

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD แบบลวดความร้อน

Synthesis of Carbon Nanotubes by Hot Filament Chemical Vapor Deposition
at Atmospheric Pressure



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน

**Synthesis of Carbon Nanotubes by Hot Filament Chemical Vapor Deposition
at Atmospheric Pressure**



โดย
นาย ประทีป ไทเศรษฐวัฒน์กุล 46015184
นาย สถาปต์ย์ รักษาสุข 46015283

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2548


ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่องการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน

ผู้จัดทำ

1. นาย ประทีป ไทเศรษฐวัฒน์กุล
2. นาย สถาปัติ รักษาสุข



.....
(รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD
แบบลดความร้อนที่ความดันบรรยากาศ

นักศึกษา

นาย ประทีป ไทเศรษฐวัฒน์กุล รหัส 46015184
นาย สถาปิตย์ รักษาสุข รหัส 46015283

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ปีการศึกษา

2548

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร. เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ด้วยวิธี HFCVD แบบลดความร้อนก๊าซผสมของเอทิลแอลกอฮอล์ กับ ไฮโดรเจนโดยการสังเคราะห์ลงบนฐานรองต่างๆ ได้แก่ ฐานรองซิลิกอน ชั้นคาร์บอน ฐานรองกราฟไฟท์ ฐานรองทองแดงบนซิลิกอน ซิลิกอนที่ถูกสเป็คด้วยนิกเกิลที่เวลา 90 วินาที และ 14 นาที และฐานรองทองแดงที่นำไปชุบด้วยนิกเกิล โดยใช้คลวดทั้งสแตนเป็นขดลวดความร้อน(hot-filament) ในการสังเคราะห์ CNTs มีจุดประสงค์หลักเพื่อ ทดลองหา ผลของอุณหภูมิของฐานรอง ที่สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่มีผลต่อการเกิด CNTs และการสังเคราะห์ CNTs ให้เกิดทั่วทั้งแผ่นบนฐานรองที่ได้เตรียมไว้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นด้วยความกรุณาของ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ในการให้คำแนะนำปรึกษา แนวทางในการแก้ไขปัญหา และการสนับสนุนในทุกด้าน ขอแสดงความขอบคุณ คณะทำงานของ TMEC สำหรับรูปถ่าย SEM ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่ได้มอบสิ่งสอนข้าพเจ้า และขอขอบคุณ รุ่นพี่ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่ดีในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

นาย ประทีป ไทเศรษฐวัฒน์กุล

นาย ประทีป ไทเศรษฐวัฒน์กุล

นาย สถาปิตย์ รักษาสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | |
|------------------------------------------------------------|----|
| บทที่ 1 นาโนเทคโนโลยี | 1 |
| บทที่ 2 คาร์บอนนาโนทิวส์และนาโนเทคโนโลยี | 3 |
| 2.1 การค้นพบคาร์บอนนาโนทิวส์ | 4 |
| 2.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวส์ | 4 |
| 2.3 พื้นฐานเบื้องต้นของคาร์บอนนาโนทิวส์ | 6 |
| 2.3.1 Single Walled Carbon nanotubes (SWCNTs) | 6 |
| 2.3.2 Multi Walled Carbon nanotubes (MWCNTs) | 8 |
| 2.4 การนำคาร์บอนนาโนทิวส์ไปใช้งาน | 8 |
| 2.4.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ | 8 |
| 2.4.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน | 9 |
| 2.4.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ | 9 |
| 2.4.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (probe) เซนเซอร์ | 9 |
| 2.4.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน | 9 |
| บทที่ 3 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์ | 11 |
| 3.1 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวส์ | 11 |
| 3.1.1 Base Growth | 11 |
| 3.1.2 Tip Growth | 11 |
| 3.2 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์ | 12 |
| 3.2.1 วิธี Arc discharge | 12 |
| 3.2.2 วิธี Laser ablation | 13 |
| 3.2.3 วิธี CVD | 14 |
| ตาราง ที่ 3.1 สรุปการสังเคราะห์ CNTs 3วิธีหลัก | 15 |
| 3.2.3.1 Thermal Chemical Vapor Deposition | 16 |
| 3.2.3.2 Plasma enhanced chemical vapor deposition (PE-CVD) | 16 |
| 3.2.3.3 Vapor phase growth | 16 |
| 3.2.3.4 High pressure CO disproportionate process | 16 |
| 3.2.3.5 Hot filament enhance CVD (HF-CVD) | 16 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| บทที่ 4 กระบวนการสร้างฟิล์มโตะด้วยวิธีการสเปกโตรบนฐานรองฉีดยกอน | 19 |
| บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD แบบ ฉวดความร้อน | 24 |
| 5.1 วัตถุประสงค์ | 24 |
| 5.2 อุปกรณ์และสารเคมี | 24 |
| 5.3 ขั้นตอนการทดลอง | 24 |
| 5.3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองต่างๆที่ได้เตรียมไว้ | 24 |
| 5.3.2 การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ให้สม่ำเสมอในบริเวณกว้าง | 25 |
| บทที่ 6 ผลการทดลองและการอภิปราย | 30 |
| บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง | 44 |
| สรุปผลการทดลองตอนที่ 1 | 44 |
| สรุปผลการทดลองตอนที่ 2 | 44 |
| เอกสารอ้างอิง | |
| ภาคผนวก | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 | ภาพของเส้นผมมนุษย์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน | 1 |
| 2.1 | Ijima ผู้ค้นพบ CNTs | 4 |
| 2.2 | การม้วนของแผ่น Graphene | 5 |
| 2.3 | การเปรียบเทียบระหว่าง Fullerenes กับ Nanotubes | 6 |
| 2.4 | ลักษณะของSWCNTs ทั้ง 3 ชนิด | 7 |
| 2.5 | โครงสร้างของ SWCNTs | 7 |
| 2.6 | โครงสร้างของ MWCNTs | 8 |
| 2.7 | ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ในการสร้างทรานซิสเตอร์ | 10 |
| 2.8 | การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้ | 10 |
| 3.1 | กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Base Growth และ Tip Growth | 12 |
| 3.2 | รูปการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Arc discharge | 13 |
| 3.3 | การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Laser ablation | 14 |
| 3.4 | การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD | 14 |
| 3.5 | ระบบของ HF-CVD | 17 |
| 4.1 | Sputtering System Diagram ของเครื่อง SPE-210 Diode Sputtering System | 19 |
| 4.2 | ระบบการสปีดเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด | 20 |
| 4.3 | แผนภาพภายใน chamber ของเครื่องสปีดเตอร์ | 21 |
| 4.4 | Panel of RF Generator | 23 |
| 4.5 | Panel of Pump Switch ,Ionizing Gauge and Heater | 23 |
| 5.1 | ภาพแสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ | 27 |
| 5.2 | ทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 1 | 27 |
| 5.3 | ทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2 | 28 |
| 5.4 | ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 29 |
| 5.5.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกแสงด้วยผงเหล็กที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 30 |
| 5.5.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกแสงด้วยผงเหล็กที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 30 |
| 5.6.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบน ฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกแสงด้วยผงเหล็กที่อุณหภูมิ 700-800 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 31 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.6.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกสเตรชด้วยผงเหล็กที่อุณหภูมิ 700-800 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 31 |
| 5.7.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกสเตรชด้วยผงเหล็ก ที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 32 |
| 5.7.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกสเตรชด้วยผงเหล็ก ที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 32 |
| 5.8.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ขึ้นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 33 |
| 5.8.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ขึ้นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 33 |
| 5.9.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐาน รองขึ้นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 700-800 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 34 |
| 5.9.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐาน รองขึ้นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 700-800 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 34 |
| 5.10.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง กราฟไฟท์ที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 35 |
| 5.10.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง กราฟไฟท์ที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 35 |
| 5.11.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง กราฟไฟท์ที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 36 |
| 5.11.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง กราฟไฟท์ที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 36 |
| 5.12.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ทองแดงบนซิลิกอนที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 37 |
| 5.12.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ทองแดงบนซิลิกอนที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 37 |
| 5.13.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 38 |
| 5.13.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 38 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.14.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 39 |
| 5.14.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 39 |
| 5.15.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 40 |
| 5.15.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 40 |
| 5.16.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 41 |
| 5.16.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 41 |
| 5.17.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ทองแดงที่ชุบด้วยนิเกิลและนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 42 |
| 5.17.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ทองแดงที่ชุบด้วยนิเกิลและนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 42 |
| 5.18.1 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ทองแดงที่ชุบด้วยนิเกิลและนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C ที่บริเวณตรงกลาง | 43 |
| 5.18.2 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรอง ทองแดงที่ชุบด้วยนิเกิลและนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C ที่บริเวณอื่นๆ | 43 |

บทที่ 1

ที่มาของนาโนเทคโนโลยี

เอริก เดริกซ์เลอร์ (Eric Drexler) ถือได้ว่าเป็นเจ้าพ่อแห่งวงการนาโนฯ และได้เสนอคำว่า นาโนเทคโนโลยี ในปี ค.ศ.1997 ระหว่างที่Drexlerเรียนปริญญาตรีที่มหาวิทยาลัย MIT เขาได้เกิดความคิด จินตนาการขึ้นว่า ในอนาคตอาจจะมีกองทัพหุ่นยนต์จิ๋วที่สามารถนำ โมเลกุลและอะตอม ของสารธรรมดาทั่วไปมาต่อเรียงกันด้วยความแม่นยำ เพื่อสร้างเป็นสารใหม่ได้ตามที่ต้องการในเวลาเพียงไม่กี่ชั่วโมง ด้วยเครื่องจัดเรียงอะตอมนี้ เราอาจจะเปลี่ยนสารเคมีต่างๆไป ไปเป็นสารต่างๆ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง เพชร จรวด อะไรก็ได้ตามที่ต้องการ ในกระแสเลือดเครื่องจักรจิ๋วจะเข้าไปรักษาโรคต่างๆได้ ในอากาศพวกมันอาจจะช่วยกำจัดมลพิษได้ ความคิดของDrexlerได้ชักจูงกลุ่มนักเคมี นักคอมพิวเตอร์ วิศวกรจำนวนมากให้หันมาสนใจศึกษาด้านวิทยาศาสตร์ที่ระดับนาโนเมตร

คำว่า นาโน (Nano) แปลว่าคนแคระในภาษากรีก แต่โดยมากจะเป็นคำที่เรียกกันติดปาก และย่อมาจากคำว่า นาโนเมตร (Nanometre) ซึ่งหมายถึง สิบกำลังลบเก้าเมตร หรือ 1 ส่วนพันล้านของ 1 เมตร คำนิยามอย่างคร่าว ๆ ของ นาโนศาสตร์ (Nanoscience) ก็คือการศึกษาปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของวัตถุที่มีขนาดในช่วงนาโนเมตร (ประมาณ 1- 1000 นาโนเมตร) ส่วนนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) ก็จะหมายถึงการสร้างและประยุกต์วัสดุนาโนนี้มาใช้ให้เป็นประโยชน์ จุดมุ่งหมายสูงสุดของนาโนเทคโนโลยีก็คือความสามารถที่จะสร้างและจัดเรียงอนุภาคต่างๆได้ตามความต้องการ เพื่อสร้างสารหรือโครงสร้างของสารในแบบใหม่ๆที่ให้คุณสมบัติพิเศษที่อาจจะไม่เคยมีก่อน



รูปที่ 1.1 ภาพของเส้นผมมนุษย์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเชิงเปรียบเทียบ ขนาด 1 นาโนเมตรนี้จะใหญ่กว่าขนาดของอะตอมประมาณสิบเท่าขึ้นไป แต่เล็กกว่าขนาดของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในตัวไมโครชิพวงจร (IC microchip) ในปัจจุบันประมาณร้อยเท่า ถ้าจะอ้างถึงของใกล้ตัว เช่น เส้นผมของคนเราซึ่งขนาดประมาณ 0.1 มิลลิเมตร ขนาด 1 นาโนเมตรก็จะเล็กกว่าเส้นผมประมาณหนึ่งแสนเท่า ที่กล่าวมานี้บางทีก็ยังมีภาพไม่ออกว่านาโนเมตรมันเล็กแค่ไหน โลกของเราที่มีขนาดประมาณ 10,000 กิโลเมตร หรือ 10,000,000 เมตร มีขนาดใหญ่เป็นประมาณหนึ่งแสนเท่าของสนามฟุตบอล (100 เมตร) ถ้าสมมุติว่าเราย่อส่วนโลกใบใหญ่ที่เราอยู่กันนี้ให้มีขนาดเท่าเส้นผม ตัวสนามฟุตบอลก็จะย่อส่วนลงไปในช่วงของ 1 นาโนเมตร ซึ่งน่าจะพอเห็นได้ว่าการไปสร้างวัตถุนาโนในโลกใบจิ๋วขนาดเท่าเส้นผม ไม่ใช่เป็นเรื่องง่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

คาร์บอนนาโนทิวบ์และนาโนเทคโนโลยี

พบได้ว่าปัจจุบันเทคโนโลยีระดับนาโนได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเทคโนโลยีย่อยในสาขาเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจมาก คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งเป็นสาขาหนึ่งในหลายๆ สาขาของนาโนเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจ โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งประเภทของการวิจัยทางด้านวัสดุนาโนออกเป็น 5 สาขาดังนี้

อนุภาคนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องผงและอนุภาคขนาดเล็ก โดยจะมีประโยชน์ในทางด้านที่เราต้องพยายามสร้างมูลค่าเพิ่มจากอนุภาคนาโนเหล่านั้นด้วยการใส่เทคโนโลยีของอุปกรณ์เข้าไป เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอุปกรณ์เป้าหมายจะเป็นอุปกรณ์ประเภท เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ อุปกรณ์ตรวจวินิจฉัย วัสดุเคลือบกันสารพิษ วัสดุเสริมแรง

วัสดุผสมพลาสมานาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการผสมผสานที่เกิดขึ้นในระดับเล็ก ทำให้แสดงคุณสมบัติพิเศษในระดับอะตอมออกมา เป้าหมายในการวิจัยทางด้านนี้ คือ แผ่นฟิล์มและบรรจุภัณฑ์ที่ต้านทานการซึมผ่านของก๊าซและความชื้น วัสดุเสริมแรงเพื่อใช้ในการแพทย์ วัสดุสำหรับเครื่องสำอาง เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ

เส้นใยนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุนาโนขึ้นรูปให้เป็นเส้นใยที่มีขนาดนาโนซึ่งจะแสดงคุณสมบัติพิเศษต่างๆ หลากอย่างออกมา เป้าหมายของการวิจัยในด้านนี้คือ เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซและสารเคมี วัสดุส่งสารออกฤทธิ์ แผ่นกรองอนุภาค ผิวนั่งเทียม

โครงสร้างนาโนของคาร์บอน และโพรงนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวางแผนที่จะพัฒนาให้ได้ผลิตภัณฑ์พวก ท่อนาโนคาร์บอนที่จะนำไปทำอุปกรณ์เซ็นเซอร์ วัสดุเสริมความแข็งแรงให้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ถ้วยชามเซรามิก กระจกเสริมแรง วัสดุโพรงนาโนเพื่อทำเยื่อเมมเบรน

ฟิล์มบางนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวางแผนและพัฒนาที่จะส่งเสริมเรื่องของการเป็นศูนย์กลางและอาหาร ผลิตภัณฑ์จากวัสดุนาโนในกลุ่มนี้จะมีลักษณะเป็นวัสดุทำหน้าที่ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวินิจฉัยโรคและวัตถุที่มีขนาดนาโน จะเรียกว่าเป็นเซ็นเซอร์ก็ได้ แต่จะเป็นเซ็นเซอร์ที่พัฒนาให้เหมาะกับประเทศไทย ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้ก็คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มบางอินทรีย์ เช่น หลอดไฟ แบบแบนเรียบ เซลล์สุริยะแบบอินทรีย์ เป็นต้น

จะเห็นได้ว่า การวิจัยนั้นมีหลายๆ ด้าน แต่ด้านที่ได้รับความสนใจที่สุดน่าจะเป็น ด้านโครงสร้าง นาโนคาร์บอนและโพรงนาโน เราจึงเลือกเป็นหัวข้อในการวิจัยของเรา

2.1 การค้นพบ CNTs

เป็นความบังเอิญที่ Sumio Iijima (นักอิเล็กทรอนิกส์ไมโครสโคปของบริษัท NEC) สังเคราะห์ fullerene โดยวิธี arc-evaporation แล้วพบว่าที่ขั้วคาโทดเกิดมีวัสดุโครงสร้างแบบกราฟไฟท์ที่เป็นทั้งอนุภาคขนาดนาโนและท่อนาโน ซึ่งอันหลังนี้ไม่เคยมีผู้ใดสังเกตเห็นมาก่อนต่อมาทีมงานของ Iijima สามารถสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวในปริมาณมากได้ โดยปรับสถานะของการทำ arc-evaporation ท่อนาโนที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเป็นท่อกราฟไฟท์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-10 นาโนเมตร (nm) และมีความยาวในช่วงหนึ่งไมโครเมตร และเป็นท่อซ้อนกัน 2-50 ชั้น เรียกว่า multi-walled CNT (MWNT) ต่อมามีการสร้างและทำให้บริสุทธิ์แพร่หลายไปตามห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ทั่วโลก รวมถึงการพัฒนาเป็นท่อเดี่ยวที่เรียกว่า single-walled CNT (SWNT) ในอีกสองปีต่อมา



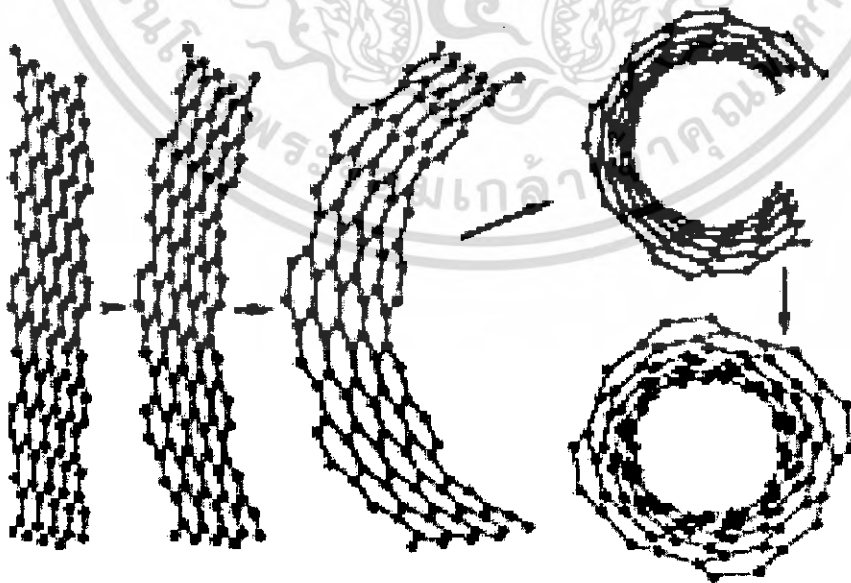
รูปที่ 2.1 Iijima ผู้ค้นพบ CNTs

2.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถพิจารณาได้จากการห่อแผ่นกราฟไฟท์ (Graphite) ซึ่งปกติคาร์บอนทิวบ์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากๆ (ระดับนาโนเมตร) ทำให้สามารถมองเป็นโครงสร้างหนึ่งมิติได้ โดยโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ประกอบด้วยสองส่วนที่แยกออกจากกันมีคุณสมบัติแตกต่างกันทางฟิสิกส์และเคมี ส่วนแรกคือส่วนผนังของท่อ และส่วนที่สองคือฝาปิดของท่อ โดยส่วนฝาปิดของท่อ มีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมที่ได้มาจากฟูลเลอร์เร็นซ์ เช่น C_{60} หรือ C_{70}

