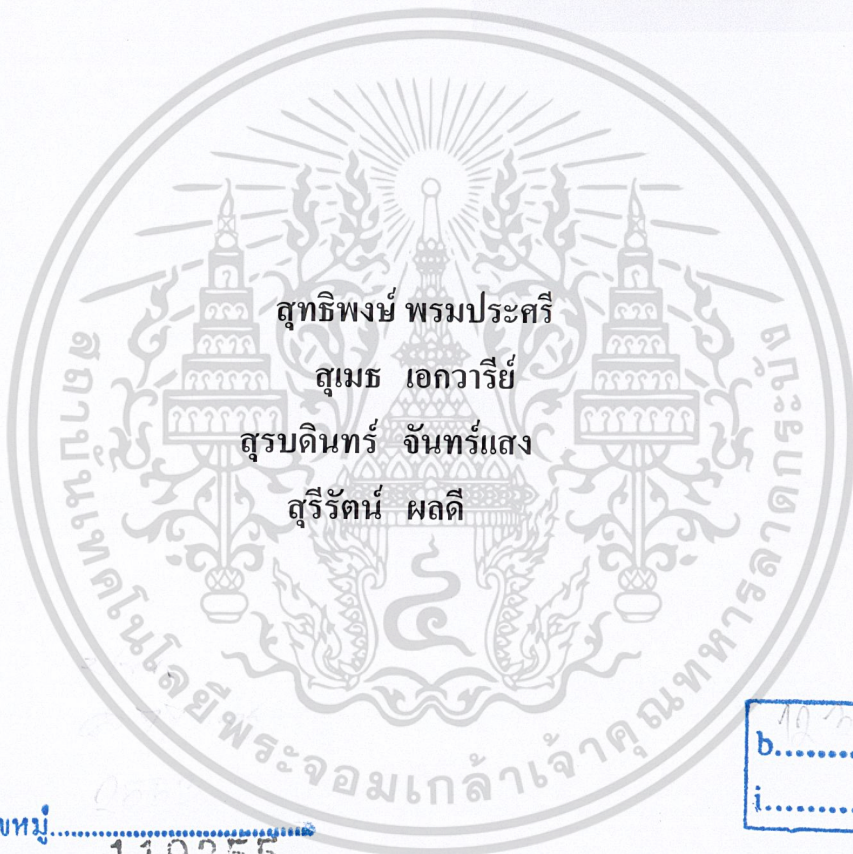


เซนเซอร์แอลกอฮอล์ด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์

ALCOHOL SENSOR BY CARBON NANOTUBES



T119355



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 119355  
วัน,เดือน,ปี - 7.S.A. 2554

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เรื่อง เซนเซอร์แอลกอฮอล์ด้วยคาร์บอนนาโนทิวส์

ALCOHOL SENSOR BY CARBON NANOTUBES

ผู้จัดทำ

- |                           |              |          |
|---------------------------|--------------|----------|
| 1.นายสุทธิพงษ์ พรหมประศรี | รหัสนักศึกษา | 50011714 |
| 2.นายสุเมธ เอกวารีย์      | รหัสนักศึกษา | 50011752 |
| 3.นายสุรบดินทร์ จันทร์แสง | รหัสนักศึกษา | 50011755 |
| 4.นางสาวสุริรัตน์ ผลดี    | รหัสนักศึกษา | 50011766 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เซนเซอร์แอลกอฮอล์ด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์

นายสุทธิพงษ์ พรหมประศรี	รหัส 50011714
นายสุเมธ เอกวารีย์	รหัส 50011752
นายสุรบดินทร์ จันทรแสง	รหัส 50011755
นางสาวสุรียรัตน์ ผลดี	รหัส 50011776
รศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2553	

## บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการนำเสนอการสร้งเซ็นเซอร์แอลกอฮอล์โดยการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ใช้เป็นตัวเซ็นเซอร์ สามารถสังเคราะห์ด้วยเตาความร้อนแบบเทอร์มอลซีวีดี(Thermal CVD) ลงบนฐานรองที่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบอยู่ โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์และอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนในการนำพาไอระเหยของแอลกอฮอล์มายัง (chamber) ที่ใช้ห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้เซนเซอร์ที่สามารถตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิในขณะการตรวจวัด เพื่อให้เซนเซอร์แอลกอฮอล์ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

# ALCOHOL SENSOR BY CARBON NANOTUBES

Mr.Sutthipong Promprasri 50011714

Mr.Sumeth Ekwaree 50011752

Mr.Surabadin Jansaeng 50011755

Miss.Sureerat Phondee 50011776

Assoc.Prof.Dr.Toempong Phetchkul Advisor

Academic Year 2010

## Abstract

This project present the alcohol sensor creation by carbon nanotube (CNTs) which synthesized via thermal CVD in to catalized  $\text{SiO}_2$  plate that used alcohol substrate. The synthesis parameters including with temperature, synthesis time and Nitrogen flow rate that take alcohol steam to the reaction chamber. We should control the temperature when check the chemical steam foe the high performance sensor.

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้จากความอนุเคราะห์ของรศ.ดร. เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้และคำปรึกษา ตลอดจนแนวทางในการดำเนินงานขอขอบคุณหนังสือ ตำรา รวมทั้งวิทยานิพนธ์ทุกฉบับที่ให้ข้อมูลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ และขอขอบคุณนักศึกษา ปริญญาโท นางสาวอัสสุชล แสงนวล(พีเบส) เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ และแนวทางการแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้นรวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกกลุ่มที่ให้ความร่วมมือในทุกเรื่องที่ต้องการช่วยเหลือ



สุทธิพงษ์ พรหมประศรี  
สุเมธ เอกวารีย์  
สุรบดินทร์ จันทร์แสง  
สุรรัตน์ ผลดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 นาโนเทคโนโลยี.....	4
2.1.1 ประวัตินาโนเทคโนโลยี.....	7
2.1.2 ความสำคัญของนาโนเทคโนโลยี.....	8
2.1.3 สาขาของนาโนเทคโนโลยี.....	9
2.1.4 ตัวอย่างผลงานจากนาโนเทคโนโลยี.....	9
2.2 หลักการเกิดท่อนาโนคาร์บอน.....	10
2.2.1 การค้นพบท่อนาโนคาร์บอน.....	10
2.2.2 รูปแบบโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน.....	11
2.2.3 ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน.....	12
2.2.4 ทฤษฎีการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน.....	13
2.2.5 วิธีสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	15
2.2.6 คุณสมบัติเชิงท่อนาโนคาร์บอน.....	20
2.2.7 การประยุกต์ใช้งานท่อนาโนคาร์บอน.....	22

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3 ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับเซนเซอร์เคมี .....	26
2.3.1 หลักการพื้นฐานของท่อนาโนคาร์บอนสำหรับเซนเซอร์เคมี.....	27
2.3.2 กลไกการดูดซับก๊าซของท่อนาโนคาร์บอนและกลไกการนำไฟฟ้า ของเซนเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอนที่เกี่ยวข้อง.....	28
2.4 เซนเซอร์.....	33
2.4.1 นิยามเซนเซอร์.....	33
2.4.2 ก๊าซเซนเซอร์.....	33
บทที่ 3 กระบวนการทดลอง.....	35
3.1 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	35
3.2 กระบวนการโฟโตลิโกราฟี.....	36
3.3 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา และการทำขั้วไฟฟ้าโดยการสัปดาห์เตอริง.....	39
3.4 กระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	42
3.5 กระบวนการสร้างเซนเซอร์แอลกอฮอล์ด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	45
4.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนตามเงื่อนไขต่างๆ.....	45
4.2 การนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้เป็นเซนเซอร์เคมี.....	47
4.3 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ของเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอน	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	67
บรรณานุกรม.....	69

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจับตัวกับโมเลกุลของแก๊ส.....	4
2.2 ขนาดของสิ่งต่างๆ ในหน่วยนาโนเมตร.....	5
2.3 เฟืองขนาดนาโน.....	6
2.4 ภาพถ่าย STM ของคลีนอิเล็กตรอน.....	6
2.5 Fullerene หรือ Bucky Ball.....	6
2.6 ประมาณการมูลค่าตลาดนาโนเทคโนโลยีของประเทศญี่ปุ่น.....	8
2.7 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน.....	11
2.8 แบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน.....	12
2.9 ภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM).....	13
2.10 การสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบ VLS mechanism.....	14
2.11 แสดงการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน.....	15
2.12 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยกระบวนการตกตะกอนไอเคมี ด้วยความร้อน.....	16
2.13 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีการเติบโตแบบแบ่งเฟส.....	17
2.14 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยกระบวนการตกตะกอนไอสารเคมี โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	17
2.15 แสดงชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากการเติมและไม่เติมโลหะคะตะลิสต์ ในกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ.....	18
2.16 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์.....	19
2.17 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของท่อนาโนคาร์บอน.....	20
2.18 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสภาวะสุญญากาศ.....	21
2.19 ใช้ท่อนาโนคาร์บอนมาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพ.....	22
2.20 แสดงภาพรวมการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้.....	23

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิตชันที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนในจอแสดงภาพแบบแบนของ Northwestern University.....	24
2.22 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของการประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวในทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนาม .....	24
2.23 แสดงโพรบวัดท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของ NASA Ames Research Center.....	25
2.24 แผนภาพแสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบน plane praphene และ CNTs.....	27
2.25 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ NO <sub>2</sub> กับ SWNT.....	28
2.26 พลังงานการดูดกลืนทางเคมีและทางฟิสิกส์ โดยแบบจำลอง Lennard-Jones มีระยะระหว่างพื้นผิวทั้งสอง $\nabla E_A$ คือพลังงานการกระตุ้นในการดูดกลืนทางเคมี.....	29
2.27 ปริมาณการดูดกลืนก๊าซที่อุณหภูมิต่างๆ.....	30
2.28 ท่อนาโนคาร์บอนที่มีตรวมกันหลายๆท่อ (bundle).....	30
2.29 แบบจำลอง AI/CNT sensor ก่อนก๊าซจะดูดซับบนก๊าซเซนเซอร์.....	32
2.30 แบบจำลอง AI/CNT sensor ขณะก๊าซจะดูดซับบนก๊าซเซนเซอร์.....	32
2.31 แสดงส่วนประกอบของก๊าซเซนเซอร์.....	34
3.1 การเตรียมแผ่นสำหรับสร้างขั้วฉนวน.....	36
3.2 แมสส์ที่ 1 สำหรับสวดลายของขั้วไฟฟ้าทองแดง.....	37
3.3 แมสส์ที่ 2 สำหรับสวดลายของขั้วไฟฟ้าทองแดง.....	37
3.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแมสส์ที่หนึ่ง.....	38
3.5 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแมสส์ที่สอง.....	39
3.6 กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับสร้างขั้วโลหะทองแดง.....	40
3.7 กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับเคลือบโลหะคะตะไลต์นิกเกิล.....	40
3.8 ภาพถ่ายของเครื่องสปัตเตอร์ริงสำหรับเคลือบคะตะไลต์และขั้วโลหะ.....	41
3.9 แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปัตเตอร์.....	41
3.10 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	42
3.11 โครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโซน.....	43
3.12 ภาพถ่ายเตาความร้อนสามโซนที่ใช้ในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์.....	44
4.1 ภาพถ่าย SEM แสดงรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้.....	47

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แผนภาพระบบการวัดแอลกอฮอล์.....	48
4.3 ภาพถ่ายระบบสำหรับตรวจวัดก๊าซ.....	50
4.4 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ650°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา15นาที.....	50
4.5 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ650°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา 30 นาที.....	51
4.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ650°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา60นาที.....	52
4.7 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ650°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา15นาที.....	53
4.8 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ650°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา30นาที.....	54
4.9 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ650°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา60นาที.....	55
4.10กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ700°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา15นาที.....	56
4.11 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ700°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา30นาที.....	57
4.12 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัด ไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ700°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา60นาที.....	58
4.13กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัด ไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ700°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา15นาที.....	59
4.14กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัด ไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ700°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา30นาที.....	60
4.15 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัด ไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ700°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา60นาที.....	61

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

วิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ในระดับนาโนจะเป็นผู้บุกเบิกเทคโนโลยีในอนาคต และเป็นศาสตร์ที่สำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยี มูลนิธิวิทยาศาสตร์ (National Science Foundation : NSF) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้พยากรณ์ไว้ว่า ในปี ค.ศ. 2015 ตลาดนาโนเทคโนโลยีทั่วโลกจะมีขนาดเติบโต ถึง 1 ล้านล้านเหรียญสหรัฐฯ (40 ล้านล้านบาท) จากปัจจุบัน 1 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ในส่วนของตลาดนาโนเทคโนโลยีภายในประเทศญี่ปุ่น พบว่าผลการประมาณมูลค่าตลาดในปี ค.ศ. 2010 จะสูงกว่า 25 ล้านล้านเยน (8 ล้านล้านบาท) แนวโน้มของตลาดนาโนเทคโนโลยีข้างต้นเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสำคัญของนาโนเทคโนโลยีต่อความรุ่งเรืองทางเศรษฐกิจโลกในอนาคต

ปี ค.ศ. 1959 ศาสตราจารย์ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Feynman) นักฟิสิกส์ผู้ที่ได้ชื่อว่าเป็นบิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี แห่งสถาบันเทคโนโลยีแคลิฟอร์เนีย (California Institute of Technology) ได้กล่าวปาฐกถาเรื่อง ยังมีทางขยับขยายอีกมากในระดับจุลภาค (There's plenty of room at the bottom) ความว่า “สักวันหนึ่งเราจะสามารถประกอบและผลิตสิ่งต่าง ๆ ขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอมด้วยความแม่นยำและเท่าที่ข้าพเจ้ารู้ ไม่มีกฎทางฟิสิกส์ใดๆ แม้แต่หลักแห่งความไม่แน่นอนที่จะมาขัดขวางความเป็นไปได้”<sup>[1]</sup> ซึ่งเป็นการบรรยายที่กระตุ้นแรงบันดาลใจเกี่ยวกับการทำนายความเป็นไปได้ และขีดความสามารถของเทคโนโลยีระดับนาโน เมื่อปี ค.ศ. 1974 ศาสตราจารย์โนริโอะ ทานิกูชิ (Norio Taniguchi) แห่งมหาวิทยาลัยวิทยาศาสตร์โตเกียวเป็นคนแรกที่ใช้คำว่า “Nanotechnology” โดยนาโนเทคโนโลยี หมายถึง เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้างหรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมากๆ ในระดับนาโนเมตร (1-100 นาโนเมตร) โดยจุดมุ่งหมายสูงสุดของนาโนเทคโนโลยีก็คือความสามารถที่จะสร้างและจัดเรียงอนุภาคต่างๆ ได้ตามความต้องการ เพื่อสร้างสารหรือโครงสร้างของสารในแบบใหม่ๆ ที่ให้คุณสมบัติพิเศษที่อาจจะไม่เคยมีมาก่อน นาโนเทคโนโลยีแบ่งออกเป็น 3 สาขา คือ เทคโนโลยีชีวภาพนาโน (Nanobiotechnology) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีชีวภาพนาโน เช่น การพัฒนาไบโอเซนเซอร์ หรือหัวตรวจชีวภาพ การปรับโครงสร้างระดับโมเลกุลของยาที่สามารถหวังผลการมุ่งทำลายชีวโมเลกุลที่เป็นเป้าหมายเฉพาะเจาะจง เช่น เซลล์มะเร็ง อุตสาหกรรมการแพทย์และสาธารณสุข ทางด้านการผลิตยาต่างๆ ก็ใช้พวคนาโนไบโอเทคโนโลยี ในการผลิตยาให้สามารถนำไปใช้เฉพาะที่ เฉพาะจุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) การประยุกต์ใช้ศาสตร์ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ และทำงานด้วยประสิทธิภาพสูง ตัวอย่างเช่น การพัฒนาระบบไฟฟ้าเครื่องกล ชูเปอร์จิว การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์และเซลล์เชื้อเพลิง การพัฒนา High-density probe storage device, ไมโครชิพของคอมพิวเตอร์ เป็นต้น และวัสดุนาโน (Nanomaterials) การประยุกต์ใช้ศาสตร์ด้านนาโนวัสดุ เช่น การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมการพัฒนาฟิล์มพลาสติกนาโน คอมโพสิต ที่มีความสามารถในการสกัดกั้นการผ่านของก๊าซบางชนิดและไอน้ำ เพื่อใช้ทำบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุความสดของผักและผลไม้ และเพิ่มมูลค่าการส่งออก การใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์สังเคราะห์เพื่อเป็นส่วนผสมของวัสดุต่างๆ ทำให้วัสดุ แข็งแกร่ง ทนทาน และน้ำหนักเบาขึ้น เป็นต้น

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทสำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และวิศวกรรมมากยิ่งขึ้น การพัฒนาเทคโนโลยีในระดับนาโนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและกำลังได้รับความสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเตรียมวัสดุระดับนาโน หรือการเตรียมอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลงจนอยู่ในระดับโมเลกุล ซึ่งในปัจจุบันท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube, CNTs) เป็นวัสดุนาโนชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจอย่างมาก

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbonnanotubs; CNTs) คือ วัสดุที่มีรูปร่างเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ซึ่งประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุคาร์บอนเพียงธาตุเดียว ถูกค้นพบเป็นครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ.1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อสุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima)<sup>[2]</sup> การค้นพบนี้นับเป็นการเริ่มต้นที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์ และนักวิจัยต่างมีความสนใจศึกษาถึงโครงสร้าง คุณสมบัติ และวิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ตลอดจนวิธีการนำไปใช้ และการประยุกต์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนนี้มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ

การวิจัยนี้เริ่มจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยเตาความร้อนแบบเทอร์มอลซีวีดี (Thermal CVD) ซึ่งใช้แอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการสังเคราะห์ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เพื่อให้ได้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีความบริสุทธิ์สูง มีขนาดและลวดลายตามที่ต้องการ จากนั้นนำไปสร้างเซนเซอร์เคมีใช้ในการตรวจวัดไอเคมีซึ่งจะมีการควบคุมอุณหภูมิในขณะตรวจวัด เพื่อให้เซนเซอร์เคมีทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.3.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ท่อนานโนคาร์บอน
- 1.3.2 เพื่อศึกษาหลักการทํางาน และวิธีการสร้างเซนเซอร์แอลกอฮอล์

## 1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 1.3.1 สามารถสังเคราะห์ท่อนานโนคาร์บอนด้วยกระบวนการตกตะกอนไอเคมีด้วยความร้อน (Thermal CVD) ได้
- 1.3.2 เข้าใจหลักการทํางาน และวิธีการนำท่อนานโนคาร์บอนมาสร้างเป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ได้

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาการค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เรื่องท่อนานโนคาร์บอน กระบวนการสังเคราะห์ท่อนานโนคาร์บอนด้วยวิธี Thermal CVD หลักการทํางานของเซนเซอร์แอลกอฮอล์กระบวนการสร้างฐานรองซิลิกอนไดไฮด์ ฯลฯ
- 1.4.2 ทําการสังเคราะห์ท่อนานโนคาร์บอนด้วยกระบวนการตกตะกอนไอเคมีด้วยความร้อน (Thermal CVD) ลงบนแผ่นฐานรองซิลิกอนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบอยู่ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน
- 1.4.3 นำท่อนานโนคาร์บอนที่ได้มาใช้สร้างเซนเซอร์แอลกอฮอล์
- 1.4.4 ศึกษาในเรื่องหลักการ และวิธีการทดลองนำท่อนานโนคาร์บอนมาสร้างเป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์
- 1.4.5 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากกรวิจัย

- 1.5.1 สังเคราะห์ท่อนานโนคาร์บอนเพื่อนำไปสร้างแอลกอฮอล์ได้
- 1.5.2 สร้างเซนเซอร์แอลกอฮอล์ด้วยท่อนานโนคาร์บอนเพื่อให้วัดไอของแอลกอฮอล์ได้
- 1.5.3 มีความรู้ ความเข้าใจในหลักการ และวิธีการนำท่อนานโนคาร์บอนมาสร้างเซนเซอร์แอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ ตั้งแต่ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเรื่อมนาโนเทคโนโลยี ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวบ์ รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทฤษฎีการเติบโตของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานของคาร์บอนนาโนทิวบ์ในด้านต่างๆ ซึ่งจะขอกกล่าวต่อไป

#### 2.1 นาโนเทคโนโลยี

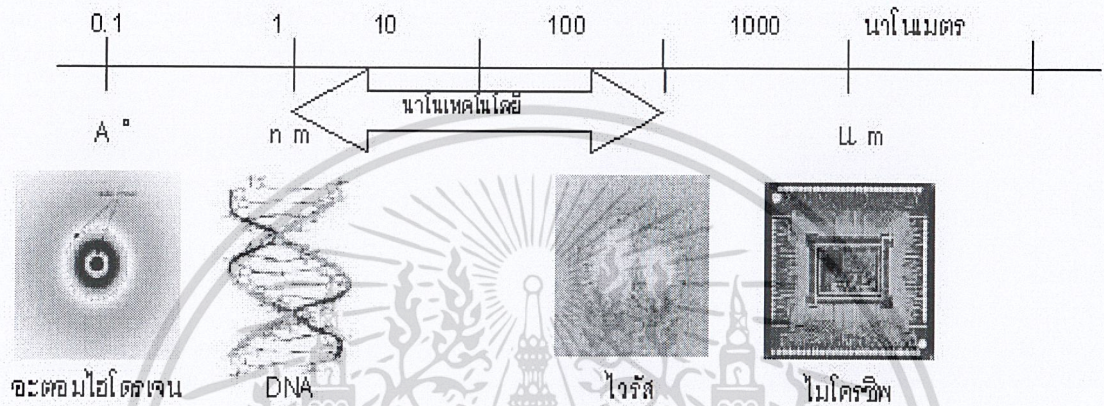
นาโนเทคโนโลยีเป็นสาขาวิชาที่ใหม่ (Multidisciplinary) ที่ต้องอาศัยความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจากหลายสาขาวิชารวมเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในงานทางวัสดุศาสตร์ (Nanomaterial) อิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) และวิทยาศาสตร์ชีวภาพ (Nanobiotechnology) ก่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ๆที่ได้รับการออกแบบและการควบคุมตั้งแต่การจัดเรียงอะตอมหรือโมเลกุล ที่มีขนาดหนึ่งในพันล้านส่วนของหนึ่งเมตร ไปจนกลายเป็นชิ้นส่วนขนาดใหญ่ คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbonnanotubes; CNTs) เป็นวัสดุที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน<sup>[3-5]</sup> เนื่องจากมีคุณสมบัติหนึ่งคือสามารถดูดซับแก๊สหรือสารเคมี เช่น  $N_2, H_2, Ar, NH_3$ , เอทานอล, เมทานอล เป็นต้น ซึ่งสามารถเลือกนำมาประยุกต์ใช้ทำเป็นเซนเซอร์เคมีได้



รูปที่ 2.1 ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจับตัวกับโมเลกุลของแก๊ส

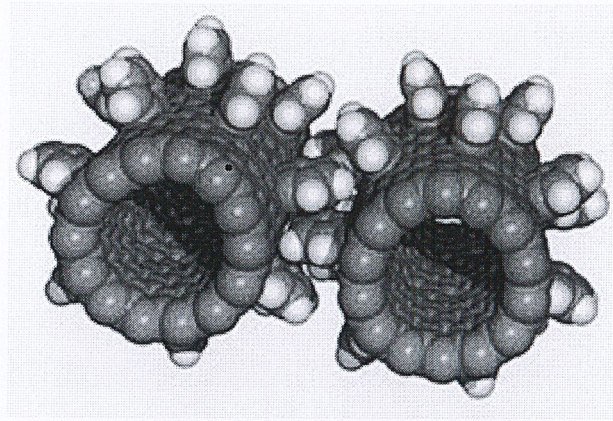
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้างหรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) รวมถึงการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมากๆ เช่น การจัดอะตอมและ โมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้



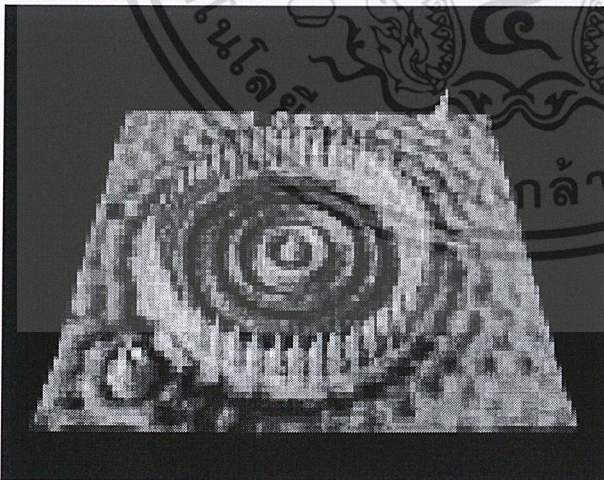
รูปที่ 2.2 ขนาดของสิ่งต่างๆ ในหน่วยนาโนเมตร

นาโนศาสตร์ (Nanoscience) คือ วิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา วัสดุ อินทรีย์ อนินทรีย์ และรวมไปถึงสารชีวโมเลกุล ที่มีโครงสร้างสามมิติ ยาว กว้าง สูง ด้านใดด้านหนึ่งอยู่ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร โดยวัสดุชนิดใดก็ตาม ถ้ามีมิติทั้งสามเล็กกว่า 100 นาโนเมตร วัสดุชนิดนั้นก็จะถูกเรียกว่า สาม-ดี วัสดุนาโน (3-D nanomaterial) ถ้ามีแค่ สอง หรือ หนึ่งมิติ ที่เล็กกว่า 100 นาโนเมตร ก็จะถูกเรียกว่าวัสดุ สอง-ดี (2-D) และ หนึ่ง-ดี (1-D) ตามลำดับ คุณสมบัติของวัสดุนาโนจะแตกต่างจากวัสดุนาโนขนาดใหญ่ (bulk materials) ไม่ว่าจะเป็คุณสมบัติ ทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ล้วนแล้วแต่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว ดังนั้นถ้าพูดถึง นาโนศาสตร์ ก็จะเป็นการสร้างหรือศึกษาวัสดุที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร โดยผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ จะได้วัสดุชนิดใหม่หรือรู้คุณสมบัติที่แตกต่าง และน่าสนใจ โดยคุณสมบัติเหล่านั้นจะถูกอธิบายด้วยทฤษฎีทางควอนตัม (quantum theory)

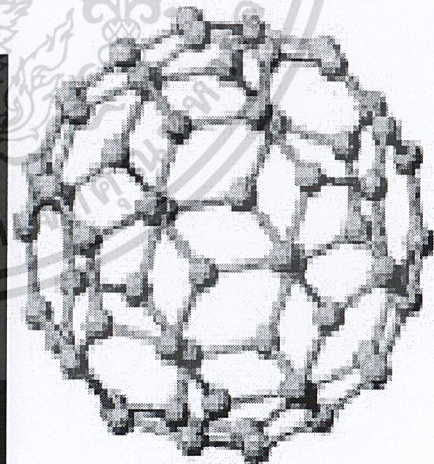


รูปที่ 2.3 เฟืองขนาดนาโน

ศักยภาพที่แท้จริงของนาโนเทคโนโลยีเริ่มเห็นได้ชัดเมื่อมีการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์ที่สามารถส่องกราดทะลุในระดับนาโนเมตรได้ ซึ่งก็คือ Scanning Tunneling Microscope (STM) ในปี ค.ศ. 1981 ภาพตัวอย่างในรูปที่ 2.3 คือคลื่นของอิเล็กตรอนที่กำลังแผ่กระจายวงออก จากนั้นในปี ค.ศ. 1985 ได้มีการ ค้นพบโครงสร้างโมเลกุลรูปแบบใหม่ของคาร์บอน นั่นคือ ฟูลเลอรีน (Fullerene) หรือ Bucky Ball ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอน 60 อะตอม ดังแสดงในรูปรูปที่ 2.5 จากนั้นมานาโนเทคโนโลยีก็พัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งทางด้านวัสดุศาสตร์ อิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจนเทคโนโลยีชีวภาพ



รูปที่ 2.4 ภาพถ่าย STM ของคลื่นอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.5 Fullerene หรือ Bucky Ball

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 ประวัติของนาโนเทคโนโลยี

เมื่อ 3,500 ล้านปีที่แล้ว สิ่งมีชีวิตเซลล์แรกได้ถือกำเนิดขึ้น เซลล์ดังกล่าวถือได้ว่าเป็นจักรกลชีวภาพ (biomachines) ที่มีขนาดอยู่ในช่วงของนาโน โดยสามารถเพิ่มจำนวนตนเองและหาแหล่งพลังงานเพื่อใช้ในการดำรงชีวิตของตนเองได้<sup>[6]</sup>

