

การสังเคราะห์ คาร์บอนนาโนทิวป์ ด้วยวิธีซีวีดี แบบขดลวดความถี่สูง

SYNTHESIS OF CARBON NANOTUBES BY HOT FILAMENT CVD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานที่ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISSN 074-15-1933-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์ คาร์บอนนาโนทิวป์ ด้วยวิธีซีวีดี แบบขดลวดความร้อน

SYNTHESIS OF CARBON NANOTUBES BY HOT FILAMENT CVD



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 60993
วัน,เดือน,ปี..... - 7 ก.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548

ISBN 974 - 15 - 1933 - 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

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

SYNTHESIS OF CARBON NANOTUBES BY HOT FILAMENT CVD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFLLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DECREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONIC
ENGINEERING SCHOOK OF GRAOUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECNOLOGY LADKRABANG

2005

ISBN 974 – 15 – 1933 – 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว ด้วยวิธีชีวิต แบบขดลวด ความร้อน
นักศึกษา	นายทวิศักดิ์ มัญญาพันธ์
รหัสประจำตัว	43061337
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูศิริรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน โดยการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่ไหลผ่านและไม่ไหลผ่านเอทิลแอลกอฮอล์ อุณหภูมิฐานรองและวัสดุฐานรอง ซึ่งพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง จะมีผลต่อการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้น วัสดุฐานรองที่เลือกใช้เป็น โมลิบดีนัม, ซิลิคอน และซิลิคอนที่ทำการเคลือบนิเกิลผสมเหล็ก ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและรูปแบบต่างๆ ของคาร์บอนนาโนทิวป์ ได้ใช้เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิSSION ในส่วนของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ ได้ทำการศึกษาด้วยเทคนิคอินเนอร์จิสทีสเปอร์เซฟสเปกโตรเมทรี และวิธีรามานสเปกโตรสโคปี จากการทดลองพบว่าการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่ทำการเคลือบนิเกิลผสมเหล็ก สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ปริมาณมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้จะเป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้งานคาร์บอนนาโนทิวป์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Synthesis of Carbon nanotubes by Hot Filament CVD
Student	Mr. Thaweesak Mattaphan.
Student ID.	43061337
Degree	Master of Engineering
Programme	Electronic Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

In this thesis, we proposed the synthesis of carbon nanotubes by using hot filament chemical vapor deposition (HFCVD). Regarding to purpose of our research we would like to acquire the aspect of HFCVD operating parameters that have affects to the synthesized carbon nanotubes. Concerning about operating parameters we paid attention with the ratio of gases which were fed in chamber, hydrogen and mixed hydrogen with ethyl alcohol, types of substrate and temperature as well. Molybdenum, silicon and NiFe (Coated on silicon substrate) has been utilized as a substrate. In order to evaluate the synthesized carbon nanotubes, we implemented transmission electron microscopy (TEM) for analysis carbon nanostructure and its type, whether is SWNTs or MWNTs. Beside this technique, raman spectroscopy and energy dispersive spectrometry (EDS) were applied to get the composite element of synthesized carbon nanotubes, Refer to the results, we concluded that the synthesis of carbon nanotubes on NiFe substrate has gained higher yield than other substrates, About the obtained information we are going to apply them in advance for fabrication of electronics devices.

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง ในการให้ความรู้ แนวความคิด การแก้ไขปัญหาและสนับสนุนงานวิจัยนี้มาด้วยดีตลอด ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยด้วยดีเสมอมา ขอขอบพระคุณอาจารย์ คณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ขอขอบพระคุณ คุณจริยา นามเสนาะ (พี่หมี) สำหรับความเป็นห่วงและดูแล ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ห้องวิจัยสารนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงาน ขอขอบคุณ คุณปาริฉัตร ปานนิล และ คุณครุณี ผลโพธิ์ จากบัณฑิตศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์

ขอขอบคุณ คุณไพयर วิทยาขจรศาสตร์ และคุณพัชรีนาฏ จากบริษัท NS Electronic ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope และขอบคุณบริษัท Western Digital ในการใช้เครื่อง Raman Spectroscopy และขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์โย จาก TMEC และ ดร. ประอง กองทรัพย์โต จากบริษัท Spansion ในการใช้เครื่อง FESEM

สุดท้ายขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่อ้อย น้องอ้น น้องมาศ ที่ให้การสนับสนุนด้านการเรียน การเงิน และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
สัญลักษณ์	XV
ศัพท์เทคนิค	XVI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 เทคนิคการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีแบบต่างๆ	2
1.2.1 Arc Discharge	2
1.2.2 Laser Ablation	3
1.2.3 Hot Filament Activation	4
1.2.4 Microwave – plasma – enhanced CVD	5
1.2.5 RF Plasma enhanced CVD	6
1.2.6 DC plasma enhanced CVD	7
1.2.7 Plasma torch activation CVD	8
1.2.8 Electron cyclotron resonance CVD	9
1.3 การประยุกต์ใช้งาน คาร์บอนนาโนทิวป์	9
บทที่ 2 ทฤษฎีของคาร์บอนนาโนทิวป์และหลักการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์	12
2.1 คาร์บอนนาโนทิวป์และรูปแบบต่าง ๆ ของคาร์บอน	12
2.1.1 SWCNTs	12
2.1.2 MWCNTs	15
2.1.3 Buckyball	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.4 Diamond	17
2.1.5 Graphite	18
2.1.6 Microcrystalline carbon	19
2.1.7 Amorphous carbon	19
2.1.8 Lonsdaleite	19
2.2 คุณสมบัติต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวป์	20
2.2.1 คุณสมบัติทางกล	20
2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า	20
2.2.3 คุณสมบัติคาร์บอนนาโนทิวป์ เมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น	22
2.3 หลักการพื้นฐานของวิธีCVD	23
2.3.1 อะตอมของไฮโดรเจน	23
2.3.2 การกระตุ้นแก๊สให้เกิดอนุภาคคาร์บอน	24
2.3.3 อุณหภูมิฐานรอง	24
2.3.4 การเตรียมพื้นผิวฐานรอง	24
2.4 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ของวิธีCVD	24
2.4.1 กระบวนการของแก๊สเฟส	24
2.4.2 ปฏิริยาที่ไร้หลอด	26
2.4.3 ผลของอุณหภูมิฐานรอง	26
2.4.4 บทบาทของแก๊สไฮโดรเจน	26
2.4.5 บทบาทของแก๊สออกซิเจน	27
2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา	27
2.5.1 คำจำกัดความของคะตะไลซิส	27
2.5.2 การดูดซับโมเลกุลบริเวณผิว	28
2.6 การดูดซับของผิวโลหะ	30
2.7 สถานะการดูดซับของโมเลกุลบนโลหะ	31
2.8 ลักษณะการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์	33
2.8.1 Root Growth	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.5 ผลการทดลองเปลี่ยนแปลงเวลาในการสังเคราะห์บนฐานรองซิติคอน ที่เคลือบ NiFe	59
5.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscopy	61
5.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM	64
5.8 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy	68
5.9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	70
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์	73
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก	77
ภาคผนวก ข	78
ภาคผนวก ค	79
ภาคผนวก ง	80
ประวัติผู้เขียน	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบค่า Thermal conductivity.....	22
2.2 เปรียบเทียบค่า young's modulus.....	22
2.3 เปรียบเทียบค่า Energygap.....	22
3.1 แสดงขดกราฟหลักๆ จากการวัดคาร์บอนด้วยเครื่อง Raman Spectroscope.....	45
4.1 อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน.....	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 Arc Discharge	3
1.2 Laser Ablation	4
1.3 แผนภาพระบบ Hot filament activated CVD	5
1.4 แผนภาพระบบ Microwave - Plasma CVD Method (a) Tube-style (b) Bell jar	6
1.5 แผนภาพระบบ RF plasma CVD method (a) Inductive RF plasma CVD (b) RF thermal plasma CVD	7
1.6 แผนภาพระบบ DC plasma CVD method	8
1.7 แผนภาพระบบ DC plasma jet CVD method	8
1.8 แผนภาพระบบ Electron cyclotron resonance microwave plasme CVD method	9
1.9 การประยุกต์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ (a) จอแบน Samsung 4.5 “ (b) หลอดไฟกินไฟน้อย(c) คาร์บอนนาโนทิวป์ FET (d) นาโน probe (e) นาโนคีม (f) คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ถูกดัดแปลงโดยการนำ Functional group มายึดติด (g) เซ็นเซอร์อุณหภูมิ (h) Fuelcell ชนิด Ethanal เป็นเชื้อ	11
2.1 โครงสร้าง SWCNTs	12
2.2 Chiralangle ซึ่งกำหนดโดยเวกเตอร์ Ch และ T	14
2.3 การเป็นโลหะและสารกึ่งตัวนำของคาร์บอนนาโนทิวป์	14
2.4 โครงสร้าง MWCNTs	15
2.5 โครงสร้างบัคกี้บอล	16
2.6 ส่วนประกอบและขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์ที่รีชาร์ดสมอลลิย์ ใช้ใน การสังเคราะห์และตรวจสอบบัคกี้บอล	17
2.7 โมเลกุลบัคกี้บอลประกอบด้วยคาร์บอน 60 อะตอมเชื่อมต่อกัน	17
2.8 โครงสร้างผลึกของเพชร	18
2.9 โครงสร้างแกรไฟต์	19
2.10 การม้วนของคาร์บอนนาโนทิวป์(a) โครงสร้างของแถบที่สของแกรเฟสชีส (b) พลังงาน ในสถานะนำไฟฟ้าของแกรเฟสชีส (c) ทิศทางการม้วนตัวรอบแกน y และ แกน X	21
2.11 เปรียบเทียบค่า Tensile strength ของคาร์บอนนาโนทิวป์ กับวัสดุชนิดอื่น	23
2.12 กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD ของคาร์บอนนาโนทิวป์	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.13 แบบจำลองการก่อตัวของไอเคมีจะก่อตัวเป็นคาร์บอน sp^2 หรือ sp^3	26
2.14 ภาพพลังงานผิวของของแข็งโควาเลนต์	28
2.15 ภาพพลังงานผิวของของแข็งไอออนิก	29
2.16 การจัดวางอะตอมของผิวของโลหะ 3 ระนาบตามเลขคี่ชั้น มิลเลอร์ (a) 100 (b) 111 (c) 110	30
2.17 ลักษณะการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ (a) Root Growth (b) Tip Growth	33
2.18 กระบวนการแพร่ซึมแบบ Root Growth	34
2.19 การก่อตัวแบบ Tip Growth	34
3.1 แผนภาพการทำงานของ SEM	36
3.2 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นไม่เป็นกลุ่ม	36
3.3 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM ของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบกลุ่ม	37
3.4 กล้อง TEM และ ตำแหน่งของเลนส์แม่เหล็กชิ้นงานและการเกิดภาพต่าง ๆ ใน TEM	38
3.5 แผนภาพลักษณะการเกิด (a) รูปแบบการเลี้ยวเบน (b) ภาพขยาย	39
3.6 ตัวอย่างภาพและข้อมูล TEM ในลักษณะต่างๆ (a) ภาพขยายกำลังแยกแยะสูง (b) ภาพขยาย แผ่นชั้นอิพิแทกซี (c) ภาพดิฟแฟรกชันที่ได้จากแผ่นชั้นอิพิแทกซี	40
3.7 อุปกรณ์ชิ้นงานที่ใช้ใน TEM	41
3.8 แผ่นวางชิ้นงานที่ใช้ใน TEM (a) ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ (b) ลักษณะ MWCNTs (c) ลักษณะส่วนปลายปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	41
3.9 ภาพถ่าย TEM (a) ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ (b) ลักษณะ MWXCNTs (c) ลักษณะส่วน ปลายปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	42
3.10 กลไกของเครื่อง Raman spectroscope	43
3.11 ไดอะแกรมของ Raman spectroscope	44
4.1 ชุดอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	48
4.2 ระเบียบอย่างง่ายของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี HFCVD	48

