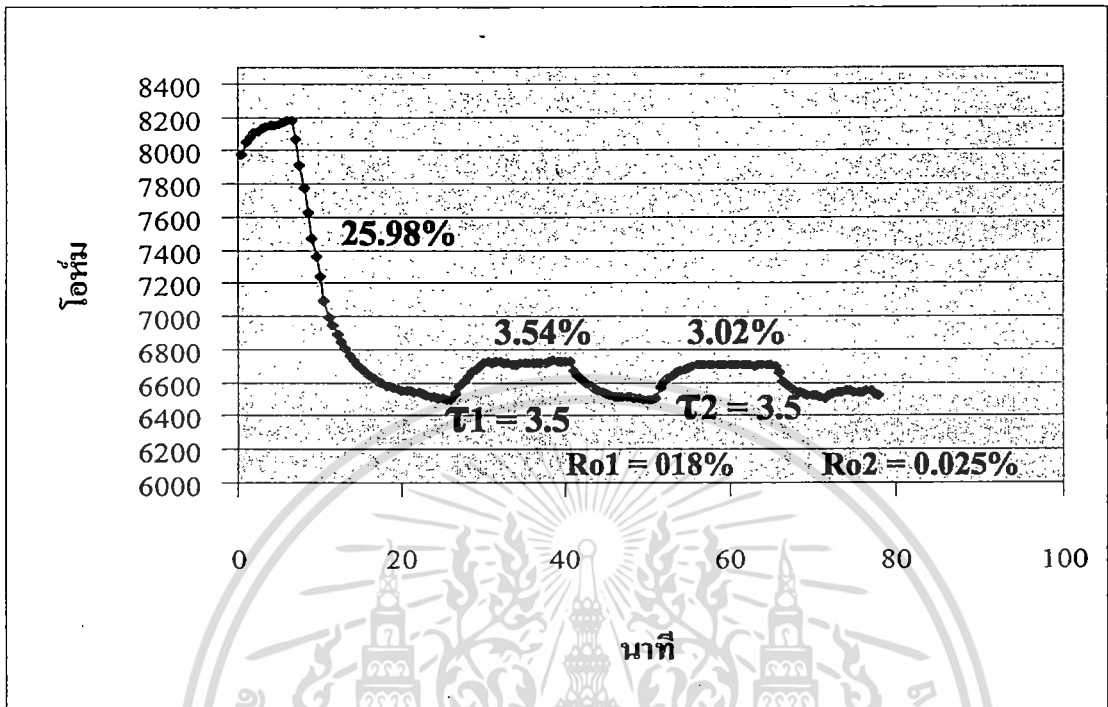
3. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 9 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.34 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 16 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 5.35 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไธระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 16

เพื่อให้เปรียบเทียบได้ง่ายจะแสดงข้อมูลเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีให้ความร้อนในระบบวัด

| แผ่น ตัวอย่าง | โครง สร้าง | เปอร์เซ็นต์การ เปลี่ยนแปลง | | เวลาการเปลี่ยน แปลง 0 - 90% | | เปอร์เซ็นต์ ส่วนต่าง Ro | | การ เปลี่ยนแปลง เมื่อให้ความ ร้อน |
|------------------|---------------|-------------------------------|------------|--------------------------------|----------|----------------------------|-------|--|
| | | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | τ_1 | τ_2 | Ro1 | Ro2 | |
| 4 | 1 | 1.02 | 0.96 | 8 | 9 | 0.33 | 0.08 | 3.97 |
| 8 | 2 | 0.99 | 0.43 | 10 | 2 | 0.41 | 0.006 | 1.99 |
| 9 | 2 | 0.97 | 0.98 | 2 | 9 | 0.28 | 0.22 | 3.47 |
| 16 | 2 | 3.54 | 3.02 | 3.5 | 3.5 | 0.18 | 0.25 | 25.98 |
| ค่าเฉลี่ย | | 1.63 | 1.34 | 5.87 | 5.87 | 0.3 | 0.13 | 8.85 |
| หน่วย | | % | % | นาที | นาที | % | % | % |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.8 พบว่าอุณหภูมิในระบบจะส่งผลต่อความต้านทานของเซนเซอร์ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ค่าความต้านทานจะลดลง (ความต้านทานแปรผกผันกับอุณหภูมิ) ซึ่งลดลงเป็นเปอร์เซ็นต์มากพอสมควร คือ ถึง 25 % และเมื่อพิจารณาคุณลักษณะต่างๆ แล้วเปรียบเทียบกับการตรวจวัดที่อุณหภูมิห้องกรณีอบตัวตรวจวัดที่ 70 องศา ก่อนนำเข้าสู่ระบบวัด จะพบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานนี้ค่าลดลง เนื่องจากค่าความต้านทานตั้งต้นที่ต่ำลงเนื่องจากความต้านทานของคาร์บอนนาโนทิวบ์จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์ต่างค่าความต้านทานตั้งต้น มีค่าน้อยลง ที่เป็นดังนี้เนื่องจากการให้ความร้อนในระบบวัด ทำให้โมเลกุลของเอทานอลหลุดออกไปจากฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิห้อง