ค . ศ . 1905 อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยที่ค้นพบว่าโมเลกุลของน้ำตาลมีขนาดประมาณ 1 นาโนเมตร

ปีค.ศ. 1959 นักฟิสิกส์ผู้ที่อาจกล่าวได้ว่าเป็นบิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี คือ ศาสตราจารย์ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Feynman) แห่งสถาบันเทคโนโลยีแคลิฟอร์เนีย (California Institute of Technology) โดยเขาได้กล่าวปาฐกถาเรื่อง “ยังมีทางขยับขยายอีกมากในระดับจุลภาค (There’s plenty of room at the bottom)” ซึ่งเป็นการบรรยายที่กระตุ้นแรงบันดาลใจเกี่ยวกับการทำนายความเป็นไปได้ และขีดความสามารถของเทคโนโลยีระดับนาโน ซึ่งเป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์ทุกคนควรจะตระหนักสนใจอย่างจริงจัง และให้ความสำคัญเกี่ยวกับเทคโนโลยีนี้ให้มากขึ้น โดยในตอนหนึ่งของปาฐกถาได้กล่าวไว้ว่า “หลักการทางฟิสิกส์เท่าที่ข้าพเจ้ามองเห็น ไม่ได้ห้ามความเป็นไปได้ที่จะทำอะไรกับสิ่งของในระดับอะตอม และการกระทำดังกล่าวก็ไม่ได้เป็นการพยายามที่จะฝืนกฎเกณฑ์ทางวิทยาศาสตร์แต่อย่างใด แต่ที่จริงแล้วเป็นสิ่งที่สามารถจะทำได้ในเชิงหลักการ เพียงแต่ในทางปฏิบัตินั้นยังทำไม่ได้ เป็นเพราะว่าเครื่องมือต่างๆ ที่เรามีใช้กันนั้นมีขนาดใหญ่เกินไป”

ปี ค.ศ. 1974 (พ.ศ. 2517) คำว่า “นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology)” ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรก โดยนักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อ โนริโอะ ทานิกูชิ (Norio Taniguchi) แห่งมหาวิทยาลัยวิทยาศาสตร์แห่งกรุงโตเกียว (Tokyo Science University) ประเทศญี่ปุ่น เขาใช้คำว่านาโนเทคโนโลยีนี้เพื่อที่จะบรรยายถึงว่าเป็น “เทคโนโลยีการผลิตที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงเป็นพิเศษ และก้าวข้ามพรมแดนของเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบัน อย่างเช่น ความแม่นยำที่สุดและถูกต้องที่สุดในระดับขนาด 1 นาโนเมตร ”

ค . ศ . 1985 โรเบิร์ต เคิร์ล (Robert F. Curl) ริชาร์ด สมอลลี (Richard E. Smalley) และ ฮาร์โรลด์ โครโต (Harold W. Kroto) ค้นพบโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนแบบใหม่ นอกจากเพชรและถ่าน นั่นคือ ฟูลเลอร์รีน (Fullerene) หรือ บัคกี้ บอลล์ (Bucky ball) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 60 อะตอมเชื่อมต่อกันเป็นรูปร่างคล้ายกับลูกฟุตบอลและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 1 นาโนเมตร

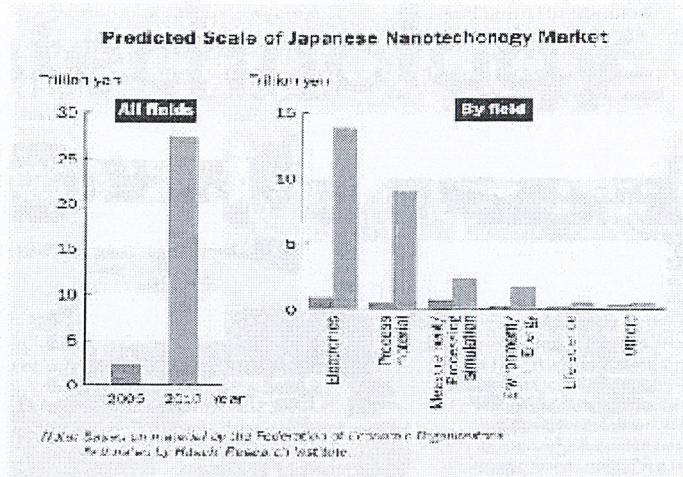
ค . ศ . 2000 รัฐบาลของประธานาธิบดี บิล คลินตัน ได้ผลักดันให้เกิดโครงการริเริ่มทางนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (National Nanotechnology Initiative) ของสหรัฐฯ ขึ้นมา ทำให้เกิดการสนับสนุนทุนวิจัยทางด้านนาโนเทคโนโลยีขึ้นมาเป็นประวัติการณ์ และทำให้ทั่วโลกเกิดความตื่นตัวเกี่ยวกับการพัฒนานาโนเทคโนโลยีขึ้นมาเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 ความสำคัญของนาโนเทคโนโลยี<sup>[7]</sup>

นายบิล เกลน ผู้ช่วยประธานาธิบดีด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของสหรัฐฯ ได้แถลงต่อสภาองเกรส เมื่อ ค.ศ. 1998 ไว้ว่า “หากข้าพเจ้าถูกถามว่าวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์สาขาใดจะเป็นผู้บุกเบิกในอนาคตอันใกล้นี้ ข้าพเจ้าจะระบุวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ในระดับนาโน” คำแถลงดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของนาโนเทคโนโลยีในสายตาของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้จัดตั้งโครงการริเริ่มนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (National Nanotechnology Initiative : NNI) เพื่อเป็นจักรกลสำคัญของการพัฒนานาโนเทคโนโลยี ในปี ค.ศ. 2004 NNI ได้เสนอของบประมาณด้านนาโนเทคโนโลยีสูงถึง 847 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ (ประมาณ 36,500 ล้านบาท) ในขณะที่รัฐบาลประเทศญี่ปุ่น ก็ลงทุนทางด้านนี้สูงถึง 30,000 ล้านบาท ในปี ค.ศ. 2003 ยุคที่สถานะทางเศรษฐกิจของประเทศญี่ปุ่นอยู่ในภาวะถดถอย แต่รัฐบาลกลับทุ่มทุนมหาศาลในการพัฒนานาโนเทคโนโลยีสูงถึงขนาดนี้ แสดงให้เห็นว่าผลประโยชน์ในระยะยาวที่จะได้รับจากการพัฒนานาโนเทคโนโลยี ต้องมากมายมหาศาลอย่างแน่นอน

มูลนิธิวิทยาศาสตร์ (National Science Foundation : NSF) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้พยากรณ์ ไว้ว่า ตลาดนาโนเทคโนโลยีทั่วโลกจะมีขนาดเติบโตใหญ่ ถึง 1 ล้านล้านเหรียญสหรัฐฯ (40 ล้านล้านบาท) ในปี ค.ศ. 2015 จากปัจจุบัน 1 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ในส่วนของตลาดนาโนเทคโนโลยีภายในประเทศญี่ปุ่น พบว่าผลการประมาณมูลค่าตลาดในปี ค.ศ. 2010 จะสูงกว่า 25 ล้านล้านเยน (8 ล้านล้านบาท) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แนวโน้มของตลาดนาโนเทคโนโลยีข้างต้นย่อมตอกย้ำความสำคัญของเทคโนโลยีสาขานี้ต่อความรุ่งเรืองทางเศรษฐกิจ ดังนั้นประเทศไทยจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องหันมาสนใจและพัฒนานาโนเทคโนโลยีอย่างจริงจัง ข่าวน่ายินดีคือคณะรัฐมนตรีกำลังพิจารณาความเป็นไปได้ และแนวทางในการพัฒนานาโนเทคโนโลยี รวมทั้งการพัฒนาทรัพยากรบุคคล และการส่งเสริมความร่วมมือระหว่างภาครัฐ สถาบันการศึกษา และภาคเอกชนอย่างจริงจัง



รูปที่ 2.6 ประมาณการมูลค่าตลาดนาโนเทคโนโลยีของประเทศญี่ปุ่น

### 2.1.3 สาขาของนาโนเทคโนโลยี<sup>[8]</sup>

นาโนเทคโนโลยีแบ่งออกเป็น 3 สาขา คือ

1. เทคโนโลยีชีวภาพนาโน (Nanobiotechnology) เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ ด้านเทคโนโลยีชีวภาพนาโน เช่น การพัฒนา ไบโอะเซนเซอร์ หรือหัวตรวจชีวภาพ และสารวินิจฉัยโรค โดยใช้วัสดุชีวโมเลกุล การปรับโครงสร้างระดับโมเลกุลของยาที่สามารถหวังผลการมุ่งทำลายชีวโมเลกุลที่เป็นเป้าหมายเฉพาะเจาะจง เช่น เซลล์มะเร็ง การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางในการส่งผ่านสารบำรุงเข้าใต้ชั้นผิวหนัง ได้ดียิ่งขึ้น อุตสาหกรรมการแพทย์ และสาธารณสุขทางการผลิตยาต่างๆ ก็ใช้พวกรนาโนไบโอเทคโนโลยี ในการผลิตยาให้สามารถนำไปใช้เฉพาะที่เฉพาะจุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น

2. นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ด้าน นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (ไฮเทค ) เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพ และทำงานด้วยประสิทธิภาพสูง ตัวอย่างเช่น การพัฒนาระบบไฟฟ้าเครื่องกล ซูเปอร์จิว การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ และเซลล์เชื้อเพลิง การพัฒนา High-density probe storage device, ไมโครชิพ ของคอมพิวเตอร์ อย่างที่ผ่านมาจะใช้เทคโนโลยีพวงไมโครชิพ แต่ในโลกอนาคตอันใกล้นี้จะเข้าสู่ของเทคโนโลยีนาโนชิพแล้ว ซึ่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของคอมพิวเตอร์ให้เร็วขึ้น และมีประสิทธิภาพสูง กินพลังงานน้อย ขนาดของเครื่องก็จะเล็กลง สามารถพกพาไปได้สะดวกขึ้น เป็นต้น

3. วัสดุนาโน (Nanomaterials) การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ ด้านนาโนวัสดุ เช่น การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในอุตสาหกรรมการพัฒนาฟิล์มพลาสติกนาโนคอมโพสิต ที่มีความสามารถในการสกัดกั้นการผ่านของก๊าซบางชนิดและไอน้ำ เพื่อใช้ทำบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุความสดของผักและผลไม้ และเพิ่มมูลค่าการส่งออก การผลิตผลอนุภาคนาโนมาใช้ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และไวรัสหรือทำให้ไม่เปียกน้ำ การใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์สังเคราะห์เพื่อเป็นส่วนผสมของวัสดุต่างๆ ทำให้วัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งแรง ทนทาน และน้ำหนักเบาขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ตัวถังรถ เป็นต้น ทำให้ประหยัดพลังงานในด้านของการกีฬาจะมีไม้เทนนิส ไม้แบดมินตันหรือว่าในการใช้ผลิตภัณฑ์บางอย่างที่ทำให้เสื้อผ้าสามารถกันน้ำกันเปื้อนดับกลิ่น เป็นต้น

#### 2.1.4 ตัวอย่างผลงานจากนาโนเทคโนโลยี

- คอนกรีตชนิดหนึ่งใช้เทคโนโลยีนาโน ใช้ Biochemical ทำปฏิกิริยาย่อยสลายกับมลภาวะที่เกิดจากรถยนต์ เช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์ ในประเทศอังกฤษได้เริ่มมีการใช้เทคโนโลยีนี้ในการสร้างถนนและอุโมงค์ต่างๆ เพื่อลดมลภาวะบนท้องถนน และขณะเดียวกันเทคโนโลยีนาโน ทำให้อุณหภูมิคอนกรีตมีขนาดเล็กมาก ฝุ่น และแบคทีเรีย ไม่สามารถฝังตัวในเนื้อคอนกรีตได้ ทำให้อาคารที่ใช้คอนกรีตชนิดนี้ดูใหม่เสมอและยังคงไม่สะสมเชื้อโรค

- ใช้นาโน ด้วยการฝังอนุภาคนาโนเงิน (silver nanoparticle) ทำให้เกิดปฏิกิริยากับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียลดลง

- ไม้เทนนิสนาโนผสมท่อคาร์บอนนาโน เป็นตัวเสริมแรง ทำให้แข็งแรงขึ้น

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทสำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และวิศวกรรมมากยิ่งขึ้น การพัฒนาเทคโนโลยีในระดับนาโนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและกำลังได้รับความสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเตรียมวัสดุระดับนาโน หรือการเตรียมอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลงจนอยู่ในระดับโมเลกุล ซึ่งวัสดุชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจอย่างมากในปัจจุบันก็คือ ท่อนาโนคาร์บอน

## 2.2 ท่อนาโนคาร์บอน

(carbon nanotube, CNT) เป็น โมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของโครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดเล็ก สร้างมาจากวัสดุที่เป็นธาตุพื้นฐานสำคัญที่สุดของมนุษย์นั่นก็คือ คาร์บอน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดังกล่าวอยู่ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) และมีความยาวถึงประมาณ 10 ไมโครเมตร ท่อนาโนคาร์บอนจึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่า มีคุณสมบัติที่แข็งแรงกว่าเหล็กกล้า แต่ในขณะเดียวกันก็มีความยืดหยุ่นและน้ำหนักเบา<sup>[9]</sup>

### 2.2.1 การค้นพบท่อนาโนคาร์บอน

ปี ค.ศ.1980 ทีมวิจัยนำโดย ศาสตราจารย์ ริชาร์ด สมอลลีย์ (Richard Smalley) ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยไรซ์ (Rice University) รัฐเท็กซัส ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้สังเคราะห์ฟูลเลอร์ (Fullerene C60) ที่มีโครงสร้างคล้ายกรง ของอะตอมคาร์บอนที่ประกบกันด้วยผิวหน้าทรงหกเหลี่ยมและห้าเหลี่ยม โมเลกุลของฟูลเลอร์มีคาร์บอน 60 อะตอมซึ่งหลังจากนั้นมีการตั้งชื่อเป็น

"Buckminsterfullerene" ตามชื่อของสถาปนิกที่ออกแบบ โดมลักษณะคล้าย C60 ซึ่งมีหน้าห้าเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

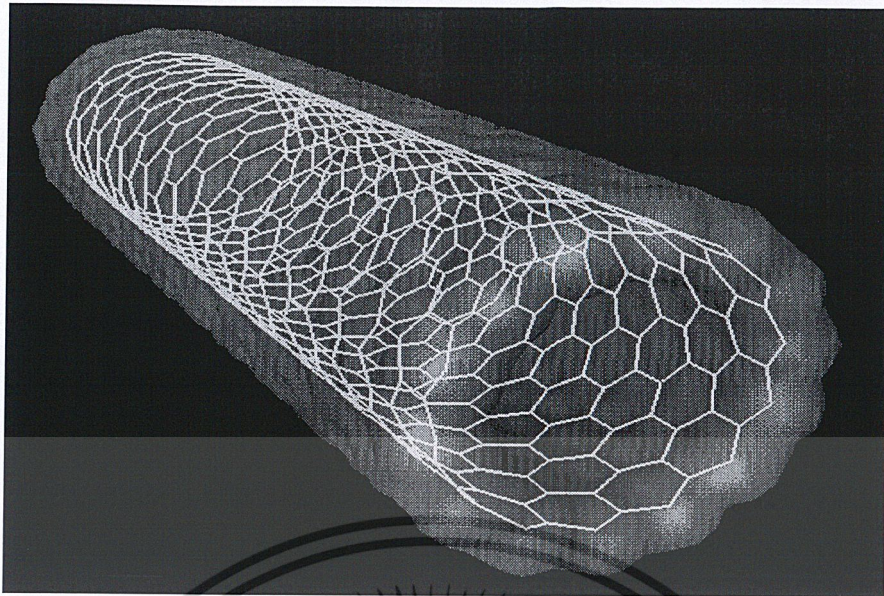
อยู่ชิดกับหน้าหกเหลี่ยมคล้ายกับลูกฟุตบอล สองถึงสามปีต่อมาการค้นพบนี้นำไปสู่การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน (nanocarbon tube)

ปี ค.ศ. 1991 ภายหลังจากค้นพบฟูลเลอร์รีน 6 ปี โดยนักวิจัยของบริษัท เอ็นอีซี (NEC) ในห้องทดลองที่เมืองสึกูบา (Tsukuba) ประเทศญี่ปุ่น ชื่อ ซุมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) ขณะที่เขาใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมากตรวจสอบเขม่าสีดำที่ได้จากการเตรียมฟูลเลอร์รีนจากกระบวนการยิงด้วยอิเล็กตรอน (electron arc discharge) แล้วสังเกตเห็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับรากไม้ เป็นเส้นยาว บาง และจับกันอยู่เป็นกลุ่ม แต่ที่น่าสนใจคือ วัสดุนี้มีโครงสร้างของอะตอมที่เป็นระเบียบและสมมาตร ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบครั้งแรกนั้นคือท่อชนิดผนังหลายชั้น จากนั้นในปี ค.ศ. 1993 อิจิมาและนักวิจัยของบริษัทไอบีเอ็ม (IBM) ชื่อ ดอน เบทูน (Don Bethune) ได้นำเสนอรายงานวิจัยว่าสามารถสร้างท่อนาโนผนังชั้นเดียวได้ โดยการเติมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อยในระหว่างการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อป้องกันการม้วนตัวด้วยตัวเองของแผ่นแกรไฟต์ และป้องกันการเกิดเป็นฟูลเลอร์รีนขนาดเล็ก จากนั้นท่อนาโนของคาร์บอนก็ได้รับความสนใจศึกษามากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างท่อนาโนคาร์บอนให้มีขนาดและคุณสมบัติตามที่ต้องการ รวมทั้งการนำท่อนาโนไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อีกด้วย

### 2.2.2 รูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) มีรูปร่างเป็นโครงตาข่ายของคาร์บอน ม้วนเชื่อมติดกันเป็นรูปทรงกระบอก และมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงไม่กี่นาโนเมตร ท่อนาโนคาร์บอน มีคุณสมบัติที่แข็งแรงและเหนียวกว่าเหล็กกล้า สามารถนำไฟฟ้าหรือกลายเป็นฉนวน (ไม่นำไฟฟ้า) ได้ ขึ้นอยู่กับทิศทางของแนวการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนผนังท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสายไฟจิ๋วในเครื่องใช้ไฟฟ้า (nanoelectronics) ใช้ทอเป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูงและทนทานกว่าไหมเทเนียม หรือผลิตเป็นแบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานนานนับสิบปี นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา เป็นต้น

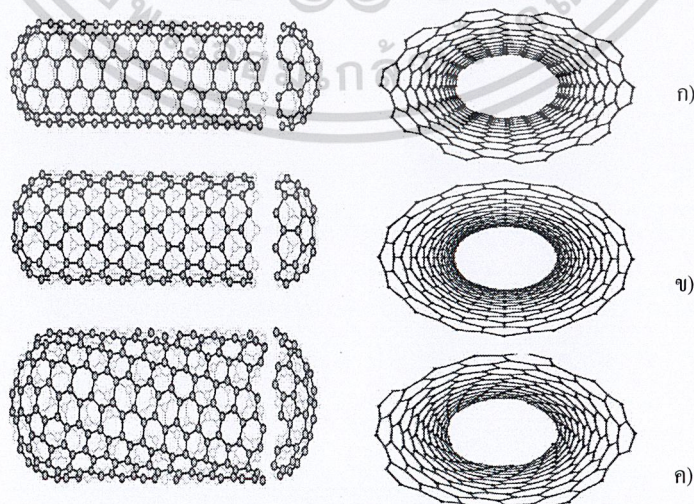
โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน มีโครงสร้างเป็นแบบโมเลกุลเดี่ยวที่มีลักษณะเป็นแถวยาวของคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นแนวยาวนับล้านๆ เท่าของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคาร์บอน โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) จะโค้งตัวม้วนเป็นแกนจากด้านหนึ่งไปบรรจบอีกด้านหนึ่ง ซึ่งนักเคมีมีแนวความคิดว่าท่อนาโนคาร์บอนนี้มีลักษณะเป็น monoelemental polymer (โพลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยธาตุเพียงชนิดเดียว ซึ่งแตกต่างจากโพลิเมอร์ที่พบโดยทั่วไปที่จะพบอะตอมของธาตุอื่นด้วย)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

2.2.3 ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน สามารถแบ่งท่อนาโนคาร์บอนออกเป็นสองชนิด คือ

(1) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single-walled Carbon Nanotubes; SWNTs)<sup>[10]</sup> มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง ซึ่งเหมือนการม้วนแผ่นแกรไฟต์ให้เป็นท่อทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางนั้นมีขนาด 0.4-2.0 nm ส่วนคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนนั้นไม่ว่าจะเป็นทางด้านไฟฟ้า กลศาสตร์ หรือทางเคมีนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของทิวป์ เช่น ชนิด (SWCNTs, MWCNTs) เส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะการม้วนของทิวป์ SWCNTs เป็นโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังชั้นเดียวเป็นรูปทรงกระบอก นอกจากนั้นยังสามารถแบ่งย่อยๆ ได้อีก 3 ชนิด ตามลักษณะการม้วนตัวของแผ่นกราฟิต์ ได้แก่ Armchair structure, Zigzag structure และ Chiral structure ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

ก) Armchair structure ข) Zig-zag structure และ ค) Chiral structure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon Nanotubes; MWNTs)<sup>[11]</sup> จะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ SWCNTs แต่จะมีลักษณะโครงสร้างภายในที่เป็นการซ้อนตัวของ SWCNTs ตั้งแต่ 2 ท่อขึ้นไป ลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก อดตามผนังของท่อมีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ โดยทุกท่อมีแกนร่วมกัน และมีระยะห่างระหว่างชั้นของท่อประมาณ 0.34-0.39 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างชั้นกราฟีนที่ซ้อนกันอยู่ในชั้นกราไฟต์ ลักษณะการซ้อนกันจะเหมือนกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกันนั้น จะมีค่า Energy gap และส่วนใหญ่ความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางจะแปรผกผันกับค่า Energy gap และส่วนใหญ่ความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกสุดประมาณ 10-15 นาโนเมตร ความยาว ความสมบูรณ์ของการเรียงตัว และการม้วนเกลียวที่แตกต่างกัน ไม่สามารถควบคุมอย่างแม่นยำได้ มีปริมาณจุดบกพร่องที่ค่อนข้างสูง ทำให้ความแข็งแรงต่ำกว่าท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นแบบผนังชั้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

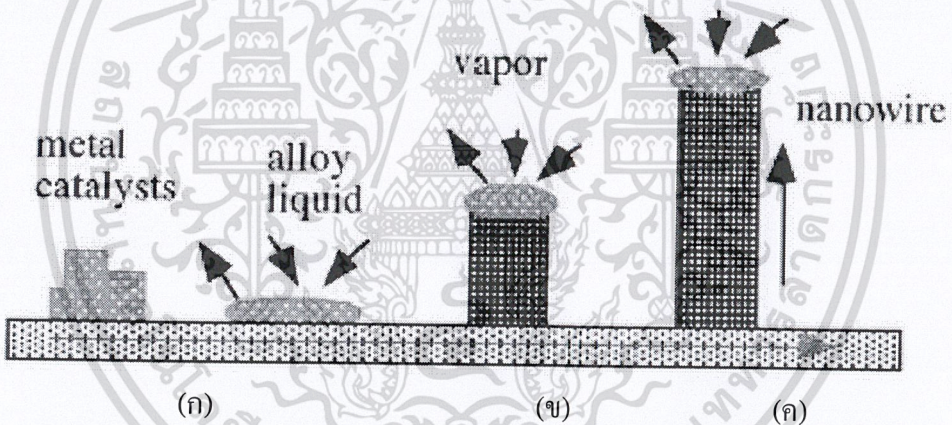
ก) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว, ข) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น

#### 2.2.4 ทฤษฎีการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน

การเติบโตของวัสดุนาโนโครงสร้าง 1 มิติ (one-dimensional nanostructures) ได้แก่ ท่อนาโน (nanotubes) เส้นใยนาโน (nanofibers) และเส้นนาโน (nanowires) นั้นมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกของวัสดุนาโนนั้นๆ ซึ่งเกิดจากกระบวนการนิวเคลียชัน (nucleation) และการเจริญเติบโตของสารจากสถานะก๊าซ (Vapor) ของเหลว (Liquid) หรือ ของแข็ง (Solid) เมื่อความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเข้าไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

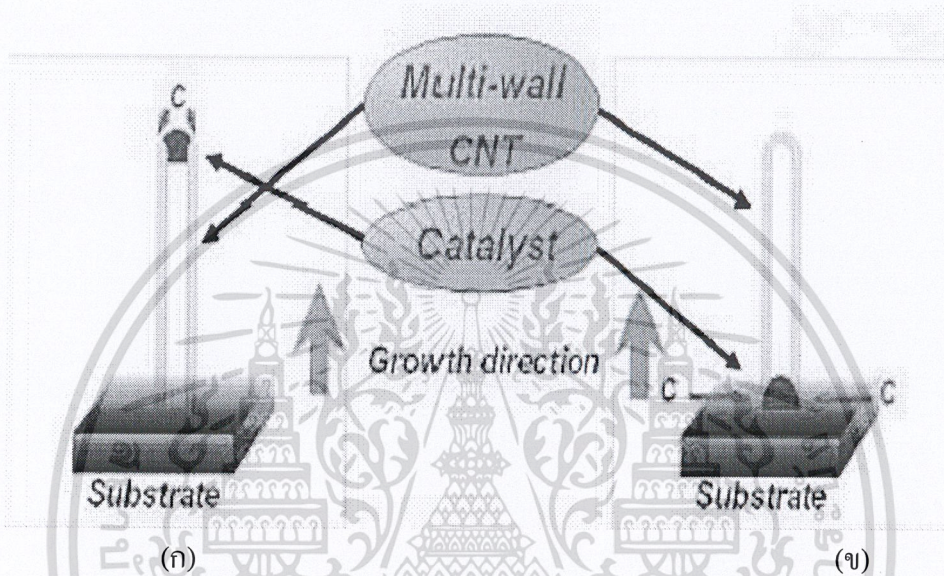
เข้มข้นของอะตอม ไอออน หรือนิวเคลียสของสารมีมากพอ จะเกิดการไหลไปรวมกันที่นิวเคลียสไอ (Nuclei) และเกิดกระบวนการนิวเคลียสเอชันเจริญเติบโตเป็นวัสดุนาโนโครงสร้าง 1 มิติขึ้นนั่นเอง โดยจะเรียกกลไกการเติบโตนี้ว่า กลไก VLS (Vapor-Liquid-Solid mechanism; VLS Mechanism) สำหรับการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนโดยอาศัยกลไก VLS นี้ อธิบายได้โดยเมื่อโลหะคะตะลิสต์ (metal catalyst) ที่อยู่ในสถานะของแข็ง เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลว และเมื่อให้แหล่งกำเนิดคาร์บอนที่อยู่ในสถานะก๊าซไหลเข้ามา โลหะคะตะลิสต์ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวจะเป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอน โดยอะตอมคาร์บอนจะตกสะสมและแพร่ (diffuse) เข้าไปในผิวโลหะคะตะลิสต์ ทำให้เกิดโลหะผสมระหว่างคาร์บอนและโลหะคะตะลิสต์ที่อยู่ในสถานะของเหลว (alloy liquid) ขึ้น และเมื่ออะตอมคาร์บอนตกสะสมและแพร่มากขึ้นจนอิ่มตัวอย่างสุดขีด จะทำให้เกิดการตกตะกอนของอะตอมคาร์บอนที่ผิวรอบบริเวณรอยต่อพื้นผิวของของแข็งและโลหะผสมที่เป็นของเหลว (solid-alloyliquid interface) เป็นโดมของฟูลเลอร์ีนส์ (fullerene dome) และสร้างตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอนในที่สุด<sup>[12,13]</sup> ดังแสดงในรูปที่ 2.10



- รูปที่ 2.10 การสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบ VLS mechanism แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ
- (ก) Alloying เป็นขั้นตอนที่โลหะคะตะลิสต์ได้รับความร้อนและมีไอของอะตอมคาร์บอนมาตกสะสมกลายเป็นโลหะผสมที่อยู่ในสถานะของเหลว
  - (ข) Nucleation เป็นขั้นตอนที่ไอของอะตอมคาร์บอนเกิดการตกสะสมที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างของแข็งและโลหะผสมที่เป็นของเหลว
  - (ค) Axial growth เป็นขั้นตอนการเจริญเติบโตเป็นท่อนาโน

โดยรูปแบบการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบ Base growth และ Tip growth ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างโลหะคะตะลิสต์กับแผ่นฐานรอง (substrate) ถ้าอันตรกิริยาระหว่างโลหะคะตะลิสต์กับฐานรองอ่อน (Weak substrate-catalyst interaction) การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนจะเป็นแบบ Tip growth โดยโลหะคะตะลิสต์จะอยู่ด้านบนของปลายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อ ดังแสดงในรูป 2.11(ก)แต่ถ้าอันตรกิริยาระหว่างโลหะคะตะลิสต์กับฐานรองรับแข็งแรง (Strongsubstrate-catalyst interaction) การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนจะเป็นแบบ Base growth โดยโลหะคะตะลิสต์จะอยู่ด้านล่างของท่อ ดังแสดงในรูป2.11(ข)โดยความสมบูรณ์ผลึกของท่อนาโนคาร์บอนนั้นขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของอนุภาคโลหะคะตะลิสต์ อุณหภูมิ และองค์ประกอบของก๊าซที่ใช้ระหว่างการสร้างตัวของท่อ ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนนั้นสามารถควบคุมได้จากขนาดของโลหะคะตะลิสต์



รูปที่ 2.11 แสดงการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน

(ก) แบบ Tip growth และ (ข) แบบ Base growth

จากกลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอนทั้งสองลักษณะ จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีจุดหลอมเหลวต่ำ เพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลวและโลหะตัวเร่งควรมีความสามารถในการละลายคาร์บอนที่ดีเพื่อให้อะตอมคาร์บอน สามารถละลายในโลหะตัวเร่งได้จำนวนมากๆ

โดยสรุปท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากมีบทเชิงประยุกต์มากมาย และมีกรรมวิธีการผลิตที่ใช้ต้นทุนต่ำ ในอนาคตการเลือกผลิตเฉพาะท่อนาโนคาร์บอนชนิดใดชนิดหนึ่ง (SWCNTหรือMWCNT) จะสามารถกระทำได้นอกจากนี้กลไกการคัดแยกท่อที่มีลักษณะการนำไฟฟ้าแบบโลหะหรือสารกึ่งตัวนำก็จะดีขึ้นด้วย ซึ่งการนำไปใช้งานสำหรับการประยุกต์ด้านต่างๆนั้นจำเป็นต้องเข้าใจถึงลักษณะทางกายภาพเป็นอย่างดี

## 2.2.5 วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน<sup>[14]</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

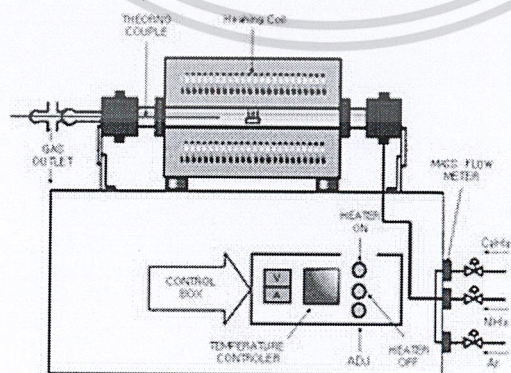
การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนนั้น มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ทั้งในด้านของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณ คุณภาพ และความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ โดยทั่วไปแล้วอาจแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลักๆ ได้แก่

### 2.2.5.1 ตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition ค่าย่อ; CVD)

เป็นวิธีที่ให้ความร้อนแก่ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน โดยก๊าซที่นิยมใช้คือ มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) และอะเซทิลีน ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) หรืออาจใช้แอลกอฮอล์ที่ระเหยได้ง่าย เช่น เมทานอล (methanol) และเอทานอล (ethanol) เป็นต้น โดยแหล่งความร้อนที่นิยมใช้ในการแยกโมเลกุลของก๊าซให้แตกตัวเป็นอะตอมคาร์บอนคือ พลาสมาหรือขดลวดความร้อน ซึ่งวิธีนี้ต้องอาศัยโลหะค้ำตะลิสต์ เช่น นิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ เป็นตัวช่วยให้เกิดการสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอน และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนอยู่ที่ประมาณ 650-900 องศาเซลเซียส ซึ่งวิธีนี้สามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้โดยการควบคุมขนาดของโลหะค้ำตะลิสต์และอัตราการไหลของก๊าซ ข้อดีของวิธีนี้ คือ สามารถทำได้ทั้งในบรรยากาศปกติและบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียมและอาร์กอน เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ในปริมาณมากและมีความบริสุทธิ์สูงอีกด้วย ซึ่งวิธีการตกสะสมไอเคมีนั้นมีอยู่หลายเทคนิคด้วยกัน คือ

#### (1) กระบวนการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition; Thermal CVD)

วิธีนี้จะใช้ เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ หรือโลหะผสมของทั้งสามชนิดนี้ เป็นตัวค้ำตะลิสต์เคลือบบนแผ่นฐานรอง ทำการเตรียมโลหะค้ำตะลิสต์ให้มีขนาดเล็กลงด้วยการนำไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูอริก (HF) จากนั้นนำโลหะค้ำตะลิสต์ที่ผ่านการเตรียมให้มีขนาดเล็กลงแล้วมาใส่ในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 750-1,050 องศาเซลเซียส โดยมีก๊าซไฮโดรคาร์บอน ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนและแอมโมเนีย ดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

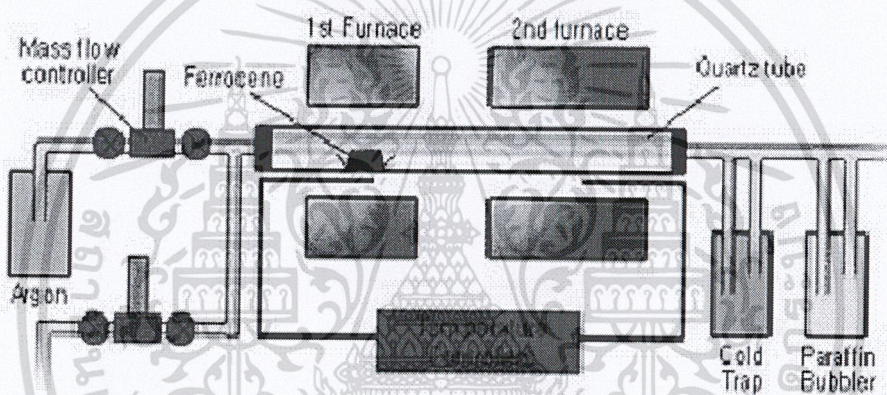
โดยกระบวนการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

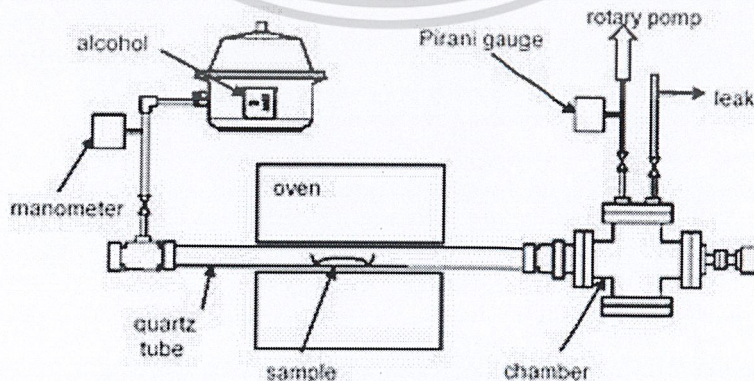
### (2) วิธีการเติบโตแบบแบ่งเฟส (Vapor Phase Growth)

วิธีนี้มีเตาเผา 2 เตา โดยที่เตาเผาแรกจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเตาเผาที่สอง และมีโลหะคะตะลิสต์วางอยู่ เมื่อปล่อยก๊าซไฮโดรคาร์บอนเข้าเตา ก็จะพาไอของโลหะคะตะลิสต์ที่ระเหยออกมาแล้วไปรวมตัวกันที่เตาเผาที่สอง และจัดเรียงตัวกันเป็นท่อนาโนคาร์บอนขึ้น ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนั้นจะทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน และท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้นมีทั้งชนิดผนังชั้นเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 นาโนเมตร และชนิดผนังหลายชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70-100 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีการเติบโตแบบแบ่งเฟส

### (3) กระบวนการตกสะสมไอสารเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (AlcoholCatalytic Chemical Vapor Deposition; ACVD)



รูป 2.14 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

โดยกระบวนการตกสะสมไอสารเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

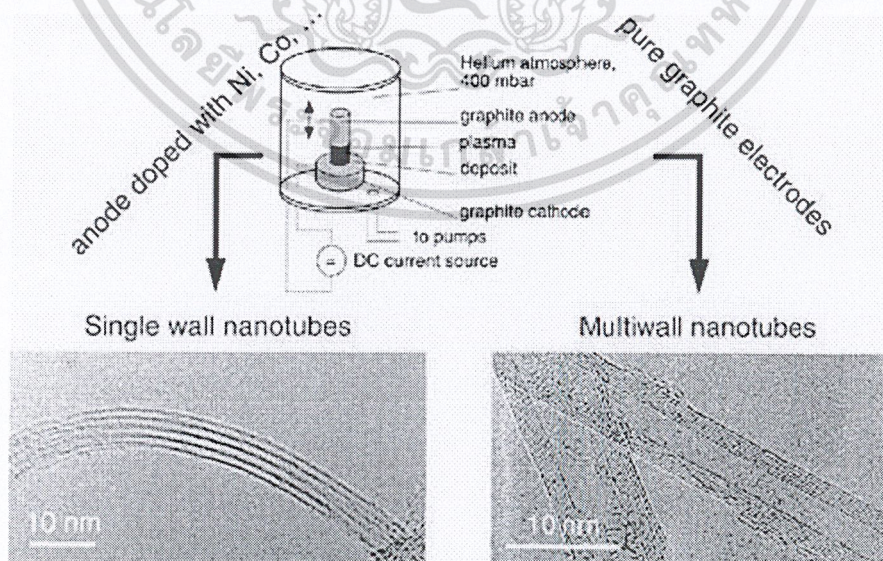
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีนี้เป็นวิธีที่กำลังได้รับความสนใจและพัฒนาเพื่อการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวในปริมาณมาก ความบริสุทธิ์สูง และประหยัด อาศัยปฏิกิริยาระหว่างแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลหรือ เอทานอลกับ โลหะคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก นิกเกิล หรือ โคบอลต์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดกระบวนการตกสะสมไอสารเคมีได้รวดเร็วยิ่งขึ้น สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นาโนเมตร และจากการที่สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส จึงสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวบนวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำได้ เช่น อุปกรณ์ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งส่วนมากจะใช้อะลูมิเนียมเป็นแม่แบบ เป็นต้น

### 2.2.5.2 วิธีอาร์คดิซชาร์จ (Arc Discharge)

วิธีอาร์คดิซชาร์จนั้นในช่วงแรกจะเป็นวิธีที่ใช้สังเคราะห์ฟูลเลอร์รีนส์ หรือ C60 ซึ่งต่อมาก็ได้มีการนำมาสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมและรู้จักกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเท่าที่มีการรับรองผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีนี้ จะทำได้ด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 50-120 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 18-40 โวลต์ ต่อก่อระหว่างแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่มีระยะห่างระหว่างแท่งประมาณ 1 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม และ อาร์กอน เป็นต้น ที่ความดันต่ำระหว่าง 50-700 มิลลิเมตรปรอท ความร้อนสูงที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจะทำให้เกิดสถานะพลาสมาขึ้น ทำให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนขึ้นตรงบริเวณกลางขั้วของแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ



รูปที่ 2.15 แสดงชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากการเติมและไม่เติมโลหะคะตะลิสต์

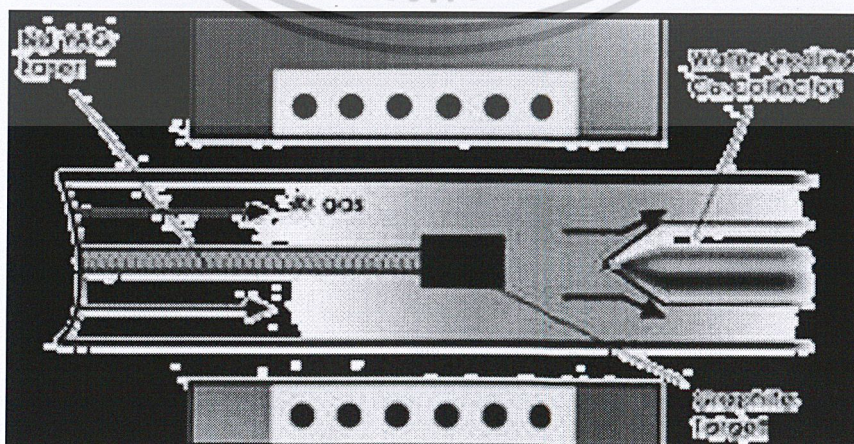
ในกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีอาร์คดิซชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่แตกต่างกัน จากการศึกษพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้นขึ้นอยู่กับของผสมระหว่างก๊าซอีเลียมและอาร์กอน เนื่องจากก๊าซอีเลียมและอาร์กอนมีสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (diffusion coefficient) และ สมบัติการนำความร้อน (thermal conductivity) ที่แตกต่างกัน ทำให้มีผลต่อความเร็วในการเกิดท่อนาโนคาร์บอน ส่งผลให้ขนาดของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้นมีขนาดที่แตกต่างกันไป ซึ่งการควบคุมขนาด ความยาว และปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้น อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของการเกิดสถานะพลาสมา และยังสามารถกำหนดชนิดของท่อนาโนคาร์บอนได้โดยผสมโลหะบางชนิดเข้าไปในแท่งแกรไฟต์เช่น เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ เป็นโลหะคะตะลิสต์เพื่อช่วยให้เกิดการสร้างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว อย่างไรก็ตามวิธีนี้ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเขม่าที่ประกอบด้วยท่อนาโนคาร์บอนและโลหะคะตะลิสต์ที่ผสมอยู่ในแท่งแกรไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ ซึ่งอาจมีความจำเป็นต้องทำการแยกโลหะคะตะลิสต์ และท่อนาโนคาร์บอนออกจากกันก่อนนำไปใช้ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับประเภทของการนำไปใช้งาน

### 2.2.5.3 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Ablation)

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์นี้ ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1995 โดยกลุ่มของ Smalley ที่ Rice University วิธีนี้จะใช้แสงเลเซอร์ที่ความเข้มแสงสูง (อาจเป็นห้วง (Pulse) หรือ ความยาวคลื่นต่อเนื่อง (Continuous)) ยิงไปยังเป้าซึ่งเป็นแกรไฟต์ ภายใต้สภาวะบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น อีเลียม และอาร์กอน เป็นต้น ที่ความดันต่ำประมาณ 500 มิลลิเมตรปรอท ในเตาเผาอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ให้อุณหภูมิจะขยายตัวและเย็นลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเทคนิคนี้จะคล้ายกับวิธีอาร์คดิซซาร์จตรงที่จะผสมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ เป็นโลหะคะตะลิสต์เพื่อช่วยให้เกิดการสร้างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว



รูปที่ 2.16 แผนภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

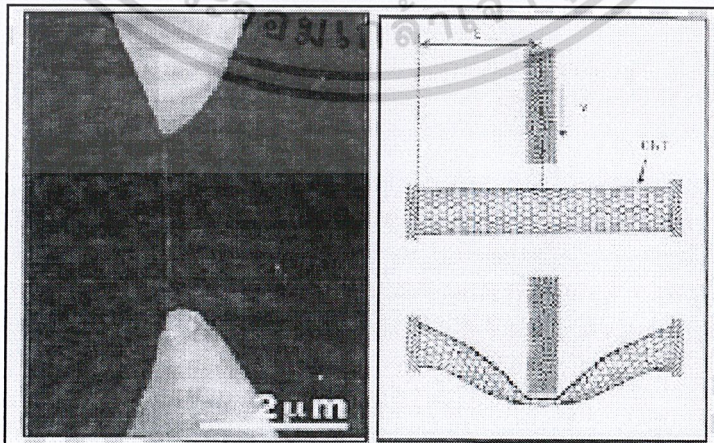
## 2.2.6 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน<sup>[15]</sup>

เป็นที่ทราบกันดีว่า ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายประการ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน เช่น ชนิดของท่อ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนตัวของท่อ

### 2.2.6.1 คุณสมบัติทางกล

เพชรซึ่งรู้กันดีว่ามีความแข็งแรงมากด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของกราฟไฟต์นั้นคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราฟไฟต์มีความแข็งแรงมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้าง CNTs ดังกล่าวรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้ CNTs แข็งแรงเพชรและกราฟไฟต์

ค่าความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ของ CNTs มีค่าสูงถึง 1 เทอราปาสคาล (TPa) หรือ 1000 กิกะปาสคาล (GPa) คงเป็นที่สงสัยว่า CNTs เล็กจิ๋วขนาดนั้นจะวัดได้อย่างไร วิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นนี้ทำได้หลายวิธีเช่น โดยอาศัย Thermal vibration หรือใช้ scanning force microscopy ไปงอ CNTs โดยยึดปลายหนึ่งไว้แล้ววัดการสั่นสะเทือนในสนามไฟฟ้าและมีการใช้ atomic force microscopy (AFM) จับ CNTs ทั้งสองข้างแล้วดึงจนขาดเพื่อหาความต้านทานแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 2.17(ก) ความแข็งแรงของ CNTs มีค่าอยู่ระหว่าง 11-63 Gpa ขณะที่ความแข็งแรงของเหล็กกล้าอัลลอยมีเพียง 2Gpa นอกจากนี้ SWCNTs สามารถยืดตัวได้ถึง 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่จะขาดออกจากกัน SWCNTs มีพื้นที่ผิวได้ถึง 1500 m<sup>2</sup>/g โดยมีความหนาแน่น 1.33 ถึง 1.40 g/cm<sup>3</sup> รูปที่ 2.17 (ข) ภาพแสดงการยืดหยุ่นที่ดีของ CNTs ขณะที่วัดความหนาแน่นด้วยความเร็วค่าหนึ่ง



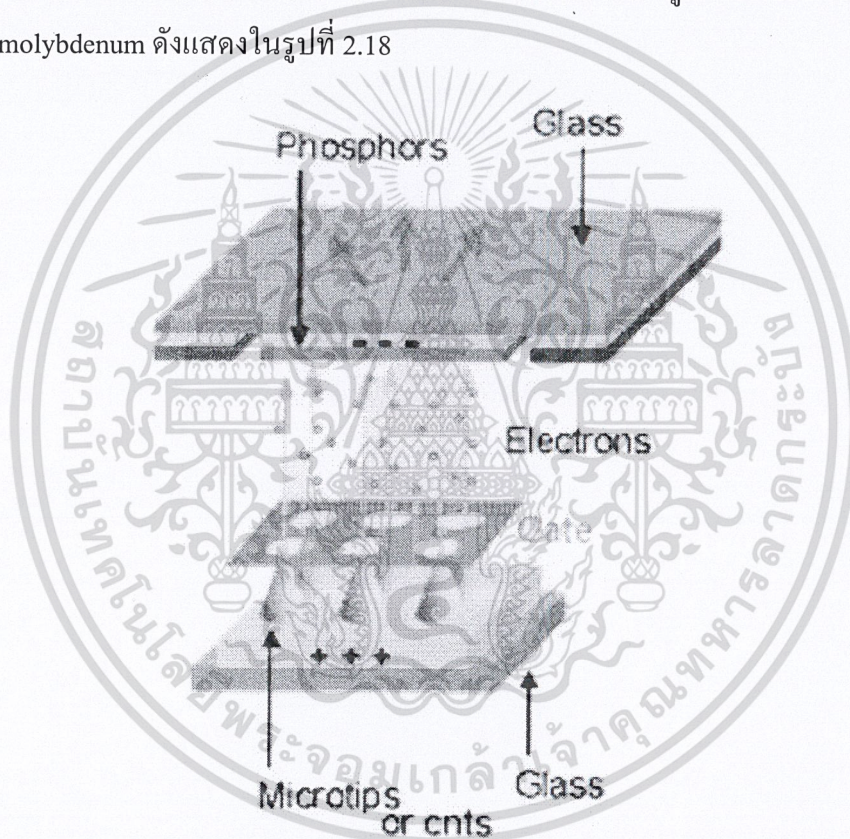
รูปที่ 2.17 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของท่อนาโนคาร์บอน

(ก) ภาพจาก SEM ของ CNT ที่อยู่ระหว่างปลายทั้งสองด้านของ AFM เพื่อวัดค่าความต้านทานแรงดึง

(ข) ภาพแสดงการยึดหยุ่นที่ดีของ CNT ขณะที่มียัดมาชนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง

### 2.2.6.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

CNTs มีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มัดหนึ่งของ CNTs สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง  $10^9$  A/cm<sup>2</sup> ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> นอกจากนี้แล้ว คุณสมบัติทางไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของ CNTs คือ สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสถานะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า เช่น จะกระตุ้น Phosphors ที่วางไว้ห่าง 1 mm จะใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว molybdenum ดังแสดงในรูปที่ 2.18



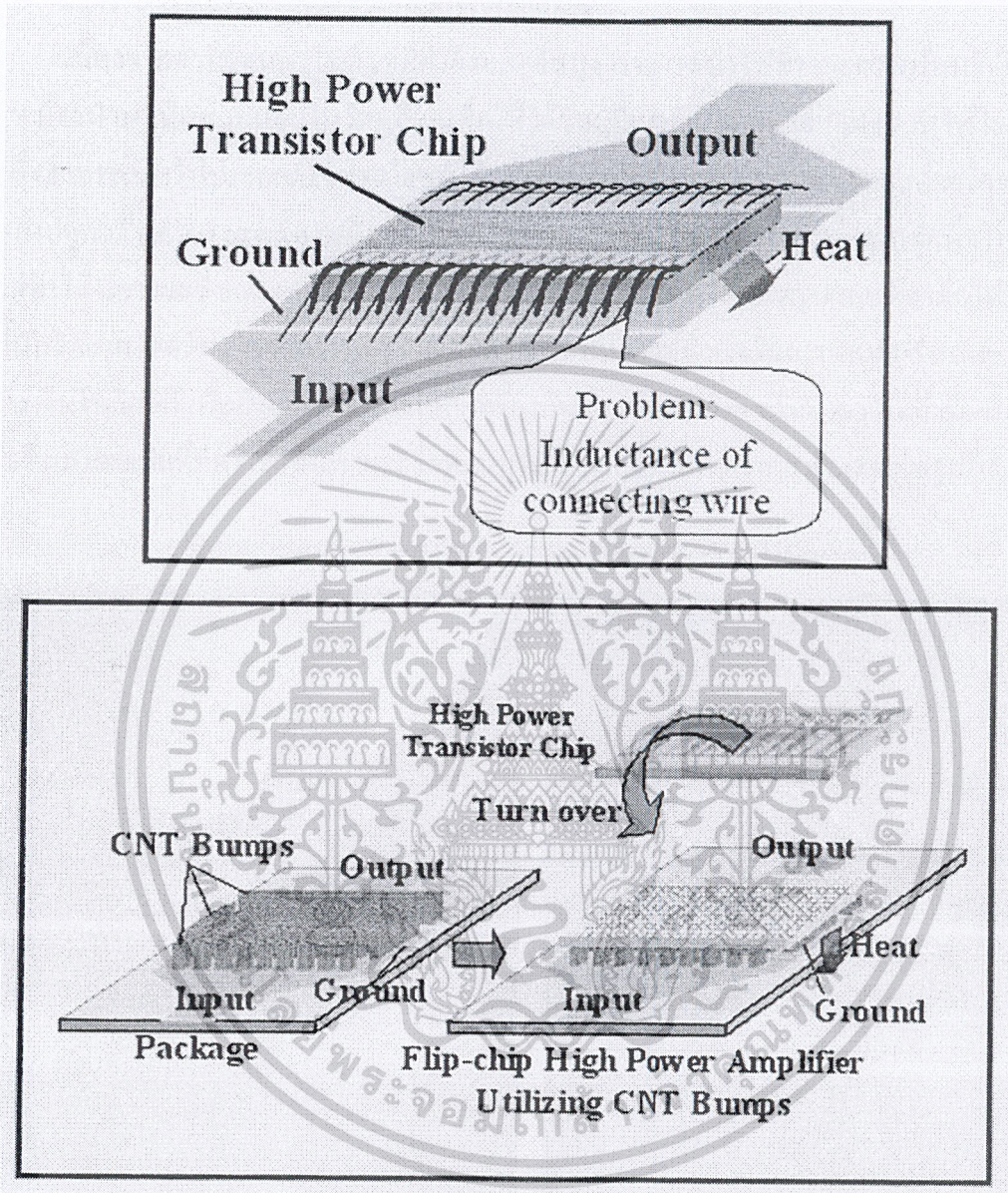
รูปที่ 2.18 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสถานะสุญญากาศ

### 2.2.6.3 คุณสมบัติทางความร้อน

ค่าความนำความร้อนของ CNTs สูงถึง 2000 W/mK โดยมีบางรายงานกล่าวว่า CNTs มีค่าการนำความร้อนได้ถึง 6000 W/mK เมื่อเปรียบเทียบกับเพชรที่มีค่าความนำไฟฟ้าเพียง 3320 W/mK นอกจากนี้ CNTs ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2800 °C ภายใต้สุญญากาศ และ 750 °C ในสถานะปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงกายภาพ ดังรูปที่ 2.19 เป็นการนำคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดีของท่อนาโนคาร์บอนมาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิปที่ใช้งานกำลังสูง

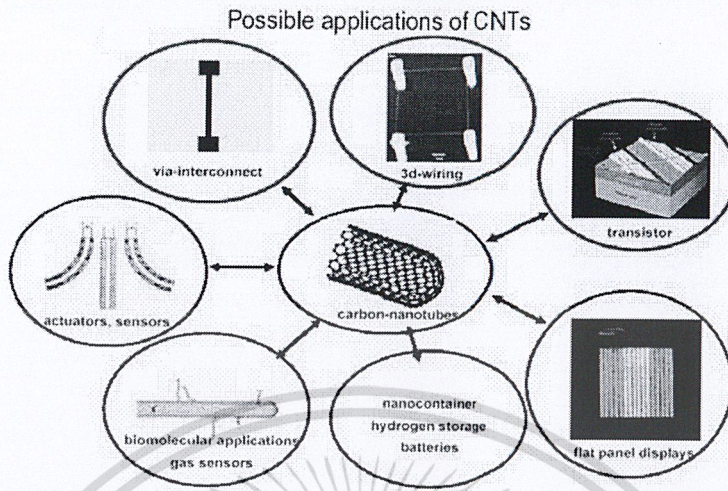


รูปที่ 2.19 ใช้ท่อนาโนคาร์บอนมาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิป

### 2.2.7 การประยุกต์ใช้งานท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำไปประยุกต์ในหลายๆ ด้าน เช่น อุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุผสมพลาสติกให้นำไฟฟ้า ตัวกักเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ตัวผสมกาวต่อเชื่อมชนิดนำไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ระดับโมเลกุล หัววัดแก๊ส หัววัด AFM ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โทรศัพทมือถือ วัสดุถ่ายเทความร้อน วัสดุเสริมความแกร่งในนาโนคอมพอสิต เส้นใยและสิ่งทอ ตัวรองรับคະตะลิสต์ และการประยุกต์ทาง Biomedical เป็นต้น