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ลักษณะชิ้นงานที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม (a) ที่อุณหภูมิฐานรอง 100 – 200 °C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนเป็นค่าดังตาราง 4.1 (b) ที่อุณหภูมิฐานรอง 200 – 300 °C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9 และ 2:8 (c) ที่อุณหภูมิฐานรอง 200 – 300 °C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 3:7, 4:6 และ 5:5	52
5.2 ลักษณะชิ้นงานที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม (a) อุณหภูมิฐานรอง 300 – 450 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9 (b) อุณหภูมิฐานรอง 300 – 450 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 2:8 (c) อุณหภูมิฐานรอง 300 – 450 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 3:7 (d) อุณหภูมิฐานรอง 300 – 450 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 4:6 (e) อุณหภูมิฐานรอง 300 – 450 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 5:5	53
5.3 ลักษณะชิ้นงานที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม (a) อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9 (b) อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 2:8 (c) อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 3:7 (d) อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 4:6 (e) อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 5:5	54
5.4 ลักษณะชิ้นงานที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม (a) ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9 (b) ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 2:8 (c) ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 3:7 (d) ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 4:6 (e) ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800 °C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 5:5	55
5.5 ลักษณะชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงเวลาในสังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม (a) 10 นาที (b) 20 นาที (c) 30 นาที (d) 40 นาที (e) 50 นาที (f) 60 นาที (g) 70 นาที (h) 80 นาที (i) 90 นาที (j) 100 นาที	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 ผลการทดลองบนฐานรองซิลิคอนขัดมัน (a) ที่อุณหภูมิฐานรอง 100 – 600°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนดังตารางที่ 4.1 (b) ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนดังตารางที่ 4.1 (c) ที่อุณหภูมิฐานรอง 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนมีค่า 1:9 (d) ที่อุณหภูมิฐานรอง 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนมีค่า 2:8 (e) ที่อุณหภูมิฐานรอง 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนมีค่า 3:7 (f) ที่อุณหภูมิฐานรอง 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน มีค่า 4:6 (g) ที่อุณหภูมิฐานรอง 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน มีค่า 5:5.....	57
5.7 ผลการทดลองบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe (a) ที่อุณหภูมิฐานรอง 100 – 200°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนดังตาราง 4.1 (b) ที่อุณหภูมิฐานรอง 200 – 450°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนดังตาราง 4.1.....	58
5.8 ผลการทดลองบนฐานรองที่เคลือบ NiFe (a) ที่อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9 (b) ที่อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 2:8 (c) ที่อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 3:7 (d) ที่อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 4:6 (e) ที่อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 5:5.....	59
5.9 ลักษณะของชิ้นงานที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800°C ที่อัตราส่วนของแก๊สเป็นดังตารางที่ 4.1.....	59
5.10 ลักษณะชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงเวลาในการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วย NiFe (a) 10 นาที (b) 20 นาที (c) 30 นาที (d) 40 นาที (e) 50 นาที (f) 60 นาที (g) 70 นาที (h) 80 นาที (i) 90 นาที (j) 100 นาที.....	60
5.11 ลักษณะปลายที่เปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจากเทคนิค FESEM.....	61
5.12 ลักษณะการขดกันของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรอง โมลิบดีนัม เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจากเทคนิค FESEM.....	62
5.13 ลักษณะคาร์บอนไฟเบอร์ที่สังเคราะห์บนฐานรอง โมลิบดีนัม เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจากเทคนิค FESEM.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 ลักษณะพื้นผิวของ NiFe ที่เคลือบบนซิลิคอนจากเทคนิค FESEM	63
5.15 ลักษณะของความหนาของชั้น NiFe ที่เคลือบบนซิลิคอน	63
5.16 ลักษณะคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe จากเทคนิค FESEM	64
5.17 ลักษณะคาร์บอนนาโนทิวป์เมื่อใช้กำลังขยายสูงด้วยเทคนิค TEM ที่สังเคราะห์บนฐานรอง โมลิบดีนัม	64
5.18 ลักษณะ MWCNTs ที่สังเคราะห์บนฐานรอง โมลิบดีนัม เมื่อใช้กำลังการขยายสูงขึ้นจากเทคนิค TEM	65
5.19 ลักษณะปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรอง โมลิบดีนัม เมื่อใช้กำลังการขยายสูงขึ้นจากเทคนิค TEM	65
5.20 ลักษณะ CCFs ของคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรอง โมลิบดีนัม เมื่อใช้กำลังการขยายสูงขึ้นจากเทคนิค TEM	66
5.21 ลักษณะ CNFs ที่สังเคราะห์บนฐานรอง โมลิบดีนัม เมื่อใช้กำลังการขยายสูงขึ้นจากเทคนิค TEM	66
5.22 ลักษณะคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจากเทคนิค TEM	67
5.23 ลักษณะ MWCNTs ที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจากเทคนิค TEM	67
5.24 ส่วนปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจากเทคนิค TEM	68
5.25 Raman spectrum ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรอง โมลิบดีนัม ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9	69
5.26 Raman spectrum ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรอง โมลิบดีนัม ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 5:5	69
5.27 Raman Spectrum ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9	70
5.28 Raman Spectrum ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 5:5	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.29 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองโมลิบดีนัม ขึ้นงานก่อนการสังเคราะห์	70
5.30 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองโมลิบดีนัม ขึ้นงานหลังการสังเคราะห์	71
5.31 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe	72
5.32 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe	72



สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

C

ความหมาย

องศาเซลเซียส

CCFs

Corrugates Carbon Fibers

CNFs

Carbon Nano Fibers

CNTs

Carbon Nanotubes

Co

โคบอลต์

E

สนามไฟฟ้า

Fe

เหล็ก

Fr

ฟรานเซียม

H₂

แก๊สไฮโดรเจน

MWCNTs

Multi – Walled Carbon Nanotubes

Ni

นิกเกิล

P

โมเมนต์สนามเหนี่ยวนำ

Rh

พาลเลเดียม

SCCM

ปริมาตรมาตรฐานในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร

SWCNTs

Single – Walled Carbon Nanotubes

SO₂

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์

V

แรงดัน

W

กำลังงานไฟฟ้า

λ

ความยาวคลื่นตกกระทบ

θ

มุมตกกระทบ

α

Polarizability

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

การกระเจิง	Scattering
การดูดซับทางการภาพ	Physical adsorption
การโต	Growth
แกรไฟต์	Graphite
แก๊สเฟส	Gas phase
กลไกดิฟแฟรกชันคอนทราสต์	Diffraction contrast
ขั้วถาวร	Dipole moment
ข้อบกพร่องในโครงสร้าง	Structural defects
คาร์บอนนาโนทิวป์	Carbon nanotubes
ความเค้น	Stress
ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	Electron density
จุดเลี้ยวเบน	Diffraction spots
ฐานรอง	Substrate
ตัวนำยิ่งยวด	Superconductor
ตัวเร่งปฏิกิริยา	Catalysis
ทังสเตน	Tungsten
นาโนคีม	Nano - tweezers
นาโนอิเล็กทรอนิกส์	Nano electronic
น้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน	Deionized water
บั๊กกี้บอล	Bucky ball
แผ่นชั้นอิพิแทกซี	Epitaxial layers
แผ่นตารางสำหรับวางชิ้นงาน	Specimen support grids
พลาสมา	Plasma
เพชร	Diamond
พันธะ	Bond
พันธะโควาเลนต์	Covalent band
ฟูลเลอร์รีน	Fullerence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค(ต่อ)

เฟส	Phase
ภาพขยายกำลังแยกแยะสูง	High resolution image
โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว	Non-polar atoms or molecules
ยูนิตเซลล์	Unit Cell
รูปแบบการเลี้ยวเบน	Diffraction pattern
แรงดึงดูดของขั้วเหนียวน้ำ	Induced dipolar attraction
แรงดึงดูดระหว่างประจุ	Electrostatic attraction
รังสีเอ็กซ์	X-ray
เลนส์วัตถุ	Object lens
เลนส์คอนเดนเซอร์	Condenser lens
โลหะรูพรุน	Porous solid
สปีดเตอร์ริง	Sputtering
สเปกตรัม	Spectrum
สังเคราะห์	Synthesis
ส่งยาแบบนำวิถี	Drug
แหล่งจ่าย	Source
อะซิโตน	Aceton
อมอร์ฟัสคาร์บอน	Amorphous Carbon
อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	Specimen holder
อุลตราโซนิก	Ultrasonic
ไฮโดรคาร์บอน	Hydrocarbon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ประวัติความเป็นมา

การพัฒนาทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมา มีการค้นคว้าวิจัยธาตุในหมู่ที่ IV ตั้งแต่การค้นพบทรานซิสเตอร์ (transistor) ที่ใช้เยอรมันเนียม (Germanium) เป็นส่วนประกอบหลักจนมาถึงการใช้ซิลิคอน (Silicon) มาสร้างเป็นวงจรรวม (Very Large Scale Integration; VLSI) ทำให้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดที่เล็กลงต่อมาได้มีการมีการพัฒนาโดยการเปลี่ยนคาร์บอน (Carbon) ให้อยู่ในรูปของ แกรไฟต์ (Graphite), เพชร (Diamond), ฟูลเลอร์รีน (Fullerene) และคาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotubes; CNTs) โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะนำสิ่งที่สังเคราะห์ได้เหล่านี้มาใช้งาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

เมื่อ ค.ศ. 1985 ศ.ดร. ฮาร์โรลด์ โครโต (Harold Kroto) นักฟิสิกส์ด้านอวกาศแห่งมหาวิทยาลัยซัสเซ็กซ์ (University of Sussex) สหราชอาณาจักร กำลังวางแผนงานวิจัยเพื่อทำการศึกษาโครงสร้างของกลุ่มสารประกอบคาร์บอนที่อาจจะพบในบริเวณบรรยากาศรอบๆ ดาวยักษ์แดง (Giant red star) ดวงหนึ่งที่อยู่ห่างจากโลกไปเป็นระยะทางประมาณ 1 พันล้านปีแสง แต่เนื่องจากที่ห้องทดลองของโครโต นั้นไม่มีอุปกรณ์ที่มีศักยภาพเพียงพอที่จะทำงานวิจัยนี้ได้เพียงลำพัง เขาจึงตัดสินใจเดินทางไปทำงานวิจัยร่วมกับ ศ.ดร. ริชาร์ด สมอลลีย์ (Richard Smalley) และ ศ.ดร. โรเบิร์ต เคิร์ล (Robert Curl) ณ มหาวิทยาลัยไรซ์ (Rice university) สหรัฐอเมริกา ระหว่างการทดลองโดยการจำลองสภาพบรรยากาศของดาวยักษ์แดงขึ้นมา โดยการใช้แสงเลเซอร์ความร้อนสูง ยิงไปยังแกรไฟต์ เพื่อให้สารประกอบคาร์บอนรูปแบบต่างๆ กลายเป็นไอระเหยขึ้นมา ในบรรยากาศที่เป็นแก๊สฮีเลียม (Helium) หลังจากปล่อยให้ไอระเหยของโมเลกุลคาร์บอนรูปแบบต่างๆ เย็นลงและจับตัวกันเป็นโครงสร้าง

นักวิทยาศาสตร์ทั้งสามท่าน ต่างก็ประหลาดใจมาก ที่พบว่าโครงสร้างโมเลกุลคาร์บอนที่พบเกือบทั้งหมดมีรูปร่างเป็นทรงกลมเหมือนลูกฟุตบอล ที่ประกอบด้วยคาร์บอน 60 อะตอม นักวิทยาศาสตร์ทั้งสามท่าน ได้ตั้งชื่อรูปทรงกลมนี้ว่า “บัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์รีน” เพื่อให้เกียรติแด่บัคมินสเตอร์ ฟูลเลอร์ (Buckminster Fuller) สถาปนิกและวิศวกรชื่อดังแห่งยุค ค.ศ. 1960 ซึ่งเป็นผู้ออกแบบอาคารและสิ่งก่อสร้างรูปโดมทรงกลม ที่มีลักษณะคล้ายกับลูกฟุตบอลขนาดใหญ่อันเลื่องชื่อหลายแห่ง ต่อมาเส้นคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากได้ถูกผลิตขึ้นในยุค 70 และ 80 ด้วยวิธีการสังเคราะห์เส้นคาร์บอน โดยการแยกแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงๆ ในกระบวนการที่มีการเตรียมฐานรอง โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10 นาโนเมตร แต่ไม่พบรายงานและการนำเสนอที่แน่นอนของการสังเคราะห์

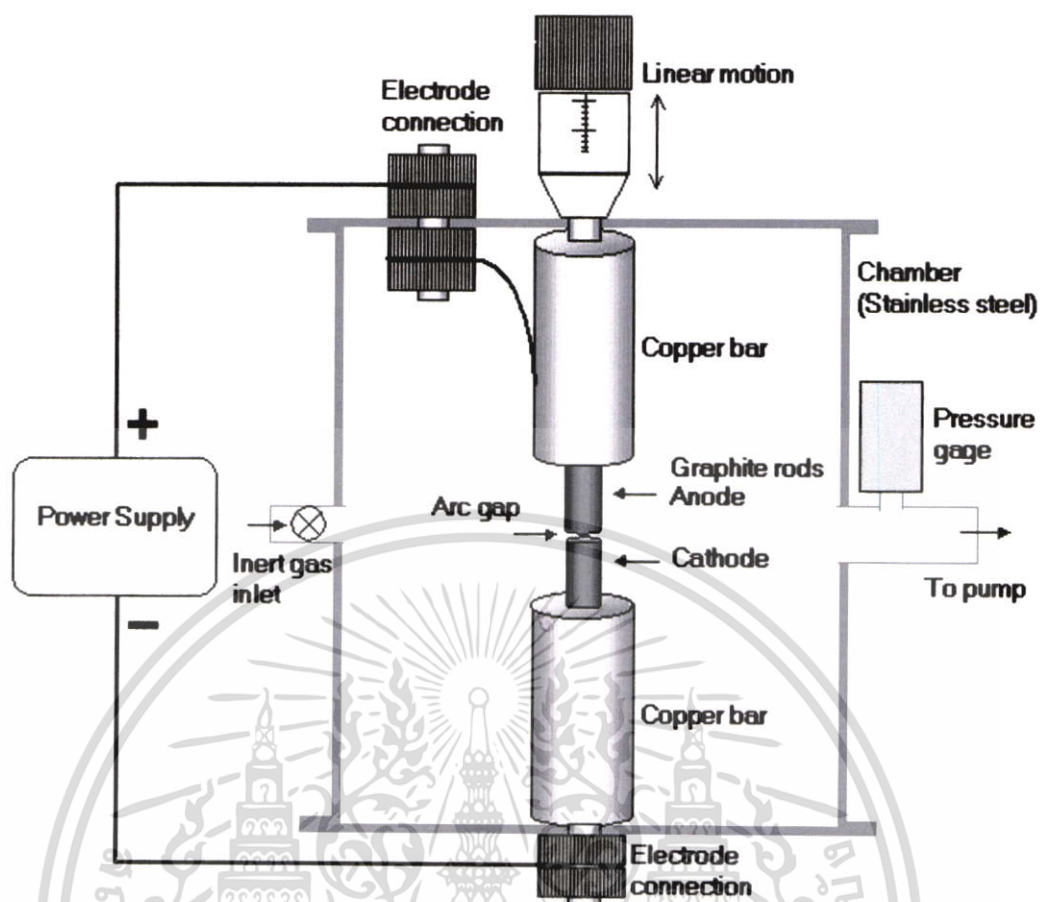
จนกระทั่งมีการค้นพบ เมื่อปี ค.ศ. 1991 ได้มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่นชื่อ S. Iijima Meijo University, NEC [17, 18] โดยใช้กล้อง High – Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM) ส่องไปพบบริเวณที่มีคาร์บอนนาโนทิวป์อยู่อย่างหนาแน่น การค้นพบของ S. Iijima เป็นจุดเริ่มต้น ที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มมีการศึกษาถึงคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์และโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อที่จะนำ คาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เพิ่มขึ้นโดยเริ่มแรกในการสังเคราะห์นั้นใช้ วิธี Arc Discharge ซึ่งเป็นวิธีเดียวกับ การสังเคราะห์ฟูลเลอร์ริน (C_{60} , C_{70}) ต่อมาได้มีการใช้ วิธี Laser Ablation แต่ในปัจจุบันวิธี CVD เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมและมีความหลากหลายในการสังเคราะห์ โดยวิธี Hot - Filament CVD (HFCVD) เป็นวิธี CVD วิธีหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันเป็นวิธีที่ใช้กันมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายน้อยและคุณภาพที่ได้ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ มีความบริสุทธิ์อยู่ในเกณฑ์ดี