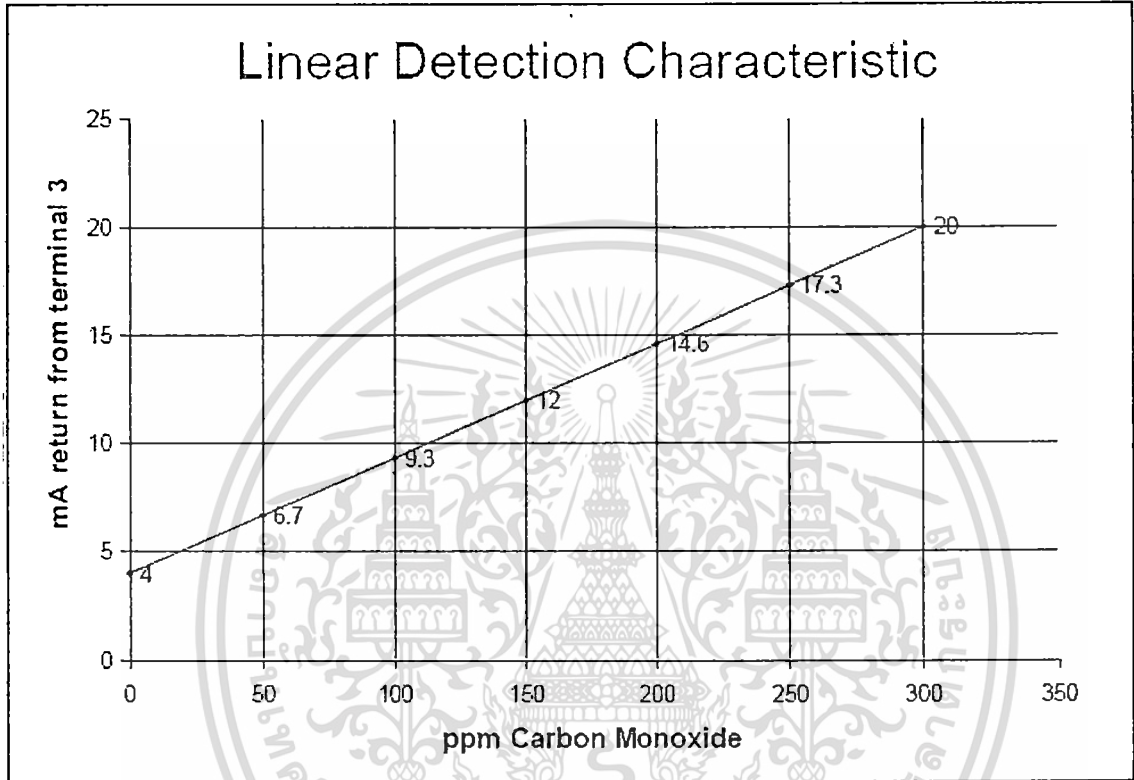
ในหัวข้อต่อไปจะแสดงถึงผลการตอบสนองจากความเข้มข้นของแก๊สที่มีการเปลี่ยนแปลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

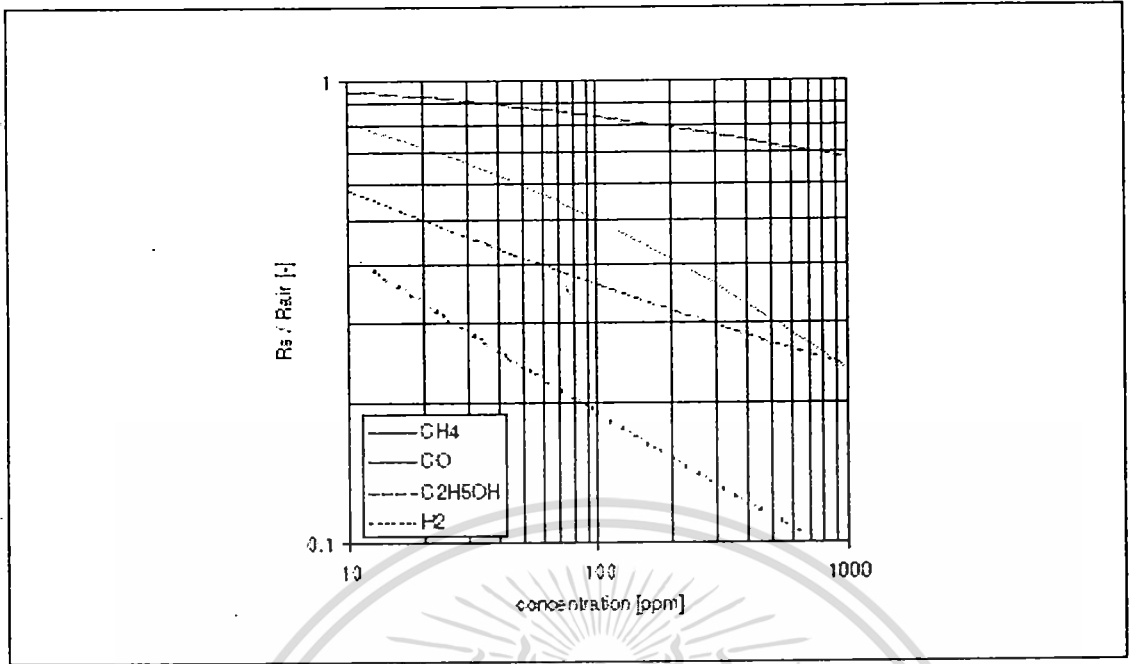
5.3.3 ผลการตอบสนองของตัวตรวจวัดจากการ เพิ่ม ลดอัตราการไหล