รูปที่ 2.20 แสดงภาพรวมการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้

### 2.2.7.1 ตัวเก็บพลังงาน (energy storage)

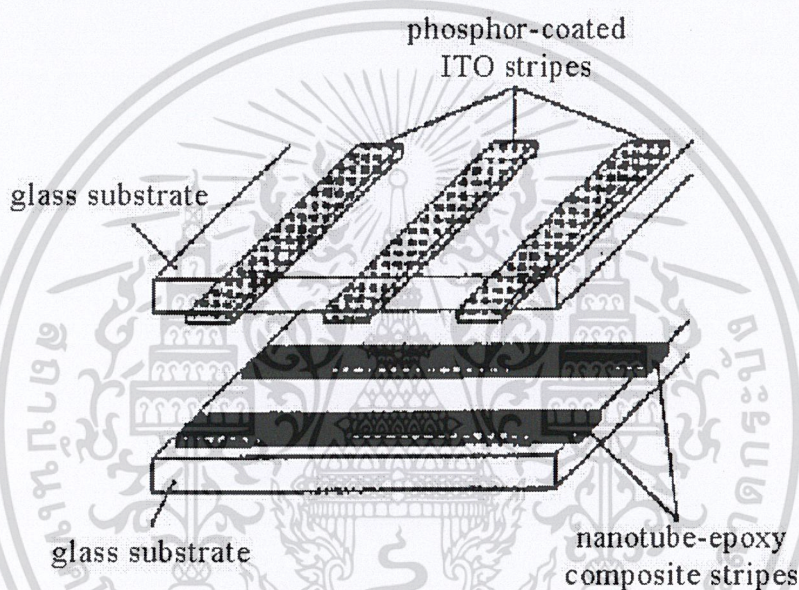
ขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่ทำจาก แกรไฟต์ วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และเส้นใยคาร์บอน นิยมนำมาใช้ในแบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cells) และการประยุกต์ทางขั้วไฟฟ้าเคมี ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้า โดยจาก idealNernstian behaviour พบว่า ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราการถ่ายเทอิเล็กตรอนมากที่สุด ดังนั้นจึงมีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้เป็นตัวเก็บพลังงาน เช่น เป็นตัวเก็บไฮโดรเจน (Hydrogen storage) เป็นตัวสอดแทรกของแบตเตอรี่ชนิดประจุลิเทียม (Lithium intercalation) และเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดขั้วไฟฟ้าเคมี (Electrochemical supercapacitors) เป็นต้น

### 2.2.7.2 อุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิชัน (field emission devices)

อาศัยหลักการที่ว่าถ้าของแข็งถูกวางไว้ในสนามไฟฟ้าที่สูงมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้ระดับเฟอร์มี (Fermi level) หลุดจากของแข็ง โดยจะทะลุผ่าน (tunneling) กำแพงศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของแข็ง (surface potential barrier) โดยกระแสไฟฟ้าที่แผ่ออกมา (emission current) นั้นขึ้นอยู่กับความแรงของสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวของของแข็งและค่าฟังก์ชันงาน (work function) โดยค่าของฟังก์ชันงานนั้นจะบอกถึงพลังงานที่ใช้ดึงอิเล็กตรอนจากสถานะสูงสุดที่อิเล็กตรอนถูกยึดไว้ (highest bounded state) เข้าไปในระดับสุญญากาศ (vacuum level) โดยความแรงของสนามไฟฟ้าที่ให้อิเล็กตรอนออกมาที่ขั้วไฟฟ้าท่อนาโนคาร์บอนที่ถ่วงน้ำหนักมาใช้งานในด้านนี้ เนื่องจากมีรูปร่างที่สามารถขยายออกได้ (Elongated shape) จึงทำให้สนามไฟฟ้าที่ได้มีค่ามากขึ้นไปด้วย (large electric field) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

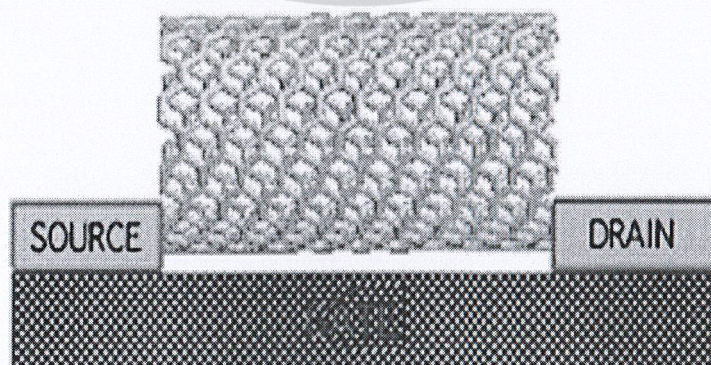
field amplification) อีกทั้งยังนำไฟฟ้าได้ดี ขนาดเล็ก พลังงานที่แผ่ออกมาจึงมีค่าน้อย และสารอื่นๆ ทำปฏิกิริยาค่อยๆ ได้ยาก แต่ปัญหาของการใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นอุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิล์มอิมิซชันก็ยังคงมีอยู่โดยจะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของการนำไฟฟ้าและการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (conductivity and emission stability)

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



รูปที่ 2.21 แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิล์มอิมิซชันที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอน  
ในจอแสดงผลแบบแบนของ Northwestern University

### 2.2.7.3 ทรานซิสเตอร์ (transistors)



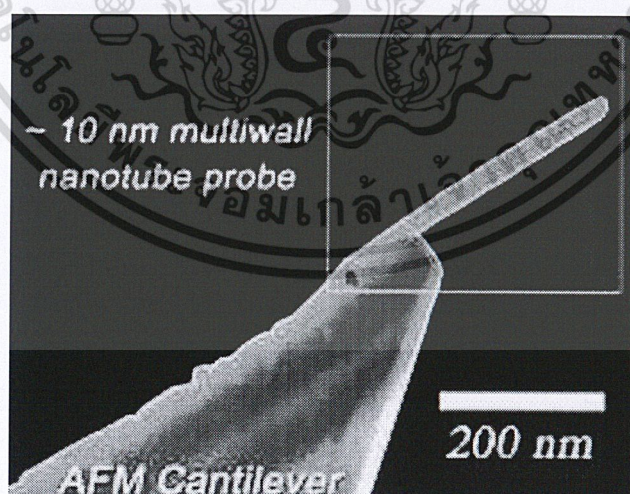
รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของการประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว

ในทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนาม  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

#### 2.2.7.4 โพรบวัดนาโนและนาโนเซนเซอร์ (Nanoprobes and Nanosensors)

โพรบวัดของกล้องจุลทรรศน์แบบเข็มกวาด (Scanning Probe Microscopes, SPMs) เช่น กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดทันเนลลิง (scanning tunneling microscopy, STM) ต้องการโพรบวัดที่มีขนาดเล็ก มีความแข็งแรง และยืดหยุ่นสูง ทำให้มีการนำเอาท่อนาโนคาร์บอนมาใช้เป็นโพรบวัด ทั้งนี้เพราะท่อนาโนคาร์บอนมีค่าโมดูลัสของยังและความยืดหยุ่นสูง ทำให้มีข้อได้เปรียบกว่าโพรบวัดที่ทำจากซิลิคอนซิลิคอนไนไตรด์ และโลหะชนิดอื่นๆ ในแง่ของควมมีเสถียรภาพและความคงทน เนื่องจากไม่ได้รับกระเทือนอย่างรุนแรงจากพื้นผิว และที่สำคัญท่อนาโนคาร์บอนยังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงมากถึง 1.2 นาโนเมตร จึงเป็นการลดปัญหาในเรื่องขีดจำกัดมุมโคนและรัศมีความโค้งงอของปลายโพรบวัด เช่น การวัดดีเอ็นเอ เป็นต้น ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนจึงเหมาะสำหรับทำโพรบวัดเพื่อเพิ่มความสามารถแยกแยะ (resolution) ให้กับกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้



รูปที่ 2.23 แสดงโพรบวัดท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของ NASA Ames Research Center

#### 2.2.7.5 วัสดุผสม (composite materials)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็ง (stiffness) และมีความยืดหยุ่นสูงมาก ดังนั้นจึงถูกนำไปใช้กับการปรับปรุงโครงสร้างในวัสดุต่างๆ เช่น การเสริมแรง (reinforcements) ในวัสดุผสมที่ต้องการความแข็งแรงสูง ทนทาน และน้ำหนักเบา แต่การทดลองที่บอกว่าการเติมท่อนาโนคาร์บอนในวัสดุผสมดีกว่าการเติมเส้นใยคาร์บอนยังมีไม่มากนัก เนื่องจากปัญหาที่พบในการนำท่อนาโนคาร์บอนไปทำเป็นวัสดุผสมมีหลายอย่าง เช่น ปัญหาของการสร้างรอยต่อ (interface) ระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีพื้นผิวที่เรียบและมีขนาดที่ใกล้เคียงกับห่วงโซ่ของพอลิเมอร์ (polymer chain) ปัญหาต่อมาคือ การที่ท่อนาโนคาร์บอนส่วนมากมักจะอยู่กันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เกิดการเลื่อนไปมาได้ง่าย เนื่องจากการที่ท่อนาโนคาร์บอนมาอยู่ใกล้กันจะมีแรงกระทำต่อกันเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมาก ทำให้การรับแรงทำได้น้อยกว่าการอยู่แบบเส้นเดี่ยว จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวมีความแข็งแรงกว่าท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยการเกาะกันอยู่เป็นกลุ่มของท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำได้ โดยการทำให้แตก และการทำให้กระจุกกระจาย (disperse) เป็นต้น แต่ข้อดีของการใช้ท่อนาโนคาร์บอนการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ในวัสดุผสมนั้น คือ เพิ่มความเหนียว (toughness) ของวัสดุผสม โดยท่อนาโนคาร์บอนจะดูดกลืนพลังงานเอาไว้ขณะมีการยืดหยุ่นเกิดขึ้น และจากการที่ท่อนาโนคาร์บอนมีความหนาแน่นน้อย ทำให้เพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า และยังทนทานต่อแรงกดต่างๆ อีกด้วย

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

### 2.3 ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับเซนเซอร์เคมี

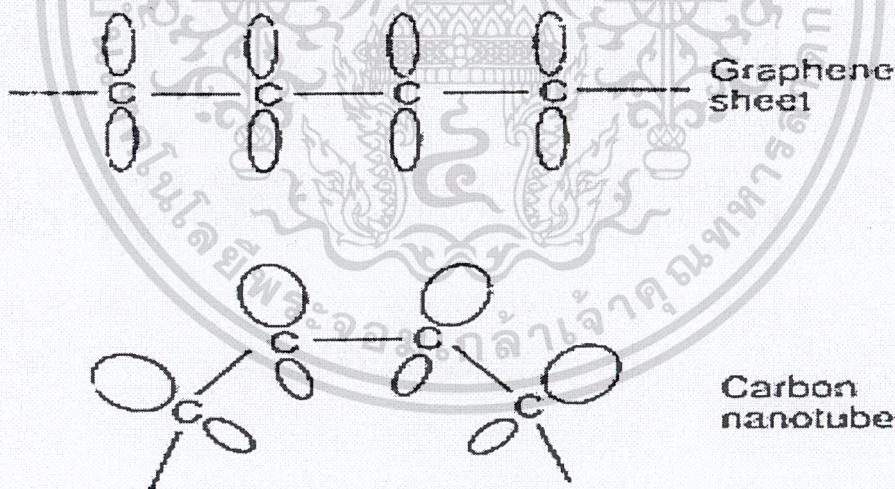
นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคนิคการสร้างโครงสร้างใหม่ที่ลงลึกถึงระดับโมเลกุลหรืออะตอม นิยมใช้ปรับโครงสร้างหรือส่วนประกอบทั้งทางกายภาพ, เคมี หรือชีวภาพเพื่อให้เกิดคุณสมบัติใหม่ๆ ขึ้น ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุนาโนชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ เนื่องจากนำไฟฟ้าได้ดี มีเสถียรภาพสูงทุกช่วงอุณหภูมิและเคมี ทั้งยังนำความร้อนได้ดีอีกด้วย ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรสูง คุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนขึ้นอยู่กับโครงสร้างอะตอมและกลไกการผิดรูป (mechanical deformation) เป็นสำคัญ คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเหมาะที่จะเป็นเซนเซอร์ประสิทธิภาพสูง เนื่องจากไวต่อสารเคมีไวต่อความกดดันทางกลและกายภาพอย่างมาก เทคโนโลยีเซนเซอร์กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ทุกวันนี้เราต้องการเซนเซอร์ที่ตอบสนองได้ฉับไว อย่างไรก็ตามเซนเซอร์บางอย่าง เช่น ภาพ เสียง สัมผัส และกลิ่นยัง

ตรวจจับได้ไม่ดีนัก จำเป็นต้องพัฒนาต่อไปเพื่อให้ตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมได้ถูกต้องและจับไวตามต้องการ

ในระยะสิบปีที่ผ่านมา เซนเซอร์เคมีมีมูลค่าทางการตลาดทั่วโลกสูงถึงกว่า 40 ล้านดอลลาร์ ส่วนใหญ่ใช้เพื่อตรวจคุณภาพสิ่งแวดล้อม โดยมีขนาดเล็ก ใช้พลังงานต่ำ ตรวจจับได้เร็ว และได้กระบวนการทำงานทางอุตสาหกรรม เซนเซอร์ที่ผลิตเพื่อการค้าส่วนใหญ่มุ่งพัฒนาในด้านความไว ความถูกต้อง และเสถียรภาพการตรวจจับเป็นหลัก ทั้งนี้ที่มวิจัยทางด้านท่อนาโนคาร์บอนได้พิจารณาเซนเซอร์เคมีหลายแบบ ทุกแบบอาศัยหลักการเปลี่ยนคุณสมบัติจำเพาะ เช่น chemiresistors และ back gate field effect transistors ซึ่งอาศัยหลักการเปลี่ยนการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน magnetic resonant sensors อาศัยหลักการเปลี่ยนความถี่จาก mass loading และ optical sensor ซึ่งอาศัยหลักการกระจายและดูดซับแสงของสารเคมีเป็นหลัก

### 2.3.1 หลักการพื้นฐานของท่อนาโนคาร์บอนสำหรับเซนเซอร์เคมี

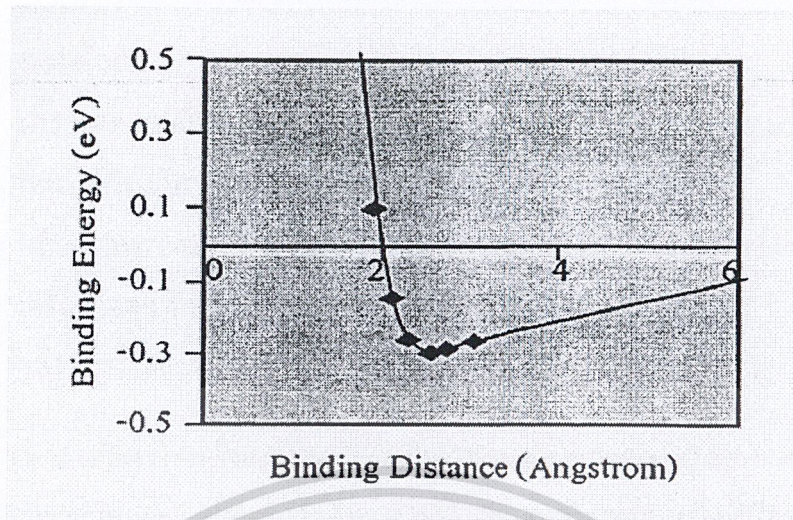
สำหรับแผ่นคาร์บอนแกรไฟน์ที่มีการเรียงตัวคาร์บอนเป็นแนวตรง ทำให้อิเล็กตรอนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เมื่อพิจารณาท่อนาโนคาร์บอน แผ่นคาร์บอนแกรไฟน์จะมีลักษณะทรงกระบอก ซึ่งแผ่นคาร์บอนแกรไฟน์ที่มีลักษณะโค้ง อิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนรูปจากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เป็นการกระจายตัวอย่างไม่สมดุลทั้งด้านในและด้านนอกแผ่น นาโนทิวบ์ทรงกระบอก ดังแสดงใน 2.24



รูปที่ 2.24 แผนภาพแสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบน plane praphene และ CNTs

หลังการยึดเกาะ (Binding Energy) ของโมเลกุลก๊าซกับ SWNT จะเป็นฟังก์ชันกับระยะทางจากโมเลกุลของก๊าซถึงท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งจากการคำนวณกับโมเลกุลก๊าซ  $\text{NO}_2$  ที่มีโครงสร้างการยึดเหนี่ยวกับ SWNT ตาม โมเดลรูปที่ 2.25 จะมี adsorption Energy ประมาณ 0.3 eV และมีระยะยึดเหนี่ยว (Binding Distance) ประมาณ 2.5 อังสตรอม ดังแสดงในรูปที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่แนะนำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ  $\text{NO}_2$  กับ SWNT

จะเห็นว่าโมเลกุลของก๊าซที่กล่าวข้างต้นมีการแพร่ที่สูงบนพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน จากการวิเคราะห์ด้วยความหนาแน่นอิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่า ประจุอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากอะตอมคาร์บอนกับโมเลกุลของก๊าซ จะถูกถ่ายหรือดึงจาก SWNT ทำให้ SWNT ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีประจุ carriers หรือ holes มากขึ้นหรือลดลง ทำให้การนำไฟฟ้าของ SWNT หรือ MWCNT เพิ่มขึ้น หรือลดลงตามลำดับ ปฏิกริยาเคมีทั่วไปเขียนได้ดังนี้



เมื่อ  $\delta$  คือ ตัวเลขแสดงจำนวนประจุที่ถูกถ่ายระหว่างเกิดปฏิกิริยา

### 2.3.2 กลไกการดูดซับก๊าซของท่อนาโนคาร์บอนและกลไกการนำไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอนที่เกี่ยวข้อง

การดูดกลืนก๊าซที่พื้นผิวจะประกอบด้วย การดูดกลืนทางฟิสิกส์ (Physisorption) และการดูดกลืนทางเคมี (Chemisorption)

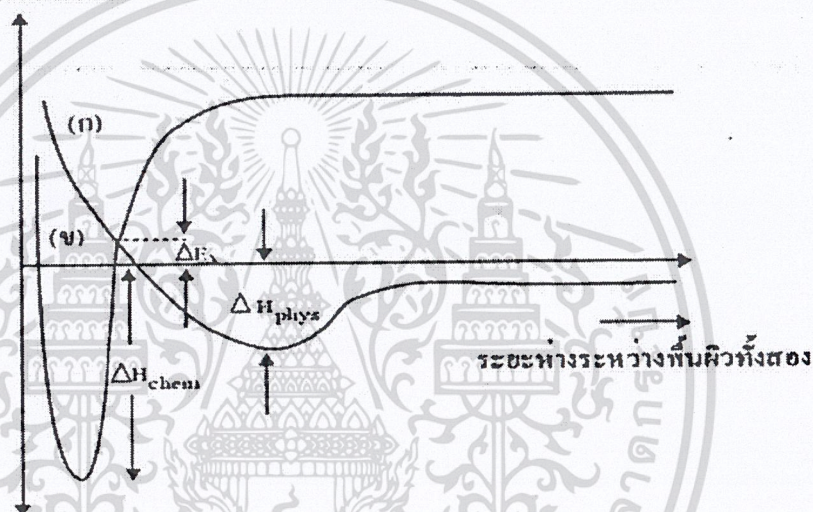
1) การดูดกลืนทางฟิสิกส์ จะเป็นการดูดกลืนที่ไม่แข็งแรงระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองด้วยแรงดึงดูดระหว่างขั้วไดโพล มีพลังงานยึดเหนี่ยว 0.1 ถึง 0.2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานยึดเหนี่ยวของระบบ จะเป็นฟังก์ชันระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง ดังแสดงในรูป 2.26 พลังงานยึดเหนี่ยวของระบบจะมีค่ามากที่สุด เมื่อระยะห่างระหว่างพื้นผิวมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ตามแบบจำลอง Lennard-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jones และเมื่อพิจารณาปริมาณการดูดกลืนทางฟิสิกส์จะมีปริมาณเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูป 2.27 ปริมาณการดูดกลืนทางฟิสิกส์จะมีปริมาณมากในช่วงอุณหภูมิ

2) การดูดกลืนทางเคมีจะเป็นพลังงานการยึดเหนี่ยว จะมีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการแยกโมเลกุลของก๊าซออกเป็นอะตอม พลังงานยึดเหนี่ยวของระบบ จะมีค่ามากกว่า  $15 \text{ kcal mol}^{-1}$  เมื่ออะตอมเข้าใกล้ผิวจะเกิดพันธะเคมี และพลังงานในการดูดกลืนทางเคมีจะมีค่าเป็นลบ และมากกว่าพลังงานการดูดกลืนทางฟิสิกส์ ดังในรูปที่ 2.26 เมื่อพิจารณาการดูดกลืนทางฟิสิกส์ จะสังเกตปริมาณเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ปริมาณการดูดกลืนทางเคมีจะมีปริมาณมากในช่วงอุณหภูมิสูง

พลังงานของระบบ

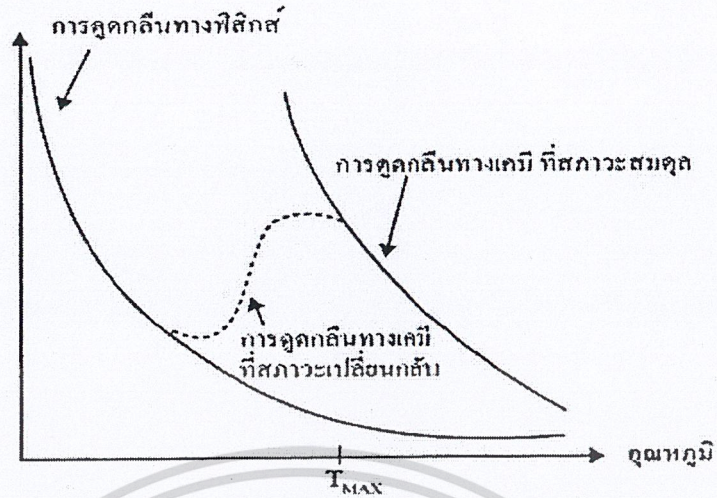


รูปที่ 2.26 พลังงานการดูดกลืนทางเคมีและทางฟิสิกส์ โดยแบบจำลอง Lennard-Jones มีระยะ ระหว่างพื้นผิวทั้งสอง  $\nabla E_A$  คือพลังงานการกระตุ้นในการดูดกลืนทางเคมี

(ก) การดูดกลืนทางฟิสิกส์

(ข) การดูดกลืนทางเคมี พลังงานที่สามารถแยกโมเลกุลของอนุภาคจะอยู่ที่ตำแหน่งห่างระหว่างพื้นผิวทั้งสองมีค่าเข้าใกล้อนันต์

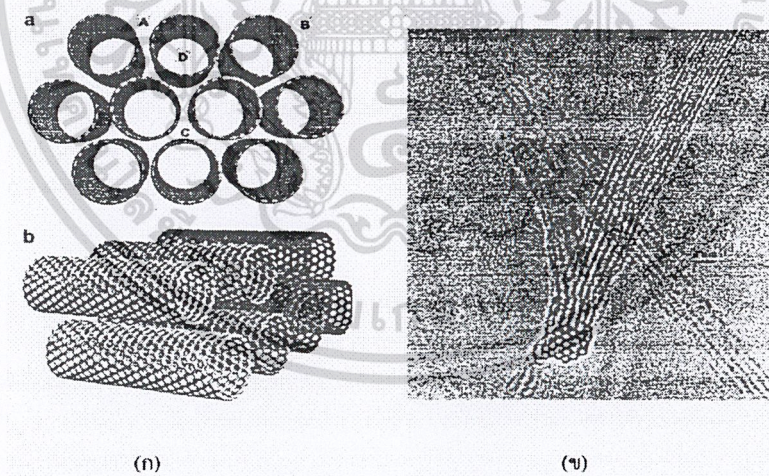
ปริมาณการดูดกลืนก๊าซ



รูปที่ 2.27 ปริมาณการดูดกลืนก๊าซที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

### 2.3.2.1 SWNTs และ SWNTs bundles

โดยทั่วไปแล้วท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จะไม่เป็นท่อ SWNTs เดี่ยวแบบโดดๆ แต่จะรวมกันอยู่หลายๆท่อ โดยจะเรียกท่อ SWNTs กลุ่มนี้ว่า SWNTs bundle โดยท่อที่รวมกันหลายๆท่อนี้ แต่ละท่อจะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ท่อนาโนคาร์บอนที่มีตรวมกันหลายๆท่อ (bundle)

(ก) ไดอะแกรมของท่อนาโนคาร์บอน (a) ภาพตัดขวางของ bundle (b) ภาพด้านข้างของ bundle

(A) Outer surface (B) Groove (C) Intertitial channels (ICs) (D) nanotube cavities

(ข) ภาพ High resolution TEM แสดง SWNT bundle<sup>[c]</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.28 แสดงบริเวณผิวของท่อนาโนคาร์บอนที่มีการดูดซับก๊าซชนิด SWNTs bundles หรือจะเรียกว่า bundles ซึ่งจะประกอบด้วยทิวของ SWNT หลายๆทิวมัดรวมกัน โดยแต่ละบริเวณของ SWNTs bundles จะเรียกว่า บริเวณที่ก๊าซหรือโมเลกุลจะดูดซับบนผิวของ SWNTs bundles มีสามบริเวณด้วยกัน คือ (A) ผิวนอก(Outer surface) ของ SWNTs bundles คือบริเวณที่ส่วนโค้งด้านนอกของ SWNTs bundles (B)กรูฟ (Groove) คือช่องที่อยู่ระหว่าง SWNTs สองท่อติดกัน (C) Intertitial channels (ICs) คือช่องระหว่าง SWNTs bundles สามท่อติดกัน โดยมีขนาด 2.6 อังสตรอม นอกจากนี้ก๊าซหรือโมเลกุลยังสามารถที่ดูดซับเข้าไปภายในท่อของ SWNTs ได้ โดย SWNTs มีลักษณะเป็นท่อปลายเปิดด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้วย โดยมีขนาดของท่อ 13.56 อังสตรอม

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

#### 2.3.2.2 MWNT

การดูดซับก๊าซที่ผิวของ MWNT สามารถศึกษาได้เฉพาะที่บริเวณผิวด้านนอกของ MWNT และภายในท่อของ MWNT ที่มีลักษณะเป็นท่อปลายเปิด อะตอมหรือโมเลกุลจึงสามารถแทรกเข้าไปในท่อของ MWNT ได้

#### 2.3.2.3 รอยสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับท่อนาโนคาร์บอน

การศึกษากลไกการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน หรือ อุปกรณ์ที่สร้างจากท่อนาโนคาร์บอน เมื่อถูกสร้างขึ้นมาเสร็จเรียบร้อยแล้วจำเป็นต้องมีการต่อเส้นลวดโลหะ หรือขั้วโลหะ ออกไปภายนอกเพื่อเชื่อมกับอุปกรณ์ภายนอกอื่นๆ ดังนั้น จึงเป็นการสร้างรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นส่วนต่างๆของตัวอุปกรณ์ เช่น การต่อขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นกับเครื่องมือวัด เป็นต้น ในทางปฏิบัตินี้ สารกึ่งตัวนำ CNT และโลหะเมื่อนำมาสัมผัสจะมีสิ่งบกพร่องเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับโลหะ เช่น มีอะตอมแปลกปลอมอื่นๆหรือประจุไฟฟ้าอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัส เช่น โลหะจะมีสิ่งสิ่งสกปรกฟิล์มบางออกไซด์เกิดขึ้นที่ผิว โดยเฉพาะผิวของโลหะออกซิเดชันสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย

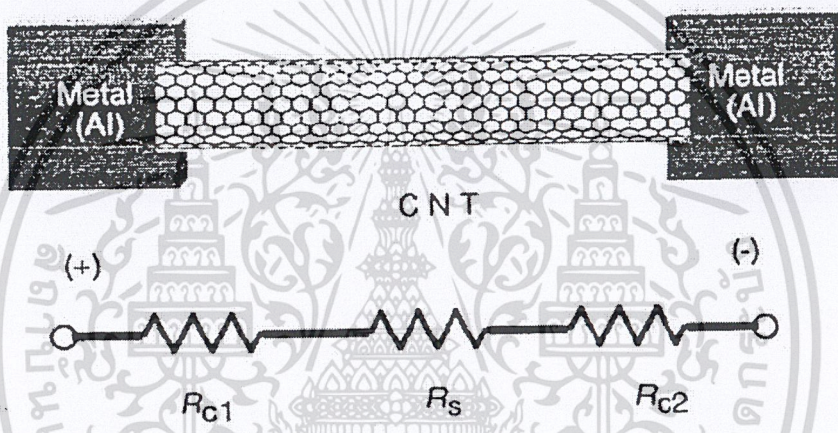
รอยสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ แบ่งได้ 2 ชนิด ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้า คือรอยสัมผัสแบบโอห์มิก (ohmic contact) และรอยสัมผัสแบบช็อตทีย์ (schottky contact) ซึ่งรอยสัมผัสแบบโอห์มิกเป็นรอยสัมผัสที่มีความนำไฟฟ้าสูง กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านทั้งสองทิศทาง และไม่มีแรงดันตกคร่อมรอยสัมผัส ส่วนรอยสัมผัสแบบช็อตทีย์เป็นรอยสัมผัสที่แสดงสมบัติเรกติไฟร์ (rectifier) คล้ายกับ โอด โดยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ทางเดียว โดยรอยสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อออนไลน์ การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ สามารถให้คุณสมบัติได้ 2 ลักษณะ คือ อาจเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก หรือรอยสัมผัสแบบช็อคกีก็ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่ท่อนาโนคาร์บอนที่นำมาสร้างให้เป็นรอยสัมผัส