1.2 เทคนิคการสังเคราะห์ คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีแบบต่างๆ

คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถสังเคราะห์หลายวิธี แต่โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักๆ ได้แก่

1.2.1 Arc Discharge

เป็นวิธีเริ่มแรกในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ และเป็นวิธีเดียวกับการสังเคราะห์ฟูลเลอร์ริน (C_{60} , C_{70}) เป็นการสร้างพลาสมา (Plasma) ที่มีความร้อนสูง ให้เกิดขึ้นระหว่างขั้วคาร์บอน โดยการป้อนแรงดันให้เกิดกระแสไฟสูง ประมาณ 100 A ระหว่างแท่งแกรไฟต์ ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm โดย Kratschmer et al [6] ในปี 1999 คาร์บอนนาโนทิวป์จะเกิดการก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว วิธีนี้ทั้งที่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งจะได้เป็น Single - walled carbon nanotubes (SWCNTs) และที่ไม่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งจะได้เป็น Multi - walled carbon nanotubes (MWCNTs) โดยวิธี Arc Discharge เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายน้อย แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก มีประสิทธิภาพของผลผลิต 30 – 90 % โดยวิธีการที่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis) ที่ส่งผลให้มีการสังเคราะห์ SWCNTs ถูกค้นพบโดย Iijima และ Ichihashi [6] โดยมีเสนอรายงานในปี 1993 เส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้เท่ากับ 1 nm โดยมีการนำเสนอโลหะผสมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีส่วนผสม คือ นิกเกิล (Ni) 2.6 %, ฟรานเซียม (Fr) 0.7%, เหล็ก (Fe) 0.75% ผลของการสังเคราะห์พบว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้มากกว่า 1 กรัมต่อชั่วโมง โดย Sun et.al [6]

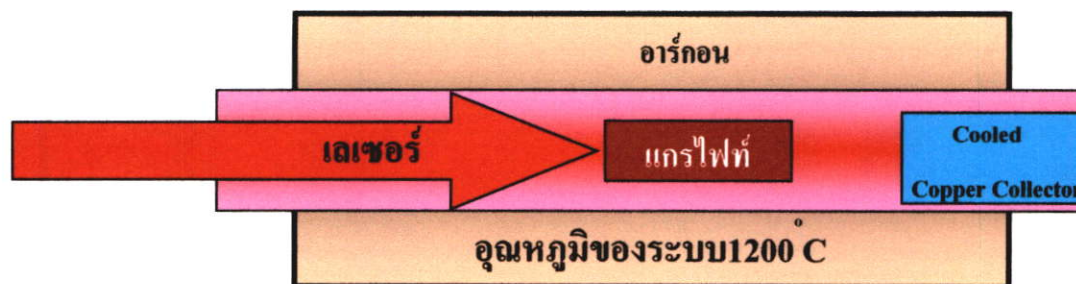


รูปที่ 1.1 วิธี Arc Discharge [6]

1.2.2 Laser Ablation

ถูกคิดค้นโดยนักวิทยาศาสตร์ ในกลุ่มของ Prof. Smalley วิธีนี้ใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูง กระแทกกับแท่งคาร์บอนผสมโลหะที่อยู่ในเตาอบซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ $1,200^{\circ}\text{C}$ ทำให้เกิดคาร์บอน แก๊สและคาร์บอนอะตอมที่ร้อนขึ้น คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีนี้จะแตกต่างจาก วิธี Arc Discharge ตรงที่ให้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีความบริสุทธิ์สูงแต่ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง โดยเริ่มแรกเป็นวิธีที่จะสังเคราะห์ฟูลเลอร์ริน ต่อมาได้มีการพัฒนาที่จะผลิต MWCNTs โดยใช้เลเซอร์พลังงานสูงกระแทกกับแท่งคาร์บอน โดยกระบวนการขั้นแรกนี้จะผลิต MWCNTs ได้เพียงอย่างเดียวต่อมาได้มีการผสมโลหะเข้าไปในแท่งคาร์บอนโลหะผสม ได้แก่ โคบอลต์ (Co), นิกเกิล และพาลาเดียม (Rh) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถผลิต SWCNTs ได้ที่มีขนาด 5 – 20 nm โดยงานวิจัยของ Zhang และ Iijima [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

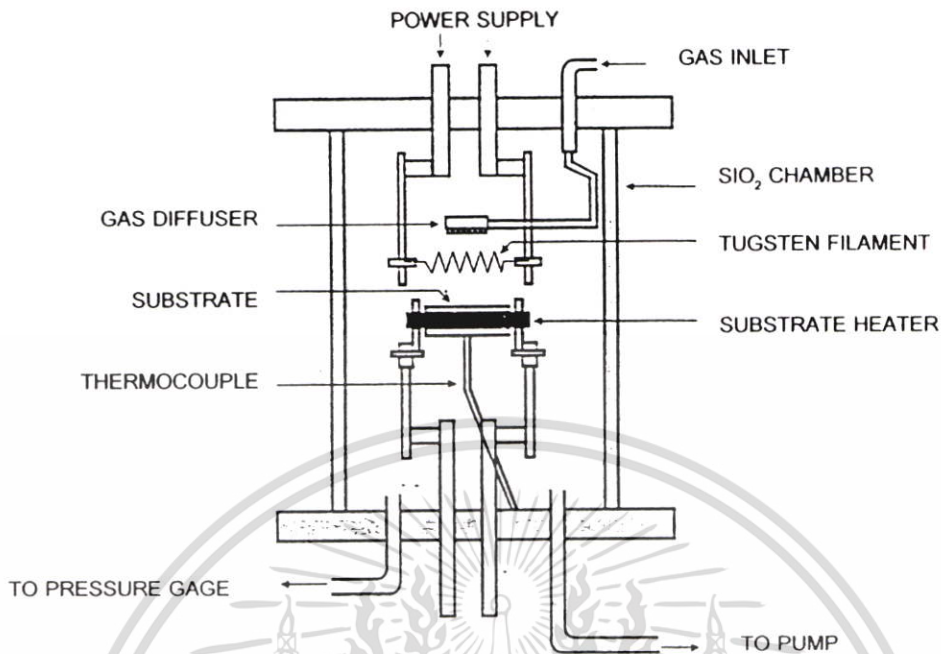


รูปที่ 1.2 วิธี Laser Ablation [6]

