

รายงานโครงการฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

เซนเซอร์เคมีด้วยฟิล์มท่อนาโนคาร์บอน

Carbon nanotube film Chemical sensor



โดย

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

Assoc. Prof. Dr. Toempong Phetchakul

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

RC4  
TA  
455  
.C3  
๑๗๗๗/๑  
83909

เสนอ

11919760  
b.....  
i.....

สภาวิจัยแห่งชาติ

(ได้รับทุนสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาสังเคราะห์และการเตรียมฐานรองสำหรับการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งขั้นตอนทั้งสองส่วนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการที่จะนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับ จะใช้วิธี CVD แบบขดลวดความร้อน กระทำที่ความดันบรรยากาศ มีแหล่งจ่ายไอระเหยคือเอทานอลผสมกับไฮโดรเจน ด้วยอัตราส่วนพอเหมาะ ไล่ลวดความร้อนถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ  $2000^{\circ}\text{C}$  ใช้วัสดุฐานรอง 2 ชนิด ได้แก่ ฐานรองซิลิคอน และฐานรองทองแดง เจือไนไซในการสังเคราะห์คือ อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วง 550 – 750 องศาเซลเซียส ใช้กำลังงาน 105 – 140 วัตต์ เวลาในการสังเคราะห์ 25 – 40 นาที อัตราส่วนของไฮโดรเจนรวมต่อไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่ายประมาณ 8 – 12 % โดยปริมาตร ผลการทดลองปรากฏว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้บนฐานรองทั้งหมด และได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางชนิด เช่น ใช้สารแหล่งจ่ายจากเอทานอลเปลี่ยนเป็นอะซีโตน ใช้ตัวแคตะไลต์จากนิกเกิลเปลี่ยนเป็นผงเหล็ก และเลือกวัสดุฐานรองที่นำมาทำการศึกษาคือ ซิลิคอนและทองแดง ผลปรากฏว่าท่อนาโนคาร์บอนสามารถสังเคราะห์ได้ และเป็นแบบผนังหลายชั้น

ในขั้นตอนต่อไป นำเสนอวิธีการเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยการสร้างลวดลายบนฐานรอง เพื่อต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดขึ้นในบริเวณที่ต้องการ โดยใช้ตัวแคตะไลต์เป็นนิกเกิลและสังเคราะห์ด้วยวิธีซีดีแบบขดลวดความร้อน (HF-CVD) ในการทดลองนี้ ศึกษาการสร้างลวดลายด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น การใช้หน้ากากป้องกัน กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และการชุบด้วยไฟฟ้า ฐานรอง ที่นำมาศึกษามี 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอนและทองแดง ผลการทดลองปรากฏว่าสามารถเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้เกิดในบริเวณที่ต้องการได้ และสุดท้ายได้ประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างเป็นตัวต้านทานสำหรับตรวจจับแอลกอฮอล์

## Abstract

This paper presents the synthesis and selective growth of carbon nanotube film. The HFCVD at atmospheric pressure was used in this work. The vapor source was ethanol mixed with hydrogen gas at appropriated ratio. The filament was heated up to around 2000°C. The two kinds of substrate were silicon and copper substrates. By this system CNTs can be grown at the condition substrate temperature in the range 550 - 750°C, 105-140 watt, 25-40 minute and 8-12 vol% of the ratio of H<sub>2</sub> gas passed through ethanol (for bubbling) to total H<sub>2</sub> gas. The results showed that CNTs film can be synthesized on all substrates and they were multi-walled.

The selective growth of carbon nanotube has been studied by patterning on substrate for controlling the growth of carbon nanotube by Ni as catalyst and synthesis by HFCVD. The research studies some techniques for selective growth which were shadow mask, photolithography and electroplating. Substrates for this studies were silicon and copper. CNTs can be selectively grown well. Finally, the resistive chemical sensor from CNTs film was applied for detecting ethanol vapor.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนทางการเงินจากสภาวิจัยแห่งชาติ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ. ที่นี้

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโท นายรัฐพงษ์ นาคาไชย ที่มีส่วนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในความเอื้อเฟื้อ สนับสนุนงานวิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน อาจารย์ เจ้าหน้าที่ นักศึกษา และผู้มีอุปการคุณทุกท่านไว้ ณ. ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
สัญลักษณ์.....	XV
ศัพท์เทคนิค.....	XVI
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2    ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3    สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4    ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5    ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6    ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์.....</b>	<b>5</b>
2.1    ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	5
2.1.1 Single Walled Carbon Nanotubes (SWCNTs).....	6
2.1.2 Multiple Walled Carbon Nanotubes MWCNTs).....	6
2.2    คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	7
2.2.1 คุณสมบัติทางกล.....	7
2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	9
2.2.3 คุณสมบัติทางความร้อน.....	9
2.3    การนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาประยุกต์ใช้งาน.....	10
2.3.1 ประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ.....	11
2.3.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์.....	12
2.3.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.4	ประยุกต์ใช้เป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์.....13
2.3.5	ประยุกต์ใช้ในการกักเก็บพลังงาน.....13
2.4	กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....14
2.4.1	Root Growth.....14
2.4.2	Tip Growth.....15
2.5	เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....16
2.5.1	การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM).....17
2.5.2	การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องทะลุ Transmission Electron Microscope (TEM).....21
2.5.3	การวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบ Energy Dispersive X-Ray (EDX) จากสัญญาณ X-Ray.....23
2.5.6	การวิเคราะห์คุณภาพของธาตุด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy.....24
2.6	กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดีแบบ ขจัดความร้อนที่ความดันบรรยากาศ.....28
<b>บทที่ 3</b>	<b>กระบวนการทดลอง การสร้างลวดลายและผลการทดลอง.....30</b>
3.1	อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....30
3.2	ขั้นตอนของกระบวนการสังเคราะห์.....32
3.3	กระบวนการทดลอง.....33
3.3.1	ฐานรองที่ใช้สำหรับการทดลอง.....33
3.3.1.1	ฐานรองซิลิกอน.....33
3.3.1.2	ฐานรองทองแดง.....33
3.3.2	แคตอะไลต์ที่ใช้สำหรับการทดลอง.....33
3.3.2.1	ผงเหล็ก.....33
3.3.2.2	นิกเกิล.....33
3.3.3	สารแหล่งจ่ายที่ใช้สำหรับการทดลอง.....33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.3.1 แอลกอฮอล์.....	33
3.3.3.2 อะซีโตน.....	33
3.3.4 วิธีการเตรียมฐานรอง.....	34
3.3.4.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอน.....	34
3.3.4.2 การเตรียมฐานรองทองแดง.....	34
3.3.5 เส้นใยในการสังเคราะห์.....	34
3.3.6 ผลการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงบน ฐานรองซิลิคอน.....	36
3.3.6.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM.....	37
3.3.6.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX.....	38
3.3.6.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy.....	39
3.3.7 ผลการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงบน ฐานรองทองแดง.....	40
3.3.7.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM.....	41
3.3.7.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX.....	42
3.3.7.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy.....	42
3.4 เทคนิคการเตรียมฐานรองสำหรับการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	44
3.4.1 การสร้างลวดลายโดยวิธีการใช้หน้ากากป้องกัน (Shadow mask).....	44
3.4.1.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM.....	46
3.4.1.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX.....	47
3.4.1.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy .....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4.2 การสร้างลวดลายโดยวิธีกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography).....	48
3.4.2.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM.....	51
3.4.2.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX.....	52
3.4.2.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy.....	53
3.4.3 การสร้างลวดลายโดยวิธีการชุบทางไฟฟ้า (Electroplating).....	54
3.4.3.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM.....	56
3.4.3.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX.....	58
3.4.3.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy.....	58
3.5 กระบวนการสร้างเป็นโครงสร้างความต้านทาน.....	58
3.5.1 การเตรียมผิวหน้าให้สะอาด.....	60
3.5.2 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	61
3.5.3 กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับเคลือบโลหะแคตะไลต์นิกเกิล.....	61
3.5.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาร์ค 1 สำหรับสร้างลวดลายนิกเกิล.....	62
3.5.5 กระบวนการสกัดชั้นนิกเกิลด้วยวิธีการ wet etching.....	63
3.5.6 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาร์ค 2 สำหรับเปิดช่อง เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า.....	63
3.5.7 กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับสร้างขั้วโลหะทองแดง.....	64
3.6 การนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ.....	66
<b>บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง.....</b>	<b>71</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม.....	73
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก.....	75
ภาคผนวก ข.....	76
ภาคผนวก ค.....	77
ภาคผนวก ง.....	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 แสดงข้อจำกัดและ Resolution ของกล้องจุลทรรศน์แบบต่าง ๆ.....	16
3.1 แผ่นทดลองที่นำมาทำการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอน.....	36
3.2 เส้นใยที่ใช้ในการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอน.....	36
3.3 แผ่นทดลองที่นำมาทำการสังเคราะห์บนฐานรองทองแดง.....	40
3.4 เส้นใยที่ใช้ในการสังเคราะห์บนฐานรองทองแดง.....	41
3.5 เส้นใยที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบนฐานรองซิลิคอนที่มีผลตายจาก การใช้หน้ากากป้องกัน.....	45
3.6 เส้นใยที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบนฐานรองซิลิคอนที่มีผลตายจาก กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	50
3.7 เส้นใยที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบนฐานรองทองแดงที่มีผลตายจาก การชุบทางไฟฟ้า.....	56
3.8 เส้นใยที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบนฐานรองซิลิคอน ที่มีผลตายเป็นโครงสร้างความต้านทาน.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

	หน้า
2.1 ลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิด.....	6
2.2 โครงสร้างของ MWCNTs.....	6
2.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	7
2.4 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสภาวะสุญญากาศ.....	8
2.5 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพ.....	9
2.6 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการสร้างสายเคเบิลสำหรับลิฟท์อวกาศ.....	10
2.7 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการแสดงผล.....	11
2.8 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการสร้างทรานซิสเตอร์.....	12
2.9 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการสร้างตัวเซนเซอร์เคมี.....	13
2.10 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการสร้างเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงาน.....	13
2.11 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบ Root Growth.....	14
2.12 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบ Tip Growth.....	15
2.13 แสดงไดอะแกรมการทำงานของเครื่อง SEM.....	17
2.14 ภาพแสดงอำนาจการแยกแยะของ SEM.....	20
2.15 ภาพถ่าย SEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	20
2.16 แสดงไดอะแกรมของ Transmission Electron Microscope.....	21
2.17 ตัวอย่างภาพถ่าย TEM ของท่อนาโนคาร์บอน.....	22
2.18 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องระบบ Energy Dispersive X-ray.....	23
2.19 ภาพจาก EDX ขององค์ประกอบธาตุต่างๆ.....	24
2.20 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่อง Raman Spectrometer.....	25
2.21 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering.....	26
2.22 กราฟรามานที่ได้จากคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
2.23 แผนภาพแสดงระบบ HFCVD.....	29
2.24 เป็นภาพถ่ายอุปกรณ์ของระบบ HFCVD ที่สร้างขึ้นเองอย่างง่าย.....	29
3.1 แสดงกระบวนการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 1.....	32
3.2 แสดงกระบวนการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2.....	32
3.3 ภาพถ่ายจาก SEM ของตัวแคตอะไลต์ผงเหล็กที่ถูกเคลือบอยู่บนพื้นผิว.....	35
3.4 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อานาโนคาร์บอนบนฐานรองซิลิคอน.....	37
3.5 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองซิลิคอน.....	38
3.6 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบนฐานรองซิลิคอน.....	39
3.7 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อานาโนคาร์บอนบนฐานรองทองแดง.....	41
3.8 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองทองแดง.....	43
3.9 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบนฐานรองทองแดง.....	43
3.10 แสดงกระบวนการเคลือบนิเกิลด้วยการสปัตเตอร์ริง โดยมีหน้าฉากป้องกัน.....	45
3.11 ภาพถ่ายจาก SEM บนฐานรองซิลิคอนบริเวณที่ถูกเคลือบด้วยนิเกิล.....	46
3.12 ภาพถ่ายจาก SEM ของคาร์บอนนาโนทิวตรงบริเวณขอบเขตของลวดลายนิกเกิล.....	46
3.13 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วยนิเกิล.....	47
3.14 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบนฐานรองซิลิคอน.....	48
3.15 แสดงวิธีการสร้างลวดลายด้วยได้โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	49
3.16 มาร์คของลวดลายต่างๆที่ได้ออกแบบไว้สำหรับกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี.....	51
3.17 ภาพถ่ายจาก SEM บริเวณขอบเขตของลวดลายนิเกิล.....	52
3.18 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายนิเกิล หลังทำการสังเคราะห์.....	53
3.19 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบนฐานรองซิลิคอน.....	53
3.20 ภาพแสดงการชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิลบนฐานรองทองแดง.....	54
3.21 แสดงวิธีการสร้างลวดลายด้วยได้โดยกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี.....	55
3.22 เป็นภาพถ่ายของลวดลายนิเกิลที่เป็นเส้นตรง.....	56
3.23 เป็นภาพถ่ายจาก SEM ของนิเกิลที่ได้จากการชุบด้วยไฟฟ้า.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

3.24 เป็นภาพถ่ายจาก SEM หลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	57
3.25 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองทองแดงที่มีลวดลาย เส้นตรงหลังทำการสังเคราะห์.....	58
3.26 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองทองแดง.....	59
3.27 แมสส์ที่หนึ่ง สำหรับสร้างลวดลายของแคตะไลต์ที่เกิด.....	60
3.28 แมสส์ที่สอง สำหรับสร้างลวดลายของขั้วไฟฟ้าทองแดง.....	60
3.29 การเตรียมแผ่นสำหรับสร้างชั้นฉนวน.....	61
3.30 นิเกิลถูกเคลือบบนซิลิคอนไดออกไซด์.....	62
3.31 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแมสส์ที่หนึ่ง.....	62
3.32 กระบวนการสกัดชั้นนิเกิลด้วย wet etching.....	63
3.33 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแมสส์ที่สอง.....	64
3.34 กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับสร้างขั้วโลหะทองแดง.....	65
3.35 ภาพถ่ายจริงของชิ้นงานก่อนทำการสังเคราะห์.....	65
3.36 ภาพถ่ายจริงของชิ้นงานหลังจากสังเคราะห์แล้ว.....	66
3.37 ภาพถ่ายระบบสำหรับตรวจวัดก๊าซ.....	66
3.38 ภาพแสดงการไล่อากาศภายในระบบออก.....	67
3.39 ภาพแสดงการพัฒนาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าสู่ระบบ.....	68
3.40 กราฟแสดงคุณสมบัติการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ในระบบที่ไม่ให้ความร้อน.....	68
3.41 กราฟแสดงคุณสมบัติการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ในระบบที่ให้ความร้อน.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สัญลักษณ์

E	ความหมาย
Fe	สนามไฟฟ้า
Ni	เหล็ก
H <sub>2</sub>	นิกเกิล
N <sub>2</sub>	แก๊สไฮโดรเจน
O <sub>2</sub>	แก๊สไนโตรเจน
Ar	แก๊สออกซิเจน
V	แก๊สอาร์กอน
W	แรงดัน
eV	กำลังงานไฟฟ้า
CNTs	อิเล็กตรอน โวลต์
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	คาร์บอนนาโนทิวส์
SWCNTs	แอลกอฮอล์
MWCNTs	คาร์บอนนาโนทิวส์
A	ชนิดผนังชั้นเดียว
cm <sup>2</sup>	คาร์บอนนาโนทิวส์
K	ชนิดผนังหลายชั้น
°C	กระแส
Co	ตารางเซนติเมตร
Mo	เคลวิน
Si	องศาเซลเซียส
Cu	โคบอล
T	โมลิบดีนัม
t	ซิลิคอน
A	ทองแดง
	อุณหภูมิ
	เวลา
	อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค

การดูดกลืน	Absorption
การดูดซับ	Adsorption
การเจริญเติบโต	Growth
การกระเจิง	Scattering
การดูดซับทางกายภาพ	Physical adsorption
กราไฟต์	Graphite
แกรฟีน	Graphene
อะซีโตน	Acetone
แอมโมเนีย	Ammonia
ระยะทางการยึดเหนี่ยว	Binding distance
พลังงานการยึดเหนี่ยว	Binding energy
ท่อนาโนคาร์บอน	Carbon nanotube
พันธะโควาเลนต์	Covalent band
น้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน	Deionized water
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	Dielectric constant
อิเล็กตรอน	Electron
เอทิลแอลกอฮอล์	Ethanol
ฟูลเลอร์รีน	Fullerene
หัวตรวจวัดก๊าซ	Gas sensors
ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	Multiwalled carbon nanotubes
ออกซิเจน	Oxygen
ผลึกหลายรูป	Poly crystalline
ซิลิคอนไดออกไซด์	Silicon dioxide
ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว	Singlewalled carbon nanotubes
สเปกตรัม	Spectrum
สปัตเตอร์ริง	Sputtering
ฐานรอง	Substrate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค(ต่อ)

สังเคราะห์	Synthesis
อุลตราโซนิก	Ultrasonic
รังสีเอ็กซ์	X-ray
ข้อบกพร่องในโครงสร้าง	Structural defects
ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	Electron density
ฐานรอง	Substrate
ตัวเร่งปฏิกิริยา	Catalysis
ทังสแตน	Tungsten
นาโนคีม	Nano-tweezers
นาโนอิเล็กทรอนิกส์	Nano electronic
บั๊กกี้บอล	Backy ball
แผ่นชั้นอีพิแทกซี	Epitaxial layers
พันธะ	Bond
พันธะโควาเลนต์	Covalent band
ฟูลเลอร์รีน	Fullerence
โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว	Non-polartoms
รูปแบบการเลี้ยวเบน	Diffraction pattern
เลนส์วัตถุ	Objection lens
เลนส์คอนเดนเซอร์	Condenser lens
สเปกตรัม	Spectrum
แหล่งจ่าย	Source
อะมอร์ฟัสคาร์บอน	Amorphou carbon
อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	Specimen holder
อุลตราโซนิก	Ultrasonic
ไฮโดรคาร์บอน	Hydrocarbon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบันนักวิจัยได้สนใจและทำการศึกษาเทคโนโลยีมานาน เนื่องจากเทคโนโลยีระดับนาโนกำลังจะเข้าไปมีบทบาทในการพัฒนาการผลิตสิ่งของเครื่องใช้ อุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่าง ๆ หรือแม้แต่อาหารที่เรารับประทาน ซึ่งเทคโนโลยีทางด้านนี้สามารถแบ่งออกเป็นหลายสาขา และหนึ่งในสาขาที่นักวิจัยให้ความสนใจค่อนข้างสูงคือนาโนอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายสาขา [1-4] ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีระดับนาโนเมตรจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและกำลังได้รับความสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเตรียมวัสดุในระดับนาโน หรือการเตรียมอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลงจนอยู่ในระดับโมเลกุล ซึ่งวัสดุที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบันก็คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์

ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาวัสดุที่เป็นส่วนหนึ่งของนาโนเทคโนโลยี ที่เรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ ได้ศึกษาตั้งแต่เริ่มกระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน จะได้เป็นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วยเครื่องมือต่างๆ ประกอบด้วย SEM, Raman Spectroscopy และ EDX ต่อมาได้ศึกษาเทคนิคการสร้างลวดลายของนิเกิลซึ่งเป็น โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อต้องการศึกษาถึงเทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้เกิดในบริเวณพื้นที่ที่ต้องการ เทคนิคต่างๆเหล่านี้สามารถนำมาพัฒนาและออกแบบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นตัวค้ำทาน เพื่อต้องการนำมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทตัวตรวจจับก๊าซ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ มีการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ และหนึ่งในนั้นคือการนำมาพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทตัวเซนเซอร์เคมี ซึ่งในปัจจุบันต้องการตัวเซนเซอร์เคมีที่มีการตอบสนองได้อย่างฉับไว มีความแม่นยำสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีขนาดเล็ก และใช้กำลังงานต่ำ วิธีการสร้างตัวอุปกรณ์เซ็นเซอร์เคมีโดยใช้วัสดุคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวตรวจจับนั้น ถูกแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน และส่วนสุดท้ายที่สำคัญคือการศึกษารูปร่างและการเตรียมฐานรองและการออกแบบลวดลายอย่างเหมาะสมให้ประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ขั้นตอนเหล่านี้สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการของเทคโนโลยีในการสร้างสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำได้ทั้งหมดที่ห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HFCVD ที่ความดันบรรยากาศ
2. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงบนฐานรองต่างๆ และผลของการเกิดเมื่อเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางชนิด
3. เพื่อศึกษาการเตรียมฐานรองให้เกิดเป็นลวดลายสำหรับการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์
4. เพื่อศึกษาการออกแบบลวดลาย ให้สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับปริมาณทางเคมี

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. สามารถสังเคราะห์ท่อคาร์บอนได้ด้วยวิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน (HF-CVD) กระทำที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวนำพาสารแหล่งจ่ายไฮระเหยแอลกอฮอล์
2. ท่อคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ จะมีลักษณะของท่อที่เป็นแบบผนังหลายชั้น
3. สามารถสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงบนฐานรองซิลิคอนและฐานรองทองแดงได้ โดยใช้ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิลหรือผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอลหรืออะซีโตน
4. สามารถควบคุมให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ตรงบริเวณที่ต้องการได้ด้วยการเตรียมฐานรองให้เกิดเป็นลวดลายของตัวแคตะไลต์
5. การออกแบบและใช้เทคนิคการสร้างลวดลายที่เหมาะสม สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับปริมาณทางเคมีได้

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ แนวโน้มของการที่จะนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์นั้น ส่วนมากมักจะนำมาใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์ประเภทตัวเซนเซอร์ต่างๆ ซึ่งหลักการทำงานของอุปกรณ์เช่นเซนเซอร์ที่สร้างจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะอาศัยอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยอุปกรณ์ชนิดนี้ จะมีขั้วต่อออกมาเพื่อทำการวัดค่าของความต้านทานที่เปลี่ยนไปของบริเวณที่เป็นตัวตรวจจับต่อสิ่งเร้าภายนอก ด้วยประเด็นนี้เอง ในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาถึงการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้เกิดขึ้นตรงบริเวณที่ต้องการโดยสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อนที่ความดันบรรยากาศ และศึกษาถึงวิธีการสร้างลวดลายลงบนฐานรองชนิดที่เป็นฉนวนและตัวนำ เพื่อที่จะหาเงื่อนไขและความเหมาะสมซึ่งนำไปสู่การประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทตัวเซนเซอร์ เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยฉบับนี้ ในส่วนแรก จะกล่าวถึงการศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน กระทำที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ส่วนผสมของแอลกอฮอล์กับไฮโดรเจนในอัตราส่วนที่เหมาะสม ได้มีการนำวัสดุฐานรองมาสังเคราะห์ด้วยกัน 4 ชนิด และยังได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางอย่างที่อาจมีผลต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ แต่ฐานรองที่สนใจจะนำมาศึกษาเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีสองชนิดได้แก่ ฐานรองซิลิคอนและฐานรองทองแดง ใช้ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิล ซึ่งฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้บนฐานรองทั้งหมดนั้น จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆเพื่ออธิบายถึงองค์ประกอบ ลักษณะของท่อ ความหนาแน่น และคุณภาพที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้

ส่วนที่สอง จะศึกษาถึงการเตรียมฐานรองเพื่อที่จะควบคุมการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้เกิดตรงบริเวณที่ต้องการ โดยจะใช้เทคนิคต่างๆในการสร้างลวดลายเช่น การใช้หน้ากากป้องกัน ในขณะที่ทำการสปิตเตอร์ริง กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และการชุบทางไฟฟ้าเคมี เพื่อให้เกิดลวดลายบนฐานรองที่ทำการศึกษา

ส่วนสุดท้าย จะทำการศึกษการสร้างลวดลายอย่างเหมาะสม ให้มีลักษณะโครงสร้างเป็นตัวต้านทานซึ่งได้จากฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ จากนั้นจะนำมาทำการวัดค่าความต้านทานที่ได้เพื่อที่จะทำการศึกษาและพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีที่ดีแบบขดลวดความร้อนที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวนำพาสารแหล่งจ่ายไอระเหยของแอลกอฮอล์
2. ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางอย่างเช่น แคตะไลต์ ฐานรอง และสารแหล่งจ่าย รวมไปถึงวิธีการเตรียมฐานรองที่จะนำมาสังเคราะห์
3. ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย SEM, EDX และ Raman Spectroscopy
4. ศึกษาการสร้างลวดลายสำหรับเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์จากการเตรียมฐานรองด้วยเทคนิคต่างๆเช่น การใช้หน้ากากป้องกัน กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีและกระบวนการชุบทางไฟฟ้าเคมี
5. ศึกษาการออกแบบลวดลายและการเตรียมฐานรอง เพื่อให้มีลักษณะ โครงสร้างเป็นตัวต้านทานไฟฟ้าสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการบอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นวัสดุที่เพิ่งถูกค้นพบไม่นานมานี้ ซึ่งประกอบขึ้นจากธาตุของ คาร์บอนคล้ายๆกับ เพชร (Diamond) กราไฟต์ (Graphite) บัคกี้บอล (Bucky Ball) และฟูลเลอร์รีน (Fullerenes) แต่ต่างกันตรงที่คาร์บอนนาโนทิวบ์มีพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูป หกเหลี่ยม เรียงกันเป็นแผ่นระนาบเดียวกัน และมีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวงที่เกิดจากการม้วน ตัวของแผ่น ดังนั้นรายละเอียดต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

### 2.1 ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวบ์

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถพิจารณาได้จากการม้วนตัวของแผ่นกราฟไฟต์ ซึ่งปกติคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากๆ (ระดับนาโนเมตร) ทำให้สามารถ มองเป็นโครงสร้างหนึ่งมิติได้ โดยโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ประกอบด้วยสองส่วนที่แยก ออกจากกันมีคุณสมบัติแตกต่างกันทางฟิสิกส์และเคมี ส่วนแรกคือส่วนผนังของท่อ และส่วนที่สอง คือ ฝาปิดของท่อ โดยส่วนฝาปิดของท่อมักมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมที่ได้มาจากฟูลเลอร์รีนซ์ เช่น  $C_{60}$  หรือ  $C_{70}$

ฟูลเลอร์รีนซ์ มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนอยู่ในรูปหกเหลี่ยมและห้าเหลี่ยม ในรูปแบบ ทางฟิสิกส์ที่สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีรูปหลายเหลี่ยมของ Euler ที่ว่ารูปห้าเหลี่ยม 12 รูป ใน รูปของโครงสร้างฝาปิดที่ประกอบด้วยรูปห้าเหลี่ยมและรูปหกเหลี่ยมเท่ากัน โดยการรวมกันของ รูปห้าเหลี่ยม 5 อัน ผลลัพธ์ทำให้เกิดความโค้งของพื้นผิวที่เป็นลักษณะปริมาตรปิด กฎข้อที่ 2 ใน การใช้รูปห้าเหลี่ยม จะต้องอยู่ในระยะทางระหว่างห้าเหลี่ยมด้วยกันบนพื้นผิวทรงกลมในระยะทาง ที่มากที่สุด เพื่อที่จะได้ความโค้งที่มีค่าน้อยที่สุด และความคื่นพื้นผิวที่น้อยที่สุด ผลลัพธ์ก็คือ โครงสร้างที่มีความเสถียรมากขึ้น และโครงสร้างที่เสถียรและเล็กที่สุดที่สามารถสร้างได้โดยวิธีนี้ก็คือ  $C_{60}$  ส่วนโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นก็คือ  $C_{70}$  และอื่นๆ คุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งฟูลเลอร์รีนซ์ประกอบขึ้น จากคาร์บอนอะตอมที่เป็นเลขคู่ เพราะว่าการเพิ่มรูปหกเหลี่ยมเพื่อให้เป็นโครงสร้างที่เป็นอยู่ได้ หมายถึงการเพิ่มอะตอมของคาร์บอนคุณสมบัติของนาโนทิวบ์ จึงคล้ายกับประกอบเป็นรูป ทรงกระบอก โดยสร้างขึ้นมาจากแผ่นกราฟไฟต์ที่มีขนาดแน่นอนและห่อขึ้นมาในทิศทางที่แน่นอน ทำให้เป็นทรงกระบอกที่สมมาตรกัน ซึ่งสามารถม้วนแผ่นกราฟไฟต์ ได้ในทิศทางที่แตกต่างกันเพื่อ สร้างเป็นทรงกระบอก ได้คาร์บอนสองอะตอม แผ่นกราฟไฟต์จะถูกเลือกตัวที่หนึ่งใช้เป็นจุดเริ่มต้น โดยแผ่นจะหมุนจนกระทั่งอะตอมตัวที่สองมาบรรจบกันโดยเวกเตอร์จากอะตอมแรก ไปอีกอะตอม หนึ่งเรียกว่า chiral เวกเตอร์ และความยาวของมันเท่ากับเส้นรอบวงของนาโนทิวบ์ โดยทิศทางของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทาง การค้า ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนนาโนทิวจะตั้งฉากกับ chiral เวกเตอร์ คาร์บอนนาโนทิวที่มี chiral เวกเตอร์แตกต่างกัน จะมีคุณสมบัติต่างกันด้วย เช่น คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางกลศาสตร์และ คุณสมบัติทางไฟฟ้า

ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวบ์ พิจารณาได้จากการม้วนตัวของแผ่นกราฟไฟต์ ซึ่งโดยทั่วไป ท่อนาโนคาร์บอนจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมาก (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) มีความยาวตั้งแต่ระดับนาโนเมตรไปจนถึงระดับเซนติเมตร ซึ่งถ้าเทียบอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง จะมีค่าหลายล้านเท่าทีเดียว และคาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆได้แก่

### 2.1.1 Single Walled Carbon Nanotubes (SWCNTs) [5]

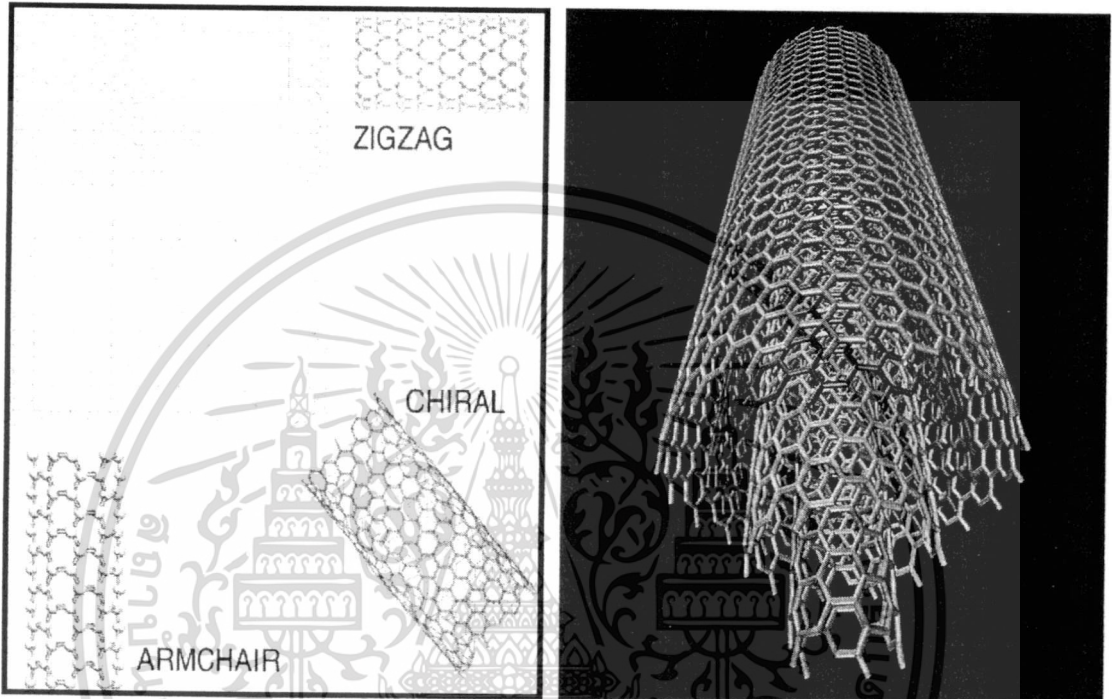
SWCNTs นั้นมีลักษณะ โครงสร้างเป็นท่อกลวง ซึ่งเหมือนการม้วนแผ่นกราฟไฟต์ (graphene sheet) ให้เป็นท่อทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางนั้นมีขนาดประมาณ 0.4 -2.0 nm ส่วนคุณสมบัติของ CNTs ไม่ว่าจะผ่านทางด้านไฟฟ้า กลศาสตร์ หรือทางเคมีนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของทิวบ์ เช่น ชนิด (SWCNTs, MWCNTs) เส้นผ่านศูนย์กลาง และ ลักษณะการม้วนของทิวบ์ SWCNTs เป็นโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังชั้นเดียวเป็นรูปทรงกระบอก นอกจากนั้น SWCNTs ยังสามารถแบ่งย่อยๆได้อีกเป็น 3 ชนิด ตามลักษณะการม้วนตัวของแผ่นกราฟไฟต์ ได้แก่ Armchair, Zigzag และ Chiral ซึ่งลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิดนี้ จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

### 2.1.2 Multiple Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) [6]

MWCNTs จะมีลักษณะ โครงสร้างคล้ายกับ SWCNTs แต่จะมีลักษณะ โครงสร้างภายในที่เป็นการซ้อนตัวของ SWCNTs ตั้งแต่ 2 ท่อขึ้นไป มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก อะตอมตามผนังของท่อมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยทุกท่อมีแกนร่วมกัน (tube axis) และมีระยะห่างระหว่างชั้นของท่อประมาณ 0.34 – 0.39 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างชั้น กราฟไฟน์ที่ซ้อนกันอยู่ในกราฟไฟต์ (0.355 นาโนเมตร) ลักษณะการซ้อนกันจะเหมือนกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกันนั้น จะมีค่า Energy gap ที่ต่างกัน โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางจะแปรผกผันกับค่า Energy gap และส่วนใหญ่ความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกสุดประมาณ 10 – 50 นาโนเมตร ความยาว ความสมบูรณ์ของการเรียงตัว และการม้วนเกลียวที่แตกต่างกันไม่สามารถควบคุมอย่างแม่นยำได้ มีปริมาณจุดบกพร่องที่ค่อนข้างสูง ทำให้ความแข็งแรงต่ำกว่าท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นแบบผนังชั้นเดียว ดังรูปที่ 2.2 แสดงถึง โครงสร้างที่เป็นผนังหลายชั้น

## 2.2 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์ [7-9]

เป็นที่ทราบกันดีว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายประการ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ จะขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เช่น ชนิดของท่อ (แบบผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้น) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนตัวของท่อ (Armchair, Zigzag และ Chiral)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิด

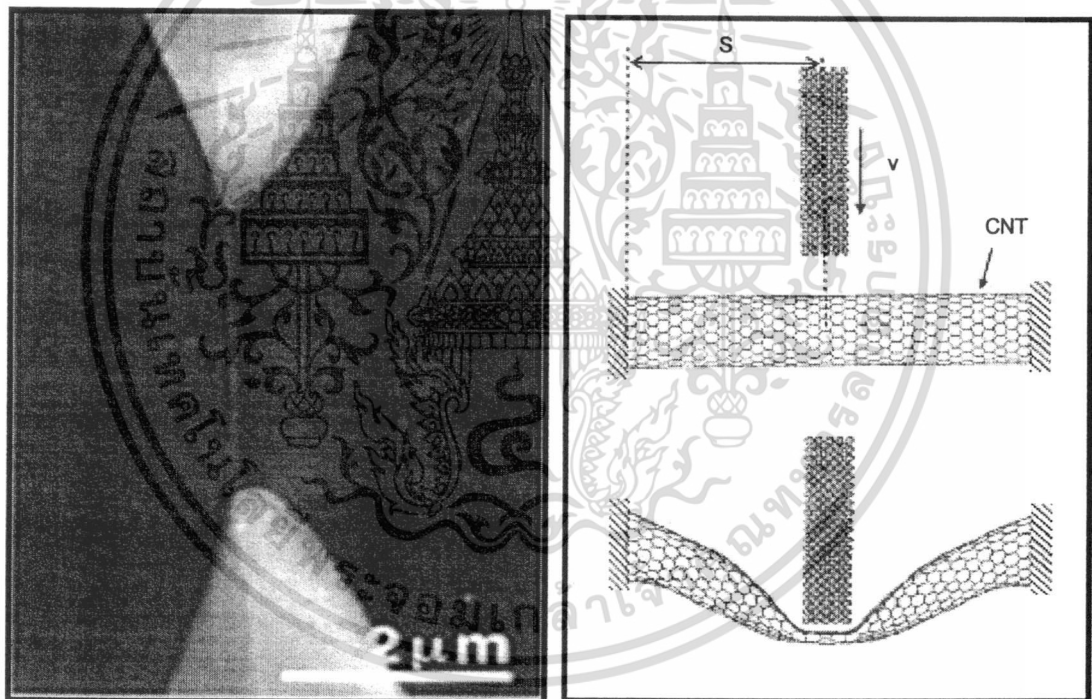
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ MWCNTs

### 2.2.1 คุณสมบัติทางกล

เพชรซึ่งรู้กันดีว่ามีความแข็งแรงมากด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของกราฟไฟต์นั้น คาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราฟไฟต์(กราฟีน) มีความแข็งแรงมาก (มากกว่าเพชร) แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้าง CNTs ดังกล่าวรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้ CNTs แข็งแรงกว่าเพชรและกราฟไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความยืดหยุ่น(Young's modulus of elasticity) ของ CNTs มีค่าสูงถึง 1 เทอราปาสคาล (Tpa) หรือ 1000 กิกะปาสคาล(Gpa) คงเป็นที่สงสัยว่าขนาดของ CNTs เล็กจิ๋วขนาดนั้นจะวัดได้อย่างไร วิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นนี้ทำได้หลายวิธีเช่น โดยอาศัย thermal vibration หรือใช้ scanning force microscopy ไปงอ CNTs โดยยึดปลายหนึ่งไว้แล้ววัดการสั่นสะเทือนในสนามไฟฟ้า และมีการใช้ atomic force microscopy (AFM) เพื่อสอดตรงกลางแท่งนาโนที่วางอยู่บน nanopores เพื่อวัดค่าความยืดหยุ่นได้มีการใช้ AFM จับ CNTs ทั้งสองข้างแล้วดึงจนขาดเพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง(tensile strength) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ความแข็งแรง ของ CNT มีค่าอยู่ระหว่าง 11 ถึง 63 Gpa ขณะที่ค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้าอัลลอยมีเพียง 2 Gpa นอกจากนี้ SWCNTs สามารถยืดตัวได้ถึง 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่จะขาดออกจากกัน SWCNT มีพื้นที่ผิวได้ถึง 1500 m<sup>2</sup>/g โดยมีความหนาแน่น 1.33 ถึง 1.40 g/cm<sup>3</sup> รูปที่ 2.3 (ข) ภาพแสดงการยืดหยุ่นที่ดีของ CNT ขณะที่มิ่วัดดูมาชนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง



(ก)

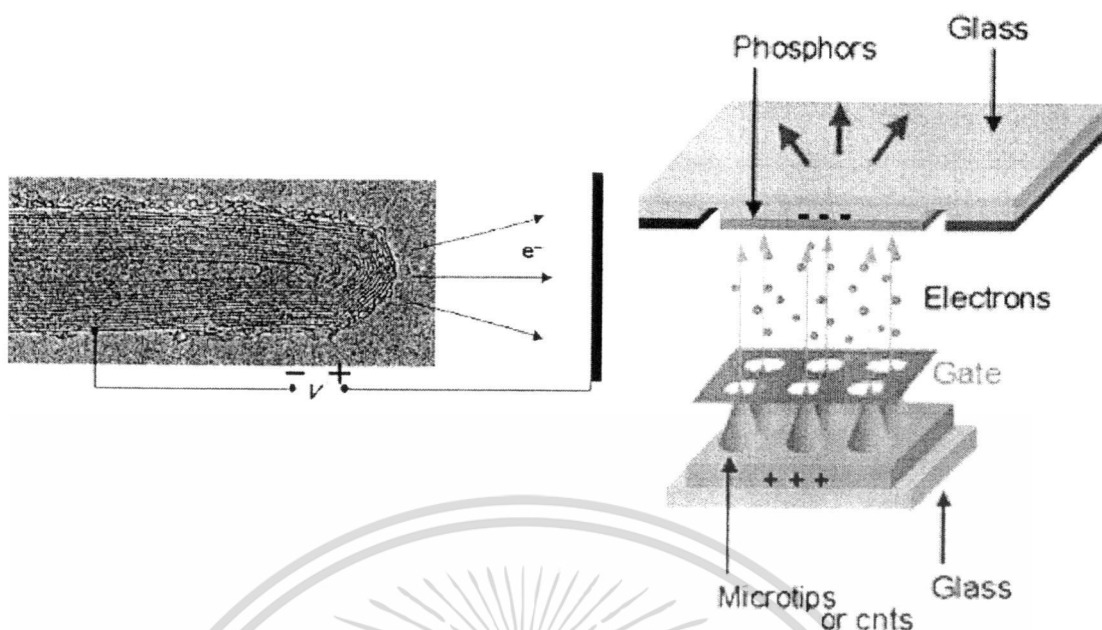
(ข)

### รูปที่ 2.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์

(ก) ภาพจาก SEM ของ CNT ที่อยู่ระหว่างปลายทั้งสองด้านของ AFM เพื่อวัดค่าความต้านทานแรงดึง(Tensile strength)

(ข) ภาพแสดงการยืดหยุ่นที่ดีของ CNT ขณะที่มิ่วัดดูมาชนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสถานะสุญญากาศ

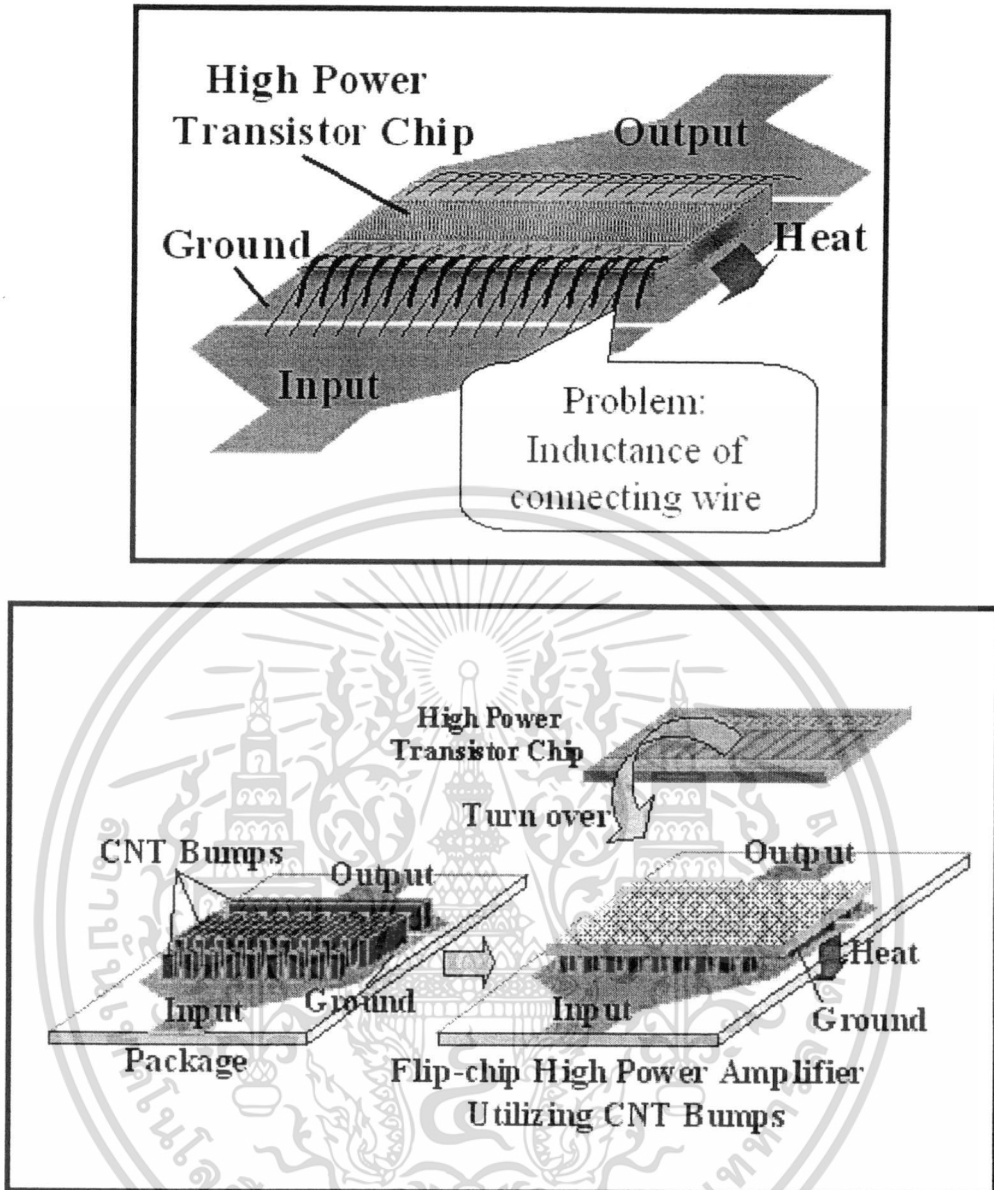
### 2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

CNTs มีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มัดหนึ่งของ CNTs สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง  $10^9$  A/cm<sup>2</sup> ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> นอกจากนี้แล้ว คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของ CNTs คือ สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสถานะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ค่าศักย์ต่ำกว่า เช่นจะกระดุน phosphors ที่วางไว้ห่าง 1 mm จะใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว molybdenum ดังแสดงในรูปที่ 2.4

### 2.2.3 คุณสมบัติทางความร้อน

ค่าการนำความร้อนของ CNTs สูงถึง 2000 W/mK โดยมีบางรายงานกล่าวว่า CNTs มีค่าการนำความร้อนได้ถึง 6000 W/mK เมื่อเปรียบเทียบกับเพชรที่มีค่าการนำความร้อนเพียง 3320 W/mK นอกจากนี้ CNTs ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2800 °C ภายใต้สุญญากาศ และ 750 °C ในสภาวะปกติ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงกายภาพ ดังรูปที่ 2.5 เป็นการนำคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวบ์มาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพที่ใช้งานกำลังสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพ

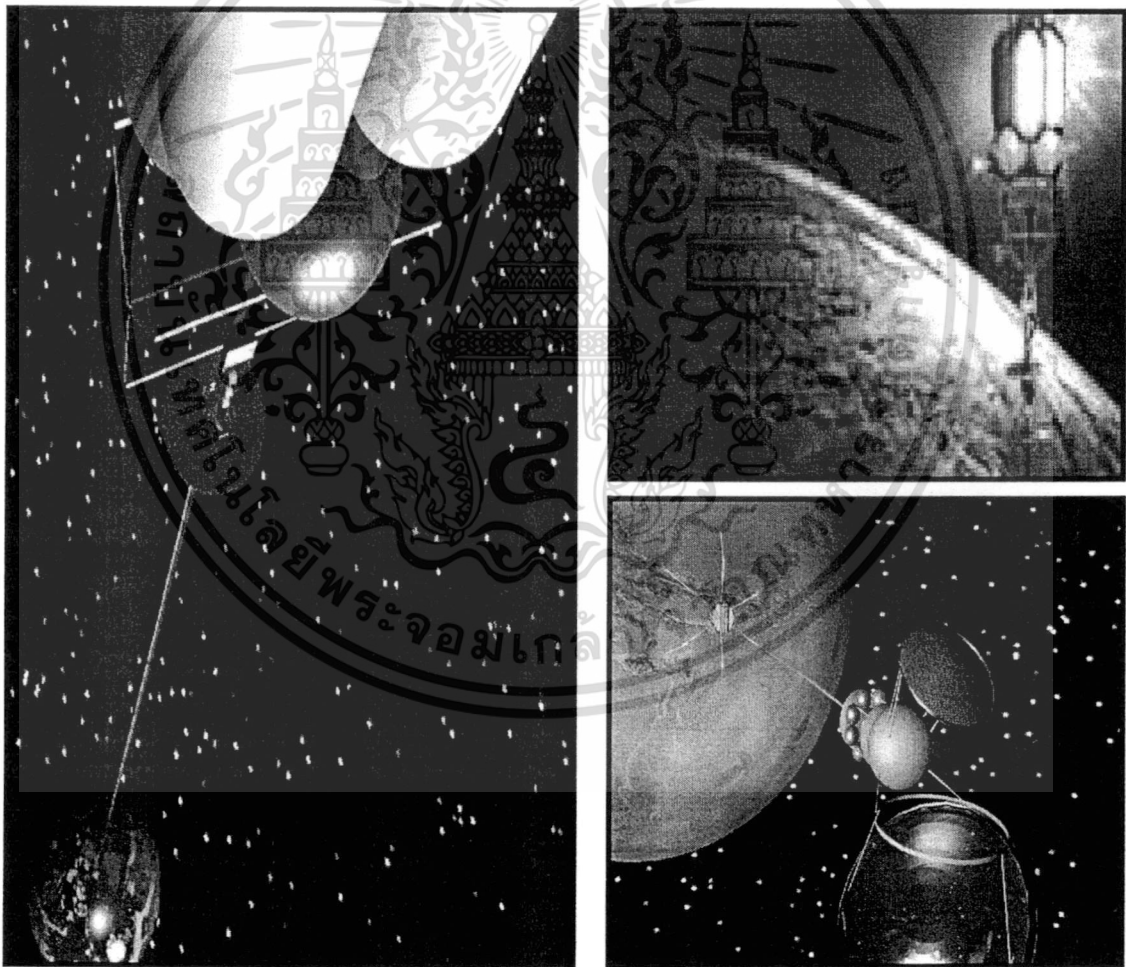
### 2.3 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งาน

จากการศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์พบว่า เป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำ มีความแข็งแรงสูงแต่มิฉะนั้นหนักเบา อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นที่ดี มีเสถียรภาพดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ และสามารถจับยึดกับโมเลกุลของก๊าซและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ เช่น ชนิดของทิวป์ (ซิงเกิลวอลล์ และมัลติวอลล์) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนตัวของทิวป์ ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆดังตัวอย่างต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 ประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าขั้วมอดูลัสสูง สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี จึงเหมาะที่จะนำมาเป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆเพื่อให้ได้วัสดุที่เบา มีค่าความยืดหยุ่นสูง ทำให้ไม่แตกง่าย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้อย่างมาก เช่น ส่วนประกอบของรถยนต์ เครื่องจักร หรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ โดยเมื่อไม่นานมานี้ นักวิทยาศาสตร์ขององค์การนาซา (NASA) ประสบความสำเร็จในการผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงในโพลีเมอร์ เพื่อสำหรับวัสดุประกอบเครื่องบินและยานอวกาศ หรือนำมาเป็นส่วนผสมในการสร้างสายเคเบิลที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูงสำหรับสร้างลิฟท์อวกาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และนี่อาจเป็นจุดเริ่มต้นของการก้าวไปสู่การสังเคราะห์พลาสติกที่สามารถนำไฟฟ้าได้ มีความแข็งแรงมาก มีน้ำหนักที่เบา และสามารถสร้างได้หลายรูปแบบ

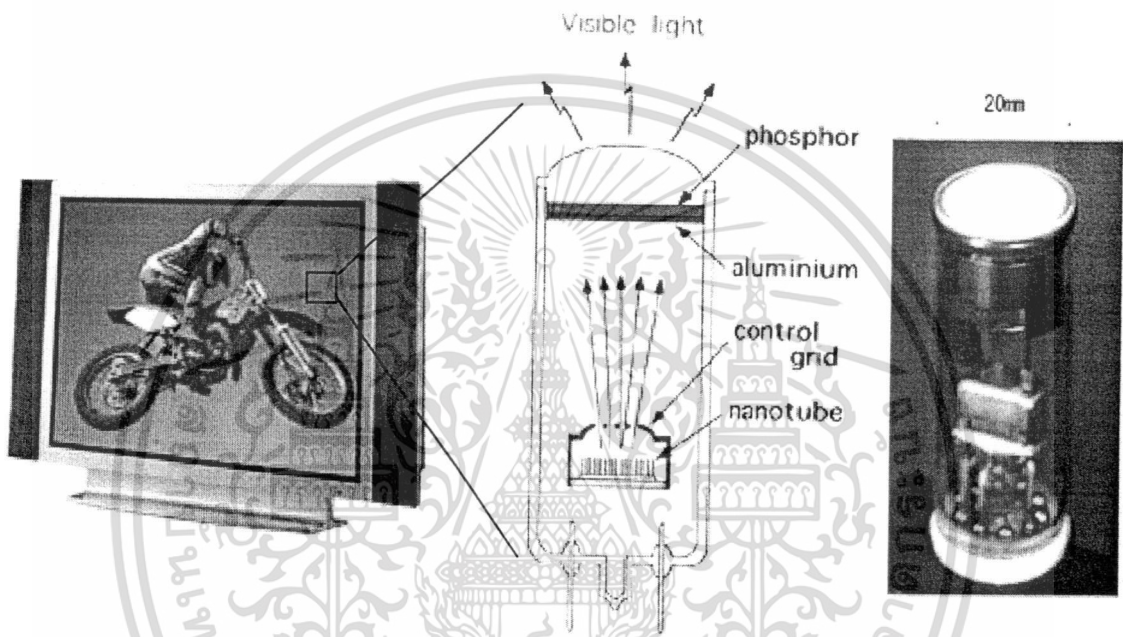


**รูปที่ 2.6** ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการสร้างสายเคเบิลสำหรับลิฟท์อวกาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNTs) มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวน้อยมาก (ค่า Aspect-ratio สูง) ทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้ CNTs มีเสถียรภาพที่ดีและทำให้ CNTs สามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าต่ำจึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนในอุปกรณ์เช่น จอแสดงผล หลอดไฟประหยัดพลังงาน แหล่งกำเนิด X-ray ขนาดเล็กและแหล่งกำเนิดไมโครเวฟขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.7

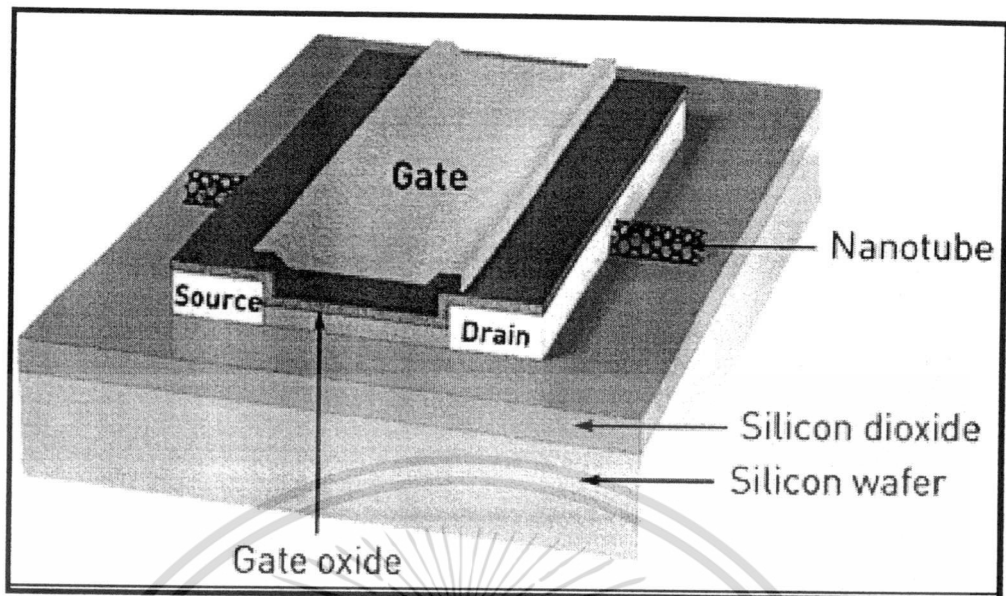


รูปที่ 2.7 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการแสดงผล

### 2.3.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากโครงสร้างของ CNTs เทียบเท่ากับ 1 มิติ จึงทำให้มีการนำไฟฟ้าแบบ Ballistic คือไม่มีการกระจัดกระจายของอิเล็กตรอนตลอดความยาวของทิวบ์ ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเหมาะที่จะใช้ ในวงจรรนาโนอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย โดยเมื่อไม่นานมานี้ บริษัทไอบีเอ็ม และกลุ่มของ Prof Dekker ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างทรานซิสเตอร์ และลอจิกเกตจากซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นครั้งแรกของโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในคอมพิวเตอร์ในอนาคตได้ ทำให้ลดขนาดของอุปกรณ์และปริมาณในการกินกระแสไฟฟ้าลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการสร้างทรานซิสเตอร์

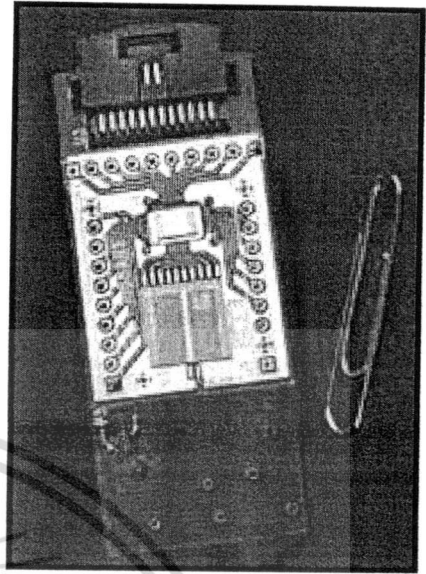
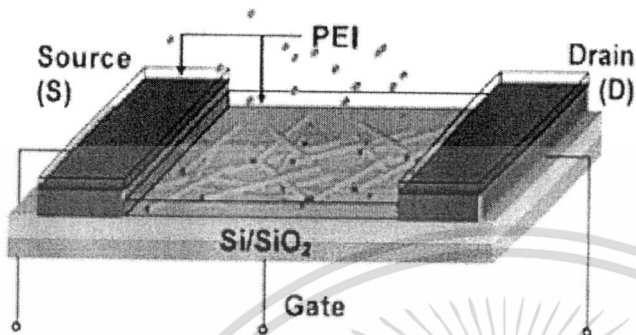
### 2.3.4 ประยุกต์ใช้เป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์ [10-12]

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร มีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นโพรบของเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างของสาร ในระดับอะตอม เช่น Scanning Probe Microscope (SPM), Atomic Force Microscopy (AFM) และประดิษฐ์เป็นนาโนทิม (Nano-Tweezers) และยังสามารถดัดแปลง โดยนำ Functional group ต่างๆ เช่น  $-COOH$  มายึดติดที่ปลายทิวบ์เพื่อนำไปใช้ในด้านชีววิทยาและการแพทย์ได้ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถนำมาสร้างเป็นเซนเซอร์ทางเคมีได้ อีกด้วย เช่นทำเป็นเซนเซอร์ก๊าซเช่น  $NO_2$ ,  $NH_3$ ,  $O_2$  ได้โดยตรวจสอบจากค่าความต้านทานของทิวบ์ที่เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 2.9

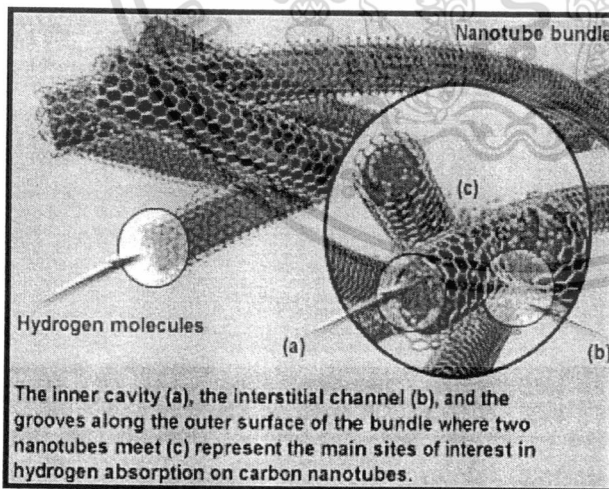
### 2.3.5 ประยุกต์ใช้ในการกักเก็บพลังงาน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีลักษณะ โครงสร้างเป็นท่อกลวง มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตรและมีพื้นที่ผิวที่มาก ทำให้เป็นที่สนใจที่จะนำมาใช้ในการเก็บไฮโดรเจน(H) ซึ่งเป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม โดยมีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dillon แสดงผลการคำนวณว่า SWCNTs จะสามารถกักเก็บไฮโดรเจนได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวบ์มากขึ้นและมีความเป็นไปได้ที่จะเก็บไฮโดรเจนได้ถึง 6.5% โดยน้ำหนักซึ่งเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้ ดังรูปที่ 2.10 เป็นการนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ในการสร้างตัวเซนเซอร์เคมี



รูปที่ 2.10 ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ในการสร้างเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

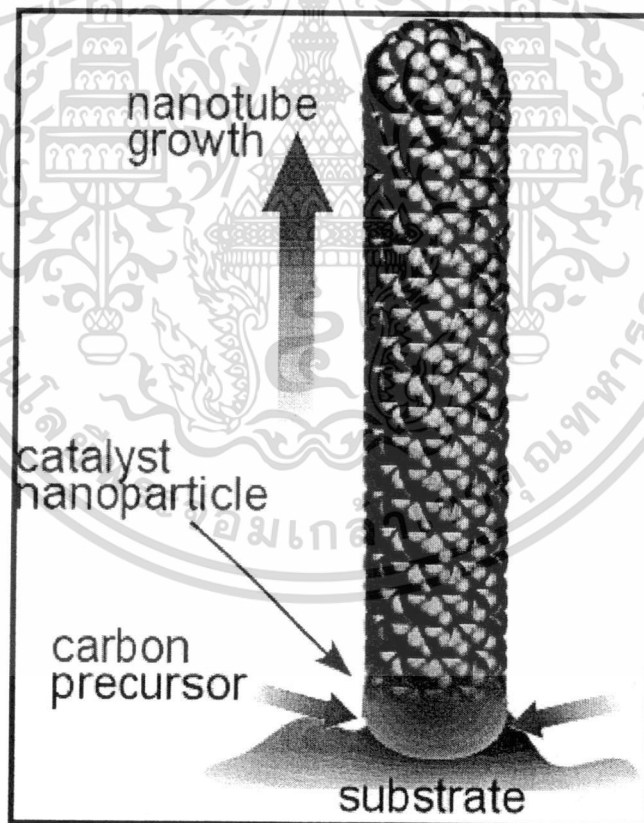
## 2.4 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์

กลไกของการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้น ในปัจจุบันยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่แน่ชัดได้ว่า เกิดลักษณะใด ซึ่งจะทราบได้ในช่วงระหว่างที่คาร์บอนนาโนทิวบ์ก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตาม ลักษณะการก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ

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

### 2.4.1 Root Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์บน โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.11 และสามารถอธิบายได้คือที่ อุณหภูมิสูงมากพอ จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon



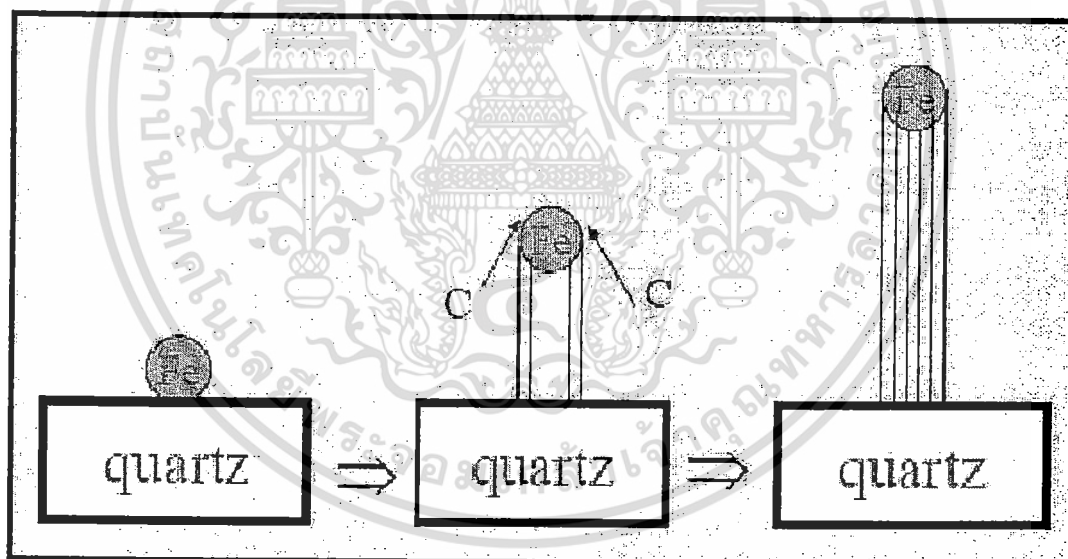
รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบ Root Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

source) และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่ง และเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งสูงกว่าอุณหภูมิด้านบน จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่งและก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิว์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 2.4.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิว์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิว์ ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้มีโลหะตัวเร่งอยู่ที่ปลายทิว์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งสามารถอธิบายได้คือ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่ง และเนื่องจากอุณหภูมิด้านบนของโลหะตัวเร่งสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่าง จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งตกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่งและก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิว์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิว์แบบ Tip Growth

จากกลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิว์ทั้ง 2 ลักษณะ จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีจุดหลอมที่ต่ำ เพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว และโลหะตัวเร่งควรมีความสามารถในการละลายคาร์บอนที่ดี เพื่อให้อะตอมคาร์บอนสามารถละลายในโลหะตัวเร่งได้จำนวนมากๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เนื่องจากการศึกษาด้านนาโนเทคโนโลยีเป็นการศึกษาเกี่ยวกับสิ่งที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร ซึ่งในส่วนของในบทนี้ จะกล่าวถึงเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติ ขนาดและความบริสุทธิ์ ซึ่งประกอบด้วย SEM สำหรับวิเคราะห์ขนาดของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ลงบนพื้นผิวฐานรอง EDX สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆบนฐานรองและ Raman Spectroscopy สำหรับวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องใช้เครื่องมือซึ่งสามารถช่วยให้เข้าถึงสิ่งเล็กๆเหล่านี้ได้ ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบแสงมีขีดจำกัดในกำลังขยายเนื่องจากการแทรกสอดของแสง ดังตารางที่ 2.1 จะแสดงค่า Resolution สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ

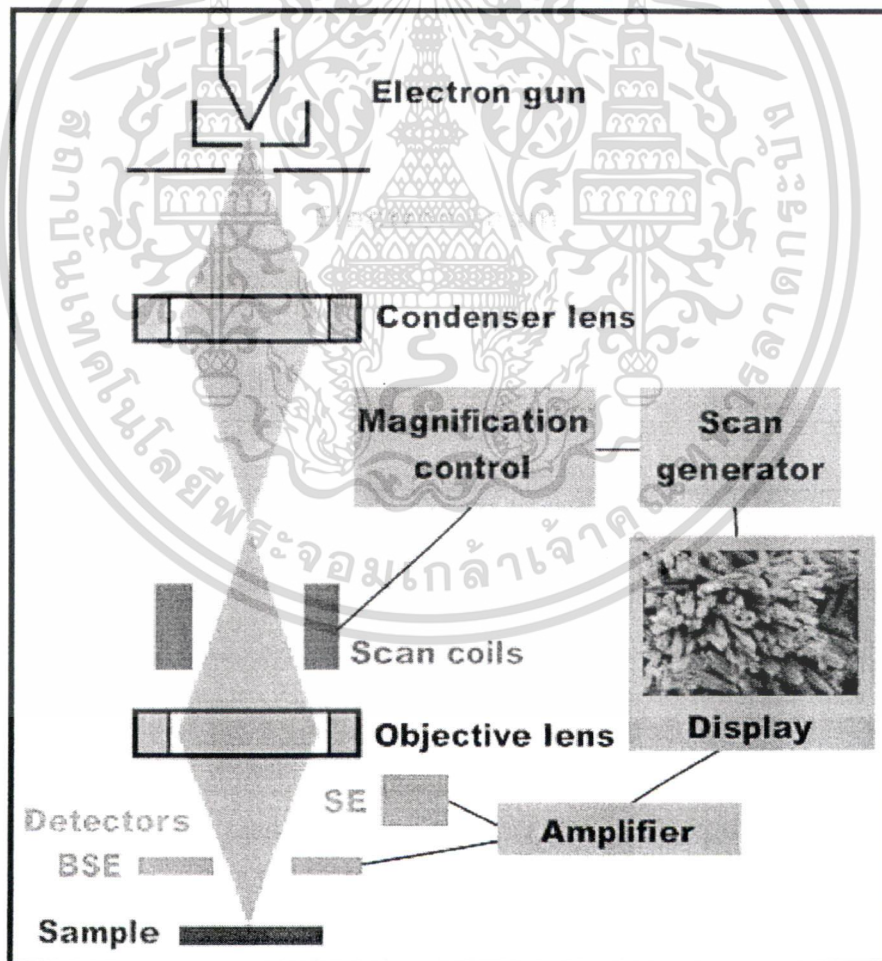
ตารางที่ 2.1 แสดงข้อจำกัดและ Resolution ของกล้องจุลทรรศน์แบบต่าง ๆ

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

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า งานวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยี มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ในบทนี้ นอกจากจะกล่าวถึงรายละเอียดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแล้ว ยังได้ กล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์เช่น Energy Dispersive X-Ray เพื่อวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน และ Raman Spectrometer เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นต้น

## 2.5.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหรือ SEM ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่าน Condenser lens เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสโดย Objective lens ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาและกราดในระนาบ xy หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกแปลงเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพต่อไป



รูปที่ 2.13 แสดงไดอะแกรมการทำงานของเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## องค์ประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบสำคัญ คือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และเลนส์อิเล็กตรอน

### แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source)

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญของ SEM โดยทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สามารถผลิตกระแสจำนวนมาก วัสดุที่ใช้ทำปืนอิเล็กตรอนนี้ต้องมีเสถียรภาพสูง ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญมี 3 ตัวได้แก่ ขนาดของลำอิเล็กตรอน ณ จุดตกกระทบ ปริมาณกระแส ณ จุดตกกระทบ และมุมคอนเวอร์เจนต์ ภาคตัดขวางของลำอิเล็กตรอนที่ส่งออกไปต้องเป็นจุดที่เล็กๆ ในปัจจุบันมีปืนอิเล็กตรอนที่นิยมใช้งานอยู่ 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่