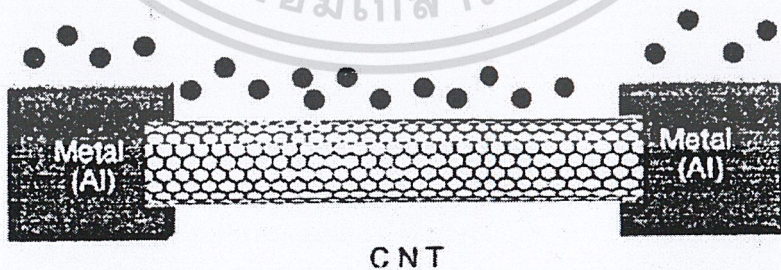
#### 2.3.2.4 กลไกการนำไฟฟ้าของก๊าซเซนเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน

กลไกของการนำไฟฟ้าเมื่อมีการตรวจวัดก๊าซของเซนเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน ปัจจุบันยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดและยังมีการศึกษากันอยู่ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามได้มีการรายงานก่อนหน้านี้ว่า กลไกการนำไฟฟ้าของก๊าซเซนเซอร์ที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอน เกิดจากการดูดซับก๊าซที่ผิวของท่อนาโนคาร์บอนและเกิดจากการดูดซับก๊าซที่ผิวของโลหะซึ่งใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของก๊าซเซนเซอร์<sup>[1]</sup> ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.29 และรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.29 แบบจำลอง Al/CNT sensor ก่อนก๊าซจะดูดซับบนก๊าซเซนเซอร์

จากรูปที่ 2.29 เป็นแบบจำลองก๊าซเซนเซอร์ก่อนนำไปวัดกับก๊าซ ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนถูกต่อเชื่อมปลายทั้งสองด้านเข้ากับขั้วไฟฟ้าโลหะอลูมิเนียม



รูปที่ 2.30 แบบจำลอง Al/CNT sensor ขณะก๊าซจะดูดซับบนก๊าซเซนเซอร์

จากรูปที่ 2.30 แสดงรูปที่ แบบจำลอง Al/CNT sensor ขณะก๊าซจะดูดซับบนก๊าซเซนเซอร์ ซึ่งเมื่อก๊าซดูดซับบนผิวของก๊าซเซนเซอร์มีผลทำให้กลไกการนำไฟฟ้าของเซนเซอร์มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 เซนเซอร์

### 2.4.1 นิยามเซนเซอร์

เซนเซอร์ คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางกายภาพ (physical) เช่น อุณหภูมิ ความดัน สี และแสง เป็นต้น ไปเป็นปริมาณทางไฟฟ้า (electrical) เช่น ความต้านทาน ความจุไฟฟ้า และกระแส เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งเซนเซอร์ได้ 2 แบบ คือ

1) เซนเซอร์ทางเคมี (chemical sensor) จัดเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสารประเภทหนึ่ง โดยมี ส่วนประกอบพื้นฐานคือ ชั้นของการตรวจจับสารเชื่อมต่อกับส่วนแปลงสัญญาณ โดยชั้นตรวจจับสารทำหน้าที่ตรวจจับด้วยการทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของสารที่ผ่านเข้ามาทำให้ชั้นตรวจจับสารเกิดการ ทำปฏิกิริยา จากนั้นส่วนแปลงสัญญาณจะทำหน้าที่แปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซทางเคมีได้ 2 ประเภท คือ ประเภทวัดความนำไฟฟ้า และ ประเภทวัดศักย์ไฟฟ้า

2) เซนเซอร์ทางฟิสิกส์ (Physical sensor) จัดเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสารประเภทหนึ่ง โดยมี ส่วนประกอบพื้นฐานคือ ชั้นของการตรวจจับสารเชื่อมต่อกับส่วนแปลงสัญญาณ โดยชั้นตรวจจับสารทำหน้าที่ตรวจจับด้วยการทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของสารที่ผ่านเข้ามาจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างภายในของชั้นตรวจจับสาร จากนั้นส่วนแปลงสัญญาณจะทำหน้าที่แปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น เซนเซอร์วัดความดัน เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ เป็นต้น

### 2.4.2 ก๊าซเซ็นเซอร์

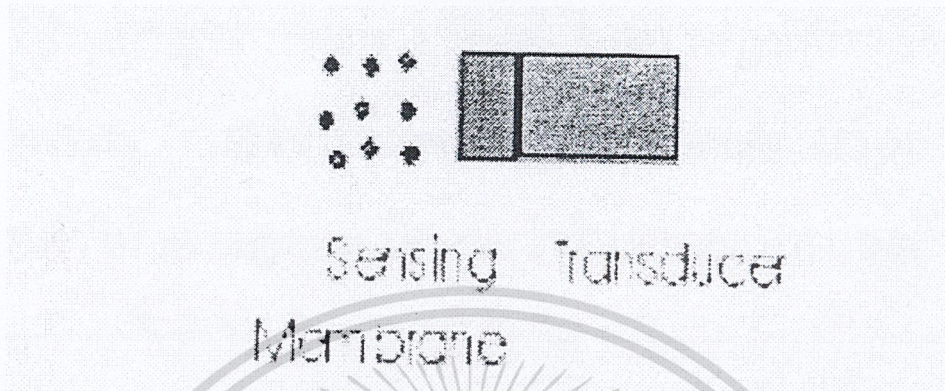
นิยามก๊าซเซ็นเซอร์ คือ วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถรับรู้โมเลกุลของก๊าซที่เข้ามากระตุ้น และสามารถตอบสนองรูปสัญญาณที่สามารถแปลงสัญญาณที่เข้ามา ให้อยู่ในรูปที่จะเป็นประโยชน์ต่อการประมวลผล เซ็นเซอร์แบ่งตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เป็น

1) Chemical Gas sensor เมื่อวัสดุที่ใช้สร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซได้รับก๊าซที่ทดสอบทำให้มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น (oxidation-reduction) มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนและพันธะเกิด (covalent) ขึ้นบริเวณผิวหน้าของเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ

2) Physical Gas sensor เมื่อวัสดุที่ใช้สร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซได้รับก๊าซที่ทดสอบโดยโมเลกุลของก๊าซจะดูดซับ (absorb) ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงที่มีค่าน้อย

### 2.4.2.1 ส่วนประกอบของก๊าซเซ็นเซอร์

ก๊าซเซ็นเซอร์ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.31 คือ



รูปที่ 2.31 แสดงส่วนประกอบของก๊าซเซ็นเซอร์

1. Sensing Membrane เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จับ หรือทำปฏิกิริยาเคมีกับก๊าซที่ต้องการวัด
2. Transducer ทำหน้าที่วัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ sensing membrane เมื่อ membrane จับหรือทำปฏิกิริยากับก๊าซ

### 2.4.2.2 คุณสมบัติของก๊าซเซ็นเซอร์

เราสามารถแบ่งคุณสมบัติของก๊าซเซ็นเซอร์ออกเป็น 5 อย่างที่สำคัญ คือ

1. ความไวการตอบสนอง (Response) คือ ความสามารถในการตอบสนองอย่างรวดเร็วในทันทีเมื่อก๊าซที่เราทำการวัดมาสัมผัสกับเซ็นเซอร์ก๊าซ คุณสมบัติข้อนี้มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อก๊าซที่เราทำการวัดเป็นก๊าซพิษหรือก๊าซไวไฟ เพื่อเราจะได้หลีกเลี่ยงและแก้ไขได้ทันทีคนที่จะได้รับอันตรายหรือเกิดเหตุร้ายแรงในบริเวณที่ทำการวัดก๊าซ หากก๊าซรั่วไหลออกมา
2. ความไวในการวัด (Selectivity) คือความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างระหว่างก๊าซที่เราต้องการวัดกับก๊าซที่เราไม่ต้องการวัดได้
3. ความเสถียรภาพ (stability) คือ ผลในการวัดคงที่ไม่เสื่อมสภาพเร็วในการใช้งาน เพื่อให้เซ็นเซอร์สามารถใช้วัดได้อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไป Sensing Membrane ทำจาก Polymer มักมีปัญหาในการใช้งาน
4. พิสัยการวัด (Dynamic Range) คือช่วงกว้างของการวัดของ Sensor ซึ่ง Sensor บางตัวสามารถวัดก๊าซปริมาณตั้งแต่ 100-10000 ppm แต่บางตัวใช้วัดในระยะ 10-15 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### กระบวนการทดลอง

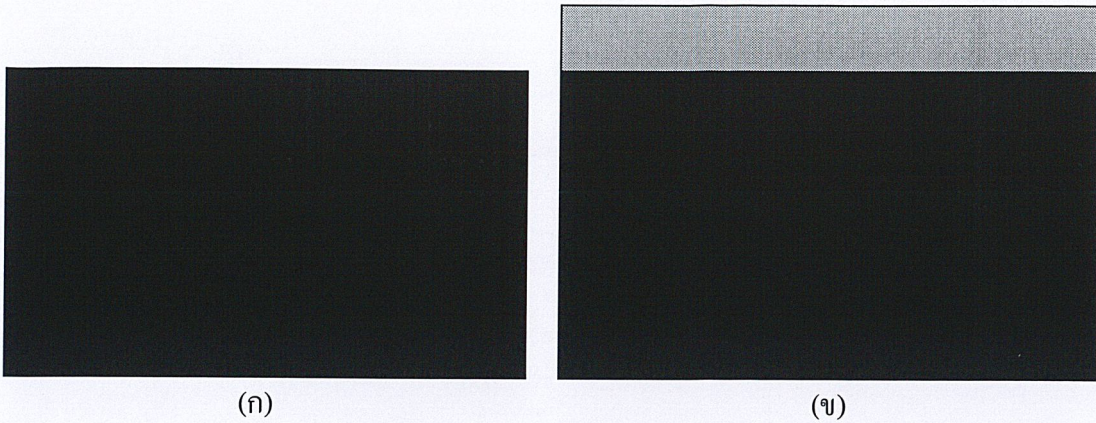
ในบทนี้กล่าวถึงสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนต่างๆ ในการเตรียมฐานรองในกระบวนการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ เพื่อจุดประสงค์ในการสร้างลวดลายบนฐานรอง ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงการนำเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยวิธีการต่างๆ มาประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทตัวเซนเซอร์ก๊าซ โดยจะกล่าวเป็นลำดับต่อไป

#### 3.1 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

ในกระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นั้น จะต้องทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนที่จะใช้เป็นฐานรองก่อนเพื่อให้ ฝุ่น เศษโลหะ และไขมันต่างๆ ที่เกาะอยู่หลุดออกไป ซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้

- ตัดแผ่นซิลิคอนให้มีขนาด  $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ .
- Ultrasonic DI 5 นาที
- จุ่ม DI 1 แก้วจนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรด Nitric ( $\text{HNO}_3$ ) 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 1 แก้ว
- ต้มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที (กรด Nitric ละลายในน้ำร้อนได้ดี)
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้วจนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $\text{N}_2$  (Trichloroethylene จะไม่ละลายในน้ำ)
- ต้มน้ำ Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้วจนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้วไปทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) โดยวิธี dry oxidation ที่อุณหภูมิ  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  ในเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นใช้วิธี wet oxidation ที่อุณหภูมิ  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  ในเวลา 1.5 ชั่วโมง และใช้ dry oxidation เป็นครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  ใช้เวลา 1 ชั่วโมง ได้ออกไซด์เคลือบอยู่บนแผ่นซิลิคอนได้ความหนาซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ  $5000 \text{ \AA}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) และรูปที่ 3.1 (ข)

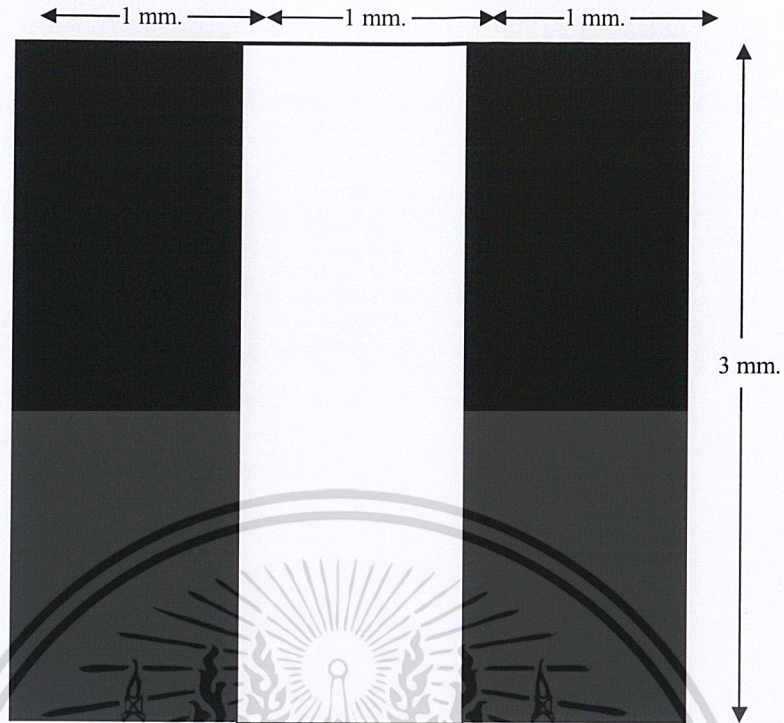


รูปที่ 3.1 การเตรียมแผ่นสำหรับสร้างชั้นฉนวน

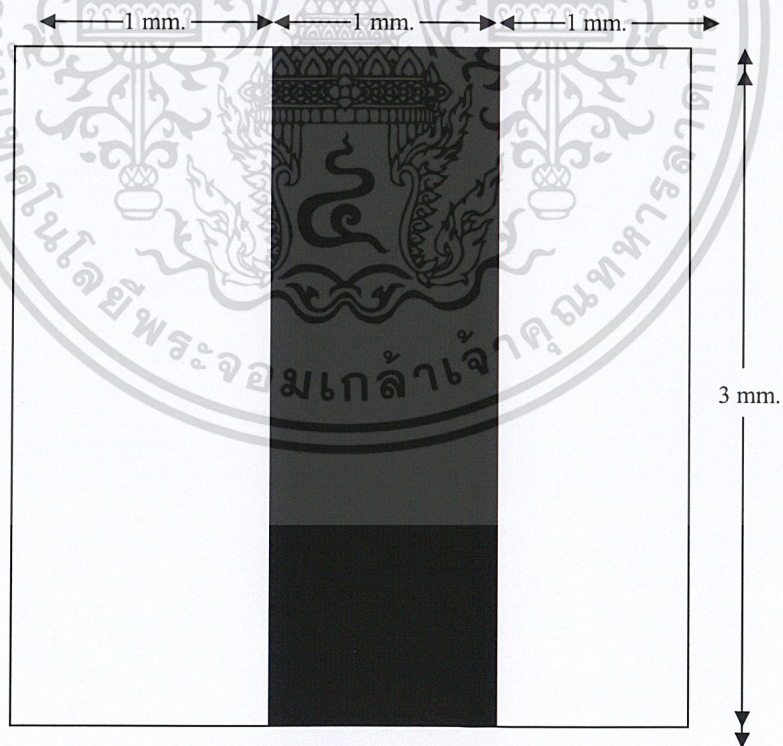
(ก) ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน (ข) สร้างชั้นเคลือบบนแผ่นซิลิคอน

### 3.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นขั้นตอนการถ่ายแบบจากแม่สีกไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน ซึ่งต้องทำในห้องที่สะอาดเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิคอน โดยจะเริ่มต้นด้วยการนำแผ่นที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วมาอบแห้งเพื่อไม่ให้แผ่นมีความชื้น เคลือบผิวแผ่นผลึกด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ 5214.E) ด้วยวิธีสปินเนอร์ (spinner) คือหยดน้ำยาไวแสงบนผลึกซิลิคอนที่ติดอยู่บนแป้นของเครื่องสปินเนอร์ โดยใช้ความเร็วรอบสูงๆ เพื่อที่จะให้น้ำยาไวแสงเคลือบเป็นฟิล์มบางๆบนแผ่นผลึกหนาประมาณ 5000 อังสตรอมขึ้นไป โดยความเร็วรอบที่ใช้จะมีอยู่สองรอบคือ รอบแรกใช้ 500 รอบ/วินาที เพื่อให้ฟิล์มกระจายไปทั่วๆแผ่น และรอบสองใช้ 3000 รอบ/วินาทีเพื่อให้ฟิล์มเรียบตามที่ต้องการ โดยขั้นตอนระหว่างการเคลือบน้ำยาไวแสงนี้ต้องระวังฝุ่นละอองอย่างมาก จากนั้นนำฟิล์มกระจกต้นแบบที่มีแม่สีกที่เราออกแบบไว้มาทาบบนผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสงและอบแห้งแล้ว จัดแม่สีกให้เรียบร้อยแล้วทำการถ่ายแบบด้วยแสงอุลตราไวโอเลต (UV) นำแผ่นที่ฉายแสงแล้วมาทำการ Development คือ สร้างลวดลายด้วยน้ำยา Developer น้ำยาไวแสงชนิดบวกเมื่อทำการ develop แล้ว ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายไป ส่วนที่ไม่ถูกแสงจะยังคงอยู่ จากนั้นทำการ Postbake ในเตาอบเพื่อให้ส่วนที่เป็นชั้นฟิล์มแห้งและยึดเกาะติดกับแผ่นผลึกแน่นยิ่งขึ้น ก่อนนำไปทำการสปีดเตอร์ริง โลหะคะตะลิสต์นี้เกิด และขั้วทองแดง

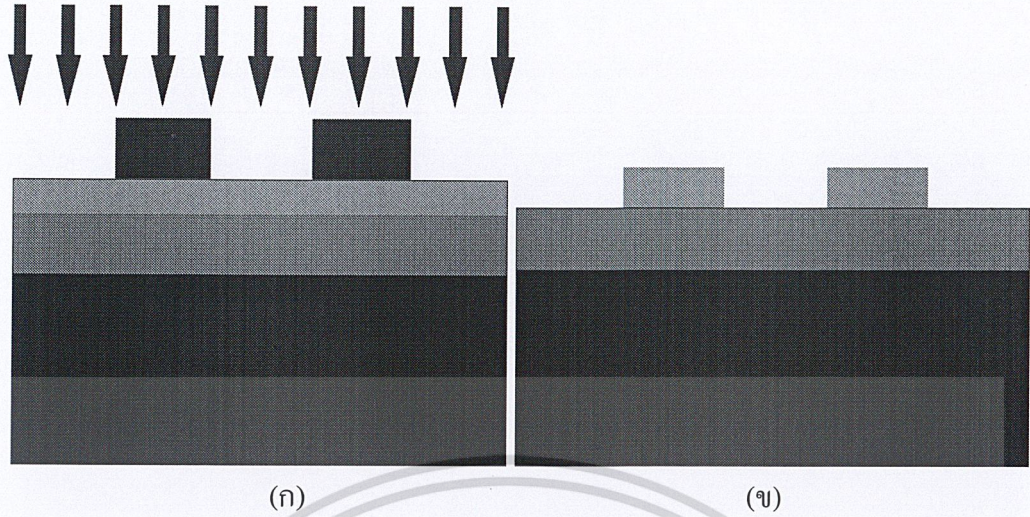


รูปที่ 3.2 แมสก์ที่ 1 สำหรับลดความคลาดเคลื่อนของกล้องดิจิทัล



รูปที่ 3.3 แมสก์ที่ 2 สำหรับลดความคลาดเคลื่อนของกล้องดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

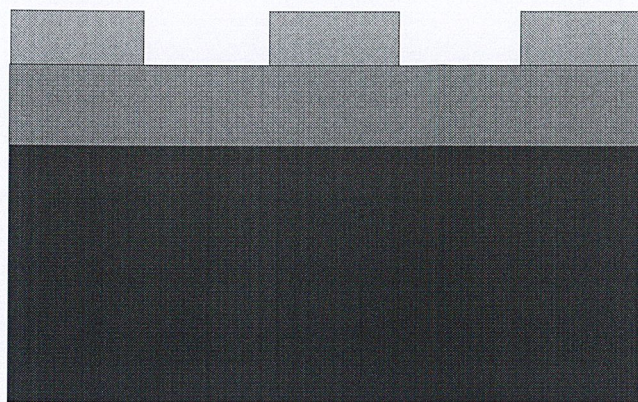


รูปที่ 3.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแมสก์ที่หนึ่ง  
 (ก) การฉายแสงสำหรับสร้างลวดลายนิเกิล (ข) การdevelop สำหรับการสปีดเตอร์นิเกิล



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(๗)

รูปที่ 3.5 กระบวนการโพโตลิโธกราฟีแมสก์ที่สอง

(ก) การฉายแสงเพื่อเปิดช่องสำหรับสร้างขั้วไฟฟ้า

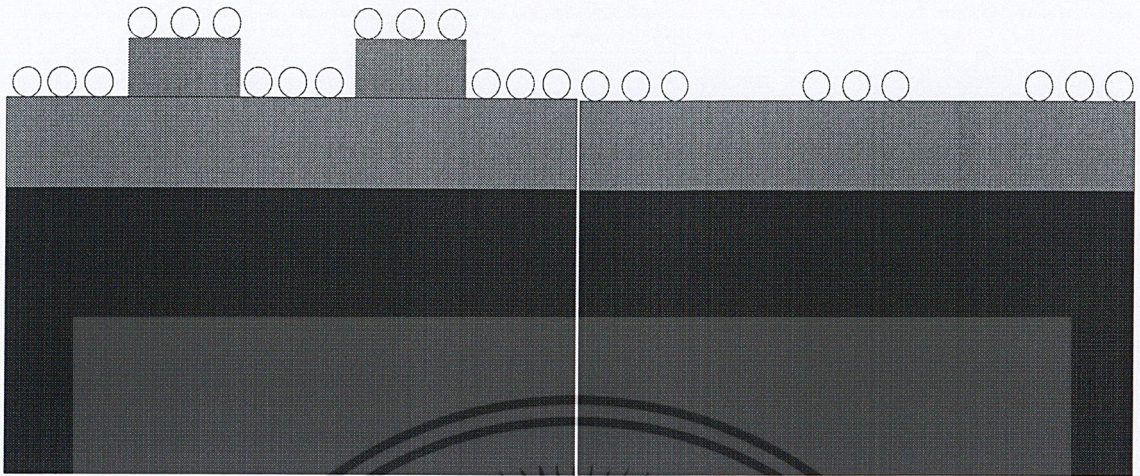
(๗) การ develop สำหรับสร้างขั้วทองแดงด้วยการสปีดเตอร์ริง

### 3.3 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และการทำขั้วไฟฟ้าโดยการสปีดเตอร์ริง

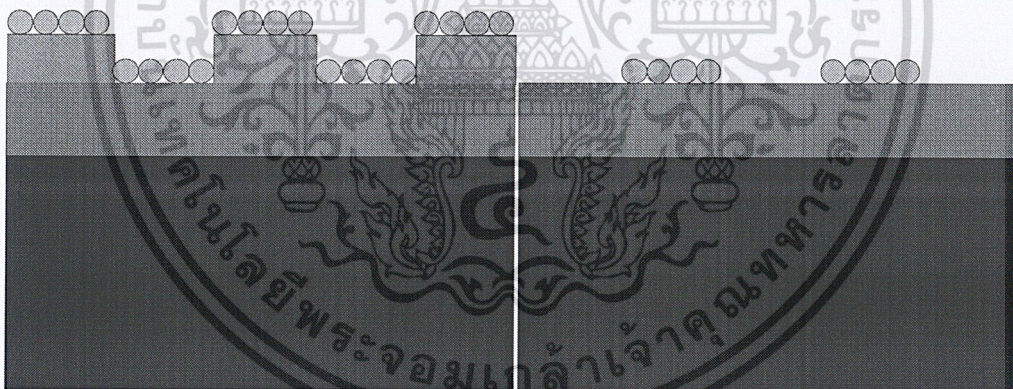
เพื่อเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนฐานรองเพื่อการก่อตัวการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดย ใช้ นิกเกิล (Ni) เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เคลือบลงบนฐานรองเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) เพื่อให้ขาดจากกันทางไฟฟ้า (นิกเกิลเป็นโลหะและนำไฟฟ้า) เนื่องจากต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ขณะตรวจจับแก๊ส จึงต้องการให้กระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนเคลื่อนอยู่บนคาร์บอนนาโนทิวบ์

อีกจุดประสงค์หนึ่งเพื่อทำขั้วไฟฟ้าเพื่อต่อใช้งาน ในที่นี้ใช้โลหะทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้าโดยการ สปีดเตอร์ริงเป็นฟิล์มบาง (Thin film) ลงบนฐานรองที่มีการทำลวดลายแล้ว ในการเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาและการทำขั้วไฟฟ้าจะใช้เครื่อง SPE - 210 ไซโคสปีดเตอร์ในการสร้าง

ส่วนต่าง ๆ ของเครื่อง SPE -210 ไซโคสปีดเตอร์ ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งมีความถี่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (13.65 MHz) แหล่งจ่ายแก๊ส ห้องสปีดเตอร์ (sputtering chamber) และปั๊มสุญญากาศ (rotary and diffusion pump) ภายในห้องสปีดเตอร์ประกอบด้วยขั้วคาโทด (cathode) ขั้วแอโนด (anode) และชัตเตอร์ (shutter) โดยแผ่น Target เป็นเป้าถูกติดไว้กับขั้วคาโทด การสปีดเตอร์เกิดจากการป้อนกำลัง RF ผ่านวงจรแมทซ์ซึ่งเข้าสู่ห้องสปีดเตอร์ซึ่งอยู่ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แก๊สอาร์กอนแตกตัวเป็นไอออน เกิดเป็นพลาสมาขึ้นมาในบริเวณระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด เนื่องจากขั้วแอโนดต่ออยู่กับผนังห้องสปีดเตอร์ทำให้พื้นที่ของขั้วแอโนดมากกว่าขั้วคาโทด จึงเกิดการเหนี่ยวนำขั้วคาโทดให้มีศักย์เป็นลบและดึงดูดไอออนบวกในพลาสมาให้พุ่งเข้าชนแผ่น Target ทำให้อะตอมของ Target กระเด็นออกมาและตกลงมาสะสมบนผิวของฐานรองแผ่นตัวอย่างซึ่งวางที่ขั้วแอโนด จะเกิดเป็นฟิล์มโลหะเคลือบอยู่บนฐานรอง



(ก) (ข)  
รูปที่ 3.6 กระบวนการสปีดเตอร์ริงสำหรับเคลือบโลหะคตะไลด์นิกเกิล  
(ก) นิกเกิลถูกเคลือบลงบนฐานรอง (ข) ลอกน้ำยาไวแสงด้วยวิธี lift off

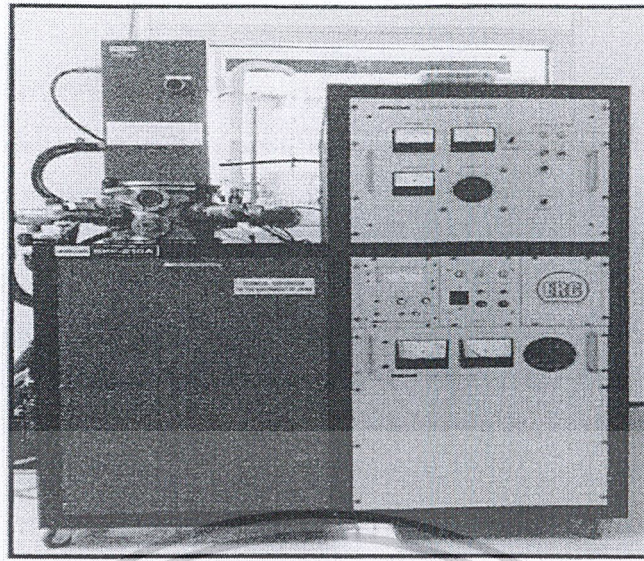


(ก)