1.2.3 Hot Filament activation CVD

วิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) คือ การแยกแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม เช่น แก๊สมีเทน, แก๊สอะเซทิลีนบนโลหะ โดยใช้ความร้อนหรือพลาสมาเข้าช่วยอุณหภูมิ อยู่ระหว่าง $400 - 1200^{\circ}\text{C}$ ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถควบคุมขนาดความยาวของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุด วิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ โดยมีประสิทธิภาพของผลผลิต $20 - 90\%$ ซึ่งวิธี CVD นี้ สามารถแบ่งย่อยตามความแตกต่าง ของวิธีการแยกแก๊สและวิธีเตรียมโลหะตัวเร่ง วิธีนี้ถูกเสนอครั้งแรกโดย Matsu moto et al. จาก NIRIM ในปี ค.ศ. 1981 แผ่นภาพของวิธี Filament Assisted Thermal CVD แสดงดังรูป 1.3 ภายในแชมเบอร์ (Chamber) ที่มีไส้หลอดทั้งสแตน (Tungsten Filament) ทำหน้าที่กำเนิดความร้อนอุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตน มีค่าสูงถึง $2,000 - 2,200^{\circ}\text{C}$ ฐานรองวางอยู่ด้านล่างของไส้หลอดทั้งสแตน มีอุณหภูมิ $700 - 1,000^{\circ}\text{C}$ เมื่อแก๊สผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนถูกปล่อยเข้าไปในแชมเบอร์ ที่บริเวณไส้หลอดทั้งสแตนจะเกิดการแตกตัวของแก๊สขึ้น เป็นไฮโดรเจนอะตอมและคาร์บอนอะตอม ฐานรองสามารถไบอัสไฟเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการก่อตัว (Growth) และอัตราการก่อตัวของทิวป์ที่อัตราส่วนระหว่างแก๊สมีเทน ($0.5 - 2\%$) ต่อแก๊สไฮโดรเจน กระทำที่ความดัน $10 - 100$ ทอร์ วิธี Filament - Assisted Thermal CVD นี้เป็นวิธีการที่ง่ายค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างได้มีคุณภาพดีมาก สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ ในบริเวณกว้างและมีความปลอดภัยสูง แต่ปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานไส้หลอดทั้งสแตนสั้น เนื่องจากผลของการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดทั้งสแตนนั้นเป็นเวลานาน ไส้หลอดทั้งสแตนจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนเป็น W_2C ทำให้ไส้หลอดทั้งสแตนเปราะและผิกรูปได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 แผนภาพระบบ Hot filament activated CVD [15]

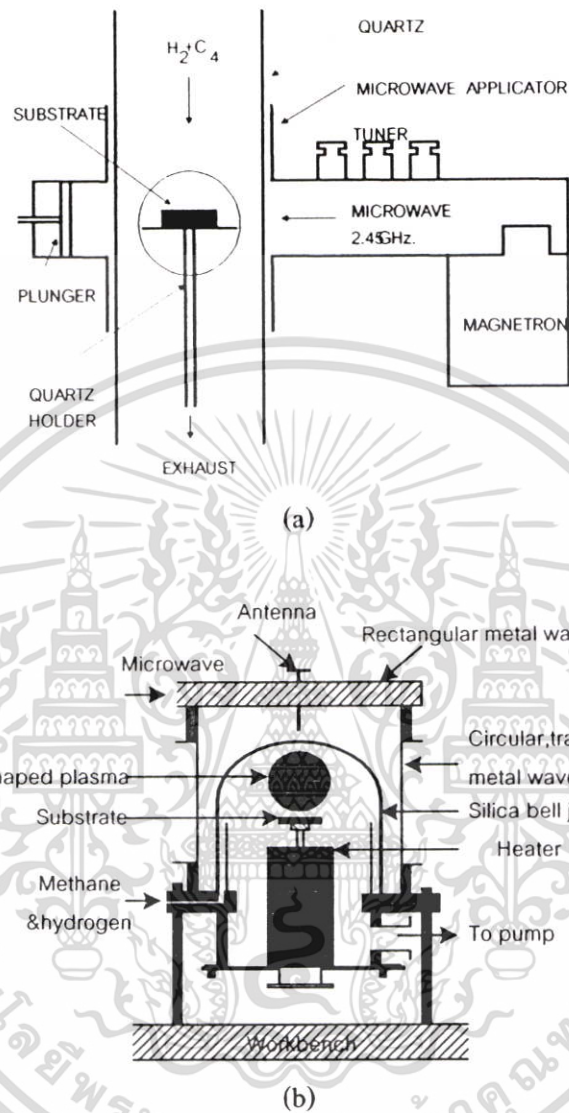
1.2.4 Microwave – plasma – enhanced CVD

เป็นวิธีการใช้ความถี่ไมโครเวฟ ทำการสั่นอิเล็กตรอนทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอนกับไอออนที่เย็น โมเลกุลอะตอมจึงแยกออกเป็นอะตอมได้ และการกระตุ้นไมโครเวฟพลาสมาของโมเลกุลไฮโดรเจน จะทำให้เกิดสภาวะสมดุลยิ่งยวดของความเข้มข้นของไฮโดรเจน

ชุดอุปกรณ์ Microwave plasma enhanced CVD แสดงดังรูป 1.4 (a) เป็น Tube-style ประกอบด้วย Magnetron ทำหน้าที่กำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ตรงเข้าสู่ Applicator ภายใน Rectangular wave guide ซึ่งเป็นตัวกำหนดขอบเขตของคลื่นไมโครเวฟ ระหว่างตัวกำเนิดและแชนเบอร์ซึ่งทำปฏิกิริยา โดยแชนเบอร์นี้จะทำมาจากท่อซิลิคอนซึ่งสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200°C และไม่ดูดคลื่นรังสีไมโครเวฟที่ผนังของท่อซิลิคอน จึงทำให้เกิดการปนเปื้อนซิลิคอนในคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้น ตำแหน่งทิศทางเคลื่อนที่ของไมโครเวฟจะพุ่งผ่าน Three stub tuners ที่บริเวณ Wave guide ฐานรองจะมีอุณหภูมิ 400 – 1000°C ใช้แก๊สผสม 0.1 – 5 % มีเทนในไฮโดรเจนอัตราการไหลรวมอยู่ระหว่าง 50 – 500 sccm แต่เนื่องจาก Tube – style ดังรูปที่ 1.4 (a) มีข้อเสียที่ขนาดของฐานรองเล็กดังนั้น ในปี 1986 Applied science and Technology Inc[15] จึงพัฒนารูปแบบทางวิศวกรรมของระบบนี้เน้นดังรูป ที่ 1.4 (b)

โดยการระเบิดของพลาสมา สามารถสร้างไมโครเวฟพลาสมาได้ขนาด 10 เซนติเมตร ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางพลาสมาจะมีลักษณะกลมเป็นลูกบอล ซึ่งจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามกำลังไมโครเวฟที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น จะพบคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 – 60 nm โดยเมื่ออุณหภูมิของการผสมแก๊สไฮโดรเจนกับมีเทนที่ 350 – 400 °C จะพบคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 – 200 nm



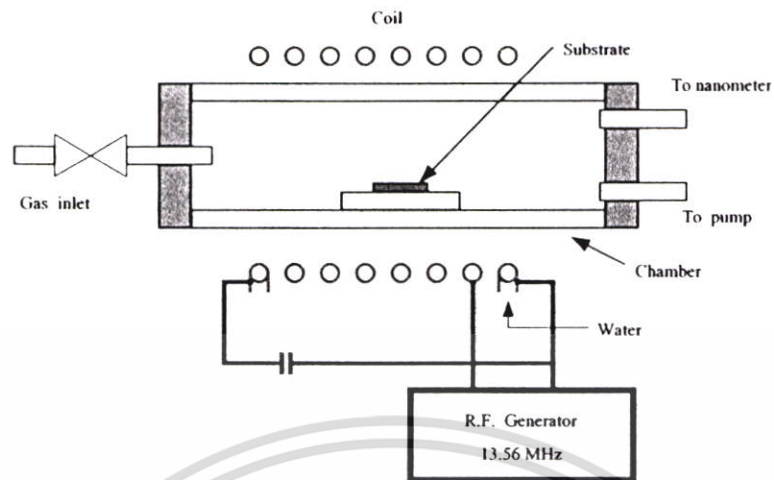
รูปที่ 1.4 แผนภาพระบบ Microwave - Plasma CVD Method (a) Tube-style (b) Bell jar

โดยวิธี HFCVD นี้ได้มีการพัฒนามาสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดย Hidetoshi Miyashita, Takahito Ono, Phana Ngoc Minh and Masayoshi Esashi, Tohoku University [12]