1. ลวดทังสเตน (Tungsten Filament) ปืนอิเล็กตรอนชนิดนี้เป็นแบบที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกและไม่ต้องการสภาพสุญญากาศ ใช้หลักการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากความร้อน หรือเรียกว่าแบบเทอร์มิออนิกอิมิชชัน (Thermionic emission)
2. ผลึก  $\text{LaB}_6$  (Lanthanum Hexaboride Crystal) ปืนอิเล็กตรอนชนิดนี้ทำจากทังสเตน ใช้หลักการทำงานแบบเทอร์มิออนิกอิมิชชัน เช่นเดียวกัน แต่สามารถให้ความสว่าง (Brightness) สูงกว่า 10 เท่า มีอายุการทำงานนานกว่า แต่มีข้อเสียคือ ราคาแพง และต้องการสภาพการทำงานที่เป็นสุญญากาศเป็นพิเศษ
3. แหล่งกำเนิดแบบโวลต์ฟิลด์อิมิชชัน (Cold Field Emission Source) แหล่งกำเนิดชนิดนี้ทำจากทังสเตนเช่นกัน แต่ใช้หลักการทำงานของการทะลุผ่านกำแพงศักย์แบบควอนตัม (Quantum tunneling) และสามารถให้ความสว่างสูงมาก ทำงานที่อุณหภูมิห้อง
4. แหล่งกำเนิดแบบช็อตตี้ฟิลด์อิมิชชัน (Schottky Field Emission Source) แหล่งกำเนิดชนิดนี้ ใช้หลักการทำงานของการทะลุผ่านกำแพงศักย์แบบควอนตัม เช่นเดียวกัน แต่ต่างกันตรงที่ ปืนอิเล็กตรอนชนิดนี้ ทำจากทังสเตน (100) ที่เคลือบด้วย  $\text{ZnO}$  และต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1800 K

### เลนส์อิเล็กตรอน

เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุลบ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะมีแรงมากระทำกับลำอิเล็กตรอน ดังนั้นเราสามารถใช้หลักการนี้ในการโฟกัสลำอิเล็กตรอนได้ ซึ่งเราจะเรียกเครื่องมือที่สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับโฟกัสลำอิเล็กตรอนนี้ว่า Condenser lens โดยจะประกอบด้วยขั้วแม่เหล็กสองขั้วและอาศัยขดลวดทองแดงสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเมื่อให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้า กลางเลนส์แม่เหล็กจะมีช่องสำหรับให้ลำอิเล็กตรอนผ่าน แรงแม่เหล็กจะบีบลำอิเล็กตรอนไปโฟกัสที่จุดโฟกัส ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้น ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ไปตกกระทบที่ผิวของวัตถุเป้าหมาย โดยมีคอยล์กวาดภาพ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุ

### อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron)

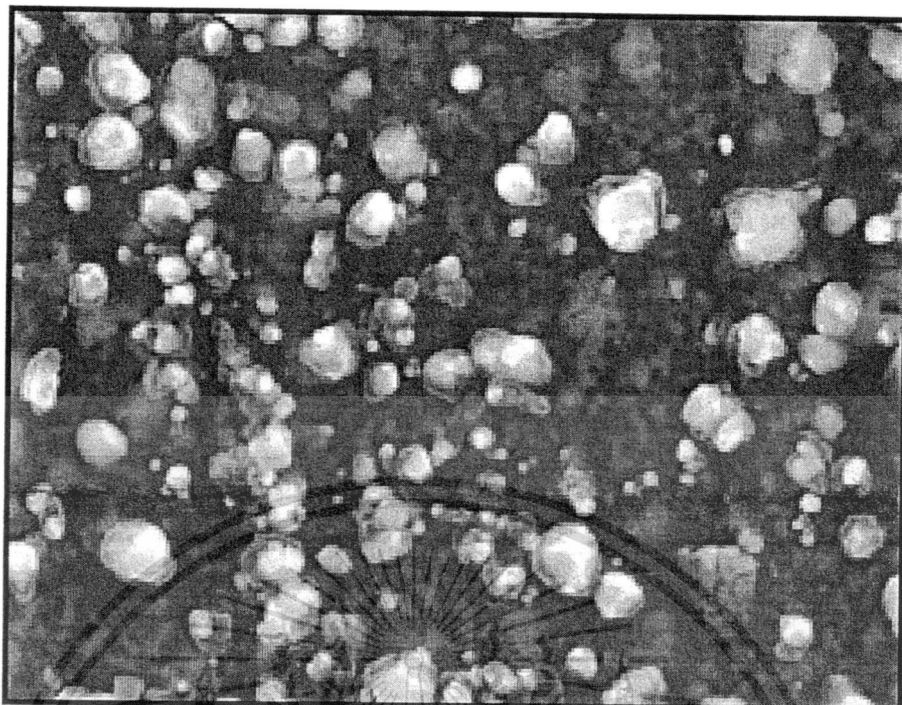
เมื่อลำอิเล็กตรอนพุ่งเข้าชนชิ้นงานจะถ่ายเทพลังงานให้อะตอมในสารตัวอย่าง ซึ่งหากพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน เนื่องจากโอกาสการเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิที่พุ่งชนสามารถเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงาน หากอิเล็กตรอนปฐมภูมิสามารถแทรกผ่านชิ้นงานได้ลึก โอกาสเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิก็จะน้อยลง ดังนั้นอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนใหญ่จะเกิดจากบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน

### Electron Detector

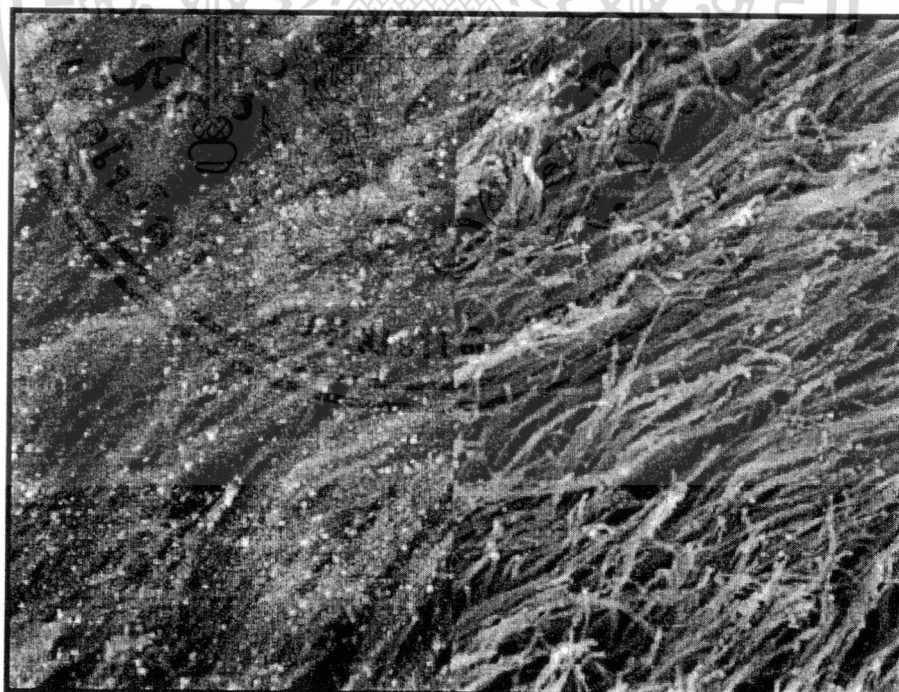
หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนจะเลือกเฉพาะสัญญาณที่ต้องการ เนื่องจากบริเวณผิวจะมีสัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอะตอมของชิ้นงานและอิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนหลายชนิด หากสัญญาณที่ต้องการนำไปสร้างภาพคืออิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะถูกดึงด้วยสนามไฟฟ้าจากหัววัดสัญญาณ ซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะมีพลังงานต่ำจึงเคลื่อนที่อยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนเข้าสู่หัววัดสัญญาณจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าสู่ Scintillator (ทำมาจาก  $\text{CaF}_2$ ) ทำให้เกิดโฟตอน ซึ่งจะถูกส่งไปตาม Light guide เพื่อเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและนำไปขยายสัญญาณต่อไป

### การเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบผิวชิ้นงานจะทำให้เกิดผลจากอันตรกิริยาต่างๆภายในระบบ หัววัดสัญญาณจะตรวจวัดสัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้น เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิหรือ Backscatter electron และนำสัญญาณไปแสดงออกบนจอ Cathode Ray Tube (CRT) โดย SEM จะมีระบบชุด Scanning coil ซึ่งเป็นขดลวดที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของชิ้นงาน ซึ่งสัญญาณที่ควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนนี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงตำแหน่งบนจอภาพแบบจุดต่อจุด ปริมาณของสัญญาณ



รูปที่ 2.14 ภาพแสดงอำนาจการแยกแยะของ SEM



รูปที่ 2.15 ภาพถ่าย SEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

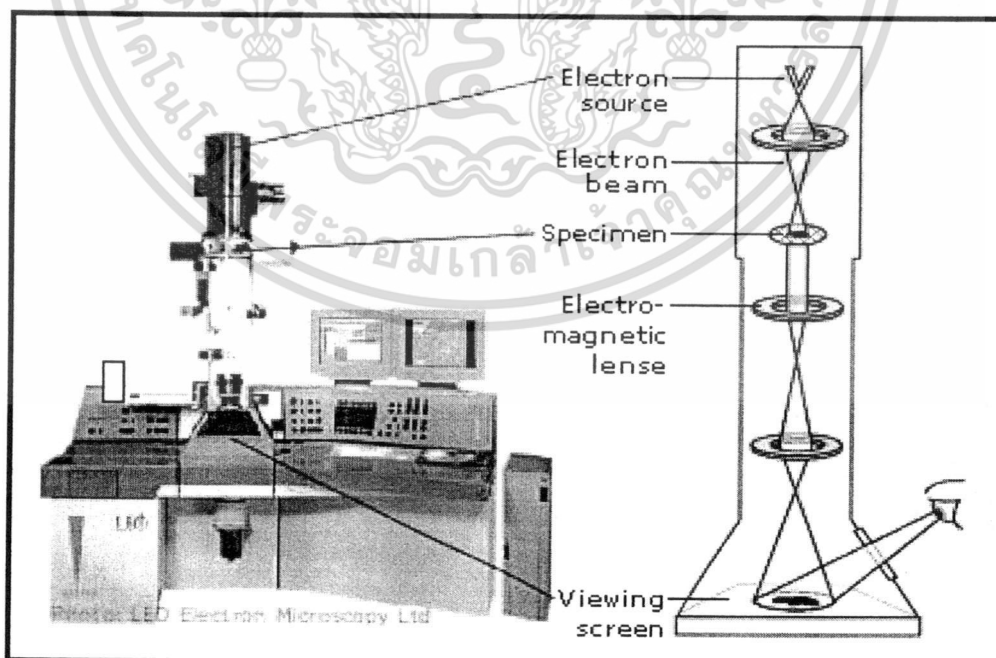
อิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมความมืดความสว่างบนจอ ในรูปที่ 2.14 เป็นภาพแสดงอำนาจการแยกแยะของ SEM และ รูป 2.15 เป็นภาพตัวอย่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เนื่องจากพื้นที่ในการกราดลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงานมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่แสดงผลบนจอภาพ ดังนั้นเราจะได้กำลังขยายของกล้อง SEM คือ

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

สำหรับความละเอียดของภาพจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการกราดลำอิเล็กตรอน ถ้าใช้ความเร็วในการกราดมีค่าสูงก็จะทำให้ภาพมีความละเอียดต่ำ และหากใช้ความเร็วในการกราดลำอิเล็กตรอนต่ำก็จะทำให้ภาพมีความละเอียดสูง ซึ่งเราสามารถควบคุมความเร็วของการกราดลำอิเล็กตรอนด้วยอุปกรณ์ Scanning coil

## 2.5.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องทะลุ Transmission Electron Microscope (TEM)

การศึกษาเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) จะใช้เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสสารที่มีขนาดเล็กมาก ตั้งแต่ระดับไมโครเมตรไปจนถึงระดับอะตอม



รูปที่ 2.16 แสดงไดอะแกรมของ Transmission Electron Microscope (TEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.16 แสดงส่วนประกอบและลักษณะการทำงานของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) โดย TEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ในลักษณะเดียวกับ SEM แต่ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนในกล้อง TEM สูงถึง 100 – 400 กิโลโวลต์ (kV) กล้อง TEM ทำงานโดยใช้เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) 2 อัน เพื่อให้โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ขนานกับคอลัมน์ของกล้อง จากนั้น ลำอิเล็กตรอนจะผ่านชิ้นงานที่เตรียมให้บาง (< 500 นาโนเมตร) และเกิดการเลี้ยวเบน ลำอิเล็กตรอนที่เลี้ยวเบน จะถูกโฟกัสรวมกันเป็นจุดดิฟแฟรกชัน (Diffraction spots) ที่ระนาบแบคโฟกัล (Back focal plane) โดยเลนส์วัตถุ (Objective lens) จากนั้นจะผ่านไปยังเลนส์โปรเจกเตอร์แม่เหล็กอีก 3 ตัวเพื่อทำหน้าที่ขยายและแสดงภาพลงมาบนจอของกล้อง TEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องผ่าน สามารถสร้างภาพได้โดยอาศัย Selected Area Electron Diffraction (SAED) ซึ่งอยู่ระหว่างชิ้นงานและเลนส์โปรเจกเตอร์ ลำอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะทะลุผ่านชิ้นงาน โดยที่ไม่ได้เกิดการกระเจิง และมีลำอิเล็กตรอนบางส่วนที่สูญเสียพลังงานเนื่องจากการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น แต่ไม่เปลี่ยนเส้นทาง ภาพที่สร้างจากอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานโดยไม่เปลี่ยนทิศทาง เรียกว่า Bright-field image ถ้าตัวรับอิเล็กตรอนรับเฉพาะอิเล็กตรอนที่หักเหทิศทาง เนื่องจากระนาบของผลึก  $hkl$  แล้ว ภาพที่ได้จากส่วนนี้ เรียกว่า Dark-field image สามารถแบ่งลักษณะของภาพได้ 2 ชนิดคือ รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งให้รายละเอียดโครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมในวัสดุและภาพขยายขนาด 10,000 – 1,000,000 เท่า ซึ่งสามารถแปลผลข้อมูลที่ได้จากภาพทั้งสองนี้ได้อย่างกว้างขวาง ดังแสดงตัวอย่างของท่อนาโนคาร์บอนในรูปที่ 2.17 ที่ได้จาก TEM



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างภาพถ่าย TEM ของท่อนาโนคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

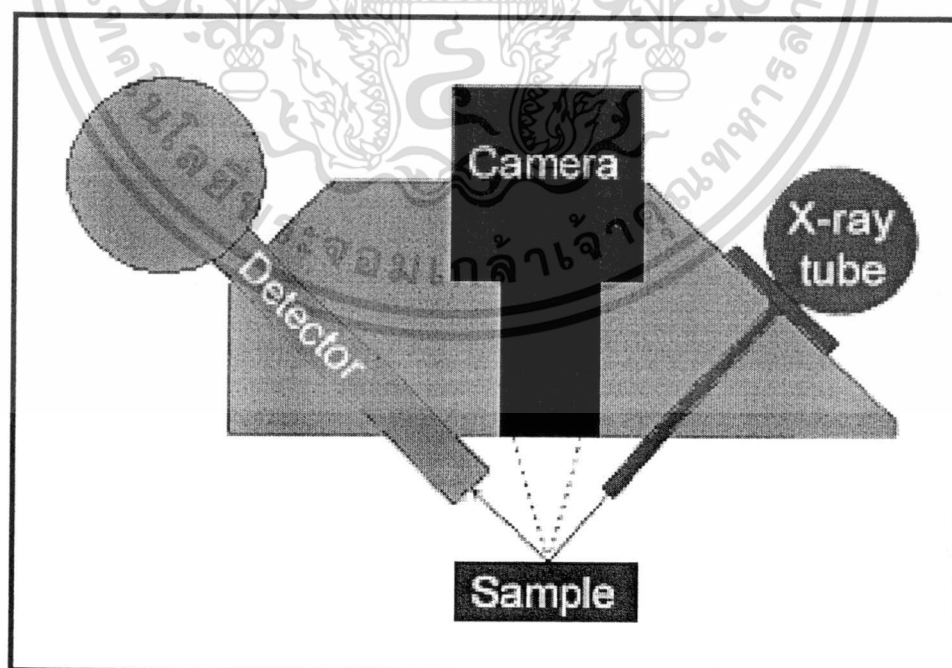
### 2.5.3 การวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบ Energy Dispersive X-ray (EDX) จากสัญญาณ X-Ray

EDX หรือ EDS เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุ ในของแข็งและของเหลวโดยการฉายด้วยรังสีเอกซ์ เพื่อจะศึกษาการกระจายของพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ได้จากอะตอมของชิ้นงาน หลังจากฉายรังสีเอกซ์กระทบชิ้นงาน โดยจะแสดงความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้บนแกนตั้ง และแสดงค่าพลังงานบนแกนนอน ซึ่งค่าพลังงานที่ได้จากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้าสู่วงในจะมีความเฉพาะเจาะจงของอะตอมแต่ละธาตุ ทำให้ศึกษาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ เมื่อถูกฉายด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานปลดปล่อย รังสีเอกซ์ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละธาตุออกมา จากนั้น Energy dispersive detector จะตรวจสอบสเปกตรัมของรังสีที่ถูกปล่อยออกมา ซึ่งธาตุแต่ละธาตุในสารตัวอย่างจะมีความเฉพาะตัวของพลังงานของรังสีที่ปล่อยออกมา

#### หลักการทำงานของ Energy Dispersive X-Ray (EDX)

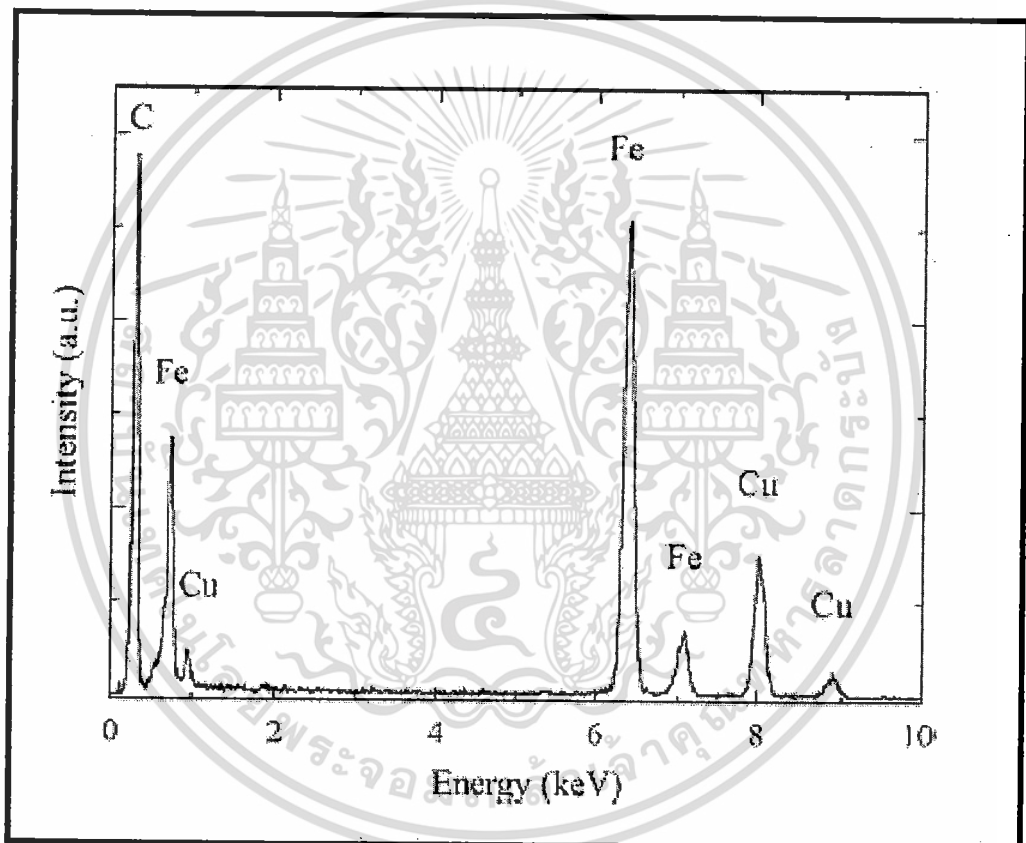
รูปที่ 2.18 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่อง ระบบ Energy dispersive X-ray เมื่อรังสีเอกซ์กระทบชิ้นงานจะมีอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนชั้นใน เนื่องจากรังสีเอกซ์มีพลังงานมากกว่าพลังงาน



**รูปที่ 2.18** ไดอะแกรมการทำงานของเครื่อง ระบบ Energy Dispersive X-Ray (EDX)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

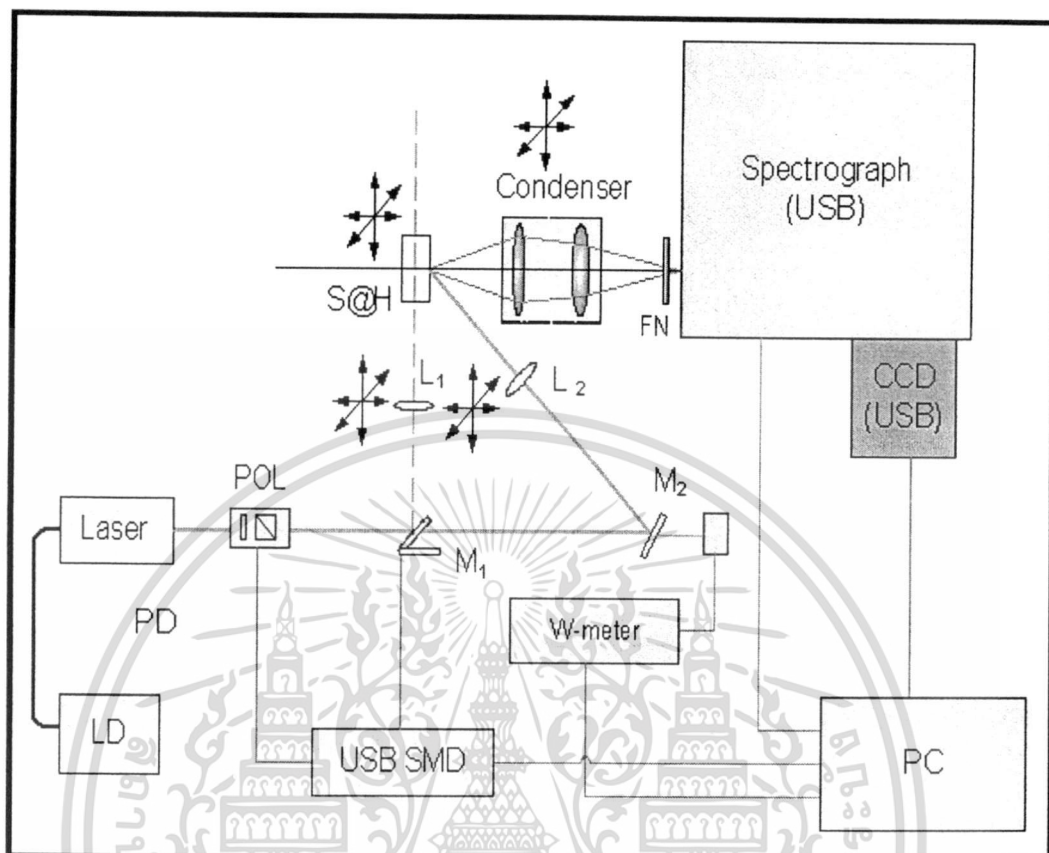
ยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานจลน์และหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้เกิดที่ว่างในวงโคจร หลังจากนั้นอิเล็กตรอนตัวอื่นที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าจะเข้ามาแทนที่การตกเข้ามาแทนที่ของอิเล็กตรอนวงนอกนี้ เรียกว่า Relaxation และอะตอมจะปล่อยรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละอะตอมออกมาในระดับพลังงานที่สูงกว่าจะตกเข้าไปแทนที่และปลดปล่อยพลังงาน ผลของพลังงานนี้จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าหลุดออกไป เรียกว่า Auger electron ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายที่ได้จากกระบวนการ Auger emission โดยรังสีเอกซ์จะทำให้อิเล็กตรอนตัวแรกหลุดออกไปจากวงใน ทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนตัวที่สอง รูปที่ 2.19 เป็นภาพถ่ายตัวอย่างจาก EDX ขององค์ประกอบธาตุต่างๆ



รูปที่ 2.19 ภาพจาก EDX ขององค์ประกอบธาตุต่างๆ

### 2.5.6 การวิเคราะห์คุณภาพของธาตุด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

Raman Spectroscopy เป็นรูปแบบหนึ่งของ Vibrational Spectroscopy เช่นเดียวกับ Infrared (IR) Spectroscopy แต่แถบอินฟราเรดเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ส่วนแถบรามานเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยน ความเป็นขั้วได้ (polarizability) มีหลายกรณีที่การทรานซิชันเกิดขึ้นได้ในกรณีของรามาน แต่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีของอินฟราเรด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่อง Raman Spectrometer

รูปที่ 2.20 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของเครื่อง Raman Spectrometer โดยทั่วไป โดยทั่วไปเครื่อง Raman Spectrometer จะมีส่วนประกอบพื้นฐาน 3 ส่วน คือ ส่วนเลเซอร์ ส่วนของ Probe และส่วน Spectrograph

**Laser** : เลเซอร์จะถูกใช้ในระบบของ Raman Spectrometer เนื่องจากเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว

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

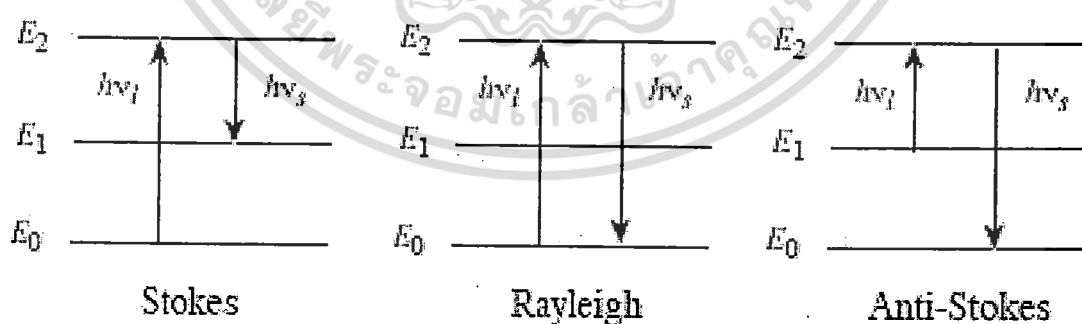
**Spectrograph** : เมื่อ Spectrograph ได้รับ Raman scatter ก็จะส่งต่อผ่านเกรตติงเพื่อแยกตามความถี่ แล้วส่งต่อไปยัง detector ซึ่งจะทำการบันทึกความเข้มของ Raman scatter ในแต่ละค่าความยาวคลื่น ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้จะนำมาเขียนลักษณะของ Raman Spectrum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หลักการทํางานของ Raman Spectroscopy

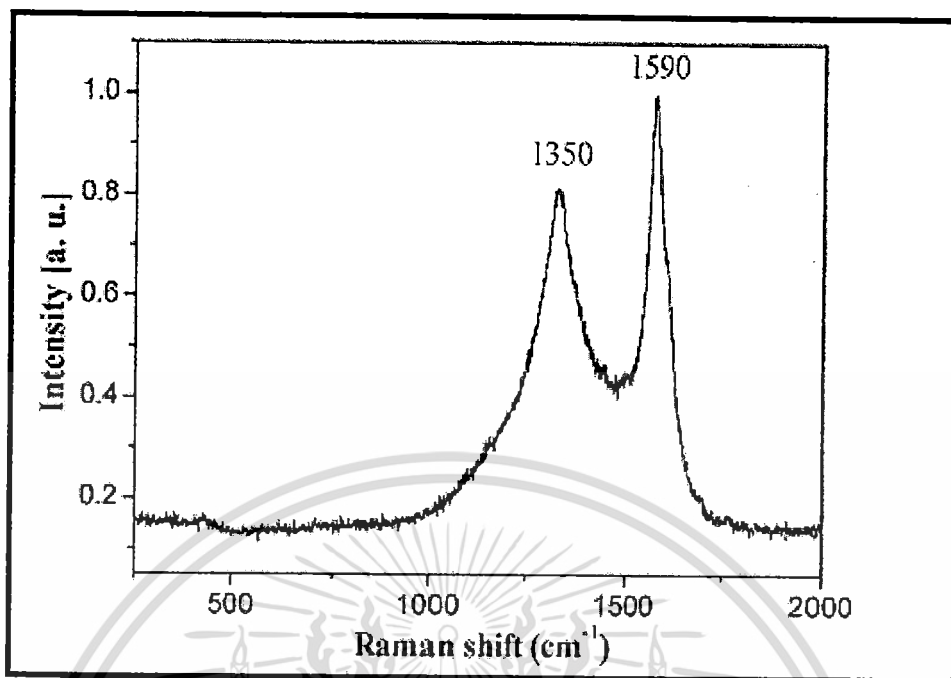
เมื่อลำแสงกระทบสารตัวอย่าง โฟตอนจะถูกดูดกลืนและกระเจิงออกมา ส่วนใหญ่โฟตอนที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่ตกกระทบ เรียกส่วนนี้ว่า Rayleigh scatter ซึ่งอิเล็กตรอนจะกลับสู่ระดับพลังงานเดิม ก่อนที่จะได้รับการกระตุ้นจากโฟตอน แต่มีโฟตอนบางส่วน (ประมาณ 1 ใน  $10^7$ ) ที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นเปลี่ยนไป โฟตอนที่มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปนี้เรียกว่า Raman scatter โฟตอนที่เป็ Raman scatter นี้ ส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นมากกว่า ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (Stoke shift) แต่ก็มีส่วนน้อยที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (anti-Stokes shift) Raman scattering ทั้งสองแบบ อิเล็กตรอนจะไม่ได้กลับมาสู่ระดับพลังงานเดิม Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนสูงกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น ส่วน anti-Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น Stokes scattering จะมีปริมาณมากกว่า anti-Stokes scattering จากรูปที่ 2.21 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering แต่ละกรณี โฟตอนที่ตกกระทบจะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า (virtual state) เมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ก็จะปล่อยโฟตอนออกมา

สเปกตรัมแบบรามานจะเป็นกราฟระหว่าง ความเข้มของรังสีรามานที่กระเจิงออกมา เทียบกับความถี่ที่แตกต่างออกไปจากความถี่ของแสงตกกระทบ (นิยมใช้หน่วยของเลขคลื่น,  $\text{cm}^{-1}$ ) ซึ่งความแตกต่างของความถี่นี้จะเรียกว่า Raman Shift ค่าที่ใช้ในการสร้างกราฟนิยมใช้ความถี่ในย่านของ Stokes รูปที่ 2.22 เป็นตัวอย่างของกราฟรามานที่ได้จากการ์บอนนาโนทิวป์



**รูปที่ 2.21** แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 กราฟรามานที่ได้จากคาร์บอนนาโนทิวป์

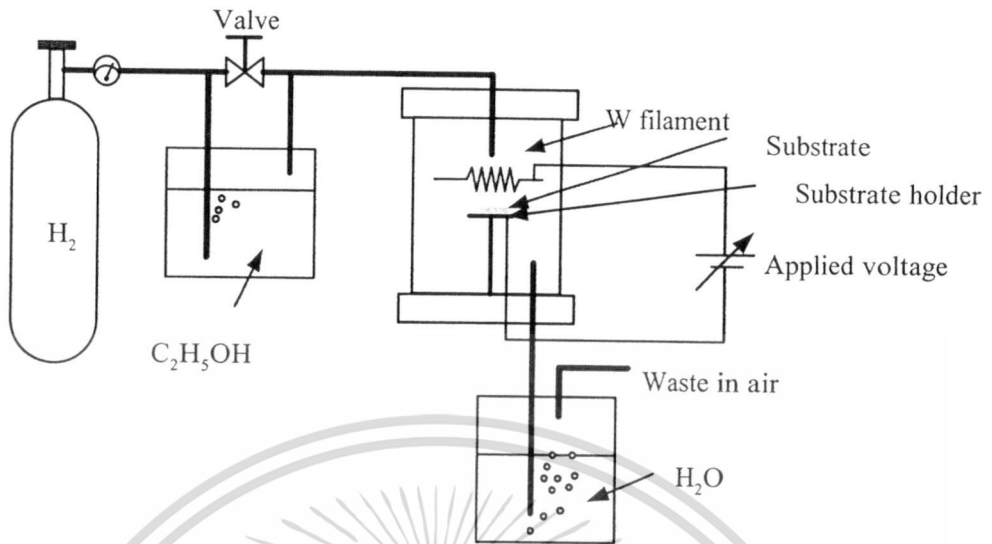
โดยทั่วไปแล้ว ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยเทคนิครามาน มีความถี่ที่สนใจอยู่ 3 ย่านคือ

- 1) ความถี่ที่อยู่ในช่วง  $<200 \text{ cm}^{-1}$  จะเรียกย่านความถี่นี้ว่า RBM (radial breathing mode) หากมีความถี่ในช่วงนี้เกิดขึ้น แสดงว่าเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว
- 2) ความถี่เฉลี่ยประมาณ  $1340 \text{ cm}^{-1}$  เรียกว่าย่าน D-Band ซึ่งเป็นย่านที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีพันธะไม่สมบูรณ์หรือมี Defect ในย่านนี้ ไม่ควรจะมีค่าสูงของพีคมากนัก เพราะเป็นย่านที่แสดงถึงความไม่สมบูรณ์หรือมีสิ่งเจือปนที่อยู่ในรูปแบบของผลึกที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น
- 3) ความถี่เฉลี่ยประมาณ  $1500 - 1600 \text{ cm}^{-1}$  เรียกว่าย่าน G-Band ซึ่งเป็นย่านที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีพันธะสมบูรณ์ ในส่วนของพีคที่แสดงถึงความบริสุทธิ์นั้น ความกว้างของแถบ G-band ยังบ่งบอกถึงคุณสมบัติการเป็นตัวนำที่ดีหรือสารกึ่งตัวนำของคาร์บอนนาโนทิวป์อีกด้วย ดังนั้น การวิเคราะห์คุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ จะหาได้จากการนำค่าพื้นที่ใต้กราฟของพีค G มาหารกับพีค D หรืออัตราส่วนของ  $I(G)/I(D)$  ซึ่งค่าที่มากจะแสดงถึงความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์