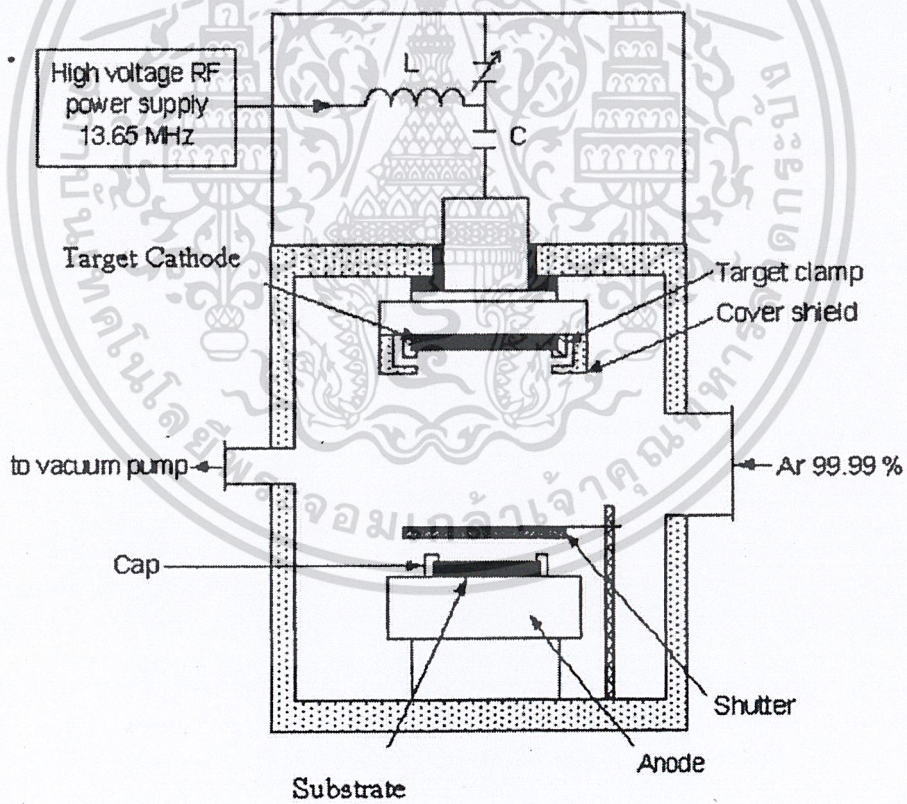
(ข)

รูปที่ 3.7 กระบวนการสปีดเตอร์ริงสำหรับสร้างขั้วโลหะทองแดง  
(ก) ทองแดงถูกเคลือบลงบนฐานรอง (ข) ลอกน้ำยาไวแสงด้วยวิธี lift off

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายของเครื่องสปัตเตอร์ริงสำหรับเคลือบคะตะไลต์และขั้วโลหะ



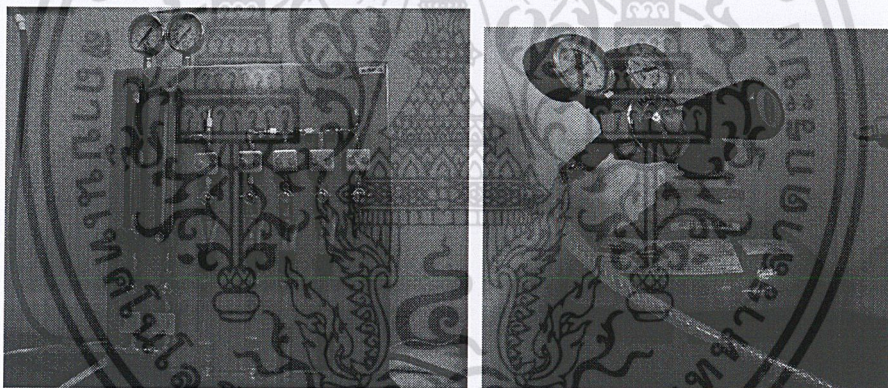
รูปที่ 3.9 แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปัตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 กระบวนการสังเคราะห์ท่อนานคาร์บอน

#### 3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนานคาร์บอน

1. ถังก๊าซไนโตรเจน
2. Flow meter สำหรับควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ
3. สารแห้งง่าย (แอลกอฮอล์)
4. ชุดเตาเผาสามโซน
5. นาฬิกาจับเวลา
6. หลอดทดลองสำหรับใส่สารแห้งง่าย
7. ขวดรูปชมพู่สำหรับเช็คก๊าซที่ไหลออกสู่ระบบ
8. ฐานรองสำหรับนำมาทำการทดลอง(ซิลิคอน ไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยนิเกิลและมีลวดลาย)
9. แผ่นเซรามิกสำหรับเป็น โบทน้าแผ่นฐานรองเข้าไปในเตา
10. แท่งแก้วสำหรับดันฐานรองเข้าไปในเตา



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ท่อนานคาร์บอน

(ก) Flow meter ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ

(ข) ถังก๊าซไนโตรเจน

#### 3.4.2 ขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์ท่อนานคาร์บอน

(1) เปิดเตาความร้อนให้ได้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นใช้แท่งแก้วดันแผ่นฐานรองที่เตรียมไว้ใส่เข้าไปในเตาโดยให้วางแผ่นฐานรองไว้ที่ปากเตาเป็นเวลา 5 นาที ต่อจากนั้นค่อยๆดันแผ่นฐานรองจนถึงกลางท่อแก้ว โดยใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

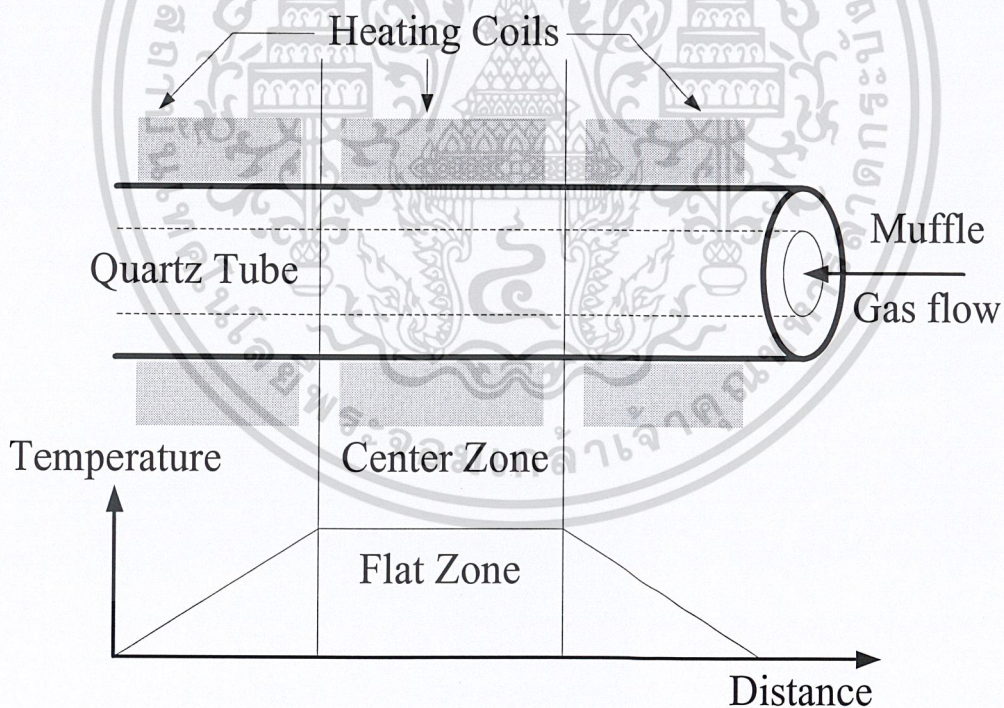
(2) ปิดครอบปากท่อแก้วที่ปากเตาให้สนิท โดยตรวจเช็คข้อต่อ รวมทั้งสายต่างๆ ก่อนการเปิดแก๊สในโตรเจน

(3) ปรับอุณหภูมิของเตาความร้อนที่อุณหภูมิตามที่ต้องการใช้ในการสังเคราะห์ จากนั้นเปิดแก๊สในโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.2 cc/min เข้าไปในเตาความร้อน

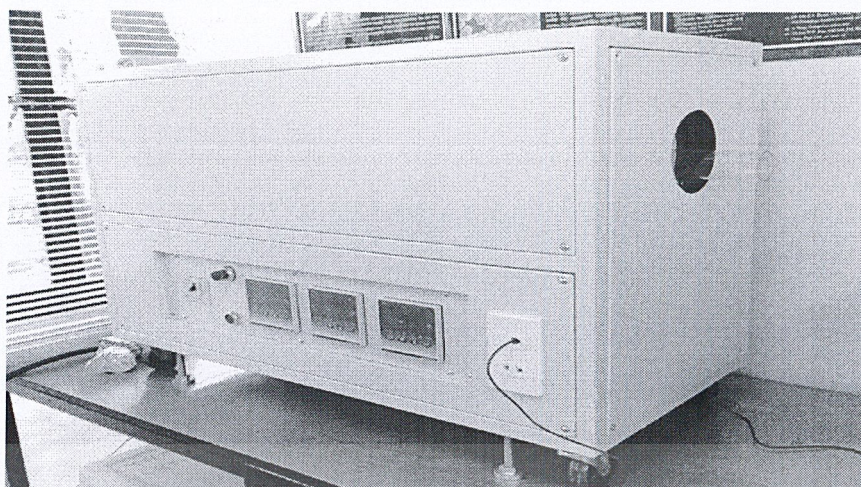
(4) หลังจากที่เตาความร้อนมีอุณหภูมิที่ต้องการสังเคราะห์ แล้ว ปิดแก๊สในโตรเจนระหว่างนั้นก็เปิดแอลกอฮอล์ที่มีอัตราการไหล 0.3 cc/min เข้าไปในเตาความร้อน เป็นเวลา 5 นาที

(5) จากนั้นปิดแอลกอฮอล์แล้วเปิดแก๊สในโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.2 cc/min พร้อมทั้งปรับอุณหภูมิของเตาความร้อนให้เหลือ 500 องศาเซลเซียส

(6) เมื่ออุณหภูมิของเตาความร้อนถึง 500 องศาเซลเซียส แล้วให้เปิดที่ครอบท่อแก้วออกจากนั้น ให้อ้อยๆ ดึงแผ่นฐานรองออกจากท่อแก้วช้าๆ โดยใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นให้วางแผ่นฐานรองไว้ที่ ปากท่อแก้วเป็นเวลา 5 นาที เมื่อถึงขั้นตอนนี้ก็สิ้นสุดกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์



รูปที่ 3.11 โครงสร้างเตาความร้อนแบบสามโซน



รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายเตาความร้อนสาม โชนที่ใช้ในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์

### 3.5 กระบวนการสร้างเซนเซอร์ด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์

#### 3.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเซนเซอร์

1. คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้
2. บอร์ดวงจรไขปลา
3. เส้นลวดตัวนำ
4. กาวเงินหรือกาวคาร์บอน
5. หัวแร้งและตะกั่วสำหรับบัดกรี

#### 3.5.2 ขั้นตอนการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้วัดค่าความต้านทาน

1. ตัดแผ่นบอร์ดวงจรไขปลาขนาด  $1 \times 1.5$  cm
2. บัดกรีขา connector ลงในบอร์ดไขปลา
3. ติดแผ่นคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ลงในบอร์ดไขปลา
4. ทำการบัดกรีลวดตัวนำต่อกับขา connector เพื่อทำเป็นขั้วทางไฟฟ้า
5. ติดกาวเงินหรือกาวคาร์บอนเชื่อมระหว่างขั้วของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้กับลวดตัวนำ

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีการปลูกด้วยไอเคมี ซึ่งเป็นแบบเทอร์โมลชีวีดี (Thermal Chemical Vapor Deposition) ตามเงื่อนไขต่างๆและนำท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ไปศึกษาและวิเคราะห์ รวมไปถึงการทดลองการนำท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ไปใช้เป็นเซนเซอร์เคมี โดยการนำมาติดตั้งภายในระบบวัดแก๊ส

#### 4.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนตามเงื่อนไขต่างๆ

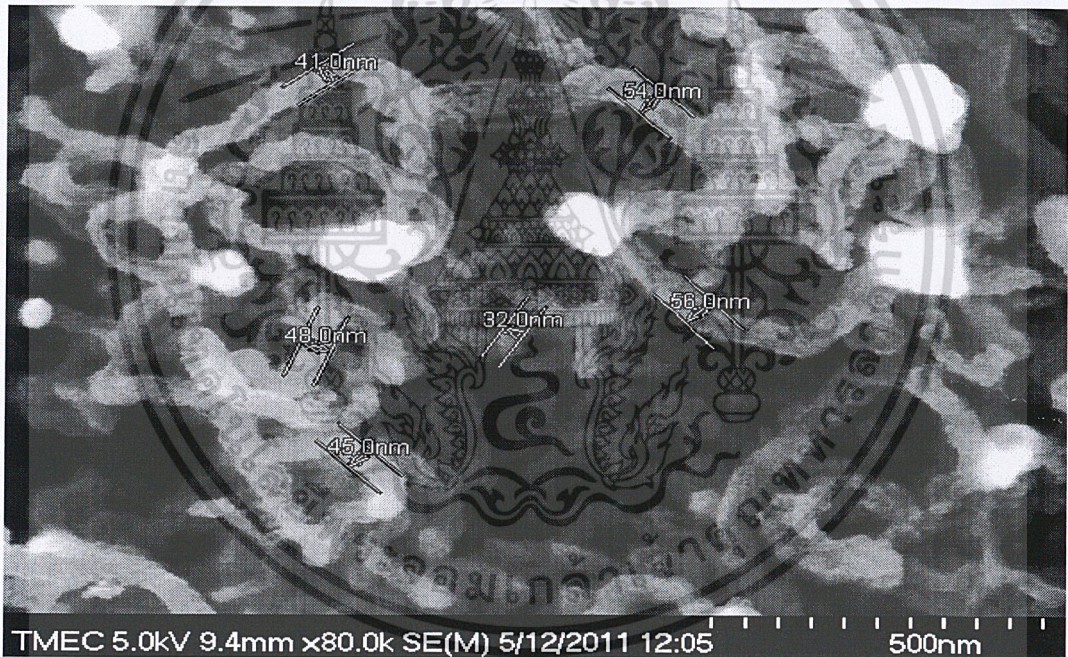
เงื่อนไขในการสังเคราะห์จะมีด้วยกัน 3 เงื่อนไข คือ อุณหภูมิที่ทำการสังเคราะห์ เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน โดยโลหะคะตะลิสต์ ที่ใช้เป็นนิเกิลซึ่งทั้ง 3 เงื่อนไขนี้จะทำให้การเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในลักษณะที่ต่างกัน จึงทำให้ต้องศึกษาเพื่อดูถึงความหนาแน่นและการจัดระเบียบของท่อนาโนคาร์บอนก่อนนำมาเป็นเซนเซอร์เคมี

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการและค่าความต้านทานก่อน-หลังการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเมื่อใช้นิเกิลเป็นโลหะคะตะลิสต์โดยเปลี่ยนอุณหภูมิ เวลา และอัตราการไหล

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (cc/min)	เวลา (นาที)	สัญลักษณ์	ความต้านทานหลังสังเคราะห์ (โอห์ม)	ความต้านทานก่อนสังเคราะห์ (โอห์ม)
650	0.2	15	650:0.2:15	10.44k	138M
		30	650:0.2:30	0.3k	0.9M
		60	650:0.2:60	3.2k	12.7M
	0.5	15	650:0.5:15	11.77k	6.5M
		30	650:0.5:30	5.12kK	5.2M
		60	650:0.5:60	5k	1.6M

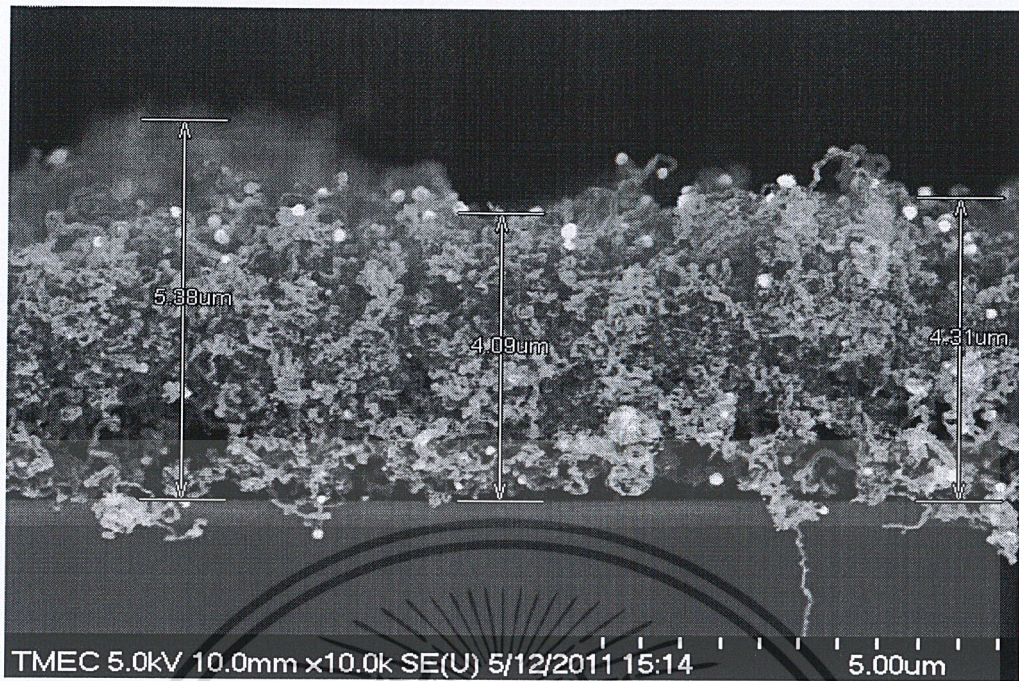
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (cc/min)	เวลา (นาที)	สัญลักษณ์	ความต้านทาน หลังสังเคราะห์ (โอห์ม)	ความต้านทาน ก่อนสังเคราะห์ (โอห์ม)
700	0.2	15	700:0.2:15	6k	11M
		30	700:0.2:30	5.17k	5.2M
		60	700:0.2:60	2M	25M
	0.5	15	700:0.5:15	10M	13.8M
		30	700:0.5:30	232k	0.72M
		60	700:0.5:60	0.689k	213K



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้

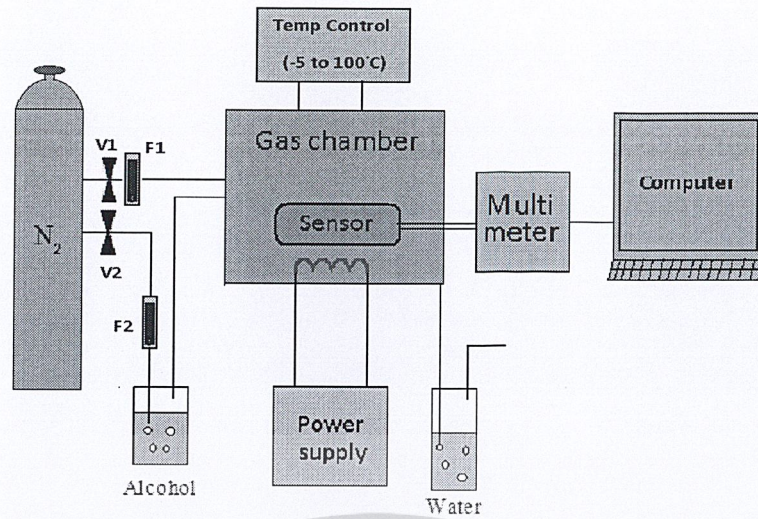
(ก) ขนาดของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้

(ข) ภาพถ่ายตัดขวางที่วัดความสูงของท่อนาโนคาร์บอน

จากรูปที่ 4.7 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (SEM) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเส้นงอ ขนาดของเส้นสม่ำเสมอ ขนาดของท่ออยู่ในช่วง 32.0-56.0 nm และมีความสูงอยู่ในช่วง 4.31-5.38 um สังเกตจุดสีขาวที่ปรากฏนั้นคือ โลหะคะตะไลต์ที่เกิด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนในครั้งนี้ เกิดท่อนาโนคาร์บอนในลักษณะการเกิดแบบ Tip growth คือ โลหะคะตะไลต์จะอยู่ด้านบนของปลายท่อ

#### 4.2 การนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้เป็นเซนเซอร์เคมี

ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการสังเคราะห์ลงบนแผ่นฐานรองและมีการต่อขั้วเรียบร้อยแล้วนั้น นำมาติดตั้งภายในระบบวัดแก๊ส



รูปที่ 4.2 แผนภาพระบบการวัดแอลกอฮอล์

ระบบการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งการวัดไอระเหยแอลกอฮอล์จะกระทำในระบบปิดภายในห้องปฏิบัติการหรือ Chamber ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิจากตัวควบคุมอุณหภูมิระหว่าง  $-5$  ถึง  $100$  °C ใช้ไนโตรเจนเหลวและ heater ในการควบคุม โดยอุณหภูมิห้องปฏิริยานี้จะเป็นอุณหภูมิแวดล้อมในการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ ในห้องปฏิริยาจะมีที่ขีดยึดหัวเซนเซอร์อยู่ภายในสำหรับยึดอุปกรณ์ขณะทำการวัด ส่วนด้านล่างของที่ขีดยึดเซนเซอร์จะมีขดลวดทั้งสแตนเลสสำหรับให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในกรณีที่ต้องการไล่ความชื้นที่ผิวฟิล์มบางหลังการดูดซับไอแอลกอฮอล์ขณะทำการวัด โดยความร้อนที่ให้ความควบคุมได้จากค่ากระแสที่ป้อนให้ขดลวดจากแหล่งจ่ายพลังงานภายนอกห้องปฏิริยา

ก่อนทำการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์จะทำการไล่อากาศในห้องปฏิริยาด้วยแก๊สไนโตรเจนผ่านวาล์ว V1 และมิเตอร์ควบคุมการไหลของแก๊ส F1 แก๊สไนโตรเจนจะเข้าแทนที่อากาศในห้องปฏิริยา Chamber ไล่อากาศออกมาภายนอกโดยมีน้ำดักอยู่ โดยน้ำจะทำหน้าที่เป็นวาล์วปิดกั้นอากาศภายนอกไม่ให้เข้าไปภายในและทำหน้าที่เจือจางแก๊สที่เหลือจากห้องปฏิริยาให้ละลายในน้ำก่อนที่จะออกสู่บรรยากาศภายนอก

เมื่อต้องการวัดการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ทำการปิดวาล์ว V1 และเปิดวาล์ว V2 ให้แก๊สไนโตรเจนโดยควบคุมปริมาณแก๊สผ่านมิเตอร์ควบคุมการไหลแก๊ส F2 ลงไปยังสารละลายแอลกอฮอล์ ไนโตรเจนจะนำพาไอระเหยแอลกอฮอล์ผ่านฟองแก๊สไนโตรเจนไปยังห้องปฏิริยาหรือ Chamber โดยจะทำสลับกันเป็นวงรอบการวัด ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงถูกแสดงผ่านจอมอนิเตอร์ที่เวลาจริงและบันทึกเก็บไว้เป็นข้อมูลอย่างต่อเนื่อง

ในการทดลองทุกตอนก่อนที่เซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์จะถูกนำไปวัดในห้องปฏิบัติการหรือ Chamber จะต้องทำการอบไล่ความชื้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์เบื้องต้นที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 20 นาที ทำการไล่อากาศออกจากห้องปฏิบัติการหรือ chamber ด้วยแก๊สไนโตรเจนผ่านวาล์ว V1 และมีเตอร่าการไหล F1 เป็นเวลา 20 นาที ในขณะที่ห้องปฏิบัติการจะเต็มไปด้วยบรรยากาศไนโตรเจน และในช่วงเวลานี้จะทำการตั้งค่าอุณหภูมิห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นอุณหภูมิแวดล้อมในการวัดให้คงที่ที่ค่าต้องการ เมื่อต้องการวัดการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์จะปิดวาล์ว 1 และเปิดวาล์ว 2 ผ่านมิเตอร์ควบคุมการไหลแก๊ส F2 ด้วยค่า 200 cc/นาที แก๊สไนโตรเจนจะนำพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไปในห้องปฏิบัติการซึ่งจะทำปฏิกิริยากับฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อไป ในการวัดจะวัดเป็นรอบการวัดอย่างต่อเนื่องอย่างน้อยสองรอบการวัด เมื่อไอระเหยแอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนนาโนทิวบ์ค่าความต้านทานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าสูงสุดและเริ่มอ้อมตัวเรียกค่าความต้านทานสูงสุดที่เริ่มอ้อมตัว  $R_{MAX}$  จากนั้นจะหยุดให้ไอระเหยแอลกอฮอล์โดยปิดวาล์ว V2 และเปิดวาล์ว V1 ให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้าไปในห้องปฏิบัติการหรือ Chamber ไล่ไอระเหยแอลกอฮอล์ในห้องปฏิบัติการออกไป ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนถึงค่าต่ำสุดเรียกว่า  $R_{MIN}$  เป็นค่าความต้านทานฐาน ณ.อุณหภูมินั้น ซึ่งจะครบหนึ่งรอบการวัด และจะทำการวัดรอบใหม่ต่อไป ค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในรอบการวัดแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง  $\Delta R\%$  โดยสามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานสูงสุดและต่ำสุดในรอบการวัดดังสมการที่ 1

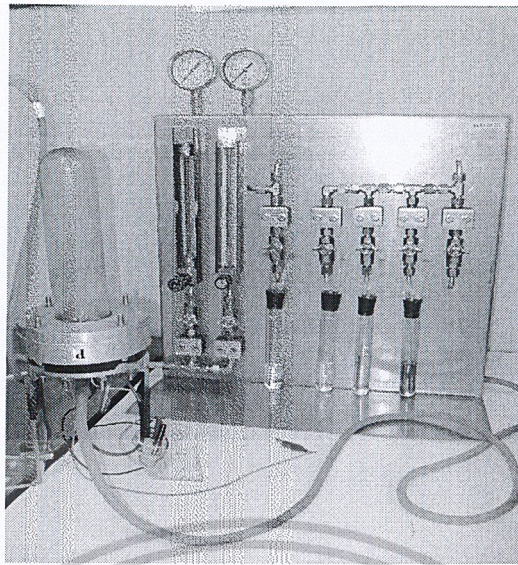
$$\Delta R\% = \frac{R_{MAX} - R_{MIN}}{R_{MIN}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ  $R_{MAX}$  คือค่าความต้านทานสูงสุดในรอบการวัด

$R_{MIN}$  คือค่าความต้านทานต่ำสุดในรอบการวัด

ขั้นตอนการนำมาตรวจวัดก๊าซ โดยเริ่มจากวัดค่าความต้านทานเริ่มต้นก่อนการตรวจวัด

1. เริ่มจ่ายก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเป็นเวลา 20 นาที วัดค่าความต้านทานเริ่มต้น
2. เริ่มจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์โดยมีไนโตรเจนเป็นตัวพา ทำการบันทึกค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไป จนได้ค่าคงที่
3. หยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์โดยที่ยังจ่ายก๊าซไนโตรเจนอยู่ ทำการบันทึกค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปจนได้ค่าคงที่ จากนั้นทดสอบซ้ำอีกครั้งแล้วบันทึกค่า

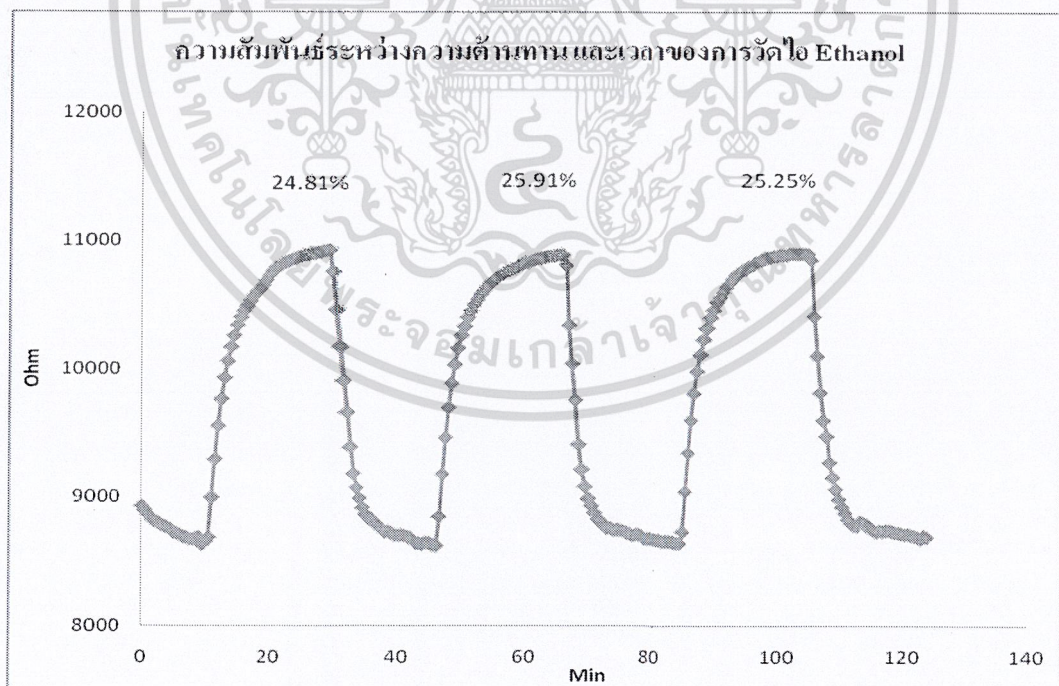


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายระบบสำหรับตรวจวัดก๊าซ

#### 4.3 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ของเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอน