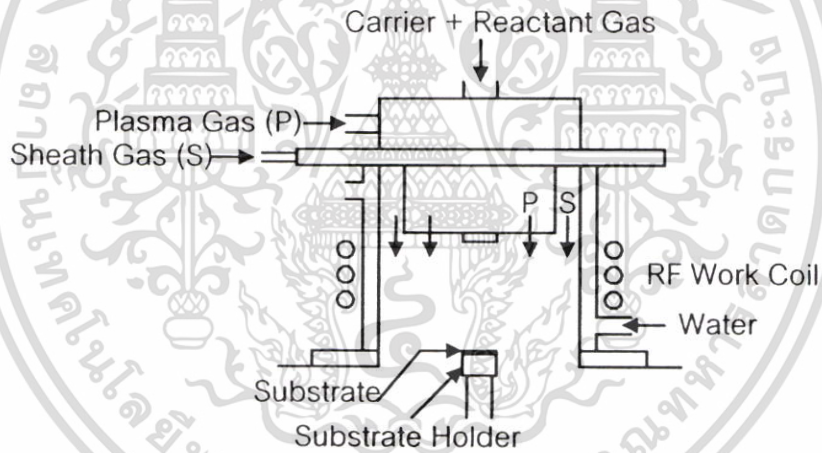
1.2.5 RF Plasma enhanced CVD

โดยทั่วไปความถี่วิทยุที่สามารถสร้างพลาสมาในอเล็กโตรด มี 2 ลักษณะที่สามารถเปิดได้ คือ การเพดแบบขนานและโดยการเหนี่ยวนำ ดังรูป 1.5 RF (a) และ (b) Plasma enhanced CVD ทำงานด้วยความถี่ 13.58 MHz โดยแก๊สมิเทนที่อุณหภูมิฐานรองต่ำกว่า 500 °C พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้มีขนาดมากกว่า 200 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

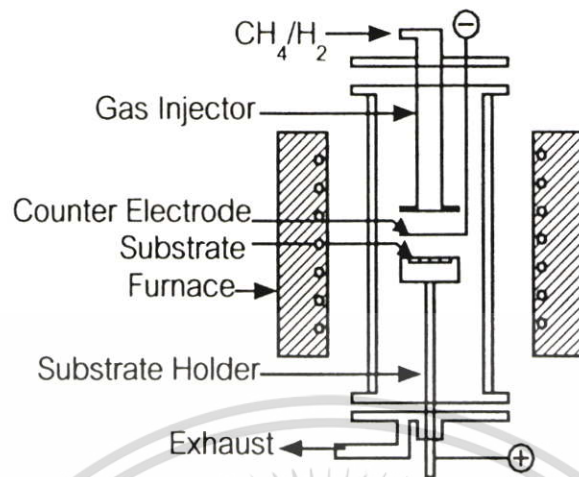
รูปที่ 1.5 แผนภาพระบบ RF plasma CVD method (a) Inductive RF plasma CVD

(b) RF thermal plasma CVD [15]

1.2.6 DC plasma enhanced CVD

ใน DC plasma CVD จะจ่ายแรงดันไฟตรงลงหรือบวกให้กับฐานรองเพื่อให้เกิดเป็นอิเล็กโทรด
 ดังรูปที่ 1.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

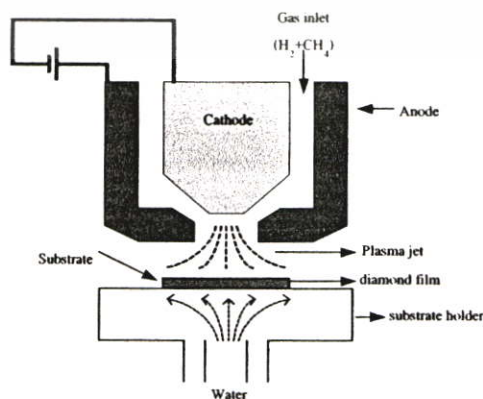


รูปที่ 1.6 แผนภาพระบบ DC plasma CVD method [15]

DC plasma CVD ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ Hollow cathode PECVD ทำให้เกิดพลาสมาขึ้นจากการไบอัสลบและให้ฐานรองไบอัสบวก ใช้แคโทด โมลิบดีนัมเป็นเพลาในการสร้าง DC arc plasma ใช้ฐานรองเป็นแอโนดพลาสมาอยู่ที่ความดัน 27 kPa (200 ทอร์) กำลังงาน 2.4 - 4 kW/cm² Akatsuka และคณะ [15] DC arc ให้กำลัง 560 W โดยใช้แก๊สผสมเป็น Ar + H₂ + เอทานอลไหลผ่าน Arc ไปยังฐานรองที่ความดันรวม 27 - 41 kPa (200 - 300 ทอร์)

1.2.7 Plasma torch activation

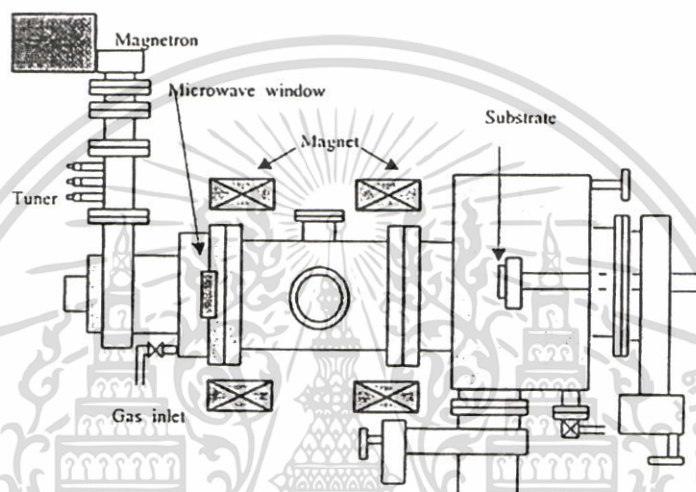
การใช้ Torch จะทำให้พลาสมามีความหนาแน่นกำลังกระตุ้นแก๊สเฟส Kurihara และคณะผู้ทำงานวิจัยร่วมที่ Fujitsu laboratories [3] ได้พัฒนา DC plasma jet process เรียก DIA - JET process โดยการพ่นแก๊สผสมมีเทนและไฮโดรเจนไปกับแก๊สที่พวาร์กอนหรือฮีเลียม ภายใต้ความดัน 4.1 - 41 kPa (30 - 300 ทอร์) DC arc ได้รับแรงดัน 80 - 150 V และกระแส 10 - 50 A (ช่วง 0.8 - 7.5 kW) และใช้ฐานรองอุณหภูมิ 520 - 1,220 °C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 1.7 แผนภาพระบบ DC plasma jet CVD method [15] ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.8 Electron cyclotron resonance

เหมาะกับการใช้งานที่ระบบพลาสมาเอชซิงค์ความดันต่ำ แต่ได้พื้นที่กว้างและความหนาแน่นพลาสมาสูง โดยเลือกความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อความถี่ของ Electron gyration ที่เท่ากับความถี่ของไมโครเวฟ เมื่อความถี่เหล่านี้เหมาะสมพอดีกัน ความหนาแน่นพลาสมาจะเพิ่มขึ้น โดยการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นของพลาสมาจากพลังงานไมโครเวฟ โดยใช้ความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz สนามแม่เหล็ก 875 Gauss ความดัน ≥ 0.1 ทอร์ ปัจจุบันเทคนิคนี้ สามารถสร้างพลาสมาเหนือพื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว ได้ดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 แผนภาพระบบ Electron cyclotron resonance microwave plasma CVD method [15]

1.3 การประยุกต์ใช้งานคาร์บอนนาโนทิวป์ [2]

คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างขึ้นด้วยวิธี CVD ที่ความดันต่ำมีความเหมาะสมหลายอย่างในการไปประยุกต์ใช้งาน เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ในเชิงกลพบว่ามีค่า Tensile strength มากกว่า 60 GPa มีความยืดหยุ่นสูงทนต่อความร้อนที่ในสูญญากาศประมาณ 2800°C และในอากาศที่ประมาณ 750°C ดังนั้นจึงไปเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะเซรามิก

นอกจากนั้นยังมีค่าสภาพนำความร้อนสูงมาก (3,000 - 6,000 W/m.k) มากกว่าเพชรและแกรไฟต์ถึง 2,000 W/m.k ซึ่งทำให้มีการนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงหรือสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีสมบัติที่ดีหลายประการ ได้มีการประยุกต์ใช้งานหลายด้านด้วยกัน ทั้งด้านเชิงกลและเชิงไฟฟ้า ดังตัวอย่างของการใช้งานที่จะกล่าวดังต่อไปนี้และเป็นแค่ตัวอย่างบางส่วนเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เป็นส่วนผสมให้แก่วัสดุอื่นๆ เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่า young's Modules สูงถึง ITPa⁴ และมีคุณสมบัติที่พิเศษอีกหลายด้าน เมื่อนำไปผสมกับวัสดุอื่นจะทำให้วัสดุนั้นมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เช่น นักวิทยาศาสตร์ของ NASA ประสบความสำเร็จที่ผสมคาร์บอนนาโนทิวป์ลงไปในโพลีเมอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้า ซึ่งอาจจะนำไปสู่การสังเคราะห์พลาสติกที่นำไฟฟ้าและแข็งแรงกว่าเหล็กก็เป็นได้

2. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวที่น้อยมากๆ ทั้งยังมีความสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ความเสถียรภาพดี และมีความสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ โดยใช้แรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่ต่ำ ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายอิเล็กตรอนได้และนำไปประยุกต์ในอุปกรณ์ต่าง เช่น X - ray และแหล่งกำเนิด microwave ขนาดเล็ก รูปที่ 1.9 (a) เป็นจอแบน รูปที่ 1.9 (b) เป็นหลอดไฟที่กินไฟน้อย