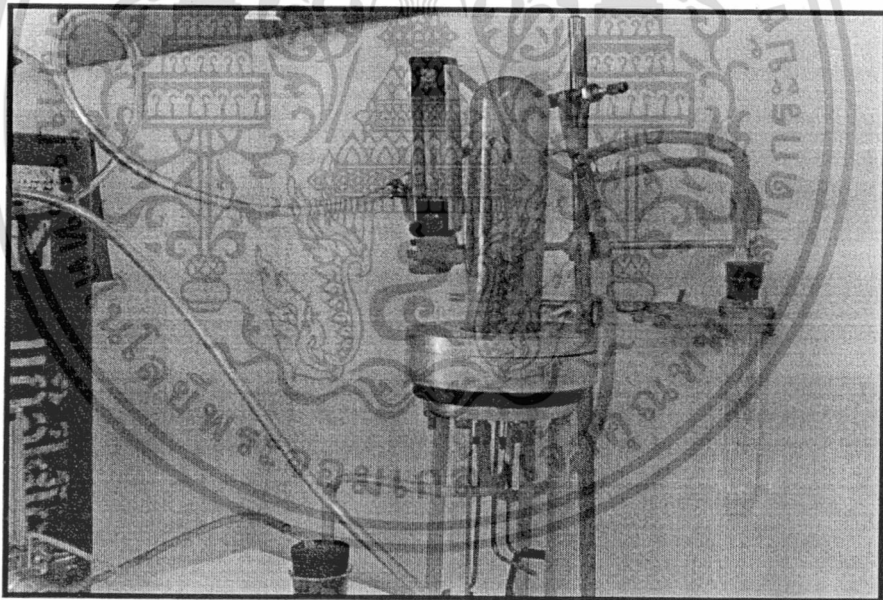
โดยสรุป จะพบว่าการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้อง ใช้เครื่องมือต่างๆเหล่านี้ช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่ง SEM เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในการหาขนาดของท่อได้อย่างคร่าวๆและยังแสดงถึงลักษณะการเกิดได้อีกด้วย เครื่องมือ EDX สำหรับเพื่อยืนยันถึงองค์ประกอบธาตุต่างๆที่สำคัญ เครื่องมือ TEM สำหรับศึกษาถึงขนาดและ ลักษณะของท่ออย่างละเอียด และสุดท้ายสำหรับเครื่องมือ Raman Spectroscopy ที่บอกถึงความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ด้วยกราฟ ในบทต่อไป จะกล่าวถึงกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HF-CVD กระทำที่ความดันบรรยากาศ และศึกษาถึงการนำเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการทดลอง

## 2.6 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อนที่ความดันบรรยากาศ [14-16]

การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน(HFCVD) กระทำที่ความดันบรรยากาศ ใช้สารแหล่งจ่ายที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนผสมกับก๊าซไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วนพอเหมาะ ใส้ของขดลวดความร้อนคือทังสเตน จากแผนภาพรูปที่ 2.23 และ 2.24 เป็นระบบ HFCVD ที่สร้างขึ้นเองอย่างง่าย ซึ่งประกอบด้วยท่อแก้ว pyrex ภายในมีลวดทังสเตนเป็นลวดความร้อนซึ่งถูกให้กระแสเข้าไปจากภายนอกจนทำให้เกิดความร้อนสูงจนทำให้โมเลกุลของก๊าซมีอุณหภูมิสูง ซึ่งอะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆจะแตกตัวออกจาก โมเลกุลของก๊าซ และไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้เตรียมไว้บนแผ่นตัวอย่างจนก่อเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยจะมีเทอร์โมคัปเปิลติดอยู่ที่ใต้ฐานรองไว้สำหรับวัดอุณหภูมิได้ฐานรอง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 550 – 750 องศาเซลเซียส มีแท่นยึดจับสำหรับนำวัสดุฐานรองมาวาง ซึ่งอยู่ใต้ขดลวดความร้อน 3 มิลลิเมตร ก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นตัวนำพาสารแหล่งจ่ายจะถูกแบ่งออกเป็นสองทาง ทางหนึ่งผ่านสารแหล่งจ่ายที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน ทำให้เกิดฟองอากาศพัดพาเอาไอระเหยของสารแหล่งจ่ายมาผสมกับอีกทางหนึ่งซึ่งเป็นไฮโดรเจนรวมกันเป็นสารแหล่งจ่ายไอระเหยเข้ามาผสมกันภายใน Chamber โดยมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนรวมต่อไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่ายประมาณ 8 – 12 %โดยปริมาตร อัตราส่วนทั้งสองส่วนถูกควบคุมด้วยมิเตอร์การไหลและวาล์ว เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ประมาณ 25 – 40 นาที ด้วยระบบนี้ยังสามารถให้สนามไฟฟ้าไปที่ระหว่างใส้ของขดลวดความร้อนและฐานรองในขณะที่ทำการสังเคราะห์ได้สำหรับกรณีที่ต้องการศึกษาการควบคุมให้ท่อนาโนคาร์บอนก่อเกิดในแนวตั้ง



รูปที่ 2.23 แผนภาพแสดงระบบ HFCVD



รูปที่ 2.24 เป็นภาพถ่ายอุปกรณ์ของระบบ HFCVD ที่สร้างขึ้นเองอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### กระบวนการทดลองและผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้ จะกล่าวถึงขั้นตอนต่างๆในการเตรียมฐานรองโดยใช้เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์มีส่วนเกี่ยวข้องในกระบวนการสร้างเพื่อจุดประสงค์ในการสร้างลวดลายบนฐานรองที่เป็นทั้งฉนวนและตัวนำ ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงการนำเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยวิธีการต่างๆนำไปสู่แนวคิดในการนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทตัวเซ็นเซอร์ก๊าซ ซึ่งฐานรองที่เตรียมไว้ จะนำมาสังเคราะห์ด้วยระบบชีวิตแบบขดลวดความร้อน กระทำที่บรรยากาศโดยฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

#### 3.1 อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

1. ถังแก๊สไฮโดรเจน
2. เรคกูเลเตอร์สำหรับควบคุมการไหลของแก๊สที่หัวถัง
3. Flow meter สำหรับควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส
4. สารแหล่งจ่าย (แอลกอฮอล์, อะซีโตน)
5. สารละลายผงเหล็ก
6. เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง
7. ขดลวดทั้งสแตน เลนผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ยาว 1 ซม.
8. เทอร์โมคัปเปิล
9. Chamber ทำจากท่อควอทซ์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 20 ซม.
10. นาฬิกาจับเวลา
11. พัดลมระบายความร้อน
12. แผ่นทึบแสง
13. มัลติมิเตอร์
14. บีกเกอร์สำหรับใส่สารแหล่งจ่าย
15. บีกเกอร์สำหรับเช็คแก๊สที่ไหลออกสู่ระบบ
16. ฐานรองสำหรับนำมาทำการทดลอง ประกอบด้วย
  - 16.1 ซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยผงเหล็ก
  - 16.2 ซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยนิเกิล
  - 16.3 ซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยนิเกิลและมีลวดลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

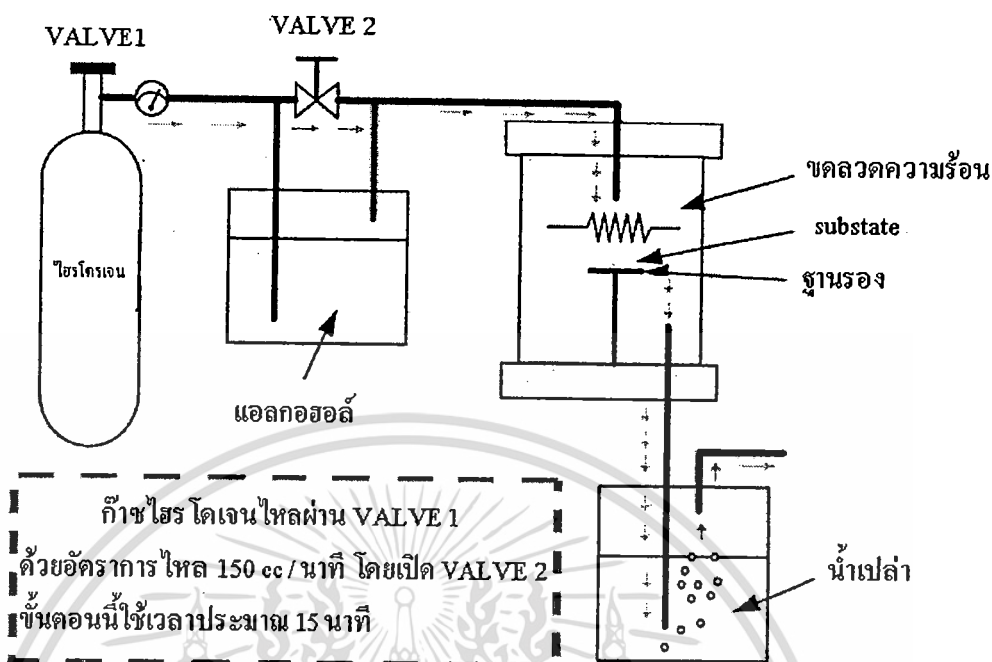
- 16.4 ทองแดงที่เคลือบด้วยผงเหล็ก
- 16.5 ทองแดงที่เคลือบด้วยนิกเกิล
- 16.6 ทองแดงที่เคลือบด้วยนิกเกิลและมีลวดลาย

### 3.2 ขั้นตอนของกระบวนการสังเคราะห์

ในการศึกษาถึงขั้นตอนในสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถเริ่มตั้งแต่กระบวนการดังต่อไปนี้

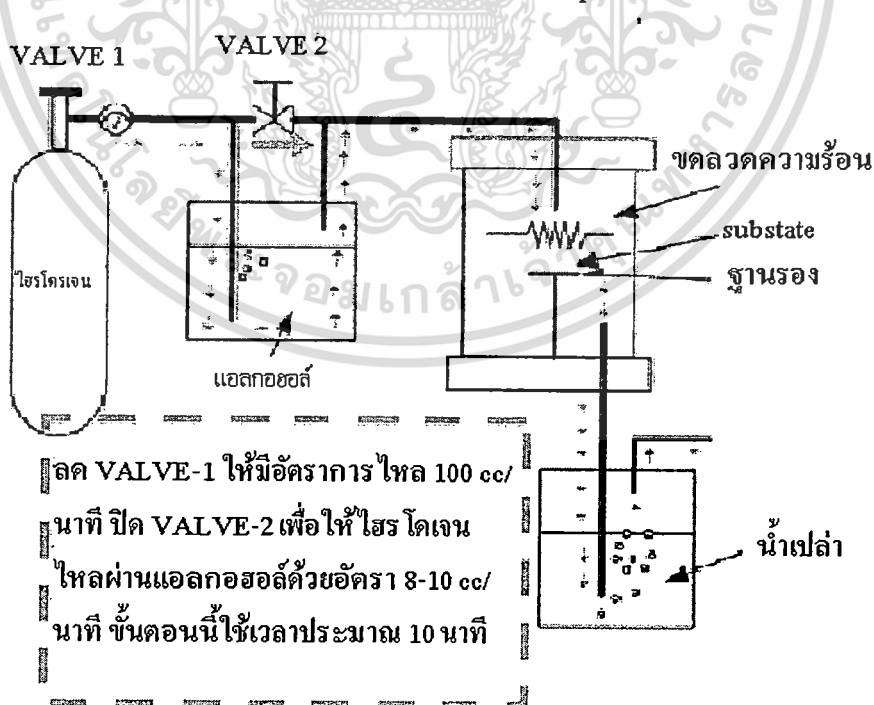
1. เปิดChamberออกเพื่อนำแผ่นฐานรองที่เตรียมไว้ไปวางบนตัวรองรับ จากนั้นจึงปิด Chamber ลง
2. ตรวจสอบระบบตำแหน่งของวาล์วทั้งหมดให้อยู่ตำแหน่งปิด
3. เปิดValve 1และ Valve 2 ของแก๊สไฮโดรเจน ให้ไหลผ่านเข้าสู่ระบบภายใน Chamber เพื่อทำการไล่อากาศภายในให้ออกจนหมด จนเหลือแต่บรรยากาศของไฮโดรเจน ด้วยอัตราการไหล 150 cc / นาที เป็นเวลา 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.3
4. ปรับอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนให้เหลือ 100 cc / นาที ต่อมาทำการปรับValve 2 เพื่อให้แก๊สไฮโดรเจนไหลผ่านผ่านสารแหล่งจ่ายในอัตราส่วน 8-10%ปริมาตร เป็นเวลา 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.4
5. เริ่มจับเวลาและในขณะที่เดียวกันค่อยๆเพิ่มกระแสจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงไปยังขดลวดทั้งสแตนเพื่อให้เกิดเป็นความร้อน โดยมีเทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิที่บริเวณใต้ฐานรอง ซึ่งมีค่าอยู่ราวๆ 550 – 750 องศาเซลเซียส และมีแผ่นที่บดแสงสำหรับสังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นบนฐานรอง ใช้เวลาในการสังเคราะห์ประมาณ 30 – 40 นาที
6. ปิด Valve 1และ Valve 2 แล้วจึงค่อยๆลดกระแสลงจนหมด รอจนกว่าแก๊สที่อยู่ภายใน Chamber หมด ซึ่งสังเกตได้จากฟองอากาศภายในบีกเกอร์สำหรับเช็คแก๊สที่ไหลออกสู่ระบบ ในขณะเดียวกันก็เพื่อต้องการให้อุณหภูมิภายใน Chamber เย็นตัวลง (สามารถทำได้ด้วยการเปิดพัดลมระบายความร้อนไปที่Chamber) จากนั้นจึงเปิด Chamber ออกแล้วนำแผ่นฐานรองที่สังเคราะห์แล้วออกมาและปิด Chamber

ภาพทำการไล่อากาศภายใน Chamber Loop ครั้งที่ 1



รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 1

ภาพทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2



รูปที่ 3.2 แสดงกระบวนการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 กระบวนการทดลอง

ก่อนทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ จำเป็นต้องศึกษาถึงตัวแปรต่างๆที่นำมาทำการทดลองและวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่อาจมีผลต่อการสังเคราะห์ จากนั้น ได้ศึกษาถึงการเตรียมฐานรองด้วยเทคนิคต่างๆเพื่อต้องการควบคุมให้เกิดในบริเวณที่ต้องการ นำไปสู่แนวคิดการออกแบบลวดลายที่เหมาะสม ให้สามารถใช้งานเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ได้ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

#### 3.3.1 ฐานรองที่ใช้สำหรับการทดลอง

ในกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HFCVD นี้ ได้ศึกษาการใช้ฐานรองอยู่ 2 ชนิดได้แก่

##### 3.3.1.1 ฐานรองซิลิคอน

ชนิด N-Types (หรือ P-Type) มีความหนาประมาณ 400 ไมโครเมตรและมีขนาดพื้นที่ประมาณ 5 ตารางมิลลิเมตร

##### 3.3.1.2 ฐานรองทองแดง

มีความหนาประมาณ 500 ไมโครเมตรและมีขนาดพื้นที่ประมาณ 5 ตารางมิลลิเมตร

#### 3.3.2 แคตตาลิต์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งใช้แคตตาลิต์อยู่ 2 ประเภทได้แก่

##### 3.3.2.1 ผงเหล็ก ( $Fe(NO_3)_3$ )

เตรียมได้จากสารละลายระหว่างเหล็กในเตรตกับเอทานอล

##### 3.3.2.2 นิกเกิล (Nickel)

- เตรียมได้จากการนำแผ่น Target ของนิกเกิลสำหรับวิธีการสปัตเตอร์ริง
- การชุบด้วยไฟฟ้า

#### 3.3.3 สารแหล่งจ่ายที่ใช้สำหรับการทดลอง

เป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของคาร์บอน ซึ่งใช้อยู่ 2 ชนิด ได้แก่

##### 3.3.3.1 แอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ )

##### 3.3.3.2 อะซีโตน ( $(CH_3)_2CO$ )

### 3.3.4 วิธีการเตรียมฐานรอง

ขั้นตอนการเตรียมฐานรอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HF-CVD และฐานรองบางประเภทจำเป็นต้องใช้ตัวแคตะไลต์เพื่อช่วยในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยฐานรองดังกล่าวที่ต้องการนำมาศึกษาจะถูกแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฐานรองซิลิคอนและฐานรองทองแดง

#### 3.3.4.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอน

นำแผ่นซิลิคอนมาทำความสะอาดผิวหน้า ต่อมาจะนำไปสร้างชั้นฉนวนด้วยกระบวนการออกซิเดชัน จากนั้นจึงนำไปเคลือบแคตะไลต์ โดยแบ่งได้สามกรณีคือ

กรณีที่ 1 เคลือบแคตะไลต์นี้เกิดด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริงเป็นแบบฟิล์มบาง

กรณีที่ 2 เคลือบแคตะไลต์นี้เกิดด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริงเป็นแบบกลุ่มก้อน

กรณีที่ 3 เคลือบแคตะไลต์ผงเหล็กด้วยการจุ่มลงในสารละลายผงเหล็กแล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

#### 3.3.4.2 การเตรียมฐานรองทองแดง

นำแผ่นทองแดงมาทำความสะอาดผิวหน้า จากนั้นจึงนำไปเคลือบแคตะไลต์ โดยแบ่งได้สองกรณีคือ

กรณีที่ 1 เคลือบแคตะไลต์นี้เกิดด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริงเป็นแบบฟิล์มบาง

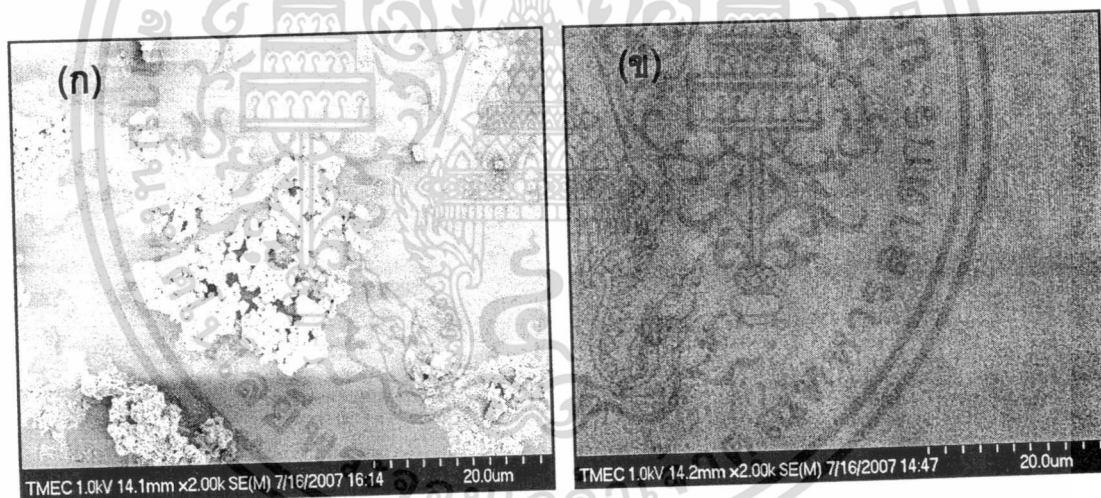
กรณีที่ 2 เคลือบแคตะไลต์ผงเหล็กด้วยการจุ่มลงในสารละลายผงเหล็กแล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

### 3.3.5 เงื่อนไขในการสังเคราะห์

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของระบบ HF-CVD มีดังนี้คือ

- กระทำที่ความดันบรรยากาศ
- อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วง 550 – 750 องศาเซลเซียส
- เวลาในการสังเคราะห์ 25 – 40 นาที
- อัตราส่วนของไฮโดรเจนรวมต่อไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่าย 8 – 12 % โดยปริมาตร
- กำลังงาน 105 – 140 วัตต์

ปัจจัยสำคัญในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ลงบนฐานรองที่ไม่มีส่วนประกอบของคาร์บอนเลยคือ การใช้ตัวแคตะไลต์สำหรับเป็นตัวช่วยให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ในที่นี้ ฐานรองที่ต้องการจะนำมาศึกษามีสองชนิดได้แก่ ฐานรองซิลิกอนและทองแดง โดยตัวแคตะไลต์ที่จะนำมาเคลือบลงบนฐานรองมีสองประเภทคือ ผงเหล็กและนิกเกิล ซึ่งวิธีการเคลือบผงเหล็กบนฐานรองทำได้โดยเริ่มจากการผสมสารละลายระหว่างเหล็กไนเตรด ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ) กับ เอทานอล จากนั้นนำฐานรองทั้งสองชนิดมาจุ่มในสารละลายที่เตรียมไว้ จากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงค่อยนำไปเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์ จากรูปที่ 3.3 จะพบว่าการกระจายตัวของผงเหล็กภายหลังจากการเคลือบนั้น มีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มไม่กระจายตัวเหมือนในกรณีของฐานรองที่เป็นทองแดง อีกทั้งการยึดเกาะของตัวแคตะไลต์บนผิวหน้าของฐานรองก็ไม่สม่ำเสมอ อาจเป็นเพราะลักษณะพื้นผิวที่มันวาวของซิลิกอน ซึ่งอาจเป็นผลทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่ำ และเกิดไม่ทั่วทั้งพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 3.3(ก) ส่วนในรูปที่ 3.3(ข) เป็นกรณีของแผ่นทองแดงที่เคลือบด้วยผงเหล็ก พบว่ามีการยึดเกาะของตัวแคตะไลต์บนผิวหน้าของฐานรองค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนกรณีของตัวแคตะไลต์นิกเกิล การเตรียมฐานรองนั้น จะใช้วิธีการเคลือบนิกเกิลด้วยวิธีการสปีดเตอร์ลงบนฐานรอง ซึ่งมีการยึดเกาะที่ดี และพื้นผิวสม่ำเสมอ



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายจาก SEM ของตัวแคตะไลต์ผงเหล็กที่ถูกเคลือบอยู่บนพื้นผิว

- (ก) ฐานรองซิลิกอน
- (ข) ฐานรองทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.6 ผลการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงบนฐานรองซิลิคอน [17-18]

การทดลองในส่วนนี้ ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางชนิด คือสารแหล่งจ่าย และตัวแคตะไลต์ ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงขนาดของท่อและคุณภาพของฟิล์มที่ได้ภายหลังจากการสังเคราะห์ว่าเป็นอย่างไร จากตารางที่ 3.1 จะแบ่งชนิดของตัวแปรที่ต้องการจะศึกษาไว้ 4 ชนิด โดยทั้งหมดนั้น มีฐานรองเป็นซิลิคอน ส่วนเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้น เป็นเงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด ดังในตารางที่ 3.2 ทั้งนี้เพื่อต้องการจะนำผลการทดลองของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้มาเปรียบเทียบกันเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 3.1 แผ่นทดลองที่นำมาทำการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอน

สารแหล่งจ่าย แคตะไลต์	เอทานอล	อะซีโตน
ผงเหล็ก	1. ซิลิคอน เคลือบผงเหล็ก/เอทานอล	2. ซิลิคอน เคลือบผงเหล็ก/อะซีโตน
นิกเกิล	3. ซิลิคอน เคลือบนิกเกิล/เอทานอล	4. ซิลิคอน เคลือบนิกเกิล/อะซีโตน

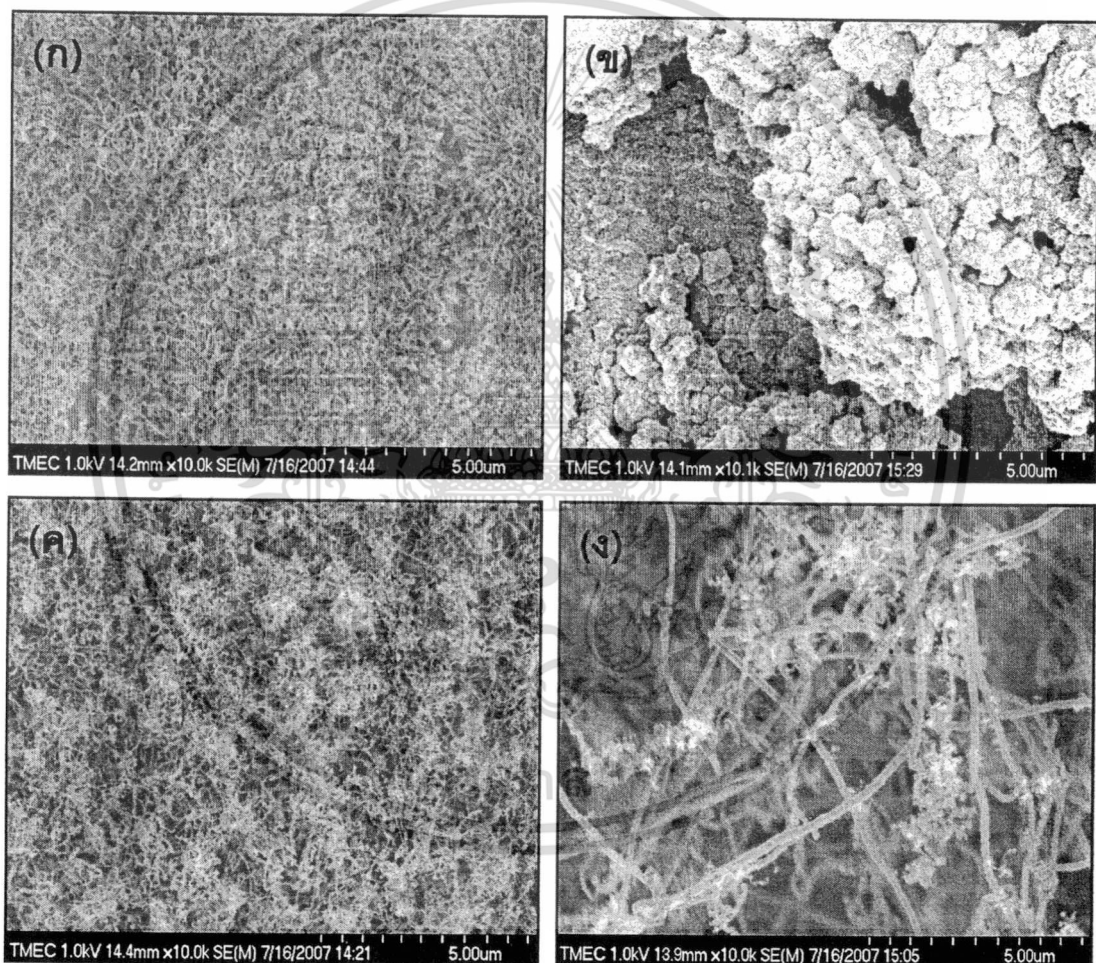
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอน

สารแหล่งจ่าย	แอลกอฮอล์	อะซีโตน	แอลกอฮอล์	อะซีโตน
แคตะไลต์	ผงเหล็ก	ผงเหล็ก	นิกเกิล	นิกเกิล
อุณหภูมิฐานรอง	600-700 °C	600-700 °C	600-700 °C	600-700 °C
กำลังงาน	135 W	135 W	135 W	135 W
เวลา	30-40 นาที	30-40 นาที	30-40 นาที	30-40 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.6.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย SEM

จากรูปที่ 3.4 เป็นภาพถ่ายจาก SEM ของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เท่ากัน(10000 เท่า) ซึ่งได้สังเคราะห์ลงบนฐานรองซิลิกอน ซึ่งได้ศึกษาการใช้ตัวแคตะไลต์และสารแหล่งจ่ายต่างชนิดกัน แต่เงื่อนไขในการสังเคราะห์เดียวกัน รูปที่ 3.4(ก) เป็นท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดการใช้ตัวแคตะไลต์เป็นผงเหล็กและสารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอล ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราการเกิดค่อนข้างต่ำจนเห็นพื้นผิวของฐานรองบางส่วน ลักษณะของท่อขึ้นอย่างไม่เป็นระเบียบ มีขนาดของท่อที่ค่อนข้างเล็ก รูปที่ 3.4(ข) เมื่อเปลี่ยนสารแหล่งจ่ายเป็นอะซีโตน พบว่ามีการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ไม่เกิดเป็นลักษณะของท่อคาร์บอนและก่อตัวไม่ปกคลุมทั่วพื้นผิวของฐานรอง



**รูปที่ 3.4** ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิกอน

(ก) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล

(ข) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

(ค) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล

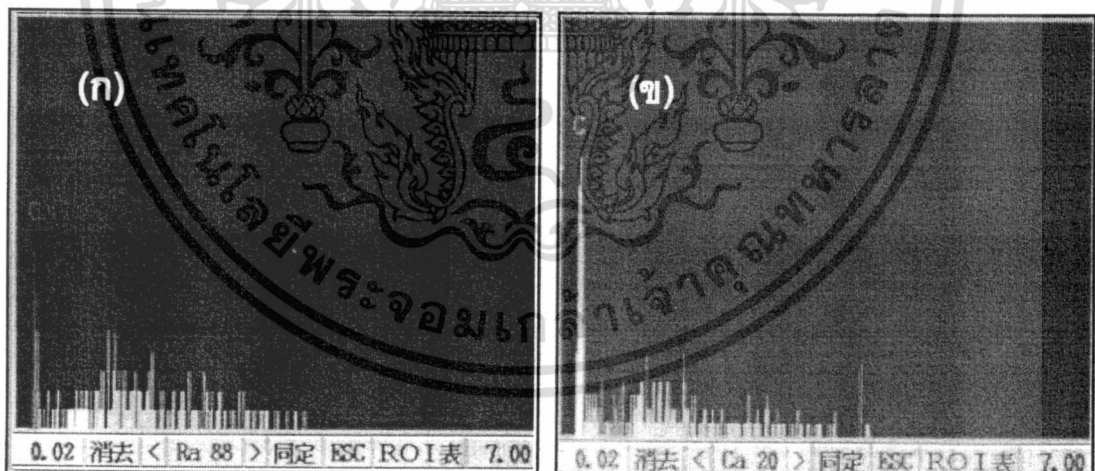
(ง) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4(ค) เมื่อเปลี่ยนมาใช้ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิลและสารแหล่งจ่ายเป็นเอทธานอล พบว่าท่อนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นอย่างหนาแน่นทั่วทั้งพื้นผิวแต่มีขนาดของท่อค่อนข้างเล็ก ส่วนรูปที่ 5.5(ง) ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นอะซีโตน พบว่าสังเคราะห์ได้ขนาดของท่อนาโนคาร์บอนประมาณ 200 – 300 นาโนเมตร ซึ่งค่อนข้างจะใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 3.4(ค) ที่ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทธานอลแต่ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิลเหมือนกัน แสดงว่าสารแหล่งจ่ายอาจมีผลต่อขนาดของท่อด้วย อีกทั้งความหนาแน่นของท่อนาโนคาร์บอนก็มากด้วยเช่นกัน

### 3.3.6.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย EDX

การนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาวิเคราะห์ด้วย EDX จะได้กราฟที่แสดงถึงความหนาแน่นของธาตุคาร์บอนหรืออัตราการเกิดของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้บนฐานรอง ในการทดลองนี้ ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทธานอลซึ่งไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด แต่ต้องการจะศึกษาผลของอัตราการเกิดที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงตัวแคตะไลต์ รูปที่ 3.5(ก) ใช้ตัวแคตะไลต์เป็นผงเหล็ก พบว่าฟิคที่ได้แสดงถึงธาตุที่เป็นองค์ประกอบคาร์บอนเกิดขึ้น แต่ไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับรูปที่ 3.5(ข) ซึ่งใช้ตัวแคตะไลต์นิเกิล พบว่ามีฟิคของธาตุคาร์บอนเกิดขึ้นสูงกว่า แสดงว่าตัวแคตะไลต์นิเกิล อาจมีผลต่ออัตราการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ไม่มากนัก



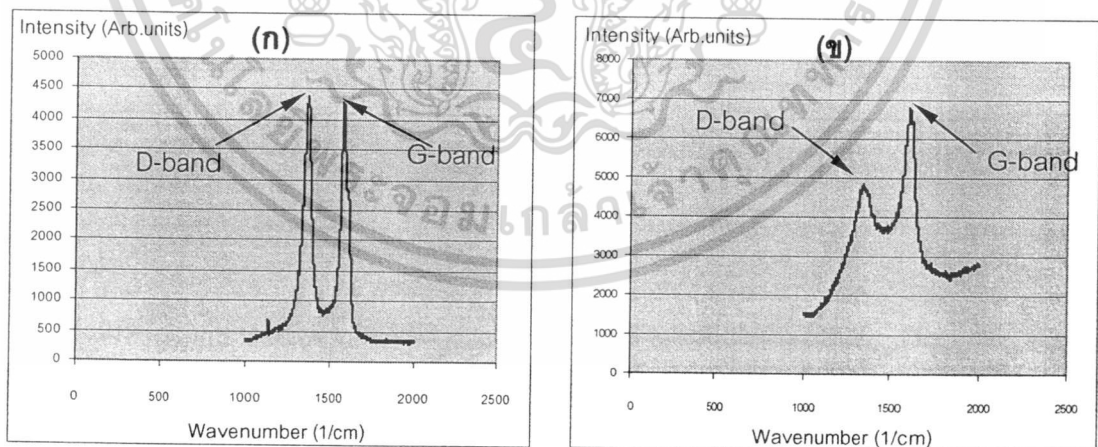
**รูปที่ 3.5** ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนบนฐานรองซิลิกอน

- (ก) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทธานอล
- (ข) เคลือบด้วยตัวตัวแคตะไลต์นิเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทธานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.6.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย Raman Spectroscopy

การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยเทคนิครามาน เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถบอกถึงคุณภาพหรือความบริสุทธิ์ของฟิล์ม อีกทั้งยังบอกถึงลักษณะของท่อที่สังเคราะห์ได้ว่าเป็นแบบผนังชั้นเดียวหรือหลายชั้น ได้อย่างคร่าวๆ อีกด้วย ซึ่งสังเกตได้จากย่านที่มีพีคเกิดขึ้น ในการทดลองนี้ จะเน้นถึงการใช้นิยามใช้เทคนิครามานเพื่อวิเคราะห์ถึงคุณภาพของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้เท่านั้น ซึ่งได้ศึกษาการใช้ตัวแคตะไลต์และสารแหล่งจ่ายต่างชนิดกัน แต่เงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่เดียวกัน รูปที่ 3.6 แสดงรามานสเปกตรัมที่บ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งพีค G แสดงถึงพันธะของกราฟไฟต์ที่สมบูรณ์ พีค D เป็นพีคที่เกิดจากคาร์บอนที่มีพันธะไม่สมบูรณ์ รูปที่ 3.6(ก) พบว่าเกิดพีคของ G กับ D สูงใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้แคตะไลต์ผงเหล็กและสารแหล่งจ่ายคือเอทานอล ดังนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนเป็นแคตะไลต์นิกเกิล กลับพบว่า พีคของ G สูงกว่า D ดังแสดงในรูปที่ 3.6(ข) ซึ่งบ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ที่ได้ค่อนข้างดีที่สุดเมื่อเทียบกับด้วยฐานรองเดียวกัน แสดงว่าการใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอลและแคตะไลต์นิกเกิลน่าจะเป็นส่วนสำคัญในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอนที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง ส่วนในกรณีของกราฟรามานที่ได้จากการใช้สารแหล่งจ่ายเป็นอะซีโตน นั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.6(ข) และ (ง) พบว่า ลักษณะของกราฟตรงช่วงบริเวณระหว่างพีคของ G กับพีคของ D กลับมีค่าสูง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่อาจจะมีสารประกอบอื่นๆ ปะปนรวมอยู่ด้วย นอกเหนือจากธาตุคาร์บอน แสดงถึงพันธะที่ไม่สมบูรณ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์