แก๊สเซนเซอร์โดยทั่วไปมักจะบอกอัตราการตอบสนองของตัวเซนเซอร์โดยเทียบกับความเข้มข้นของแก๊ส (หน่วยเป็น ppm) ดังรูปที่ 5.36

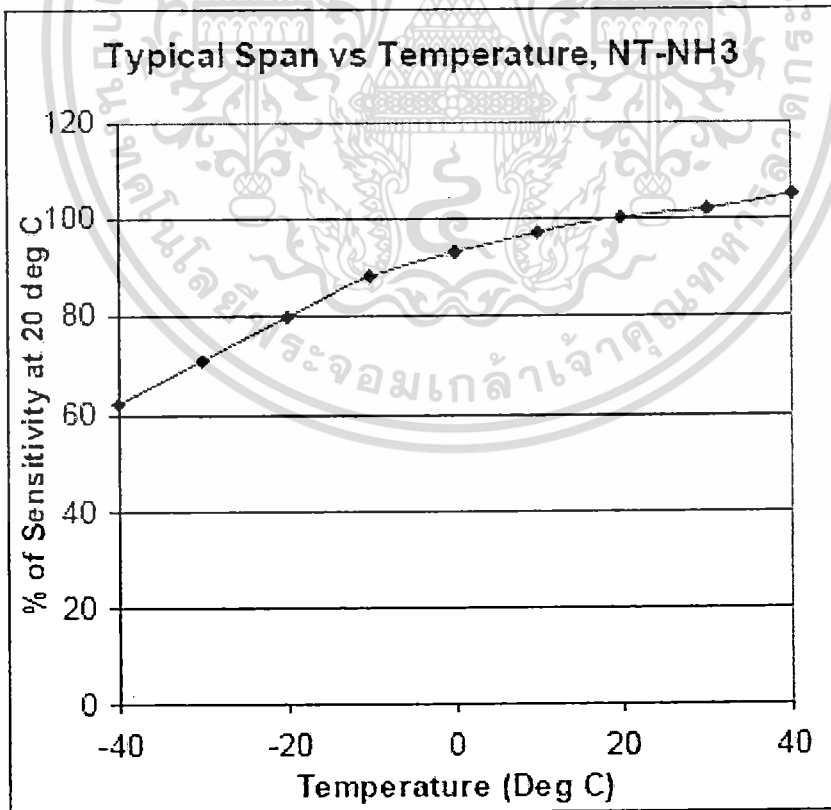


รูปที่ 5.36 กราฟแสดงคุณลักษณะของเซนเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์

จากรูปที่ 5.36 จะเห็นได้ว่าเป็นกราฟที่แสดงค่าอินพุตต่อเอาต์พุต ของเซนเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ให้อาต์พุตเป็นกระแส (มิลลิแอมป์) อินพุตเป็นค่าความเข้มข้นของแก๊ส (ppm) กราฟแสดงคุณลักษณะจะแสดงค่าความไวของเซนเซอร์และสามารถบอกย่านการตอบสนองของเซนเซอร์ได้ ดังนั้น Data Sheet ของแก๊สเซนเซอร์จึงควรมีกราฟที่แสดงคุณลักษณะในตัวแปรหลายๆ แบบ อย่างเช่น แสดงเอาต์พุตต่อความเข้มข้นของอินพุต แสดงผลของอุณหภูมิ แสดงผลการตอบสนองต่อเวลา เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ได้อย่างถูกต้องเหมาะสมกับงานมากที่สุด ตัวอย่างของกราฟต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.39 – 5.40



รูปที่ 5.37 กราฟแสดงคุณลักษณะของแก๊สเซนเซอร์ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน ต่อความเข้มข้นของแก๊ส