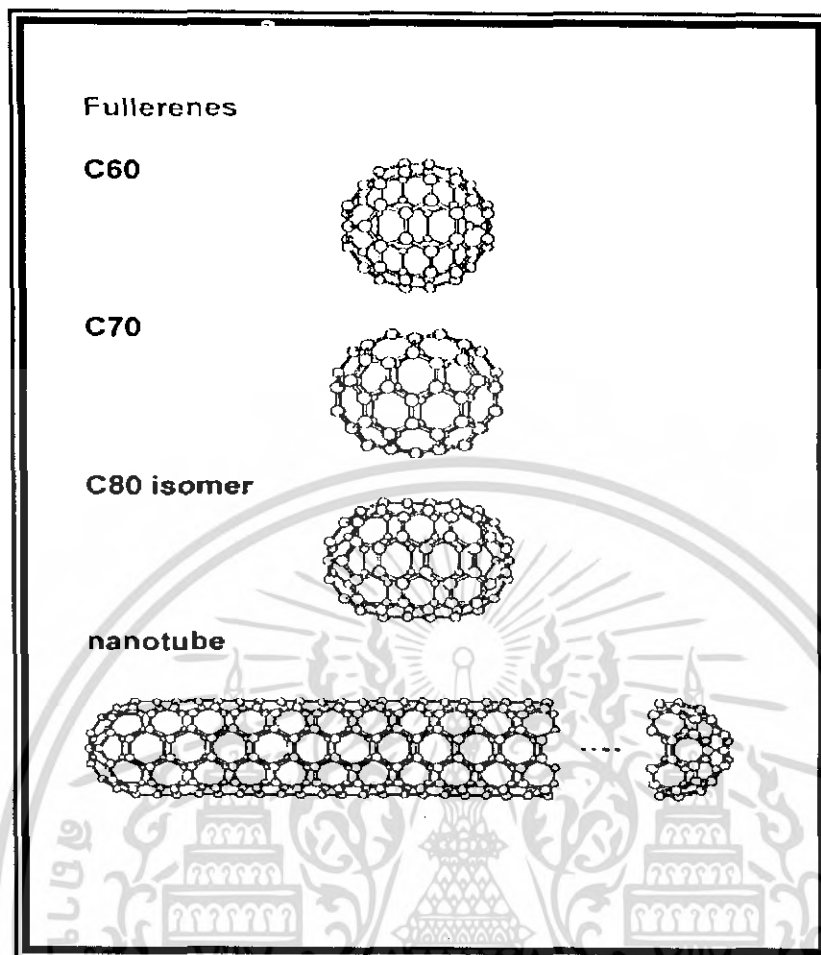
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟูลเลอร์เร็นซ์ มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนอยู่ในรูปหกเหลี่ยมและห้าเหลี่ยม ในรูปแบบทางฟิสิกส์ที่สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีรูปหลายเหลี่ยมของ Euler ที่ว่ารูปห้าเหลี่ยม 12 รูป ในรูปของโครงสร้างผลึกที่ประกอบด้วยรูปห้าเหลี่ยมและรูปหกเหลี่ยมเท่ากัน โดยการรวมกันของรูปห้าเหลี่ยม 5 อัน ผลลัพธ์ทำให้เกิดความโค้งของพื้นผิวที่เป็นลักษณะปริมาตรปิด กฎข้อที่ 2 ในการใช้รูปห้าเหลี่ยม จะต้องอยู่ในระยะทางระหว่างห้าเหลี่ยมด้วยกันบนพื้นผิวทรงกลมในระยะทางที่มากที่สุด เพื่อที่จะได้ความโค้งที่มีค่าน้อยที่สุด และความเค้นพื้นผิวน้อยที่สุด ผลลัพธ์ก็คือ โครงสร้างที่มีความเสถียรมากขึ้น และโครงสร้างที่เสถียรและเล็กที่สุดที่สามารถสร้างได้โดยวิธีนี้ก็คือ C_{60} ส่วนโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นก็คือ C_{70} และอื่นๆ คุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งฟูลเลอร์เร็นซ์ประกอบขึ้นจากคาร์บอนอะตอมที่เป็นเลขคู่ เพราะว่าการเพิ่มรูปหกเหลี่ยมเพื่อให้เป็นโครงสร้างที่เป็นอยู่ได้หมายถึง การเพิ่มอะตอมของคาร์บอนคุณสมบัติของนาโนทิวบ์ จึงคล้ายกับประกอบเป็นรูปทรงกระบอก โดยสร้างขึ้นมาจากแผ่น Graphene ที่มีขนาดแน่นอนและห่อขึ้นมาในทิศทางที่แน่นอนทำให้เป็นทรงกระบอกที่สมมาตรกัน โดยได้แสดงการม้วนของแผ่น Graphene ในรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถม้วนแผ่น Graphene ได้ในทิศทางที่แตกต่างกันเพื่อสร้างเป็นทรงกระบอก ได้คาร์บอนสองอะตอม แผ่น Graphene จะถูกเลือกตัวที่หนึ่งใช้เป็นจุดเริ่มต้น โดยแผ่นจะหมุนจนกระทั่งอะตอมตัวที่สองมาบรรจบกันโดยเวกเตอร์จากอะตอมแรกไปอีกอะตอมหนึ่งเรียกว่า chiral เวกเตอร์ และความยาวของมันเท่ากับเส้นรอบวงของนาโนทิวบ์ โดยทิศทางของแกนนาโนทิวบ์จะตั้งฉากกับ chiral เวกเตอร์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มี chiral เวกเตอร์แตกต่างกัน จะมีคุณสมบัติต่างกันด้วย เช่น คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางกลศาสตร์ และ คุณสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 การม้วนของแผ่น Graphene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบระหว่าง Fullerenes กับ Nanotubes

2.3 พื้นฐานเบื้องต้นของคาร์บอนนาโนทิวป์

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์สามารถตรวจสอบได้โดย เครื่อง Transmission Electron Microscopy (TEM) และ Scanning Tunneling Microscopy (STM) ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่านาโนทิวป์มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก ที่เกิดจากแลตทิซที่มีลักษณะคล้ายรังผึ้งซึ่งอยู่ในลักษณะของแผ่น Graphite ที่มีลักษณะเป็นชั้นของอะตอมเพียงชั้นเดียว

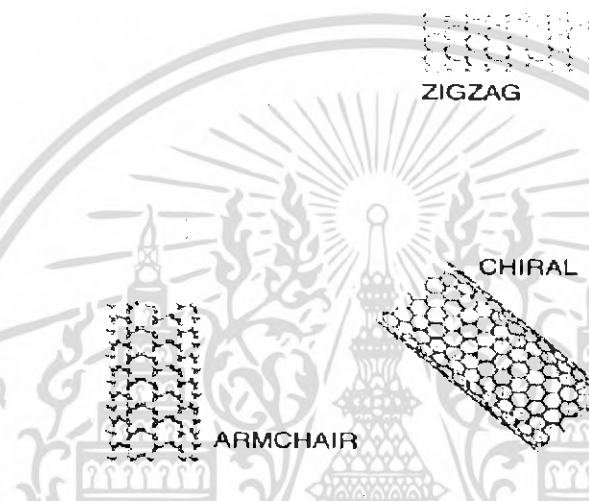
คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon Nanotubes) สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆคือ

2.3.1 Single Walled Carbon nanotubes (SWCNTs)

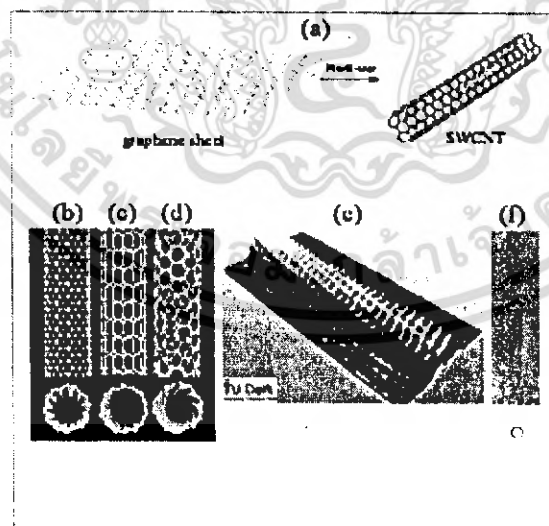
SWCNTs นั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง ซึ่งเหมือนการม้วนแผ่นกราฟไฟต์ (graphene sheet) ให้เป็นท่อทรงกระบอก โครงสร้างของ SWCNTs นั้นยังสามารถแบ่งออกเป็นอีก 3 ชนิดตามลักษณะการม้วน ซึ่งได้แก่ Armchair, Zigzag และ Chiral เส้นผ่าศูนย์กลางนั้นมีขนาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 0.4 -2.0 nm ส่วน MWCNTs นั้น คือการซ้อนกันหลายๆ ชั้นของทิวบ์ โดยที่แต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.34 nm เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของ MWCNTs นั้นมีขนาดประมาณ 1.5-15 nm ส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกนั้นมีขนาดประมาณ 2.5-30 nm คุณสมบัติของ CNTs ไม่ว่าจะเป็นทางด้านไฟฟ้า กลศาสตร์ หรือทางเคมีนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของทิวบ์ เช่น ชนิด (SWCNTs, MWCNTs) เส้นผ่าศูนย์กลาง และ ลักษณะการม้วนของทิวบ์

ซิงเกิลวอลล์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Single walled carbon nanotubes (SWCNTs)) ยังสามารถแบ่งย่อยได้อีก 3 ชนิดตามลักษณะการม้วนคือ 1.) Armchair nanotubes 2.) Zigzag nanotubes และ 3.) Chiral nanotubes ซึ่งได้แสดงลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิดในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิด



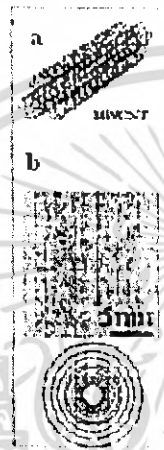
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ SWCNTs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (a) โครงสร้างของ SWCNTs แสดงการม้วนแผ่นกราฟไฟต์ให้เป็น SWCNTs ชนิดของ SWCNTs
 (b) Armchair (c) Zigzag และ (d) Chiral SWCNTs (e) ภาพ STM แสดงระดับอะตอมของ SWCNTs (f) ภาพ TEM ของ SWCNTs

2.3.2 Multi Walled Carbon nanotubes (MWCNTs)

มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ SWCNTs ที่ซ้อนกันเป็นชั้นๆตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป โดยแต่ละชั้นมีระยะห่างกันประมาณ 0.34 nm. ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ MWCNTs

a) โครงสร้างของ MWCNTs (b) ภาพ TEM ของ MWCNTs

2.4 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ คือเป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำ มีความแข็งแรงสูงแต่เบา ทั้งยังมีความยืดหยุ่นที่ดี มีเสถียรภาพดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ และสามารถจับยึดกับโมเลกุลของก๊าซและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ เช่น ชนิดของทิวป์ (ซิงเกิลวอลล์และมัลติวอลล์) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนตัวของทิวป์ ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.4.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่า Young's Modulus สูง สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี จึงสามารถนำมาผสมในวัสดุอื่นๆเพื่อให้ได้วัสดุที่เบาและมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ดีหรือมีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี โดยเมื่อไม่นานมานี้ นักวิทยาศาสตร์ขององค์การนาซา (NASA) ประสบความสำเร็จในการผสมคาร์บอนนาโนทิวป์ลงในโพลีเมอร์ ซึ่งนี่อาจเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเริ่มต้นของการก้าวไปสู่การสังเคราะห์พลาสติก ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ และมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กก็เป็นได้

2.4.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์(CNTs)มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวน้อยมากๆ(ค่าRespect-ratio สูง) ทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้CNTs มีเสถียรภาพที่ดีและทำให้CNTs สามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าต่ำจึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ในอุปกรณ์เช่น จอแสดงผล หลอดไฟฟ้าประหยัดพลังงาน แหล่งกำเนิด X-ray ขนาดเล็กและ แหล่งกำเนิดไมโครเวฟขนาดเล็ก เป็นต้น

2.4.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์เทียบเท่ากับ 1 มิติจึงทำให้มีการนำไฟฟ้าแบบ Ballistic คือไม่มีการกระจายของอิเล็กตรอนตลอดความยาวของทิวบ์ ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดที่จะใช้ ในวงจรรนาโนอิเล็กทรอนิกส์ และนอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย โดยเมื่อไม่นานมานี้ บริษัท ไอบีเอ็ม และกลุ่มของ Prof Dekker ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างทรานซิสเตอร์ และลอจิกเกตจากซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นครั้งแรกของโลก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในคอมพิวเตอร์ในอนาคตได้ ทำให้ลดขนาดของอุปกรณ์และปริมาณในการกินกระแสไฟฟ้าลงได้

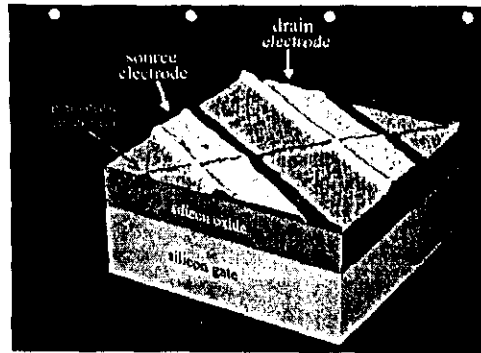
2.4.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร มีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นโพรบของเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างของสาร ในระดับอะตอม เช่น Scanning Probe Microscope (SPM) , Atomic Force Microscopy (AFM) และประดิษฐ์เป็นนาโนทิวบ์ (Nano-Tweezers) และยังสมารถดัดแปลง โดยนำ Functional group ต่างๆ เช่น -COOH มายึดติดที่ปลายทิวบ์เพื่อนำไปใช้ในด้านชีววิทยาและการแพทย์ได้ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถนำมาสร้างเป็นเซนเซอร์ทางเคมีได้ อีกด้วย เช่นทำเป็นเซนเซอร์ก๊าซเช่น $\text{NO}_2, \text{NH}_3, \text{O}_2$ ได้ โดยตรวจสอบจากค่าความต้านทานของทิวบ์ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นต้น

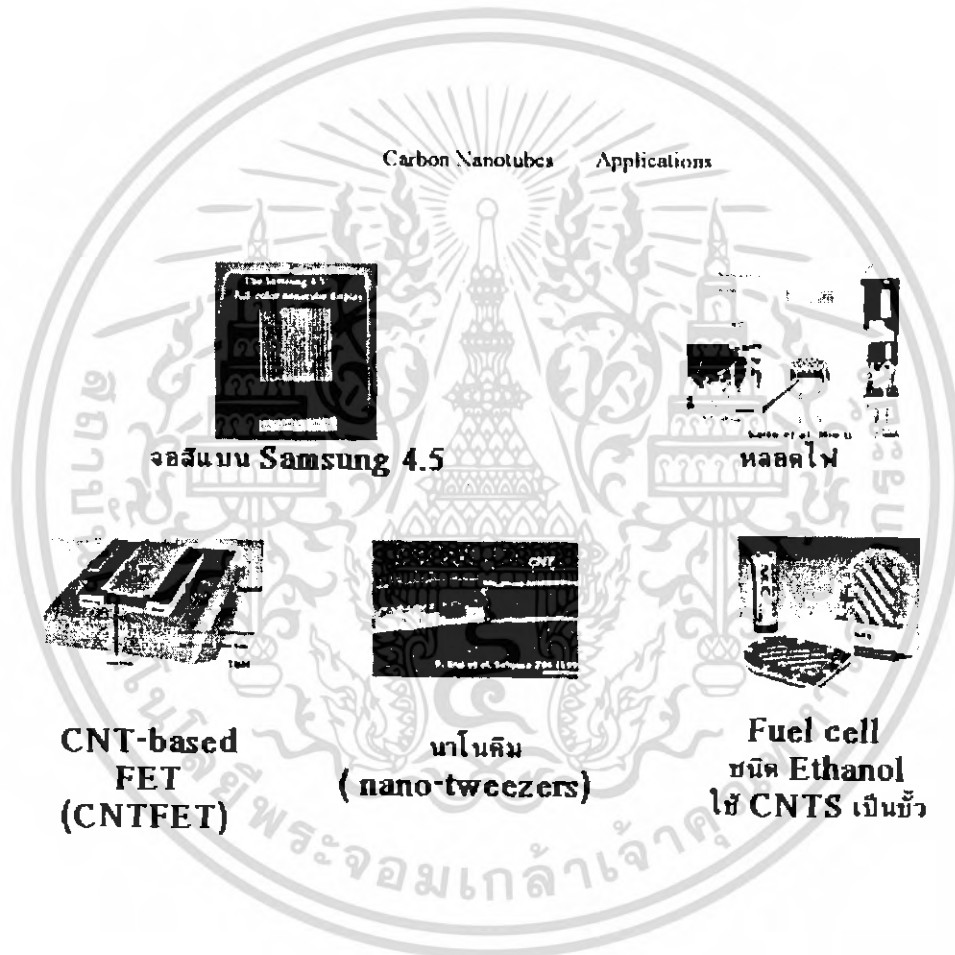
2.4.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตรและมีพื้นที่ผิวที่มาก ทำให้เป็นที่สนใจที่จะนำมาใช้ในการเก็บไฮโดรเจน(H) ซึ่งเป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม โดยมีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dillon แสดงผลการคำนวณว่า SWCNTs จะสามารถกักเก็บไฮโดรเจนได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวบ์มากขึ้นและมีความเป็นไปได้ที่จะเก็บไฮโดรเจนได้ถึง 6.5% โดยน้ำหนักซึ่งเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ในการสร้างทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.8 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

3.1 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ

- 1) Base Growth
- 2) Tip Growth

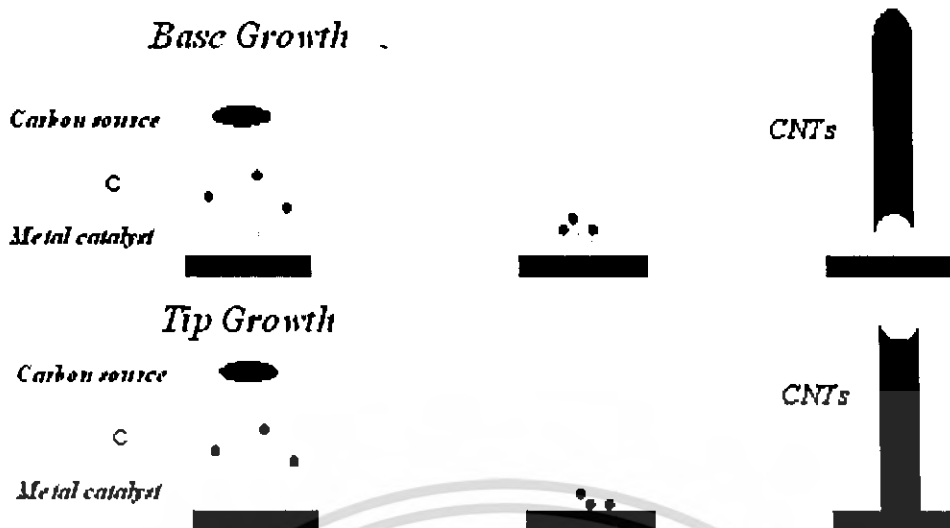
3.1.1) Base Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.1 และสามารถอธิบายได้คือที่อุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon source) และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่ง และเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งสูงกว่าอุณหภูมิด้านบน จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่ง และก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1.2) Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้มีโลหะตัวเร่งอยู่ที่ปลายทิวบ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งสามารถอธิบายได้คือที่อุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่ง และเนื่องจากอุณหภูมิด้านบนของโลหะตัวเร่งสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่าง จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งตกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง และก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

จากกลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้ง 2 ลักษณะ จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีจุดหลอมที่ต่ำ เพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว และโลหะตัวเร่งควรมีความสามารถในการละลายคาร์บอนที่ดี เพื่อให้อะตอมคาร์บอนสามารถละลายในโลหะตัวเร่งได้จำนวนมากๆ



รูปที่ 3.1 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Base Growth และ Tip Growth

3.2) วิธีการสังเคราะห์

CNTsสามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายวิธี แต่วิธีที่มีประสิทธิภาพนั้นมี 3 วิธี แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน

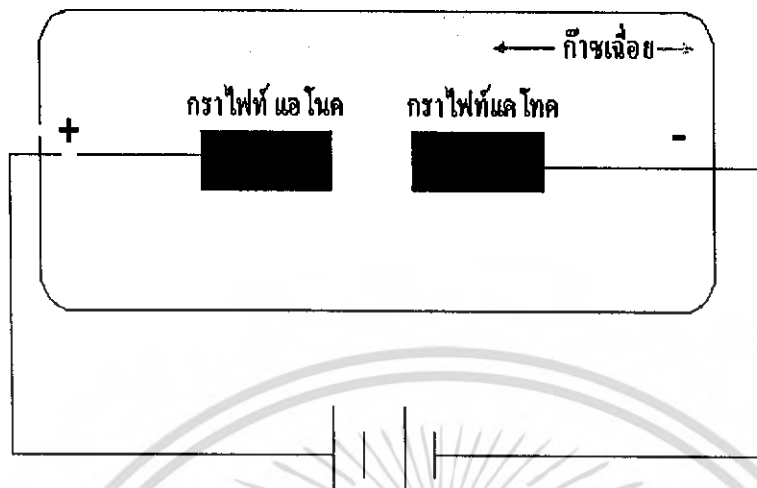
คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถที่จะสังเคราะห์ได้จากสามวิธีการหลักคือ

- 1) วิธี Arc discharge
- 2) วิธี Laser ablation
- 3) วิธี Chemical vapor deposition (CVD)

3.2.1 วิธี Arc discharge

วิธี Arc discharge เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการอาร์คที่ปลายทั้ง 2 ของแท่งกราไฟท์(หรือแท่งคาร์บอน) 2 แท่ง ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยาที่เต็มไปด้วยก๊าซเฉื่อย อาจเป็น ฮีเลียม (helium) ผสมกับ อาร์กอน(argon) หรือ ไนโตรเจนเหลว ที่ความดันต่ำโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสูงเพื่อไปอาร์คแท่งกราไฟท์ ทำให้บริเวณที่ถูกอาร์คมีอุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ เกาะอยู่บนบางส่วนของแท่ง กราไฟท์ ที่หลุดกระเด็นออกมาและรอบบริเวณแท่งกราไฟท์ที่ถูกอาร์ค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมระหว่าง ก๊าซฮีเลียมกับ ก๊าซอาร์กอน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ และการนำความร้อนมีค่าต่างกัน จึงมีผลกระทบกับความเร็วในการแพร่ของ

โลหะตัวเร่ง การเข็นตัวของแท่งคาร์บอนและอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เป็นผลให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ มีขนาดต่างกันออกไปไม่สม่ำเสมอ วิธี Arc discharge สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี Arc discharge

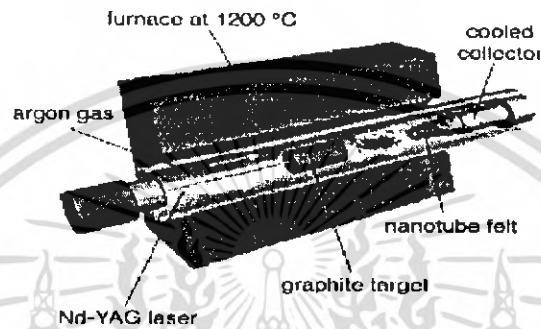
และด้วยวิธีการนี้ ยังสามารถที่จะเลือกให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้ ให้เป็นชนิด ซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SWCNTs) หรือ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (MWCNTs) โดยหากต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นชนิด ซิงเกิลวอลล์ ก็สามารถใช้แท่ง กรรไฟฟ้ ที่เจือด้วยอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก (Fe), โคบอลต์ (Co), นิกเกิล (Ni) หรือ โมลิบดีนัม (Mo) ที่ขั้วแอ โนค และถ้าต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นมัลติวอลล์ ก็สามารถใช้แท่งกรรไฟฟ้บริสุทธิ์ เท่านั้นก็พอ ไม่จำเป็นต้องผสมโลหะตัวเร่งก็ได้ซึ่งเป็นข้อดีของวิธีนี้ ด้วยวิธี Arc discharge นี้ จะทำให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ไม่สะอาด ปะปนกับ เขม่า , โลหะตัวเร่ง และ อะตอมคาร์บอนที่มีรูปร่างไม่แน่นอน จึงต้องผ่านการแยก ให้เหลือเฉพาะคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งจะบ่งบอกและคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ก็ยังคงขึ้นอยู่กับขนาดไม่สม่ำเสมอสั้นบ้างยาวบ้าง

3.2.2 วิธี Laser ablation

ในปี 1995 ทีมวิจัยของ Prof. Smalley ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยการใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูง หลักการคือใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูงยิงไปที่เป้าหมายซึ่งเป็นแท่งกรรไฟฟ้ที่อยู่ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิประมาณ 1200°C ภายในเต็มไปด้วยก๊าซฮีเลียมหรืออาร์กอน ทำให้แท่งกรรไฟฟ้ระเหยออกเป็นไอของคาร์บอน โดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะมี 2 ชนิดคือ pulsed laser และ continuous laser สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง pulsed laser และ continuous laser เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ pulsed laser ต้องใช้ความเข้มของแสงสูงมากแต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่อง ส่วน continuous laser นั้น จะใช้ความเข้มแสงน้อยกว่า แต่จะยิงเลเซอร์ไปที่เป้าหมายอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีมากกว่า 70% และมีความบริสุทธิ์สูงมาก ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ได้จะอยู่ในช่วง 1-2 nm เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงจึงนิยมใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดซิงเกิลวอลล์เท่านั้น วิธี Laser ablation ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.3

Laser furnace

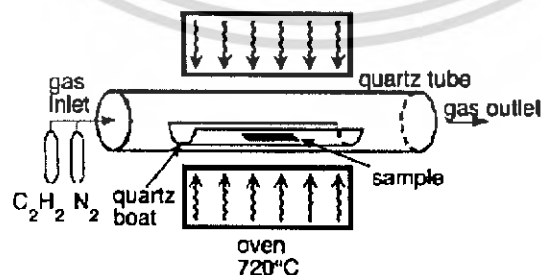


รูปที่ 3.3 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี Laser ablation

3.2.3 วิธี CVD

วิธีแบบ CVD (Chemical Vapor Deposition) คือการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วย อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวบ์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวบ์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัตถุที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ วิธี CVD ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.4

• Chemical vapor deposition (CVD)



รูปที่ 3.4 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สรุปวิธีการสังเคราะห์ CNTs 3 วิธีหลัก

| วิธี | Arc Discharge | Laser Ablation | CVD |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| วิธีการสังเคราะห์ | ป้อนกระแสไฟสูงประมาณ 100 A ระหว่างแท่งกราไฟต์ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm เพื่อให้เกิด hot-plasma ขึ้น CNTs จะก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว (โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ในบรรยากาศของก๊าซ He) | ใช้เลเซอร์พลังสูงยิงใส่แท่งคาร์บอนที่มีโลหะผสม ทำให้เกิดการระเหยของคาร์บอน และ จากนั้น CNTs ก็ก่อรูปขึ้น (โดยส่วนมากสังเคราะห์ใน บรรยากาศของก๊าซ Ar ที่อุณหภูมิประมาณ 1200 °C) | เป็นการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น มีเทน) โดยใช้ความร้อน หรือ Plasma เข้าช่วยมีโลหะเป็นตัวเร่งการสังเคราะห์ (อุณหภูมิประมาณ 400 - 1200 °C) |
| ประสิทธิภาพของผลผลิต | 30-90% | มากกว่า 70% | 20-90 |
| SWCNT | - ขนาดสั้น - Ø: 0.6-1.4 nm | - ขนาดสั้น - Ø: 0.6-1.4 nm | - ขนาดยาวมาก - Ø: ขนาดสั้น 0.6 -4 nm |
| MWCNT | - ขนาดสั้น - Ø: (ใน) 1-3 nm (นอก) 10 nm | เนื่องจากวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ MW-CNTs แต่สามารถสังเคราะห์ได้ | - ยาวมาก (> 20 nm) - Ø: 10 -200 nm |
| ข้อดี | - เป็นวิธีที่ง่าย และ ค่าใช้จ่ายถูก - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย - สามารถสังเคราะห์ MW-CNTs ได้ โดยไม่ต้องใช้ โลหะเป็นตัวเร่ง - สามารถทำได้ในความดันบรรยากาศห้อง | - ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่เป็น SWCNTs - ความบริสุทธิ์สูง - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย | - สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีอื่น - ขนาดของ SWCNT ยาว - สามารถกำหนดทิศทางของ และตำแหน่งของทิวป์ได้ง่าย - ความบริสุทธิ์อยู่ในเกณฑ์ดี - สามารถที่จะสังเคราะห์ในเชิงอุตสาหกรรมได้ |
| ข้อเสีย | - ความยาวของทิวป์สั้น และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ - มีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก | - เป็นวิธีที่แพงเนื่องจากต้องใช้เลเซอร์ที่มีกำลังสูง | - เมื่อเทียบกับวิธี Laser ablation ทิวป์ที่ได้มี Defect อยู่บ้าง แต่ไม่มาก |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธี CVD นั้นยังสามารถแยกย่อยตามความแตกต่างของวิธีการแยกก๊าซและวิธีการเตรียมโลหะตัวเร่งออกเป็น 5 วิธีใหญ่คือ

3.2.3.1 วิธี Thermal chemical vapor deposition

วิธี Thermal CVD เป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมชั้นออกไซด์ของซิลิคอน (Si) และเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ทั้งชนิด ซิงเกิลวอลล์ และมัลติวอลล์ ใช้โลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก(Fe), โคบอล(Co), นิกเกิล(Ni), โมลิบดีนัม(Mo) หรือ อัดลอยของโลหะเหล่านี้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีขนาดยาวอยู่ในช่วง 0.6-4 nm

3.2.3.2 Plasma enhanced chemical vapor deposition (PE-CVD)

วิธีPlasma CVD เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C โลหะตัวเร่งที่ใช้คือ เหล็ก (Fe), นิกเกิล (Ni) และ โคบอล (Co) นอกจากนี้วิธีนี้ยังเป็นวิธีที่สามารถกำหนดทิศทางการเกิดของทิวป์ให้ทิวป์ตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้ แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดมัลติวอลล์ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิดซิงเกิลวอลล์ได้ แต่ปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดซิงเกิลวอลล์ได้แล้ว

3.2.3.3 Vapor phase growth

เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นก๊าซของโลหะ เช่น Ferrocene ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ครั้งละเป็นจำนวนมากๆ และทิวป์ที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาวมากๆ (มากกว่า 20 μm) และ มีความบริสุทธิ์มากกว่า 80 % แต่เนื่องจากวิธีนี้มักจะใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายจึงต้องระมัดระวังอย่างมากนอกจากนี้วิธีนี้ยังยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดทิวป์อีกด้วย

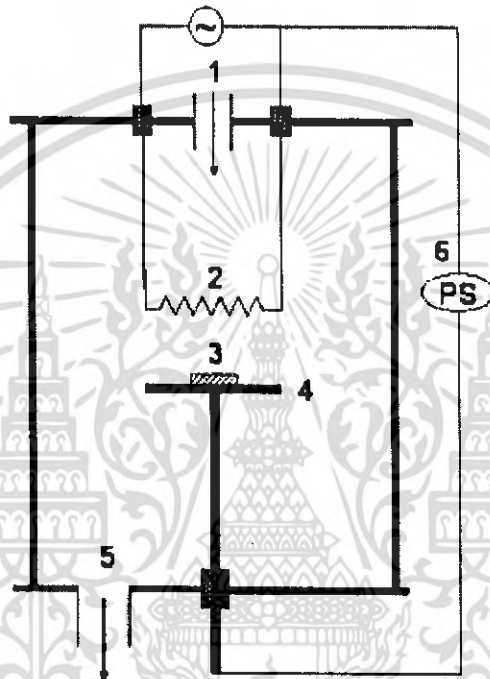
3.2.3.4 High pressure CO disproportionate process

วิธีนี้จะคล้ายกับวิธี Vapor phase growth คือ ใช้ก๊าซของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์(CO)เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน(Carbon source)จึงต้องระมัดระวังอันตรายจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์(CO)ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ การควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นทำได้ยาก แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะมีปริมาณที่มาก มีความบริสุทธิ์สูงมากประมาณ 80 % และมีสิ่งเจือปนน้อย

3.2.3.5 Hot filament enhance CVD (HF-CVD)

สำหรับวิธีนี้ จะมีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแก่ก๊าซ วิธี HF-CVD นี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและในเชิงพาณิชย์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร

หลักการคือ ใช้ไฟฟ้ากระแสสูงจ่ายให้ขดลวดความร้อน เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้น ที่ขดลวดมีฐานรองสำหรับวางโลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก (Fe) และ โคบอล (Co) ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา(Chamber)จะมีท่อนำก๊าซซึ่งเป็นก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบเช่น ไอของแอลกอฮอล์หรือมีเทน(CH₄) เป็นต้น เข้ามาภายในระบบ ความร้อนจากขดลวดความร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ 1600–2000°C จะทำให้โมเลกุลของก๊าซมีอุณหภูมิสูงและถูกเร่งปฏิกิริยาโดยโลหะตัวเร่ง อะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆจะแตกตัวออกจากโมเลกุลของก๊าซและไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่ง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยแสดงระบบของ HF-CVD ในรูปที่ 3.5



Schematic of the hot filament chemical vapor deposition system. (1) gas inlet, (2) filament, (3) substrate, (4) substrate holder, (5) pumping port and (6) dc power supply, ± 600 V.

รูปที่ 3.5 ระบบของ HF-CVD

แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน วิธี Thermal CVD เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ทั้ง SWCNTs และ MWCNTs ส่วน PE-CVD นั้นสามารถสังเคราะห์ CNTs ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400°C) แต่ CNTs ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีนี้โดยส่วนมากจะเป็นชนิด multi-walled เท่านั้น ส่วนวิธี HF-CVD นั้นมีหลักการเดียวกันกับวิธี Thermal CVD เพียงแต่ใช้ Filament ที่มีอุณหภูมิสูงในการแยกก๊าซออกเท่านั้น ข้อดีของวิธีนี้คือง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ แต่โดยส่วนมากแล้วคุณภาพของ CNTs ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้ยังมีคุณภาพที่ต่ำอยู่ทว่ายังสามารถพัฒนาได้อีก ส่วนวิธี Vapor phase growth นั้น ใช้ก๊าซของโลหะ เช่น ferrocene, Fe(CO)₅ ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก สองวิธีหลังนี้สามารถสังเคราะห์ CNTs ที่ละจำนวนมากได้ แต่มีข้อเสียคือ

ไม่สามารถควบคุมทิศทางและตำแหน่งของทิวป์ได้ง่ายนัก และ ก๊าซที่ใช้ส่วนมากมีพิษ (เช่น CO เป็นต้น)

โดยในการวิจัยของเรานั้นจะเลือกใช้วิธี CVD แบบลวดความร้อน (HFCVD) เป็นวิธีในการสังเคราะห์ CNTs โดย ใช้เอทานอลผสมก๊าซไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วนพอเหมาะแหล่งจ่ายไอระเหยคือ ไล่ลวดความร้อนถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 2000°C อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วง 550-750°C โดยกระทำที่ความดันบรรยากาศ

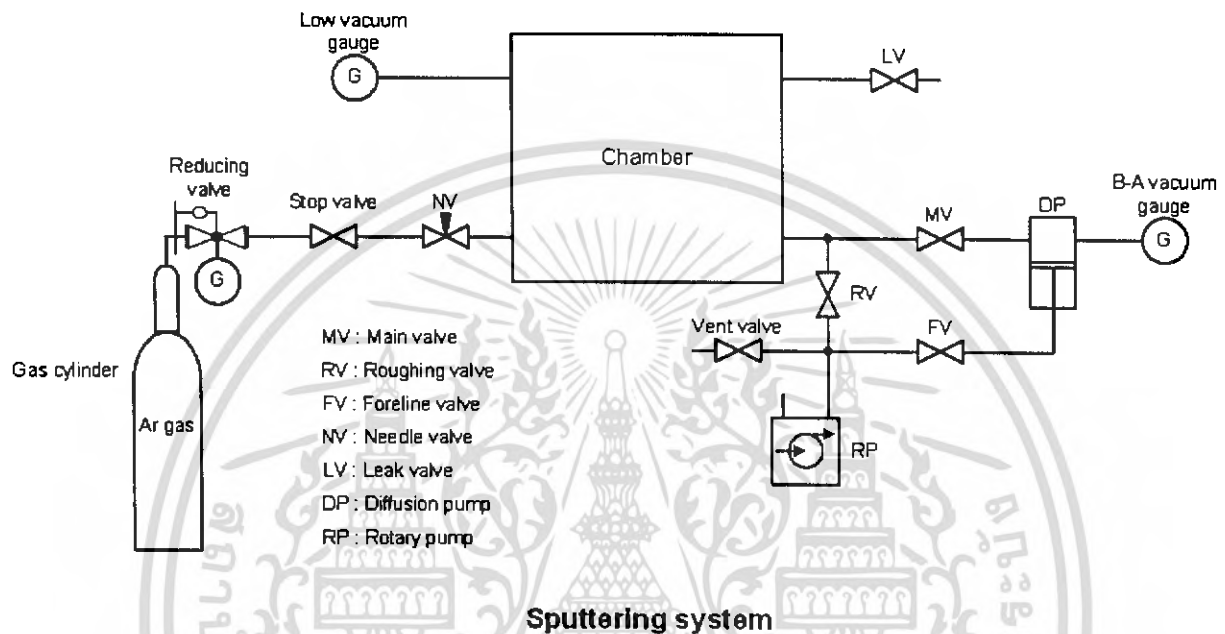


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน

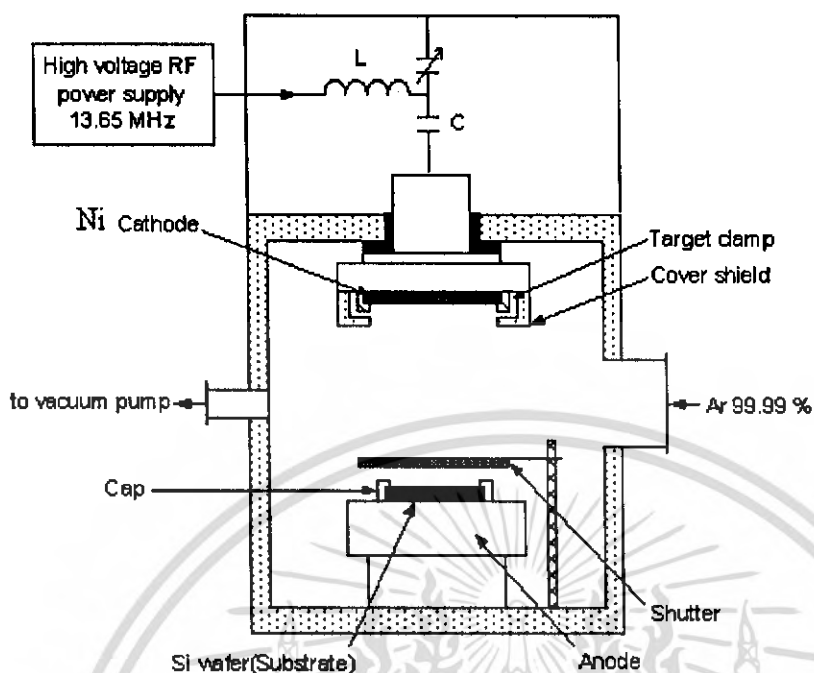
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “ อาร์เอฟ ไดโอด สปัตเตอร์”]