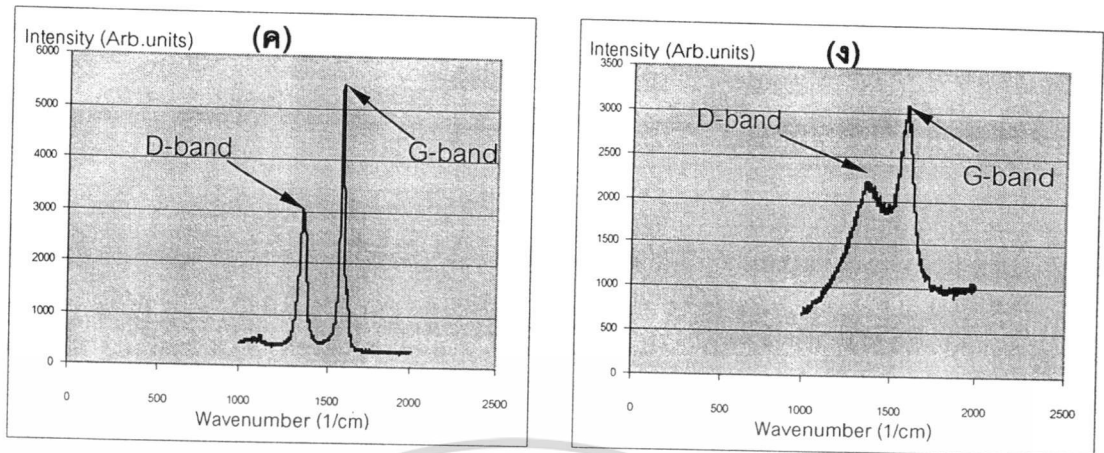


รูปที่ 3.6 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอน

(ก) ตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล

(ข) ตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.6(ต่อ)** รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองซิลิคอน

(ค) ตัวแคตะไลต์ที่เกิดและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล

(ง) ตัวแคตะไลต์ที่เกิดและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

### 3.3.7 ผลการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ลงบนฐานรองทองแดง [17-18]

การทดลองในส่วนนี้ ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางชนิดเหมือนกับกรณีของซิลิคอน คือสารแหล่งจ่ายและตัวแคตะไลต์ จากตารางที่ 3.3 จะแบ่งชนิดของตัวแปรที่ต้องการจะศึกษาไว้ 4 ชนิด โดยทั้งหมดนั้น มีฐานรองเป็นทองแดง กระทำด้วยเงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด ดังในตารางที่ 3.4 จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบต่อไป

**ตารางที่ 3.3** แผ่นทดลองที่นำมาทำการสังเคราะห์ บนฐานรองทองแดง

สารแหล่งจ่าย แคตะไลต์	เอทานอล	อะซีโตน
<b>ผงเหล็ก</b>	1. ทองแดง เคลือบผงเหล็ก/เอทานอล	2. ทองแดง เคลือบผงเหล็ก/อะซีโตน
<b>นิกเกิล</b>	3. ทองแดง เคลือบนิกเกิล/เอทานอล	4. ทองแดง เคลือบนิกเกิล/อะซีโตน

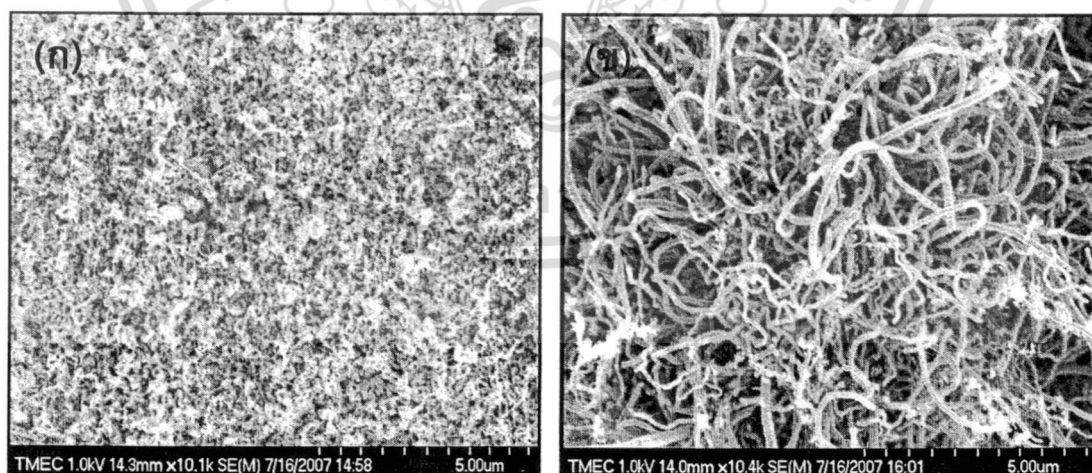
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.4** เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์บนฐานรองทองแดง

สารแหล่งจ่าย	แอลกอฮอล์	อะซีโตน	แอลกอฮอล์	อะซีโตน
แคตะไลต์	ผงเหล็ก	ผงเหล็ก	นิกเกิล	นิกเกิล
อุณหภูมิฐานรอง	600-700 °C	600-700 °C	600-700 °C	600-700 °C
กำลังงาน	106 W	106 W	106 W	106 W
เวลา	25-30 นาที	25-30 นาที	25-30 นาที	25-30 นาที

### 3.3.7.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย SEM

จากรูปที่ 3.7 เป็นภาพถ่ายจาก SEM ของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ในกำลังขยายที่เท่ากัน (10000 เท่า) ซึ่งได้สังเคราะห์หลังบนฐานรองทองแดง ซึ่งได้ศึกษาการใช้ตัวแคตะไลต์และสารแหล่งจ่ายต่างชนิดกัน แต่เงื่อนไขในการสังเคราะห์เดียวกัน จากรูปที่ 3.7(ก) พบว่าท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีความหนาแน่นสูงและเกิดทั่วทั้งพื้นผิวอย่างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะของท่อค่อนข้างสังเกตุยาก เนื่องจากขนาดของท่อที่เล็กมาก รูปที่ 3.7(ข) สังเกตเห็นลักษณะของท่อ ได้อย่างชัดเจน มีขนาดของท่อประมาณ 100 – 400 nm และเกิดขึ้นอย่างหนาแน่นทั่วบนฐานรอง รูปที่ 3.7(ค) จะมีลักษณะของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ไม่ค่อยมีความสมบูรณ์และค่อนข้างเล็ก มีอัตราการเกิดที่หนาแน่น รูปที่ 3.7(ง) สังเกตเห็นลักษณะของท่ออย่างชัดเจนและเกิดอย่างหนาแน่น ท่อมีขนาดเล็กและยาว

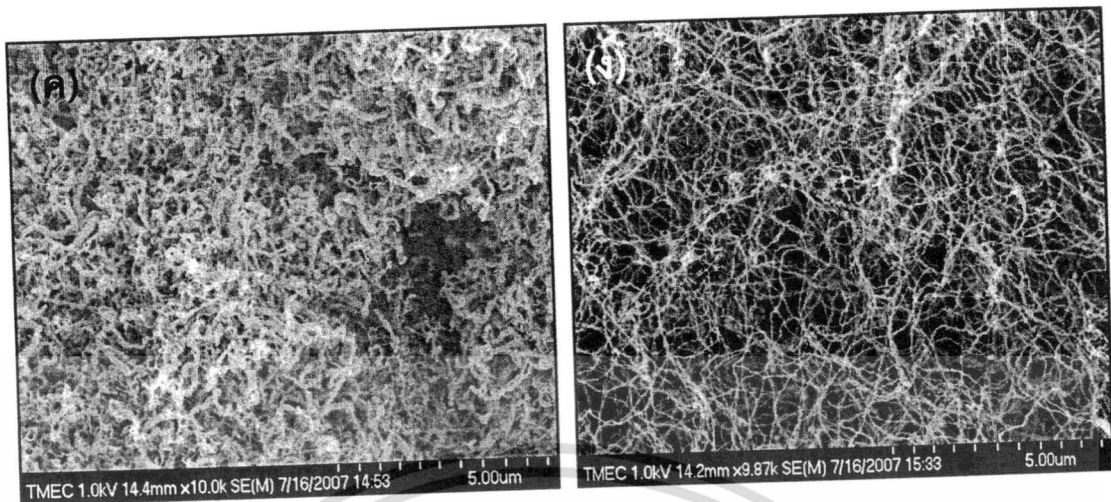


**รูปที่ 3.7** ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองทองแดง

(ก) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล

(ข) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.7(ต่อ)** ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองทองแดง

(ก) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล

(ข) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

### 3.3.7.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย EDX

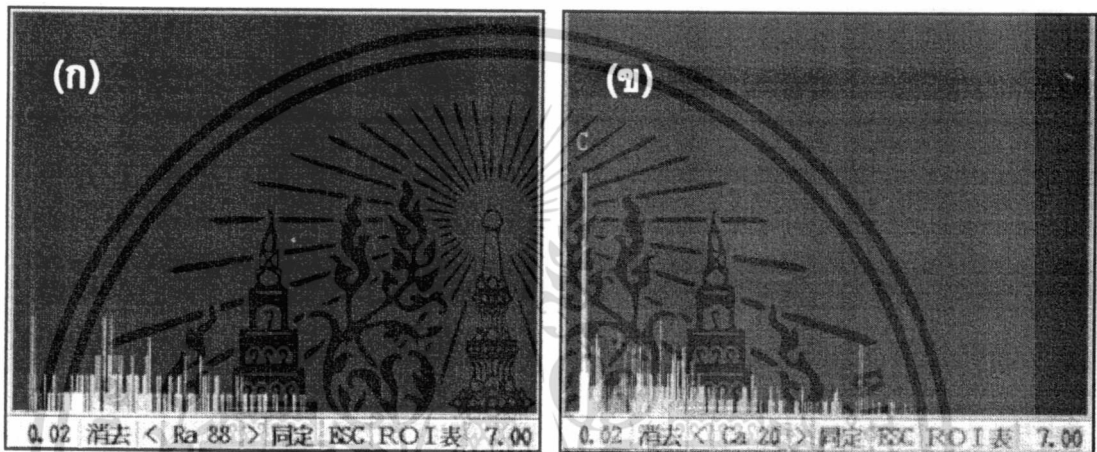
ในการทดลองนี้ ต้องการจะศึกษาผลของอัตราการเกิดที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงตัวแคตะไลต์ โดยที่ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอลซึ่งไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดเช่นเดียวกับกรณีของฐานรองซิลิคอน ดังนั้นนำฟิล์มที่สังเคราะห์ได้บนฐานรองทองแดงนำมาวิเคราะห์หาความหนาแน่นของคาร์บอนด้วย EDX ปรากฏว่า จากรูปที่ 3.8(ก) พบว่ามีพีคของคาร์บอนเกิดขึ้นซึ่งใช้ตัวแคตะไลต์เป็นผงเหล็ก เมื่อเทียบกับรูปที่ 3.8(ข) ซึ่งใช้ตัวแคตะไลต์นิกเกิล พบว่ามีพีคของคาร์บอนเกิดขึ้นในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นน่าจะสรุปได้ว่า ความหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้นั้น ขึ้นอยู่กับการเตรียมตัวแคตะไลต์ที่เคลือบบนฐานรอง ให้มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ

### 3.3.7.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย Raman Spectroscopy

การศึกษาคุณภาพของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้บนฐานรองทองแดง โดยการใช้ตัวแคตะไลต์และสารแหล่งจ่ายต่างชนิดกัน แต่เงื่อนไขในการสังเคราะห์เดียวกัน พบว่า รูปที่ 3.9(ก) เกิดพีค G ซึ่งเป็นพันธะที่สมบูรณ์ค่อนข้างสูง แต่พีค D ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่สมบูรณ์กลับสูงเกือบเคียงกันขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้แคตะไลต์ผงเหล็กและสารแหล่งจ่ายคือเอทานอล ดังนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนเป็นแคตะไลต์นิกเกิลพบว่า พีคของ G สูงกว่า D ดังแสดงในรูปที่ 3.9(ข) ซึ่งบ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ที่ได้ค่อนข้างดีที่สุดเมื่อเทียบกับด้วยฐานรองเดียวกัน แสดงว่าการใช้สารแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

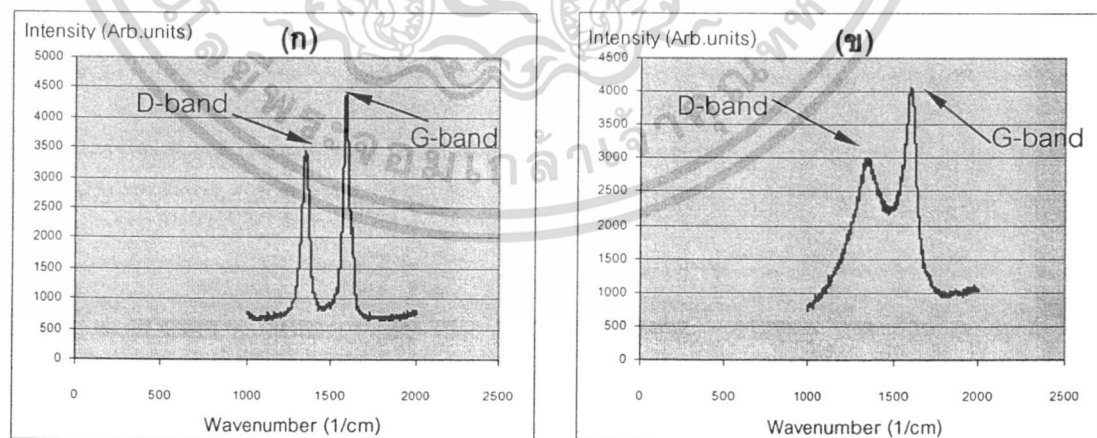
เอทธานอลและแคตะไลต์นี้เกิดน่าจะเป็นส่วนสำคัญในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองทองแดงที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง ส่วนกราฟรามานในรูปที่ 3.9(ข)และ(ง) ที่ได้จากการใช้สารแหล่งจ่ายเป็นอะซีโตนนั้น พบว่า ลักษณะของกราฟตรงช่วงบริเวณระหว่างพีคของ G กับ พีคของ D กลับมีค่าสูง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่อาจจะมีสารประกอบอื่นๆปะปนรวมอยู่ด้วย นอกเหนือจากธาตุคาร์บอน แสดงถึงพันธะที่ไม่สมบูรณ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อสังเกตแนวโน้มที่ได้จากกราฟรามานของฐานรองทองแดงพบว่าลักษณะของกราฟคล้ายกับกรณีของฐานรองซิลิคอน ดังนั้นสรุปได้ว่า แคตะไลต์นี้เกิดและสารแหล่งจ่ายเอทธานอล จึงถูกเลือกเป็นตัวแปรที่เหมาะสมจะนำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีคุณภาพสูง



รูปที่ 3.8 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของชาตุนบนฐานรองทองแดง

(ก) ถ่ายด้วยตัวแคตะไลต์ฟงเหล็ก

(ข) ถ่ายด้วยตัวแคตะไลต์นิกเกิล

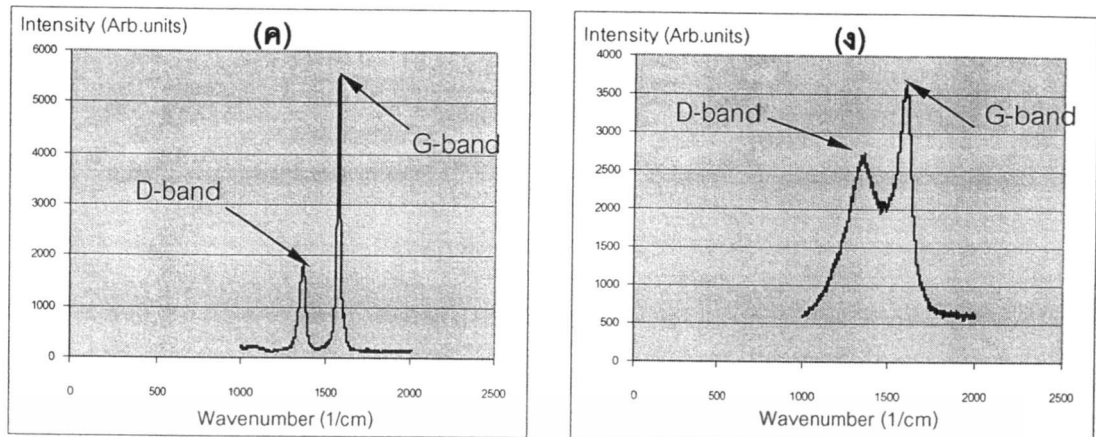


รูปที่ 3.9 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองทองแดง

(ก) ถ่ายด้วยตัวแคตะไลต์ฟงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทธานอล

(ข) ถ่ายด้วยตัวแคตะไลต์ฟงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9(ต่อ) รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองทองแดง

(ก) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์นิเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล

(ง) เคลือบด้วยแคตะไลต์นิเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

### 3.4 เทคนิคการเตรียมฐานรองสำหรับการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์

[19-20]

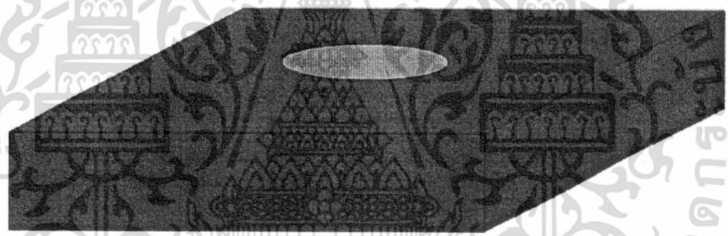
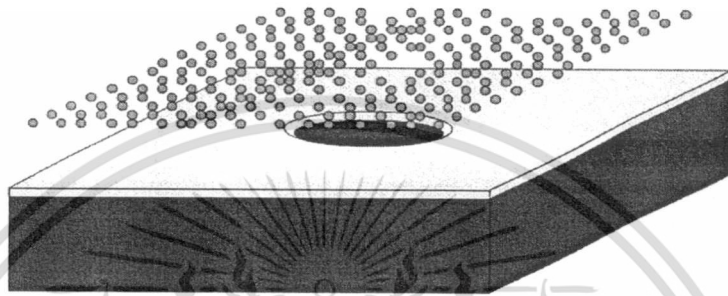
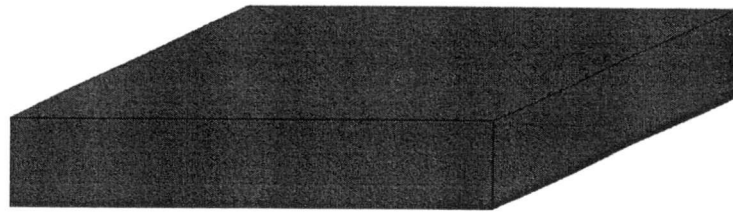
จากผลการทดลองที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าการ์บอนนาโนทิว์จะเกิดได้โดยใช้ตัวแคตะไลต์ ดังนั้นหากต้องการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ให้เกิดในบริเวณที่ต้องการนั้น ขึ้นอยู่กับการสร้างลวดลายของตัวแคตะไลต์บนฐานรอง ในการทดลองนี้ ศึกษาการใช้ตัวแคตะไลต์ที่เป็นนิเกิลเท่านั้น เนื่องจากกระบวนการเตรียมฐานรองเป็นลวดลายนิเกิล สามารถทำได้ด้วยเทคโนโลยีด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีเทคนิควิธีในการสร้างลวดลายต่างๆ ได้ดังนี้

#### 3.4.1 การสร้างลวดลายโดยวิธีการใช้หน้ากากป้องกัน (Shadow mask)

จากรูปที่ 3.10 เป็นกระบวนการสร้างลวดลายที่ไม่ค่อยมีความซับซ้อนมาก โดยมีหลักการดังนี้คือ นำหน้ากากที่มีลวดลายไปวางประกบกับฐานรอง โดยยกตัวอย่างฐานรองที่นำมาศึกษาเป็นซิลิคอน จากนั้นนำไปทำการสปัตเตอร์ด้วยนิเกิล โดยนิเกิลจะเคลือบลงบนผิวหน้าซิลิคอน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 (ก) เวลาในการสปัตเตอร์ คือ 90 วินาที จะเห็นเป็นรูปวงกลมตามลวดลายของหน้ากากป้องกัน เมื่อทำการขยายภาพบริเวณพื้นผิวนิเกิล แสดงได้ดังรูปที่ 3.11 (ข) จะเห็นว่าโลหะนิเกิลจะมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน ไม่เป็นฟิล์มปกคลุมตลอดพื้นผิวที่เป็นวงกลม สาเหตุเนื่องจากเวลาในการสปัตเตอร์น้อย ทั้งนี้ด้วยเหตุผลที่ต้องการเปรียบเทียบกับโลหะนิเกิลที่เคลือบเป็นลักษณะของฟิล์ม ดังนั้นจะได้นิเกิลเคลือบลงบนฐานรองตามลวดลายของหน้ากากหรือตรงบริเวณที่ไม่มีอะไรมากั้น จากนั้นจึงนำฐานรองที่เตรียมแล้ว ไปทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ โดยมี

เงื่อนไขดังตารางที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.10** แสดงกระบวนการเคลือบนิเกิลด้วยการสปัตเตอร์ริง โดยมีหน้ากากป้องกัน

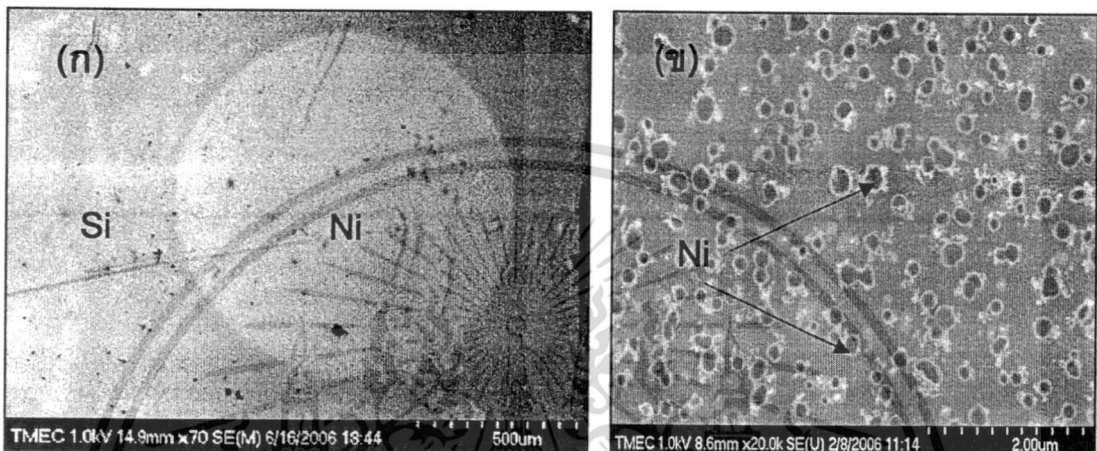
**ตารางที่ 3.5** เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอนที่มีสวดลายจากการใช้หน้ากากป้องกัน

<b>อุณหภูมิฐานรอง</b>	600-700 °C
<b>กำลังงาน</b>	120 W
<b>สารแหล่งจ่าย</b>	แอลกอฮอล์
<b>แคตะไลต์</b>	นิเกิล
<b>เวลา</b>	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

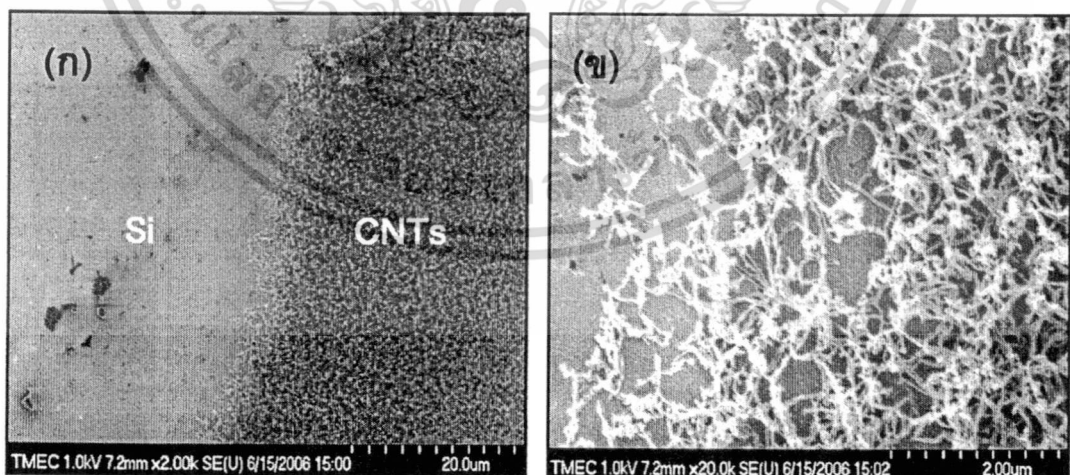
### 3.4.1.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวด้วย SEM

รูปที่ 3.12(ก) เป็นภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยายต่ำบริเวณขอบเขตวงกลมที่ได้จากการใช้ หน้ากากป้องกัน พบว่ามีคาร์บอนนาโนทิวส์เกิดขึ้นในบริเวณวงกลมและแสดงถึงขอบเขตระหว่าง ส่วนที่เกิดกับไม่เกิดอย่างชัดเจน รูปที่ 3.12(ข) เป็นภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยายสูง สังเกตจะพบว่า เกิดการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนไปตามพื้นผิวของซิลิคอนอย่างเห็นได้ชัดและเกิดขึ้นมาอย่างไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายจาก SEM บนฐานรองซิลิคอนบริเวณที่ถูกเคลือบด้วยนิเกิล

- (ก) กำลังขยายต่ำ  
(ข) กำลังขยายสูง



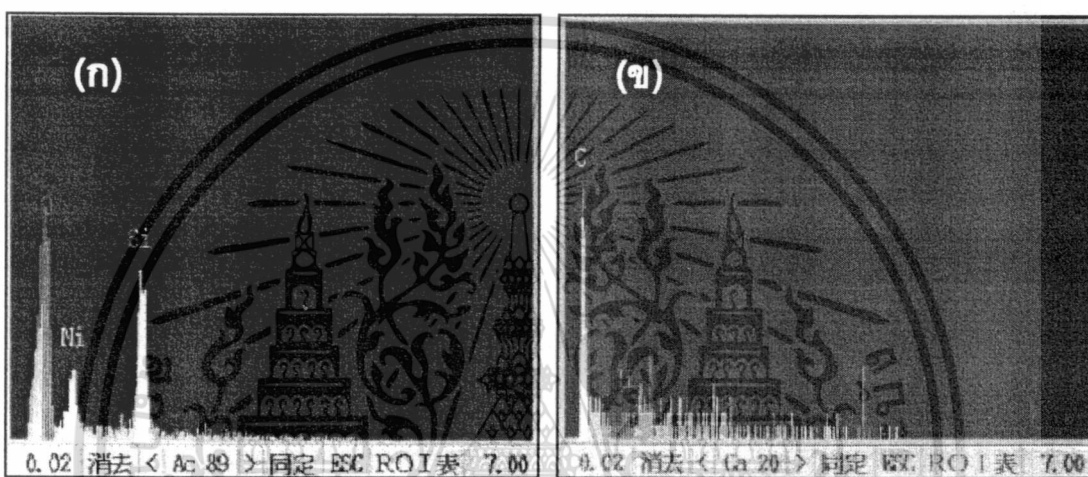
รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายจาก SEM ของคาร์บอนนาโนทิวส์ตรงบริเวณขอบเขตของลวดลายวงกลม

- (ก) ที่กำลังขยายต่ำ  
(ข) ที่กำลังขยายสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX

รูปที่ 3.13(ก) เป็นภาพจาก EDX พบว่าเมื่อนำฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วยนิเกิล ก่อนที่มาทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ จะสังเกตเห็นองค์ประกอบของธาตุที่แสดงเป็นพีคต่างๆคือ พีคของธาตุนิกเกิลและซิลิคอน ซึ่งเป็นชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ และมีพีคของธาตุนิกเกิลเกิดขึ้นไม่สูงนักซึ่งได้จากการสเปกโตรริงที่เวลาน้อย แต่ไม่พบพีคที่เป็นธาตุคาร์บอนแต่อย่างใด ในรูปที่ 3.13(ข) ภายหลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แล้ว พบว่ามีพีคของธาตุคาร์บอนเกิดขึ้นมาอย่างชัดเจน



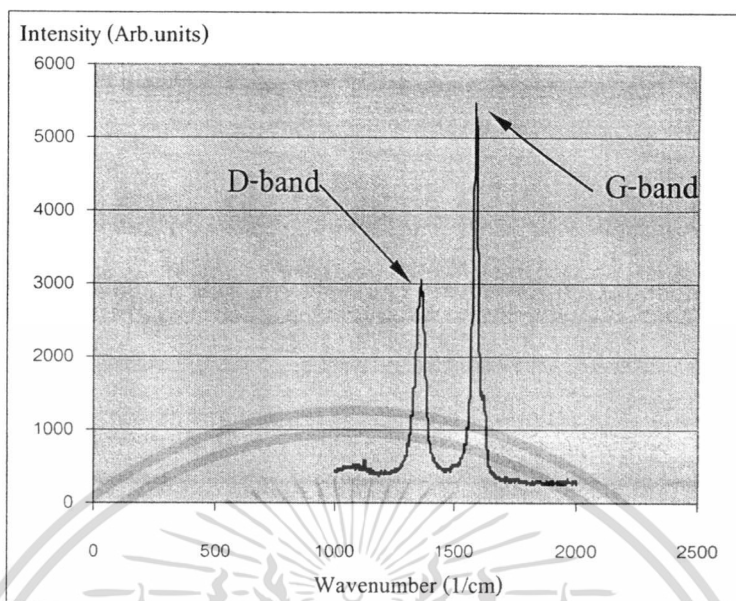
รูปที่ 3.13 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วยนิเกิล

- (ก) ก่อนทำการสังเคราะห์
- (ข) หลังทำการสังเคราะห์

### 3.4.1.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy

รูปที่ 3.14 เป็นกราฟรามานสเปกตรัมที่บ่งบอกถึงชนิดของคาร์บอนว่าเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีพันธะสมบูรณ์ จากค่าสเปกตรัมที่ประมาณ  $1580\text{ cm}^{-1}$  หรือ G-band และ ค่าสเปกตรัมที่ประมาณ  $1355\text{ cm}^{-1}$  หรือ D-band ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายจากการใช้หน้ากากป้องกัน พบว่าอยู่ในย่านของสเปกตรัมที่เป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งยืนยันได้จากกราฟว่าเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ และสามารถคำนวณหาคุณภาพของฟิล์มได้จากอัตราส่วนของ G/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

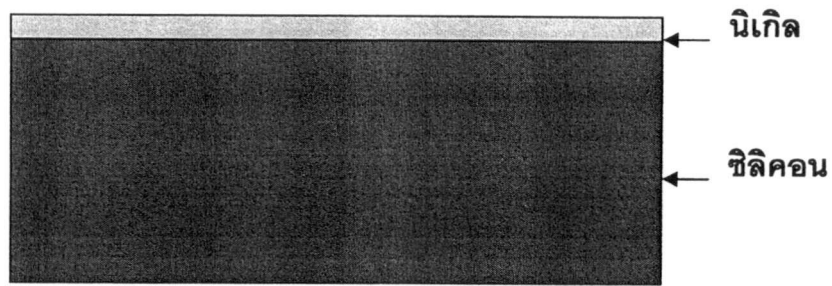


รูปที่ 3.14 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบนฐานรองซิลิคอน

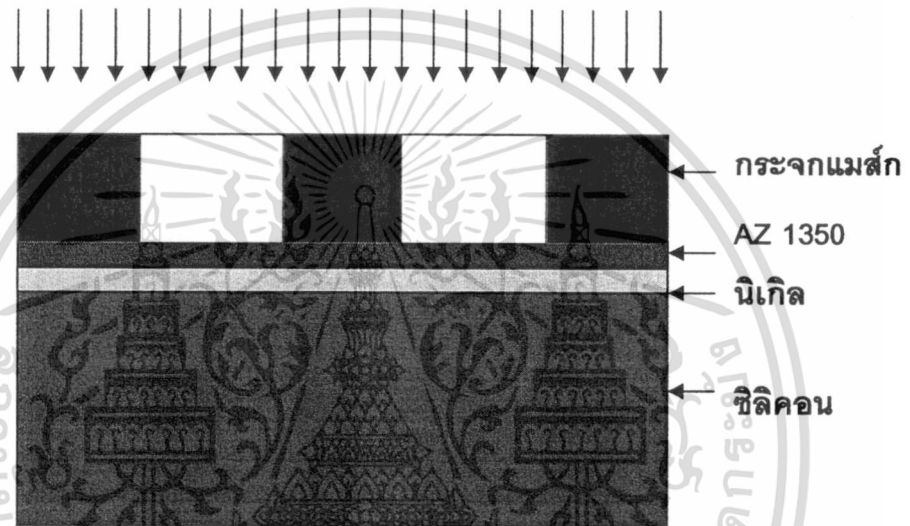
### 3.4.2 การสร้างลวดลายโดยวิธีกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

เทคนิคการสร้างลวดลายด้วยวิธีนี้ แบ่งออกได้เป็นสองส่วน โดยส่วนแรกเป็นการออกแบบลวดลายที่เป็นต้นแบบ ซึ่งใช้โปรแกรม Corel Draw สำหรับออกแบบลวดลายตามต้องการ ดังรูปที่ 3.16(ก) จากนั้นจะนำไปสร้างต้นแบบลงบนแผ่นพลาสติกใส แล้วนำมาแปะบนกระจกสำหรับเป็นต้นแบบ เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เริ่มจากการเตรียมฐานรองด้วยการนำแผ่นซิลิคอนขนาด 1 ตารางนิ้วไปเคลือบนิเกิลด้วยการสปัตเตอร์ริงให้ได้ฟิล์มบางดังรูปที่ 3.15(ก) รูปที่ 3.15(ข) นำกระจกต้นแบบมาวางบนฐานรองที่เคลือบชั้นน้ำยาไวแสงชนิดบวกแล้วนำไปฉายแสง รูปที่ 3.15(ค) ทำการ develop เพื่อเปิดช่องสำหรับทำการกัดชั้นนิเกิล รูปที่ 3.15 (ง) แสดงบริเวณที่นิเกิลโดนกัดออกด้วยวิธีการ wet etching รูปที่ 3.15(จ) ทำการลอกชั้นน้ำยาไวแสงจะได้ลวดลายต่างๆตามที่ได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.16(ข) จากนั้นจึงนำฐานรองที่ได้ ไปทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยมีเงื่อนไขดังตารางที่ 3.6 ภายหลังจากกระบวนการสังเคราะห์แล้วจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.16(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

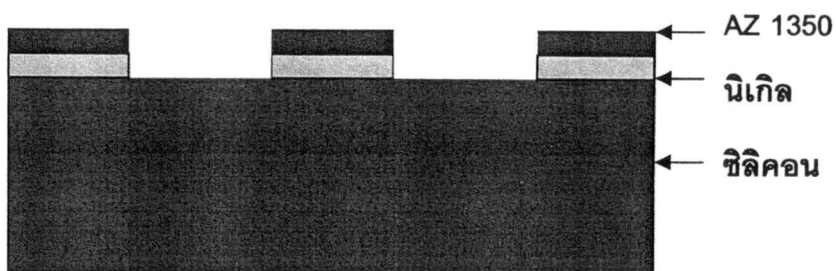
**รูปที่ 3.15** แสดงวิธีการสร้างลวดลายด้วยได้โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

