

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างและคุณสมบัติของเซ็นเซอร์แอมโมเนียจากคาร์บอนนาโนทิวส์และดีบุก
ออกไซด์

**Preparation and Characterization of Ammonia Sensors from
Carbon nanotube/SnO₂**



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**82959**.....
วัน, เดือน, ปี...**29**...**ก.ค.**...**2551**.....

b.....**11957840**.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

การสร้างและคุณสมบัติของเซ็นเซอร์แอมโมเนียจากคาร์บอนนาโนทิวส์และดีบุก
ออกไซด์

Preparation and Characterization of Ammonia Sensors from
Carbon nanotube/SnO₂



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างและคุณสมบัติของเซ็นเซอร์แอม โมเนียจากคาร์บอนนา

โนทิว์และดีบุกออกไซด์

(

๔๕๖



~~~~~

.....  
สิทธิศักดิ์ )

อาจารย์ที่ปรึกษา

# การสร้างและคุณสมบัติของเซ็นเซอร์แอมโมเนียจาก

## คาร์บอนนาโนทิวบ์และดีบุกออกไซด์

นาย ปรีชญา คำภาบุตร รหัส 48015214

นาย ปรีชญญา คำภาบุตร รหัส 48015258

ผศ.ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

### บทคัดย่อ

รายงานผล  
คาร์บอนนาโน  
นา ชั้นฟิล์มค  
ั่วไฟฟ้า โดย  
เคลือบไอทาง  
อาร์กอนโดยใ  
อะลูมิเนียมถูก

โครงสร้างเซ็นเซอร์ ขหว เถ รนทว เรมเซมขนระทว เงชนพตมท เวบชนน เเนทวับและชั้นฟิล์มดีบุก  
ออกไซด์ ตำแหน่งการเคลือบ บนลักษณะเฉพาะของเซ็นเซอร์แต่ละตัวนั้นจะทราบได้เมื่อมีการ  
ตรวจวัดแอมโมเนีย



เนียบที่อยู่บนชั้นฟิล์ม  
ฐานรองที่เป็นอะลูมิ  
เนียมที่ต่อออกมาเป็น  
เลือบ โดยเทคนิคการ  
1 บรรยากาศของก๊าซ  
าอฮอล ส่วนั่วไฟฟ้า  
evaporation) ผลของ

# Preparation and Characterization of Ammonia Sensors from Carbon nanotube/SnO<sub>2</sub>

Mr. Prachya Khumpabutra ID.48015214

ID.48015258

naitsak Advisor



## Abstract

This report describes the preparation and characterization of ammonia sensors based on carbon nanotube/SnO<sub>2</sub>. The sensors were prepared by chemical vapor deposition (CVD) using SnCl<sub>2</sub>-ethanol solution. The effects of the

ammonia sensors based on alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) substrate, which were deposited by thermal evaporation. The sensors were prepared by thermal evaporation using ferrocene-ethanol evaporation. The effects of the

position on the characteristic of sensors when exposed to Ammonia (NH<sub>3</sub>) will be investigated.

## กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินการจัดทำปฏิญานิพนธ์ “การสร้างและคุณสมบัติของเซ็นเซอร์แอม โมเนีย จากคาร์บอนนาโนทิวบ์และดีบุกออกไซด์” ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้แนวทาง ข้อมูลทางด้านวิชาการและข้อคิดด้านการปฏิบัติ ตั้งแต่เริ่ม จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ทำให้ปฏิญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณบัววรรณ ไชยธงรัตน์ สำหรับคำแนะนำทางวิชาการ ตลอดจนข้อมูลและคำแนะนำในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆภายในห้องทดลอง

สุดท้าย  
บิดามารดา แะ  
ประสพแต่ควา



เลประทานพรให้คุณ  
เรศศึกษาแก่ผู้จัดทำจน  
คตลอดไป

ปรัชญา คำภาบุตร  
ปฏิญญา คำภาบุตร

# สารบัญ

|                                                        | หน้า |
|--------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย                                        | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                                     | II   |
| กิตติกรรมประกาศ                                        | III  |
| สารบัญ                                                 | IV   |
| สารบัญรูป                                              | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ                                           | 1    |
| 1.1 นิ                                                 | 2    |
| 1.2 วิ                                                 | 2    |
| 1.3 วิ                                                 | 3    |
| 1.4 ก                                                  | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎี                                          | 4    |
| 2.1 ป                                                  | 4    |
| 2.2 โฟ                                                 | 5    |
| 2.3 ช                                                  | 6    |
| 2.4 ก                                                  | 6    |
| 2.4.1                                                  | 8    |
| 2.4.2 Tip Growth                                       | 9    |
| 2.5 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์                       | 10   |
| 2.6 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์                  | 13   |
| 2.6.1 วิธี Arc discharge                               | 13   |
| 2.6.2 วิธี Laser ablation                              | 14   |
| 2.6.3 วิธี Chemical vapor deposition (CVD)             | 15   |
| 2.6.3.1 วิธี Thermal chemical vapor deposition         | 15   |
| 2.6.3.2 วิธี Plasma enhanced chemical vapor deposition | 16   |
| 2.6.3.3 วิธี Vapor phase growth                        | 17   |
| 2.6.3.4 วิธี High pressure CO disproportionate process | 18   |



## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 2.6.3.5 วิธี Hot filament enhance Chemical<br>vapor deposition | 19 |
| 2.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์             | 20 |
| 2.7.1 หลักการทำงานทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน            | 20 |
| 2.7.2. ประเภทและการนำไปใช้งานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน       | 20 |
| 2.7.3 TEMs                                                     | 20 |
| 2.8 ระบุ                                                       | 21 |
| 2.9 วิธี                                                       | 22 |
| 2.10                                                           | 22 |
|                                                                | 24 |
|                                                                | 25 |
|                                                                | 25 |
|                                                                | 26 |
|                                                                | 26 |
|                                                                | 27 |
|                                                                | 28 |
|                                                                | 30 |
| 2.11 เ                                                         | 30 |
| 2.11.1 ส่วนประกอบของ เซนเซอร์ก๊าซ                              | 30 |
| 2.11.2 คุณสมบัติของเซนเซอร์ก๊าซ                                | 31 |
| 2.11.3 ชนิดหลัก ๆ ของเซนเซอร์ก๊าซ                              | 32 |
| 2.12 การตรวจวัดปริมาณสาร                                       | 33 |
| 2.13 ความเป็นมาของการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ                   | 33 |
| 2.14 นิยามของก๊าซเซ็นเซอร์                                     | 34 |
| 2.15 ทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์                                    | 36 |
| 2.16 ปฏิกิริยาของการดูดซับก๊าซที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ            | 37 |
| 2.16.1 สถานะพื้นผิว (Surface state) ในการตรวจจับทางเคมี        | 37 |
| 2.17 กลไกในการตรวจจับก๊าซของทินออกไซด์                         | 42 |



## สารบัญ(ต่อ)

|                                                | หน้า      |
|------------------------------------------------|-----------|
| 2.17.1 ผลในเนื้อสาร                            | 42        |
| 2.17.2 ผลจากผิวของสารกึ่งตัวนำ                 | 43        |
| 2.17.3 ผลจากขอบเกรน                            | 45        |
| 2.18 ปฏิกริยาเคมีระหว่างทินออกไซด์กับก๊าซต่างๆ | 48        |
| 2.18.1 ปฏิกริยาออกซิเดชัน                      | 48        |
| 2.18.2 ปฏิกริยารีดักชัน                        | 48        |
| 2.19 f                                         | 49        |
| <b>บทที่ 3 การอบ</b>                           | <b>50</b> |
| 3.1 ก                                          | 50        |
| 3.2 ก                                          |           |
| บ                                              | 51        |
|                                                | 51        |
| 3.3 ซ้ำ                                        | 55        |
| 3.4 ซ้ำ                                        | 57        |
| <b>4.1 บทที่ 4 กา</b>                          | <b>58</b> |
| 4.1 กา                                         | 58        |
| 4.2 ผลการทดลอง                                 | 58        |
| 4.3 การทดสอบก๊าซแอมโมเนีย                      | 60        |
| 4.4 ผลการทดสอบก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง     | 61        |
| 4.5 การทดสอบก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิต่างๆ      | 64        |
| 4.6 การทดสอบน้ำ (H <sub>2</sub> O)             | 65        |
| 4.7 การทดสอบก๊าซแอลพีจี                        | 66        |
| 4.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ                  | 66        |
| 4.8 ผลการทดสอบก๊าซแอลพีจี                      | 68        |



## สารบัญ(ต่อ)

|                                                                                     | หน้า      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>                                             | <b>69</b> |
| 5.1 สรุปผลการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์<br>บนฐานรองอะลูมินา | 69        |
| 5.2 สรุปผลจากการทดสอบแอมโมเนีย                                                      | 69        |
| 5.3 การทดสอบก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิต่างๆ                                           | 69        |
| 5.4 การทดสอบน้ำ (H <sub>2</sub> O)                                                  | 70        |
| 5.5 กฏ                                                                              | 70        |
| <b>เอกสารอ้างอิง</b>                                                                | <b>71</b> |



# สารบัญรูป

| รูปที่                                                              | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 การจัดกลุ่มอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์                                 | 2    |
| 2.1 วัสดุที่มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนที่แตกต่างกัน                  | 5    |
| 2.2 การม้วนของแผ่นกราฟีน                                            | 6    |
| 2.3 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (SWNTs)                        | 7    |
| 2.4 ภาพอธิบาย                                                       | 7    |
| 2.5 คาร์บอนน                                                        | 8    |
| 2.6 ท่อคาร์บอน                                                      | 8    |
| 2.7 กลไกการมี                                                       |      |
| แบบ Base Gro                                                        | 10   |
| 2.8 ภาพการท                                                         |      |
| ของ MWNT ว                                                          |      |
| MWNT ที่อยู่ร                                                       | 11   |
| 2.9 การปลดปล                                                        | 11   |
| 2.10 วิธี Arc di                                                    | 13   |
| 2.11 วิธี Laser                                                     | 14   |
| 2.12 ระบบขอ                                                         | 16   |
| 2.13 ระบบของวิธี Plasma enhanced CVD                                | 16   |
| 2.14 ระบบของวิธี Vapor phase growth                                 | 17   |
| 2.15 ระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process          | 18   |
| 2.16 แสดงระบบของวิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition | 19   |
| 2.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEMs                       | 21   |
| 2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEMs                       | 22   |
| 2.19 แผนภาพการทำงานของ TEMs                                         | 22   |
| 2.20 แผนภาพการทำงานของ SEMs                                         | 24   |



## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่                                                                                              | หน้า             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 2.21 ลักษณะ Single-molecule Transistor                                                              | 27               |
| 2.22 เซมิคัลเซินเซอร์ที่ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์ สำหรับตรวจวัดก๊าซ หรือสาร โมเลกุลอื่น                  | 28               |
| 2.23 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจับกับหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์                        | 29               |
| 2.24 ภาพจาก AFM ของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ตรึงอยู่บน SWNTs                                         | 30               |
| 2.25 ส่วนประสม                                                                                      | 30               |
| 2.26 การจัดกลุ่ม                                                                                    | 35               |
| 2.27 โครงสร้าง                                                                                      | 37               |
| 2.28 แบบจำลองอะตอมผู้                                                                               | 39               |
| 2.29 Surface d                                                                                      | 42               |
| 2.30 ความสัมพันธ์ของเสาเซลล์                                                                        | 43               |
| 2.31 การเปลี่ยน                                                                                     | (E) 44           |
| 2.32 โครงสร้าง                                                                                      | 45               |
| 2.33 โครงสร้าง                                                                                      | เส้นออกซิเจน) 46 |
| 2.34 แบบจำลองกราฟิกแพนด้าของเซมิคอนดักเตอร์                                                         | 47               |
| 2.35 กำแพงศักย์ตามทางเดินกระแสในทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์ (ผลึกมีขนาดน้อยกว่า สองเท่าของ Debye length) | 47               |
| 2.36 การตรวจจับ $C_2H_5OH$ ของทินออกไซด์ จะได้ $CH_3COOH$ และ $H_2O$                                | 48               |
| 2.37 การตรวจจับ $O_3$ ของทินออกไซด์ จะได้ $O_2$                                                     | 49               |
| 2.38 การตรวจจับ $NO_2$ ของทินออกไซด์ จะได้ $NO$                                                     | 49               |
| 3.1 แผ่นอะลูมินาที่จะนำมาตัด                                                                        | 50               |
| 3.2 แผ่นอะลูมินาที่ตัดแล้วขนาด 1.5 ซม. x 0.7 ซม.                                                    | 50               |
| 3.3 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องอัลตราโซนิก                                                        | 51               |



## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                                   | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา                                                                                                         | 52   |
| 3.5 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์                                                                        | 53   |
| 3.6 กระบวนการไล่อากาศออกจากระบบ                                                                                                                          | 54   |
| 3.7 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์                                                                                          | 55   |
| 3.8 แบบจำลอง                                                                                                                                             | 56   |
| 3.9 เครื่อง Eva                                                                                                                                          | 56   |
| 3.10 การวางชิ้น                                                                                                                                          | 56   |
| 3.11 หัวตรวจวัด                                                                                                                                          | 57   |
| 4.1 ภาพถ่าย                                                                                                                                              | 58   |
| 4.2 ภาพถ่าย                                                                                                                                              | 59   |
| 4.3 ภาพถ่าย                                                                                                                                              | 60   |
| 4.4 การทดสอบ<br>และใช้แ                                                                                                                                  | 60   |
| 4.5 กราฟแสดง<br>Ferrocene                                                                                                                                | 61   |
| 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบเซนเซอร์ทราจบนทสารละลายอัตราส่วน<br>Ferrocene 0.5 % SnCl <sub>2</sub> 0.5 % ต่อไอแอม โมเนียอิมตัวที่อุณหภูมิห้อง (28° C)           | 61   |
| 4.7 กราฟแสดงผลการทดสอบเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นที่สารละลายอัตราส่วน<br>Ferrocene 0.25 % SnCl <sub>2</sub> 0.75 % ต่อไอแอม โมเนียอิมตัวที่อุณหภูมิห้อง (28° C) | 62   |
| 4.8 กราฟแสดงผลการทดสอบเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นที่สารละลายอัตราส่วน<br>Ferrocene 0 % SnCl <sub>2</sub> 1 % ต่อไอแอม โมเนียอิมตัวที่อุณหภูมิห้อง (28° C)       | 62   |
| 4.9 แผนภูมิแสดงค่า Response ของเซนเซอร์แต่ละตัวในรูปที่ 4.5-4.8                                                                                          | 63   |
| 4.10 แผนภูมิแสดงค่า t <sub>on</sub> และ t <sub>off</sub> ของเซนเซอร์ในรูปที่ 4.5-4.8                                                                     | 63   |



## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                    | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.11 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน<br>Ferrocene : SnCl <sub>2</sub> 0.5% : 0.5% ต่อ ไอแอมโมเนียอิมตัวที่อุณหภูมิ 50° C  | 64   |
| 4.12 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน<br>Ferrocene : SnCl <sub>2</sub> 0.5% : 0.5% ต่อ ไอแอมโมเนียอิมตัวที่อุณหภูมิ 100° C | 64   |
| 4.13 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน<br>Ferrocene                                                                         | 65   |
| 4.14 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน<br>Ferrocene                                                                         | 65   |
| 4.15 ภาพถ่าย                                                                                                                              | 66   |
| 4.16 ภาพถ่าย                                                                                                                              | 66   |
| 4.17 ภาพถ่าย                                                                                                                              | 67   |
| 4.18 ภาพโปรไฟล์                                                                                                                           | 67   |
| 4.19 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน<br>Ferrocene                                                                         | 68   |
| 4.20 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน<br>Ferrocene                                                                         | 68   |



# บทที่ 1 บทนำ

ปัจจุบันมีการค้นคว้าและวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อศึกษาอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการรับรู้แทนประสาทสัมผัสต่างๆของมนุษย์ เพื่อใช้อำนวยความสะดวกและใช้ป้องกันอันตรายต่างๆที่อาจเกิดขึ้นกับชีวิตและทรัพย์สิน เช่น ก๊าซพิษและสารเคมีต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการวิจัย และตามบ้านเรือน

การตรวจวัดชนิดของสาร เป็นสิ่งจำเป็นในสิ่งแวดล้อมใช้ที่อยู่อาศัย ซึ่งเรทางด้านเคมี

การวัดต้น ส่วนการวัดตรวจวัดปริมาณประเภทพอลิเมอ ( Chemical : ชั้นฟิล์ม ซึ่งเรีย sensor )



การตรวจวัดชนิดของสาร ในด้านการอนุรักษ์บริเวณแหล่งชุมชนและนกายภาพ และการวัด

ภูมิ และความดัน เป็นใน เมื่อพิจารณาถึงการระออกไซด์แล้ว วัสดุารดูดซับทางเคมีามด้านทานไฟฟ้าของณ์ตรวจวัดก๊าซ ( Gas

หลังจาก

s เมื่อปี ค.ศ.1991 โดย

นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) งานวิจัยด้านนี้ก็ได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากคุณสมบัติที่เด่นในหลายทาง กล่าวคือ คาร์บอนนาโนทิวปีนั้น มีค่าความความแข็งแรง และความยืดหยุ่นมากกว่าวัสดุใดๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวปียังมีความสามารถในการนำกระแสได้ดี และเป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวกเตอร์การม้วนตัว หรือที่เรียกว่า “Chirality” หลังจากการค้นพบ นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลกต่างทำการศึกษาวิธีการผลิต คุณสมบัติ ตลอดจนวิธีการประยุกต์ใช้ อย่างมากมาย คาร์บอนนาโนทิวปีนั้นสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้าน ของนาโนเทคโนโลยี การประยุกต์ใช้งานนั้น จะเน้นไปทางด้านอุปกรณ์เครื่องมือกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ การกักเก็บพลังงาน ใช้เป็น



4. เพื่อศึกษาการตอบสนองของหัวตรวจวัดที่มีต่อแอมโมเนีย
5. เพื่อพัฒนาหัวตรวจวัดให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

### 1.3 วิธีการดำเนินการ

1. การเตรียมสารละลาย ของสาร 3 ชนิดคือ Ferrocene :  $\text{SnO}_2$  : Ethanol
2. การเตรียมชั้นฟิล์ม ดิบุกออกไซด์-คาร์บอนนาโนทิวบ์ ( $\text{SnO}_2$  – CNTs films) โดยวิธีชีวิตีบนฐานรองอะลูมินา
3. วัด
4. กร
5. ผล
6. สรุป

### 1.4 การประยุกต์

รายงาน  
โครงสร้างอย่าง  
ที่สังเคราะห์ด้วย  
โลหะเร่งปฏิกิริยา  
ออกไซด์-คาร์บอน  
ราคาไม่แพงและ



no - resistor ที่มี  
( $\text{SnO}_2$  – CNTs films)  
ชั้น (Ferrocene) เป็น  
มตราระห์ชั้นฟิล์มดิบุก  
หัวตรวจจับก๊าซต้องมี

หัวตรวจจับก๊าซที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการตรวจวัดสารพิษในปริมาณที่ต่ำ เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรม, ทางการแพทย์, ในห้องปฏิบัติการ และบ้านเรือนที่อยู่อาศัย เป็นต้น สถานที่เหล่านี้จำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจจับสารเคมี ในการตรวจสอบและทำการวัดค่าระดับที่อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อป้องกันการรั่วไหลของปริมาณสารพิษ ใช้ตรวจวัดปริมาณก๊าซเพื่อนำไปใช้งานในปริมาณที่เหมาะสม เป็นต้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ประวัติที่มาของคาร์บอนนาโนทิวป์

เมื่อกลางปี ค.ศ. 1985 ทีมวิจัยนำโดย Prof. Smalley ที่ Rice University ได้สังเคราะห์ Fullerene ที่มีโครงสร้างคล้ายทรงของอะตอมคาร์บอนที่ประกอบด้วยผิวหน้าหกเหลี่ยมและห้าเหลี่ยม โมเลกุลของ Fullerene มี

สถาปนิกที่ออก  
ถึงหกปีต่อมา  
ได้สัดส่วน มีผ  
คนแรกคือ นาย  
ปี ของบริษัท N  
คาร์บอนนาโน  
evaporation แล้ว  
ในลักษณะนี้ ไ  
วัสดุดังกล่าวได้  
ค้นพบครั้งแรก  
มะ และนักวิจัย  
สามารถสร้างที่



ระหว่างการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อป้องกันการม้วนตัวด้วยตัวเองของแผ่นกราฟไฟท์ และป้องกันการเกิดเป็น Fullerene ขนาดเล็ก

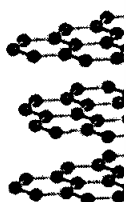
หลังจากที่ได้มีการค้นพบ คาร์บอนนาโนทิวป์ก็กลายเป็นที่กล่าวถึงกันมากในปัจจุบัน ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเหตุผลของการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้อย่างมากมาย นับตั้งแต่การนำมาเป็นองค์ประกอบสำคัญในการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรง ชิ้นงานด้านอิเล็กทรอนิกส์และแสงคะตะลิสต์แบตเตอรี่ กักเก็บพลังงานและเซนเซอร์ เพราะคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นมีเอกลักษณ์ที่เด่นในทางอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถนำความร้อนได้สูง นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีความเหนียวความแข็งแรงและความยืดหยุ่นกว่าวัสดุใดๆ ในปัจจุบัน

fullerene ตามชื่อของ  
่ายกับลูกฟุตบอล สอง  
ในท่อ Fullerene ที่ยาว  
ามีปลายปิด ผู้ที่ค้นพบ  
วิเล็คตรอนไมโครสโค  
va) [1] โดยการค้นพบ  
llerene โดยวิธี Arc-  
เคขนาดนาโน และท่อ  
ามารถที่จะสังเคราะห์  
ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่  
ัดมา นาย สุมิโอะ อิจิ  
ำเสนอรายงานวิจัยว่า  
ยาปริมาณเล็กน้อย ใน

### 2.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์

คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ประกอบขึ้นจากธาตุคาร์บอน เช่นเดียวกับ เพชร (Diamond) กราไฟท์ (Graphite) เถ้าถ่าน และ Fullerene หรือ  $C_{60}$  (รูปที่ 2.1) แต่จะมีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เพชรมีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่ 4 ตัว เกิดเป็นโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อของพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนจึงทำให้เพชรมีความแข็งแรงและคงทนมาก ขณะที่กราฟิที่มีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่เพียง 3 ตัว พันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายกับรังผึ้งหรือตาข่าย เรียงกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกัน เรียกว่า แผ่นกร

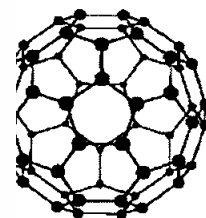
เดียวกันของแผ่นได้ ส่วนเถ้าถ่านเรียกว่า “คาร์บอนที่จัดเรียงโครงสร้างเป็นข



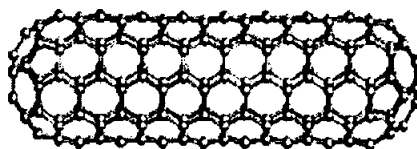
Graphite



วงคาร์บอนในระนาบมากมักและเลื่อนไหลไม่เป็นระเบียบหรือที่เรียกว่า  $C_{60}$  ซึ่งมีโครงสร้างของนาโนทิวป์ที่มีลักษณะ



Fullerene หรือ  $C_{60}$

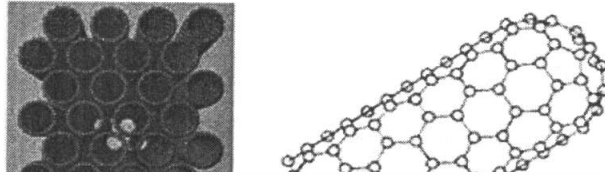


Carbon nanotubes

รูปที่ 2.1 วัสดุที่มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนที่แตกต่างกัน



แหวนทกเหลี่ยม และอาจมีบริเวณที่ปลายของท่อปิดด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของคาร์บอน ที่มีโครงสร้างคล้ายครึ่งหนึ่งของ Fullerene ดังรูปที่ 2.3

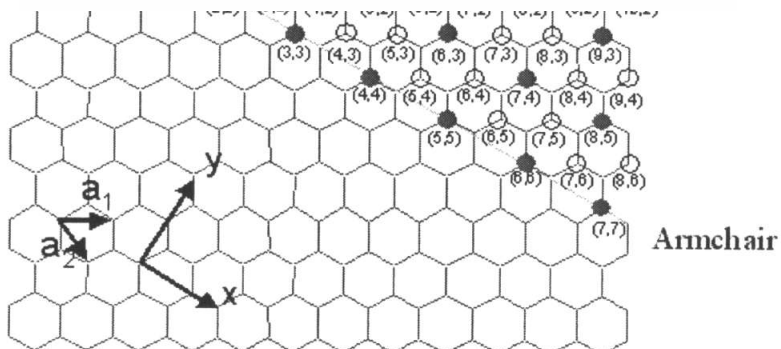


ลวดลาย  
แตกต่างกันอาจแ  
แบบ Armchair ี  
เกิดจากการม้วน  
ม้วนแผ่นกราฟไฟ



ลักษณะโครงสร้างที่  
นี้ คือ โครงสร้างท่อ  
างท่อแบบ Zigzag ที่  
Chiral ที่เกิดจากการ

ลธ



รูปที่ 2.4 ภาพอธิบายการม้วนแผ่นกราฟไฟท์เป็นท่อคาร์บอนนาโนทิวป์

จากรูปที่ 2.4 ลักษณะของการม้วนของคาร์บอนนาโนทิวป์ แบบ Zigzag แบบ Armchair และแบบ Chiral สามารถอธิบายได้คือ การม้วนแบบ Zigzag นั้นจากรูปจะพิจารณาเส้นที่ลากจากจุด (0,0) ไปยังจุด (0,10) เป็นแกนและทำการม้วนตามแนวแกน ซึ่งมุมในการม้วนก็คือ  $0^\circ$  ก็จะได้เป็น Zigzag nanotubes และเส้นที่ลากจากจุด (0,0) ไปยังจุด (7,7) ซึ่งเป็นมุม  $30^\circ$  และม้วนตามมุมดังกล่าว ก็จะได้ Armchair nanotubes แต่ถ้าทำการม้วนตามมุมอื่นๆ ที่ไม่ใช่มุม  $0^\circ$  และมุม  $30^\circ$  คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะเรียกว่า Chiral nanotubes [3] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5

zag, Chiral)

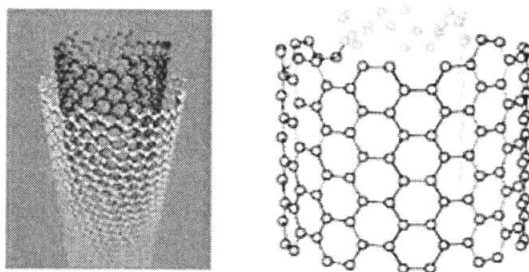
2.2.2 คา

MWNTs)

ผนังขอ

โดยมีจุดศูนย์กลาง

ภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกัน และมีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (MWNTs)

## 2.4 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ยังไม่สามารถสรุปได้เป็นที่แน่ชัด และยังคงเป็นหัวข้อให้ถกเถียงกันในปัจจุบัน ซึ่งกลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ อาจจะถูกเปิดเผยขึ้นในระหว่างที่คาร์บอนนาโนทิวป์ก่อตัวขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดอาจแบ่งได้ 2 ลักษณะตามลักษณะการก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์คือ กลไกการเกิดแบบ Base Growth และกลไกการเกิดแบบ Tip Growth ซึ่งมีความแตกต่างกันโดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.4.1 B

จะเป็นปฏิกิริยาของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ละลายในของเหลวที่เหมาะสมที่จะทำปฏิกิริยาโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิสูงกว่าคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่



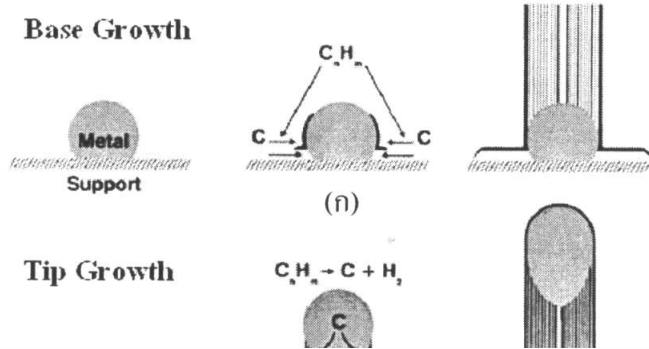
ปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาในอุณหภูมิที่สูง อุณหภูมิที่สูงจะทำให้แหล่งกำเนิดคาร์บอนตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีความเข้มข้นก่อนเป็นคาร์บอนนา

### 2.4.2 Ti

เป็นกาปฏิกิริยาก่อตัว

อยู่ปลายท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ และอุณหภูมิสูงพอเหมาะจะเกิดคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิที่สูงจะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะสูงกว่าด้านล่างทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาคงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง ปฏิกิริยาจะสูงกว่าด้านล่างทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาคงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง ก่อนเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.7 (ข)

ปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดของคาร์บอน

2.5 คุณสมบัติของ

คาร์บอนเด่นๆได้ดังต่อไปนี้  
- ความแข็งแรงและกราฟระหว่างพันธะของหนึ่งอะตอมเชื่อม



รูป Base Growth (จ)

ตัวอย่างคุณสมบัติที่

แข็งแรงมาก มากกว่ามมิจากการเชื่อมต่อกกราฟที่นั่นคาร์บอนพันธะที่เหลือนจะยึด

กับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราฟ (กราฟีน) มีความแข็งแรงมาก (มากกว่าเพชร) แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังกล่าวรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ แข็งแรงกว่าเพชรและกราฟ

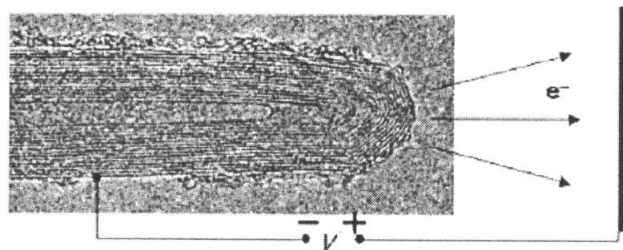
- ความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ค่าความยืดหยุ่นของคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่าสูงถึง 1 เทราปาสคาล (Tpa) หรือ 1000 กิกะปาสคาล (Gpa) วิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นนี้ทำได้หลายวิธีเช่น โดยอาศัย Thermal Vibration หรือใช้ Scanning Force Microscopy ไปงอคาร์บอนนาโนทิวป์โดยยึดปลายหนึ่งไว้แล้ววัดการสั่นสะเทือนในสนามไฟฟ้า และมีการใช้ Atomic Force Microscopy (AFM) เพื่อวัดตรงกลางแท่งนาโนที่วางอยู่บน Nanopores เพื่อวัดค่าความยืดหยุ่น ได้มีการ

ใช้ AFM จับคาร์บอนนาโนทิวป์ทั้งสองข้างแล้วดึงจนขาดเพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) (รูปที่ 2.8) ความแข็งแรงของคาร์บอนนาโนทิวป์ มีค่าอยู่ระหว่าง 11 ถึง 63 Gpa ขณะที่ค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้าอัลลอยมีเพียง 2 Gpa นอกจากนี้ SWNTs สามารถยืดตัวได้ถึง 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่จะขาดออกจากกัน



รูปที่ 2.8 ภาพการผ่านรูเพื่อวัดค่า  $\rho$  AFM เพื่อวัดค่า  $\rho$  - ความสททองแดง หนึ่งมัดเพียง  $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup> ปลดปล่อยอิเล็กคาร์บอนนาโนทิวป์ mm ใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว Molybdenum