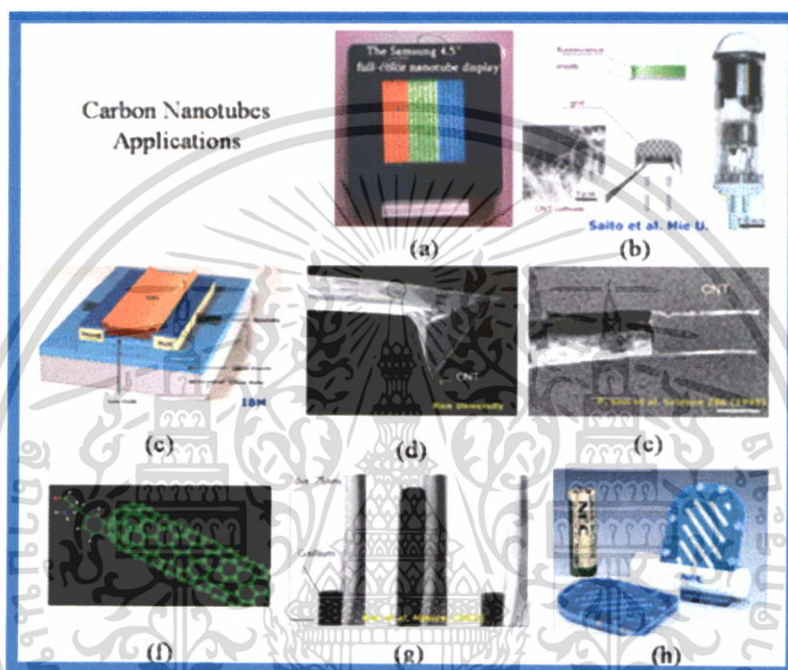
3. Electronics device เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีโครงสร้างเทียบกับ ID จึงทำให้การนำไฟฟ้าในคาร์บอนนาโนทิวป์เป็นแบบ ballistic กล่าวคือ ไม่มีการกระจัดกระจายของอิเล็กตรอน ตลอดความยาวของทิวป์ จึงสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ในวงจรรนาโนอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีคุณสมบัติเป็นเซมิคอนดักเตอร์อีกด้วย รูปที่ 1.9 (c) เมื่อไม่นานมานี้ กลุ่ม IBM และกลุ่ม Prof. Dekker ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างทรานซิสเตอร์และ Logic Gate ที่ทำมาจาก SWCNTs สำเร็จเป็นครั้งแรกของโลกคาร์บอนนาโนทิวป์ FET ที่ประดิษฐ์ขึ้นมานั้นมีประสิทธิภาพดีกว่า MosFET ที่ใช้งานกันในปัจจุบัน อุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ สามารถที่จะนำไปใช้ในคอมพิวเตอร์ได้ในอนาคต ซึ่งจะช่วยลดขนาดอุปกรณ์และปริมาณการกินกระแสไฟลง

4. รูปที่ 1.9 (d) เป็นนาโน Probe เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีขนาดระดับนาโนเมตรและมีความยืดหยุ่นสูงจึง สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็น Probe ของเครื่องมือวิเคราะห์ Scanning Probe Microscope (SPM) เช่น Scanning Tunneling Microscopy (STM) และ Atomic Force Microscopy (AFM) และรูปที่ 1.9 (e) สามารถนำมาประยุกต์เป็นนาโนคีบ (Nano - tweezers) รูปที่ 1.9 (f) นอกจากคาร์บอนนาโนProbe จะสามารถช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างของสสารระดับอะตอมได้แล้ว SPM ยังสามารถถูกดัดแปลงโดยการนำ Functional group ต่างๆ เช่น -COOH มายึดติดที่ปลายคาร์บอนนาโนทิวป์

5. รูปที่ 1.9 (g) เป็นเซ็นเซอร์ (sensors) เซ็นเซอร์อุณหภูมิสามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 50 - 500°C ปัจจุบันทางวิชาการแสดงให้เห็นว่า คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถนำมาทำเป็นเซ็นเซอร์แก๊ส เช่น NO₂, NH₃, O₂ ได้โดยตรวจสอบจากค่าความต้านทานของทิวป์ที่เปลี่ยนไป

6. การเก็บกักพลังงาน แนวคิดที่จะนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาใช้ในการกักเก็บพลังงานนั้น เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อกลวงมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กระดับนาโนเมตรและมีพื้นผิวที่เรียบ ลักษณะโครงสร้างที่พิเศษของคาร์บอนนาโนทิวป์นี้เป็นสิ่งเอกลक्षणเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างความสนใจให้นักวิจัยทั่วโลก ที่จะนำมาใช้ในการกักเก็บ H_2 ซึ่งพลังงาน H_2 เป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อม นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dillon ได้แสดงผลการคำนวณไว้ว่า SWCNTs จะสามารถกักเก็บ H_2 ได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์มากขึ้น และมีความเป็นไปได้ที่กักเก็บ H_2 ได้ถึง 6.5 % โดยน้ำหนักซึ่งเป็นค่าที่จะสามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้ นอกเหนือจากนี้ รูปที่ 1.9 (h) คาร์บอนนาโนทิวป์ยังสามารถนำไปใช้เป็น Fuel cell ชนิด Methene Ethanal หรือใช้เป็นขั้วในแบตเตอรี่ได้อีกด้วย



รูปที่ 1.9 วิธีการประยุกต์ของนาโนทิวป์ [2] (a) จอแบน Samsung 4.5 นิ้ว, (b) หลอดไฟกินไฟน้อย, (c) คาร์บอนนาโนทิวป์ FET, (d) นาโน probe, (e) นาโนทิม, (f) คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ถูกดัดแปลงโดยการนำ Functional group มาซึ่ติด, (g) เซ็นเซอร์อุณหภูมิ และ (h) Fuelcell ชนิด Ethanal เป็นขั้ว

บทที่ 2

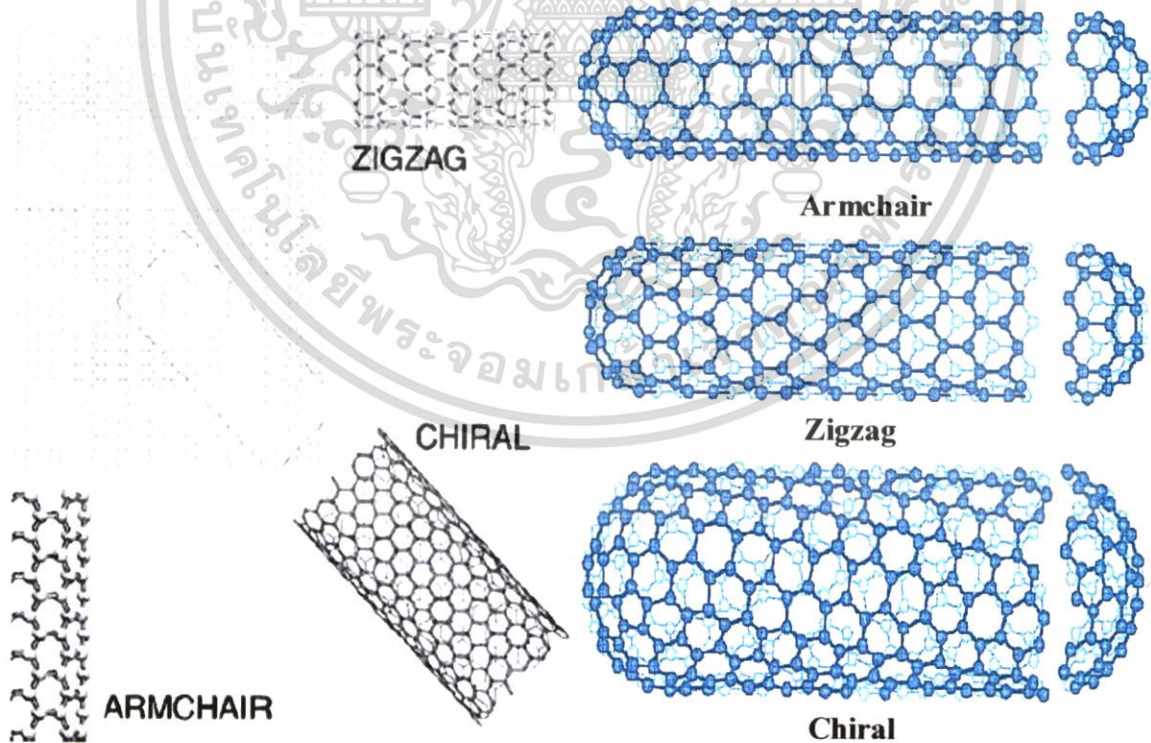
ทฤษฎีของคาร์บอนนาโนทิวป์และหลักการเกิด

คาร์บอนนาโนทิวป์

คาร์บอนอยู่ในหมู่ IV ของตารางธาตุ ซึ่งคาร์บอนสามารถอยู่ได้หลายรูปแบบ เช่น แกรไฟต์ เพชร บัคกี้บอล (Bucky ball) และคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจมากที่สุดในสาขาเทคโนโลยี เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตรที่มีคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างจากวัสดุอื่นปัจจุบันจึงมีการศึกษาคาร์บอนนาโนทิวป์กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะเทคนิคการสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นจำเป็นต้องมีอะตอมคาร์บอนในระบบเพื่อที่จะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งสารที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ก็คือ รูปแบบๆ ของคาร์บอนโดยสารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้างภายใน ดังนั้นหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรูปแบบๆ ของคาร์บอนนาโนทิวป์