(ก) การเคลือบนิเกิลด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง

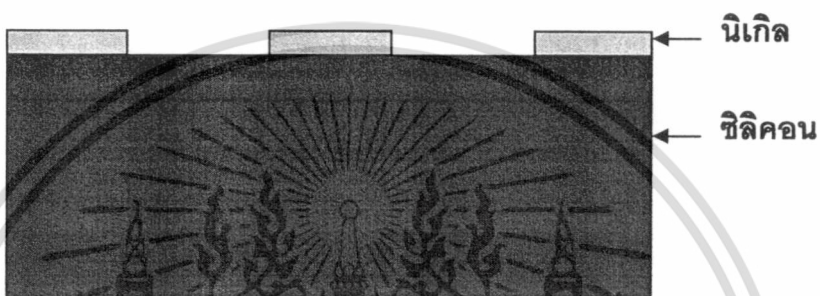
(ข) การฉายแสง

(ค) การ develop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)



(จ)

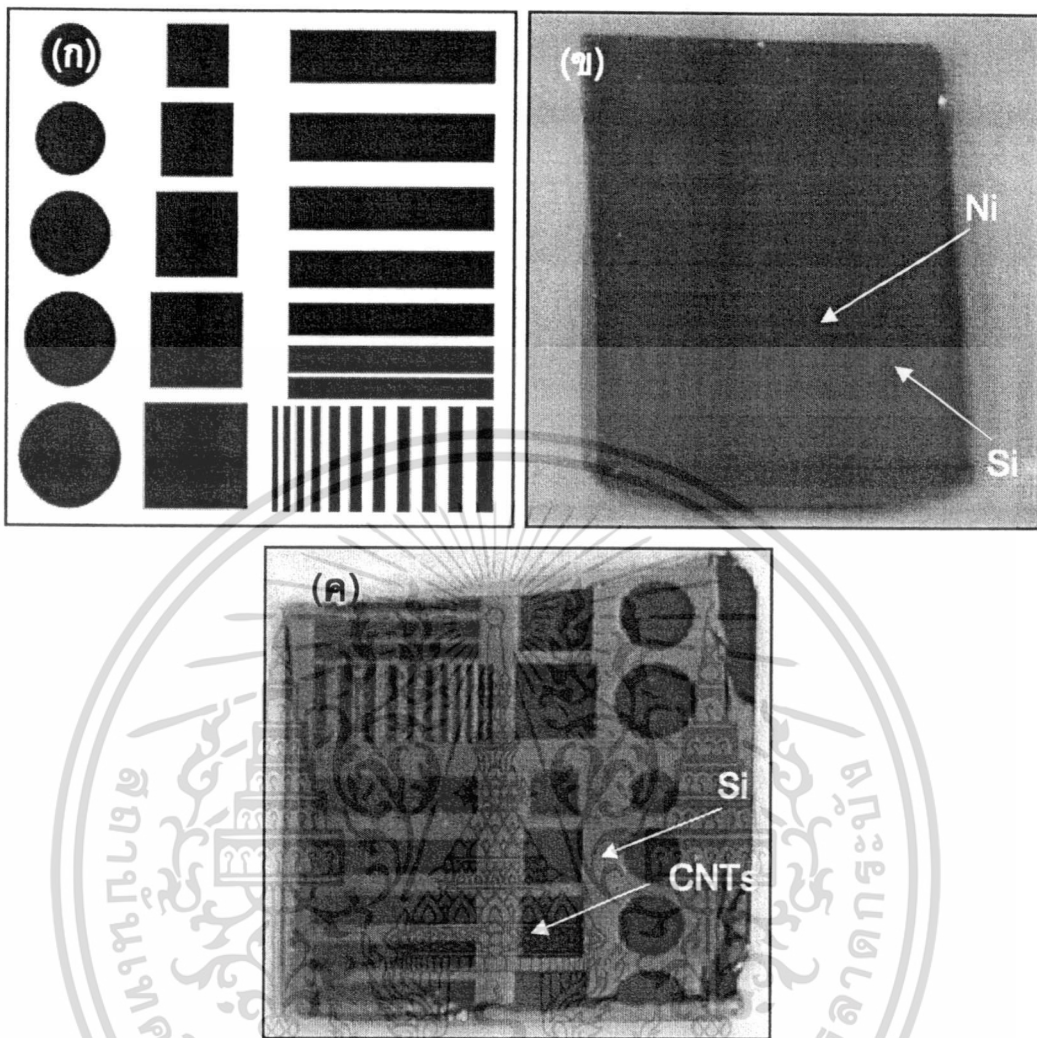
**รูปที่ 3.15(ต่อ)** แสดงวิธีการสร้างลวดลายด้วยได้โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

- (ง) การกัดชั้นนิเกิล  
(จ) การลอกชั้นน้ำยาไวแสง

**ตารางที่ 3.6** เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

อุณหภูมิฐานรอง	600-700 °C
กำลังงาน	120 W
สารแหล่งจ่าย	แอลกอฮอล์
แคตะไลต์	นิเกิล
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



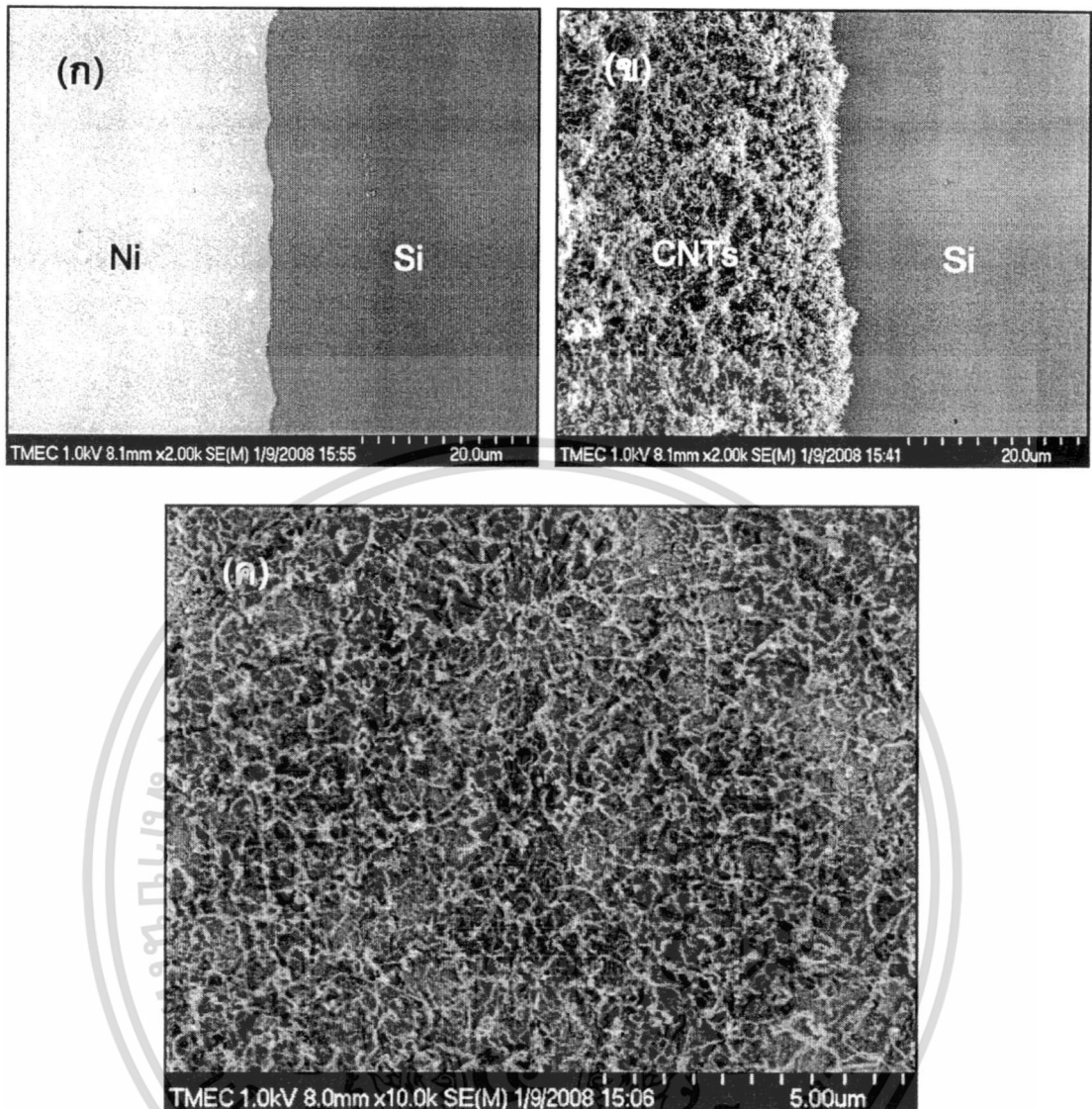
รูปที่ 3.16 แม่เหล็กของลวดลายต่างๆที่ได้ออกแบบไว้สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

- (ก) แม่เหล็กสำหรับกระจัดต้นแบบเป็นลวดลายต่างๆ
- (ข) ภาพถ่ายลวดลายของนิเกิลหลังผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
- (ค) ภาพถ่ายลวดลายภายหลังการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

#### 3.4.2.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM

รูปที่ 3.17 เป็นภาพถ่ายจาก SEM บนฐานรองซิลิคอนที่ออกแบบให้มันเกิดมีลวดลายเป็นรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ รูปที่ 3.17(ก) ภาพถ่ายจาก SEM บริเวณขอบเขต พบว่าลวดลายมีความคมชัด จากนั้นเมื่อมาทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.17(ข) ซึ่งจะสังเกตเห็นคาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดขึ้นอย่างหนาแน่นทั่วทั้งพื้นผิวและแสดงถึงขอบเขตที่คมชัดเช่นกัน รูปที่ 3.17(ค) เป็นภาพถ่ายจาก SEM เฉพาะบริเวณที่เป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ พบว่าเกิดขึ้นอย่างหนาแน่น และมีขนาดท่อที่ค่อนข้างเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



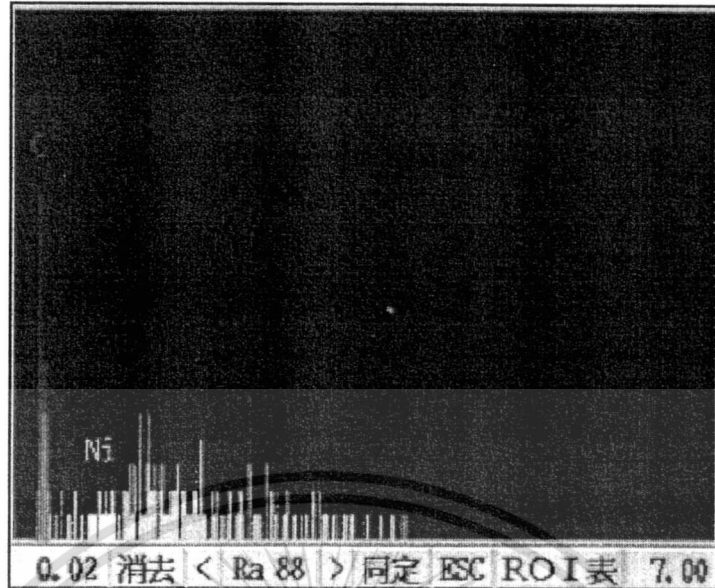
รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายจาก SEM บริเวณขอบเขตของลวดสายนิเกิล

- (ก) ขอบเขตระหว่างนิเกิลกับฐานรองซิลิคอน
- (ข) ขอบเขตระหว่างคาร์บอนนาโนทิวกับฐานรองซิลิคอน
- (ค) บริเวณที่เป็นคาร์บอนนาโนทิว

#### 3.4.2.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวด้วย EDX

เมื่อนำฟิล์มที่ได้มาวิเคราะห์ด้วย EDX พบว่า รูปที่ 3.18 เป็นภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนเป็นฟิสิกเกิดขึ้นสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความหนาแน่นที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวที่สังเคราะห์ได้

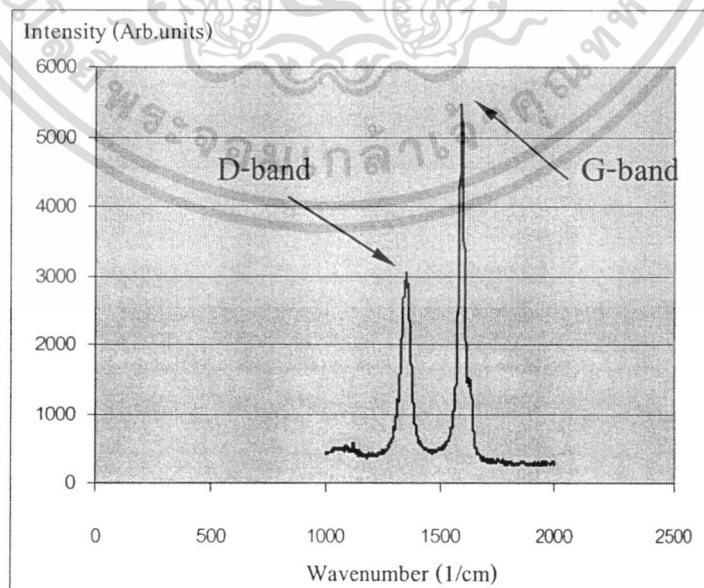
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.18** ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองซิลิคอนที่มีสวลาขนิเกิด  
หลังทำการสังเคราะห์

### 3.4.2.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย Raman Spectroscopy

รูปที่ 3.19 เป็นค่ารามานสเปกตรัมที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอนที่มีสวลาขนิจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี พบว่า กราฟที่ได้อยู่ในช่วงความถี่ที่บ่งบอกว่าเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ และพีคที่แสดงถึงความบริสุทธิ์อย่างชัดเจน



**รูปที่ 3.19** รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 การสร้างลวดลายโดยวิธีการชุบทางไฟฟ้า (Electroplating) [20]

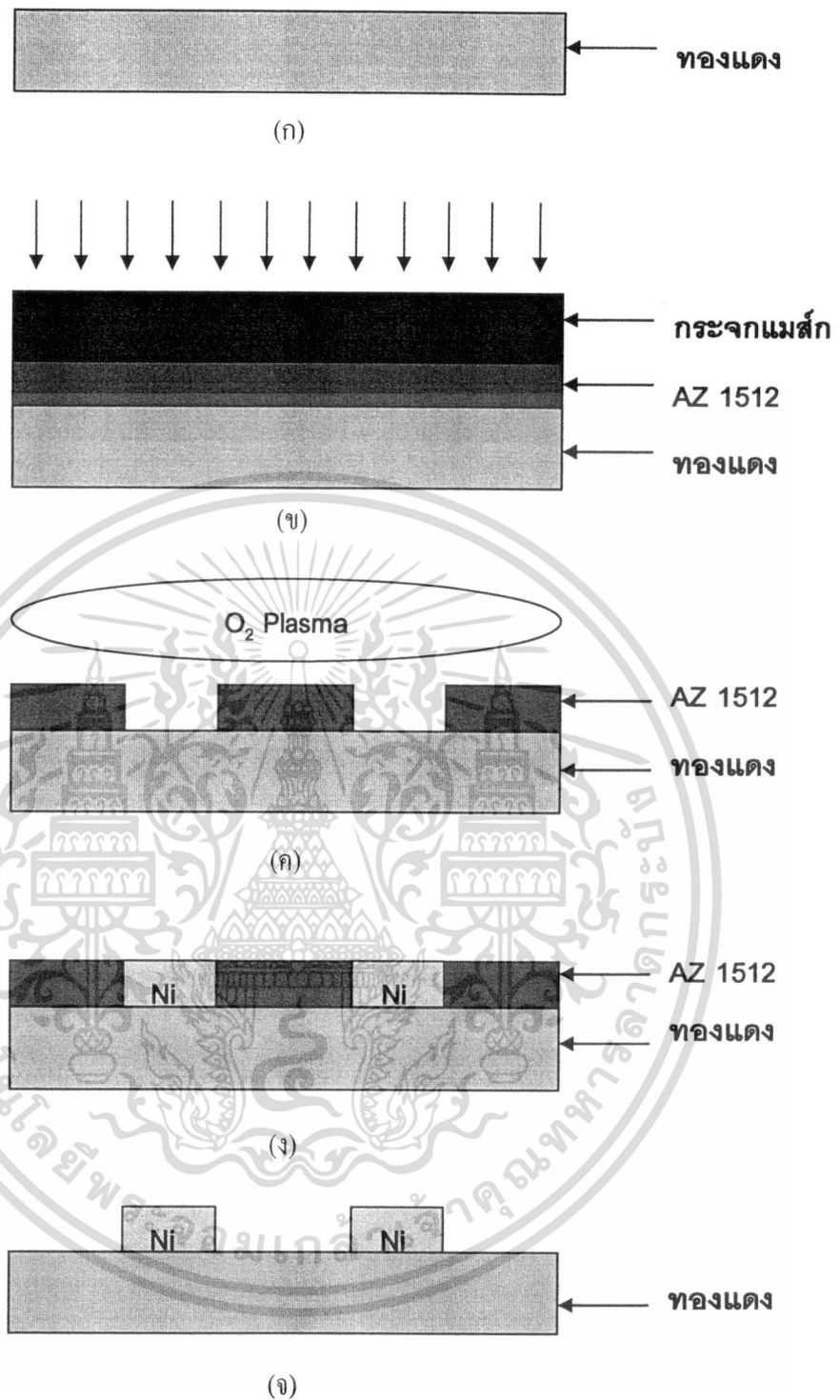
กระบวนการชุบทางไฟฟ้า (Electroplating) เป็นกระบวนการที่สามารถนำไปใช้ในการเตรียมตัวแคตะไลต์ได้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ การทดลองนี้ ได้ทำการสร้างลวดลายของนิเกิลบนฐานรองทองแดง เพื่อต้องการศึกษาว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่สามารถเกิดขึ้นบนฐานรองทองแดงตรงบริเวณที่ปราศจากตัวแคตะไลต์ รูปที่ 3.20 เป็นภาพถ่ายของระบบการชุบทางไฟฟ้าโดยมีโลหะนิเกิลเป็นตัวล่อ ซึ่งต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟขั้วบวก และแผ่นทองแดงเตรียมไว้ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟขั้วลบ ใช้เวลาในการชุบประมาณ 30 นาที ด้วยกระแส 0.2 แอมแปร์

การสร้างลวดลายของนิเกิลบนฐานรองทองแดง เริ่มจากการออกแบบลวดลายที่เป็นลายเส้นตรงลงบนแผ่นใสสำหรับเป็นต้นแบบในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ในส่วนของขั้นตอนการเตรียมฐานรองก่อนนำไปชุบไฟฟ้านั้น เริ่มต้นด้วยการนำแผ่นทองแดง หนาประมาณ 500 ไมครอน มาทำความสะอาดคราบไขมันด้วยแอลกอฮอล์ ดังแสดงในรูป 3.21(ก) จากนั้นนำกระจกต้นแบบมาวางบนฐานรองที่เคลือบชั้นน้ำยาไวแสงชนิดลบแล้วนำไปฉายแสงดังแสดงในรูปที่ 3.21(ข) รูปที่ 3.21(ค) ทำการ develop และทำความสะอาดแผ่นด้วยวิธีพลาสมาหรือกระบวนการ dry etching เพื่อเปิดช่องสำหรับเติมโลหะนิเกิลด้วยวิธีการชุบทางไฟฟ้า รูปที่ 3.21(ง) นำแผ่นไปเติมโลหะนิเกิลด้วยการชุบทางไฟฟ้า รูปที่ 3.21(จ) ทำการลอกชั้นน้ำยาไวแสงออก จะได้ลวดลายต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบดังแสดงในรูปจากนั้นจึงนำฐานรองที่ได้ ไปทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยมีเงื่อนไขดังตารางที่ 3.7 โดยรูปที่ 3.22(ก) เป็นภาพหลังจากที่ผ่านการชุบทางไฟฟ้า ต่อมาเมื่อนำไปผ่านกระบวนการสังเคราะห์แล้วจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.22(ข)



รูปที่ 3.20 ภาพแสดงการชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิลบนฐานรองทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



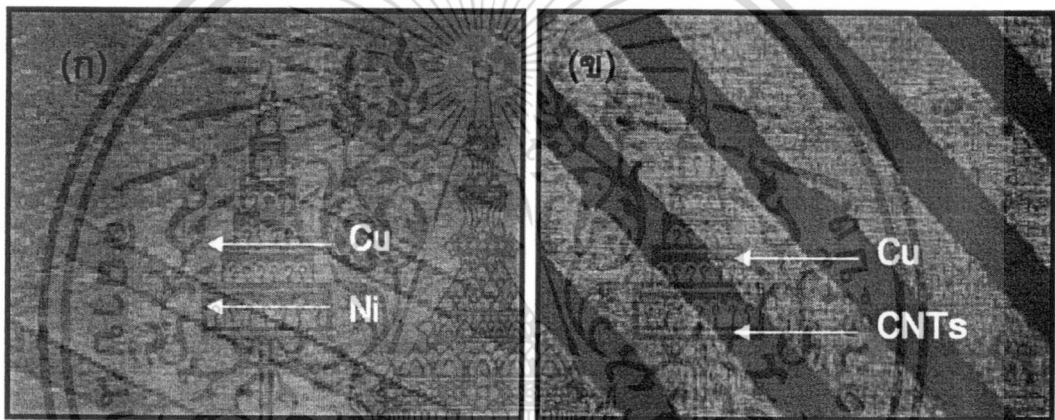
**รูปที่ 3.21** แสดงวิธีการสร้างลวดลายด้วยได้โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

- (ก) การทำความสะอาดแผ่นทองแดงด้วยแอลกอฮอล์
- (ข) การฉายแสง
- (ค) การ develop และ พลาสมา
- (ง) การเติมนิเกิลด้วยวิธีชุบทางไฟฟ้า
- (จ) การลอกชั้นน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.7** เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองทองแดงที่มีลวดลายจากการชุบทางไฟฟ้า

อุณหภูมิฐานรอง	600-700 °C
กำลังงาน	106 W
สารแหล่งจ่าย	แอลกอฮอล์
แคตะไลต์	นิกเกิล
เวลา	25-30 นาที



**รูปที่ 3.22** เป็นภาพถ่ายของลวดลายนิกเกิลที่เป็นเส้นตรงบนฐานรองทองแดง

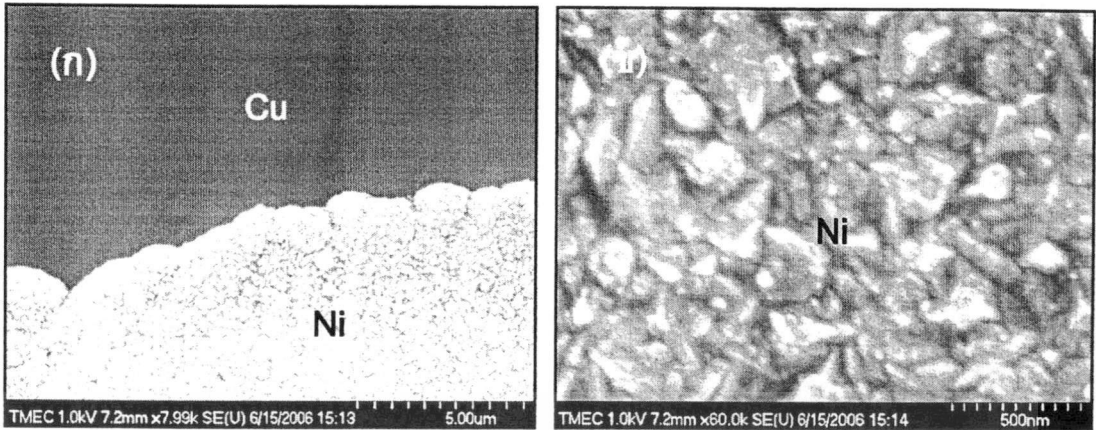
(ก) ภาพถ่ายลวดลายของนิกเกิลหลังผ่านกระบวนการชุบทางไฟฟ้า

(ข) ภาพถ่ายลวดลายภายหลังการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์

#### 3.4.3.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ด้วย SEM

รูปที่ 3.23(ก) เป็นภาพถ่ายจาก SEM ที่แสดงถึงขอบเขตของลวดลายนิกเกิลที่ได้จากการชุบทางไฟฟ้าบนฐานรองทองแดง พบว่าลวดลายมีความคมชัด รูปที่ 3.23(ข) เป็นภาพจาก SEM ตรงบริเวณที่เป็นนิกเกิล ซึ่งพบว่าเป็นผลึกเกาะติดกันอย่างหนาแน่น รูปที่ 3.24(ก) เป็นภาพจาก SEM ที่กำลังขยายต่ำและรูปที่ 3.24(ข) ภาพจาก SEM ที่กำลังขยายสูง บอกถึงขอบเขตระหว่างคาร์บอนนาโนทิว์กับทองแดง ซึ่งพบว่าคาร์บอนนาโนทิว์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้บนฐานรองทองแดง และรูปที่ 3.24(ค) เป็นภาพจาก SEM พบว่าคาร์บอนนาโนทิว์เกิดขึ้นอย่างหนาแน่นและเห็นขนาดท่อที่ชัดเจน ประมาณ 10-50 nm

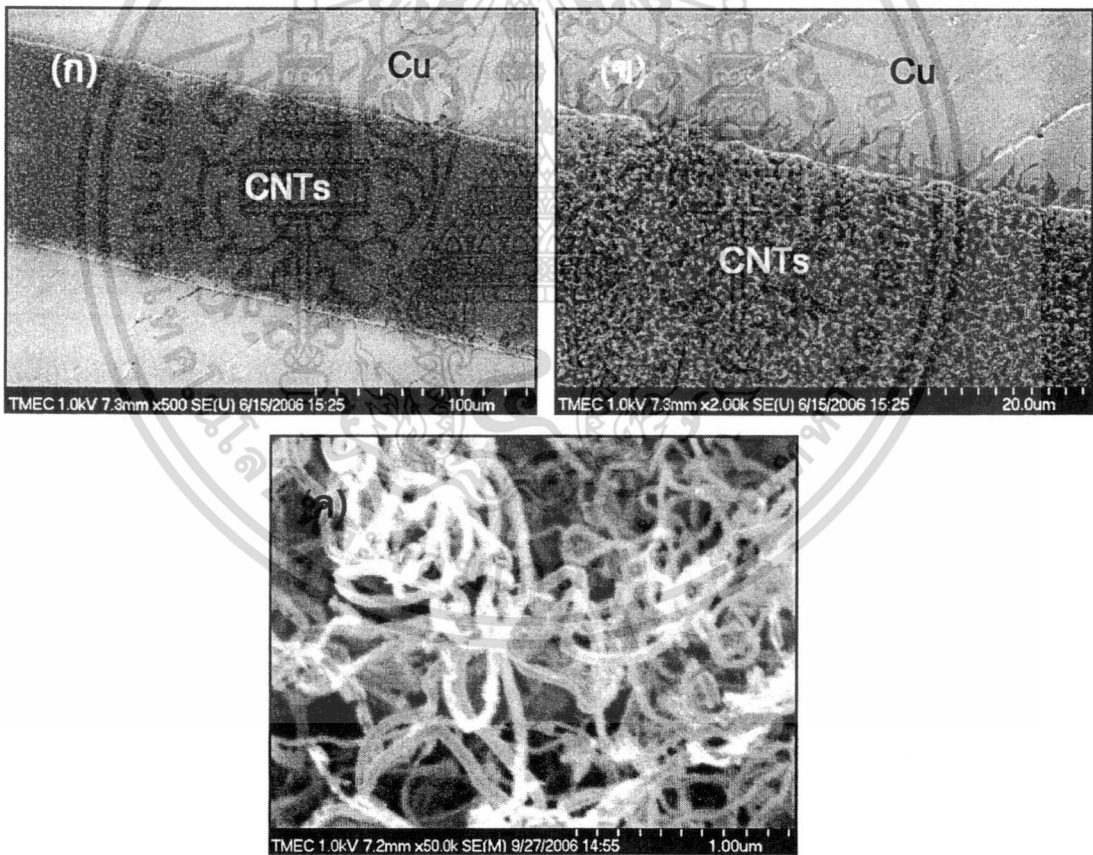
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 เป็นภาพถ่ายจาก SEM ของนิเกิลที่ได้จากการชุบด้วยไฟฟ้า

(ก) ขอบเขตระหว่างฐานรỗngทองแดงกับนิเกิล

(ข) พื้นผิวของนิเกิลที่ได้จากการชุบทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.24 เป็นภาพถ่ายจาก SEM หลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

(ก) กำลังขยายต่ำบริเวณขอบเขต

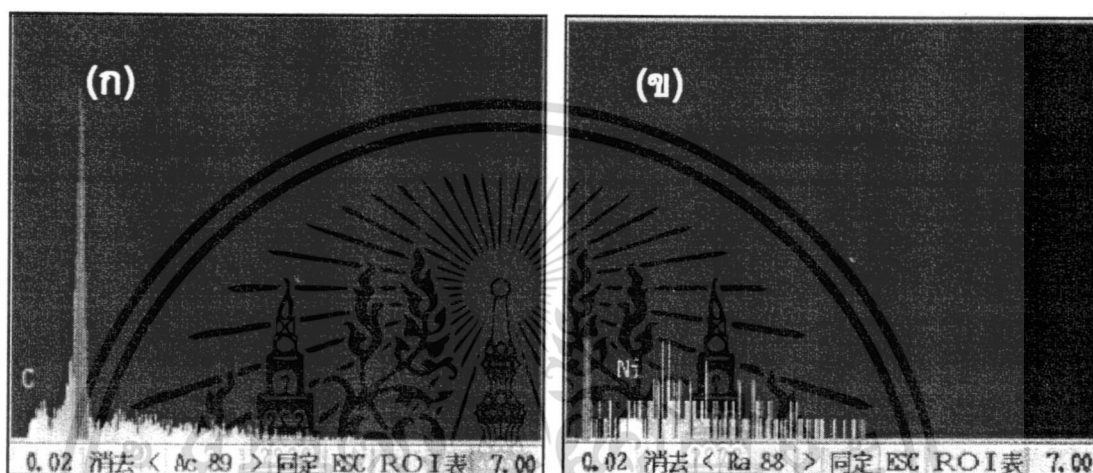
(ข) กำลังขยายสูงบริเวณขอบเขต

(ค) คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้บนบนลวดลายของฐานรỗngทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX

รูปที่ 3.25(ก) เป็นภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุตรงบริเวณทองแดง พบว่าไม่มีฟีดของคาร์บอนเกิดขึ้นเลย เป็นการยืนยันอย่างแน่นหนาว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่สามารถเกิดได้บนฐานรองทองแดง รูปที่ 3.25(ข) แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนบนฐานรองทองแดงที่มีลวดลายนิเกิลซึ่งได้จากการชุบทางไฟฟ้า หลังทำการสังเคราะห์พบว่าไม่มีฟีดของธาตุคาร์บอนเกิดขึ้นสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความหนาแน่นที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 3.25 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนบนฐานรองทองแดงที่มีลวดลายเส้นตรงหลังทำการสังเคราะห์

- (ก) บริเวณที่เป็นฐานรองทองแดง
- (ข) บริเวณที่เป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์

### 3.4.3.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy

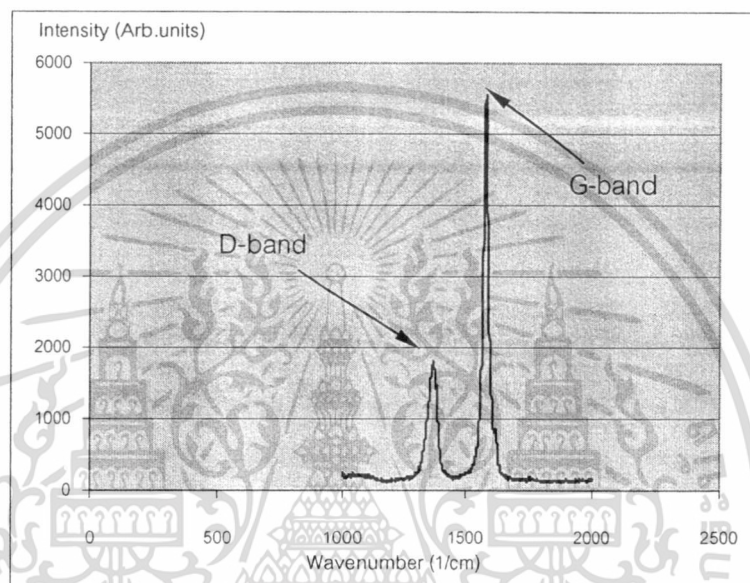
รูปที่ 3.26 เป็นค่ารามานสเปกตรัมที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองทองแดงที่มีลวดลายจากการชุบทางไฟฟ้า พบว่า กราฟที่ได้อยู่ในช่วงความถี่ที่บ่งบอกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดย G-band คือพันธะที่สมบูรณ์ของกราฟไฟต์และ D-band คือพันธะที่ไม่สมบูรณ์

## 3.5 กระบวนการสร้างเป็นโครงสร้างความต้านทาน

จากเทคนิคการเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการสร้างลวดลายนั้น ทำให้ได้แนวคิด

ที่จะนำเทคนิคต่างๆมาประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างเป็นตัวต้านทานได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเริ่มจากการออกแบบโครงสร้างที่เป็นลวดลายด้วยโปรแกรม Corel DRAW มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังแสดงได้ในรูปที่ 3.27 เป็นแม่สักรูปที่หนึ่ง ซึ่งเป็นลวดลายของแคตะไลต์นิกเกิลและรูปที่ 3.28 เป็นแม่สักรูปที่สอง สำหรับลวดลายของทองแดงเพื่อสร้างให้เป็นขั้วไฟฟ้า จากนั้นจึงนำไปอิงฟิล์มบนแผ่นใสเพื่อเป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยลวดลายดังกล่าวถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการของเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ หลังจากนั้น จึงนำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HFCVD โดยมีเงื่อนไขการสังเคราะห์ดังตารางที่ 3.8