ope ของ MWNT วางลายทั้งสองด้านของ การนำไฟฟ้าได้ดีกว่า ะที่ทองแดงได้สูงสุด | คือ สามารถในการ ู้ (รูปที่ 2.9) เมื่อ phors ที่วางไว้ห่าง 1



รูปที่ 2.9 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์

- ความสามารถในการนำความร้อน ค่าการนำความร้อนของคาร์บอนนาโนทิวปีนั้นสูงถึง 2000 W/m. K โดยมีบางรายงานกล่าวว่าคาร์บอนนาโนทิวปี มีค่าการนำความร้อนได้ถึง 6000 W/m. K เมื่อเปรียบเทียบกับเพชรที่มีค่าการนำไฟฟ้าเพียง 3320 W/m. K นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวปี ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2800 °C ภายใต้สูญญากาศ และ 750 °C ในสภาวะอากาศปกติ

นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวปียังมีคุณสมบัติเด่นอีกหลายประการด้วยกันนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น เช่น เป็นได้ทั้งตัวนำและกึ่งตัวนำ สามารถจับยึด โมเลกุลและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของทิวปี เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนของทิวปี โ

#### ตารางที่ 1 คุณสมบัติ

|                          |                                                                     |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| ขนาดพื้นที่              |                                                                     |
| ความหนา                  |                                                                     |
| กำลังต้านทาน             | มีน้ำหนักแค่ประมาณ                                                  |
| ความยืดหยุ่น             | มีเสถียร                                                            |
| การทนต่อการนำความร้อน    |                                                                     |
| การนำความร้อน            |                                                                     |
|                          | SWN1s: ค่าประมาณ 6,000 W/m. K (มากกว่าเพชรและกราฟไฟท์ 2,000 W/m. K) |
| ความสามารถในการนำไฟฟ้า   | $\sim 10^9$ A/cm <sup>2</sup> (ประมาณ 1,000 เท่าของทองแดง)          |
| การปลดปล่อยอิเล็กตรอน    | สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ที่ 1 – 3 V/um                           |
| การทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี | ตามปกติจะไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ                                          |



## 2.6 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

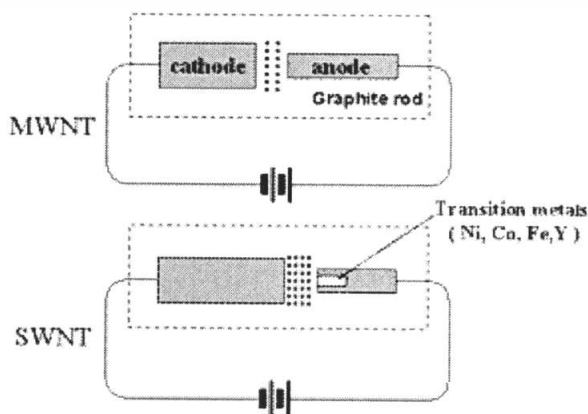
คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ต้องการ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น สามารถแบ่งออกได้ 3 วิธีหลักๆ คือ 1.วิธี Arc discharge 2.วิธี Laser ablation 3.วิธี Chemical vapor deposition (CVD) [2,3] แต่ละวิธีก็จะวิธีการและเทคนิค รวมถึงข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.6.1 วิธี

เทคนิค  
Fullerene โดยใช้  
ระหว่างขั้วคาร์บ  
แตกตัวกลายเป็น  
คาร์บอนนาโนทิว  
MWNTs มีขนาด  
ประมาณ 10 nm  
ศูนย์กลางประมา  
คาร์บอนนาโนทิว  
จากการสังเคราะห์  
สามารถแสดงได้



ใช้ในการสังเคราะห์  
ประมาณ 20 กิโลโวลต์ที่  
ทำให้คาร์บอนเกิดการ  
และก่อตัวใหม่เป็น  
ไอชนิดผนังหลายชั้น  
ศูนย์กลางด้านนอก  
Ts ที่มีขนาดเส้นผ่าน  
วิธีสังเคราะห์  
คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้  
องวิธี Arc discharge



รูปที่ 2.10 วิธี Arc discharge

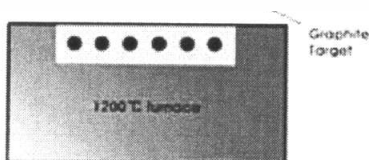
### 2.6.2 วิธี Laser ablation

เทคนิคนี้คิดค้นขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของ (Smalley) โดยใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงยิงกระทบแท่งคาร์บอนผสมโลหะในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 1200 ถึง 1500 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนและอะตอมคาร์บอนที่ร้อนขึ้น และใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) หรือไนโตรเจน ( $N_2$ ) ไปกวาดเอาท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่เกิดขึ้นออกจากเตาเผาแล้วนำไปหล่อเย็นที่ตัวกักเก็บที่ทำมาจากทองแดงด้านนอกเตาเผา โดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะมี 2 ชนิดคือ pulsed laser และ continuous laser สิ่ง

ที่แตกต่างกันระห  
มากแต่จะยิงเลเซ  
น้อยกว่า แต่จะยิง  
จะมีมากกว่า 70  
โนทิวป์ ที่ได้จะอ  
สังเคราะห์คาร์บอน  
แสดงได้ดังรูปที่ 2



ความเข้มของแสงสูง  
จะให้ความเข้มแสง  
เวปที่ได้จากวิธีการนี้  
เลาของคาร์บอนนา  
ยสูงจึงนิยมใช้ในการ  
ser ablation สามารถ



รูปที่ 2.11 วิธี Laser ablation

ที่กล่าวมาทั้งสองวิธี คือวิธี Laser ablation และวิธี Arc discharge นั้นเป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ใช้อุณหภูมิสูง โดยใช้การยิงแผ่นแกรไฟต์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1500 °C เพื่อให้เกิดการแตกตัวของอะตอมคาร์บอนและตัวเร่งปฏิกิริยา ความ

หนาแน่นของอะตอมทั้งสองชนิดที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวแปรที่สำคัญของการสร้างพันธะของคาร์บอนจนได้เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์

**2.6.3 วิธี Chemical vapor deposition (CVD)**

เทคนิคนี้จะเป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วยที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถนำมาใช้แยกย่อยตามความ

และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้ (CVD) นั้นยังสามารถน 5 วิธีใหญ่ คือ

**2.6.3.1**

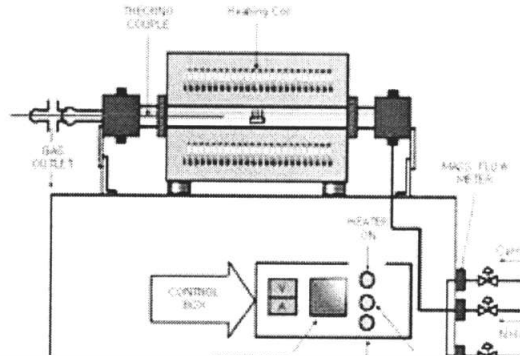
**วิธีนี้จะ**

นั้นจะทำการกักอุณหภูมิ 750°C เพื่อใช้เป็นแหล่งออกมาจากแหล่งขนาด nanometer ของคาร์บอนนา



มเร่งปฏิกิริยา หลังจากหรือ แอมโมเนีย ที่ปล่อยเข้ามาในระบบคอมคาร์บอนแตกตัวที่ถูกกักให้มีอนุภาคนการศึกษาคุณสมบัติงานศูนย์กลางของท่อโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

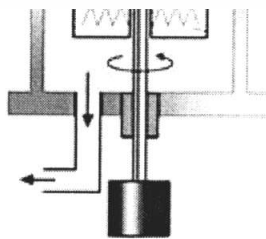
โดยความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 13 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 30-40 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ MWNTs เมื่อความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 2-3 นาโนเมตรจะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 1 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ SWNTs รูปที่ 2.12 แสดงระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition



2.6.3.2 วิธี  
วิธีนี้จะให้  
เข้ามาทำให้ไอ  
ปฏิกิริยากับโลหะ



ขใช้แรงดันความถี่สูง  
มาขึ้นและเข้าไปทำ  
VD



รูปที่ 2.13 ระบบของวิธี Plasma enhanced CVD

จากรูปที่ 2.13 แผ่นเพลทจะต่อกับขั้วไฟฟ้า ที่วางขนานกับฐานรอง และฐานรองจะต่ออยู่กับกราวด์ของขั้วไฟฟ้า เมื่อก๊าซเข้ามาตามท่อจากแผ่นเพลทตรงกันข้ามด้านบนกับฐานรอง ถูกแรงดันที่มี

ความถี่สูง เกิดเป็นพลาสมา ทำให้ไอของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัว และลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นจะก่อตัวบนอนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นโลหะจำพวก Fe , Ni , Co เคลือบบนชั้นซัลฟิดอนหรือชั้นไดออกไซด์ หรือบนแก้วซึ่งการสร้างชั้นเคลือบสามารถทำได้ด้วยวิธี Evaporation หรือวิธี Sputtering โดยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถยึดติดกับฐานรองได้หนาแน่นจะมีผลต่อ ขนาดของท่อ, อัตราการเจริญเติบโต, ความหนาของผนัง, รูปร่าง และ โครงสร้างข

ปฏิบัติสำหรับ  
ประสิทธิภาพผล  
อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า  
CO เป็นต้น การ  
ตั้งฉากกับฐานรอง  
ทิวป์ชนิด MWN  
สังเคราะห์คาร์บอน  
MHz) โดยใช้ก๊าซ

2.6.3.3 วิ

วิธีนี้จะเ

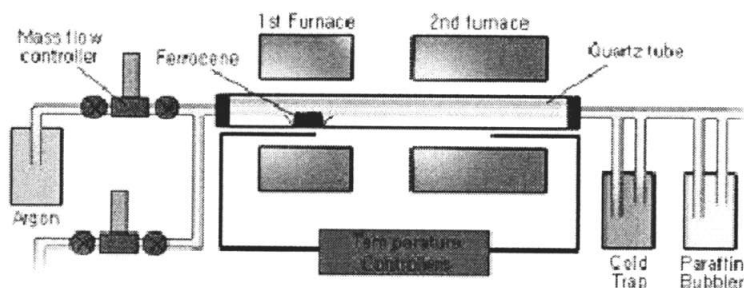
นำมาทำเป็นแหล่ง

โดยไม่ใช้ฐานรอง รูปที่ 2.14 แสดงระบบของวิธี Vapor phase growth



ทำเป็นโลหะตัวเร่ง  
อยู่ที่ 15 นาโนเมตร  
และสามารถทำได้ที่  
, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>,  
เอนนาโนทิวป์ให้ท่อ  
ได้ แต่คาร์บอนนาโน  
มีรายงานว่าสามารถ  
w-discharge (13.56

เป็นส่วนประกอบ  
รียาภายใน Chamber



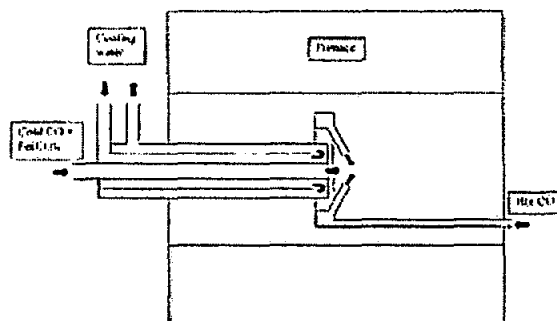
รูปที่ 2.14 ระบบของวิธี Vapor phase growth

จากรูปที่ 2.14 ในระบบของวิธี Vapor phase growth จะมีเตาความร้อนอยู่ 2 เตาครอบอยู่ระหว่าง Chamber โดยเตาความร้อนที่ 1 จะทำให้ก๊าซโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากลายเป็นไอและก่อตัวกันขึ้นและคงสภาพไว้ เมื่อมาถึงเตาความร้อนที่ 2 อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนเนื่องจากโคนความร้อนจะแพร่และซึมทรานลงบนอนุภาคของก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทั่วไปแล้วการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะอยู่ที่ประมาณ 2-4 นาโนเมตร สำหรับ SWNTs และ 70-100 นาโนเมตร สำหรับ MWNTs การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ได้ครั้งละ ตำแหน่งการเกิดของ  
คาร์บอนนาโน

2.6.3.4  
วิธีนี้จะ  
มาอย่างต่อเนื่อง  
โนทิวป์ขึ้น คาร์  
ประมาณ 0.7 น  
เล็กที่สุด โดยข  
ผลผลิตอยู่ที่ประ  
และเป็นอันตราย  
แสดงระบบของ



ล่งกำเนิดคาร์บอน เข้า  
ทำให้เกิดคาร์บอนนา  
โดยขนาดของท่ออยู่ที่  
ไว้ให้มีขนาดของท่อ  
โนเมตร ประสิทธิภาพ  
คาร์บอนนาโนทิวป์ได้  
ก๊าซอันตราย รูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process

### 2.6.3.5 วิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ที่มีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (Filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแทนการใช้เตาความร้อนโดยระบบของวิธี Hot-filament enhance Chemical vapor deposition แสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูป

จากรูป

ความร้อน (Filament) ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน

เตรียมไว้ จะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ ไอของ แอลกอฮอล์ หรือ มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) เป็นต้น ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้โลหะจำพวก เหล็ก (Fe) และ โคบอลต์ (Co) วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ไม่ยากและประหยัดค่าใช้จ่าย ส่วนคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้นั้น จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิของฐานรอง, ชนิดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหลของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เป็นต้น

» deposition

ไฟฟ้าให้กับขดลวดเป็นส่วนประกอบ ความร้อนจะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่

## 2.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

### 2.7.1 หลักการทำงานทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถให้กำลังขยาย (Magnification) และ แจกแจงรายละเอียด (resolution) ได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา โดยในปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงถึง 500,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสงในการสะท้อนวัตถุ เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้มีประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูง กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาจะแจกแจงรายละเอียดได้

0.1 นาโนเมตร และผ่านออกมา ขดลวดแม่เหล็กไปยังด้านล่างของ ผ่านหรือกระจายหน้าทีในการขยายจอร์บภาพ เช่น หน้าทีเสมือนเลน ภาพลงสู่จอคอมพิวเตอร์



จะมีประสิทธิภาพถึงสูญญากาศ จะถูกเร่ง n) ซึ่งประกอบด้วยทำให้อิเล็กตรอนผ่านรวบรวมอิเล็กตรอนให้แม่เหล็กชุดที่สามที่ทำให้เกิดการโฟกัสภาพไปหลักชุดสุดท้ายจะทำให้การแปลงสัญญาณ

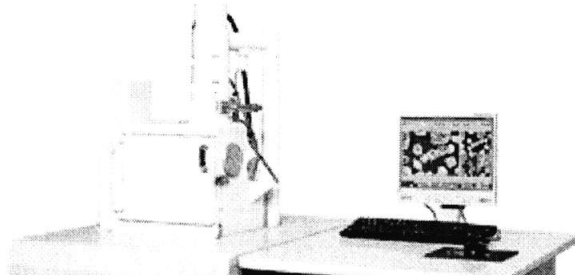
### 2.7.2 ประเภท

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopes; TEMs) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes; SEMs)

### 2.7.3 TEMs

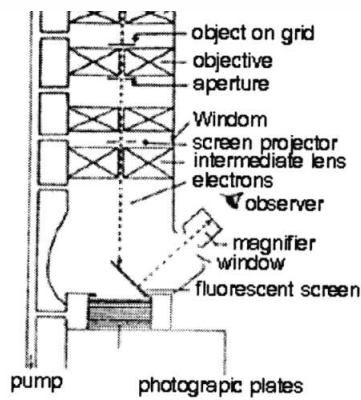
เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบางซึ่งเตรียมขึ้น โดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอิเล็กตรอนผ่านได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์





2.8 ระบบการทำงาน

2.8.1 ระบบ



รูปที่ 2.19 แผนภาพการทำงานของ TEMs

การทำงานของ TEMs จะประกอบด้วยระบบที่สำคัญ 4 ระบบคือ

**ระบบสุญญากาศ (Vacuum system)** ประกอบด้วยเครื่องสูดอากาศ 2 แบบ ได้แก่ เครื่องสูดอากาศแบบ mechanical pump และเครื่องสูดอากาศที่ใช้ น้ำมันแบบ diffusion pump หรืออาจเป็นแบบ ion getter pump ซึ่งจะทำงานร่วมกัน โดยเริ่มจากการทำให้ภายในคอลัมน์เป็นสุญญากาศที่มีความดันประมาณ  $10^{-3}$ - $10^{-8}$  torr และต้องกำจัดโมเลกุลของก๊าซต่างๆ ออกให้หมด เนื่องจากโมเลกุลเหล่านี้จะเกิดการดูดกลืนอิเล็กตรอนและทำให้ลำอิเล็กตรอนเกิดการกระเจิง ประจุอิเล็กตรอนกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ภาพที่ได้ไม่ค่อยคมชัด นอกจากนี้ โมเลกุลของก๊าซอาจเกิดปฏิกิริยาการแผ่รังสี (ionization) ซึ่ง

อาจจะไปรวมตัว  
อาจไปจับกับตัว

ระบบแ  
อิเล็กตรอนจะเ  
อิเล็กตรอนที่เกิด  
ของอิเล็กตรอน  
ขึ้น ค่าความยาว  
ปรับเปลี่ยนความ  
มากกว่าหนึ่งซุน  
มากขึ้น และยังเ

ระบบค

เรียกว่า Aperture เทอกรมกมุคตอเททอวหงกมพหุทกพสทกมมูรต รวมทงมองกนการกระจายตัวของ อิเล็กตรอนซึ่งจะส่งผลต่อความคมชัดของภาพ สำหรับขนาดของช่อง aperture นี้ ยังมีขนาดเล็กจะยังทำให้การแจกแจงรายละเอียดของภาพดีขึ้น แต่ความคมชัดจะลดลง

**ระบบภาพ (Imaging system)** ประกอบด้วยเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า 3 ตัว คือ objective lens, intermediate lens และ projector lens เมื่อทำการฉายลำอิเล็กตรอนบนตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะผ่านตัวอย่างไปยัง objective lens ที่อยู่ใต้ช่องใส่ตัวอย่างและคอนเดนเซอร์เลนส์ objective lens จะทำหน้าที่ขยายภาพ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะผ่านไปยัง intermediate lens เพื่อทำการขยายภาพเพิ่มขึ้นอีก จากนั้นผ่านไปยัง projector lens ที่ทำหน้าที่นำภาพที่ขยายไปปรากฏบนจอซึ่งเราสามารถมองเห็นได้จากหน้าต่างสำหรับมองภาพ (viewing window)



โมเลกุลของก๊าซ  
และขาดในที่สุด หรือ  
อวิเคราะห์ต่อไปได้  
นเซอร์เลนส์ โดยป็น  
น้ำที่รวบรวมประจุ  
อย่าง ค่าความยาวคลื่น  
ะแสไฟฟ้าแรงสูงมาก  
คดีขึ้น ดังนั้นการ  
เอนเดนเซอร์อาจมีได้  
ภาพที่ได้มีความสว่าง  
กตรอนด้วย  
กลมๆ ขนาดเล็กที่

ระบบบันทึกภาพ (Photographic system) ประกอบด้วยชัตเตอร์และเครื่องวัดแสง โดยระบบนี้จะอยู่ใต้ Projectors lens ชัตเตอร์จะทำหน้าที่ปิดหรือเปิดให้ลำแสงอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนแผ่นรับภาพเรืองแสง

## 2.8.2 ระบบการทำงานของ SEMs

จากอิเล็กตรอนมาเป็นภาพ  
ภาพนี้แสดงให้เห็นว่า



กล้องจุล

บส่องผ่าน แต่มีสิ่ง

ที่แตกต่างคือระบบภาพและแสง ผด เทยม เพท เตจะถูกส่งสัญญาณเพอ เบขยาย แล้วจึงแปลภาพบนจอ CRT (Cathode Ray Tube) คอลัมน์ของ SEMs จะประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์ เช่นเดียวกับ TEM ลำอิเล็กตรอนที่ผ่าน objective lens ไปตกลงบนตัวอย่างนั้นสามารถที่จะบังคับทิศทางเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างได้ด้วย และมี scanning generator อยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวสุดท้ายกับ objective lens ลำอิเล็กตรอนนี้เป็น Primary electron โดยจะถูกโฟกัสลงบนตัวอย่างทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวอย่างส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เรียกว่า Secondary electron และถูกรวบรวมโดย electron collector ซึ่งจะถูกนำไปขยายและแปลสัญญาณให้เกิดเป็นภาพบนจอ CRT ซึ่งสามารถดูได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกไว้บนฟิล์ม ความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับพื้นผิวของตัวอย่าง ถ้าพื้นผิวของตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่นูนขึ้น นอกจากนี้ที่

Objective lens จะมีช่อง Aperture เช่นกันเพื่อช่วยเพิ่มความลึกของภาพ SEMs นี้อาจติดตั้งและต่อเติม อุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เช่น Backscattered electron detector อิเล็กตรอนที่เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้จะช่วยในการบอกรายละเอียดของรูปร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนที่ลึกเกินกว่าที่ Secondary electron ทำการตรวจสอบได้ หรือทำการติดตั้งระบบ EDS เพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุ หรือติดตั้ง Transmitted electron detector เพื่อศึกษาลักษณะภายในของตัวอย่างที่ทำให้บาง เป็นต้น

## 2.9 วิธีการการใช้

สิ่งที่เส  
อิเล็กตรอน เพื่อ

1. ปุ  
อุปกรณ์เสริมอย  
นำไปวิเคราะห์

2. ตรวจ
3. ทำบ้ำ
4. ตรวจ
5. มีการ
6. ทำกา



เจดทรสน์

รสน์อิเล็กตรอนและ  
และภาพหรือสิ่งที่จะ

|กรรายการ  
นอยู่เสมอ