4.3.1 ผลการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ของเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่างๆ

650:0.2:15



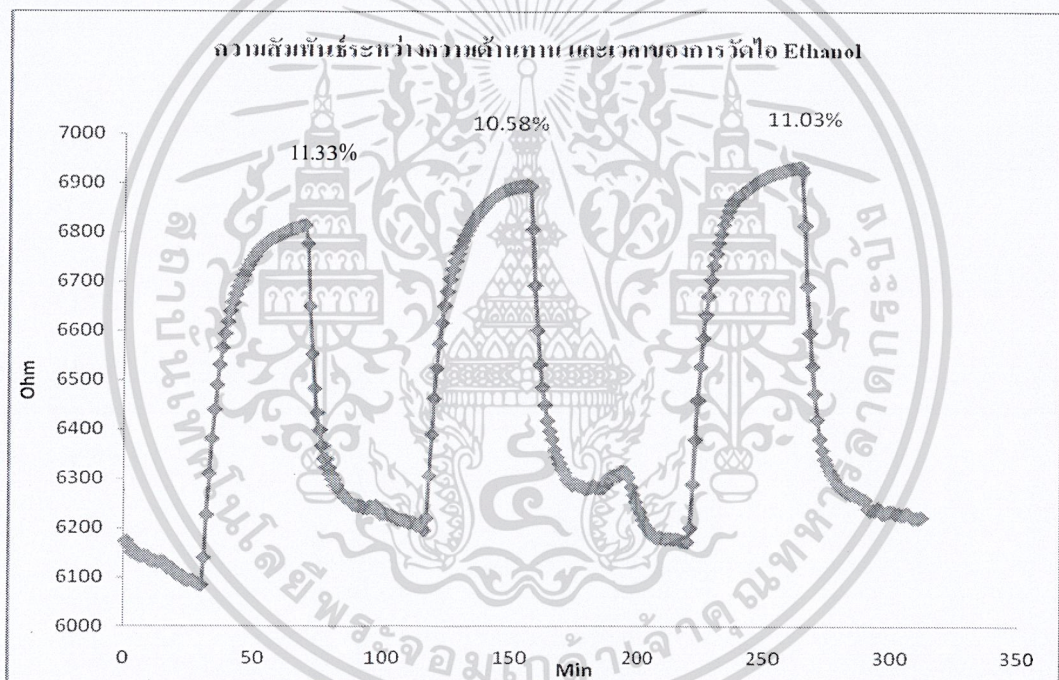
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล

โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $650^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหล  $0.2\text{ cc/min}$  และที่เวลา 15 นาที พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 8.69 กิโลโอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดๆหนึ่งคือเริ่มอิ่มตัวอยู่ที่ประมาณ 10.8 กิโลโอห์ม ใช้เวลาประมาณ 7 นาทีซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 24.81% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยเอทานอล ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของการวัดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ประมาณ 25.91% และ 25.25% ตามลำดับ

650:0.2:30



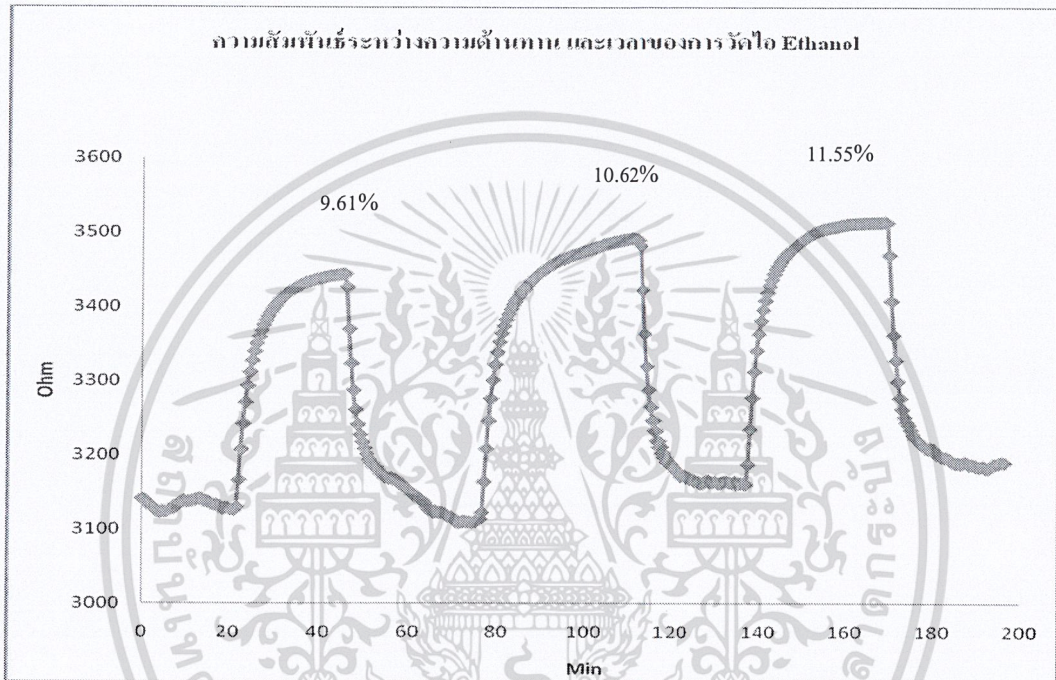
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $650^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหล  $0.2\text{ cc/min}$  และที่เวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $650^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหล  $0.2\text{ cc/min}$  และที่เวลา 30 นาที พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 6.09 กิโลโอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดๆหนึ่งคือเริ่มอิมตัวอยู่ที่ประมาณ 6.78 กิโลโอห์ม ใช้เวลาประมาณ 15นาทิจึงได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 11.33% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่าย ไอระเหยเอทานอล ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการ ทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของการวัดครั้งที่ 1และครั้งที่ 2 ประมาณ 10.58% และ 11.03% ตามลำดับ

650:0.2:60

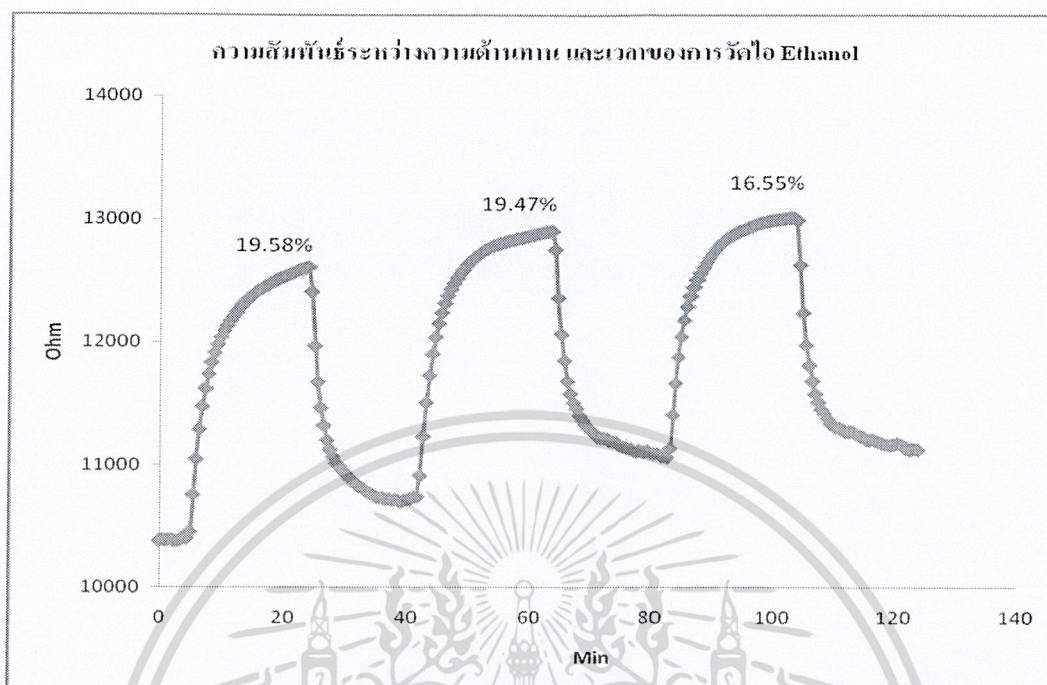


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $650^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหล  $0.2\text{ cc/min}$  และที่เวลา 60 นาที

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ $650^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหล  $0.2\text{ cc/min}$  และที่เวลา 60 นาที พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 3.12 กิโลโอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดๆหนึ่งคือเริ่มอิมตัวอยู่ที่ประมาณ 3.42 กิโลโอห์ม ใช้เวลาประมาณ 8นาทิจึงได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 9.61% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยเอทานอล ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการ ทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของการวัดครั้งที่ 1และครั้งที่ 2 ประมาณ 10.62% และ 11.55% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

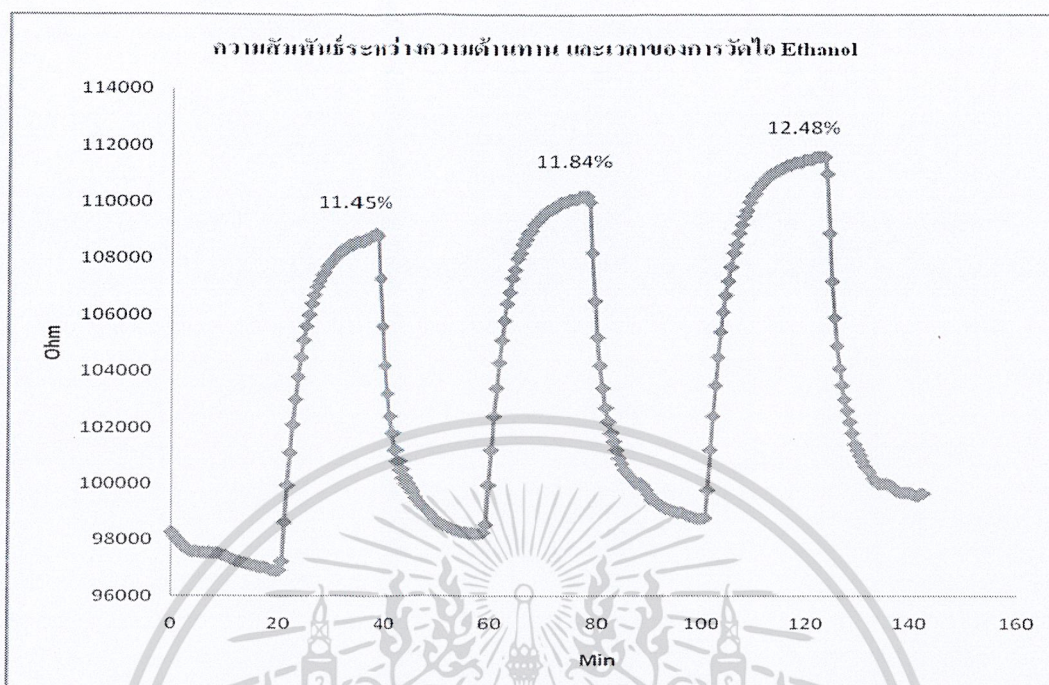
650:0.5:15



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา 15 นาที

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา 15 นาที พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 10.38 กิโลโอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่งคือเริ่มอ้อมตัวอยู่ที่ประมาณ 12.42 กิโลโอห์ม ใช้เวลาประมาณ 4 นาที ซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 19.58% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยเอทานอล ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของการวัดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ประมาณ 19.47% และ 19.55% ตามลำดับ

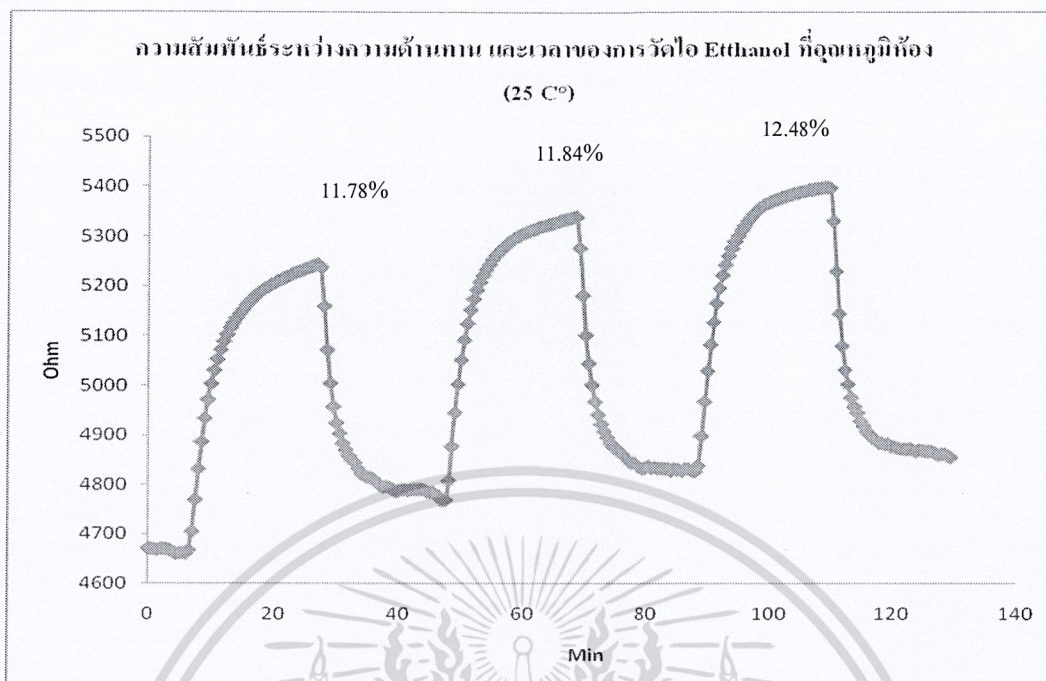
650:0.5:30



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา 30 นาที พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 96.9 กิโลโอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่งคือเริ่มอิมตัวอยู่ที่ประมาณ 108 กิโลโอห์ม ใช้เวลาประมาณ 7 นาที ซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 11.45% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยเอทานอล ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของการวัดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ประมาณ 11.84% และ 12.48% ตามลำดับ

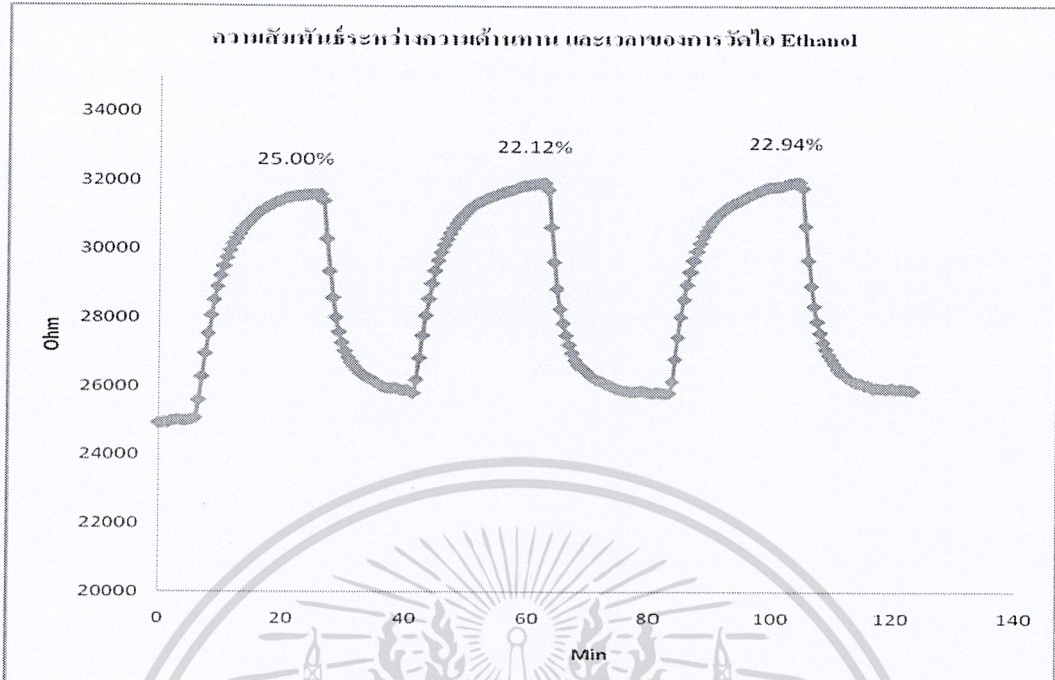
650:0.5:60



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา 60 นาที

จากรูปที่ 4.9 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 650°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา 60 นาที พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 46.69 กิโลโอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่งคือเริ่มอิมตัวอยู่ที่ประมาณ 51.91 กิโลโอห์ม ใช้เวลาประมาณ 8 นาทีซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 11.78% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยเอทานอล ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของการวัดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ประมาณ 11.40% และ 11.44% ตามลำดับ

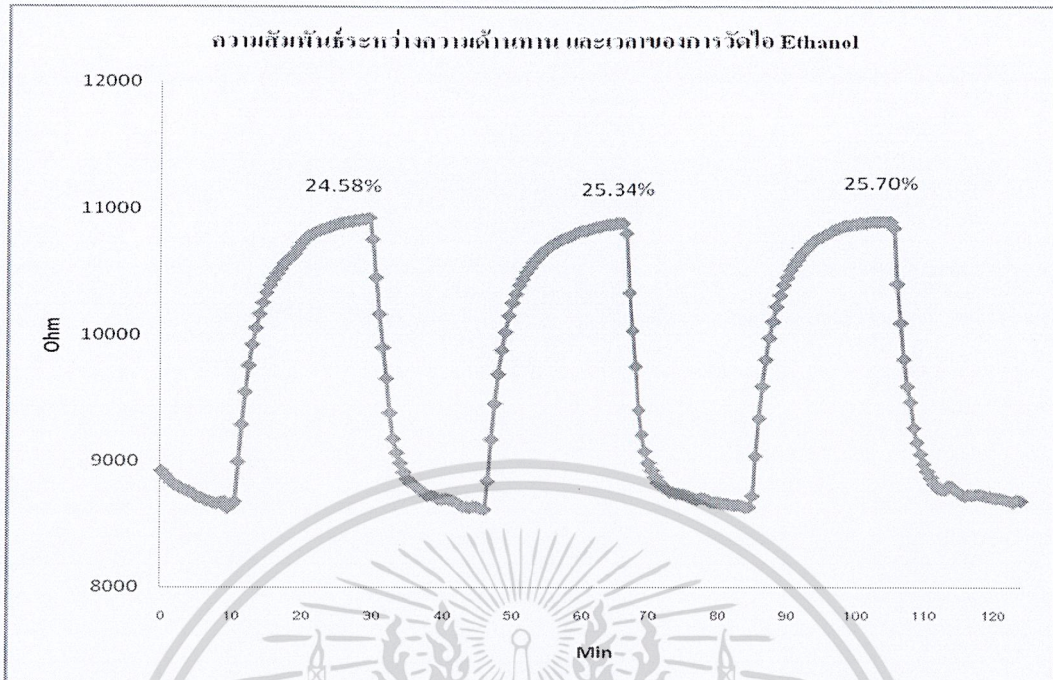
700:0.2:15



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา 15 นาที

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา 15 นาที พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 25.03 กิโลโอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่งคือเริ่มอิมตัวอยู่ที่ประมาณ 31.37 กิโลโอห์ม ใช้เวลาประมาณ 7 นาทีซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 25.00% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยเอทานอล ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการทดสอบซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของการวัดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ประมาณ 22.12% และ 22.94% ตามลำดับ

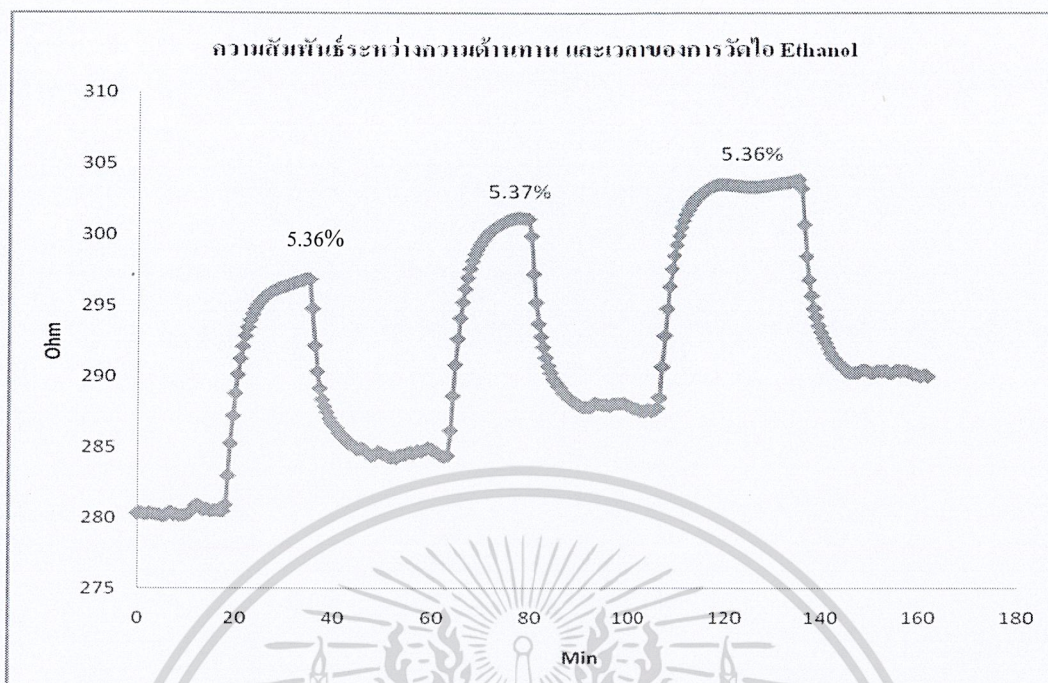
700:0.2:30



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา 30 นาที พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 8.67 กิโลโอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่งคือเริ่มอิมตัวอยู่ที่ประมาณ 10.79 กิโลโอห์ม ใช้เวลาประมาณ 7 นาทีซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 24.58% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยเอทานอล ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของการวัดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ประมาณ 25.34% และ 25.70% ตามลำดับ

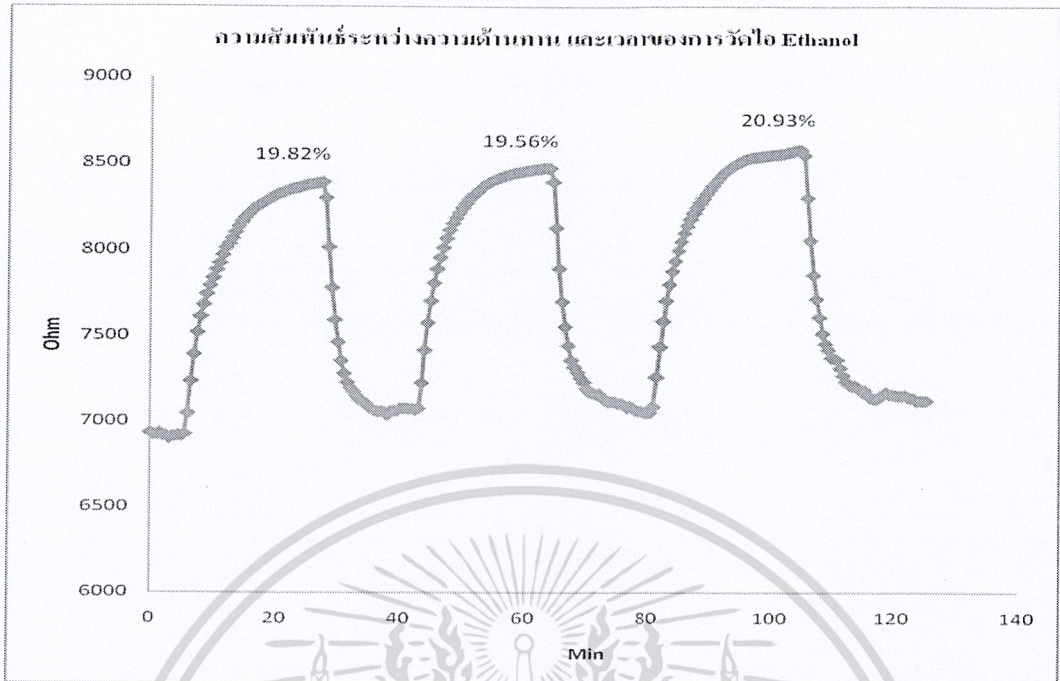
700:0.2:60



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา 60 นาที

จากรูปที่ 4.12 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700°C อัตราการไหล 0.2 cc/min และที่เวลา 60 นาที พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 295.69 โอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่งคือเริ่มอิมิตัวอยู่ที่ประมาณ 280.63 โอห์ม ใช้เวลาประมาณ 6 นาทีซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 5.36% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยเอทานอล ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของการวัดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ประมาณ 5.37% และ 5.36% ตามลำดับ

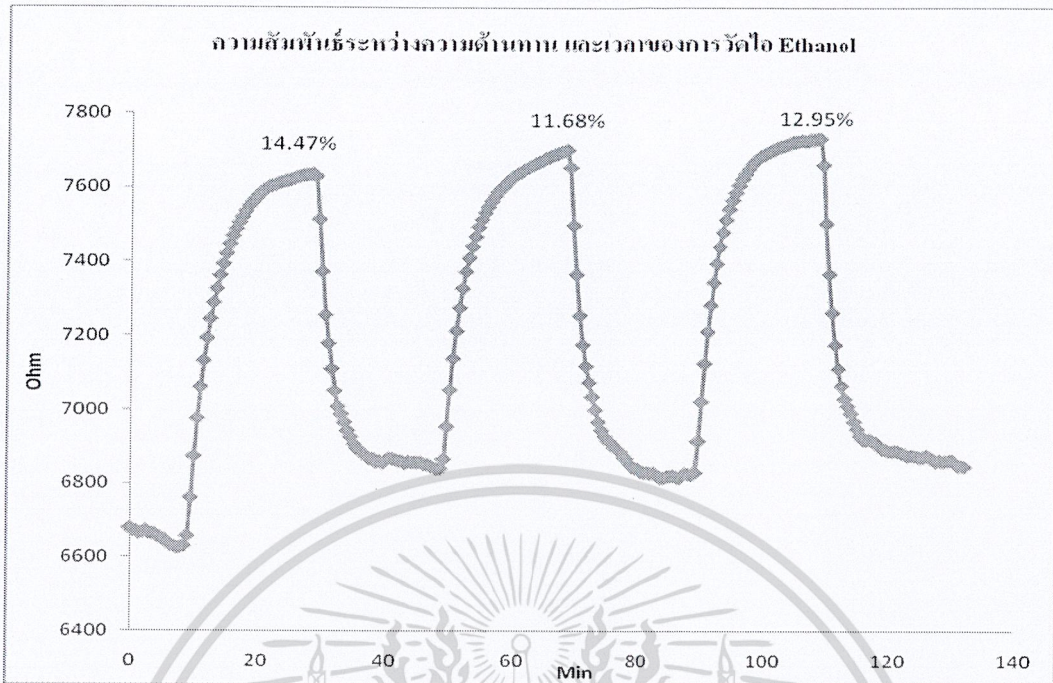
700:0.5:15



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา 15 นาที

จากรูปที่ 4.13 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา 15 นาที พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 6.91 กิโลโอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่งคือเริ่มอ้อมตัวอยู่ที่ประมาณ 8.28 กิโลโอห์ม ใช้เวลาประมาณ 7 นาที ซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 19.82% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยเอทานอล ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของการวัดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ประมาณ 19.56% และ 20.93% ตามลำดับ