รูปที่ 4.1 Sputtering System Diagram ของเครื่อง SPE-210 Diode Sputtering System

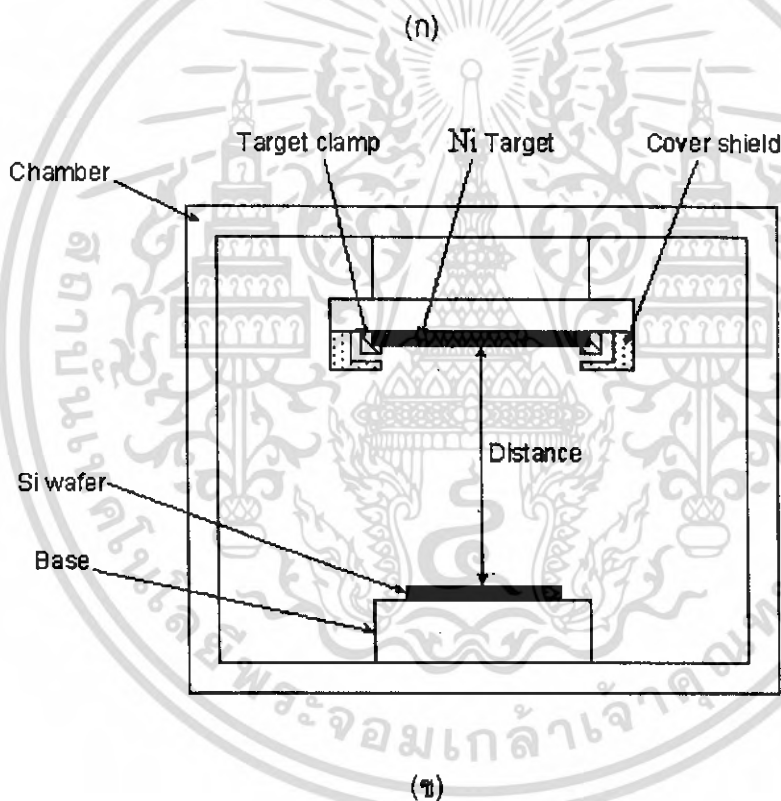
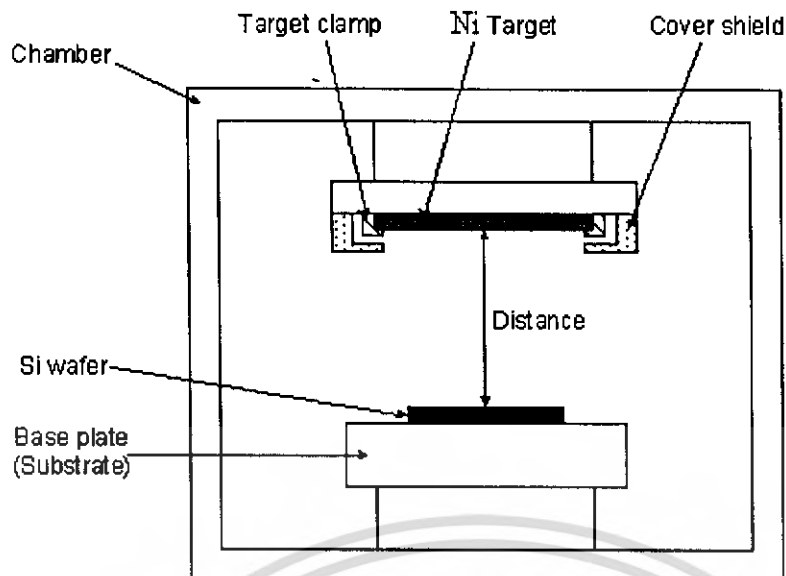
จากไดอะแกรมในรูปที่ 4.1 แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปัตเตอร์ ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งมีความถี่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (13.65 MHz) , แหล่งจ่ายแก๊ส , ห้องสปัตเตอร์(sputtering chamber), และปั๊มสุญญากาศ(rotary and diffusion pump) ภายในห้องสปัตเตอร์ประกอบด้วย ขั้วคาโทด (cathode) ขั้วแอโนด (anode) และชัตเตอร์ (shutter) โดยแผ่นอลูมิเนียมซิลิคอน (Al-Si (2wt%)) เป็นเป้าถูกติดไว้กับขั้วคาโทด ดังแสดงในรูปที่ 4.2 การสปัตเตอร์เกิดจากการป้อนกำลัง RF ผ่านวงจรมะทซึ่งเข้าสู่ห้องสปัตเตอร์ซึ่งอยู่ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออน เกิดเป็นพลาสมาขึ้นมาในบริเวณระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด เนื่องจากขั้วแอโนดต่ออยู่กับผนังห้องสปัตเตอร์ ทำให้พื้นที่ของขั้วแอโนดมากกว่าขั้วคาโทด จึงเกิดการเหนี่ยวนำขั้วคาโทดให้มีศักย์เป็นลบ และดึงดูดไอออนบวกในพลาสมาให้พุ่งเข้าชน โดย Ni ที่ขั้วคาโทด ทำให้อะตอมของ Ni กระเด็นออกมาและสะสมบนผิวฐานรองแผ่นซิลิคอนซึ่งวางที่ขั้วแอโนด เกิดเป็นฟิล์มโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ระบบการสปีดเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด

ขั้นตอนการสปีดเตอร์ เริ่มด้วยการนำแผ่นซิลิคอน หนา(100) วางลงบนขั้วอาโนด แล้วดูดอากาศออกจากห้องสปีดเตอร์จนกระทั่งเหลือความดันต่ำกว่า 5×10^{-7} บาร์ เพื่อทำความสะอาดห้องสปีดเตอร์ จากนั้นปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปในห้องสปีดเตอร์จนกระทั่งถึงความดัน 2×10^{-1} bar โดยค่อยๆ เพิ่มกำลัง RF ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดพลาสมาขึ้นในห้องสปีดเตอร์ จากนั้นปรับความดันให้ได้ 2×10^{-3} bar [13,10] ปรับกำลัง RF จนได้ค่าที่จะทำการสปีดเตอร์ ทำการพรี-สปีดเตอร์ (pre-sputter) โดยปล่อยให้ระบบอยู่ในเงื่อนไขที่จะทำการสปีดเตอร์เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของ Ni จึงเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มทำการสปีดเตอร์ ดังแสดงตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 แผนภาพภายใน chamber ของเครื่องสเปคเตอร์

(ก) ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วแอโนด ที่ 27 cm

(ข) ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วแอโนด ที่ 37 cm

กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะเริ่มด้วยการปรับระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด ซึ่งมีสองระยะคือ 27 และ 37 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งระยะความห่างที่ 27 mm จะมีขีดจำกัด

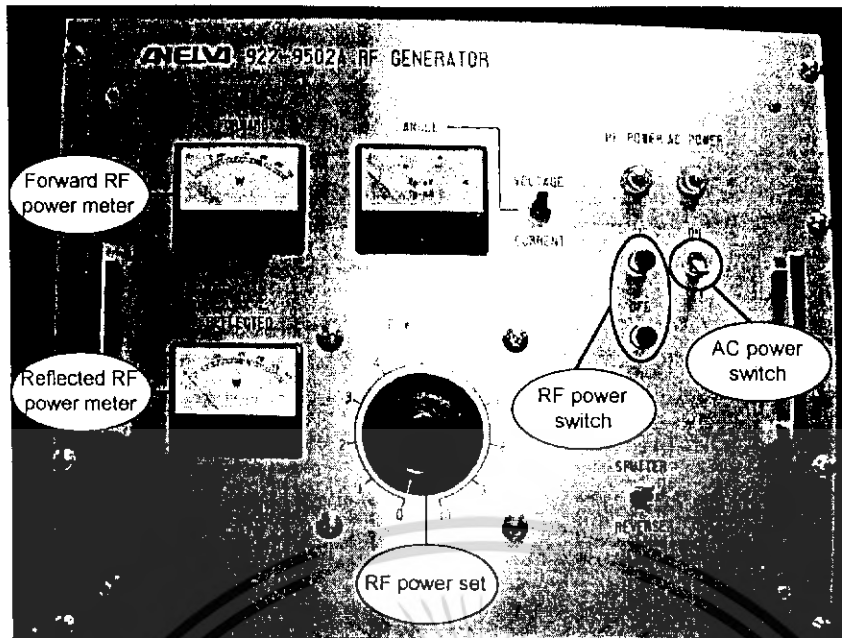
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่องความดันที่ให้อ่างฟิล์ม ซึ่งจะมีช่วงการใช้งานได้ที่ความดันต่ำสุดที่ 2×10^{-2} bar [13] ผลของฟิล์มโลหะที่ได้มีสีเทาดำและมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นฉนวน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับระยะห่างระหว่างขั้วให้มากขึ้นไปที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 37 mm จะทำให้ช่วงความดันในการสปีดเตอร์ลดลงอยู่ในช่วง $2-5 \times 10^{-3}$ bar ทำให้ได้ฟิล์มโลหะมีคุณภาพดีขึ้น ในระหว่างกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะจะเกิดความร้อนทั้งขั้วคาโทดและขั้วแอโนดเนื่องจากอะตอมของอาร์กอนวิ่งไปชนขั้วคาโทด ซึ่งมีโลหะ Ni ทำให้อะตอมของโลหะกระเด็นตกลงมาที่แผ่นซิลิคอนและคลายความร้อนลงบนแผ่นซิลิคอน ซึ่งความร้อนนี้จะมีผลการเรียงตัวอะตอมโลหะ Ni ดังนั้นต้องควบคุมอุณหภูมิที่ขั้วแอโนดไม่ให้เกิน 40°C จะได้ฟิล์มโลหะที่มีคุณภาพดีขึ้น

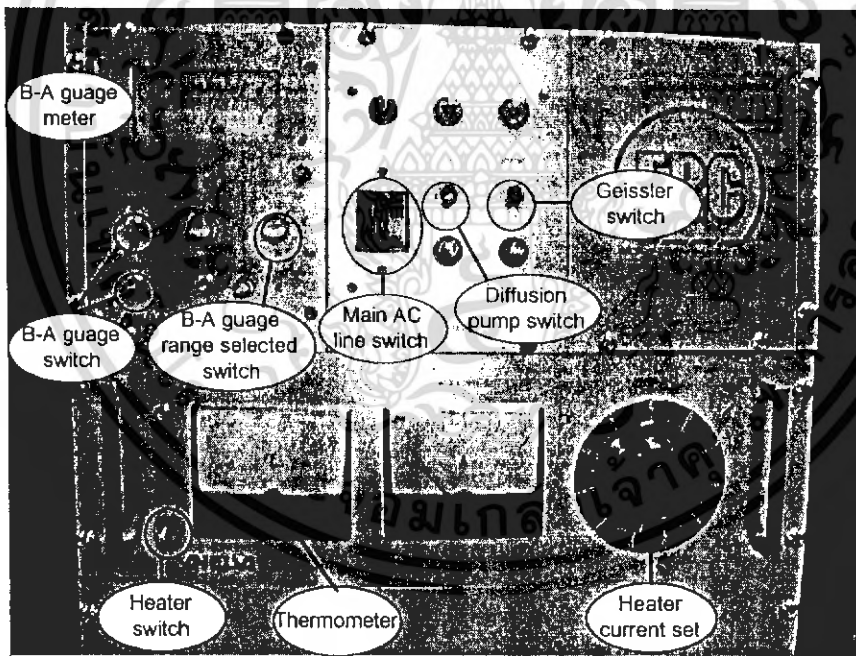
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการสปีดเตอร์ Ni ในการทดลอง

| เงื่อนไข | รายละเอียด |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| ขั้ว คาโทด | เป้าโลหะ Ni (2wt%) ขนาด \varnothing 80 mm. ความบริสุทธิ์ 99.999% |
| บรรยากาศ | อาร์กอน 99.99 % |
| ความดัน | $2-5 \times 10^{-3}$ bar |
| ระยะห่างของขั้วคาโทดและขั้วแอโนด | 37 mm |
| กำลังงาน RF | 100 - 150 วัตต์ |
| อุณหภูมิของแอโนด | $25 - 30^{\circ}\text{C}$ |
| ฐานรอง | ซิลิคอน หนา 100) ปกคลุมด้วยซิลิคอนไดออกไซด์ 0.3 ไมครอน |

จากเงื่อนไขของการสปีดเตอร์ทั้งหมดสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนการทำงานในระบบของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปีดเตอร์ได้ดังนี้



รูปที่ 4.4 Panel of RF Generator



รูปที่ 4.5 Panel of Pump Switch ,Ionizing Gauge and Heater

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน

5.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์
2. เพื่อหาฐานรองต่างๆที่ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์
3. เพื่อหาค่าที่ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้บนฐานรอง ต่างๆ

5.2 อุปกรณ์และสารเคมี

1. ท่อแก้ว(pyrex)ที่ใช้เป็นห้องทำปฏิกิริยา(Chamber)
2. แอลกอฮอล์(Ethanol)
3. ลวดทังสเตน
4. ถังเก็บก๊าซไฮโดรเจน (H_2)
5. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง
6. เครื่องวัดอัตราการไหล(Flow meter)
7. เทอร์โมคัปเปิล
8. สารละลายเหล็กระหว่างไนเตรต($Fe(NO_3)_3$)กับเอทานอล

ฐานรองที่ใช้ในการทดลอง

1. ชั้นคาร์บอน
2. แผ่นซิลิกอนที่มีตัวคะตะไลต์เป็นเหล็กโดยแบ่งออกเป็น
 - 2.1 ฐานรองซิลิกอนผิวมันวาวจุ่มลงในสารละลายเอทานอลผสมผงเหล็ก
 - 2.2 ฐานรองซิลิกอนผิวถูกขีดข่วนด้วยกระดาษทรายและนำมาจุ่มลงในสารละลายเอทานอลผสมผงเหล็ก
3. ชั้นทองแดง
4. ชั้นกราฟไฟท์ จากไส้ดินสอด 2B
5. ซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 14 นาที
6. ซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที
7. แผ่นทองแดงที่ชุบด้วยนิเกิล

5.3 ขั้นตอนการทดลอง

5.3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองต่างๆที่เตรียมไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองการปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน โดยการใ้ฐานรองต่างๆ ในการทดลอง ก็เพื่อหาเงื่อนไขอุณหภูมิพื้นผิววัสดุฐานรอง เพื่อนที่จะนำมาใช้สังเคราะห์ท่อคาร์บอน

เราแบ่งการขั้นตอนการเตรียมฐานรองได้ดังนี้

ในการทดลองแรกนี้เราใช้ฐานรอง 4 ชนิดคือ

1. ชี้นคาร์บอน
2. แผ่นซิลิกอนที่มีตัวคะตะไลต์เป็นหลัก โดยแบ่งออกเป็น
 - 2.1 ฐานรองซิลิกอนผิวมันวาวจุ่มลงในสารละลายเอทานอลผสมผงเหล็ก
 - 2.2 ฐานรองซิลิกอนผิวถูกขีดข่วนด้วยกระดาษทรายและนำมาจุ่มลงในสารละลายเอทานอลผสมผงเหล็ก
3. ชี้นทองแดง
4. ชี้นกราไฟท์ จากใส่คินสอ 2B

โดยการเตรียมฐานรองแผ่นซิลิกอนที่มีตัวคะตะไลต์เป็นหลัก เราสามารถทำได้โดยนำสารละลายประกอบเหล็กในเตรตมาผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์และคนละลายให้เข้ากัน จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนผิวมันวาวและที่มีรอยขีดข่วนจากการขีดด้วยกระดาษทรายมาจุ่มลงในสารละลายคิงกล่าวและปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

5.3.2 การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ให้สม่ำเสมอในบริเวณกว้าง

โดยจากการทดลอง 5.3.1 เราได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองที่ได้เตรียมไว้ได้ง่ายๆ เพื่อให้ทราบว่าวิธีการสังเคราะห์แบบ HFCVD สามารถสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ได้บนฐานรองชนิดต่างๆ โดยจากผลการทดลองที่ได้พบว่าคุณสมบัติของฟิล์มที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า ลักษณะของฟิล์มยังมีลักษณะไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ดังนั้น การทดลองนี้เราจึงมีจุดประสงค์เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ในบริเวณกว้าง

เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้เราจำเป็นต้องมีการเตรียมฐานรองขึ้นมาใหม่ โดยฐานรองที่เตรียมขึ้นมาใหม่นี้จะต้องมีคะตะไลต์ทั่วทั้งแผ่นเพื่อให้สามารถสังเคราะห์ให้เกิดฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ในบริเวณกว้าง โดยเราเลือก การสปีดเตอร์ริงมาเป็นวิธีในการเตรียมฐานรองของเรา ซึ่งการสปีดเตอร์ริงนี้เป็นเทคนิคที่ใช้ในการทำขั้วโลหะสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป โดยคะตะไลต์ที่เราเลือกใช้คือนิกเกิล(นิกเกิล) ซึ่งหลักการสปีดเตอร์ริงเราได้อธิบายไว้ยังบทที่ 4 ของรายงานฉบับนี้ โดยเราทำการสปีดภายใต้เงื่อนไขระยะเวลาการสปีด โดยระยะเวลาการสปีดเตอร์ริงจะส่งผลให้ความหนาแน่นต่างกันโดยการทดลองนี้เราจะใช้ค่าเวลาที่แตกต่างกัน 2 ค่าคือ

1. เวลาในการสปีดเตอร์ 90 วินาที โดยระยะเวลาในการสปีดเตอร์ 90 วินาทีนี้จะทำให้ได้ฐานรองที่มี นิกเกิล ไม่เกาะกันเป็นฟิล์มแต่จะเป็นก้อนกระจัดกระจายบนฐานรองสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น

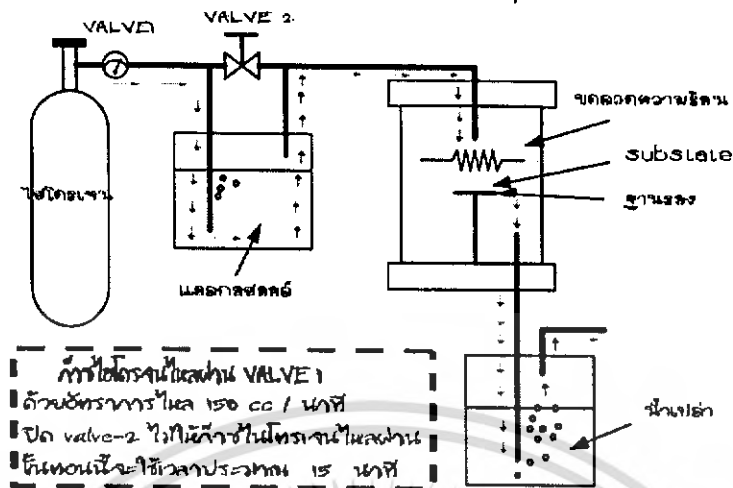
2. เวลาในการสปีดเตอร์ 14 นาที โดยระยะเวลาในการสปีดเตอร์ 14 นาทีนี้จะทำให้ได้ฐานรองที่มี ฟิล์มนิกเกิลเคลือบบนฐานรองซิลิกอนมีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร

และในการทดลองในขั้นตอนนี้เราได้ทำการเตรียมฐานรองอีกชนิดคือ ทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิล ทำให้เกิดลักษณะคล้ายฟิล์มนิกเกิลบนฐานรองซิลิกอนในบริเวณกว้าง

เงื่อนไขการสังเคราะห์กระทำที่อุณหภูมิฐานรองในช่วง 550-900°C อัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนผ่านเอทธานอลต่อไฮโดรเจนรวมคือ 8-10% โดยโครงสร้างของการทดลองนี้จะใช้หลอดทดลองตั้งเป็นหลอดความร้อนซึ่งถูกให้กระแสเข้าไปจากภายนอกทำให้เกิดความร้อน 2000°C ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 - 0.3 mm. ถูกทำให้ร้อนโดยแหล่งจ่ายไฟที่มีค่า 30-40 v และกระแส 9-10 A. เครื่องวัดอุณหภูมิถูกติดตั้งตรงด้านล่างของฐานรองเพื่อที่จะวัดอุณหภูมิของฐานรอง และนำวัสดุฐานรองวางลงบนแท่นจับซึ่งอยู่ใต้หลอดความร้อน การเคปโพสิทชันโดยทั่วไปใช้อุณหภูมิ 750°C ระยะห่างระหว่างหลอดและฐานรอง 3-5 mm. การเคปโพสิทชันในแชมเบอร์ จากนั้นก็ปล่อยก๊าซ C_2H_5OH และ H_2 เข้ามา ก๊าซ C_2H_5OH ที่ถูกนำเข้ามาใช้แยกมวลการปล่อยที่ควบคุมให้ได้อัตราตามที่ต้องการ (0.5 sccm, ถูกเปลี่ยนจาก 0.2 เป็น 0.1 sccm) ก๊าซ H_2 ที่ถูกนำเข้ามา ควบคุมค่าคงที่ของมวลการปล่อยด้วยอัตรา 35 sccm เมื่อการทำงานนี้เสถียรภาพค่าที่ตั้งไว้ (2.66 กิโลปาสคาล, ถูกเปลี่ยนแปลงค่าในช่วง 2.66-3.99 กิโลปาสคาล) กระแสไฟจะถูกส่งไปที่หลอดทดลอง การปลุกโดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 40-60 นาที หลังจากนั้น ฟิล์มที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วย SEM

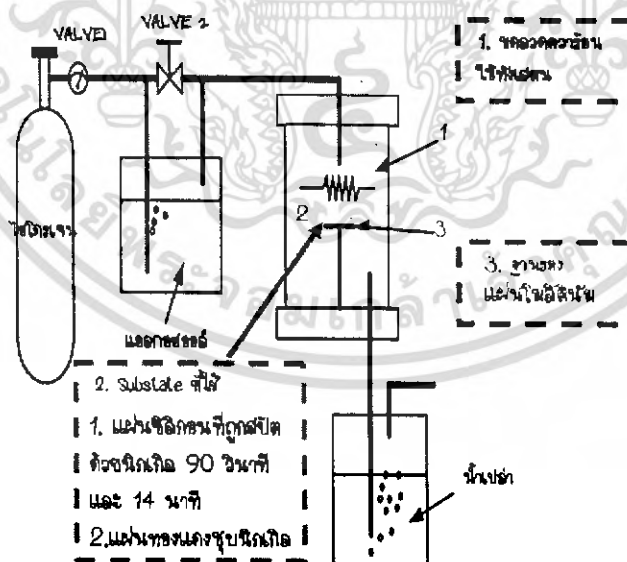
รูปที่ 5.1 เป็นภาพแสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี Hot-filament enhance CVD (HF-CVD) ที่ความดันบรรยากาศ ประกอบด้วย ท่อแก้ว (Chamber) ซึ่งภายในใช้ในการเกิดปฏิกิริยา, แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง, หลอดทดลอง ซึ่งใช้เป็นหลอดความร้อน (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm ความยาวประมาณ 30 mm), แอลกอฮอล์ (Ethanol) ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon source), ที่วางฐานรอง, เครื่องวัดอัตราการไหล (flow meter), น้ำ ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกเข้ามาบรบกวนภายในระบบและช่วยถ่ายเทอากาศจากภายในระบบออกสู่ภายนอก, ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ใช้เป็นก๊าซนำพา (Carrier gas) ช่วยเร่งการระเหยแอลกอฮอล์

ภาพทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 1



รูปที่ 5.1 เป็นภาพแสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

โดยก่อนที่จะทำการทดลองจะต้องทำการไล่อากาศภายใน Chamber เสียก่อน เพื่อไม่ให้เกิดการออกซิไดซ์ในขณะที่ทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยการให้แก๊สไฮโดรเจนไหลผ่าน Valve-1 เข้าไปใน Chamber ด้วยอัตราการไหล 150 cc / นาที แต่ปิด valve-2 ไม่ให้แก๊สไฮโดรเจนไหลผ่าน โดยในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15 นาที ดังรูป

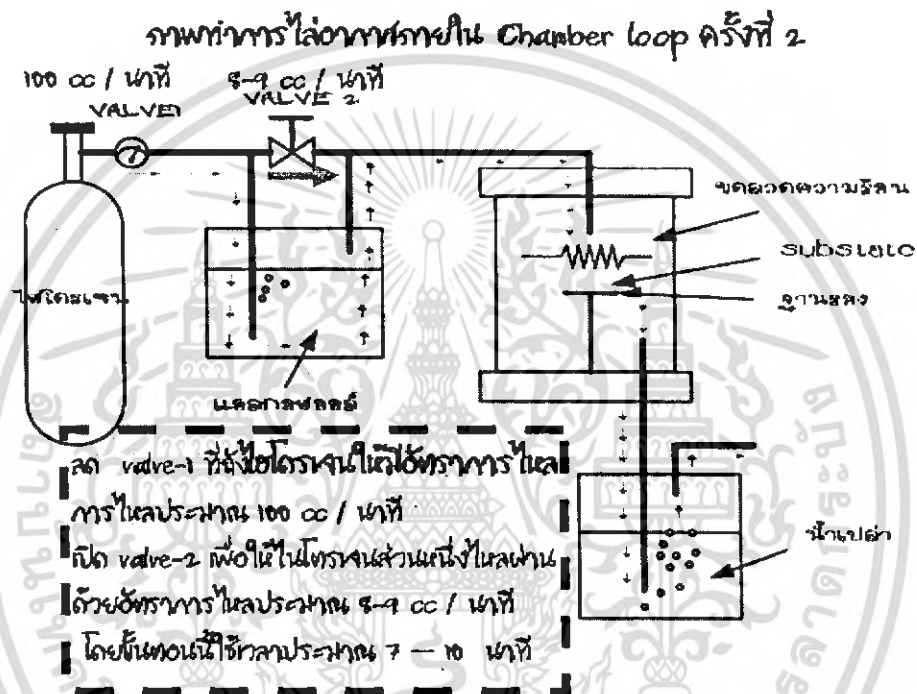


รูปที่

รูปที่ 5.2 ทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 1

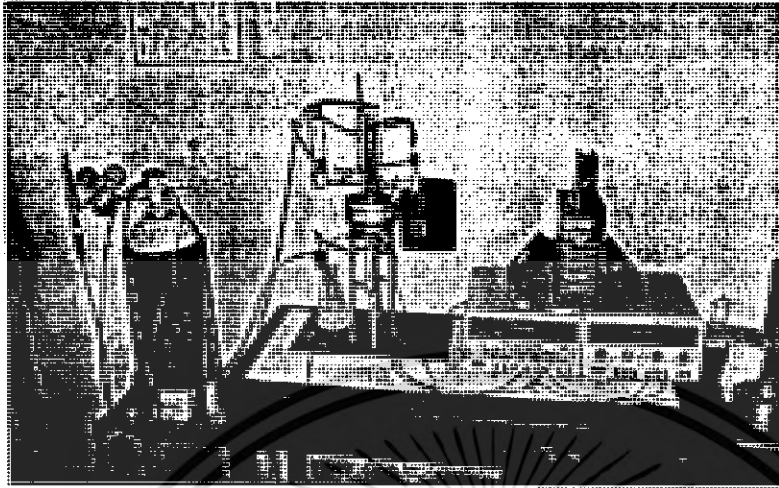
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการไล่อากาศใน Chamber อีกครั้ง ขั้นตอนนี้ทำการลด valve-1 ที่ตั้งไฮโดรเจน ให้มีอัตราการไหลประมาณ 100 cc / นาที เปิด valve-2 เพื่อให้ไฮโดรเจนส่วนหนึ่งไหลผ่านด้วย อัตราการไหลประมาณ 8-9 cc / นาที โดยขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 7 นาที โดยก๊าซไฮโดรเจน ถูกแบ่งเป็นสองทางทางหนึ่งผ่านสารเอทธานอล ทำให้เกิดฟองอากาศพัดพาเอาไอระเหยของแอลกอฮอล์มาผสมกับอีกทางหนึ่งซึ่งเป็นไฮโดรเจนรวมกันเป็นสารจ่ายไอระเหย อัตราส่วนทั้งสองส่วนถูกควบคุมด้วยมิเตอร์การไหลและวาล์วคั่งรูป



รูปที่ 5.3 ทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2

จากนั้นทำการให้ความร้อน โดยใช้ขดลวดทั้งสแตนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. ถูกทำ
ให้ร้อนโดยแหล่งจ่ายไฟที่มีค่า 30-40 v และกระแส 9-10 A. เริ่มกระบวนการสังเคราะห์
คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 40-60 นาที จากนั้นทำการปิด valve-1 และรอ
ให้ไฮโดรเจนหยุดไหลเข้า Chamber และรอให้อุณหภูมิตกลง จากนั้นนำ sample ออก



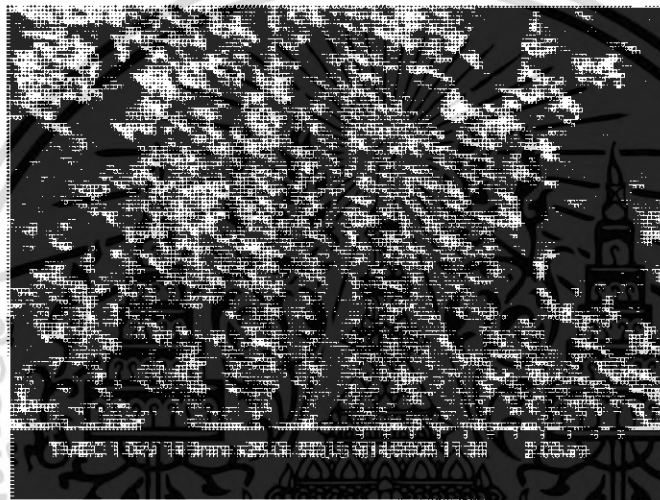
รูปที่ 5.4 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

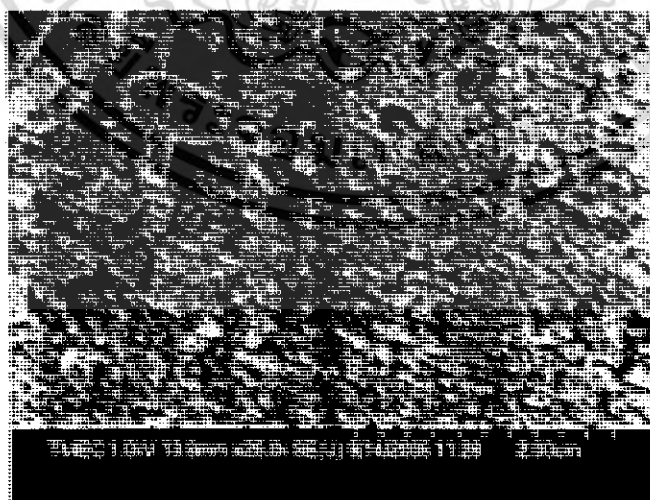
ผลการทดลองและการอภิปราย

รูปที่ 5.5.1 และ 5.5.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบน ฐานรองซิลิกอนที่ถูกแผ่ด้วยผงเหล็กที่อุณหภูมิ 600-700 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 102 W. |
| Temperature | 600-700 °C |
| Time | 45minute |



รูปที่ 5.5.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบน ฐานรองซิลิกอนที่ถูกแผ่ด้วยผงเหล็กที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณตรงกลาง

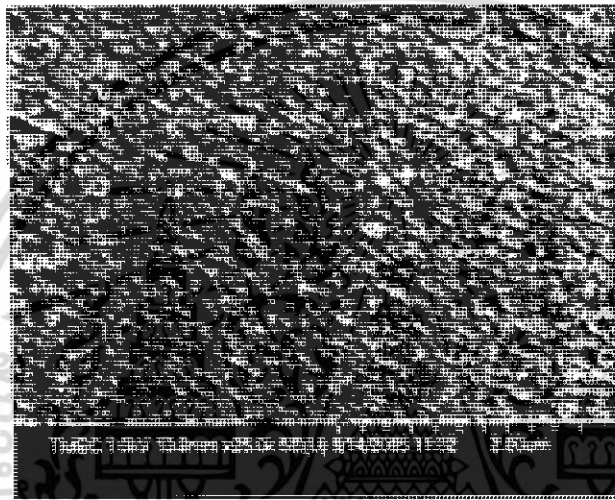


รูปที่ 5.5.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบน ฐานรองซิลิกอนที่ถูกแผ่ด้วยผงเหล็กที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณอื่นๆ

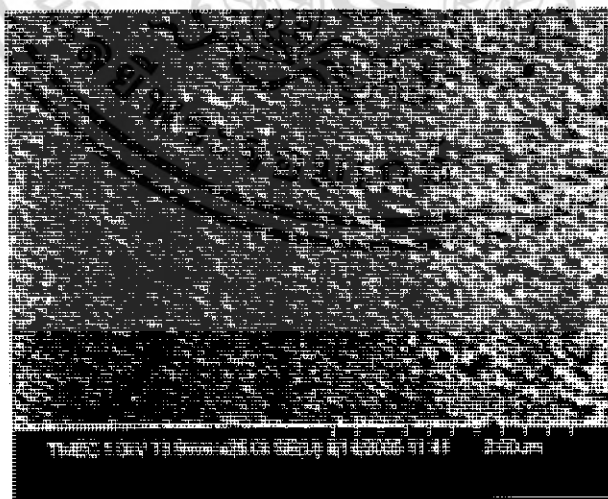
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.6.1 และ 5.6.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบน ฐานรองซิลิกอนที่ถูกเสกสรด้วยผงเหล็กที่อุณหภูมิ 700-800 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 158 W. |
| Temperature | 700-800 °C |
| Time | 40minute |



รูปที่ 5.6.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบน ฐานรองซิลิกอนที่ถูกเสกสรด้วยผงเหล็กที่อุณหภูมิ 700-800 °C ที่บริเวณตรงกลาง

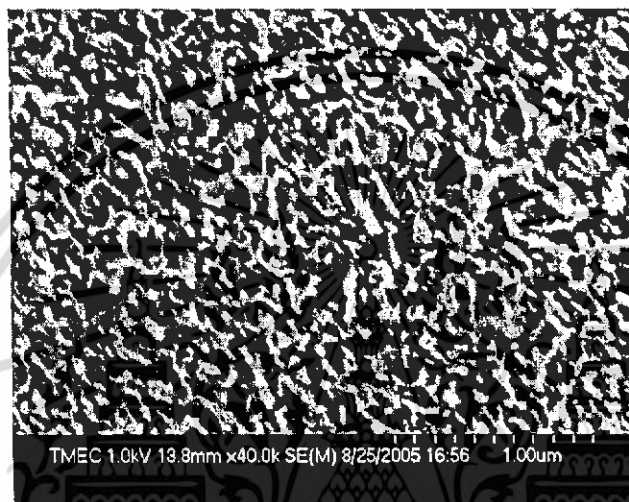


รูปที่ 5.6.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบน ฐานรองซิลิกอนที่ถูกเสกสรด้วยผงเหล็กที่อุณหภูมิ 700-800 °C ที่บริเวณอื่นๆ

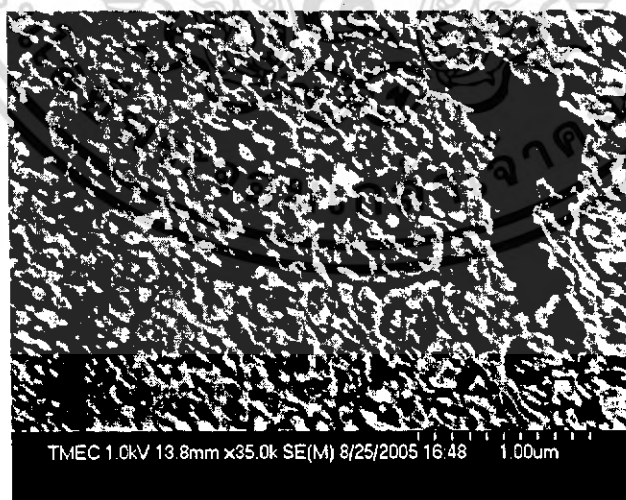
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.7.1 และ 5.7.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกแสงกรด้วยผงเหล็ก ที่อุณหภูมิ 600-700 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 130 W. |
| Temperature | 600-700 °C |
| Time | 40minute |



รูปที่ 5.7.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกแสงกรด้วยผงเหล็ก ที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณตรงกลาง

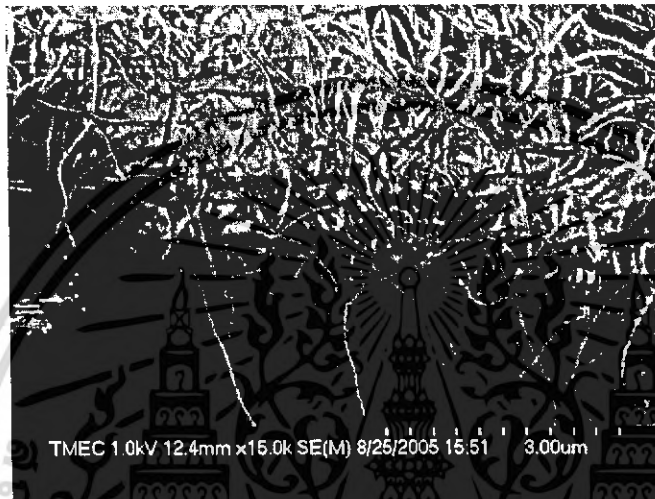


รูปที่ 5.7.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกแสงกรด้วยผงเหล็ก ที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณอื่นๆ

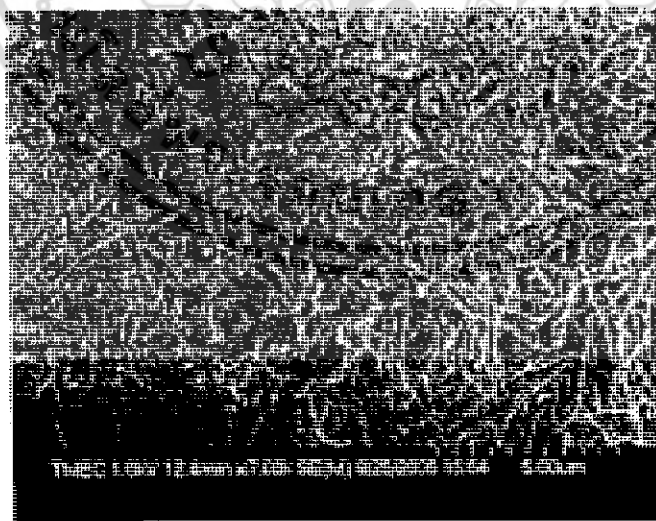
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.8.1 และ 5.8.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองขึ้นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 600-700 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 157 W. |
| Temperature | 600-700 °C |
| Time | 45minute |