## 2.10 การนำคาร์

หลังจากการค้นพบในปี ค.ศ. 1991 เป็นต้นมา นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลกต่างก็ศึกษาถึงคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ ตลอดจนถึงวิธีการผลิต วิธีการนำไปใช้และการประยุกต์อย่างมากมาย ทั้งนี้ก็เนื่องมาจาก คุณสมบัติเด่นหลายประการด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น เป็นได้ทั้งตัวนำและกึ่งตัวนำ มีความแข็งแรงสูง เบา และมีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถจับยึดโมเลกุลและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆในสาขาของนาโนเทคโนโลยี ดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.10.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต เพราะด้วยคุณสมบัติที่มันมีน้ำหนักเบา ราคาถูก และมี ค่าความยืดหยุ่นสูงซึ่งจะไม่แตกหักง่าย อีกทั้งยังสามารถหด โคงงอได้เหมือนสปริง เมื่อออกแรงกดแล้วคืนรูปสู่สภาพ เดิมได้ ทำให้ได้วัสดุคอมโพสิต ที่มีคุณสมบัติพิเศษคือ จะแข็งแรงกว่าพวกไฟเบอร์ทั้งหลายเท่าที่เคยมีมา จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่นเป็นส่วนประกอบใน รถยนต์ เครื่องบิน สิ่งปลูกสร้างต่างๆ หรือแม้กระทั่งใช้ทำ เสื้อเกราะกันกระสุน เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถเอาไปใช้ ทำเป็นหลอดทดลองขนาดนาโนเพื่อเก็บของเหลวบางอย่าง หรือทำ

NASA  
ภาพถ่ายทั้งความ  
วัสดุประกอบเค  
แข็งแกร่ง (reinfi  
ฟิล์มบาง ไฟเบอร์



รถเพิ่มคุณสมบัติทาง  
เกมสำคัญมากสำหรับ  
สามารถช่วยเสริมความ  
ด้หลายรูปแบบได้แก่

2.10.2 1

เนื่องจาก  
Respect-ratio สู  
และทำให้คาร์บอน  
ประยุกต์ใช้เป็น

เขววน้อยมากๆ (ค่า  
ทิวปี มีเสถียรภาพที่ดี  
ค่าจึงเหมาะสมที่จะ  
Saito) สามารถ

ประดิษฐ์จอภาพ... รับบนนาโนทิวปีแทนโลหะในส่วนที่เป็น ขั้วในตัวหลอดสำหรับจ่ายลำอิเล็กตรอน ด้วยคุณสมบัติที่ เหนือกว่าคือมันให้ความสม่ำเสมอ ให้ปริมาณที่เพียงพอ และมีอายุการใช้งานของการจ่ายอิเล็กตรอนนานกว่า นอกจากนั้น แล้ว ยังไม่จำเป็นต้องใช้ในสุญญากาศและยังเป็นการประหยัด พลังงาน เนื่องจากมันสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่จำเป็นต้องเผาไส้หลอดให้แดง อย่างกรณีการใช้โลหะ ซึ่งตัวอย่างนี้อาจจะ กำลังพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการค้าชิ้นแรกของญี่ปุ่นที่ได้มีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากคาร์บอนนาโนทิวป์

### 2.10.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในระดับหนึ่งไมโครเมตร ถ้าก้าวต่อไปเป็นนาโนอิเล็กทรอนิกส์นั้น ก็ต้องลดขนาด Component ลง 10 ถึง 1000 เท่าจากเดิม ดังนั้นกระบวนการผลิตของอิเล็กทรอนิกส์ component ขนาดนาโนทั้งทรานซิสเตอร์ ไดโอด รีเลย์ และลอจิกเกตต้องเปลี่ยนใหม่ เช่น ทรานซิสเตอร์จากเดิมระดับไมครอนที่เป็นซิลิกอนเซมิคอนดักเตอร์ ต้องหันมาใช้โครงสร้างโมเลกุล อินทรีย์ (organic molecules) หรืออนินทรีย์ (Inorganic) ในระดับนาโน มีการใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ เป็นช่อง (Chan-

nel) (FET) (รูปที่ 2.1) จากซิลิกอน FET ด้วยกำลังไฟฟ้า ด้วย CNTs-FET Type เกิดขึ้น



field-effect transistor ปกติ แต่สิ่งที่แตกต่างมากกว่าถึง 1 ล้านเท่า ึ่งการสร้างลอจิกเกต ได้ N-Type หรือ P-

รูปที่ 2.21 ลักษณะ Single-molecule Transistor

ถึงแม้จะสามารถสร้างอุปกรณ์เหล่านั้นได้ในระดับนาโนแต่สิ่งที่ท้าทายกว่าคือการเชื่อมต่อ (Wire) อุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกัน เพื่อจะปฏิบัติการเชิงคณิตศาสตร์หรือลอจิกได้ จึงเกิดแนวคิดที่ต้องทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ เป็นทั้งตัวเชื่อมและเป็นอุปกรณ์ในทีเดียว อย่างไรก็ตามสิ่งนี้ยังไม่รวมถึงในระดับโครงสร้างของระบบวงจรเชื่อมต่อกอมพิวเตอร์หรือระบบการทำงานอิสระอื่นๆ

### 2.10.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์

การที่คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถทำให้อยู่ในรูปของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และในขณะเดียวกันสารกึ่งตัวนำตอบสนองต่อสารพวก อัลคาไลน์ ฮาโลเจน และ ก๊าซต่างๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อเป็น Semiconducting CNTs จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ดีขึ้นอย่างมาก ทำให้เซนเซอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ นี้มีความไวมากขึ้น ซึ่งก็มีการพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัด Cytochrome , Methane , Krypton และ โมเลกุลของ Alkylamine แบบ

ที่ 2.18



รูปที่ 2.22 เซ

แต่การประยุกต์ใ  
ความเข้มข้นต่ำใ  
ก๊าซที่ไหลผ่าน ใ

สารโมเลกุลอื่น

วแยกชนิดของก๊าซที่  
นหภูมิ และความเร็ว  
ซึ่งเซนเซอร์ให้ดีขึ้น

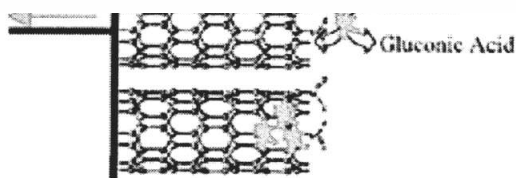
สามารถทำได้ด้วยเหตุที่คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถ functionalize (เช่น หมู่ -OH และ -COOH เป็นต้น) ได้ ทำให้สามารถตรึงด้วยสารทางชีวภาพได้แก่ โปรตีน เอนไซม์ หรือ ดีเอ็นเอ จึงสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับงานด้านไบโอเซนเซอร์ เพื่อประโยชน์ในการวินิจฉัยทางการแพทย์ หรือใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารต่างๆ ได้ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ มีพื้นผิวสำหรับการตรึงสารทางชีวภาพสูงทำให้สามารถเพิ่มขนาดสัญญาณได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีของไบโอเซนเซอร์เดิม การตรึงสารทางชีวภาพบนคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นมีหลายวิธีได้แก่ การทำ simple adsorption ที่ช่องของปลายเปิดหรือผนังด้านนอกของคาร์บอนนาโนทิวป์ (วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกแต่มีข้อเสียคือ มีปริมาณสารทางชีวภาพที่ติดอยู่น้อย (การทำ hydrophobic หรือ Electrostatic interaction ระหว่างสารชีว

โมเลกุลกับการทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์หรืออาจ Functionalize ด้านข้างของคาร์บอนนาโนทิวป์โดยการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ ได้มีการพัฒนาใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ สร้างเป็นหัววัดไบโอเซนเซอร์สำหรับตรวจวัด น้ำตาลกลูโคส ดีเอ็นเอ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และ NADH เป็นต้น การตรึงสารทางชีวภาพที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นต้องเปิดปลายหรือเอาส่วนของครึ่งทรงกลม C<sub>60</sub> ออกโดยสองวิธีหลัก ๆ คือ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับคาร์บอนนาโนทิวป์ ด้วยกรด (Acid oxidation) วิธีนี้ทำให้เกิดหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดและสามารถตรึงเอนไซม์ลงบนคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ ดังรูปที่ 2

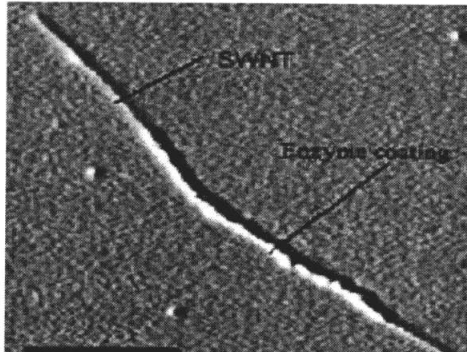
ร้อนสูง 600 °C 1 แรกเพราะไม่สามของเอนไซม์ด้วยท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์และมีหมู่ให้เกิดหมู่ Carb คักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 1 สารชีวภาพจะสา



oxidation) ด้วยความ นปริมาณน้อยกว่าวิธี ความคงตัว)stability) ของเอนไซม์ภายใน ปลายเปิดของคาร์บอนนา นอนาโนทิวป์เพื่อทำ เองเคมีไฟฟ้า โดยให้ ันหมู่เอมีนที่มีอยู่ใน



รูปที่ 2.23 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจับกับหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์



รูปที่ 2.10

2.10.5 ใยคาร์บอน

แนวความคิดในการใช้โครงสร้างของคาร์บอนที่มีพื้นผิวที่เรียบสำหรับการเก็บ  $H_2$  (ซึ่งแวกต์ลุ่ม) นักวิทยาศาสตร์พบว่าการดูดซับ  $H_2$  เพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยคาร์บอนลดลง ซึ่งเป็นที่น่าพอใจนำไปใช้ใน Fuel Cell



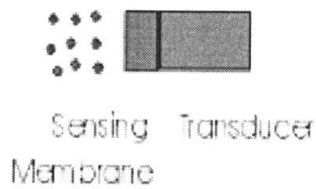
รูปที่ 2.11 SWNTs

เนื่องจากลักษณะระดับนาโนเมตรและพื้นที่ผิวทั้งหมดที่นำมาใช้ ทำให้คาร์บอนนาโนทิวเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับ  $H_2$  ได้มากถึง 6.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งยังสามารถนำไปใช้ใน Fuel Cell

2.11 เซนเซอร์ก๊าซ

2.11.1 ส่วนประกอบของ เซนเซอร์ก๊าซ

เซนเซอร์ก๊าซ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.11 คือ



รูปที่ 2.25 แสดงส่วนประกอบของเซนเซอร์ก๊าซ

1.Sensing Membrane เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จับหรือทำปฏิกิริยาเคมีกับก๊าซที่ต้องการวัด

2 Transducer ทำหน้าที่วัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ sensing membrane เมื่อ membrane จับหรือทำปฏิกิริยากับก๊าซ ( sensing Membrane กับ Transducer อาจจะเป็นตัวเดียวกันก็ได้)

2.11.2 คุณสมบัติของเซนเซอร์ก๊าซ

เราสามารถแบ่งคุณสมบัติของก๊าซเซนเซอร์ ออกเป็น 5 อย่างที่สำคัญคือ

1. ความไวการตอบสนอง ( Response )
2. ความ
3. ความ
4. ความ
5. พิสัย

1. ความ

ในทันทีเมื่อก๊าซ  
อย่างขึงเมื่อก๊าซ  
ก่อนที่จะได้รับอิ

2. ความ

ของปริมาณก๊าซ  
ปริมาณน้อย ๆ  
น้อย ๆ ก็จะทำให้  
เฉพาะกรณีก๊าซ



บสนองอย่างรวดเร็ว  
สำคัญมาก โดยเฉพาะ  
ียงและแก้ไขได้ทันที  
ไหลออกมา  
จะบอกความแตกต่าง  
ามแตกต่างของ ก๊าซ  
ณที่มี ก๊าซแตกต่างกัน  
สมบัติชนิดนี้จะมีสำคัญ  
นั้น

3. ความจำเพาะ ( Selectivity ) คือ ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างระหว่างก๊าซที่เราต้องการวัดกับก๊าซที่เราไม่ต้องการ วัดได้ กล่าวคือ เซนเซอร์ก๊าซ ชนิดหนึ่ง ๆ ควรมีความสามารถในการตอบสนองต่อก๊าซชนิดหนึ่งชนิดเดียวที่เราต้องการวัด และไม่ควรถ้าจะตอบสนองต่อก๊าซชนิดอื่น เพราะจะทำให้สัญญาณรบกวนการวัดได้ ในทางปฏิบัติเราต้องพยายามหาวัสดุที่ เหมาะสมที่ไวเฉพาะต่อก๊าซที่เราต้องการวัดมาใช้ทำ Sensing membrane หรืออาจจะเจือสารบางตัวลงไปในวัสดุที่ใช้ทำ membrane เพื่อให้ membrane มีความไวในการตอบสนองก๊าซที่เราต้องการวัดขึ้นมาได้ หรือเชื่อมต่อการตอบสนองก๊าซที่เราไม่ต้องการที่จะวัด Selectivity เป็นคุณสมบัติที่สำคัญมาก ซึ่งเซนเซอร์ก๊าซที่ดีต้องมีค่า Selectivity สูง

4. ความเสถียรภาพ ( Stability ) คือ ผลในการวัดคงที่ไม่เสื่อมสภาพเร็วในการใช้งาน เพื่อให้เซ็นเซอร์ สามารถใช้วัดได้อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไป Sensing Membrane ทำจาก Polymer มักมีปัญหาในการใช้งาน

5. พิสัยการวัด ( Dynamic Range ) คือ ช่วงกว้างของการวัดของ Sensor ซึ่ง Sensor บางตัวสามารถวัดก๊าซปริมาณตั้งแต่ 100-10000 ppm แต่บางตัวใช้วัดในระยะ 10-50 ppm

### 2.11.3 ชนิดหลัก ๆ ของเซนเซอร์ก๊าซ

แบ่งเซน

1. Gas
2. Gas
3. Sel

1. Gas Adsorption  
มีโมเลกุลของก๊าซ  
ดูดซับโมเลกุลของ  
● surface  
● เกิดการ  
นซ์ของ

2. Gas Reaction  
ต้องการวัดเกิดขึ้น  
เมื่อเซรามิกสัมผัส



เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อ  
ที่ใช้ทำ เซนเซอร์ ถูก

ทำให้ความถี่รีโซแนน

งที่เกิดขึ้น เมื่อก๊าซที่  
ตัวจะตะลึงสตั้ผสมอยู่

3. Selective Membrane Gas Sensor ซึ่งทำงานโดยใช้ประโยชน์ของ Sensing membrane ที่ยอมให้ก๊าซบางชนิดเท่านั้นผ่านเข้าไปได้ เซนเซอร์ก๊าซ ชนิดนี้ที่ใช้วัด Oxygen จะมีแผ่น membrane แบบ solid electrolyte ที่ทำมาจาก  $Y_2O_3$  dope  $ZrO_2$  ส่วนที่ใช้วัด  $SO_2$  จะมีแผ่น membrane แบบ Solid electrolyte ที่ทำมาจาก  $K_2 SO_4$  โดยเมื่อมีก๊าซข้างต้นซึมผ่านเข้าไปก็จะทำให้วัสดุดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป เราก็วัดปริมาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหากเปลี่ยนแปลงมากก็แสดงว่ามีก๊าซดังกล่าวมาก

## 2.12 การตรวจวัดปริมาณสาร

การตรวจวัดปริมาณสารมีจุดมุ่งหมายสำคัญ เพื่อการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หรือตัวแปรต่างๆ ทั้งในระหว่างกระบวนการผลิตและเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ รูปแบบและวิธีการวัดมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นการวัดตัวแปรทางกายภาพและทางเคมี ตัวอย่างการวัดทางกายภาพ เช่น การวัดปริมาตร, มวล, ความหนาแน่น, อัตราการไหล, ความดันและอุณหภูมิ เป็นต้น ในการวัดตัวแปรทางเคมีในปัจจุบัน มีเครื่องมือต่างๆ เช่น ก๊าซและลิควิด โครมาโตกราฟี (Gas-Liquid chromatography) พีเอชมิเตอร์ (pH meter) อีออนซีเลกทีฟอิเล็กโทรด (Ion-selective electrode) และสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectro photo

โดยตรงหรือมีการใช้

เช่น TGS sense เพื่อวิเคราะห์ เครื่องมือทางใด เรียกว่า เคมีเซน

## 2.13 ความเป็น

หลายปี จำนวนมาก เช่น electrode เป็นต้น

มากกว่าเพราะต้นทุนการผลิตมีราคาสูงและยังสามารสร้างเป็นวงจรรวมได้อีกด้วย

ในปี ค.ศ. 1970 มีอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ 2 ชนิด ที่มีความโดดเด่นมากก็คือ ISFET ที่สร้างโดย Piet Bergveld หัวหน้ากลุ่มไบโอเซนเซอร์ (Biosensor) ที่ Twente University ประเทศเนเธอร์แลนด์ และ Palladium gate MOSFET ซึ่งสร้างในปี 1975 โดย Lund strom หัวหน้ากลุ่ม Chemical sensor ที่ Linkoping University ประเทศสวีเดน ISFET เป็นรูปแบบของมอดเฟสที่ไม่มี gate contact เมื่อ ISFET ถูกจุ่มลงในอิเล็กโทรไลต์ จะเกิดการกระแสดรอน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นไอออนของ  $H_2$ , Na หรือ K ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์



เปร หรือสารตัวอย่าง

เนื่อง  
 เวลาในการวิเคราะห์  
 กไซด์ ( $SnO_2$ ) เป็นตัว  
 ลทางเคมีไปติดเข้ากับ  
 เครื่องมือวัดแบบนี้

ฐานรองซิลิกอน เป็น  
 อร์ และ ion-selective  
 วย่อมเป็นที่น่าสนใจ

Pd gate MOSFET เป็นมอสเฟต โดยที่ส่วนของเกตจะถูกเปลี่ยนจากอลูมิเนียม (Al) เป็นพลาเดียม (Pd) แทน ซึ่งพลาเดียมเป็น Highly catalytical active metal ที่สามารถแยกโมเลกุลของไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ออกเป็นไฮโดรเจนอะตอม (H<sup>+</sup>) ซึ่งอะตอมเหล่านี้จะแพร่เข้าไปยังรอยต่อ Pd-SiO<sub>2</sub> ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสทรานในมอสเฟต

ปัจจุบันนี้ มีความต้องการ การพัฒนาการใช้อุปกรณ์ตรวจจับทางเคมีกันมาก เพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ทางเคมีภายนอกห้องปฏิบัติการ Zemel ได้รวบรวมความต้องการที่จะได้อุปกรณ์ตรวจจับทางเคมีในอุดมคติดังนี้ ราคาไม่แพง ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็ก output สามารถแสดงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

มีอัตราส่วน sig ความน่าเชื่อถือ ต่างๆแน่นอนก่อสร้างก๊าซเซนเซอร์

เกินกว่าต่อครั้งหลายๆ มีแรงต่ออุณหภูมิและรังสีที่แสดงให้เห็นว่าการเก่าแล้วมากที่สุด

2.14 นิยามของ เซนเซอร์

ออกมาแทนการกลั่น การลิ้มรส ในปริมาณที่มากกว่าที่เท่ากับการตรวจจับไมโคร



ที่สามารถแสดงผลการได้ขึ้นสัมผัส คมบ่งชี้เหล่านั้นโดยตรงวงอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ เซอร์มีการพัฒนาเป็นการทำตัวตรวจจับ ที่

สามารถตอบสนองต่อความถี่สูงและมีความไวในการตอบสนองได้ดี CCD camera สามารถประสานภาพการมองเห็นได้สูงมากหรือน้อยแม้แต่การทำไมโครโฟนที่มีความไวในการตอบสนองเสียงได้ดี ซึ่งสิ่งเหล่านี้ยังเป็นขั้นเริ่มต้น

สัญญาณดิจิทัลในทางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวตรวจจับทางเคมีซึ่งจะสามารถรู้สและได้กลิ่นของสิ่งไม่มีชีวิต ถึงแม้แต่ในระบบชีววิทยายังมีระบบภูมิคุ้มกัน และการวัดปริมาณกลุโคส การวัดความเข้มข้นสารเคมีและการควบคุมปริมาณที่ต้องใช้ความถูกต้องสูง เพื่อที่จะแทนที่หรือเป็นตัววัดระบบทางชีววิทยาเหล่านี้จนในที่สุดจะได้ตรวจจับที่มีการตอบสนองและการแยกแยะที่ดี วัสดุตรวจจับทางเคมีในเชิงพาณิชย์จะต้องสามารถปรับค่าเริ่มต้นแต่ยังไม่สามารถแยกแยะและมีความไวในการตอบสนองได้ดีพอ อย่างไรก็ตามถ้ามีสารชีววิทยาที่สามารถเป็นตัวตรวจจับทางเคมีและทางชีววิทยาที่

สามารถแยกแยะสารและการตอบสนองที่ดีที่เหมือนระบบชีววิทยานั้นได้รับการยอมรับในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการวิจัยทางนี้อย่างกว้างขวางและจนกระทั่งในปัจจุบันได้มีเซนเซอร์ออกสู่ตลาดหลายชนิด

ตัวอย่างเซนเซอร์ที่ได้รับการแพร่หลายมากที่สุดก็คือ กลูโคส เซนเซอร์ ในปัจจุบันเซนเซอร์ชนิดสามารถสร้างได้ง่าย มีราคาถูก จนสามารถใช้แล้วทิ้งได้ เพื่อให้การตอบสนองที่ดีและมีความถูกต้อง และยังมีการแสดงผลเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อง่ายต่อการใช้

ความหมายของคำว่า ทรานสดิวเซอร์ (Transducers) มีรากศัพท์มาจาก ภาษาลาติน จากคำว่า “transduco-tradi เปลี่ยนแปลงให้เปลี่ยนไปก็ได้ ทรานสดิวเซอร์รูป โดยพลังงานและทางการแพร่

ปรกรณ์จะต้องเป็นการ โดยที่รูปแบบอาจจะ ใดๆ ในสิ่งแวดล้อม หนึ่งไปเป็นพลังงานอีก ามร้อน, ทางแม่เหล็ก



รูปที่ 2.26 การจัดกลุ่มของทรานสดิวเซอร์ (Transducers)

เซนเซอร์ (Sensor) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงสัญญาณในรูปแบบต่างๆ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ส่วนแอกชูเอเตอร์ (Actuators) จะเป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงจากสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณในรูปแบบอื่น โดยทั่วไปจะเป็นสัญญาณในรูปกลศาสตร์ ตัวอย่างของเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์วัดความดัน pH เซนเซอร์ และโฟโตทรานซิสเตอร์ ตัวอย่างแอกชูเอเตอร์ (Actuators) เช่น โซลินอยด์ อุปกรณ์เพียร์โซอิเล็กทริก และเลเซอร์ไดโอด ส่วนในเคมีคอลแอกชูเอเตอร์ (Actuators) เช่น โซลิ