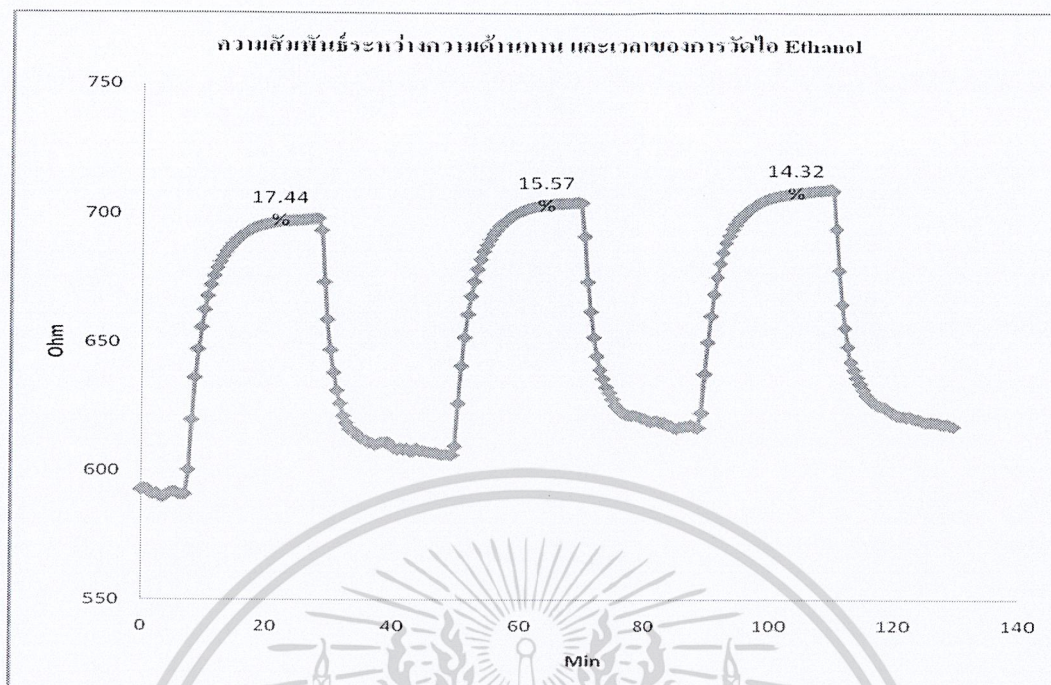
700:0.5:30



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่ส่งกระแสที่อุณหภูมิ 700°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่ส่งกระแสที่อุณหภูมิ 700°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา 30 นาที พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายในโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 6.63 กิโลโอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ในโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่งคือเริ่มอิมตัวอยู่ที่ประมาณ 7.59 กิโลโอห์ม ใช้เวลาประมาณ 8 นาที ซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 14.47% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยเอทานอล ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของการวัดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ประมาณ 11.68% และ 12.95% ตามลำดับ

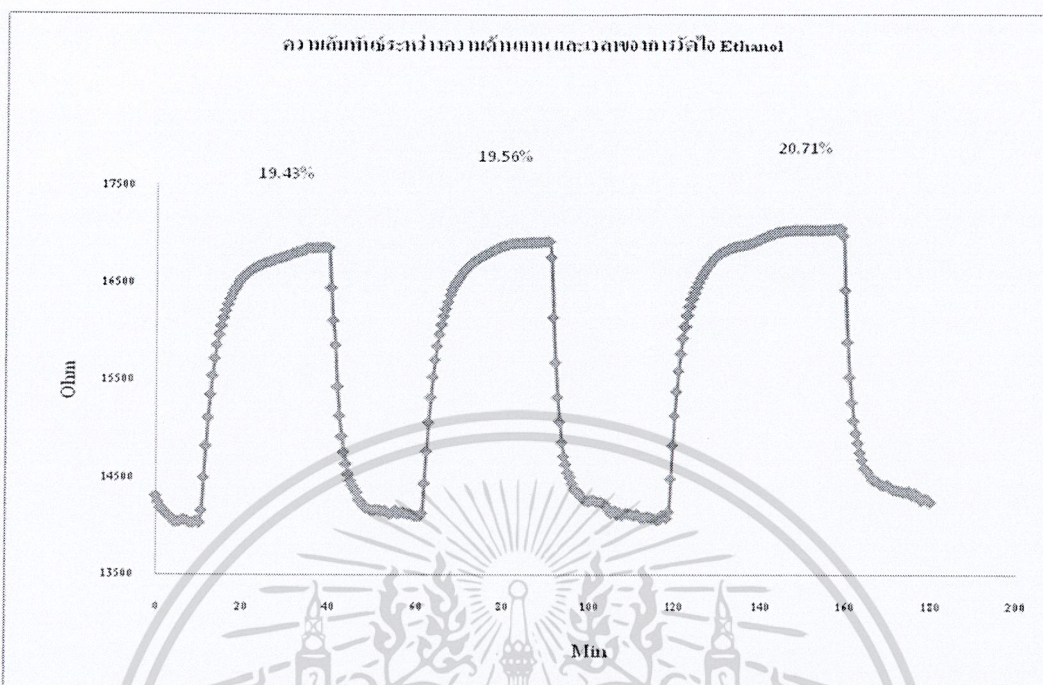
700:0.5:60



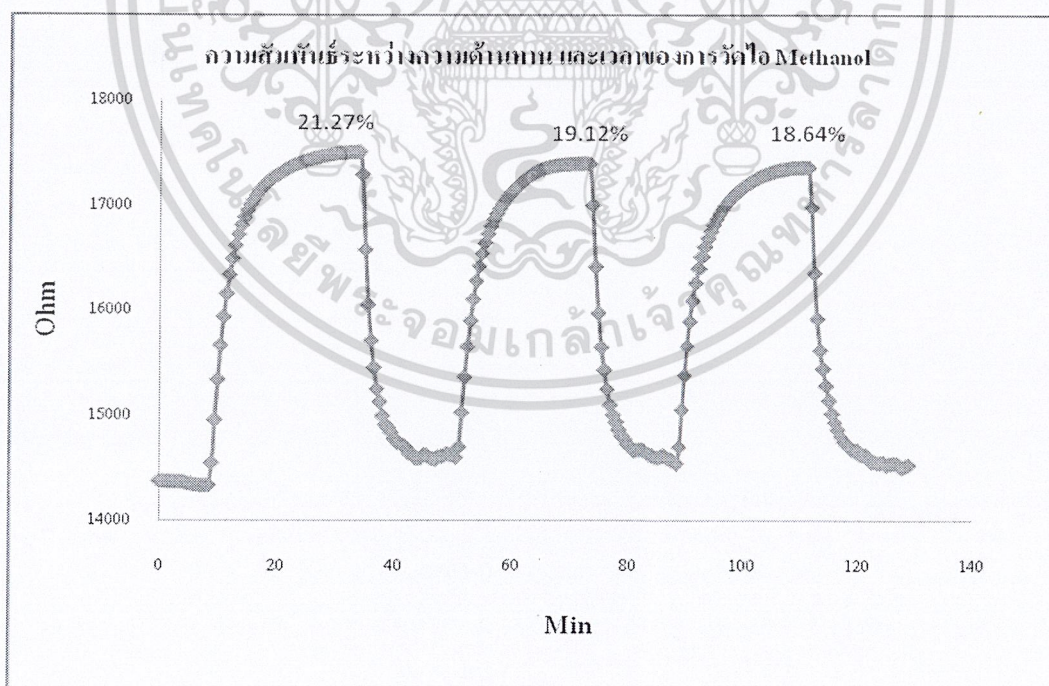
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา 60 นาที

จากรูปที่ 4.15 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล โดยเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700°C อัตราการไหล 0.5 cc/min และที่เวลา 60 นาที พบว่าขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบ วัดค่าความต้านทานคงที่ได้ประมาณ 591.9 โอห์ม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆ หนึ่งคือเริ่มอิมิตัวอยู่ที่ประมาณ 694.5 โอห์ม ใช้เวลาประมาณ 7 นาทีซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 17.44% ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยเอทานอล ค่าความต้านทานมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นของการวัดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ประมาณ 15.57% และ 14.32% ตามลำดับ

#### 4.3.2 ผลการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ 8 ชนิดของเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอน

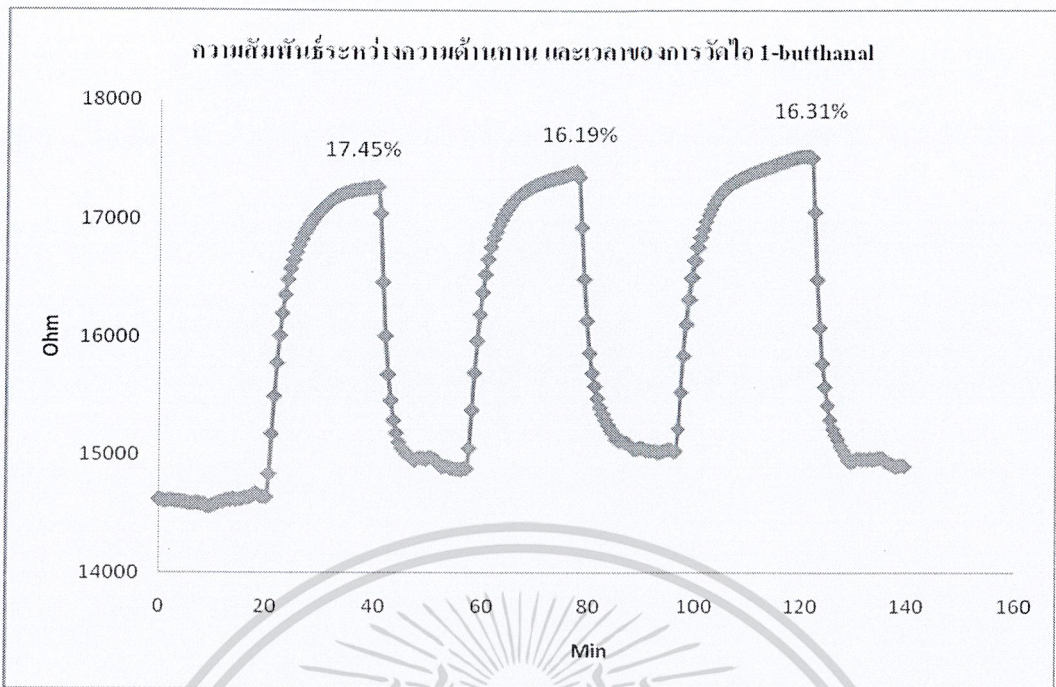


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล

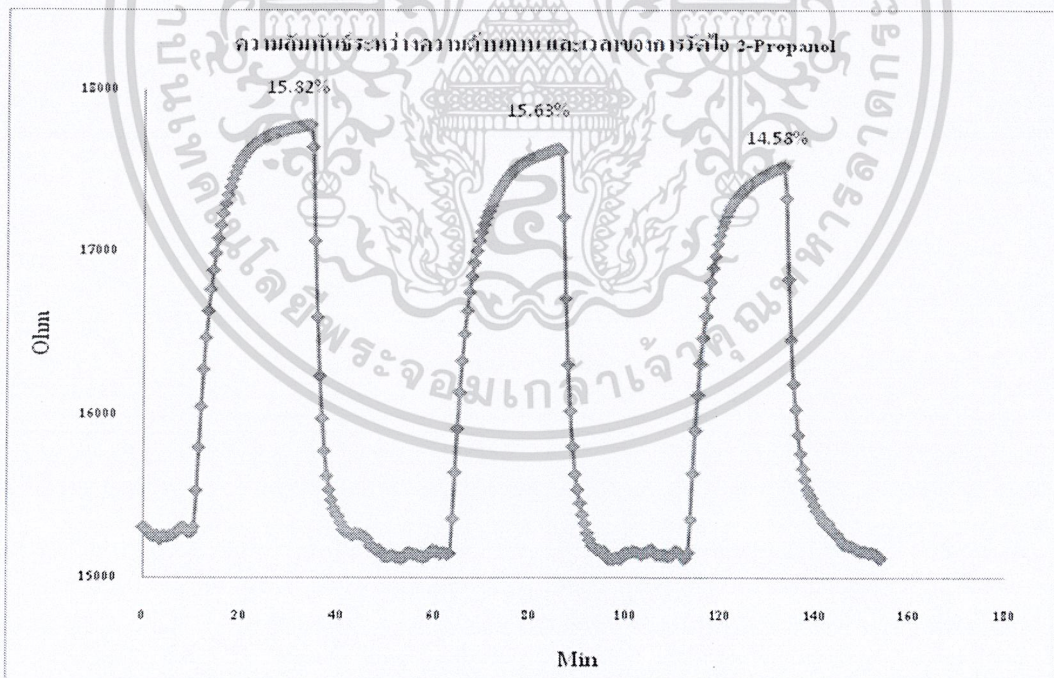


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเมทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

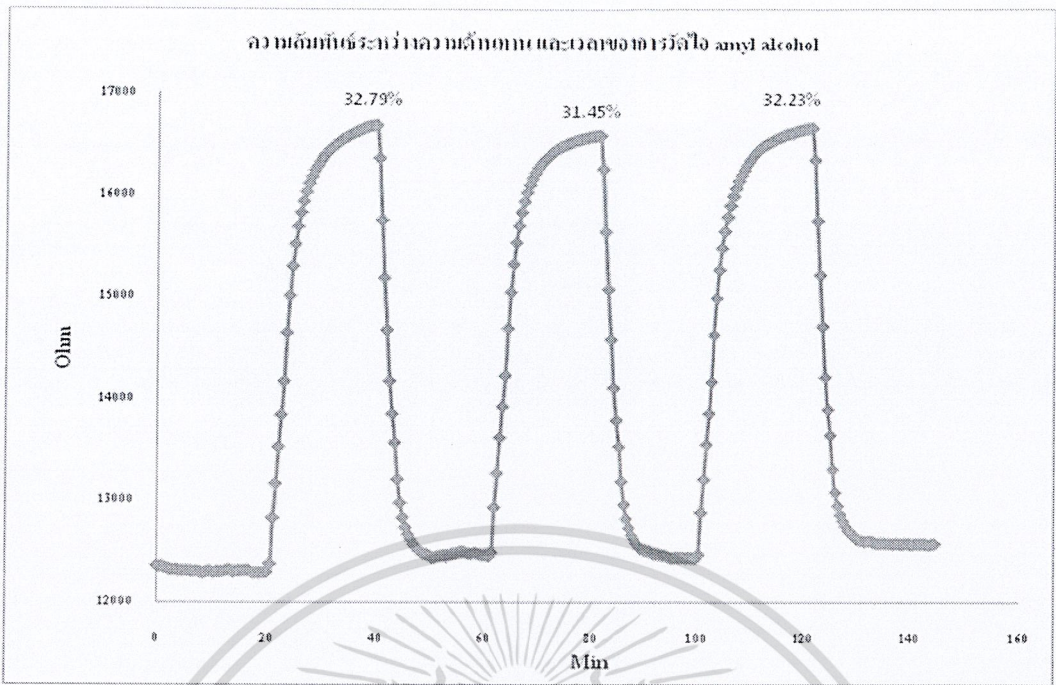


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหย 1-butthanal

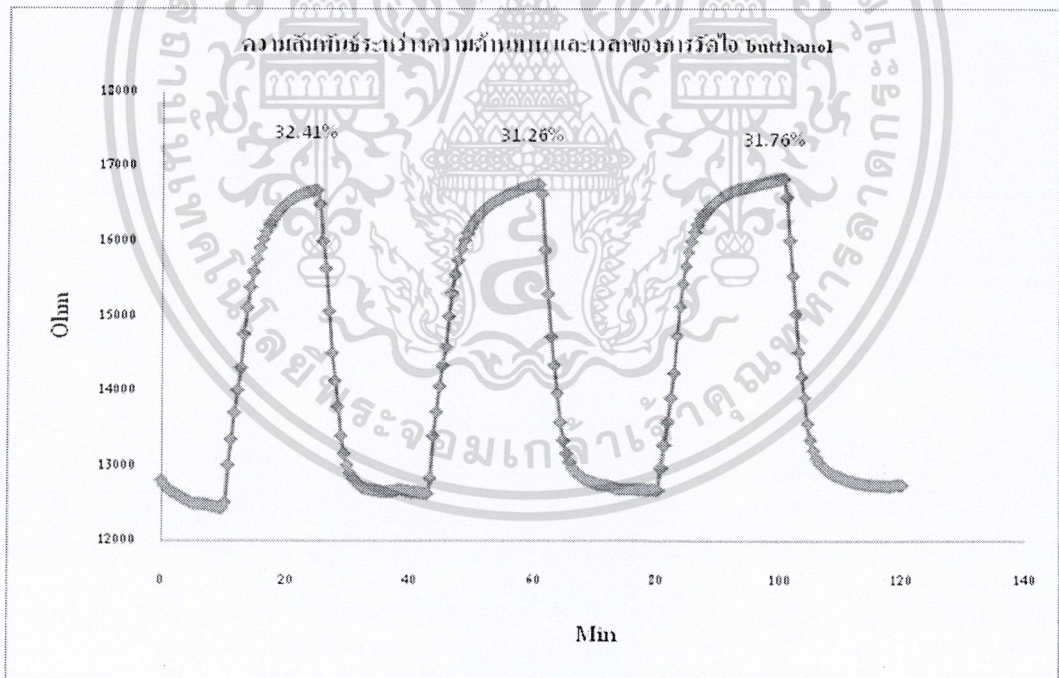


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหย 2-propanol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

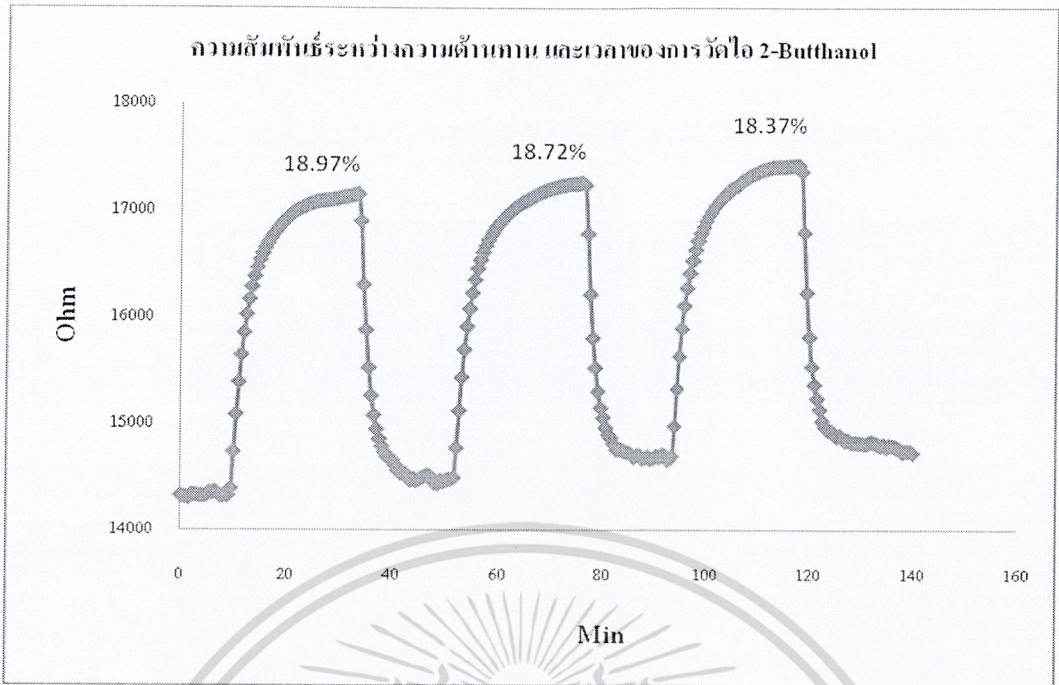


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหย amyl alcohol

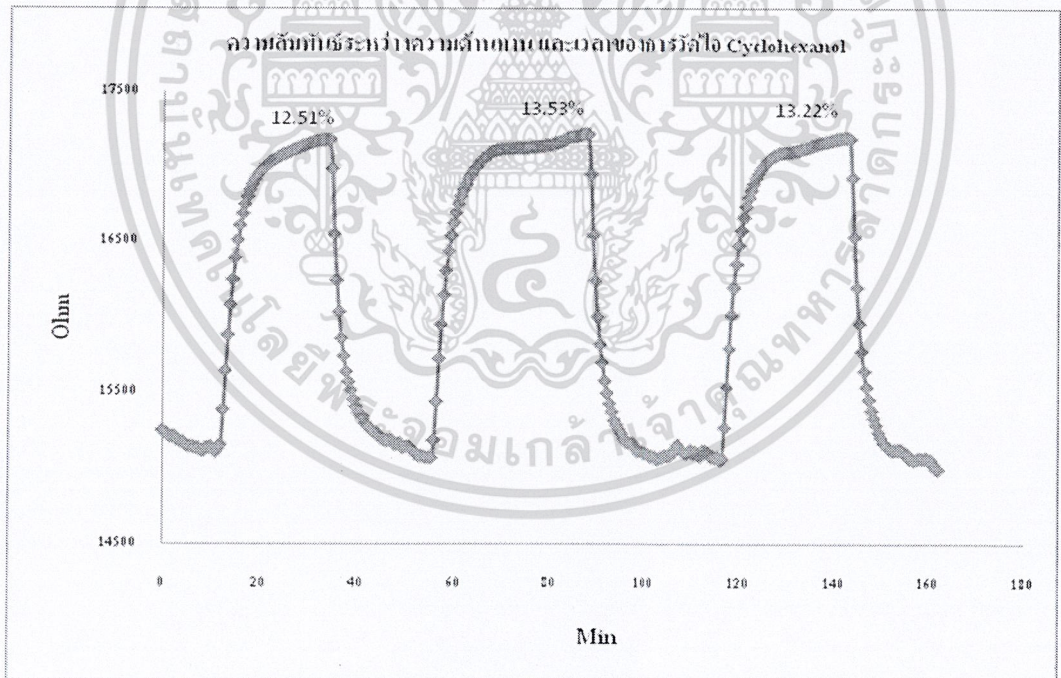


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหย buthanol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหย 2-buthanol



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหย Cyclohexanol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.16-4.23 แสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอรระเหยของแอลกอฮอล์ ทั้ง 8 ชนิด คือ Ethanol, Metanol, 1-buthanol, 2-propanol, amyl alcohol, buthanol, 2-buthanol และ Cyclohexanol ตามลำดับ ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องทั้งหมด พบว่า เซนเซอร์หนึ่งตัวสามารถ ตรวจจับไอรระเหยแอลกอฮอล์ได้ทั้ง 8 ชนิด ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปโดยเฉลี่ยของการตรวจจับ ไอรระเหยแอลกอฮอล์ทั้งหมดคือ 19.%, 19.67%, 16.65%, 15.34%, 32.15%, 31.81%, 18.68%,13.08% ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้นำเสนอการสร้างเซนเซอร์แอลกอฮอล์จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition ; Thermal CVD) โดยใช้แหล่งกำเนิดคาร์บอนเป็นเอทานอลที่มีก๊าซในโตรเจนเป็นตัวนำพา ใช้ตัวคะตะไลต์นิเกิลเป็นตัวช่วยในการเกิด ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถทำได้ครั้งละหลาย ๆ ชิ้น ราคาประหยัดกว่าวิธีอื่นๆ และไม่ใช่ก๊าซชนิดที่เป็นอันตราย ส่วนข้อเสียคือ ไม่สามารถมองเห็นขณะเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้เป็นแบบผนังหลายชั้น ในส่วนกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ได้ทำการสังเคราะห์บนแผ่นซิลิกอนที่เป็นฐานรอง โดยมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์ คือ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 650 และ 700 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจนในการนำพาไอระเหยเอทานอลเป็น 0.2 และ 0.5 cc / min เวลาในการสังเคราะห์เป็น 15 , 30 และ 60 นาที ผลปรากฏว่าจากการสังเคราะห์ จะได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดขึ้นบนฐานรองซิลิกอนสามารถมองเห็นเข็มสีดำเคลือบอยู่บนแผ่นซิลิกอนได้ด้วยตาเปล่า บนลวดลายที่ต้องการโดยในส่วนการสร้างลวดลายต้องอาศัยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีและกระบวนการสปีเตอร์ริงสำหรับเคลือบโลหะคะตะไลต์นี้เกิดให้ลวดลายเกิดตามที่กำหนด

จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ตามขั้นตอนดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น เราสามารถนำไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือสร้างเป็นเซนเซอร์ตรวจจับก๊าซ โดยการสปีเตอร์ริงให้ เป็นกลุ่มก้อนเพื่อให้ขาดจากกันทางไฟฟ้าและสร้างเป็นลวดลายโดยมีขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นทองแดงซึ่งเหมาะกับการทำขั้ว เพราะคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่สามารถเกิดขึ้นบนทองแดงได้แต่จะเกิดบนลวดลายนิเกิลที่เป็นกลุ่มก้อน และจากการทดลองการตรวจจับไอระเหยของแอลกอฮอล์ ผลปรากฏว่า สามารถตรวจจับได้ ซึ่งจะสังเกตได้จากค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อปล่อยก๊าซเข้าไปในระบบ พบว่าในการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิการสังเคราะห์ 700 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 0.2 cc/min และเวลาในการสังเคราะห์ 30 นาที มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมากที่สุด โดยมีการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย 25.54% อันดับที่ 2คือ อุณหภูมิการสังเคราะห์ 650 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 0.2 cc/min และเวลาในการสังเคราะห์ 15 นาที มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน โดยมีการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย 25.32% และที่อุณหภูมิการสังเคราะห์ 700 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 0.2 cc/min และเวลาในการสังเคราะห์ 60 นาที มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน โดยมีการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย 5.36%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงในการวัดไอรระเหยโดยผลจากอุณหภูมิได้ ดังนี้ ที่ 650 องศาเซลเซียส เป็น 14.91% ที่ 700 องศาเซลเซียส เป็น 16.77%

ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงในการวัดไอรระเหยโดยผลจากอัตราการไหลได้ดังนี้ที่ 0.2 cc/min เป็น 16.88% ที่ 0.5 cc/min เป็น 14.80%

ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงในการวัดไอรระเหยโดยผลจากเวลาได้ดังนี้ที่ 15 นาที เป็น 21.19% ที่ 30 นาที เป็น 15.36% ที่ 60 นาที เป็น 10.96%

จากการวิจัยผลที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้สามารถนำไปศึกษาและพัฒนาเพื่อเป็นเซนเซอร์ และวัสดุอุปกรณ์ทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีต่อไป



## บรรณานุกรม

- [1] Nanotechnology. “ประวัติศาสตร์ระดับนาโนเทคโนโลยี” <http://www.atom.rmutphysics.com>
- [2] Sumio Iijima. “Helical microtubules of graphiti carbon”, Nature, 354:56-58, 1991.
- [3] N.Hamada, Mater. Sci.Eng, B, 19, p.181 (1993)
- [4] W.R.Fahrner. “Nanotechnology and Nanoelectronics” Springer, 2005.
- [5] Phillip G. Collins and Phaedon Avouris. “Nanotubes for Electronics” Scientific American, December 2000.
- [6] “นาโนเทคโนโลยี” <http://ozonefilm.com/nanofilm.php>.
- [7] “นาโนเทคโนโลยี...เทคโนโลยีแห่งศตวรรษ” [www.engineeringtoday.net](http://www.engineeringtoday.net), 16 เมษายน 2547
- [8] “นาโนเทคโนโลยี” <http://www.2.cs.science.co.th>
- [9] “ประวัติการค้นพบท่อนาโนคาร์บอน (Carbonnanotube)” <http://www.mnc.eng.psu.th>.
- [10] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant, Nature 388 (1997) 756.
- [11] Z.F. Ren, Z.P. Huang, J.H. Wang, M.P. Siegal, P.N. Provencio, Science 282 (1998) 1105.
- [12] B.Y.Xia, P.Y.Y. Sun, Y. Wu, B. Gates, Y.Yin, F. Kim, H. Yan, “One-Dimensional Nanostructures: Synthesis, Characterization, and Applications”, Advances Materials, 15: 353-389, 2003.
- [13] C.N. Rao, B.C. Satishkumar, A. Govindaraj, Manashi Nath, “Nanotubes” CHEM.PHY.CHEM. 2 : 78-105-, 2001.
- [14] อิศรา พิมพ์ธรา “การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่นซิลิคอนโดยกระบวนการตกตะกอนไอเคมี”, หน้า14-18. ตุลาคม 2550
- [15] รัฐพงษ์ นาคาไชย. “การเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวด้วยวิธี CVD ขดลวดความร้อน.”, หน้า 6-10.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้