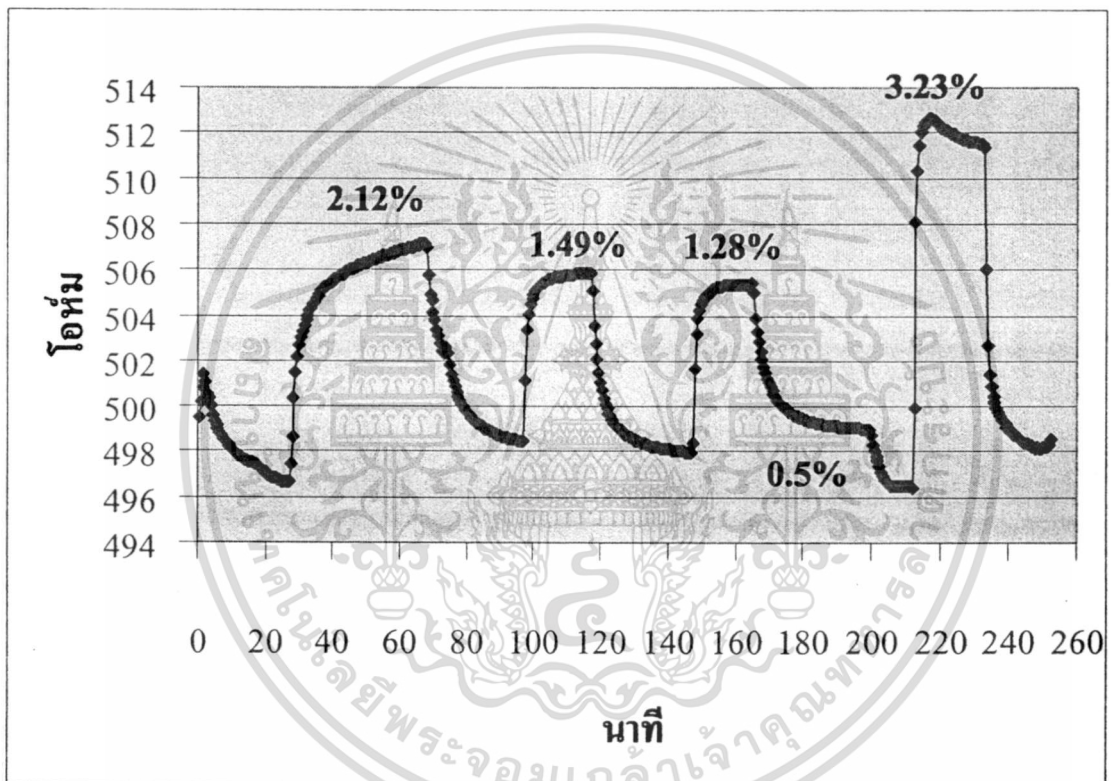


รูปที่ 5.38 กราฟคุณลักษณะของแก๊สเซนเซอร์ แสดงผลของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องด้วยผู้จัดทำไม่สามารถบอกค่าความเข้มข้นของแก๊สได้ เนื่องจากไม่มีเครื่องมือวัดค่าความเข้มข้น ผู้จัดทำจึงใช้การควบคุมอัตราการไหลแทน ดังนั้นกราฟที่ได้จะเป็นเพียงพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของเซนเซอร์เท่านั้นเพราะไม่ทราบขนาดทางอินพุต

อย่างไรก็ตามยังคงต้องคำนึงถึงผลของความเข้มข้นแก๊สในการตรวจวัด ในการทดลองผู้จัดทำจึงใช้การเพิ่มลดอัตราการไหล เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความเข้มข้นแก๊ส โดยมีผลการทดลองดังรูปที่ 5.39



รูปที่ 5.39 แสดงผลการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ต่อการเพิ่มอัตราการไหล

จากรูปที่ 5.39 จะเห็นได้ว่าในการวัด 3 ครั้งแรก ใช้อัตราการไหลเท่ากัน แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานมีแนวโน้มต่ำลงเมื่อทำการวัดซ้ำ ในการวัดครั้งที่ 4 มีการปรับอัตราการไหลให้เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าส่งผลให้ค่าความต้านทานตั้งต้นมีค่าต่ำลง 0.5% และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานก็เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย จึงสรุปได้ว่าอัตราการไหลมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ที่เป็นดังนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้ค่าความเข้มข้นแก๊สสูงขึ้น จำนวน โมเลกุลในหน่วยพื้นที่จะมากขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์ระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับ โมเลกุลของแก๊สมากตามไปด้วย ความต้านทานของ เซนเซอร์จึงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด

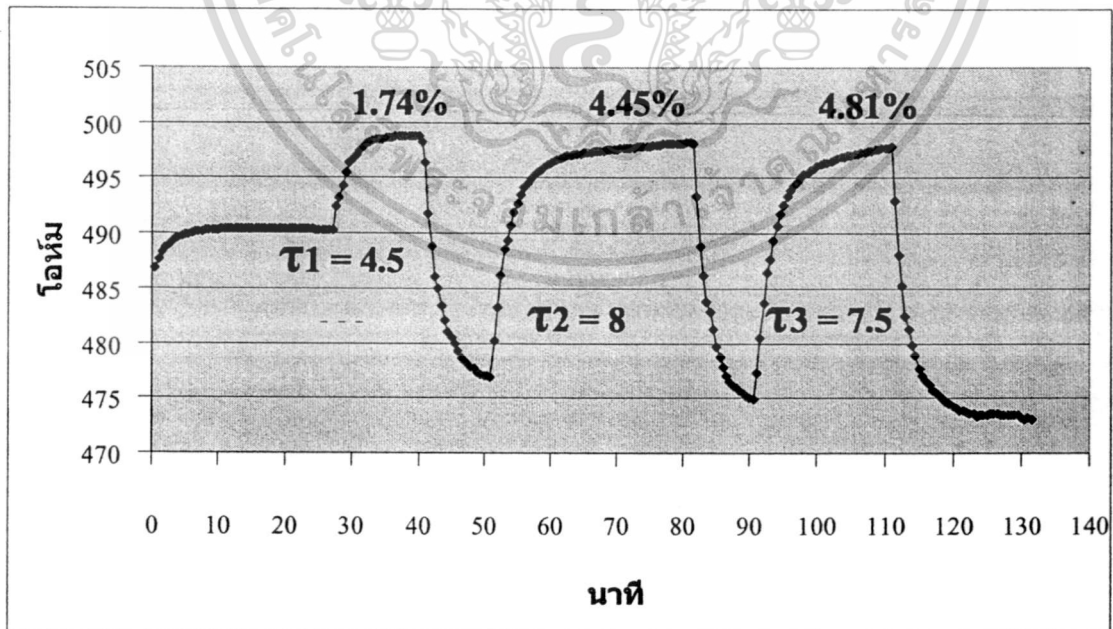
จากหัวข้อ 5.31 – 5.32 จะเห็นได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง ความต้านทานสูงกรณีฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวลวงก่อนทำการวัดหรือเมื่ออุณหภูมิใน ระบบวัดต่ำ และเมื่อมีการทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของแก๊ส โมเลกุลของแก๊สจะค้างค้ำอยู่ภายในชั้น ฟิล์มที่มีลักษณะเป็นตาข่าย ในกรณีนี้การทำให้โมเลกุลนั้นหลุดออกไปได้หรือระเหยออกไปก็คือ การให้ความร้อนในระบบวัด