นอยซ์ อุปกรณ์ เพียร์โซอิเล็กทริก และเลเซอร์ไดโอด ส่วนในเคมีคอลแอกชูเอเตอร์ (Chemical Actuators) เมื่อป้อนศักดาทางไฟฟ้าจะทำให้เกิด ไฮโดรเจน และออกซิเจน จอภาพจะเป็น ทรานสคิวดเซอร์ชนิดพิเศษที่แปลงจากสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นรูปแบบที่มองเห็นเช่น จอภาพ CRT, จอ LCD array ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์แสดงผลที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป

โดยทั่วไประบบควบคุมการทำงานของทรานสคิวดเซอร์ในทางอิเล็กทรอนิกส์จะประกอบด้วย เซนเซอร์ที่อยู่ในส่วนอินพุตต่อไปยังสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าจะผ่านการขยาย สัญญาณ โดยแอกชูเอเตอร์เพื่อแสดงบนหน้าจอ

2.15 ทินออกไซด์

สารกึ่งตัวนำ เริ่มพัฒนาเพื่อใช้ ชนิดอื่นด้วย เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ความสำคัญ ใช้สร้างเซนเซอร์ จากท่อไอเสียรถ การเริ่ม การยอมรับเท่าที่ ตรวจสอบก๊าซที่อุ



โดยเซนเซอร์ชนิดนี้ ใช้ในการตรวจจับก๊าซ 1) แอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>)

โมดูลสารกึ่งตัวนำที่สามารถตรวจจับก๊าซ

ทินออกไซด์ไม่ได้รับ เช่น ความไว ในการ ซึ่งปัญหาเหล่านี้ จะ

ส่งผลต่อความไวของเซนเซอร์ ความไวของเซนเซอร์ของสารกึ่งตัวนำมีความถูกต้องของการ วัดในอุตสาหกรรมและความปลอดภัยต่อร่างกายของมนุษย์ ดังนั้น จึงมีการพัฒนาทินไดออกไซด์ใน เงื่อนไขต่างและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการจนทำให้ทินออกไซด์มีคุณสมบัติที่เหมาะสม และมีความไวในการตรวจจับก๊าซได้เร็ว ซึ่งจะแสดงว่า ทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์สามารถตรวจจับก๊าซที่มี ปริมาณของสารที่ความเข้มข้นต่ำได้

ตัวตรวจจับก๊าซแบบสารกึ่งตัวนำ ( Semiconductor gas sensor ) คือ เซ็นเซอร์ก๊าซที่อาศัย ประโยชน์จากลักษณะสมบัติของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือเมื่อมีโมเลกุลของก๊าซเข้ามาดูดเกาะ (adsorb) ที่ ผิวของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับสารกึ่งตัวนำนั้นขึ้น

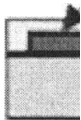
ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น โดยการวัดการนำ จะทำให้เราทราบความเข้มข้นของก๊าซได้

ลักษณะการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ 1) การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่ผิว และ 2) การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าในบัลค์ ( Bulk ) แบบแรกนั้นส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็น ฟิล์มบางหรือฟิล์มหนา ส่วนแบบหลังนั้นจะมีความหนามาก โดยมีลักษณะเป็นก้อนเซรามิก ( sintered block ) ลักษณะการตอบสนองของก๊าซเช่นเซอร์ ต่อดัชนีของก๊าซนั้นจะขึ้นกับชนิดขององค์ประกอบของ เซนเซอร์แบบนี้ ก๊าซ  $\text{Nox}$  ,  $\text{Co}$  ,  $\text{F}$  ได้ดังรูปที่ 2.27

เองวัสดุ ที่ใช้ทำก๊าซ เซนเซอร์สำหรับวัด สารกึ่งตัวนำ แสดง



3 nO2



ectrade



## 2.16 ปฏิบัติการของการดูดซับก๊าซที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ

### 2.16.1 สถานะพื้นผิว (Surface state) ในการตรวจจับทางเคมี

โลหะเซนเซอร์ส่วนใหญ่จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เราจะเน้นถึงสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวสัมผัสของสาร สารกึ่งตัวนำชนิดพีจะไม่ค่อยเสถียรเท่าชนิดเอ็นเพราะเมื่อเกิดปฏิกิริยากับก๊าซรอบๆ ทำให้คุณสมบัติของสารเปลี่ยนไปอย่างถาวร

ที่ผิวสัมผัสของเนื้อสาร อะตอมจะมีพันธะขาดไป 1 หรือ 2 อะตอม ทำให้เกิดเป็นพันธะอย่างหลวมๆ ประจุบวกของ  $\text{Sn}^+$  ไอออนจะมีประจุลบ  $\text{O}^-$  ไอออนล้อมรอบอยู่ เมื่อมีปริมาณไอออนลบรอบๆ ตัวมันน้อย ไอออนบวกจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน ดังนั้นการจัดเรียงของแถบนำใน

กรณีนี้ จะมีพลังงานต่ำกว่าแถบความนำจริงและสามารถดึงอิเล็กตรอนจากเนื้อสารได้ อีกทั้งยังสามารถสร้างพันธะกับค่าที่มีอนุภาค  $\text{OH}^-$  ซึ่งมีอิเล็กตรอนอิสระมาใช้ในการเกิดพันธะ ทำให้เหมือนกับว่าที่ผิวมีเฉพาะไอออนลบ มีผลให้แถบพลังงานของประจุลบมีค่าสูงกว่าแถบวาเลนซ์ที่เป็นจริง ไอออนเหล่านี้มันสามารถ ดึงโฮล หรือให้อิเล็กตรอนแก่เนื้อสาร แต่ในกรณีโมเลกุลของกรดที่มีอนุภาค  $\text{H}^+$  อิเล็กตรอนอิสระจะไม่สามารถอยู่ในชั้นสถานะผิวได้ ลักษณะการจัดเรียงตัวถูกอธิบายโดยแบบจำลองของ Madelung เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิค่า เนื้อสารจะถูกปกคลุมด้วยไอออนที่มีอนุภาค  $\text{OH}^-$  จับกับไอออนบวกที่พื้นผิว และ  $\text{H}^+$  จะอยู่บริเวณที่มีไอออนลบ อิทธิพลของน้ำในการจับก๊าซทำให้เกิดความไม่ชัดเจน ถึงแม้เร

อุณหภูมิสูง น้ำ  
ผู้ให้หรือผู้รับก็

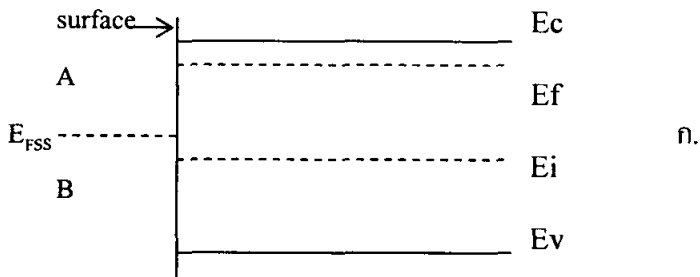
เหตุผล  
states” ซึ่งจะมี  
ผิว  $E_c$  คือ พลัง  
พลังงานและ  $E_f$   
แถบพลังงาน  $N$   
ชั้นที่แสงสามารถ  
พลังงาน 2 ระดับ  
แบบจำลองของ  
bands” เราสังเกต



วามขึ้นสูงๆ ในขณะที่  
เสหรือกรดกับอะตอม

งสถานะผิว “Surface  
จำลองแถบพลังงานที่  
นที่ระดับครึ่งของแถบ  
่า ความหนาแน่นของ  
ชั้นของผิวที่มีอยู่หลาย  
นดังนั้นจึงแสดงแถบ  
คยรูปที่ 2.27(ก) เป็น  
และสารกึ่งตัวนำ “flat  
ม่มีความจำเป็น จะมี

ความสัมพันธ์ของพลังงานเฟอร์มิ ( $E_{FSS}$ ) ของวัสดุของพลังงานเฟอร์มิ) ในรูปที่ 2.27 (ข) เราแสดงถึงกรณีสมดุล อิเล็กตรอนถูกเคลื่อนย้ายจากบริเวณ  $E_f$  สูงใกล้บริเวณพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำไปสู่บริเวณ  $E_f$  ต่ำ ในสถานะพื้นผิวการแบ่งแยกประจุนำไปสู่ความต่างศักย์ของ 2 ชั้น ในตัวอย่างนี้ การเพิ่มของระดับพลังงานที่พื้นผิว (รวมระดับ  $E_{CS}$  และ  $E_{VS}$  ที่ผิว) เมื่อความต่างศักย์ของ 2 ชั้นมีประสิทธิภาพทำให้  $E_f$  คงที่ตลอดระบบ เรามีความสมดุล (ฟังก์ชันเฟอร์มิอธิบายถึงการไม่ว่างของทุกระดับพลังงาน) การเคลื่อนย้ายของแถบ ใกล้พื้นผิว เรียกว่า “การหักเหของแถบ”



รูปที่ 2.1  
อะตอม  
ก. ใน  
ข. ใน

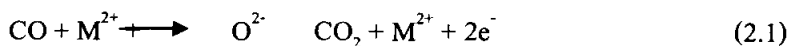


และ  
ง(E)  
งัว  
จนถึงสมดุล

รูปแบบของพลังงานเฟอร์มิจะถูกระบุโดยสมการ  $E_f = E_v + k_B T \ln \left( \frac{N_v}{N} \right)$  ซึ่งเกี่ยวข้องกับการพยายามให้เกิดความไม่ว่างของ  $E_f$  พลังงานเฟอร์มิจะถูกประมาณที่ครั้งหนึ่งระหว่างกลุ่มผู้ให้และกลุ่มผู้รับดังแสดงในรูปที่ 2.28 ถ้ามีเพียง 1 ระดับพลังงาน ในทำนองเดียวกันพลังงานเฟอร์มิจะเข้าสู่ระดับที่สมดุล อาจกล่าวได้ว่า เมื่อเข้าสู่สมดุลจะเกิดการโค้งงอของแถบพลังงาน (band bending)

ที่น่าสนใจสำหรับเราคือ การวิเคราะห์สารที่สามารถถูกดูดซับและแบ่งแยกสถานะผิว มันจะฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ (ลดออกซิเจน) หรือรับอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ (เพิ่มออกซิเจน) เช่น ไฮโดรเจนเมื่อถูกดูดกลืนจะฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปสารกึ่งตัวนำและจะได้เป็น  $H^+$  ส่วนออกซิเจนเมื่อถูกดูดกลืนจะจับอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำและได้เป็น  $O^-$  การอธิบายทางคณิตศาสตร์จะอธิบายได้เหมือนกรณีของสถานะผิว เราใช้ทอมของสถานะผิวเพื่ออธิบายระดับพลังงานพื้นผิวต่อชนิดของการ

ดูดกลืน ตัวอย่างของการพิจารณาก็คือ CO เคลื่อนเข้าสู่ผิวทำปฏิกิริยากับโลหะออกไซด์ดังสมการ (2.1) เมื่อ  $O^{2-}$  เปลี่ยนไปเป็นสถานะก๊าซ



ไอออนบวกโลหะ M ทางด้านซ้ายเป็นสารที่ไม่สามารถระเหยได้โดยง่ายหรือไม่แพร่เข้าไปในเนื้อสาร มันจะมีประจุเกิดขึ้นและถูกส่งไปยังสารกึ่งตัวนำและเกิดพฤติกรรมที่สถานะผิวอีกครั้ง

กระแ  
จะอธิบายกรณี  
ระดับชั้นพลังงาน  
แบบที่  
2.28(ก) เกิดขึ้น  
ที่ถูกฉีดมีการเร  
อัสตรอมเข้าไป  
ความต่างศักย์ข  
(C) ของชั้นคู่ (F



27(ข) มีอยู่ 3 แบบเร  
ดูดีให้มีเพียง 1

และสมประจูดังรูปที่  
| เพราะว่าอิเล็กตรอน  
จะมีขนาดเพียงไม่กี่  
/ โดย  $\psi$  คือ  
งพันธ์กับค่าเก็บประจุ

$$C = q(\dots)$$

N คือ ทวมเมทน แนนบวระจุทตบเนะพวทยพทท

$E_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

$\epsilon_0$  คือ permittivity ของสุญญากาศ

ในกรณีชั้นสะสมค่า D จะมีค่าน้อย จากสมการจะได้ค่า N ที่มีค่ามาก การเคลื่อนย้ายประจุเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อธิบายการว่างของสถานะผิว ชั้นสะสมจะเกิดบนสารกึ่งตัวนำชนิด P เมื่อโฮล ถูกฉีดเข้าไปในแถบวาเลนซ์ (อิเล็กตรอนถูกดึงจากชั้นแถบวาเลนซ์โดยผู้ให้ที่มีค่าสูง) ชั้นสะสมจะเกิดขึ้นจากสถานะผิวที่มีประจุลบกับประจุโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์

แบบที่ 2 ถ้าอิเล็กตรอนถูกดึงจากแถบความนำของสารกึ่งตัวนำชนิด N โดยสถานะผิวที่เป็นตัวรับประจุที่ไม่แข็งแรงมากจนบริเวณปลอดประจุที่จะเกิดขึ้นที่พื้นผิว โดยแสดงดังรูป 2.28 (ข) โดยชั้นคู่ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นผิวที่ประจุลบและไอออนของผู้ให้ประจุบวก (เคลื่อนที่ไม่ได้) ในสารกึ่งตัวนำชนิด N การดึงอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งถึงพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นสถานะผิวของวัสดุตรวจจับ โดยทั่วไปประจุนี้จะมีค่าหนึ่งในชั้นคู่ อย่างไรก็ตามในสารกึ่งตัวนำประจุจะมาจากไอออนตัวให้ ซึ่งมีปริมาณจำกัด การกำหนดจำนวนประจุจะแสดงถึงความหนาของชั้นคู่ที่ขยายเข้าไปในสารกึ่งตัวนำในขณะเดียวกันจากสมการที่ 2.2 ค่า  $d$  จะมีค่ามากกรณีในเขตปลอดประจุ ความหนาแน่นของ

บริเวณปลอดประจุระหว่างประจุลบ

แบบที่ 2 :  
รูปแรงที่ผิว รูปที่  
เลนซ์จะทำให้  
เฟอร์มิอยู่ใกล้แ  
ตัวรับที่สถานะผิ  
รูปที่ 2.28 ค ที่ผิ  
ส่วนที่ 2

ใช้สถานะผิวง่าย  
2.1 หลีกเลี้ยงกา

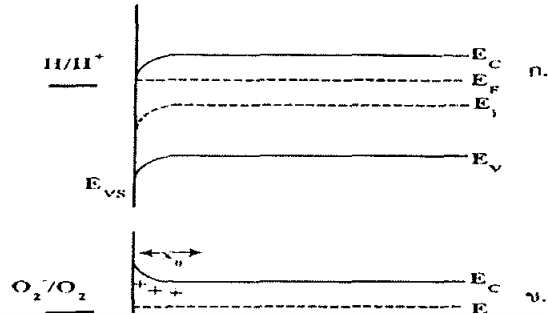
สมมุติความเข้มของแสงของแสงที่ตกกระทบผิวของสารกึ่งตัวนำที่แสดงโดยรูป 2.28 (ข) แสดงถึงศักดาที่สัมพันธ์กับพลังงานศักย์ในเนื้อสาร สถานะผิวที่แสดงโดยรูปแบบที่ง่าย ๆ เพียง 1 ชั้น ถ้ามีการยึดเหนี่ยวที่ชั้นนี้ จะเกิด Reducing agent เช่น  $O_2^-$  แต่ถ้าไม่มีการยึดเหนี่ยวในชั้นนี้ บริเวณที่ว่างเกิด Reducing agent



บสารกึ่งตัวนำชนิดพี  
ะผิวผู้ให้ออกจากชั้นคู่

สร้างออกซิไดซ์อย่าง  
ลังงานใกล้กับแถบวา  
เมสมดุลย์ ถ้าพลังงาน  
ออกมา ขณะที่อะตอม  
วาเลนซ์ แสดงไว้ใน

การวิเคราะห์ในกรณี  
ชนิดอื่น ซึ่งสมการที่  
ำหรับสถานะผิวและ



ก. ชั้น ๔  
โดยปล่อยใ  
ข. ชั้น ๑  
บริเวณผิวข

เข้าไปในแถบความนำ  
เขตเซตด้วยประจุบวก

ค. ชั้นกึ่งนำ  
ทั้งแถบความนำและแถบวาเลนซ์

**2.17 กลไกในการตรวจจับก๊าซของทินออกไซด์**

ทินออกไซด์ มีการจัดเรียงผลึกแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า ซึ่งมีความกว้างของแถบ พลังงาน 3.5-3.8 อิเล็กตรอนโวลต์ จุดบกพร่องจำนวนมากในเนื้อทินออกไซด์จะอยู่ในรูปที่ว่างในอะตอมออกซิเจนซึ่งจะแสดงตัวเป็นผู้ให้อิออน แต่ส่วนที่มีผลต่อการแสดงตัวเป็นอะตอมผู้ให้ก็คือที่ว่างในอะตอมออกซิเจน โดยกระบวนการที่มีผลต่อค่าความนำไฟฟ้าของทินออกไซด์ต่างๆมีดังนี้

2.17.1 ผลในเนื้อสาร

จุดบกพร่องในเนื้อหินออกไซด์ปกติจะเป็นที่ว่างในอะตอมออกซิเจน 1 และ 2 ไอออน จากแบบจำลองจุดบกพร่องสำหรับผลึกหิน ไซค์บริสุทธิกับช่องว่างออกซิเจนสองประจุลบจะมีสมการที่อุณหภูมิสูงๆ ดังนี้



ที่อุณหภูมิค่าก่ำนของการดูดกลืนออกซิเจนจะเป็นส่วนสำคัญกว่าดังรูปที่ 2.8 ช่องว่างเหล่านี้จะเพิ่มอะตอมผู้ให้ในแถบพลังงาน แสดงว่าจะมีระดับของอะตอมผู้ให้อยู่ 2 ระดับที่ทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจน

2.17.2

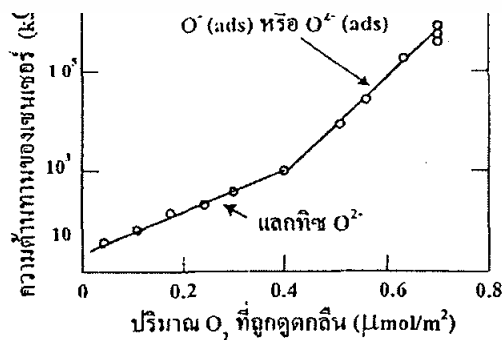
ในบรรดาจากแถบความถี่แบบแรกจะเกิด 400 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ด้านทานลดลงองศาเซลเซียสของก๊าซต่างๆ โ



เกิดการดึงอิเล็กตรอน  $O_2, O^-$  และ  $O^{2-}$  โดยไอออนที่อุณหภูมิประมาณ

500 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความต้านทานสูงที่ 400 องศาเซลเซียส

(2.3)



รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 800 ถึง 200 องศาเซลเซียส กับปริมาณ  $O_2$  ที่ถูกดูดกลืน

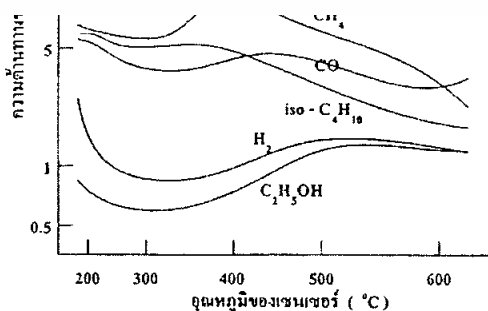
การลดลงของความต้านทานในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิจาก 0 ถึงประมาณ 250 องศาเซลเซียส เป็นคุณสมบัติปกติของสารกึ่งตัวนำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพิ่มจนถึงจุดที่ความต้านทานเพิ่ม คือ เริ่มเกิดการฟอร์มตัวของ  $O^-$  และ  $O^{2-}$  เมื่อถึงอุณหภูมิค่าหนึ่งจะเกิดการแตกสลายของไอออนเหล่านี้ทำให้ค่าความต้านทานของทินออกไซด์ลดลงอีกครั้ง

การลดลงของความต้านทานก๊าซเซ็นเซอร์เมื่ออยู่ในบรรยากาศของก๊าซเผาไหม้สามารถอธิบายได้คือ ปริมาณไอออนของออกซิเจนบนผิวลดลงเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับก๊าซ  $O^-$  ทำให้เกิดอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในเนื้อสาร

จากปฏิกิริยา  
การตรวจจับก๊าซ  
ผลสรุปในการใ  
รอบๆ ความหน  
ตัวกำหนดความ



มต้านทานมากนั้ก ใน  
เองก๊าซทดสอบจะได้  
เชิเงินจากบรรยากาศ  
องก๊าซรอบๆ จะเป็น



รูปที่ 2.31 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของทินออกไซด์ต่ออุณหภูมิที่บรรยากาศของก๊าซต่างๆ

### 2.17.3 ผลจากขอบเกรน

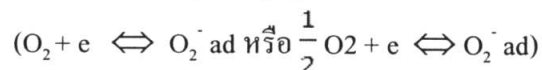
การเปลี่ยนแปลงที่ผิวซึ่งเกิดจากการดูดกลืนหรือคายไอออนจะมีค่าไม่มากพอที่อธิบายถึงการที่ความต้านทานเพิ่มขึ้นมากๆ ส่วนที่มีผลต่อความต้านทานมากกว่าก็คือ ขอบเกรน

ผลึกทินออกไซด์จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ประกอบด้วยแถบที่ขอบเกรนของออกซิเจนซึ่งแสดงตัวเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน เมื่ออะตอมของออกซิเจนหลุดออกก็อิเล็กตรอนจากอะตอมผู้ให้บริเวณพื้นผิวจะถูกดูดกลืนเป็นไอออนลบ เกิดการฟอร์มตัวของชั้นปลอดประจุมีค่าขึ้นอยู่กับกำแพงศักย์ โดยแถบพลังงานจะเ



รูปที่ 2.32 โครงสร้างแถบพลังงานของทินออกไซด์

( ■ ) คือ ออกซิเจนประจุลบที่ถูกดูดกลืน คือ ศักย์ที่ผิวเกิดจากการดูดซับ  $O_2^-$  หรือ  $O^-$ ,



- $E_s$  คือ กำแพงศักย์
- $E_F$  คือ ระดับเฟอร์มิ
- $E_D$  คือ ระดับผู้ให้
- $E_C$  คือ ระดับต่ำสุดของแถบความนำ

- $E_v$  คือ ระดับสูงสุดของแถบวาเลนซ์
- $E_{cd}$  คือ ความถี่ของระดับผู้ให้
- $E_{cv}$  คือ ช่องว่างพลังงานระหว่าง  $E_c$  และ  $E_v$

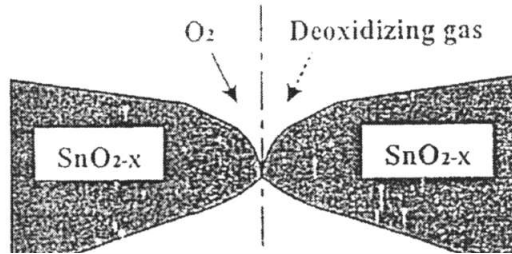
แบบจำลองทางฟิสิกส์สำหรับการจับคู่ของขอบแถบแสดงถึงบริเวณปลอดประจุและผลของการคือออกซิไดซิงก์ก๊าซ ดังรูปที่ 2.32

กรณีผลึกมีขนาดน้อยกว่าสองเท่าของ Debye length ดังรูปที่ 2.33 แต่ละผลึกจะแสดงตัวเหมือนช่องทางในเฟต ทำให้มี



รูปที่ 2.33 โครงสร้างและแบบจำลองของสารกึ่งตัวนำ (กำแพงศักย์ที่เกิดจากการดูดกลืนออกซิเจน)

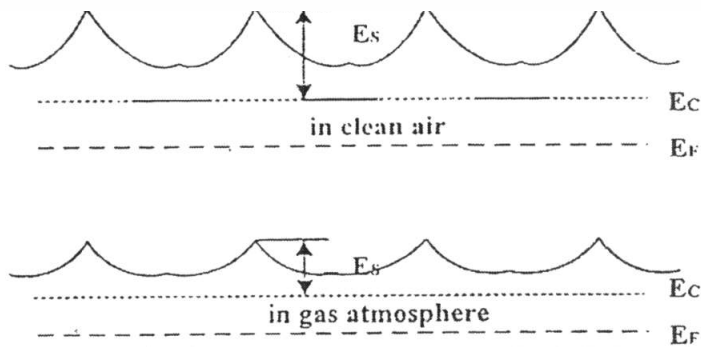
- (ก) แบบจำลองทางฟิสิกส์
- (ข) แบบจำลองแถบพลังงาน



e of

s

at path



รูปที่ 2.35 กำแพงศักย์ตามทางเดินกระแสในทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์ (ผลึกมีขนาดน้อยกว่า สองเท่าของ Debye length)

## 2.18 ปฏิริยาเคมีระหว่างทินออกไซด์กับก๊าซต่างๆ

เราจะแบ่งปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ 2 แบบ โดยดูได้จากว่าความต้านทานของทินออกไซด์ลดลงหรือเพิ่มขึ้น

### 2.18.1 ปฏิริยาออกซิเดชัน

ในปฏิริยาออกซิเดชัน ก๊าซทดสอบจะถูกออกซิไดซ์ (ให้อิเล็กตรอนแก่ทินออกไซด์) และทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งจะมีผลทำให้ความต้านทานของทินออกไซด์ลดลง ตัวอย่างของก๊าซและปฏิริยาออกซิเด

- เอทิลแ



(2.4)

$\text{SiO}_2$

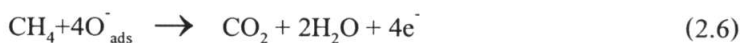
รูปที่

ละ  $\text{H}_2\text{O}$

- คาร์บอน

(2.5)

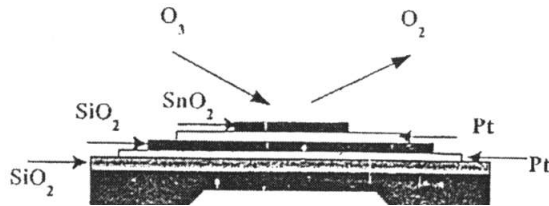
- มีเทน  $\text{CH}_4$



### 2.18.2 ปฏิริยารีดักชัน

ในปฏิริยารีดักชัน ก๊าซทดสอบจะถูกรีดิวซ์ (ดึงอิเล็กตรอนจากทินออกไซด์) และทำหน้าที่เป็นตัวออกไซด์ ซึ่งจะมีผลทำให้ความต้านทานของทินออกไซด์เพิ่มขึ้น ตัวอย่างของก๊าซและปฏิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)

-ไอโซน  $O_3$



-ไนตรัส



(2.8)

รูปที่ 2.38 การตรวจจับ  $NO_2$  ของทินออกไซด์ จะได้ NO

## 2.19 การปรับปรุงความไวในการตอบสนองโดยการเติมตัวเร่งตะกั่ว

ตัวเร่งตะกั่ว (Catalyst) คือ สารที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยที่ตัวเองไม่เปลี่ยนแปลง และไม่ได้เปลี่ยนพลังงานอิสระของปฏิกิริยา แต่ทำให้พลังงานกระตุ้นมีค่าต่ำลง โดยรูปที่ 2.38 จะแสดงปรากฏการณ์ที่ผิวสัมผัสเมื่อเติมตัวเร่งตะกั่ว

จุดประสงค์โดยทั่วไปของการเติมตัวเร่งตะกั่ว ก็เพื่อเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อก๊าซตลอดเวลาในการตอบสนองและการฟื้นตัว ตัวเร่งตะกั่วที่นิยมใช้ทั่วไป ก็จะเป็นสารพวกโลหะ

### บทที่ 3

#### การออกแบบและการสร้างเซ็นเซอร์

กระบวนการสร้างหัวตรวจจับก๊าซแอมโมเนียมีขั้นตอนดังนี้

- การเตรียมแผ่นฐานรองอะลูมินา
- การสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองอะลูมินา
- ขั้นตอนการสร้างลวดลายตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย
- ขั้นตอนการสร้างหัวตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย

#### 3.1 การเตรียม

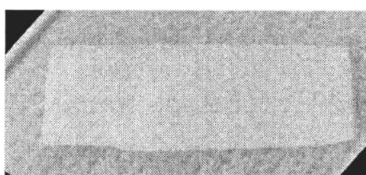
นำแผ่น

ชม. ดังรูป



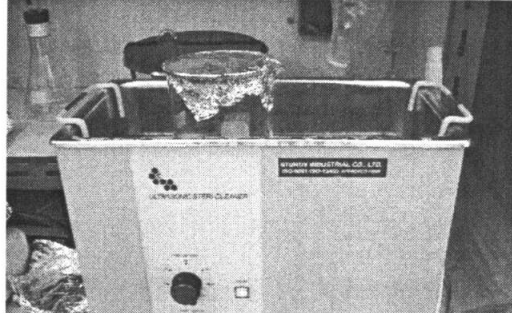
ขนาด 1.5 ซม. x 0.7

รูปที่ 3.1 แผ่นอะลูมินาที่จะนำมาตัด



รูปที่ 3.2 แผ่นอะลูมินาที่ตัดแล้วขนาด 1.5 ซม. x 0.7 ซม.

จากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดแล้วไปทำความสะอาดด้วยเอทานอลและอะซิโตน โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกใช้เวลา 15 นาที



ข้อควร  
เวลาตัดจึงต้องร:

### 3.2 การสร้างฟิล์ม

เราจะทำ  
CVD ที่ความดัน

#### 3.2.1 อุณหภูมิ

1. ท่อแม่

2. กระบ

3. แอลกอฮอล์ (Ethanol)

4. ผงเฟอร์โรเซน (Ferrocene)

5. ผงดีบุกคลอไรด์ ( $\text{SnCl}_2$ )

6. ถังเก็บก๊าซอาร์กอน (Ar)

7. แผ่นอะลูมินาขนาด 1.5 ซม. x 0.7 ซม.

8. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง

9. เครื่องทำให้เป็นอะตอม (Atomizer)

10. เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter)

11. เทอร์โมคัปเปิล (Thermo couple)

12. นาฬิกาจับเวลา



เป็นอย่างมาก ดังนั้น

มีนา

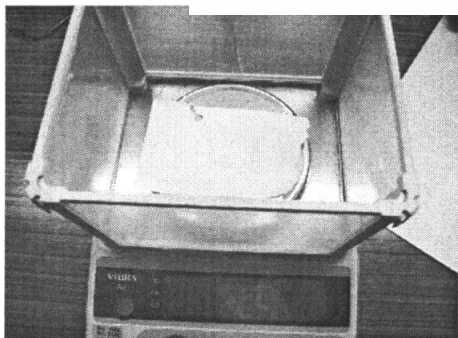
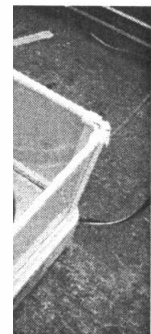
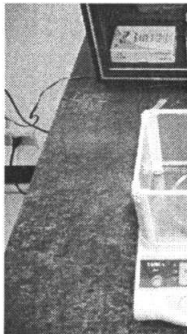
ชุดด้วยวิธี Thermal  
อนและวิธีการดังนี้

### 3.2.2 ขั้นตอนและวิธีทำการสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์

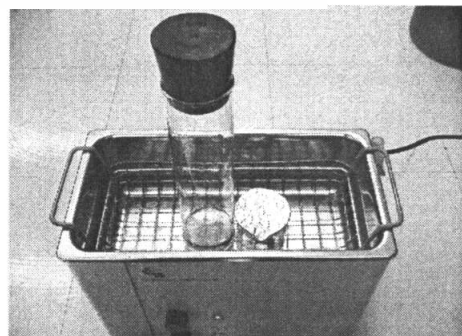
#### 3.2.2.1 การเตรียมสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา

โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยในการสร้างนี้ ใช้ ผงฟลูโรเซนเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโลหะตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะถูกนำไป ผสมกับดีบุกคลอไรด์และแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอล ขั้นตอนและวิธี การเตรียมสารโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้ โดย เริ่มต้นจากการคำนวณอัตราส่วนน้ำหนักของแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลกับผงฟลูโรเซนและผงดีบุกคลอไรด์ตามเงื่อนไข คือ ผงฟลูโรเซนและผงดีบุกคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อนี้ นำมาโดยผสมกันแล้วใช้ ส่วนนี้มาผสมกับผงฟลูโรเซนและดีบุกคลอไรด์ ที่ใช้ ผสมกับเอทานอล จากนั้นนำไปจุดธรีไรต์และแอลกอฮอล์

โซนิคด้วยเครื่องละลายเข้ากัน



(ค)



(ง)

### รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

- (ก) ขั้นตอนการนำแอลกอฮอล์มาชั่งน้ำหนัก
- (ข) ขั้นตอนการนำผงฟลูโรเซนมาชั่งน้ำหนัก
- (ค) ขั้นตอนการนำผงดีบุกคลอไรด์มาชั่งน้ำหนัก
- (ง) ขั้นตอนการนำผงฟลูโรเซนและผงดีบุกคลอไรด์ที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์มาอัลตราโซนิก

#### 3.2.2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์



### รูปที่ 3.5 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์

จากรูปที่ 3.5 เป็นภาพแสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในเชิงปริมาณ ซึ่งประกอบไปด้วย ก๊าซอาร์กอน (Ar) ใช้เป็นก๊าซนำพา, Flow meter ใช้ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน, เฟอโรเซนและดีบุกคลอไรด์ ใช้เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะถูกผสมลงในแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน, เครื่อง Atomizer (2 MHz) ใช้เป็นตัวทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมในแอลกอฮอล์กลายเป็นละออง, ท่อแกว ภายในใช้เป็น

Chamber หรือห้องในการทำปฏิกิริยา, ฮีตเตอร์ ใช้เป็นตัวให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา, น้ำ ใช้ป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกไหลย้อนเข้ามาภายในระบบ

ในส่วนของชิ้นงานนั้นเราจะใส่เข้าไปในหลอดแก้วที่ตำแหน่ง 10 ซม. และ วัดจากตรงจุดกึ่งกลางของฮีตเตอร์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทดลองแล้วว่าเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ดีที่สุด

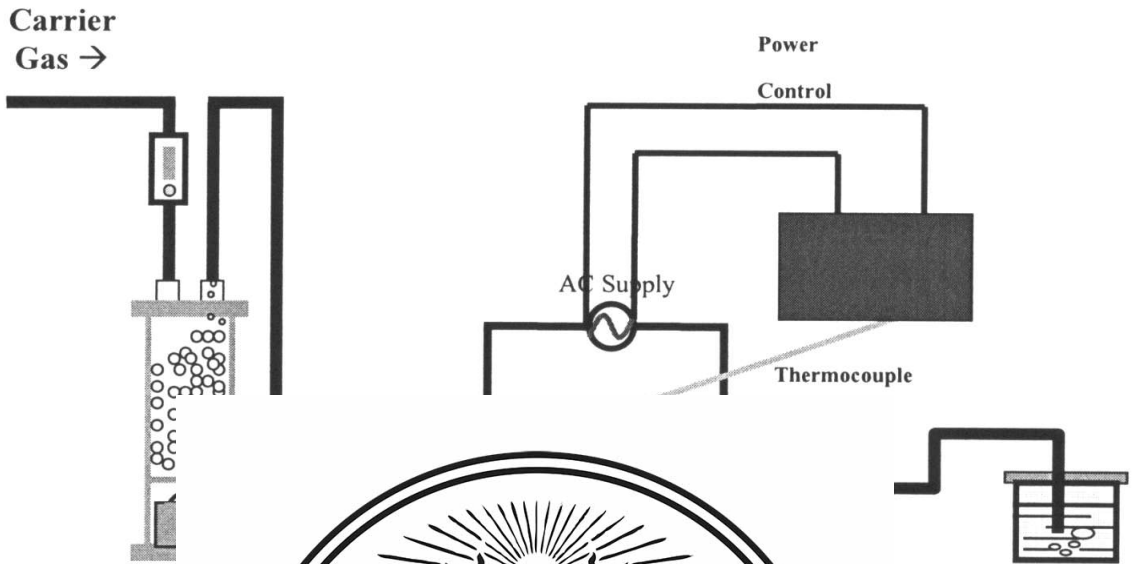
โดยในการสร้างเริ่มแรกจะต้องทำการไล่อากาศภายใน Chamber ออกเสียก่อน เพื่อมิให้เกิดการทำปฏิกิริยากับอากาศ (oxidize) ในขณะที่ทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.6



จากรูป

กระบอกแก้วซึ่งภายในบรรจุ ฟลู โรเซนและดีบุกคลอไรด์ ที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ ที่อัตราการไหล 1 L/min เพื่อไล่อากาศออกจากระบบ โดยในระหว่างนี้จะเปิดฮีตเตอร์ให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 20 นาที หลังจากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

ทำการไหลเข้าไปใน



รูปที่

จากรูป ทำให้ ฟลูโรเซาแก้ว และลงไปนาที่ จากนั้น เมื่จากนั้นนำขึ้นงา กราด (SEM) แ



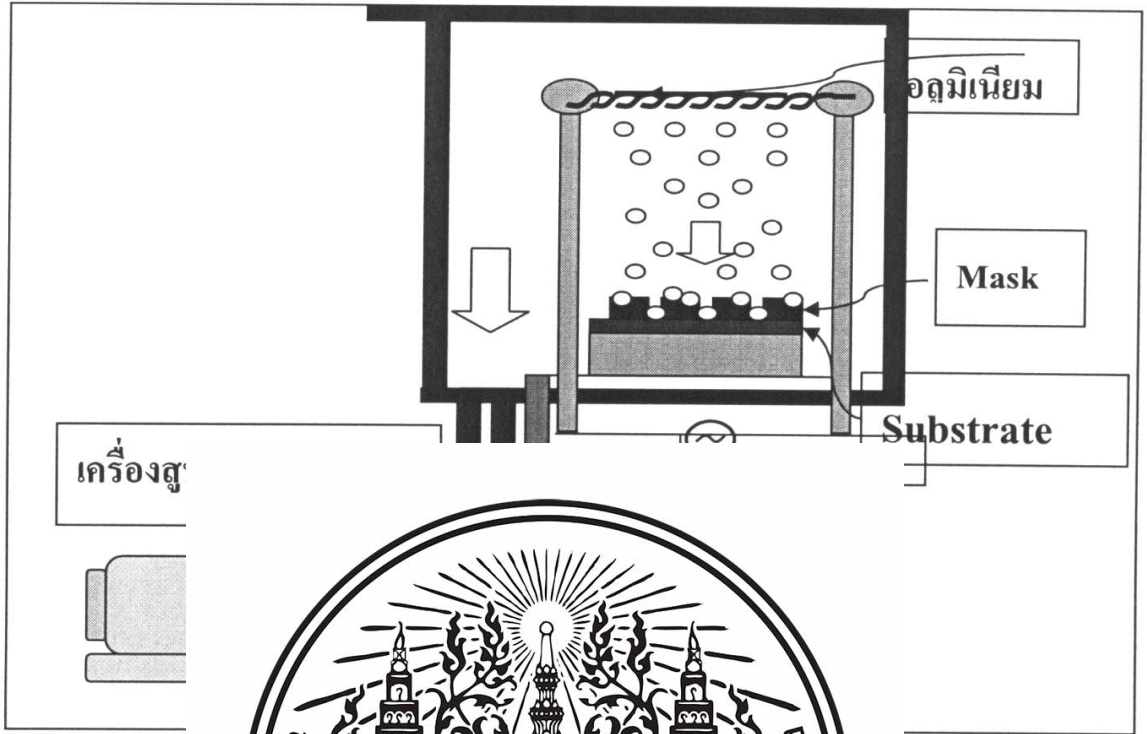
ออกไซด์

เครื่อง Atomizer เพื่อ กลอยขึ้นไปตามท่อ เาะนี้จะใช้เวลา 20 r หรือให้ระบบเย็นลง ิว์อิเล็กทรอนิกส์

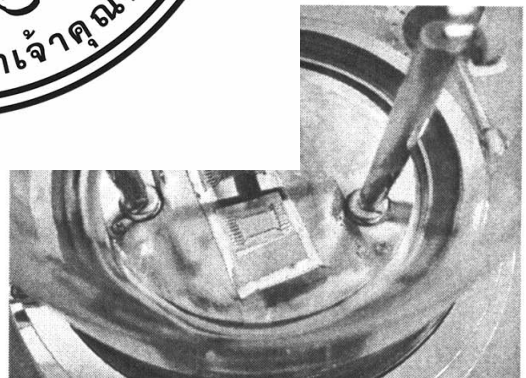
### 3.3 ขั้นตอนการสร้างลวดลายตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย

ในการสร้างลวดลายนั้นเราจะใช้แผ่นลายสำเร็จรูป (Hard mask) ที่เหมาะในการสร้างเป็น ลวดลายตรวจจับก๊าซ โดยใช้เทคนิคระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ(thermal evaporation) ด้วยเครื่อง Evaporator โดยการทำการลวดลายและขั้วไฟฟ้านั้นจะใช้อะลูมิเนียมเป็นสารที่ใช้เคลือบบน แผ่นฐานรอง โดยจะทำการสร้างลวดลายบนฐานรองหลังการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้น ฟิล์์มดีบุกออกไซด์