รูปที่ 5.8.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองขึ้นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณตรงกลาง

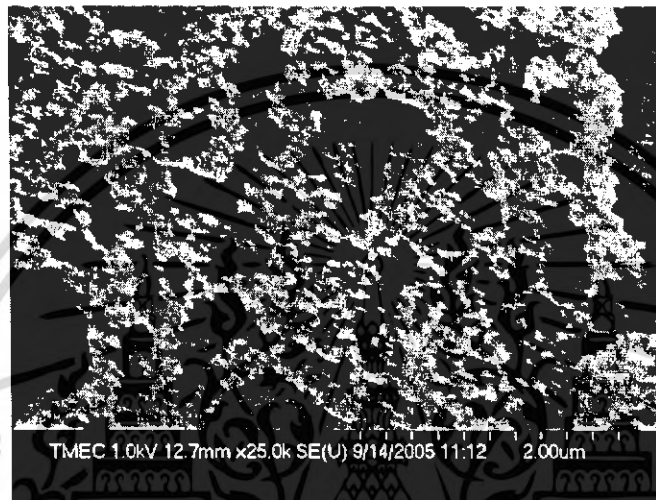


รูปที่ 5.8.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองขึ้นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณอื่นๆ

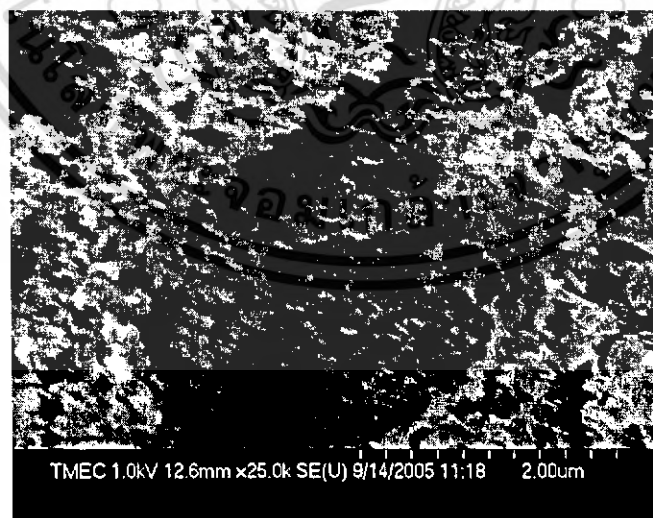
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.9.1 และ 5.9.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองชั้นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 700-800 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 178 W. |
| Temperature | 700-800 °C |
| Time | 45minute |



รูปที่ 5.9.1 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองชั้นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 700-800 °C ที่บริเวณตรงกลาง

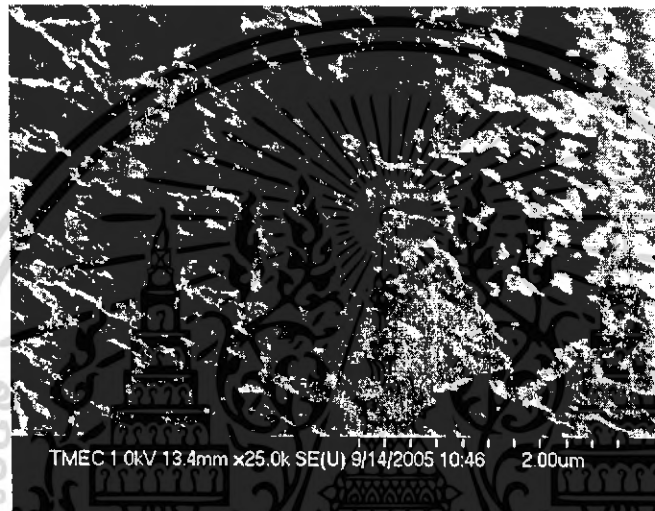


รูปที่ 5.9.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองชั้นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 700-800 °C ที่บริเวณอื่นๆ

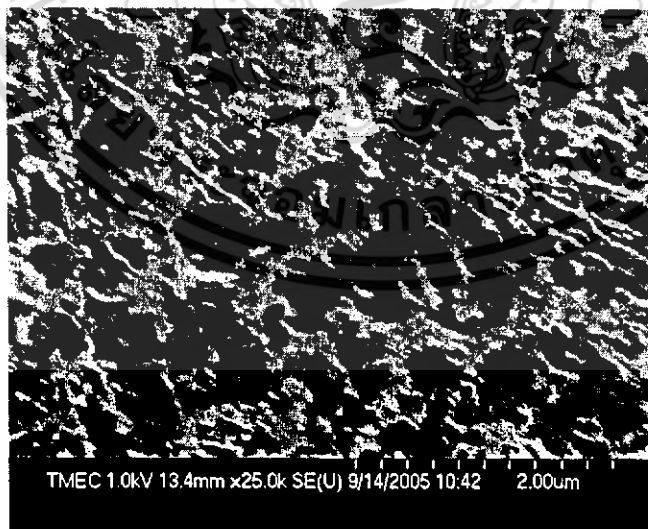
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.10.1 และ 5.10.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองกราฟิที่อุณหภูมิ 600-700 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 96 W. |
| Temperature | 600-700 °C |
| Time | 45minute |



รูปที่ 5.10.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองกราฟิที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณตรงกลาง

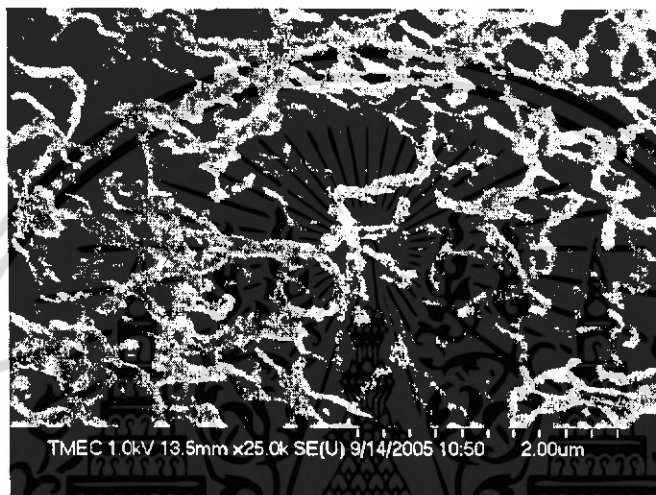


รูปที่ 5.10.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองกราฟิที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณอื่นๆ

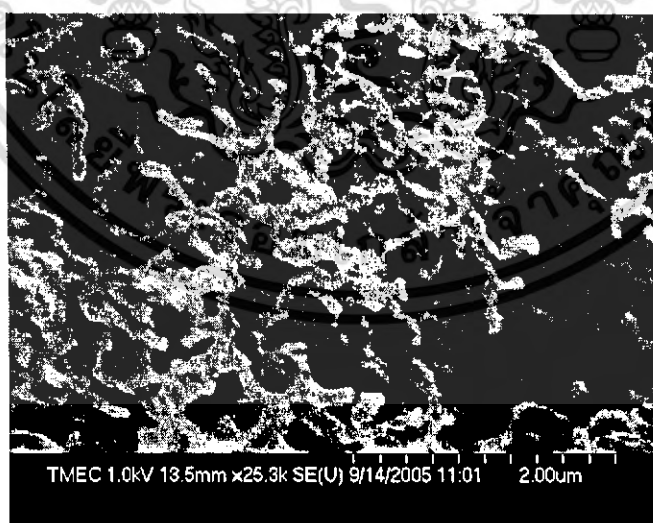
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.11.1 และ 5.11.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองกราฟิ์ที่อุณหภูมิ 600-700 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 117 W. |
| Temperature | 600-700 °C |
| Time | 45minute |



รูปที่ 5.11.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองกราฟิ์ที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณตรงกลาง

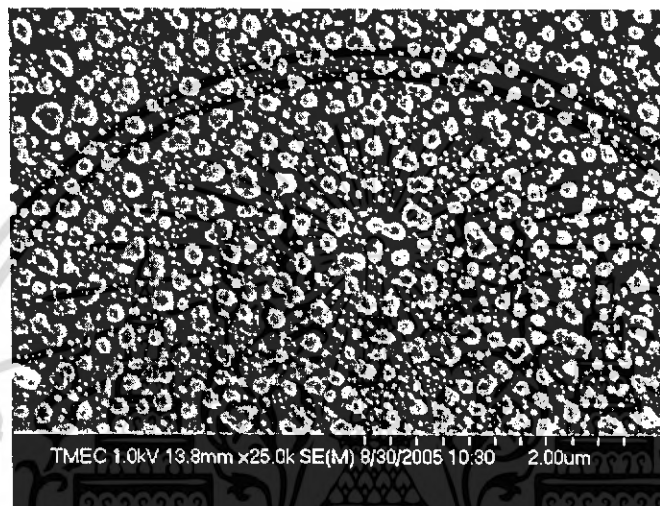


รูปที่ 5.11.2 แสดงภาพถ่ายSEMของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองกราฟิ์ที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณอื่นๆ

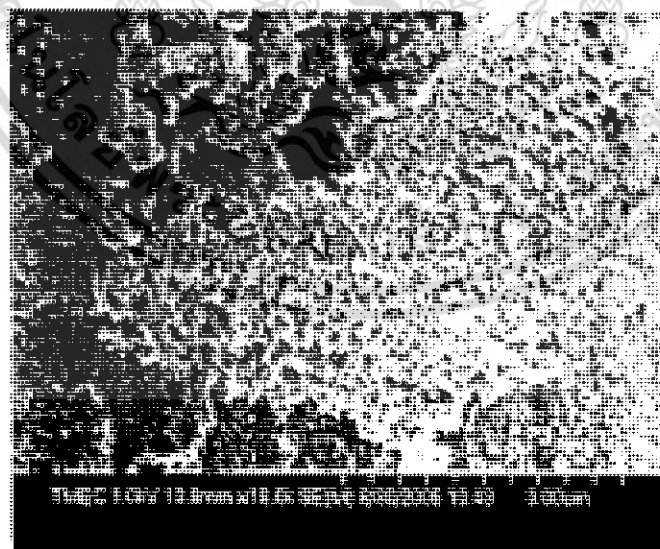
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.12.1 และ 5.12.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองแดงบนซิลิกอนที่อุณหภูมิ 600-700 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 102 W. |
| Temperature | 600-700 °C |
| Time | 45minute |



รูปที่ 5.12.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองแดงบนซิลิกอนที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณตรงกลาง

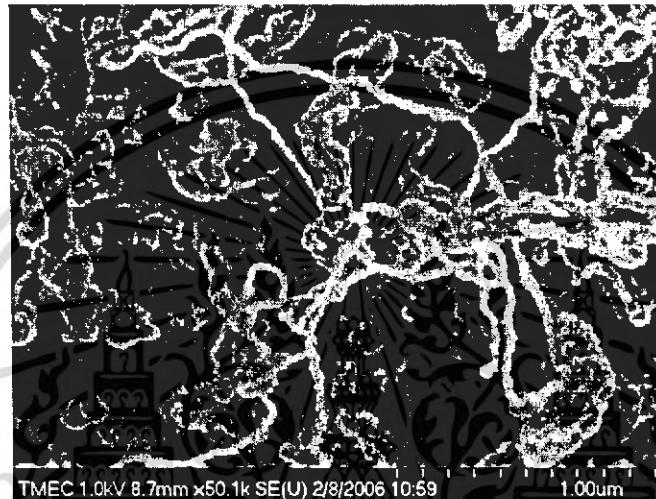


รูปที่ 5.12.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองแดงบนซิลิกอนที่อุณหภูมิ 600-700 °C ที่บริเวณอื่นๆ

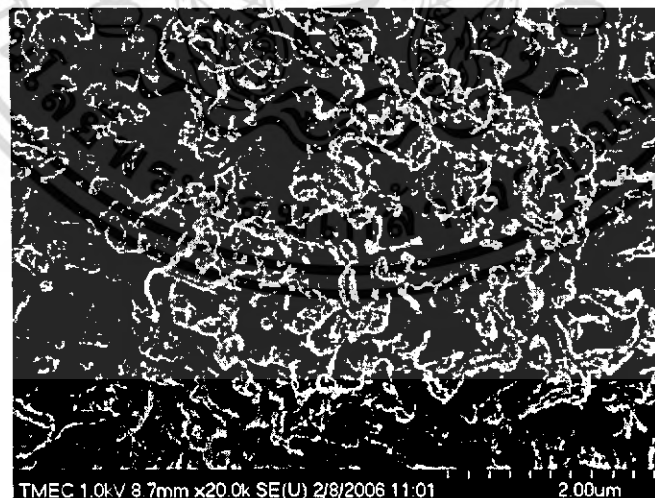
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.13.1 และ 5.13.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที แล้วนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 65.28W. |
| Temperature | 500-600 °C |
| Time | 45 minute |



รูปที่ 5.13.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที แล้วนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C ที่บริเวณตรงกลาง

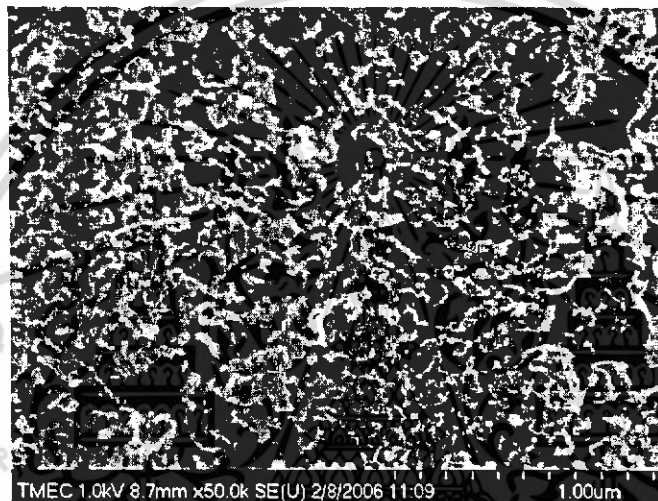


รูปที่ 5.13.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที แล้วนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C ที่บริเวณอื่นๆ

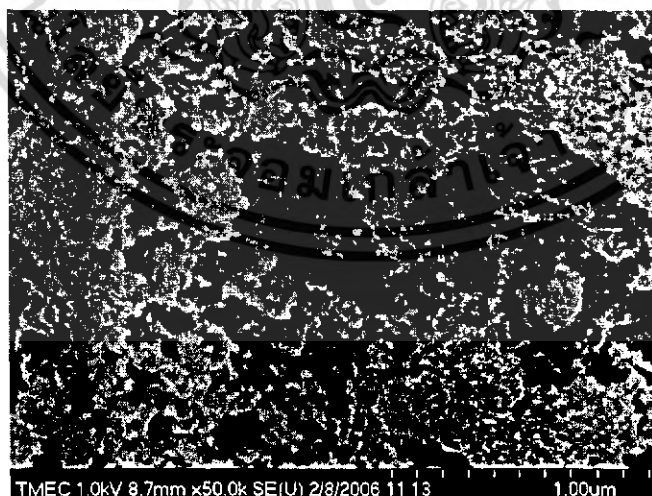
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.14.1 และ 5.14.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|--------------|
| Power | 68.64 W. |
| Temperature | 500 - 600 °C |
| Time | 45minute |



รูปที่ 5.14.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C ที่บริเวณตรงกลาง

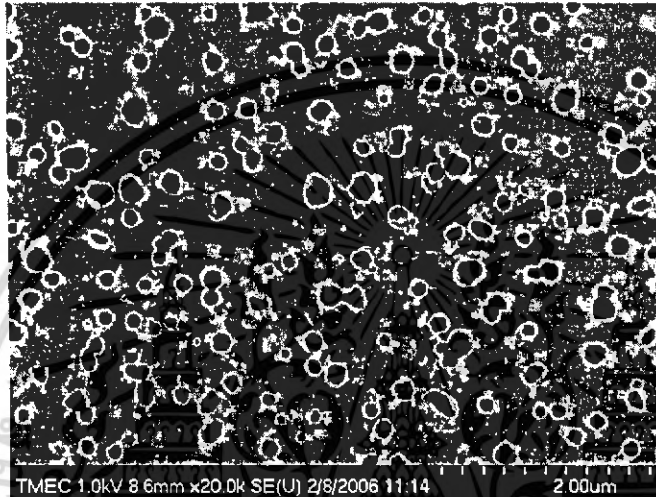


รูปที่ 5.14.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C ที่บริเวณอื่นๆ

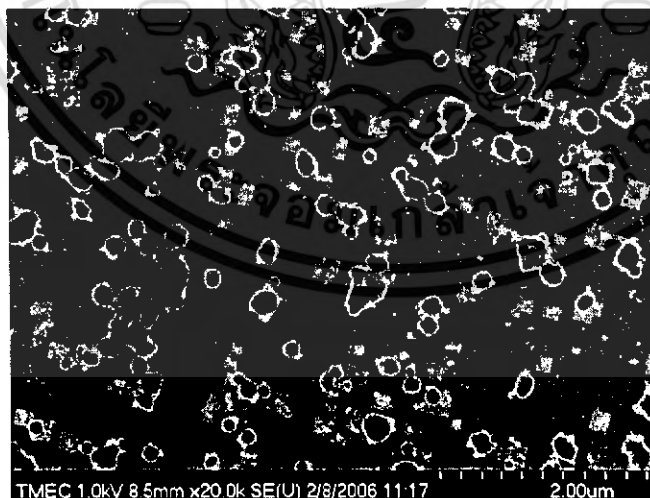
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.15.1 และ 5.15.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อานาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 700 – 800 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 93 W. |
| Temperature | 700-800 °C |
| Time | 45minute |



รูปที่ 5.15.1 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อานาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 700 – 800 °C ที่บริเวณตรงกลาง



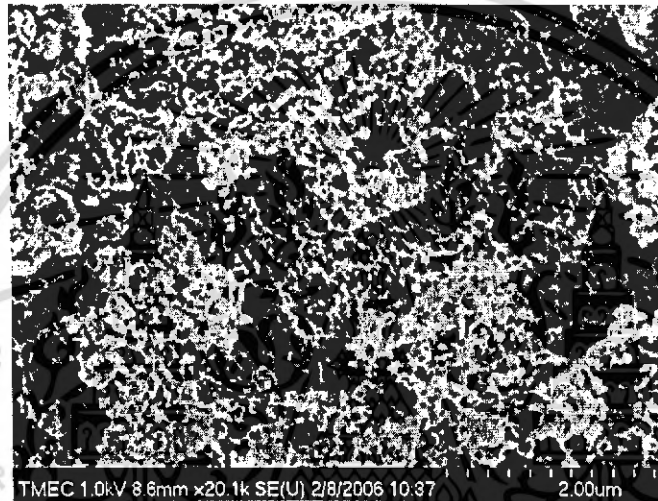
รูปที่ 5.15.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อานาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 700 – 800 °C ที่บริเวณอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

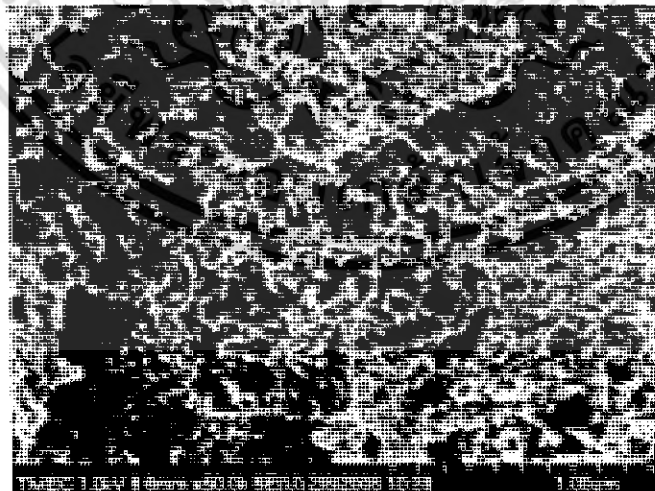
รูปที่ 5.16.1 และ 5.16.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C โดยมี

เงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 130 W. |
| Temperature | 600 -700°C |
| Time | 40minute |



รูปที่ 5.16.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C ที่บริเวณตรงกลาง

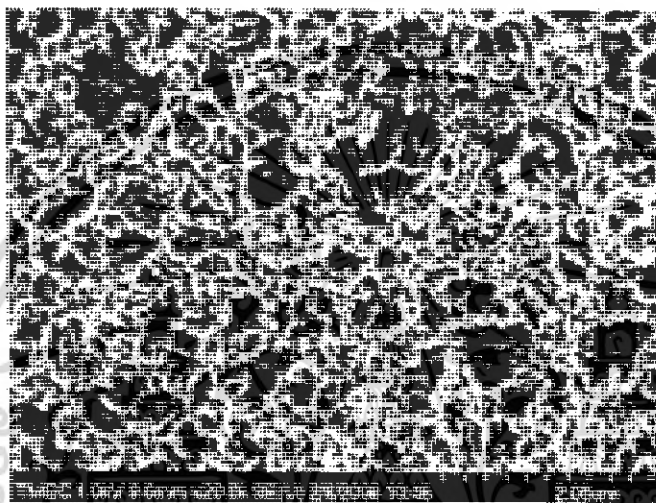


รูปที่ 5.16.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C ที่บริเวณอื่นๆ

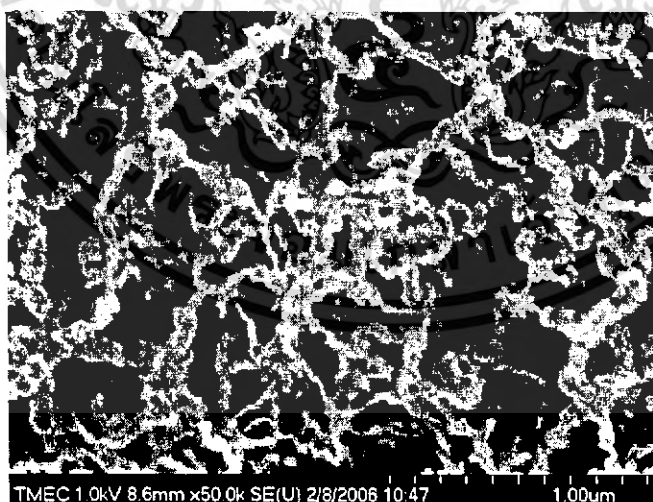
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.17.1 และ 5.17.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิลและนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|-------------|
| Power | 72.4W. |
| Temperature | 500 -600 °C |
| Time | 45minute |



รูปที่ 5.17.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิล และนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C ที่บริเวณ ตรงกลาง

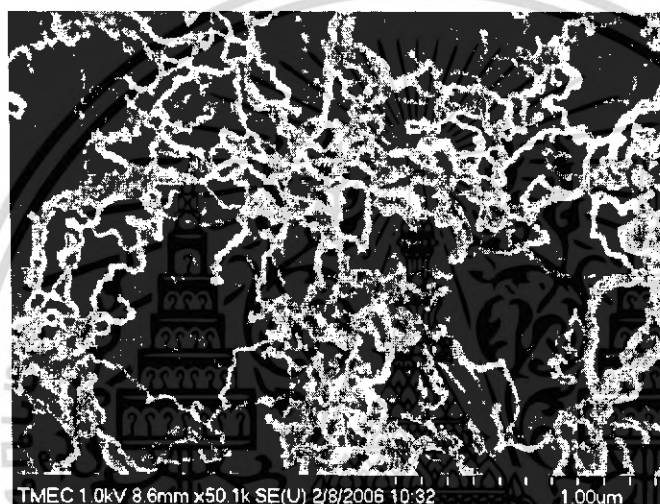


รูปที่ 5.17.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิล และนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C ที่บริเวณ อื่นๆ

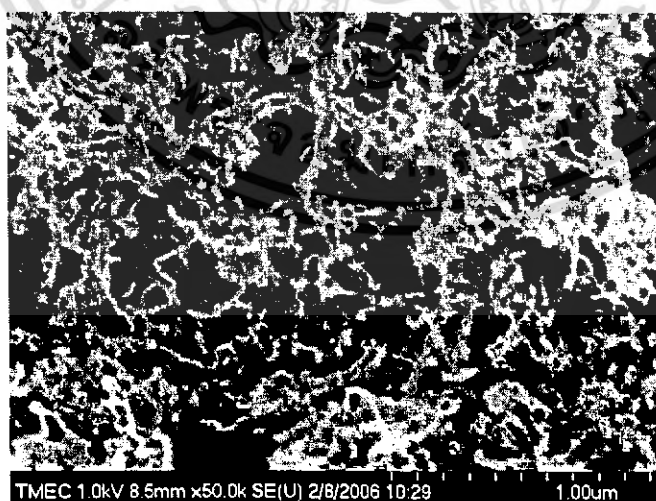
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.18.1 และ 5.18.2 แสดงภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิล ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|-------------|
| Power | 84 W. |
| Temperature | 600 -700 °C |
| Time | 45minute |



รูปที่ 5.18.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิล ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C ที่บริเวณตรงกลาง



รูปที่ 5.18.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิล ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C ที่บริเวณอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

จากการสังเคราะห์ฟิล์มนาโนคาร์บอนด้วยเอทธานอลผสมไฮโดรเจนที่ความดันบรรยากาศสามารถทำได้ โดยในการทดลองนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการที่ง่ายและ ราคาไม่แพง โดยใช้วิธี hot-filament chemical vapor deposition (HF-CVD) โดยใช้แอลกอฮอล์(Ethanol) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ใช้ไฮโดรเจนเป็นก๊าซนำพา(carrier gas) และใช้ขดลวดทั้งเสตนเป็นลวดความร้อน โดยจากผลการทดลอง อุณหภูมิของฐานรอง เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างยิ่งในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยเราสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ที่อุณหภูมิของฐานรองอยู่ในช่วงระหว่าง 500-800°C และอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่อยู่ในช่วง 100-150 cc/min เราได้ทำการสังเคราะห์บนฐานรองที่ต่าง ๆ กัน โดยเราสามารถสรุปผลการทดลองแบ่งออกได้เป็น 2 ตอนดังนี้

สรุปผลการทดลองตอนที่ 1

จากผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่าย SEM พบว่าเราสามารถสังเคราะห์ CNTs ได้บนฐานรองทั้งสามชนิดได้คือสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้บน ชั้นคาร์บอนที่อุณหภูมิฐานรองในช่วง 680°C สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้บน ชั้นกราฟไฟต์ที่อุณหภูมิฐานรองในช่วง 650°C และสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้บน แผ่นซิลิกอนผิวมันวาวที่สแกรชด้วยผงเหล็กที่อุณหภูมิฐานรองในช่วง 680 °C แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ยังมีคุณภาพต่ำ เนื่องจากพบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีสิ่งเจือปนไม่สะอาด แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองที่ได้แนะนำเสนอนี้ก็ทำให้ทราบว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ที่ความดันบรรยากาศและบนฐานรองต่างๆกันซึ่งหากมีการพัฒนาต่อไปก็อาจสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีคุณภาพสูงขึ้นได้

ซึ่งในอนาคตต่อไปเราจะศึกษาและทดลองหาวิธีทางที่ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้มีความสะอาดขึ้นและทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น โดยเราจะใช้ เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

สรุปผลการทดลองตอนที่ 2

จากผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่าย SEM พบว่า เราได้ทำการสังเคราะห์ CNTs ได้บน แผ่นซิลิกอนที่ถูกสปัตเตอร์ด้วยนิกเกิล เป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิประมาณ 600 – 700 °C โดย พบว่าเกิดเป็นเขม่าดำๆ ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า แล้ววิเคราะห์ด้วยSEM แล้ว พบว่าเกิดเส้นใยของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์อย่างหนาแน่น ทั้งนี้เป็นเพราะเราใช้เวลาสังเคราะห์ที่นานพอสมควรคือ ประมาณ 45 นาที และเมื่อนำแผ่นซิลิกอนที่ถูกสปัตเตอร์ด้วยนิกเกิล เป็นเวลา 90 วินาที แล้วนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิประมาณ 500 – 600 °C พบว่าเป็นช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเขม่าดำขึ้นเหมือนกันแสดงว่าเมื่อนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วจะทำให้ช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเส้นใยของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์เร็วขึ้น ส่วนแผ่นซิลิกอนที่ใช้เวลาสัปดาห์ 14 นาที พบว่าเราไม่สามารถสังเคราะห์ได้เพราะ เนื่องจากเมื่อทำการสังเคราะห์โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 300-400 °C แล้ว ฟิล์มนิเกิลที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนก็จะลอกออก ซึ่งอาจเกิดจากการที่แผ่นฟิล์มกับแผ่นซิลิกอน ไม่ยึดติดกันหรือทำการสปัตนานเกินไปทำให้ฟิล์มหนากว่าที่ทำการสปัตเป็นเวลาน้อยๆเมื่อทำการให้ความร้อนเพียงเล็กน้อยฟิล์มก็จะลอกออก ส่วนฐานรองทองแดงที่ถูกชุบด้วยนิเกิลเราสามารถสังเคราะห์ CNTs ได้ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าเราพบที่เกิดเป็นเขม่าสีดำเหมือนกัน แล้วเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าเกิดเส้นใย คาร์บอนสมำเสมอเต็มพื้นที่ทั้งหมด และนาโนทิวป์ก็มีความหนาแน่นมาก ซึ่งเกิดจากที่เราใช้เวลาสังเคราะห์ ประมาณ 45 นาทีเหมือนกัน และเมื่อนำฐานรองทองแดงที่ถูกชุบด้วยนิเกิลแล้วนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิประมาณ 500 – 600 °C พบว่าเป็นช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเขม่าดำขึ้นเหมือนกันแสดงว่าเมื่อนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์แล้วจะทำให้ช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเส้นใยของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์เร็วขึ้นซึ่งจะเหมือนกับแผ่นซิลิกอนที่ถูกสปัตเตอร์ด้วยนิเกิล และจากการสังเกตต่อไปเราพบว่าเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิให้เกินจุดที่เกิดการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ ก็จะพบว่าเขม่าดำๆที่เคยเกิดขึ้นนั้นจะหายไป

โดยสรุปผลการทดลองในส่วนนี้สามารถสรุปได้ว่าเราสามารถสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ได้อย่างทั่วทั้งแผ่นตามที่ต้องการและเมื่อนำ ไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์แล้วจะทำให้ช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเส้นใยของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์เร็วขึ้นและจากรูปเราจะพบว่าท่อคาร์บอนนาโนทิวป์มีความหนาแน่นมากเพราะอาจจะเป็นการสังเคราะห์ที่ใช้เวลานานเกินไปและท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนแผ่นทองแดงที่ถูกชุบด้วยนิเกิลจะเกิดได้ดีกว่าแผ่นซิลิกอนที่ถูกสปัตเตอร์ด้วยนิเกิล เป็นเวลา 90 วินาที ซึ่งผลที่ได้นี้สามารถนำไปศึกษาและพัฒนาเพื่อใช้สร้างเป็นวัสดุอุปกรณ์ทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป และเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตฟิล์มนี้เป็นการใช้ศักยภาพ วัสดุและอุปกรณ์ที่มีภายในประเทศทั้งหมด หากมีการศึกษาและพัฒนาที่จะสามารถก่อให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด

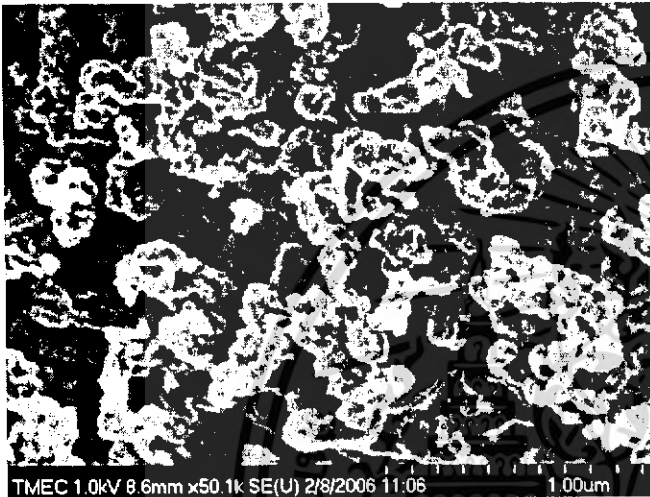
เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng., B 19 (19993) 181.
- [2] R. F. Service, Science 271 (1996) 1232
- [3] A. Badzian, T. Badzian, E. Breval, A. Piotrowski, Thin Solid Films 398 (2001) 170..
- [4] 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.
- [5] J. Suehiro, G. Hiroshi, W Ding, M. Hara, Sens. Actuators B (2004).
- [6] S. Iijima, Nature (1991) 359, 56
- [7] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant, Nature 388, (1997) 756.
- [8] Z.F. Ren, Z.P. Huang, J.H. Wang, M.P. Siegal, P.N. Provencio, Science 282 (1998) 1105.
- [9] A. Thess, Science 273 (1996) 483.
- [10] C.J. Lee, D.W. Kim, Y.H. Lee, J.M. Kim, Chem. Phys. Lett. 299 (1999) 97.
- [11] วารสาร NANOTEC IN 4 ฉบับที่ 3 มีนาคม 2548.
- [12] <http://lib.kmutt.ac.th>
- [13] <http://encyclopedia.thefreedictionary.com>
- [14] <http://www.nanotec.or.th/Webboard/view.php?No=51>
- [15] รศ.ดร. เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD สำหรับอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์, รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์.
- [16] T Phetchakul*, S Cheirsirikul, S Supdech (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand), Atmospheric pressure HFCVD Synthesis of carbon nanotube by using ethanol source, The 10th International Conference on New Diamond Science and Technology (ICNDST-10), May 11-14, 2005, AIST, Tsukuba, Japan.
- [17] Toempong Phetchakul, Somsak Cherirsirikul, Somkiat Supdech, Synthesis of carbon nanotube by HFCVD at Atmospheric Pressure, The 3rd International Conference on Material for Advance Technologies (ICMAT 2005), July 3-8, 2005, Singapore.
- [18] เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุภเดช, รัฐพงษ์ นาคาไชย (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง), การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EE-CON 28), 20-21 ตุลาคม, 2548, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

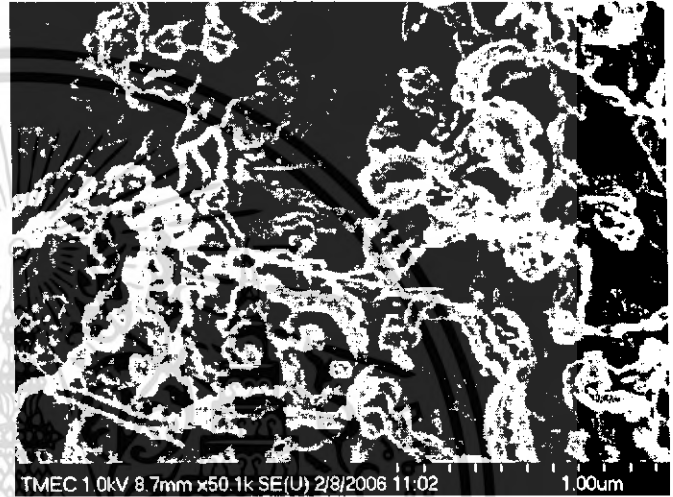
ภาคผนวก

รูปที่ 1ก, 2ก, 3ก, 4ก, 5ก และ 6ก แสดงภาพถ่ายจาก SEM (scanning electron microscope) ของท่อ นาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสเปกด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที แล้วนำไปจุ่มในผง เหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

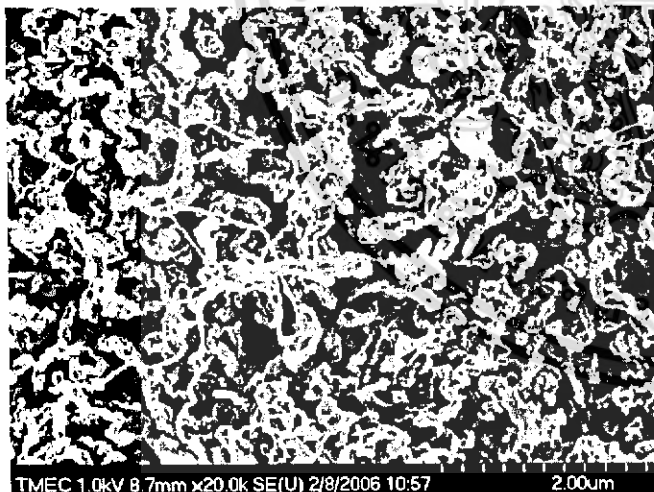
| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 65.28 W. |
| Temperature | 500-600 °C |
| Time | 45 minute |