ผู้จัดทำจึงสรุปได้ว่าในการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นแก๊สเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของ เอทานอลนั้นควรมีกระบวนการดังนี้

1. อบหรือให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 20 นาที
2. ปลอ่ยให้เซนเซอร์เย็นตัวก่อนทำการวัด
3. หลังจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของแก๊สแล้ว ต้องมีการให้ความร้อน

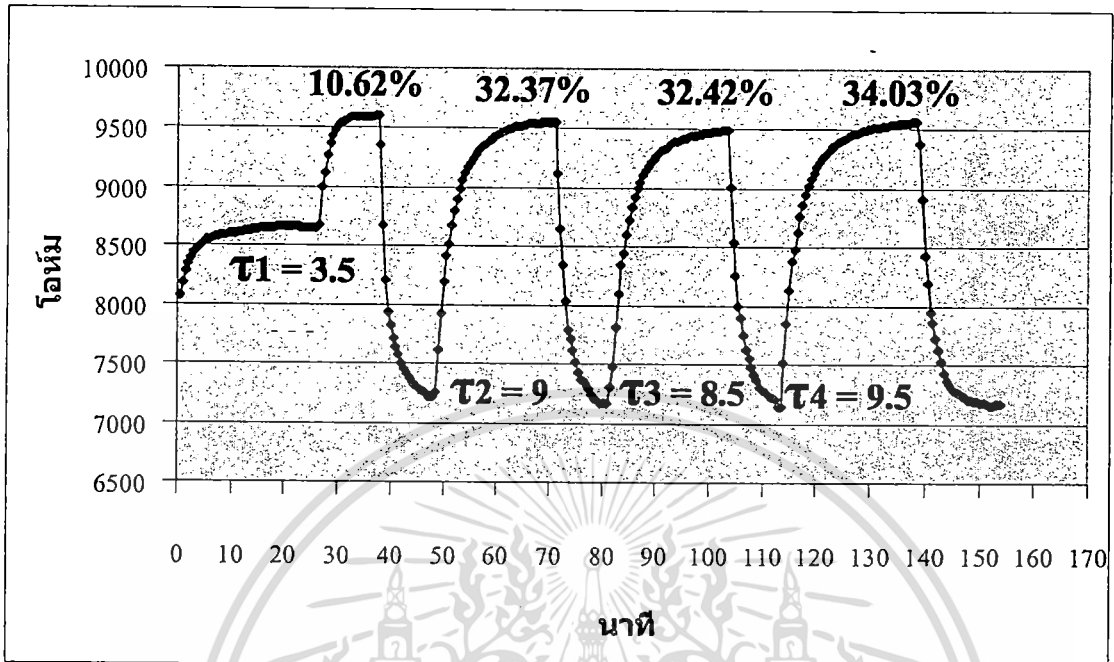
ในระบบวัดอีกครั้งเพื่อให้ค่าความต้านทานตั้งต้นกลับเข้าสู่ค่าเดิม

ผลการทดลองวัดในกระบวนการวัดที่เหมาะสมแสดงได้ดังรูปที่ 5.40



รูปที่ 5.40 แสดงผลการทดลองวัดในกระบวนการวัดที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.41 แสดงผลผลการทดลองวัดในกระบวนการวัดที่เหมาะสม (2)

จากรูปที่ 5.40 – 5.41 จะเห็นได้ว่ามีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสูงขึ้นมากกว่า 2 เท่า เนื่องจากค่าความต้านทานตั้งต้นลดลง แต่ส่วนค่าความต้านทานขณะตรวจพบแก๊สนั้นยังคงเท่าเดิมเนื่องจากเป็นจุดอิมิตซ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์คือไม่ตอบสนองต่ออินพุตในปริมาณที่มากกว่านี้

5.4 ชนิดรอยสัมผัสและความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ

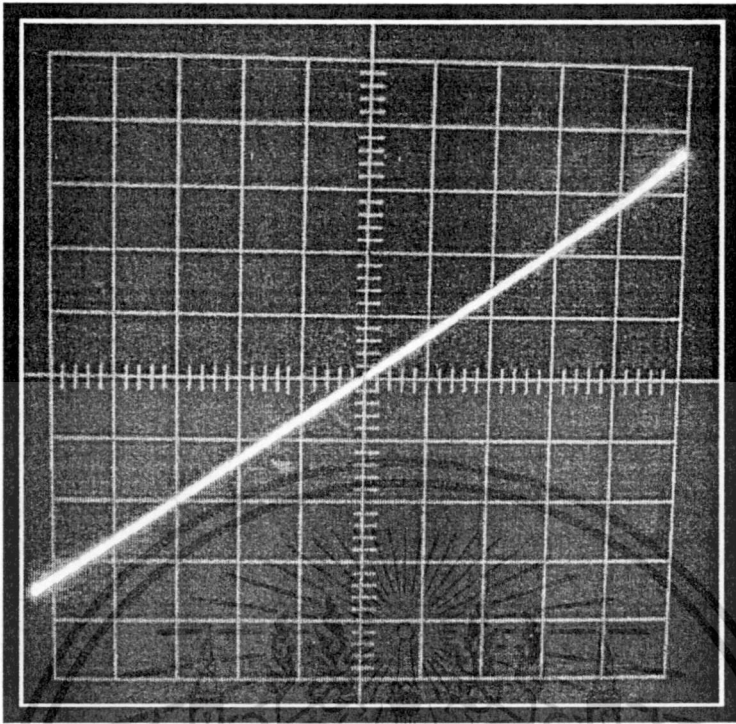
คาร์บอนนาโนทิวบ์ก็คือธาตุคาร์บอนที่มีการจับตัวเป็นรูปท่อ ธาตุคาร์บอนเป็นธาตุหมู่ 4 ในตารางธาตุ เป็นหมู่เดียวกับซิลิคอนจึงมีคุณลักษณะเป็นกึ่งตัวนำไฟฟ้า ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์อาจเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี หรือ ชนิดเอ็น ก็ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยในการสังเคราะห์ และรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ อาจเกิดได้ทั้งแบบ รอยสัมผัสแบบ เรคตีไฟร์และรอยสัมผัสแบบ โอม์มิก

จากการค้นคว้า งานวิจัยต่างๆ พบว่าส่วนใหญ่ คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งแบบผนังเดี่ยวและแบบหลายผนัง 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 ให้ค่าความต้านทานรอยสัมผัสที่ต่ำที่สุดและเป็นรอยสัมผัสแบบ โอม์มิก โดยโลหะชนิดอื่นๆ มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานรอยสัมผัสมากขึ้นตามลำดับดังนี้ Pd Pt Cu Au และยังมีงานวิจัยของ Institute of Physics Academia Sinica Taipei ที่กล่าวว่า Cr เป็นโลหะที่ให้คุณสมบัติรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ดี คือมีความต้านทานรอยสัมผัสที่ต่ำ (ช่วงเป็นกิโลโอห์ม ที่อุณหภูมิห้อง) เป็นโอห์มมิกคอนแทค ผลกระทบจากอุณหภูมิต่ำ ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กต่ำ และเหมาะสมที่จะเป็นอิเล็กโทรดของอุปกรณ์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นส่วนประกอบ

สำหรับปริญญานิพนธ์นี้เป็นรอยสัมผัสระหว่างทองแดงกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ สาเหตุที่เลือกใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรดเนื่องจากทองแดงมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิในการสังเคราะห์ (550 – 750 องศาเซลเซียส) มาก เมื่อดูจากจุดหลอมเหลวแล้วแน่ใจว่าทองแดงจะไม่หลอมเหลวขณะสังเคราะห์ แต่ในการสังเคราะห์จริงนั้นพบว่า ทองแดงมีการหลุดล่อนจากแผ่นฐานรองซิลิคอนบางส่วน และอีกเหตุผลหนึ่งคือทองแดงไม่เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนนาโนทิวบ์จะไม่เกิดบนทองแดงที่ต้องการให้เป็นขั้วไฟฟ้า แต่ข้อเสียของทองแดงคือ ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นออกไซด์ได้ง่าย ออกไซด์นี้เป็นฉนวน จะส่งผลให้ความต้านทานที่รอยสัมผัสมีค่าสูงขึ้น เป็นรอยสัมผัสที่แย่ เพราะมีความต้านทานสูงและเมื่อนำแผ่นตัวอย่างไปทำการต่อขั้ว ต้องตัดลวดตัวนำกับอิเล็กโทรดด้วยกาวเงิน เป็นเหตุให้มีค่าความต้านทานรอยสัมผัสมากขึ้นอีก เนื่องจากกาวเงินอาจติดได้ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ความต้านทานโดยรวมมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ในการพิจารณาว่ารอยสัมผัสเป็นแบบโอห์มมิกหรือเรกติไฟร์นั้น ผู้จัดทำได้นำตัวตรวจวัดแก๊สที่ต่อขั้วเสร็จสมบูรณ์ มาวัด กราฟคุณลักษณะ I - V ด้วยเครื่อง Curve Tracer ได้ผลดังรูปที่ 5.42



รูปที่ 5.42 กราฟคุณลักษณะ $I - V$ ของตัวตรวจวัดกระแส

จากรูปที่ 5.42 พบว่าเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ซึ่งผลการวัดทุกๆ แผ่นตัวอย่างเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกทั้งสิ้น โดยมีความชันหรือความต้านทานแตกต่างกันออกไป