โดยมีวิธีการคือ วางแผ่นลายสำเร็จรูปบนชิ้นงานแล้ววางบนถาดรองแล้วใส่ไปในโถแก้วที่ ถูกดูดอากาศออกจนหมด จากนั้นจึงให้ความร้อนแก่ขดลวดทั้งสแตนท์ที่อยู่ในโถแก้ว ซึ่งใส่เส้นลวด อะลูมิเนียมไว้ภายในขดลวดทั้งสแตนท์ เพื่อให้อะลูมิเนียมละลายกลายเป็นละอองหมอกแล้วปล่อยให้ ตกลงบนชิ้นงาน ก็จะได้ลวดลายตามแบบแผ่นลายสำเร็จรูป(Hard mask)



รูปที่ 3.9 เครื่อง Evaporator



รูปที่ 3.10 การวางชิ้นงานภายใน โถแก้ว

### 3.4 ขั้นตอนการสร้างหัวตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย

ในขั้นตอนนี้จะทำการต่อขั้วไฟฟ้าออกมาจากชิ้นงานที่ทำการปลุกทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุก ออกไซด์ที่ทำลวคลายแล้วโดยใช้กาวเงิน ลวดนำไฟฟ้า ต่อสายสัญญาณออกมาเพื่อทำเป็นขั้ววัด

เราจะเห็นว่าที่ขั้วทั้งสองข้างของชิ้นงานเราจะทำการทา กาวเงิน เพื่อที่จะทำการต่อสายสัญญาณออกมา โดยในขั้นตอนนี้ต้องระวังเรื่องของลวดลายตรวจวัดที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นสารเคลือบ เพราะว่าลายอาจหลุดได้หากไม่ระวัง การต่อสายสัญญาณที่ขั้วที่ทา กาวเงินไว้แล้ว โดยจะสร้างอยู่บนแผ่นวงจรสำเร็จรูป เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปวัดผล ซึ่งในขั้นตอนนี้ต้องตรวจสอบสายสัญญาณที่ต่อด้วยขั้วว่ามีความถี่ไม่สูงเกินไปจนทำให้สัญญาณที่ส่งไปเป็นเช่นเซอร์ตรวจวัดก๊าซ



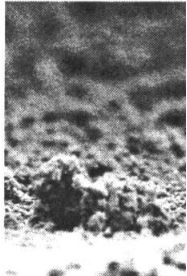
## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์- ดีบุกออกไซด์

การสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์- ดีบุกออกไซด์ บนฐานรองอะลูมินาที่นำมาสร้างหัวตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย สังเคราะห์ด้วยวิธีการ ซีวีดี (Chemical Vapor Deposition : CVD) ที่ความดัน 1 บรรยากาศโดย ใช้เอทานอลเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เฟอโรเซน (Ferrocene) เป็นโลหะเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) (SnO<sub>2</sub>) สำหรับเป็นปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวทำสารละลาย โดย

#### 4.2 ผลการทดลอง



TMEC 1.0kV 12.4mm x1.00k SE(M) 8/30/2007 15:53 50.0um

(ก)



ฟิล์มดีบุกออกไซด์  
อัตราส่วนต่างกัน  
รื้อโซนิคโดยมีเอทา  
นอลเร่งปฏิกิริยา



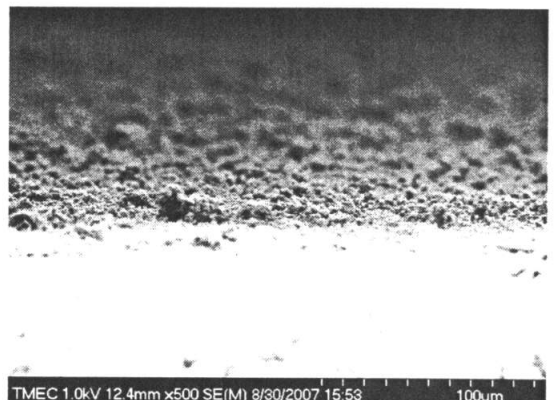
TMEC 1.0kV 12.4mm x10.0k SE(M) 8/30/2007 15:52 5.00um

(ข)



TMEC 1.0kV 12.4mm x30.0k SE(M) 8/30/2007 15:51 1.00um

(ค)

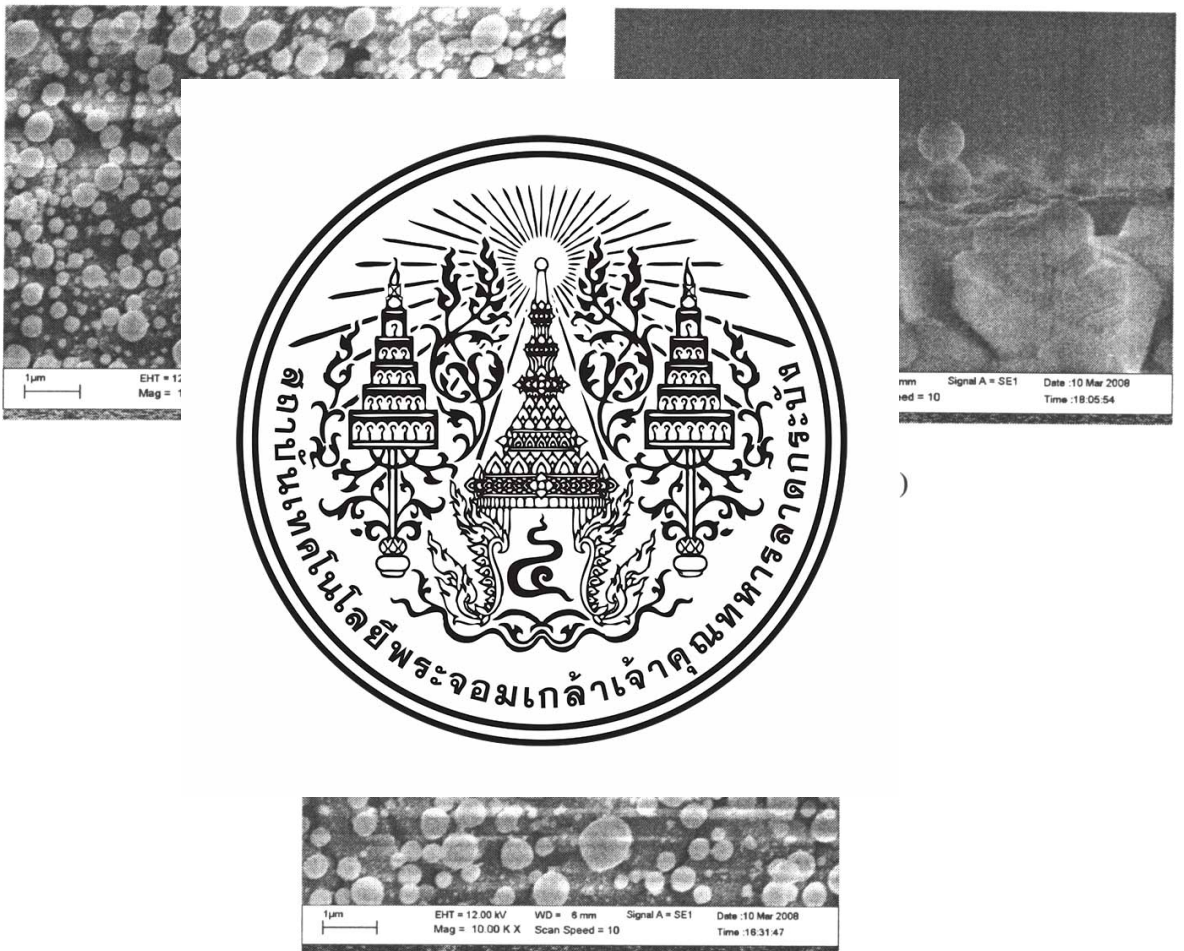


TMEC 1.0kV 12.4mm x500 SE(M) 8/30/2007 15:53 100um

(ง)

รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของอะลูมินาที่อัตราส่วนผสมของ Ferrocene 1% SnCl<sub>2</sub> 0%

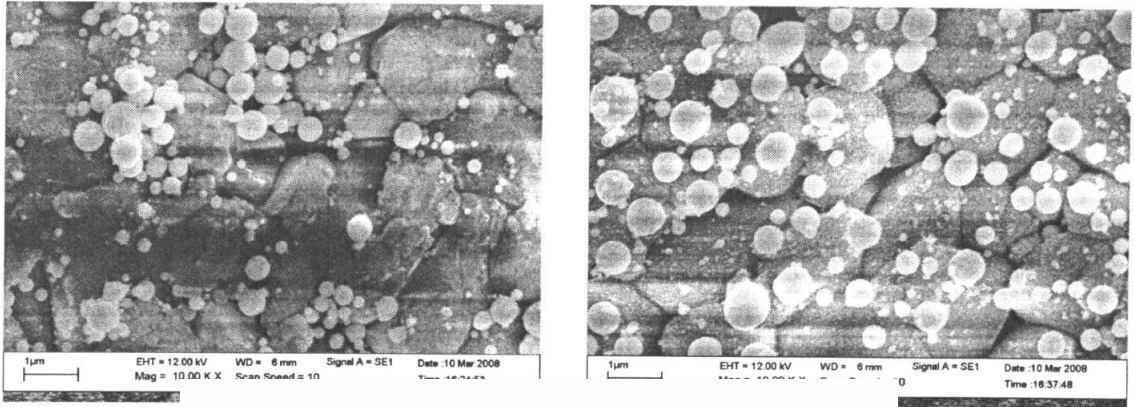
- (ก) ภาพถ่ายแบบ cross ที่อัตราขยาย 1 k
- (ข) ภาพถ่ายแบบ cross ที่อัตราขยาย 10 k
- (ค) ภาพถ่ายแบบ cross ที่อัตราขยาย 30 k
- (ง) ภาพถ่ายแบบ cross ที่อัตราขยาย 500



(ค)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของอะลูมินาที่อัตราส่วนผสมของ Ferrocene 0.25% SnCl<sub>2</sub> 0.75%

- (ก) ภาพถ่ายแบบ Surface ที่อัตราขยาย 10 k
- (ข) ภาพถ่ายแบบ cross ที่อัตราขยาย 10 k
- (ค) ภาพถ่ายแบบ Surface ที่อัตราขยาย 10 k



รูปที่ 4

: 0.5% SnCl<sub>2</sub> 0.5%

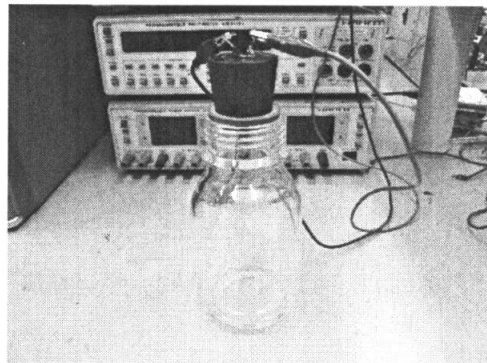
#### 4.3 การทดสอบ

ในการทดสอบ  
เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์  
หัวตรวจวัดกับ  
จากนั้นเปิดฝา  
เปลี่ยนไปจนค่า

ขวดทดลอง วัดความต้านทานกับอากาศที่อุณหภูมิห้องอีก แล้วสลับกับการวัดแอมโมเนีย บันทึกราค่า  
แล้วนำไปวาดกราฟ

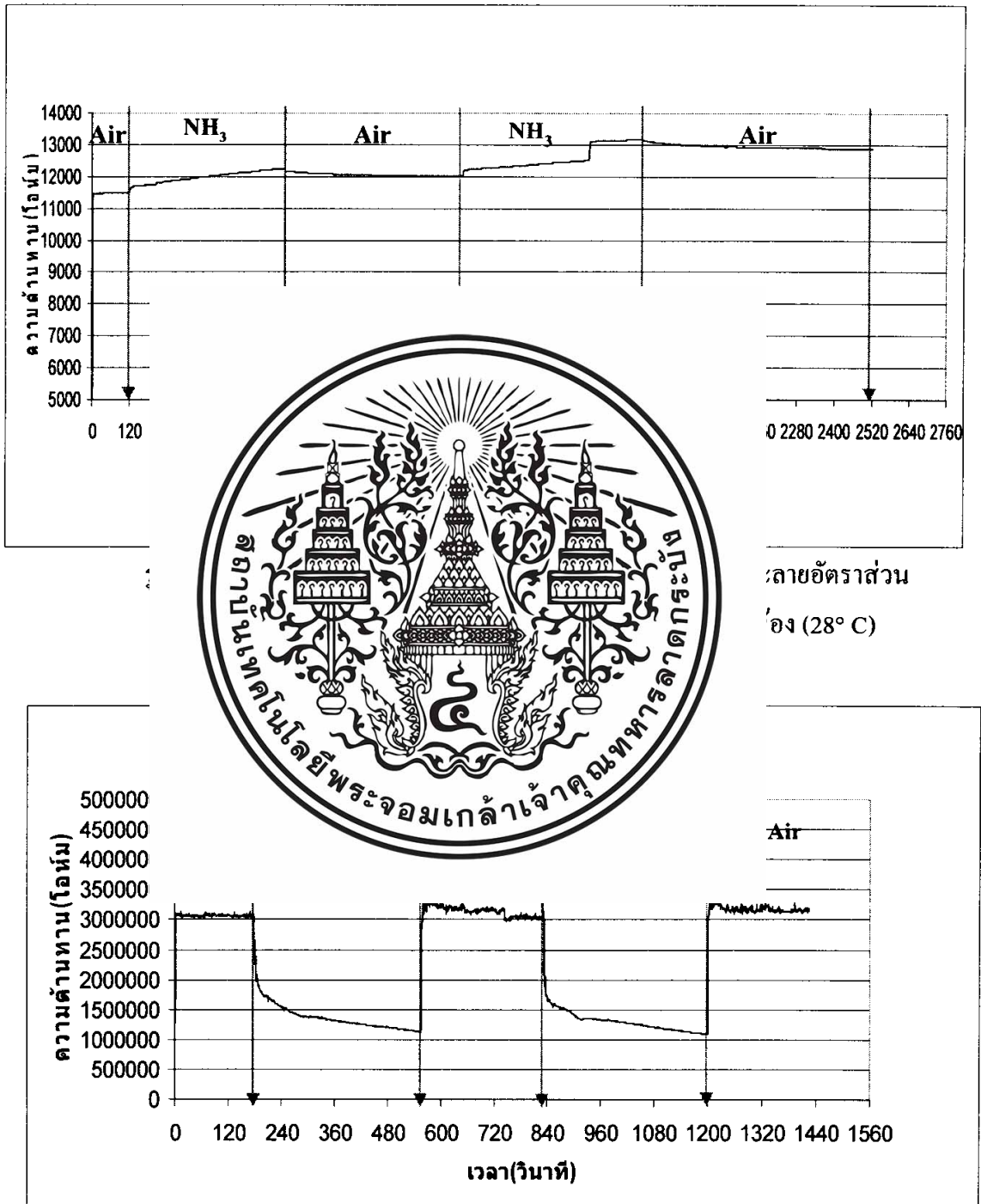


ใส่แอมโมเนียความ  
ความต้านทานของ  
เนแปลงที่น้อยมาก  
ของหัวตรวจวัดที่  
ตรวจวัดออกมาจาก



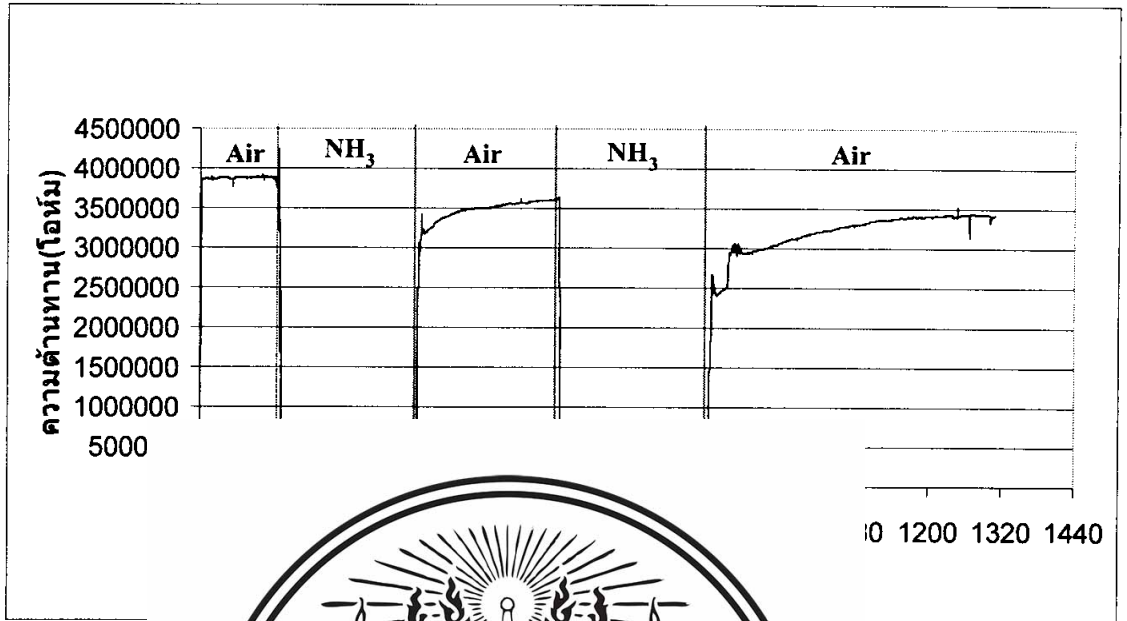
รูปที่ 4.4 การทดสอบแอมโมเนียทดสอบโดยใช้ขวดทดลองขนาด 280 ซีซี  
และใช้แอมโมเนียปริมาณ 10 ซีซี

#### 4.4 ผลการทดสอบก๊าซแอมโมเนียอิมตัวที่อุณหภูมิห้อง (28° C)

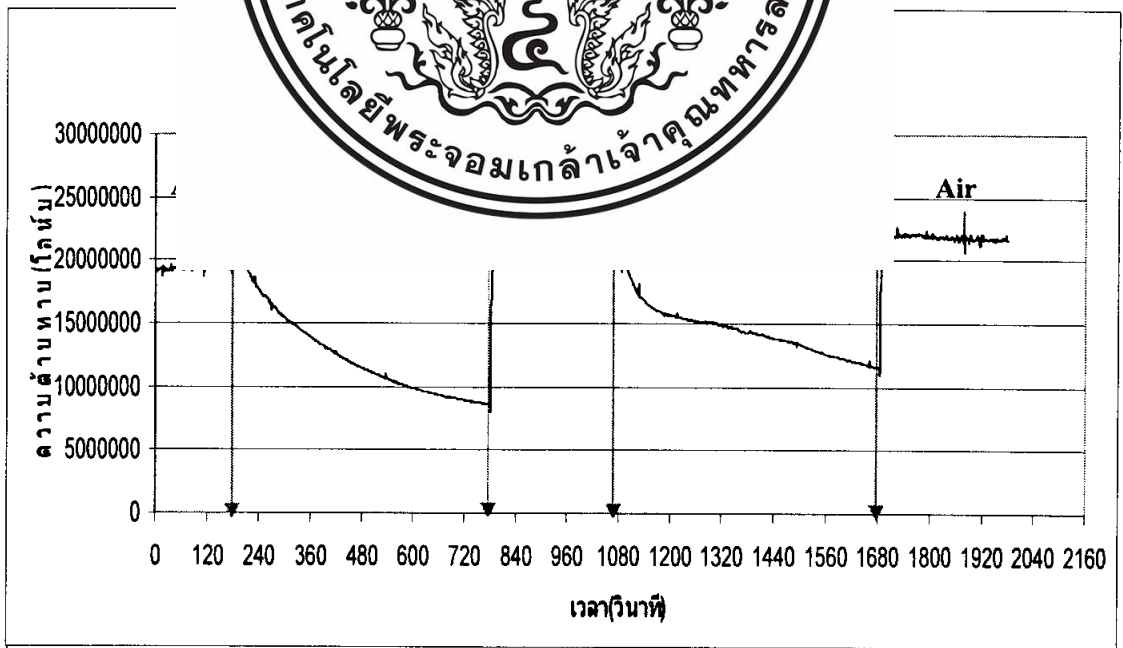


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่สารละลายอัตราส่วน

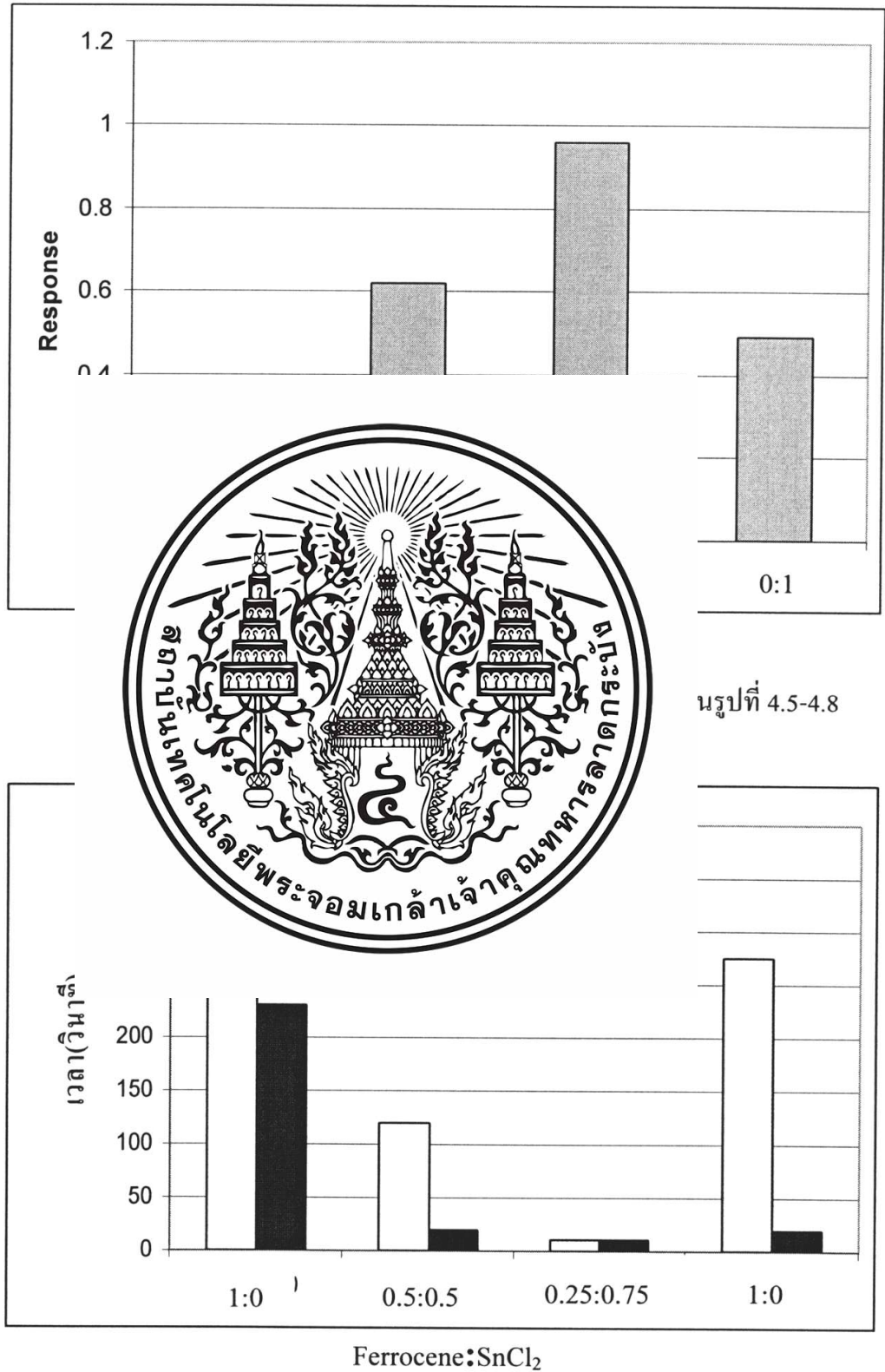
Ferrocene 0.5 % SnCl<sub>2</sub> 0.5 % ต่อไอแอม โมเนียอิมตัวที่อุณหภูมิห้อง (28° C)



ละลายอัตราส่วน  
มีห้อง (28° C)

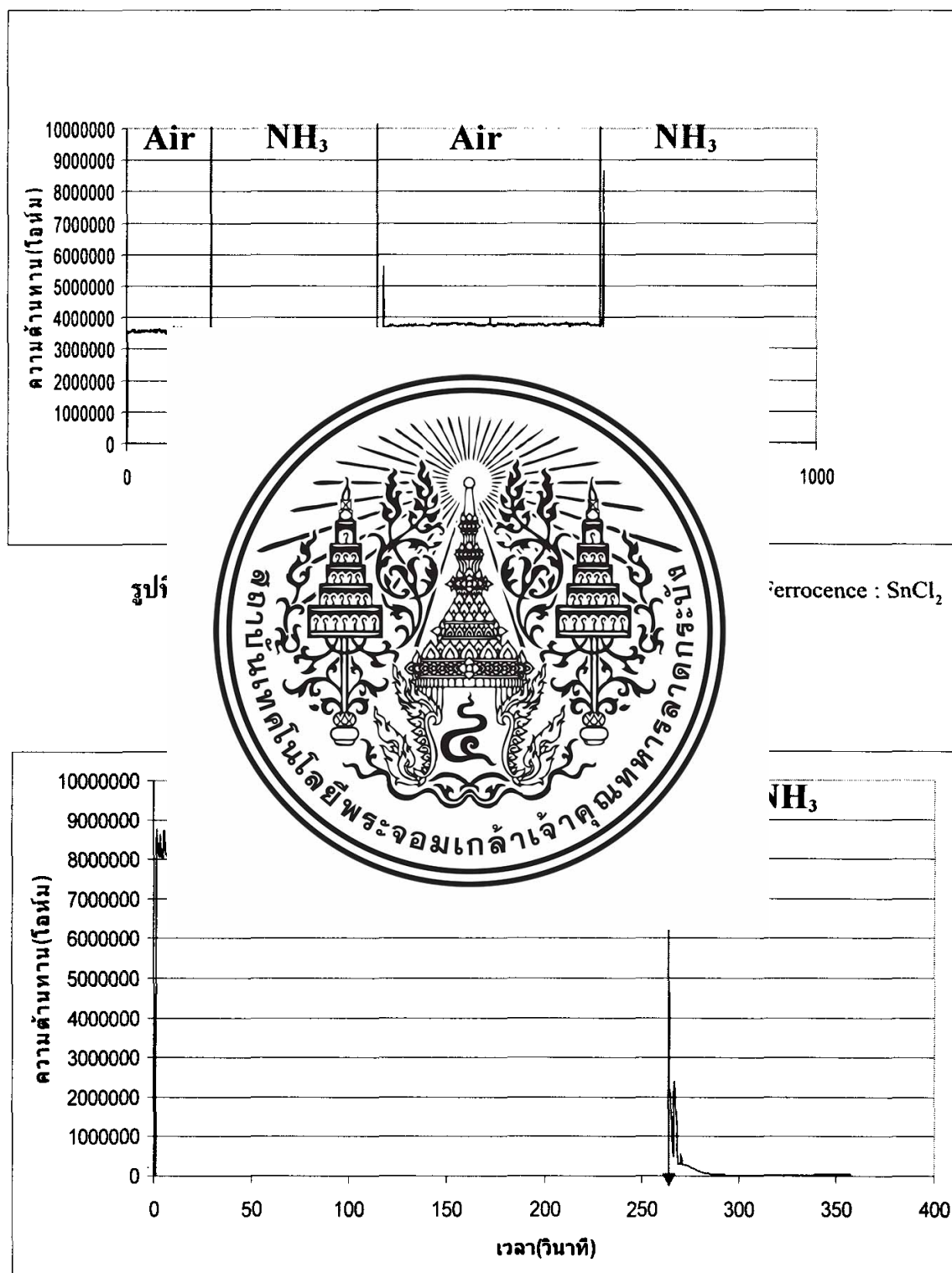


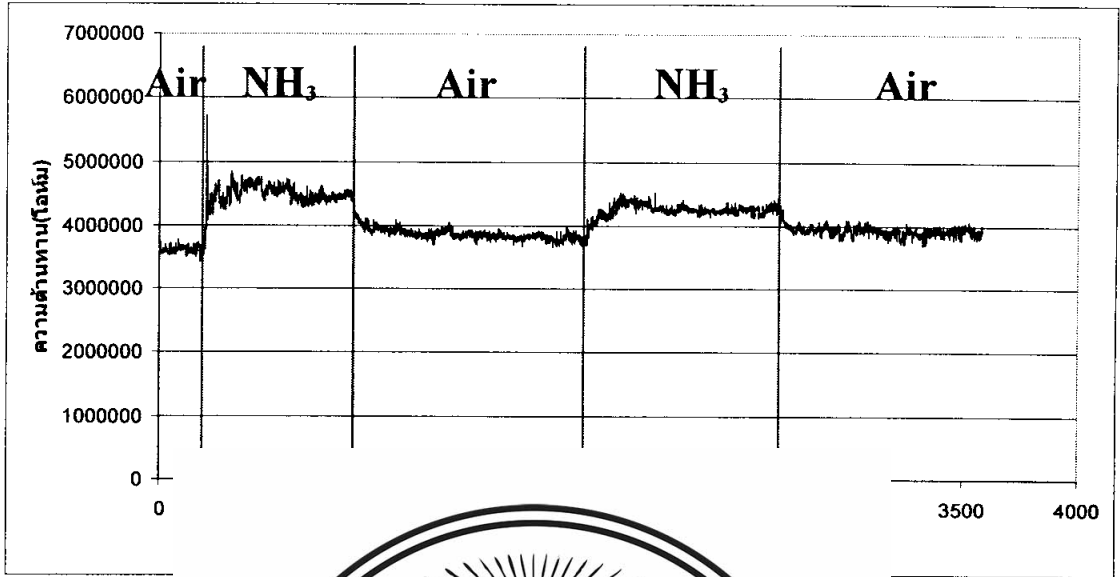
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่สารละลายอัตราส่วน  
Ferrocene 0 % SnCl<sub>2</sub> 1 % ต่อ ไอแอมโมเนียอิมตัวที่อุณหภูมิห้อง (28° C)



รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงค่า  $t_{on}$  และ  $t_{off}$  ของเซ็นเซอร์ในรูปที่ 4.5-4.8

## 4.5 การทดสอบก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิต่างๆ





รูปที่

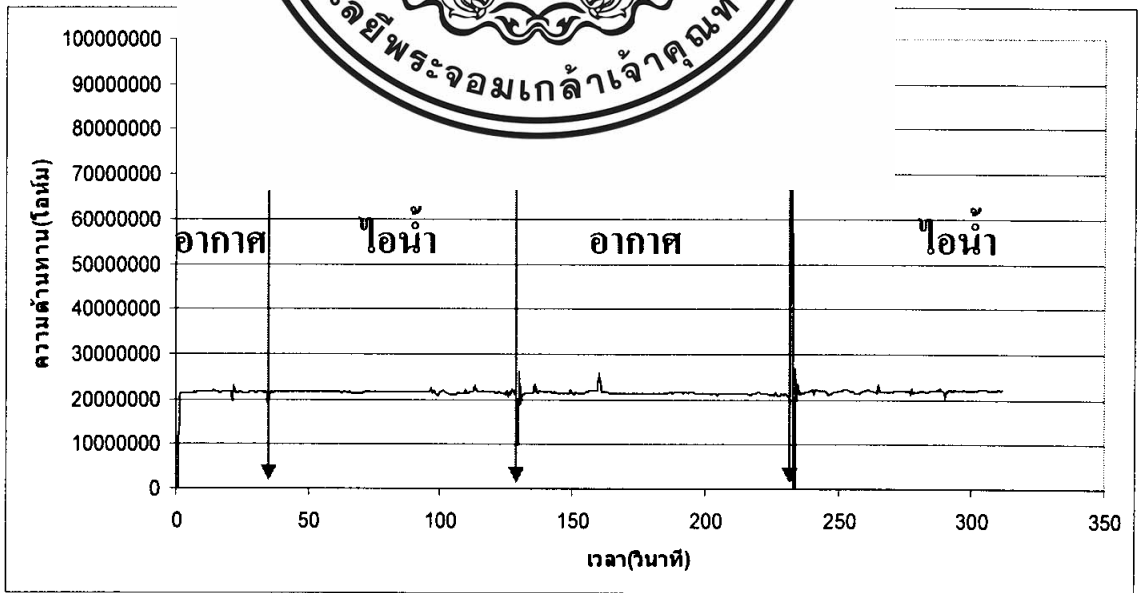
Ferrocene :  $\text{SnCl}_2$

4.6 การทดสอบ

ใช้วิธี

อุณหภูมิห้อง

ก็กลายเป็นไอที่



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocene :  $\text{SnCl}_2$  0.5% : 0.5% ต่อไอน้ำที่อุณหภูมิห้อง ( $28^\circ \text{C}$ )