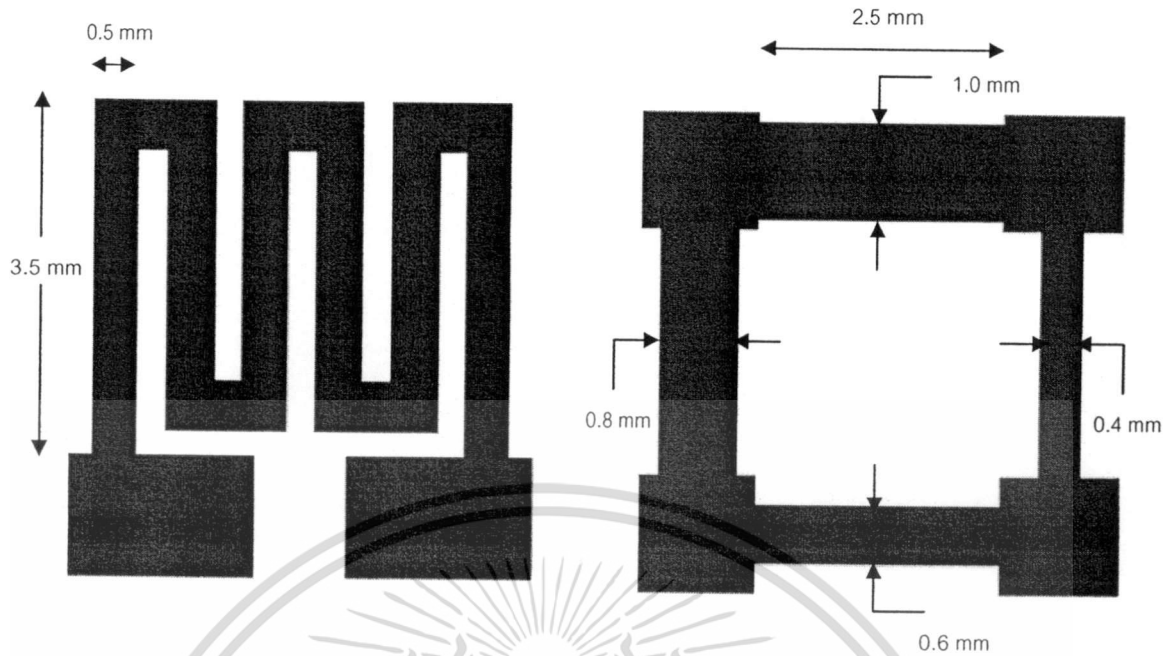


รูปที่ 3.26 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองทองแดง

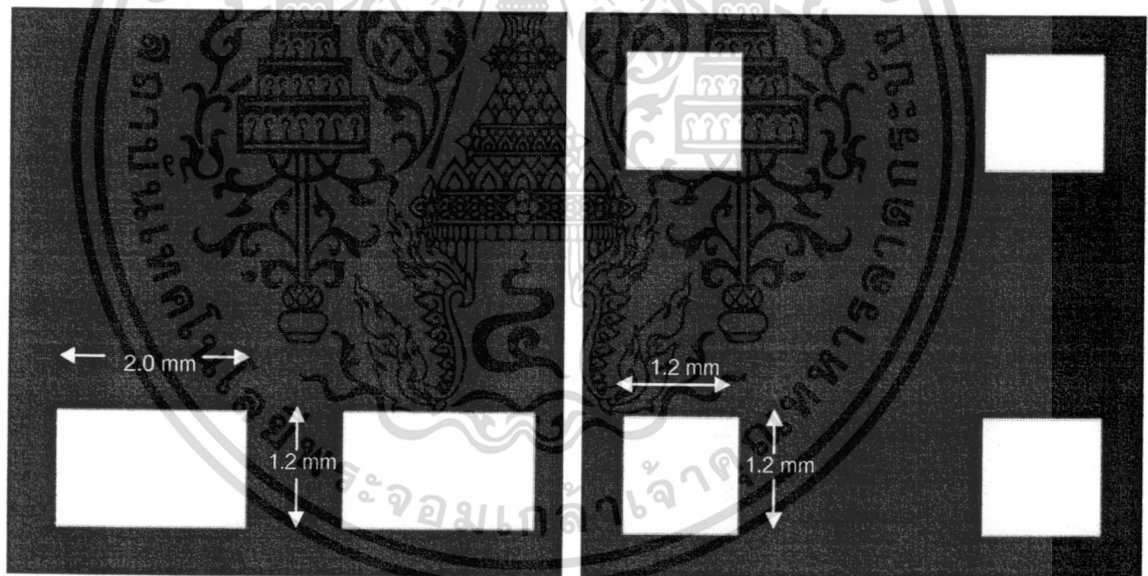
ตารางที่ 3.8 เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายเป็นโครงสร้างความต้านทาน

อุณหภูมิฐานรอง	600-700 °C
กำลังงาน	120 W
สารแหล่งจ่าย	แอลกอฮอล์
แคตะไลต์	นิกเกิล
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 แมสก์ที่หนึ่ง สำหรับสร้างลวดลายของแคตะไลต์นี้เกิด



รูปที่ 3.28 แมสก์ที่สอง สำหรับสร้างลวดลายของขั้วไฟฟ้าทองแดง

### 3.5.1 การเตรียมผิวหน้าให้สะอาด

นำแผ่นฐานรองซิลิกอนมาทำความสะอาดดังนี้

- ต้มในกรด  $\text{HNO}_3$  10 นาที
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่ 1 และ 2 แก้วละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI และเป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต้มใน Trichoro acetic acid 5 นาที
- อัลตราโซนิคด้วยอะซิโตน 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI และเป่าแห้งด้วย  $N_2$

### 3.5.2 กระบวนการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

นำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วไปทำการสร้างชั้น  $SiO_2$  โดยวิธี dry oxidation ที่อุณหภูมิ  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นใช้วิธี wet oxidation ที่อุณหภูมิ  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 1.5 ชั่วโมงและใช้ dry oxidation เป็นครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลา 0.5 ชั่วโมง ได้ออกไซด์เคลือบอยู่บนแผ่นซิลิกอน ได้ความหนาซิลิกอนไดออกไซด์ ประมาณ  $5000\text{ \AA}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.29(ก) และ รูปที่ 3.29(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.29 การเตรียมแผ่นสำหรับสร้างชั้นฉนวน

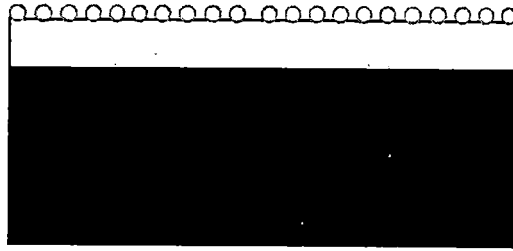
(ก) ทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

(ข) สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอน

### 3.5.3 กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับเคลือบโลหะแคตะไลต์นิเกิล

เงื่อนไขการสปัตเตอร์ริงนิกเกิลขั้นตอนนี้ เป็นเทคนิคที่สำคัญสำหรับนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตัวต้านทาน ซึ่งจะใช้เวลาในการสปัตเตอร์ด้วยเวลา 90 วินาที เพื่อต้องการให้โลหะนิกเกิลกระจายตัวเป็นกลุ่มก้อน ไม่ให้เกิดเป็นฟิล์มโลหะ ดังในรูปที่ 3.30

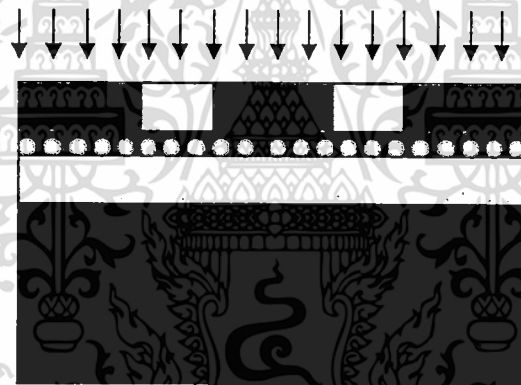
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



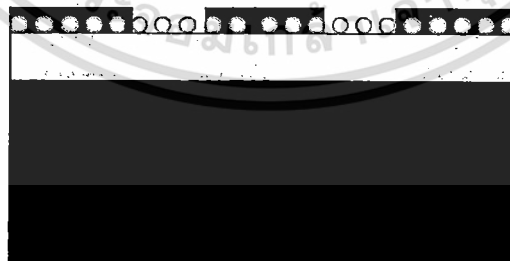
รูปที่ 3.30 นิเกิลถูกเคลือบบนฟิล์มคอนไดออกไซด์

3.5.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแมสก์ 1 สำหรับสร้างลวดลายนิเกิล

รูปที่ 3.31(ก) นำชิ้นงานไปเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ 1350) และอบให้แห้ง จากนั้นจึงนำไปฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบสำหรับสร้างลวดลายนิเกิล รูปที่ 3.31(ข) ทำการ develop เพื่อเปิดช่องสำหรับสกัดชั้นนิเกิล



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.31 กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีแมสก์ที่หนึ่ง

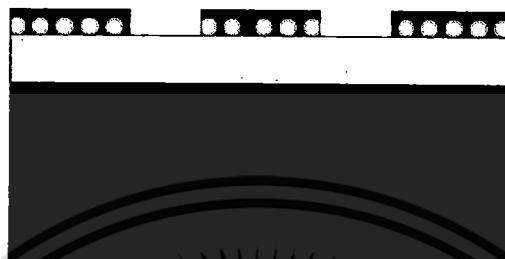
(ก) การฉายแสงสำหรับสร้างลวดลายนิเกิล

(ข) การ develop เพื่อเปิดช่องสำหรับสกัดชั้นนิเกิล

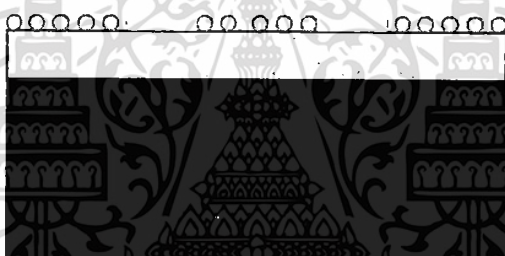
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.5 กระบวนการสกัดชั้นนิเกิลด้วยวิธีการ wet etching

นำสารละลายนิเกิลต้มให้พออุ่น จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาจุ่มในสารละลายนิเกิลเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้ง และนำไปลอกน้ำยาไวแสงด้วยอะซิโตน จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.32(ก) และ 3.32(ข)



(ก)



(ข)

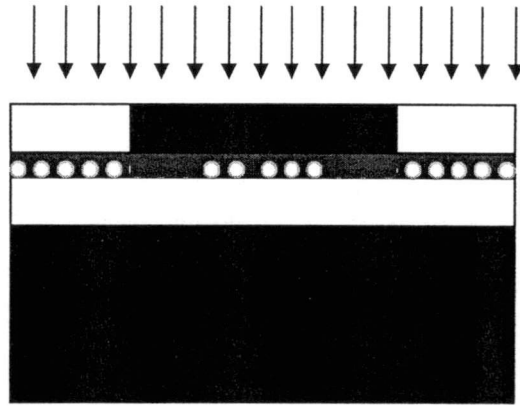
รูปที่ 3.32 กระบวนการสกัดชั้นนิเกิลด้วย wet etching

(ก) ชั้นนิเกิลที่ถูกสกัดออก

(ข) ทำการลอกน้ำยาไวแสง

### 3.5.6 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแมสก์ 2 สำหรับเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า

รูปที่ 3.33(ก) นำชิ้นงานไปเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกและอบให้แห้ง ต่อมานำชิ้นงานไปฉายแสงผ่านกระจกแมสก์ที่สอง สำหรับสร้างขั้วทองแดง จากนั้นจึงนำมาทำการ develop ดังแสดงในรูปที่ 3.33(ข)



(ก)



(ข)

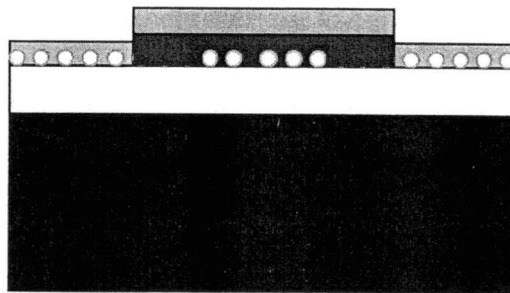
### รูปที่ 3.33 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแมสก์ที่สอง

(ก) การฉายแสงสำหรับสร้างขั้วทองแดง

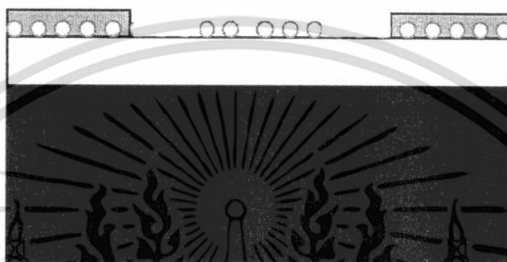
(ข) การ develop สำหรับสร้างขั้วทองแดงด้วยการสปีดเตอร์ริง

### 3.5.7 กระบวนการสปีดเตอร์ริงสำหรับสร้างขั้วโลหะทองแดง

การสปีดเตอร์ทองแดงสำหรับการสร้างขั้วไฟฟ้า จะใช้เวลาในการสปีดเตอร์เป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อต้องการให้เกิดเป็นฟิล์มทองแดง จากนั้น จึงนำไปลอกน้ำยาไวแสงด้วยอะซีโตน โดยเป็นกระบวนการ Lift-off เพื่อให้ส่วนที่อยู่บนน้ำยาไวแสงหลุดออกไปพร้อมกับทองแดงที่อยู่ด้านบนดังแสดงในรูปที่ 3.34(ก) และ รูปที่ 3.34(ข) ส่วนรูปที่ 3.35 เป็นภาพก่อนทำการสังเคราะห์ ต่อมาเมื่อนำไปผ่านกระบวนการสังเคราะห์แล้วจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.36



(ก)

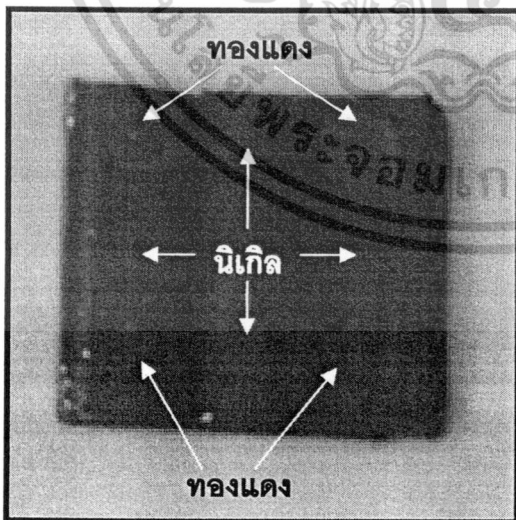


(ข)

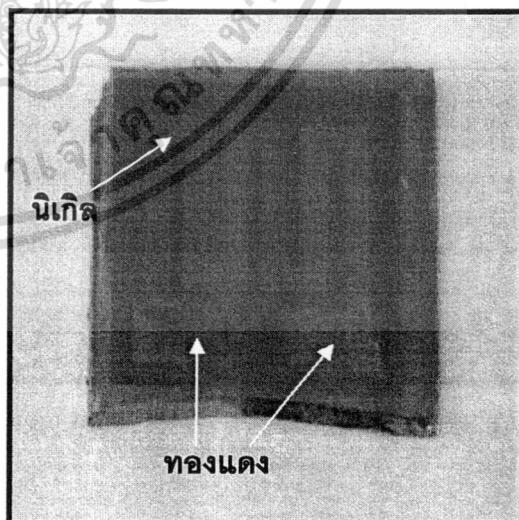
รูปที่ 3.34 กระบวนการสปีดเตอร์ริงสำหรับสร้างขั้วโลหะทองแดง

(ก) ทองแดงถูกเคลือบลงบนฐานรอง

(ข) ลอกน้ำยาไวแสงด้วยวิธี Liff-off

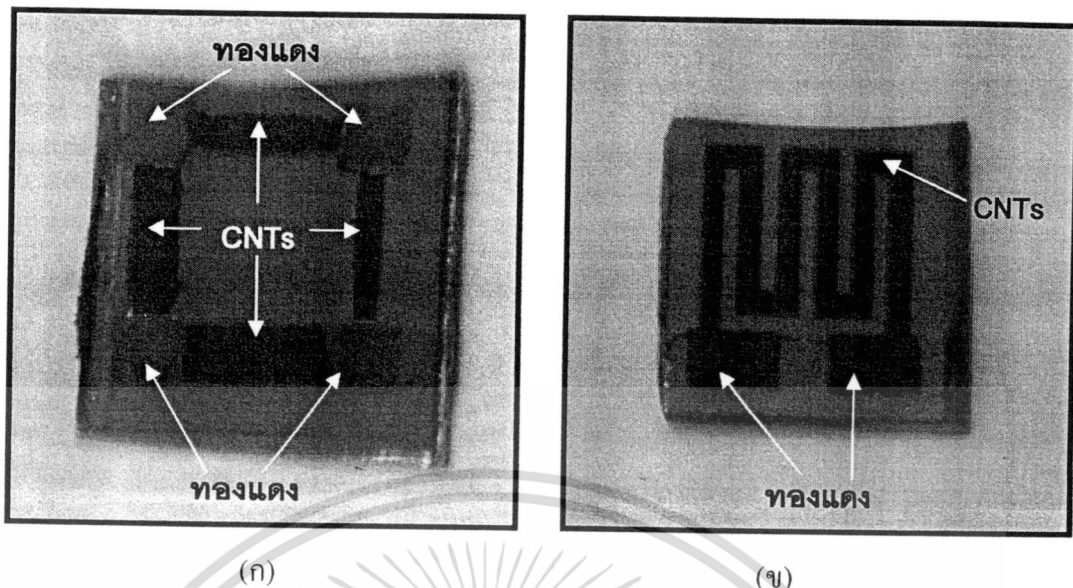


(ก)



(ข)

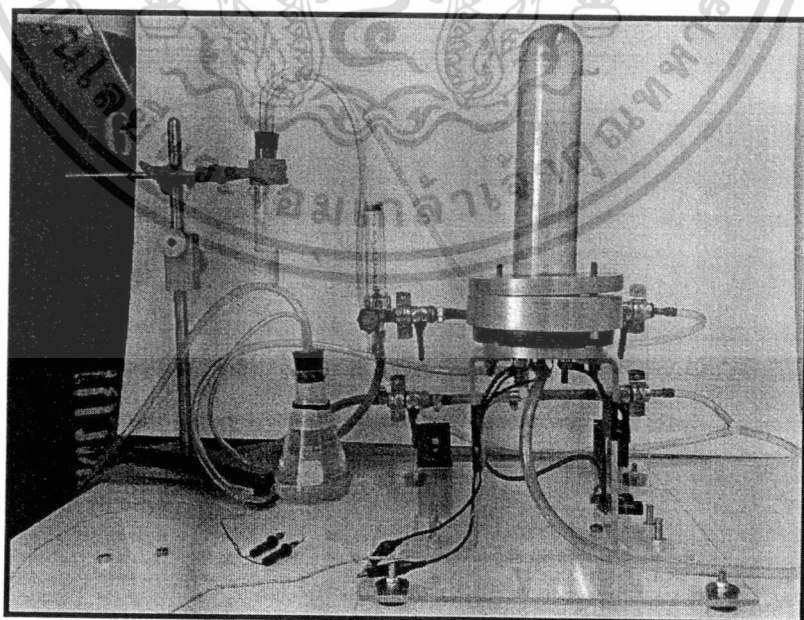
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ **รูปที่ 3.35** ภาพถ่ายจริงของชิ้นงานก่อนทำการสังเคราะห์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.36 ภาพถ่ายจริงของชิ้นงานหลังจากสังเคราะห์แล้ว

### 3.6 การนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ

การทดลองนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.36(ข) มาทำการทดสอบการตรวจจับไอระเหยของแอลกอฮอล์ เนื่องจากมีพื้นที่สำหรับตรวจจับก๊าซมากกว่า โดยระบบในการวัดคุณสมบัติการตรวจจับก๊าซนั้น จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 ภาพถ่ายระบบสำหรับตรวจวัดก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

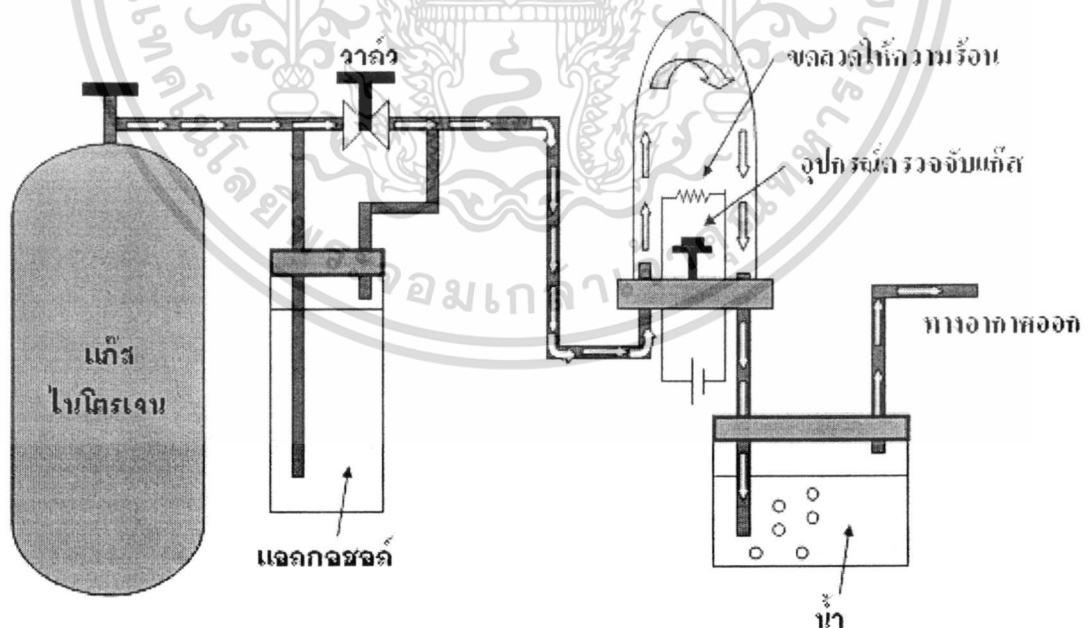
ขั้นตอนการนำมาตรวัดก๊าซแสดงได้ดังรูปที่ 3.38 และ 3.39 โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้คือ

**กรณีที่ 1** ไม่ให้ความร้อนภายในระบบวัด

1. วัดค่าความต้านทานเริ่มต้นก่อนการทดลอง ได้ 1.122 กิโลโอห์ม
2. เริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเป็นเวลา 20 นาที ได้ค่าความต้านทาน 1.126 กิโลโอห์ม
3. เริ่มจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์โดยมีไนโตรเจนเป็นตัวนำพา ทำการบันทึกค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไป จนได้ค่าคงที่
4. หยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์โดยที่ยังจ่ายไนโตรเจนอยู่ ทำการบันทึกค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปจนได้ค่าคงที่

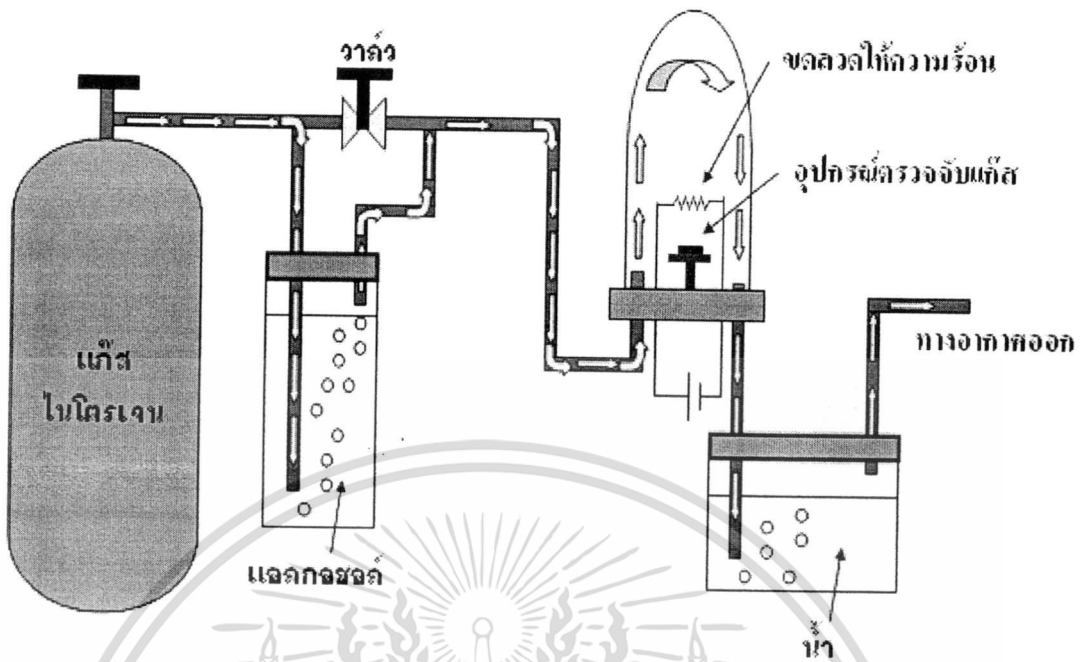
**กรณีที่ 2** ให้ความร้อนภายในระบบวัด (อุณหภูมิที่ฐานรองประมาณ 70 – 80 °C)

1. เริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเป็นเวลา 20 นาที ได้ค่าความต้านทาน 0.95 กิโลโอห์ม
2. เริ่มจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์โดยมีไนโตรเจนเป็นตัวนำพา ทำการบันทึกค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไป จนได้ค่าคงที่
3. หยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์โดยที่ยังจ่ายไนโตรเจนอยู่ ทำการบันทึกค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปจนได้ค่าคงที่

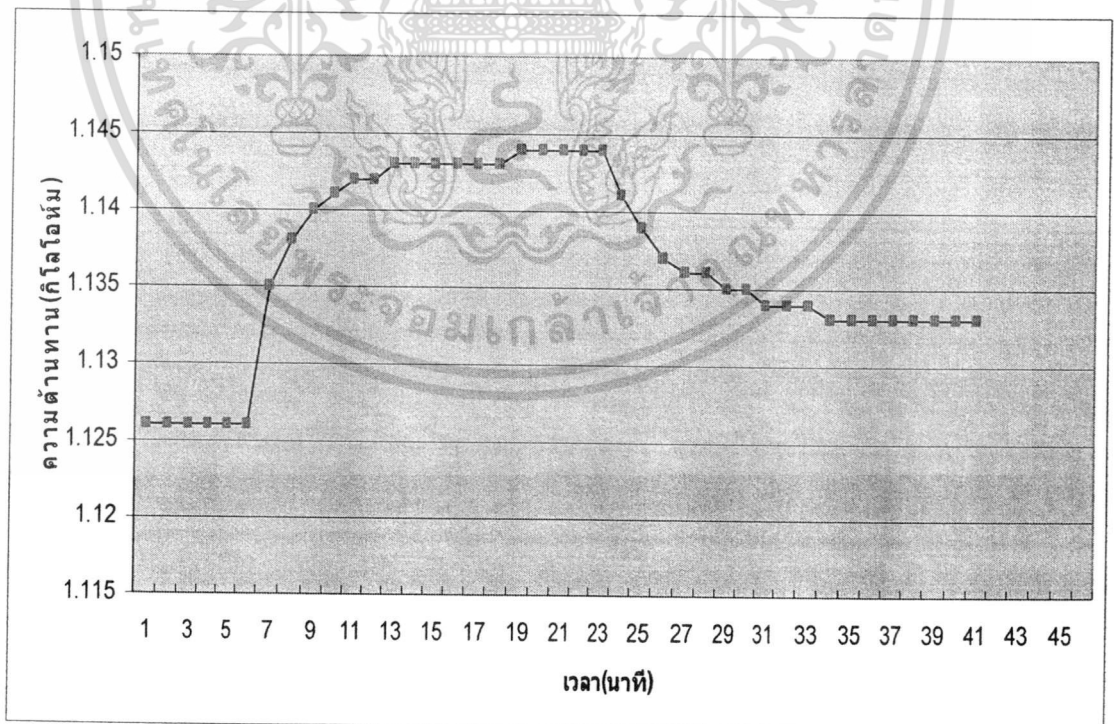


**รูปที่ 3.38** ภาพแสดงการได้อากาศภายในระบบออก

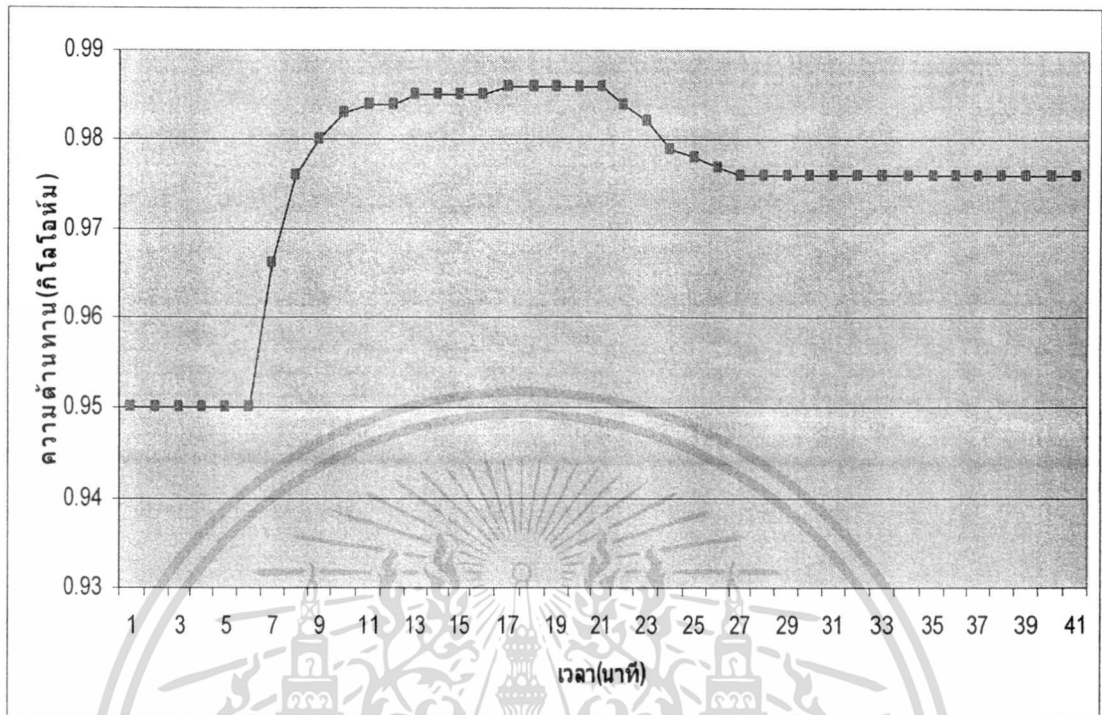
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.39 ภาพแสดงการพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าสู่ระบบ



รูปที่ 3.40 กราฟแสดงคุณสมบัติการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ในระบบที่ไม่ให้ความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาเบเซ็ประเยชนทานการค้ำ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.41** กราฟแสดงคุณสมบัติการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ในระบบที่ให้ความร้อน

จากรูปที่ 3.40 พบว่าในขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบที่ยังไม่ให้ความร้อน วัดค่าความต้านทานคงที่ประมาณ 1.126 กิโลโกรัม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่าค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เริ่มอ้อมตัว ได้ค่าประมาณ 1.144 กิโลโกรัม ใช้เวลาประมาณ 17 นาที ซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 1.598 % ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงลดลง จนมาคงที่ที่ค่าๆหนึ่งประมาณ 1.133 กิโลโกรัม

จากรูปที่ 3.41 เมื่อทดสอบการจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบที่ให้ความร้อน วัดค่าความต้านทานคงที่ประมาณ 0.95 กิโลโกรัม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา ได้ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปเพิ่มขึ้นเป็น 0.986 % ใช้เวลาประมาณ 16 นาที ได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 3.789 % เมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ ได้ค่าความต้านทานลดลงจนคงที่ที่ 0.976 กิโลโกรัม ซึ่งในความเป็นจริงของทั้งสองกรณีนี้ ค่าความต้านทานควรลดลงมาที่ค่าแรกเริ่มคือ 1.126 กิโลโกรัม อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปนานมากพอสมควร จึงพบว่า ค่าความต้านทานจะกลับไปสู่ค่าเท่าเดิม ดังนั้นน่าจะสรุปได้ว่า สาเหตุน่าจะมาจากกรณีที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจจะยังมีโมเลกุลของไอระเหยแอลกอฮอล์บางส่วน เกาะอยู่ในวัสดุที่เป็นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์  
ยังระเหยออกไปไม่หมดก็เป็นได้

โดยสรุป การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน สามารถทำ  
ได้ง่าย และเมื่อได้ศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ที่ต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อสังเคราะห์โดยใช้แคตอะไลต์ชนิดเกิดและ  
สารแหล่งจ่ายเป็นแอลกอฮอล์ จะได้คุณภาพฟิล์มที่ดี ต่อมาเมื่อได้ศึกษาการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอน  
นาโนทิวบ์ด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อที่จะนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้น มีความจำเป็น  
อย่างยิ่งที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์มาเกี่ยวข้องช่วยในการที่จะสร้างเป็นอุปกรณ์  
ตรวจจับก๊าซ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอถึงวิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน (HF-CVD) กระทำที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้แหล่งกำเนิดคาร์บอนเป็นเอทานอลที่มีก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวนำพา ใช้ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิลเป็นตัวช่วยในการเกิด ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถทำได้ง่าย ราคาประหยัดกว่าวิธีอื่นๆ และไม่ใช้ก๊าซพิษที่เป็นอันตราย ส่วนข้อเสียคือ สามารถสังเคราะห์ได้บนพื้นที่เล็กและสร้างได้ครั้งละหนึ่งชิ้นงาน โดยท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้เป็นแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) อีกทั้งไม่สามารถควบคุมขนาดของท่อได้

ในส่วนของการกระบวนการสังเคราะห์ ได้ทำการศึกษาถึงผลการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองต่างชนิดกัน ซึ่งแบ่งได้ 2 ชนิด ได้แก่ ฐานรองซิลิคอน และฐานรองทองแดง เจือไนในการสังเคราะห์คือ อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วง 550 – 750 องศาเซลเซียส ใช้กำลังงาน 105 – 140 วัตต์ เวลาในการสังเคราะห์ 25 – 40 นาที อัตราส่วนของไฮโดรเจนรวมต่อไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่ายประมาณ 8 – 12 % โดยปริมาตร ผลการทดลองปรากฏว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้บนฐานรองทั้งหมด จากนั้นได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนตัวแปรบางชนิด เช่น ใช้สารแหล่งจ่ายจากเอทานอลเปลี่ยนเป็นอะซิโตน ใช้ตัวแคตะไลต์จากนิเกิลเปลี่ยนเป็นผงเหล็ก และเลือกวัสดุฐานรองที่นำมาทำการศึกษาคือ ซิลิคอนและทองแดง ผลการทดลองเมื่อวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยายเท่ากัน (10000 เท่า) ปรากฏว่า ธรรมชาติของฐานรองซิลิคอนนั้น พบว่าได้ขนาดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใหญ่ที่สุดประมาณ 200 – 300 นาโนเมตร เมื่อใช้สารแหล่งจ่ายเป็นอะซิโตนและแคตะไลต์เป็นนิเกิล ในกรณีของฐานรองทองแดง พบว่าได้ขนาดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใหญ่ที่สุดประมาณ 100 – 400 นาโนเมตร เมื่อใช้สารแหล่งจ่ายเป็นอะซิโตนและแคตะไลต์เป็นผงเหล็ก เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy เพื่อศึกษาถึงคุณภาพของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยความบริสุทธิ์คำนวณได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง G/D โดยพีค G-Band ซึ่งเป็นพีคที่แสดงถึงความสมบูรณ์ของพันธะคาร์บอน และ D-Band เป็นพีคที่แสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของพันธะคาร์บอน ปรากฏว่า ธรรมชาติของฐานรองซิลิคอน ซึ่งสังเคราะห์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ พบว่าจะคำนวณได้ความบริสุทธิ์ที่ดีที่สุด ซึ่งมีดัชนีประมาณ 1.802 เมื่อใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอลและแคตะไลต์เป็นนิเกิล ในกรณีของฐานรองทองแดง ซึ่งสังเคราะห์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ พบว่าจะคำนวณได้ความบริสุทธิ์ที่ดีที่สุด มีดัชนีประมาณ 3.027 เมื่อใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอลและแคตะไลต์เป็นนิเกิล จะพบว่ามีแนวโน้มเหมือนกับกรณีเดียวกันกับซิลิคอน แสดงว่าเอทานอลเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารแหล่งจ่ายในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต้องการคุณภาพสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการสร้างลวดลายนั้น มีจุดประสงค์เพื่อต้องการศึกษาการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้เกิดขึ้นในบริเวณที่ต้องการ ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเกิดได้บนฐานรองที่มีแคตะไลต์เคลือบอยู่ จึงได้ทำการศึกษาการสร้างลวดลายลงบนฐานรองที่เป็นฉนวนและตัวนำไฟฟ้า ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิล และสารแหล่งจ่ายเป็นแอลกอฮอล์ ส่วนของขั้นตอนกระบวนการสร้างลวดลายนั้น พบว่า มีความจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์มามีส่วนเกี่ยวข้องด้วยคือ กระบวนการออกซิเดชันเพื่อสร้างชั้นซัลไฟด์ไดออกไซด์ซึ่งเป็นฉนวนบนฐานรองซัลไฟด์ กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับเคลือบตัวแคตะไลต์นิเกิล และกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับสร้างลวดลาย