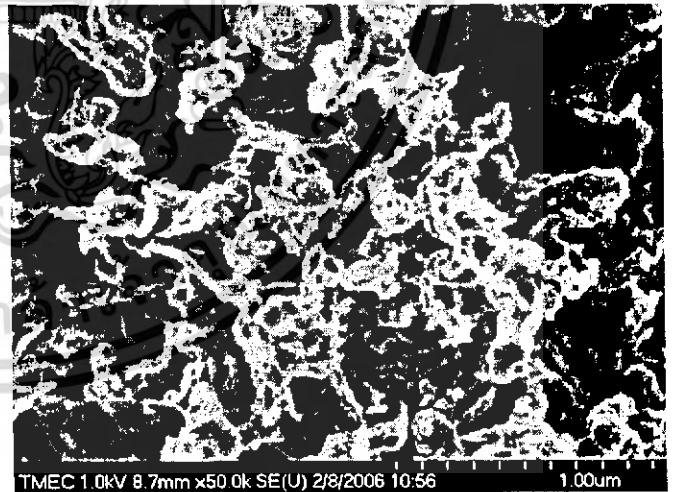
1ก



2ก

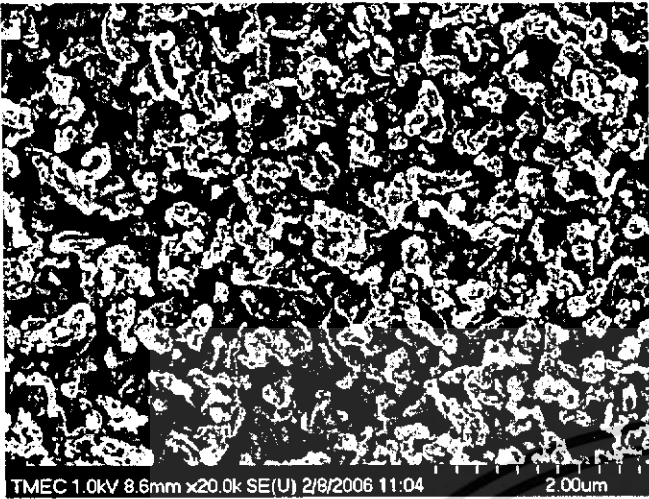


3ก

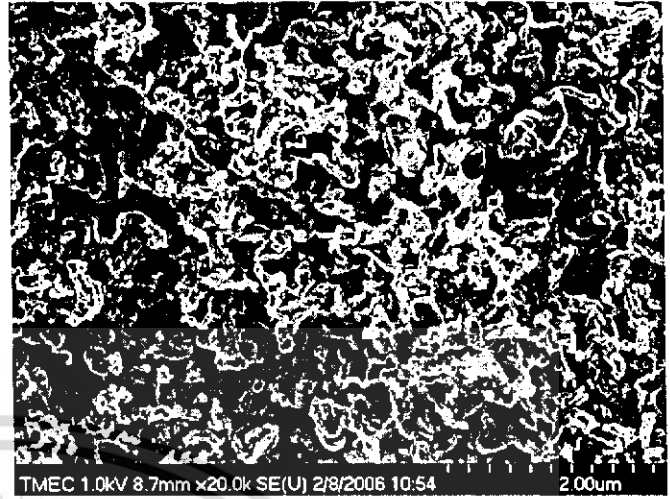


4ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5ก

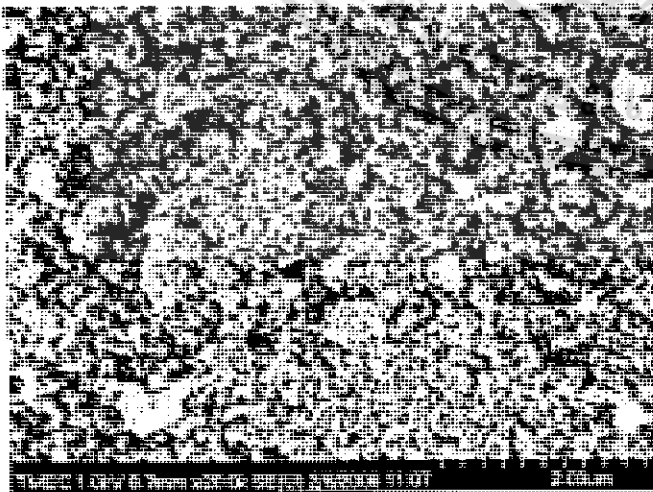


6ก

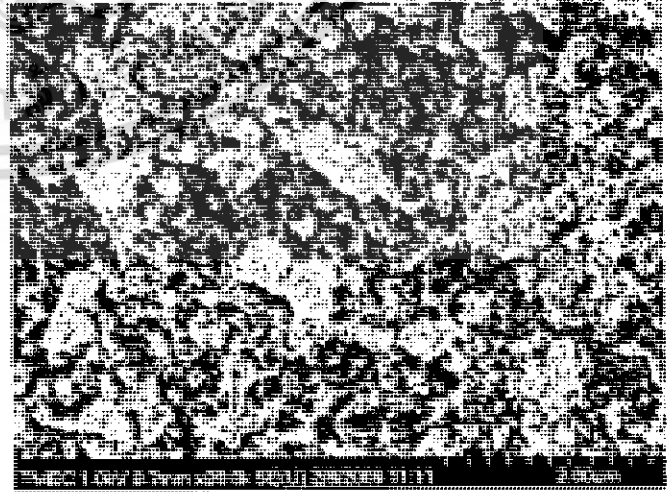
จากSEMจะสังเกตเห็นได้ว่าท่อนาโนทิวที่ ได้มีขนาดใหญ่มากเนื่องจากการสังเคราะห์ที่นานจนเกินไปคือ เวลาประมาณ 45นาที่ และนาโนทิวที่ได้มีความเสถียรมาก

รูปที่1ขและ2ขแสดงภาพถ่ายจาก SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอน ที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสัต์ด้วยไมกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °cโดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|--------------|
| Power | 68.64 W. |
| Temperature | 500 - 600 °C |
| Time | 45minute |



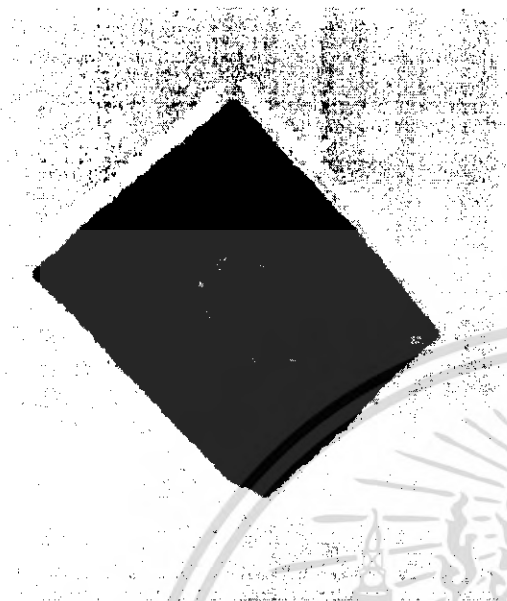
1ข



2ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

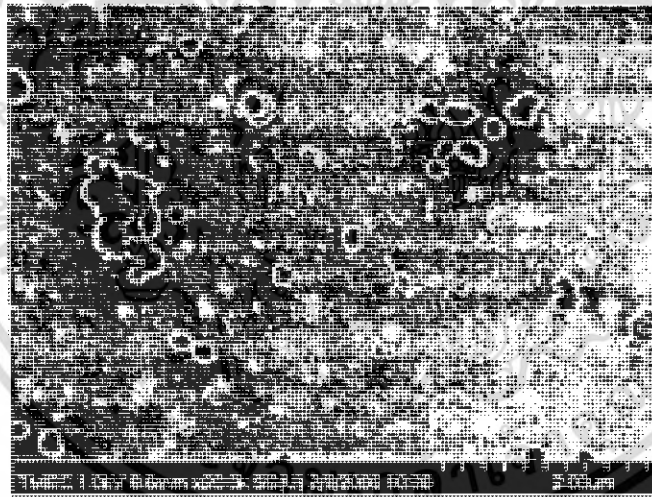
รูปที่1ค,2ค,3ค,4คและ5คแสดงภาพถ่ายจากSEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้



| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 130 W. |
| Temperature | 600 -700°C |
| Time | 40minute |

ภาพที่1ค แสดงฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C จะพบว่าตอนแรกเขม่าสีดำได้เกาะทั่วบริเวณฐานรองแต่เมื่อให้ความร้อนแก่ขดลวดทั้งสี่จนเพิ่มขึ้นบริเวณตรงกลางจะกลับมาเป็นสีขาวเหมือนตอนที่ยังไม่มีเขม่าสีดำเพราะเกาะซึ่งจากSEMจะสังเกตเห็นได้ว่า

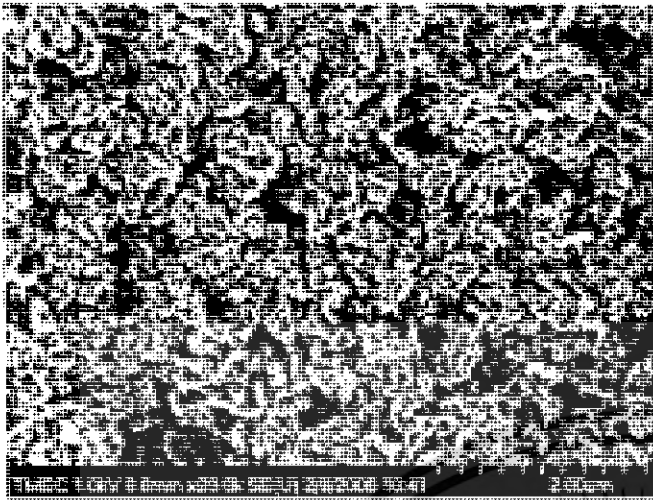
1ค



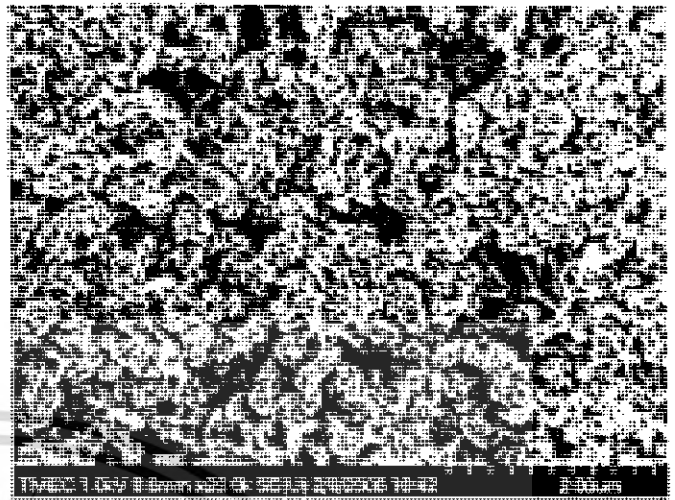
2ค

ภาพที่2คแสดงภาพจากSEMบริเวณตรงกลางฐานรองซิลิกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาที จะสังเกตเห็นว่าไม่มีท่อนาโนคาร์บอนเกิดขึ้น

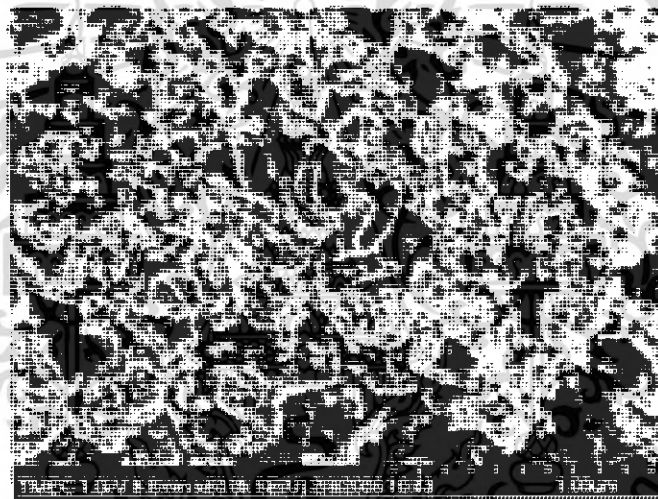
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3ค



4ค



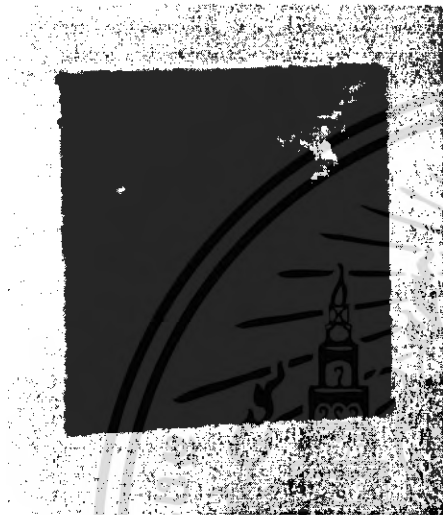
5ค

ภาพที่3ค,4คและ5คแสดงภาพจากSEMที่บริเวณด้านข้างฐานร่องซิกกอนที่ถูกสปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 90 วินาทีที่มีเขม่าสีดำแพร่มาเกาะจะสังเกตเห็นว่ามีท่อนาโนคาร์บอนเกิดขึ้น

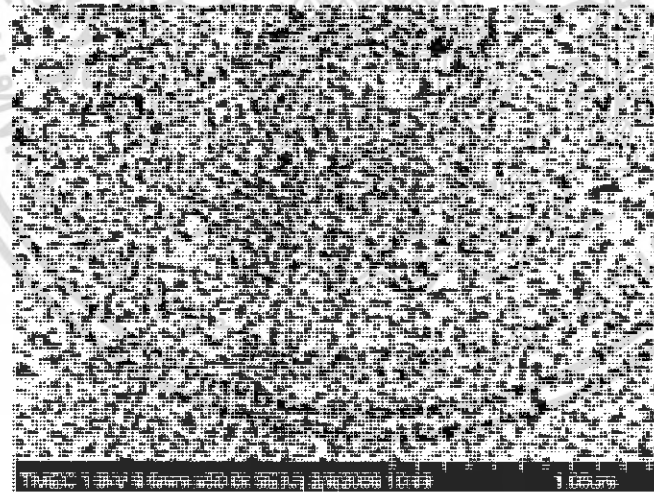
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1ง, 2ง, 3ง และ 4ง แสดงภาพถ่ายจาก SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิลและนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|-------------|
| Power | 72.4W. |
| Temperature | 500 -600 °C |
| Time | 45minute |



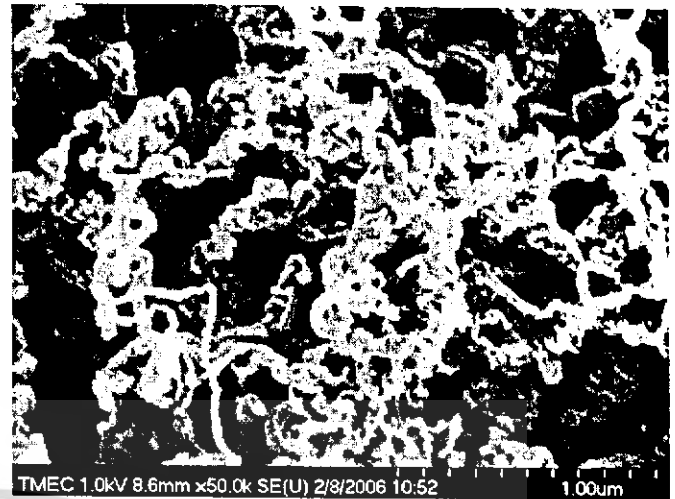
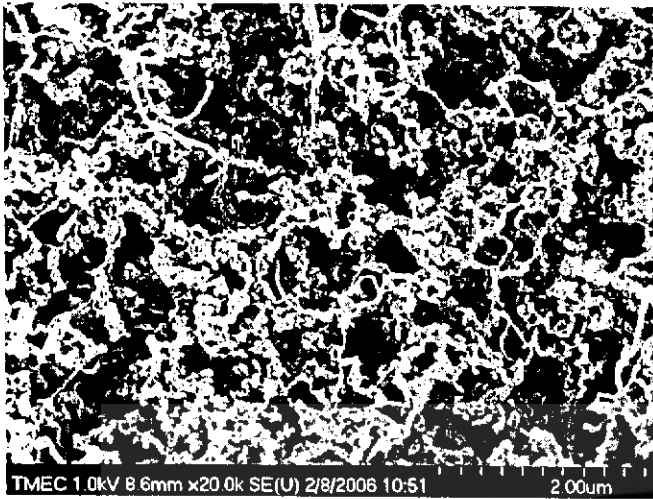
ภาพที่ 1ง แสดงฐานรองทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิลและนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ ประมาณ 500 – 600 °C เมื่อสังเกตจะพบว่าเกิดเขม่าสีดำเกาะฐานรองขึ้นแต่มุมบนด้านขวาจะ ไม่มีเขม่าสีดำเกิดขึ้น อาจเป็นเพราะเมื่อนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอาจทำให้สารละลายผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์ไม่ไปเกาะที่บริเวณดังกล่าวซึ่งมีความตึงผิวของสารละลายหรือบริเวณดังกล่าวเป็นฐานรองที่มีลักษณะรูพรุนขึ้นสารละลายจึงไม่สามารถมาเกาะบริเวณดังกล่าวทำให้เหมือนกับว่าไม่ได้นำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์



2ง

ภาพที่ 2ง แสดงภาพจาก SEM บริเวณมุมบนด้านขวาที่ของฐานรองทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิลและนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



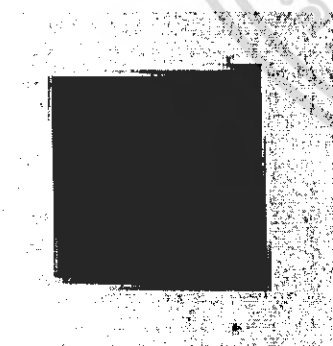
34

43

ภาพที่3งและ4งแสดงภาพจากSEMบริเวณที่เป็นเขม่าสีดำเมื่อนำวิเคราะห์ด้วยSEMจะสังเกตเห็นว่าเกิดท่อนาโนคาร์บอนขึ้นมีลักษณะหนาแน่นและมีขนาดใหญ่ซึ่งอาจเกิดจากการสังเคราะห์ที่เป็นเวลานาน

รูปที่1จ,2จ,3จและ4จแสดงภาพถ่ายจากSEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิล ที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °C โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

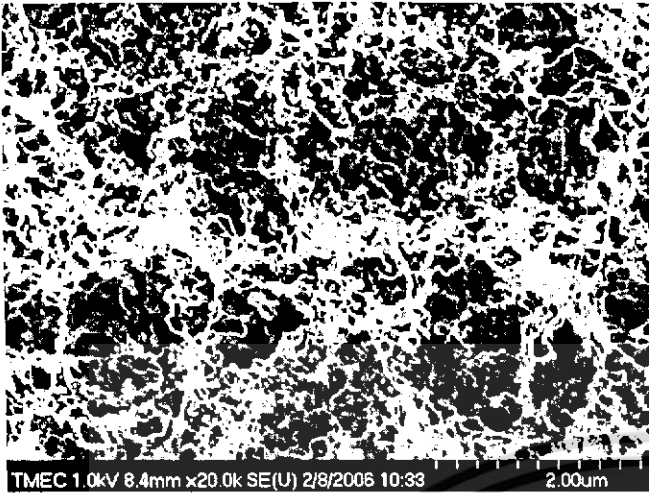
| PARAMETER | VALUE |
|-------------|-------------|
| Power | 84 W. |
| Temperature | 600 -700 °C |
| Time | 45minute |



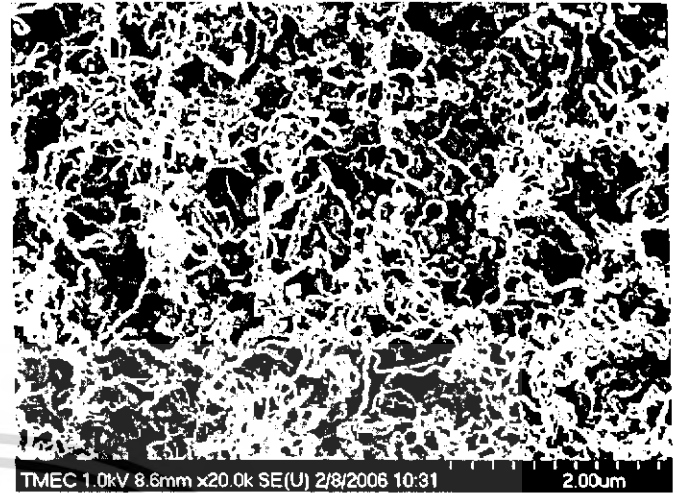
จากภาพที่1จ แสดงฐานรองทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิลที่อุณหภูมิ ประมาณ 600 – 700 °Cจะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์มากกว่าฐานรองทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิลและนำไปจุ่มในผงเหล็กที่ละลายด้วยแอลกอฮอล์

1จ

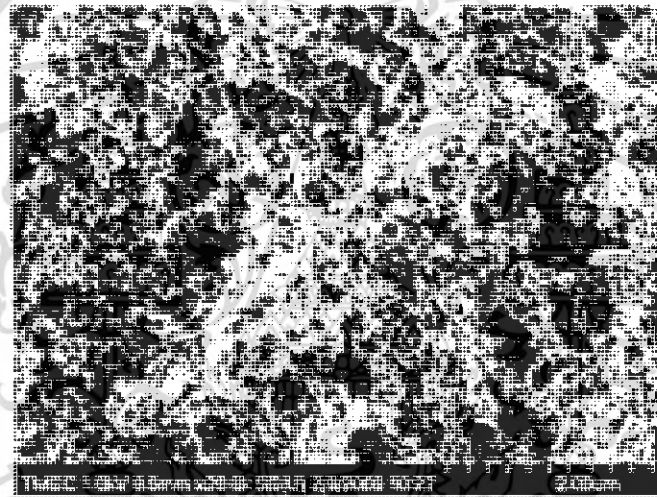
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2จ



3จ



4จ

ภาพที่2จ,3จและ4จแสดงภาพจากSEMของรูพรongทองแดงที่ชุบด้วยนิกเกิลจะสังเกตเห็นว่าท่อนาโนคาร์บอนมีความหนาแน่นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้