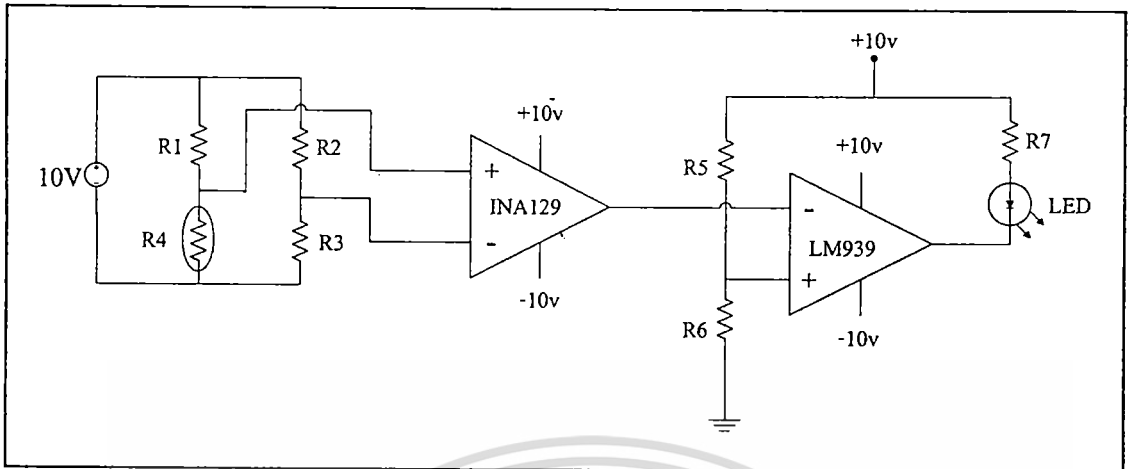
5.5 การนำอุปกรณ์ตรวจวัดมาประกอบเป็นวงจรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้

จากหัวข้อที่ 5.2 จะเห็นแล้วว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติที่เป็นเซนเซอร์ไวระเหยของเอทานอลได้ ในหัวข้อนี้จะนำตัวตรวจวัดมาประกอบเป็นวงจรเพื่อแสดงให้เห็นว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง

ตัวตรวจวัดมีเอาต์พุตเป็นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไม่มาก (ไม่เกิน 8%) จึงเหมาะสมกับการประกอบเป็นวงจรบริดจ์เพื่อแปลงเอาต์พุตที่ได้ให้เป็นศักดาไฟฟ้าเพื่อความสะดวกในการจัดการ แล้วใช้ Instrumentation Amplifier ขยายสัญญาณ แล้วนำไปแสดงผล วงจรที่ใช้เป็นดังรูปที่

5.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.43 วงจรแก๊สเซนเซอร์แสดงผลด้วยไดโอดเปล่งแสง

จากวงจรแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. วงจรบริดจ์ โดยมีเซนเซอร์เป็นแขนของบริดจ์ที่ R4 โดยเมื่อความต้านทานเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับแก๊ส สักค่าที่ node นี้จะสูงกว่าอีก node หนึ่ง
2. Instrumentation Amplifier INA129 เพื่อขยายสักค่าไฟฟ้าที่ได้จากวงจรบริดจ์ เนื่องจากถ้าค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เอาต์พุตของวงจรบริดจ์ จะมีขนาดเป็น มิลลิโวลต์ จึงต้องมีการขยายเพื่อให้นำไปใช้กับวงจรอื่นๆ เพื่อแสดงผลได้
3. คอมพาราเตอร์ LM393 จะถูกตั้งจุดทำงานไว้โดยการปรับค่า R6 ซึ่งเมื่อสักค่าของขา inverting มีค่ามากกว่าขา non inverting คอมพาราเตอร์จะให้เอาต์พุตเป็นสักค่า $-V_{sat}$ (-10V) จะทำให้ ไดโอดเปล่งแสง ได้รับการไบอัสตรง ไดโอดเปล่งแสงจะติดสว่างแสดงสถานะว่ามีการตรวจพบแก๊ส

บทที่ 6

สรุป

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่อง CVD แบบความร้อนที่พัฒนาขึ้นสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้เป็นอย่างดี กระบวนการสังเคราะห์ทำให้ความดันบรรยากาศ ใช้แอลกอฮอล์และไนโตรเจนเป็นสารตั้งต้นทำให้ไม่มีมลพิษและอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ตัวหลักของเครื่องประกอบด้วยเตาความร้อนแบบสามโซนที่ควบคุมอุณหภูมิเที่ยงตรงสูงทำให้ปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์คงที่สม่ำเสมอ มีระยะช่วงอุณหภูมิคงที่ Flat zone ขาวทำให้มีเนื้อที่ในการสังเคราะห์ได้ทีละมาก ๆ ทำให้ประหยัดและสามารถสังเคราะห์ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์พื้นที่ขนาดใหญ่ทำให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้เครื่อง CVD แบบลดความร้อนยังมีราคาถูก

การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้มาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจจับแอลกอฮอล์แบบตัวต้านทานสามารถทำได้ โดยอุณหภูมิสภาพแวดล้อมมีผลต่อความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์และการดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์เป็นอย่างมาก ความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลงและจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ขึ้นแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำมากกว่าคุณสมบัติของตัวนำ อุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถดูดซับแอลกอฮอล์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง ทำให้อุปกรณ์เซนเซอร์มีความไวที่ไวสูง (Sensitivity) ขึ้น ผลของการให้ความร้อนแก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการช่วยคืนสภาพความต้านทานหลังดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ จะทำช่วยเพิ่มค่าความไวได้สูงขึ้นอีกและมีเวลาการตอบสนอง (Response time) ได้เร็วยิ่งขึ้น การทำงานของเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีอุณหภูมิแวดล้อมต่ำที่ -5°C และให้ความร้อนในการคืนสภาพที่ 85°C จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสูงถึง 76.22% คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถใช้งานเป็นตัวตรวจจับแอลกอฮอล์ที่ดีได้โดยประยุกต์ใช้ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคาร์บอนนาโนทิวบ์

จากการวิจัยดังกล่าวเป็นแนวทางที่จะนำไปสู่การพัฒนาให้ก้าวหน้าต่อไป อาทิเช่นการนำไปประยุกต์ร่วมกับหัวเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ในการตรวจจับกลิ่นที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนประกอบที่เรียกว่าจมูกอิเล็กทรอนิกส์ และการวิจัยนี้ได้มีส่วนอย่างมากต่อการเรียนการสอนการศึกษาในระดับปริญญาตรีและโท ผู้วิจัยหวังว่าคงจะได้รับการสนับสนุนงานวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอีกในคราวต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, “เอกสารการสอนวิชา Sensors & Transducers” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
2. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, “อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
3. สมเกียรติ สุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
4. ศักดา ไตรศักดิ์, “โครงสร้างอะตอมและพันธะเคมี”, คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 124 หน้า, 2547
5. วิสชุด ศรีรัตนะ, “เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ในงานอุตสาหกรรม”, ซีเอ็ดดูเคชั่น, 392 หน้า 2547
6. ทรงพล กาญจนชูชัย, “นาโนอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น”, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 348 หน้า, 2550
7. ประพันธ์ พิพัฒน์สุข, “ออปแอมป์และการใช้งาน”, สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ, 189 หน้า
8. เอกสารประกอบการบรรยาย “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำระดับ 5 ไมโครเมตร”, ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
9. รัฐพงษ์ นาคาไชย, “การเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีวิธีดีแบบขดลวดความร้อน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
10. กิตติ บุคศิริตัน, “คาร์บอนนาโนทิวป์ : อีภทบาทหนึ่งของคาร์บอน”
11. ชีร์เกียรติ์ เกิดเจริญ, “นาโนเทคโนโลยี : ความเป็นไปได้และทิศทางในอนาคต”
12. T.Phetchakul, S.Cheirsirikul, S.Supadech, “Atmospheric pressure HFCVD Synthesis of carbon nanotube by using ethanol source”, The 10th International conference New Diamond Science and Technology (ICNDST – 10), May 11 – 14, 2005, AIST, Tsukuba, Japan
13. Yuki Matsuda, Wei-Qiao Deng & William A. Goddard III, “ Contact Resistance Properties of Metal-Nanotube Interfaces” Materials and Process Simulation Center (MC74-139) California Institute of Technology, California 91125, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. W.S.Su, T.C.Leung, and C.T.Chan, "Work function of Single – walled and multiwalled carbon nanotubes : First – principles study" , Department of Physics, Hong Kong university.
15. C.Cantalini, L.Valentini, I.Armentano, J.M.Kenny, L.Loizzi, S,santucci, "Carbon nanotubes as new materials for gas sensing applications" , Department of chemistry University of L'Aquila Italy
16. Shu Peng, James O'Keeffe, Chengyu Wei, K. Cho, Jing Kong, Robert Chen, Nathan Franklin, H. Dai, "Carbon Nanotube Chemical and Mechanical Sensors" Conference Paper for the 3 rd International Workshop on Structural Health Monitoring
17. Meechai Tapnurat, Supab Choopun, Atcharawon Gardchareon, Pisith Singjai, Pongsri Mangkorntong and Nikorn Mangkorntong , "Thick Film of Carbon Nanotube Composite for Ethanol Sensor", Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand
18. Y. F. Hsiou,¹ Y. J. Yang,¹ L. Stobinski, Watson Kuo, and C. D. Chen , "On the Ohmic Contact between Multiwalled Carbon Nanotubes and Nano-electrodes" , Graduate Institute of Electronics Engineering and Department of Electrical Engineering, National Taiwan University, Taipei, R.O.C. Institute of Physical Chemistry, Polish Academy of Sciences, Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, Nankang 11529, Taiwan, R.O.C.
19. I. Sayagoa, E. Terradob, E. Lafuenteb, M.C. Horrilloa, W.K. Maserb, A.M. Benitob, R. Navarroc, E.P. Urriolabeitiac, M.T. Martinezb, J. Gutierrez, "Hydrogen sensors based on carbon nanotubes thin films" , Laboratorio de Sensores, Instituto de Física Aplicada, Spainb Instituto de Carboquímica, CSIC, Departamento de Química Inorgánica, Universidad de Zaragoza,
20. Junya Suehiro, Shinji Yamane, Kiminobu Imasaka, "Carbon nanotube – Based Hydrogen Gas Sensor Electrochemically Functionalized with Palladium", Graduate school of Information Science and Electrical Engineering Kyushu University Fukuoka, Japan