## 4.7 การทดสอบก๊าซแอลพีจี

### 4.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- ก๊าซไนโตรเจน ทำหน้าที่เป็นก๊าซพาก๊าซแอลพีจีเข้ามาเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีตามที่ต้องการ

- DAQ board (Data acquisition board) เป็นบอร์ดที่ใช้เชื่อมสัญญาณการควบคุม Mass-Flow controller กับเครื่องคอมพิวเตอร์

- Mass-Flow controller ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน โดยมีการควบคุมอัตราการไหลมาที่  $5000 \text{ cm}^3/\text{min}$  (Standard condition) meter per minute: ลูกบาศก์เซนติเมตร

- เครื่อง  
เข้าไปในภา

ไหลของก๊าซแอลพีจี



- เครื่องมือวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้าของบริษัท Keithley รุ่น 2400 ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายเครื่องมือวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้า

- ภาชนะที่ใช้บรรจุเซ็นเซอร์ ซึ่งมีปริมาตร 886 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยภาชนะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าสำหรับต่อเชื่อมเซ็นเซอร์กับเครื่องมือวัด Keithley รุ่น 2400 ดังรูปที่ 4.16

- เครื่องคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ติดต่อเครื่องมือวัด Keithley รุ่น 2400 และ DAQ board ด้วย โปรแกรม LabView Version 7.1 ในเพื่อบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวเซ็นเซอร์เมื่อทดสอบด้วยก๊าซแอลพีจี

- เครื่องจ่ายกระแสให้ฮีตเตอร์ 2 เครื่อง

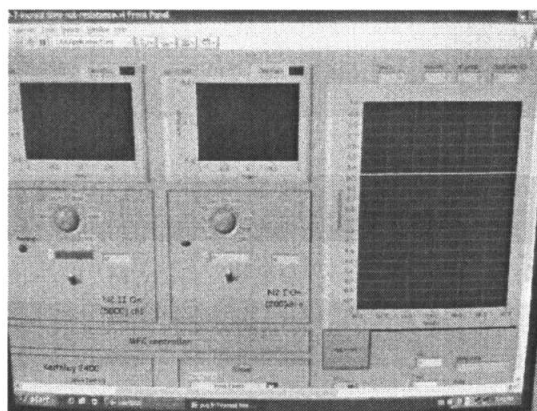
- ป้อนคู่มือและเครื่องแปลงไปใส่สไลด์ขนาด 3.5 นิ้ว เป็น 110 ไวลด์ ซึ่งทำหน้าที่ดูคู่มือ

แอลพีจีและก๊าซ



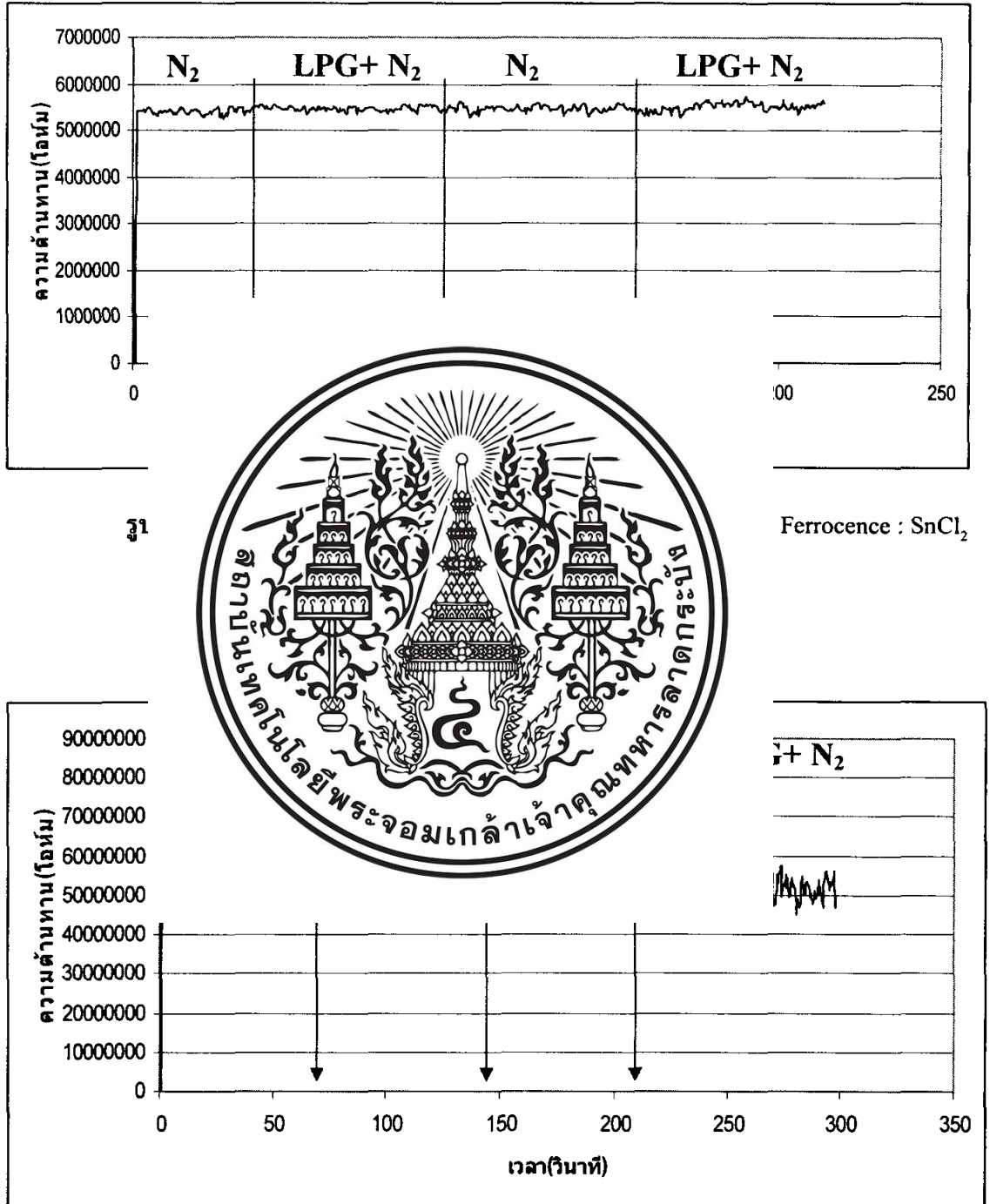
- โปรแกรม  
และปริมาณของ

ควบคุมการเปิดปิด



รูปที่ 4.18 ภาพโปรแกรม Lab View

## 4.7 ผลการทดสอบก๊าซแอลพีจี



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence :  $SnCl_2$  0.5% : 0.5% ต่อก๊าซ LPG 6.42% ที่อุณหภูมิ  $300^\circ C$

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์บนฐานรองอะลูมินา

จากผลการ SEM ที่อัตราขยายต่างๆกันจะเห็นว่าเกิด  $\text{SnO}_2$  ที่พื้นผิวของอะลูมินาลักษณะเป็นก้อนคล้ายกรวดกระจายอยู่ทั่วไปแต่มองไม่เห็นทิวส์ที่อัตราส่วนของ Ferrocene 0.5%  $\text{SnO}_2$  0.5% และที่อัตราส่วนของ Ferrocene 0.25%  $\text{SnO}_2$  0.75% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอัตราส่วนของ Ferrocene ที่อาจจะน้อยเกินไปในการใช้ปฏิกิริยา ซึ่งวิธีทดลองนี้คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง Ferrocene ให้มากขึ้น อาจเป็น 1% เท่า

#### 5.2 สรุปผลการ

จากการทดลอง  
แอมโมเนีย 30  
สามารถสรุปได้  
- ที่อัตราส่วน  
แอมโมเนียที่นี้  
- ที่อัตราส่วน  
เวลานานที่ควา  
กลับมา



ซี ความเข้มข้นของ  
ตามกราฟในบทที่ 4  
การเกิดปฏิกิริยากับ  
เมเวลาเรื่อยๆและใช้  
ทานเมื่อ recovery

- ที่อัตราส่วน Fe 0.5%  $\text{SnCl}_2$  0.5% จากกราฟท จะเห็นวามอัตราการเปลี่ยนแปลงที่คงที่คือ  
ใช้เวลาในการ recovery ที่ใกล้เคียงกันและมีค่าความต้านทานที่ recovery กลับมา ใกล้เคียงกัน

- ที่อัตราส่วน Fe 0.75%  $\text{SnCl}_2$  0.25% มี sensitivity มากที่สุด ใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงน้อย  
แต่เมื่อ recovery กลับมาความต้านทานจะลดลงทุกครั้งและใช้เวลานานในการกลับ ไปที่ค่า ความ  
ต้านทานเริ่มต้น

#### 5.3 การทดสอบก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟผลการทดลองในบทที่ 4 ที่อุณหภูมิ  $0^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}, 100^\circ\text{C}$  สามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิ  
เพิ่มขึ้นจะทำให้เซ็นเซอร์มีอัตราการวัดที่ดีขึ้น ซึ่งจากผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่  
อุณหภูมิสูงๆได้

#### 5.4 การทดสอบน้ำ ( $H_2O$ )

จากการวัดไม่มีการตอบสนองต่อเซ็นเซอร์ สรุปได้ว่าที่อุณหภูมิห้องจะไม่มีการตอบสนองต่อไอน้ำในขดทดลองที่ใช้เซ็นเซอร์ของสารละลายที่อัตราส่วน Ferrocene 0.5 %  $SnCl_2$  0.5 % น้ำ 10 cc อุณหภูมิ 28°C

#### 5.5 การทดสอบก๊าซแอลพีจี

จากกราฟที่อุณหภูมิ 28°C และ 300°C สรุปได้ว่า เซ็นเซอร์ของสารละลายที่อัตราส่วน Ferrocene 0.5 %  $SnCl_2$  0.5 % % N, 1000 sccm LPG 68.6 sccm ไม่มีการตอบสนอง



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ทรงศักดิ์ น้อยทรัพย์, “การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์อย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ” ปรินญาณิพนธ์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548, หน้า 48-74
- [2] “ท่อนาโนคาร์บอน ”, <http://www.technologymedia.com/articledetail.asp?arid=2484&pid=257>
- [3] วิกิจ ชื่นใจดี, “การสร้างแอม โมเนียเซ็นเซอร์ โดยใช้ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์” ปรินญาณิพนธ์ สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] ศรีสัชชา เจริญศักดิ์  
สุริชัย ชัยสิทธิ์  
L
- [5] สุริชัย ชัยสิทธิ์  
L
- [6] S. Iijima, N



ดอกไชด์-ท่อนาโน  
ครอิเล็กทรอนิกส์  
หน้า 6-41  
เบ้โดยวิธี CVD”,