เทคนิคการสร้างลวดลายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แบ่งได้ 3 วิธีคือเทคนิควิธีการสร้างลวดลายจากใช้หน้ากากป้องกัน วิธีกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และวิธีการชุบทางไฟฟ้า โดยวิธีแรกเป็นการสร้างลวดลายจากการใช้หน้ากากป้องกัน ซึ่งสามารถทำได้ง่ายเพียงนำหน้ากากที่เป็นลวดลายไปวางทับบนฐานรองแล้วจึงนำไปทำการเคลือบนิเกิลด้วยการสปัตเตอร์ริง แต่ลวดลายที่ได้มีความคมชัดต่ำ วิธีที่สองเป็นการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งเริ่มจากการนำฐานรองซัลไฟด์ไปสปัตเตอร์ริงด้วยนิเกิล จากนั้นจึงนำไปเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี จะได้ลวดลายต่างๆตามต้นแบบที่ออกแบบไว้ ซึ่งวิธีนี้พบว่าลวดลายมีความคมชัดสูง แต่ขั้นตอนต่างๆค่อนข้างซับซ้อนและใช้เวลาพอสมควร วิธีที่สามเป็นการสร้างลวดลายนิเกิลด้วยการชุบทางไฟฟ้าซึ่งใช้ฐานรองเป็นทองแดง วิธีนี้ใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีในการเปิดช่องสำหรับเติมโลหะนิเกิลที่ได้จากการชุบด้วยไฟฟ้า โดยใช้สารละลายเป็นนิเกิลซัลเฟต มีแท่งโลหะนิเกิลต่อกับขั้วบวกและแผ่นทองแดงต่อกับขั้วลบ จากนั้นทำการป้อนกระแส 0.2 แอมแปร์ เป็นเวลา 30 นาที พบว่าวิธีนี้ลวดลายมีความคมชัดสูงเช่นกัน และเมื่อนำฐานรองที่สร้างลวดลายด้วยเทคนิคต่างๆดังกล่าวมาไปทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ปรากฏว่าสามารถสังเคราะห์ได้โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ตามลวดลายที่ได้

จากเทคนิคต่างๆของการสร้างลวดลาย ทำให้สามารถนำไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างเป็นตัวต้านทานได้ คือ การสปัตเตอร์นิเกิลให้เป็นกลุ่มก้อนเพื่อต้องการให้ขาดจากกันทางไฟฟ้า และสร้างเป็นลวดลายโดยมีขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นทองแดง ซึ่งเหมาะสมจะทำเป็นขั้วเพราะเมื่อทำการสังเคราะห์ ปรากฏว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้บนทองแดง แต่จะเกิดเป็นฟิล์มบนลวดลายนิเกิลที่เป็นกลุ่มก้อน โครงสร้างนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซได้ โดยในรายงานการวิจัยฉบับนี้ได้นำมาทดสอบการตรวจจับไอระเหยของแอลกอฮอล์ผลปรากฏว่าสามารถตรวจจับได้ ซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 1.598 % ต่อมาเมื่อทดลองทำการให้ความร้อนแก่ระบบ พบว่าสามารถตรวจจับได้ดียิ่งขึ้น โดยมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นประมาณ 3.789 %

## บรรณานุกรม

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng. B, 19, p.181, 1993.
- [2] R.F. Service, Science, 271, p 1232, 1996.
- [3] Fischer E.John, Johnson T. Alan, Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. 4 (1999) 28.
- [4] M. Buongiorno Nardelli, J.-L. Fattebert, D. Orlikowski, C.Roland, Q. Zhao, J. Bernholc, Carbon 38 (2000) 1703.
- [5] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant, Nature 388 (1997) 756.
- [6] Z.F. Ren, Z.P. Huang, J.H. Wang, M.P. Siegal, P.N. Provencio, Science 282 (1998) 1105.
- [7] J. Weber, A. Kumar, A. Kumar, and S. Bhansali, "Novel lactate and pH biosensor for skin and sweat analysis based on single walled carbon nanotubes." Sens. Actuators B, vol. 117, pp.308-313, 2006.
- [8] J. Suchiro, H. Imakiire, S. Hidaka, W. Ding, G. Zhou, K. Imasaka and M. Hava, "Shottky – type response of carbon nanotube NO<sub>2</sub> gas sensor fabricated onto aluminum electrodes by dielectrophoresis," Sens. Actuators B, vol. 114, pp. 943-949, 2006.
- [9] C. S. Huany, B. R. Huang, Y. H. Jang, M.S. Tsai, and C. Y. Yeh, "Three-terminal CNTs gas sensor for N<sub>2</sub> detection." Diamond Relat. Mater., vol 14, pp. 1872-1875, 2005.
- [10] A. Badzian, T. Badzian, E. Breval, A. Piotrowski. Thin Solid Film 398 (2001) 170
- [11] I. Sayago, E. Lafuente, M.C. Horrillo, W.K. Maser, A.m. Benito, R. Navaro, E.P. Urriolabeitia, M.T. Martinez, J. Gutierrez, Synthematic Metal 148 (2005) 15.
- [12] J. Suehiro, G. Hiroshi, W Ding, M. Hara, Sens. Actuators B (2004).
- [13] Toshiya Okazaki, Hisanori Shinohara, Synthesis and characterization of single- wall carbon nanotube by hot-filament assisted chemical vapor deposition, Chemical Physics Letters 376 (2003) 606-611.
- [14] T. Phetchakul, S. Cheirsirikul, S. Supadech "Asmospheric pressure HFCVD synthesis of Carbon nanotube by using ethanol source" ICNDST-10, May11-14, 2005 AIST, Tsukuba, Japan

- [15] T. Phetchakul, S. Cheirsirikul, S. Supadech “Synthesis of Carbon Nanotube by HFCVD at Atmospheric pressure” ICMAT 3<sup>rd</sup>, 3-8 July 2005, Singapore.
- [16] เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุภเดช และ **รัฐพงษ์ นาคาไชย** “การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28 เดือนตุลาคม 2548, หน้า 1145-1148
- [17] **รัฐพงษ์ นาคาไชย**, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุภเดช และ เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์, การศึกษาคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการเตรียมสารแหล่งจ่าย แคตะไลต์ และฐานรองต่างชนิดกัน, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2550 (12-17).
- [18] **รัฐพงษ์ นาคาไชย** เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล สมเกียรติ สุภเดช และ เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์, การศึกษาคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการเตรียมสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวรองรับต่างชนิดกัน, การประชุมวิชาการครั้งที่ 46 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 29 มกราคม – 1 กุมภาพันธ์ 2551 (175-182).
- [19] **รัฐพงษ์ นาคาไชย**, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุภเดช, เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์, นิमित ชมนาวัง และ รังสรรค์ เมืองเหลือ “การเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์จากการสร้างลดด้วยวิธี CVDแบบลดความร้อน”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29 เดือนพฤศจิกายน 2549, หน้า 729-732
- [20] T. Phetchakul , N. Chomnawang , S. Cheirsirikul , **R. Nakachai**, E. Ratanaudomphisut and P. Songsiriritthigul “Selective Growth of CNT on Ni/Cu Substrate” Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, January 16-19, 2007, Bangkok, Thailand.

## ภาคผนวก ก

**ตารางที่ ก - 1** แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal conductivities

<b>Material</b>	<b>Conductivity (w/mk)</b>
Carbon nanotubes	3,000 - 6,000
Diamond (Type II)	2,000
Boron nitride (theory)	1,300
Beryllium oxide	370 – 590
Water	561
Silicon earbide	490
Silver	418
Copper	380
Aluminum nitride	370
Gold	311
Aluminum	238
Tungsten	170
Silicon	150
Oil, Transformer	136
Iron	182
Graphite	80 - 250
Palladium	70
Platinum	69
Tin	65
Gallium arsenide	46
Germanium	28
Titanium	20
Quartz	7 – 14
Indium arsenide	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

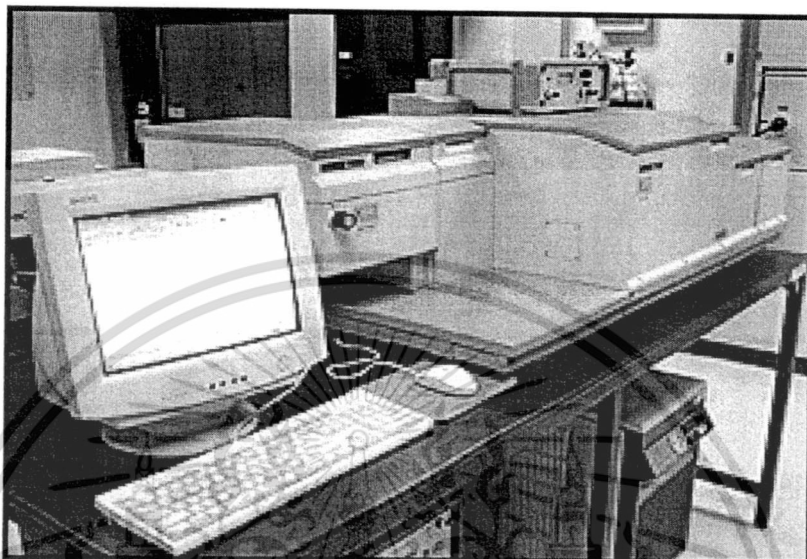
ตาราง ข – 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Young's modulus

Material	Value (N/m <sup>2</sup> )
Carbon nanotubes	1 x 1,012
Diamond	1000
Tungsten	340x
Steel	172 – 205
Ferrites (most)	150
Platinum	147
Cast iron	138
Copper	124
Silicon	113
Quartz	79 – 107
Gold	74 – 80
Silver	71 – 78
Aluminum	69
Tin	41 – 45
Lead	14

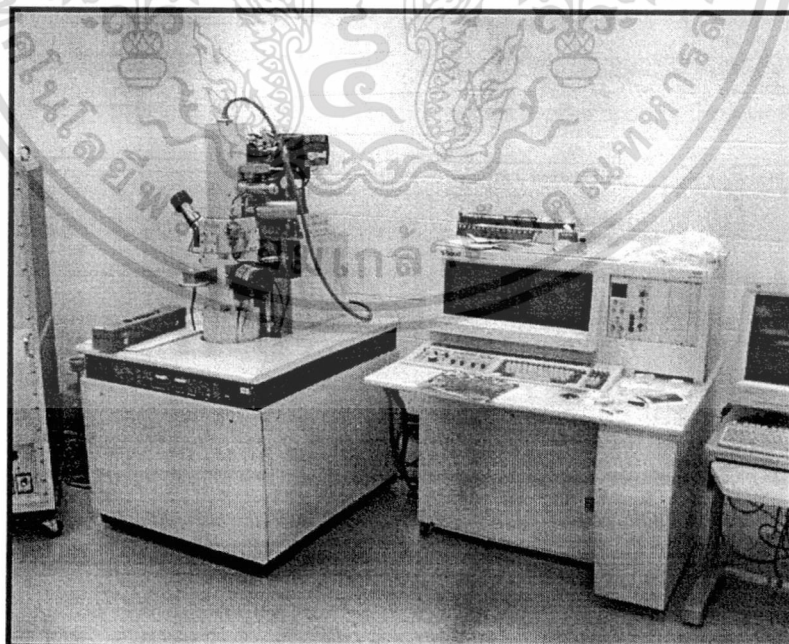
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

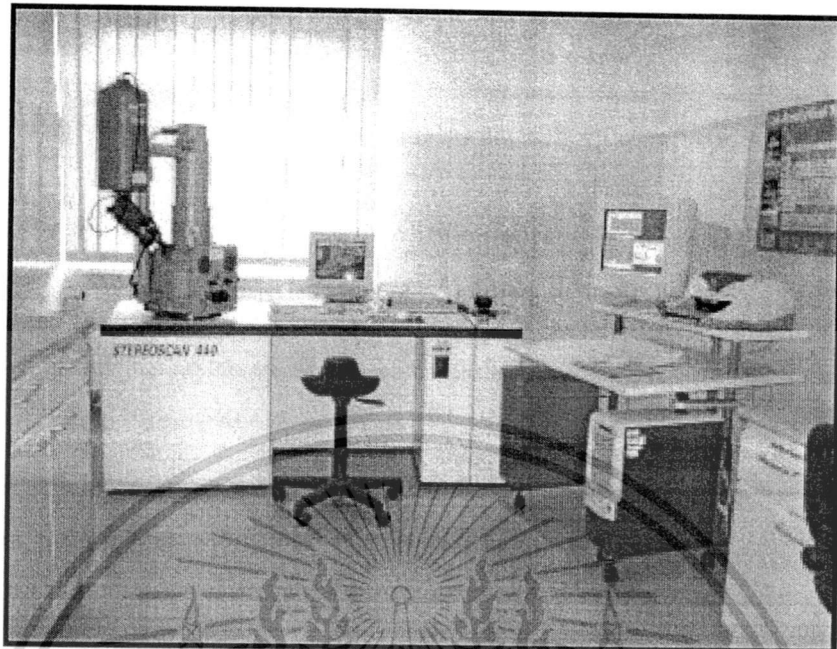


รูปที่ ค-1 Raman spectroscopy



รูปที่ ค-2 SEM (Scanning Electron Microscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-3 EDX (Energy Dispersive X-Ray)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย

1. **T. Phetchakul**, N. Chomnawang, S. Cheirsirikul, R. Nakachai, E. Ratanaudomphisut and P. Songsiriritthigul “Selective Growth of CNT on Ni/Cu Substrate” Conference on IEEE Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, January 16-19, 2007, Bangkok, Thailand.
2. R. Nakachai, **T. Phetchakul**, S. Cheirsirikul, S. Supadech, E. Ratanaudomphisut and N. Chomnawang “Selective Growth of Carbon Nanotube by HFCVD” 29<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference, November 9-10, 2006, Thailand.
3. รัฐพงษ์ นาคาไชย **เดิมนพงษ์ เพ็ชรกุล** สมศักดิ์ เขียร์ศิริกุล สมเกียรติ สุภเดช และ เอกธราภรณ์ รัตนอุดมพิสุทธิ, การศึกษาคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการเตรียมสารแหล่งจ่าย แก๊สไฮโดรเจน และฐานรองรับต่างชนิดกัน, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2550 (12-17).
4. รัฐพงษ์ นาคาไชย **เดิมนพงษ์ เพ็ชรกุล** สมศักดิ์ เขียร์ศิริกุล สมเกียรติ สุภเดช และ เอกธราภรณ์ รัตนอุดมพิสุทธิ, การศึกษาคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการเตรียมสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวรองรับต่างชนิดกัน, การประชุมวิชาการครั้งที่ 46 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 29 มกราคม – 1 กุมภาพันธ์ 2551 (175-182).

patterns on a Cu background was obtained as shown in Fig. 1. Although the line-width and spacing of these preliminary Ni electrodes are quite large compared to the size of CNT, they can be scaled down to submicron range later when we study CNT synthesis across the gaps between electrodes in future work. Fig. 2 shows the closed-up surface of Ni electrodes on which CNT will be deposited.

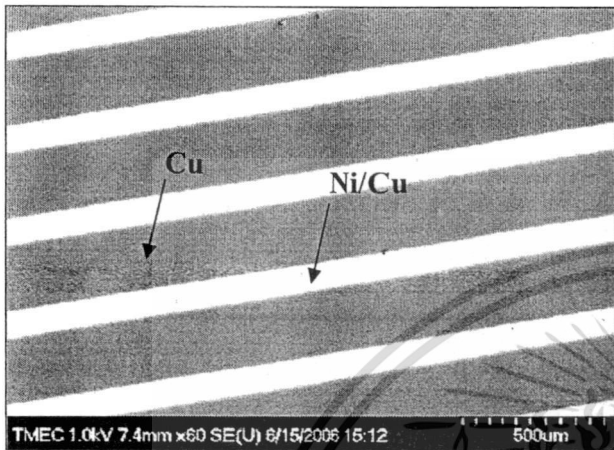


Figure 1. SEM image of Ni electrode patterns on Cu background.

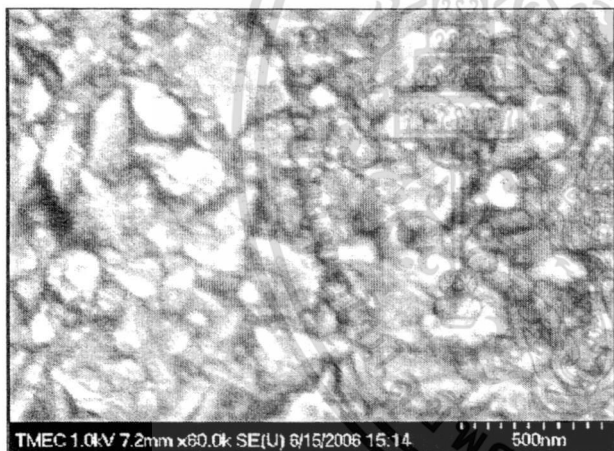


Figure 2. SEM image showing surface of Ni electrodes.

### III. CNT SYNTHESIS

CNT films were grown on the Ni/Cu substrates by HFCVD at atmospheric pressure [14] using apparatus setup as shown in Fig. 3. This self-contraction system uses ethanol vapor and  $H_2$  gas as starting sources.  $H_2$  gas supply was splitted in two paths, 90% of which directly flows to the Pyrex™ glass chamber while another 10% passes through bubbling container to carry ethanol vapor before joining the first path. Gas flow rate in

each path was separately controlled by a flow meter. The substrate was heated to temperature 700-850 °C by a tungsten filament hanging 3 mm above the substrate. The same system can also be used in diamond thin film deposition [14].

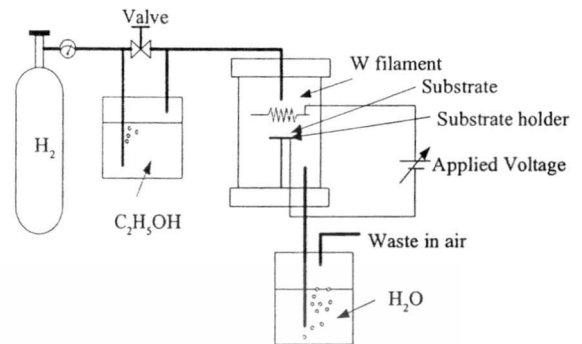


Figure 3. Schematic diagram of HFCVD apparatus.

### IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

The CNT films were grown on Ni/Cu substrate by HFCVD apparatus as described. We observed that CNT films were grown in the areas with Ni catalyst only. No CNT film was obtained at all in an area of Cu background. Fig. 4a shows an SEM image of a CNT film which is selectively grown on a surface of Ni electrodes. CNT films at some edge areas of Ni electrodes were unintentionally removed mechanically during sample handling. This image clearly shows that Cu layer can be used as a masking material for selective CNT deposition the same way as Pt masking layer reported by [15].

Fig. 4b shows the boundary between Ni electrode and Cu background. It can be seen that area-selective quality of CNT growth depends on patterning quality of Ni electrodes. Therefore, high area-selective quality of this growing technique can be improved by scaling the pattern size down to the limit of photolithography process. A closed-up view of resulting CNT film after synthesis for 45 minutes is shown in Fig. 4c. In this photo, the sizes of CNT are mixed between small and large diameters. When CNT film was grown using higher ethanol flow rate and lower substrate temperature, CNT films of smaller diameters were obtained as shown in Fig. 5. Comparing CNT films in Fig. 4c and Fig. 5, differences in diameter, uniformity and density are clearly observed.

In order to confirm the resulting CNT film, it was analyzed through Raman spectrum measurement. Fig. 6 shows a spectrum of CNT shown in Fig 5. According to the Raman spectrum, only two peaks were observed at wave numbers of 1,600  $cm^{-1}$  (G-band) and 1,360  $cm^{-1}$  (D-band). The peaks indicate presence of graphitic CNTs and defective structures,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

respectively. Higher intensity of G-band compared to that of D-band implies high quality and low defective properties of obtained CNT film. This confirms the quality of HFCVD used in this work.

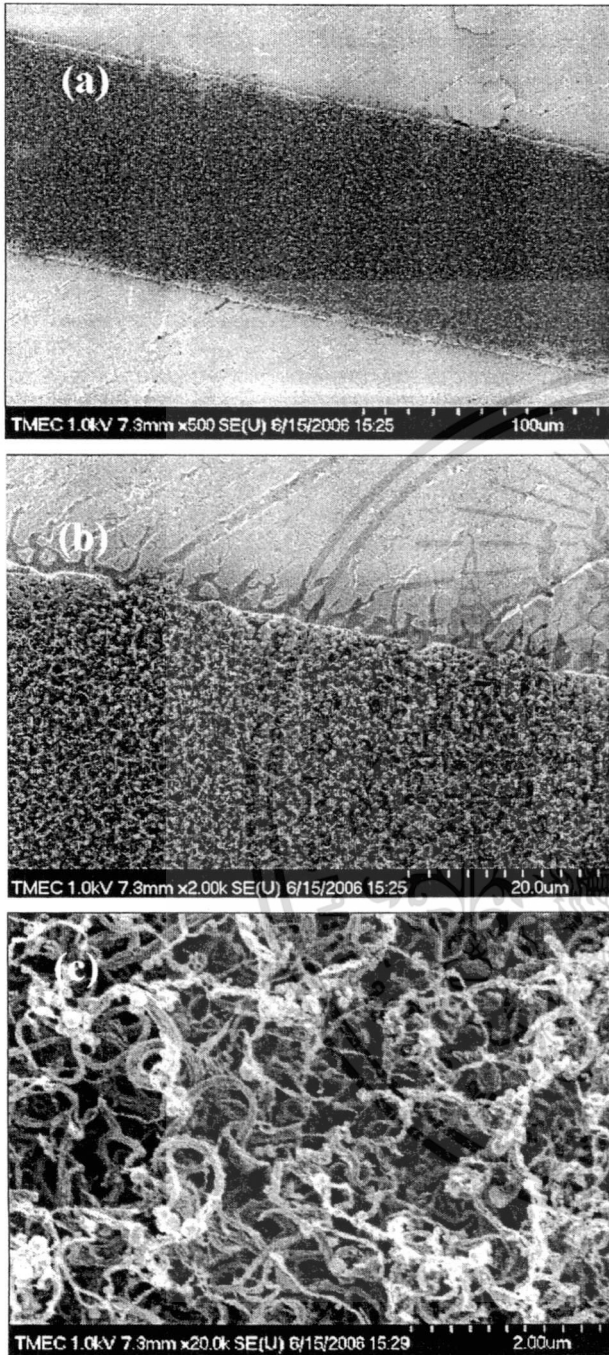


Figure 4. SEM images showing (a) CNT on Ni pattern at low resolution, (b) at electrode boundary, and (c) a closed-up view of CNT film.

In addition to Raman spectrum, EDX analysis was also performed on the substrate before and after CNT synthesis.

The results of EDX analysis shown in Fig 7(a) confirm presence of both Ni and Cu on the substrate before CNT synthesis. The peaks of Ni and Cu in this photo are almost superimposed. After CNT deposition, a high peak of carbon was observed along with the existing Ni and Cu peaks as shown in Figure 7(b). This also confirms the presence of CNT films.

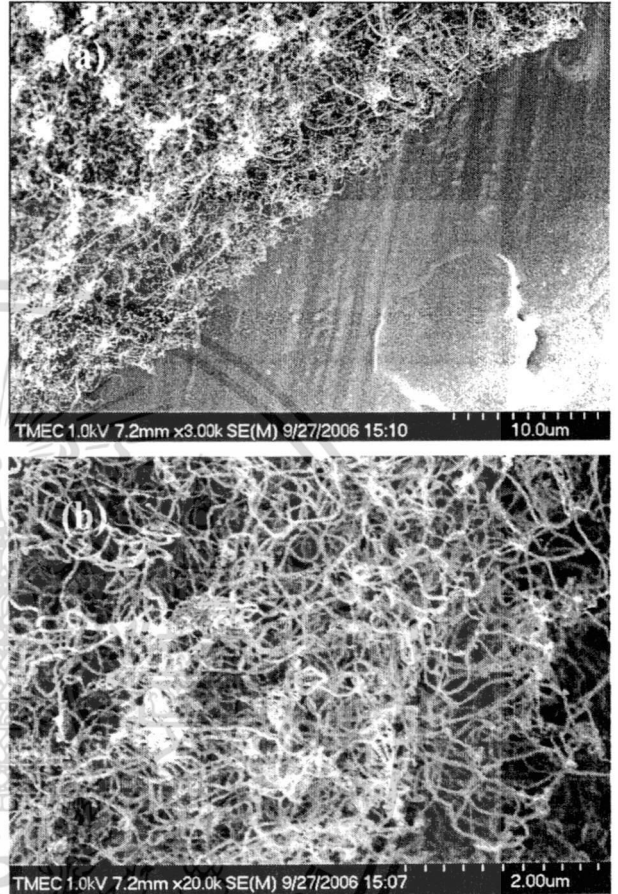


Figure 5. SEM image of CNT film grown at higher ethanol flow rate and lower substrate temperature, (a) at electrode boundary, (b) at the middle of electrode.

Since CNT synthesis cannot be grown on a copper surface, one can use this finding to selectively grow CNT films in predefined non-conductive areas by scarcely sputter-deposits Ni catalyst atoms on such substrate followed by deposition and patterning of Cu layer. The area not covered by Cu can be then used for selective growth of CNT films. Since masking conductive substrate with Cu layer has been demonstrated in this paper, Cu masking on non-conductive substrates will be done in future work along with growing CNT across the gaps between 3D high-aspect-ratio Ni microstructures fabricated by LIGA processes as shown in Fig. 8. Considering CNT synthesis on such 3D microstructures, Cu masking layer can also be used to protect the bonding pads of Ni electrodes from being covered by CNT during synthesis step. This will ease wire bonding process when devices are packaged.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

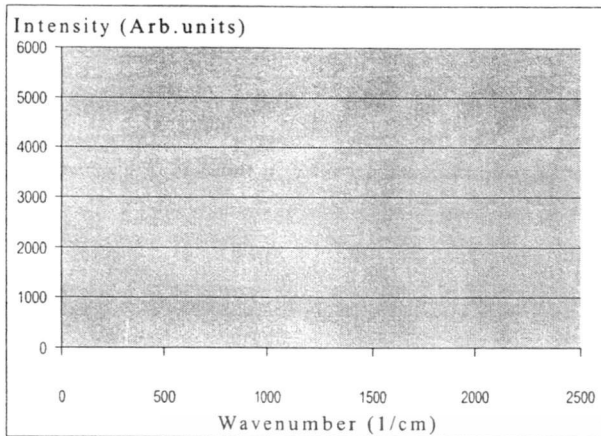


Figure 6. Raman spectrum of CNT film.

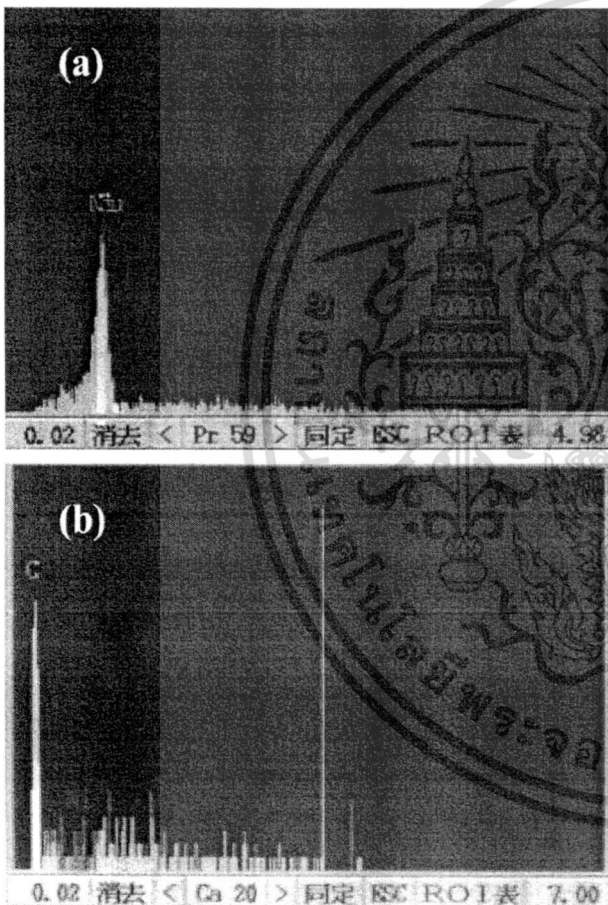


Figure 7. EDX spectrum of the substrate, (a) before and (b) after CNT synthesis.

## V. CONCLUSION

A method for selective growth of CNT on Ni/Cu conductive substrates has been demonstrated. Experiment results lead to a finding that CNT cannot be grown on copper surface.

Hence, Cu can be used as a masking material similar to the case of Pt reported by other researchers. Based on experiments done in this paper, CNT selective growing will be tested on both 2D and 3D microstructures in the near future.

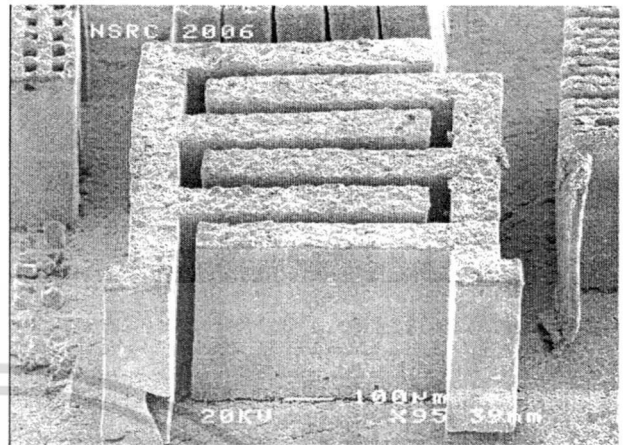


Figure 8. photo of high-aspect-ratio 3D Ni electrodes made of electroplated Ni which was fabricated using the Thai LIGA processes developed at the National Synchrotron Research Center, Thailand. These microstructures was prepared for study of CNT synthesis across the gaps between Ni electrodes which will be done in future work.

## ACKNOWLEDGMENT

Special thanks go to the National Synchrotron Research Center (NSRC), Thailand, for its X-ray lithography and microfabrication facilities, as well as partial financial and staff supports. The 3D electrodes shown in Fig. 8 were realized using the Thai LIGA processes developed by NSRC staffs. We appreciate SUT graduate students for their helps on fabrication of Ni/Cu substrates.

## REFERENCES

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng. B, 19, p.181, 1993.
- [2] R.F. Service, Science, 271, p.1232, 1996.
- [3] Fischer E.John, Johnson T. Alan, Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. 4 (1999) 28.
- [4] M. Buongiorno Nardelli, J.-L. Fattbert, D. Orlikowski, C.Roland, Q. Zhao, J. Bernholc, Carbon 38 (2000) 1703.
- [5] J. Weber, A. Kumar, A. Kumar, and S. Bhansali, "Novel lactate and pH biosensor for skin and sweat analysis based on single walled carbon nanotubes" Sens. Actuators B, vol. 117, pp.308-313, 2006.
- [6] J. Suchiro, H. Imakiire, S. Hidaka, W. Ding, G. Zhou, K. Imasaka and M. Hava, "Shottky - type response of carbon nanotube NO<sub>2</sub> gas sensor fabricated onto aluminum electrodes by dielectrophoresis," Sens. Actuators B, vol. 114, pp. 943-949, 2006.
- [7] C. S. Huang, B. R. Huang, Y. H. Jang, M.S. Tsai, and C. Y. Yeh, "Three-terminal CNTs gas sensor for N<sub>2</sub> detection." Diamond Relat. Mater., vol 14, pp. 1872-1875, 2005.
- [8] Y. Abdi, J. Koohsorkhi, J. Derakhshandeh, S. Mohajerzadeh, H. Hoseinzadegan, M.D. Robertson, J.C. Bennett, X. Wu, and H. Radamson, "PECVD-grown carbon nanotubes on silicon substrates with a nickel-seeded tip-growth structure," Mater. Sci. Eng., vol. 26, pp. 1219-1223, 2006.
- [9] L. Heh-nan, C. Yu-Hsien, Y. Jung-Hsien, H. Ju-Hung, L. Ing-Chi, H. Min-Hsiung, "Selective growth of vertically aligned carbon nanotubes on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- nickel oxide nanostructures created by atomic force microscope nano-oxidation," Chem. Phys. Lett., vol. 399 pp. 422-425, 2005.
- [10] G. Y. Liu, D. Y. Zhong, S. H. Xia, S. F. Cheng, Y. G. Ding, Y. J. Lu, Y. J. Shao, H. Y. Li, L. J. Hangfu and E. G. Wang, "CNTs grown on the surface of various material by large volume MP- CVD for VME application" Appl. Surf. Sci., vol. 215 pp. 209-213, 2003.
- [11] Chen-Chun Lin, Po-Lin Chen, Chi-Ting Lin and Cheng-Tzu Kuo, "Selective growth of horizontally-oriented carbon nanotube bridges on patterned silicon wafers by electroless plating Ni catalysts" Diamond Relat Mater., vol. 14, pp. 1867-1871, 2005.
- [12] X. Wang, Y. Liu, P. Hu, G. Yu, K. Xiao, D. Zhu, Adv. Mater. 14 (2002) 1557.
- [13] S. Huang, "Controllable 3D architectures of aligned carbon nanotube arrays by multi-step processes" Chem. Phys. Lett., vol. 374 pp. 157-163, 2003.
- [14] S. Petchakul, S. Cheisirikul, and S. Supadech, "The 10<sup>th</sup> International Conference on New Diamond Science and Technology (ICNDST-10), Japan, 2005.
- [15] L. Valentini, I. Armentano, J.M. Kenny, L. Lozzi, and S. Suntucci, "Controllable fabrication of aligned carbon nanotubes by pulsed plasma selective positioning and electrical transport phenomena," Materials Letters, 58, pp. 470-473, 2004



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้