2.1 คาร์บอนนาโนทิวป์และรูปแบบต่างๆ ของคาร์บอนนาโนทิวป์

2.1.1 SWCNTs



รูปที่ 2.1 โครงสร้าง SWCNTs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์สามารถค้นพบได้โดยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) ที่มีความเข้มสูง และการใช้เทคนิคของ STM ยืนยันที่ว่าคาร์บอนนาโนทิวป์ จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหลายอันที่ไม่ได้เชื่อมกัน ซึ่งแตกแขนงออกมาจาก โครงสร้างที่คล้ายรังผึ้ง ซึ่งทำให้เห็นถึงชั้นอะตอมเดี่ยวของผลึกแกรไฟต์ ซึ่งถูกเรียกว่าแกรเฟตชีต (graphene sheet) ลักษณะโครงสร้างของ SWNTs สามารถอธิบายได้โดยง่ายในเทอมของยูนิตเซลล์ 1 มิติซึ่งแทนด้วยเวกเตอร์ \hat{c}_1 และ \hat{c}_2

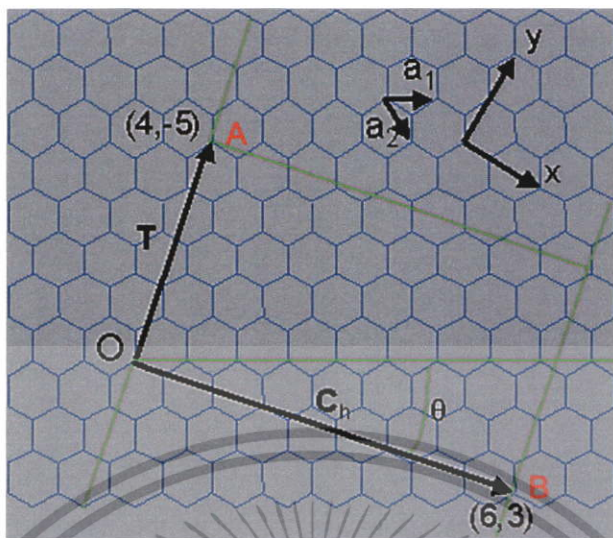
เส้นรอบวงของตัวคาร์บอนนาโนทิวป์ต่างๆ แสดงได้ในเทอมของ Chiral vector $\hat{c}_h = n\hat{a}_1 + m\hat{a}_2$ โดยการเชื่อมต่อด้านที่มีความสมมูลของเป็นผลึกทั้ง 2 ด้าน บนแกรเฟตชีต 2 มิติโครงสร้างแสดงถึงมุม Chiral (θ) ที่เกิดระหว่าง Chiral vector (\hat{c}_h) และทิศทาง "Zigzag" ($\theta = 0$) และ Vectors \hat{a}_1 และ \hat{a}_2 ของแกรเฟตชีตทั้ง 3 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถเกิดขึ้นจากการม้วนของแกรเฟตชีตเข้าเป็นทรงกระบอก โดยจะเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ Zigzag และคาร์บอนนาโนทิวป์ Armchair คาร์บอนนาโนทิวป์ Chiral ตามลำดับโดยที่ Chiral angle ของ $\theta = 0$, $\theta = 30^\circ$ คาร์บอนนาโนทิวป์ Chiral จะมีค่า $0 < \theta < 30^\circ$ โดยจุดตัดของเวกเตอร์ \hat{c}_h (โดยทั่วไปเป็น \hat{c}_h) กับจุดพันธะแรกสามารถคิดได้ว่าเป็นเวกเตอร์แปลง 1 มิติพื้นฐาน (T) ยูนิตเซลล์ของพันธะ 1 มิติ คือรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งกำหนดโดยเวกเตอร์ \hat{c}_h และ T ทรงกระบอก จะเชื่อมต่อฝาครอบครึ่งซีกทั้งสองข้างของตัวคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ประกอบขึ้นจากการวางซ้อนกันที่จุดปลายทั้งสองของเวกเตอร์ \hat{c}_h และจุดเชื่อมต่อของทรงกระบอกที่เกิดขึ้นไปตามแนวของเส้นตรง 2 เส้น OB และ AB เป็นเส้นที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ $\hat{c}_h = n\hat{a}_1 + m\hat{a}_2$ โดยเวกเตอร์ (n,o) หรือ (o,m) ใช้แทนคาร์บอนนาโนทิวป์ Zigzag และเวกเตอร์ (n,n) ใช้แทนคาร์บอนนาโนทิวป์ Armchair และเวกเตอร์ (n,m) ใช้แทนคาร์บอนนาโนทิวป์ Chiral เส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ d_t สามารถแสดงไว้โดย

$$d_t = \sqrt{3} \frac{ac - c(m^2 - mn + n^2)^{1/2}}{\pi} = \frac{c}{\pi} \sin \theta \quad (2.1)$$

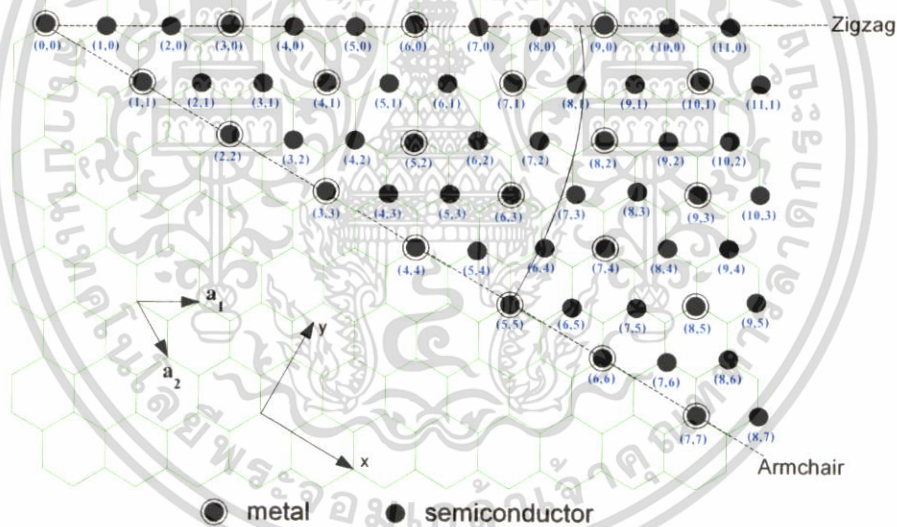
โดยที่ \hat{c}_h คือ ความยาวของเวกเตอร์ \hat{c}_h , $ac - c$ คือ ความยาวของพันธะ C - C (1.42 Å) และ Chiral angle (θ) สามารถแสดงได้โดย

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{3}n}{2m + n} \right] \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2 จากการที่มุม $\theta = 30^\circ$ สำหรับ (n,n) เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ แบบ Armchair และมุม $\theta = 60^\circ$ สำหรับ (n,0) เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ Zigzag จากรูปที่ 2.2 จะเป็นไปตามที่ว่าเรากำหนด θ ให้อยู่ระหว่าง $0 \leq \theta \leq 30^\circ$ ดังนั้นโดยการสมมาตรมุม $\theta = 0^\circ$ จะเป็นได้ทั้งคาร์บอนนาโนทิวป์ Zigzag และคาร์บอนนาโนทิวป์ Chiral



รูปที่ 2.2 Chiral angle ซึ่งกำหนดโดยเวกเตอร์ Ch และ T



รูปที่ 2.3 การเป็นโลหะและสารกึ่งตัวนำของคาร์บอนนาโน

ความแตกต่างในเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ dt และมุม Chiral θ ทำให้เกิดข้อแตกต่างในทางคุณสมบัติของ คาร์บอนนาโนทิวป์ ต่างๆ เวกเตอร์ที่สมมาตร CR- (W/T) จากกลุ่มของความสมมาตรสำหรับคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ถูกแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่ส่วนที่เปลี่ยนแปลง คือ ช่วงระยะห่างระหว่างของ T และมุมที่หมุนถูกแสดงจำนวนของรูป 6 เหลี่ยม (N) ต่อยูนิทเซลล์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ Chiral ถูกระบุโดยค่าต่างๆ ของ (N,N) สามารถแสดงได้ตามสูตร

$$N = 2(n^2 + n^2 + nm) / dR \quad \text{---} \quad 2.3$$

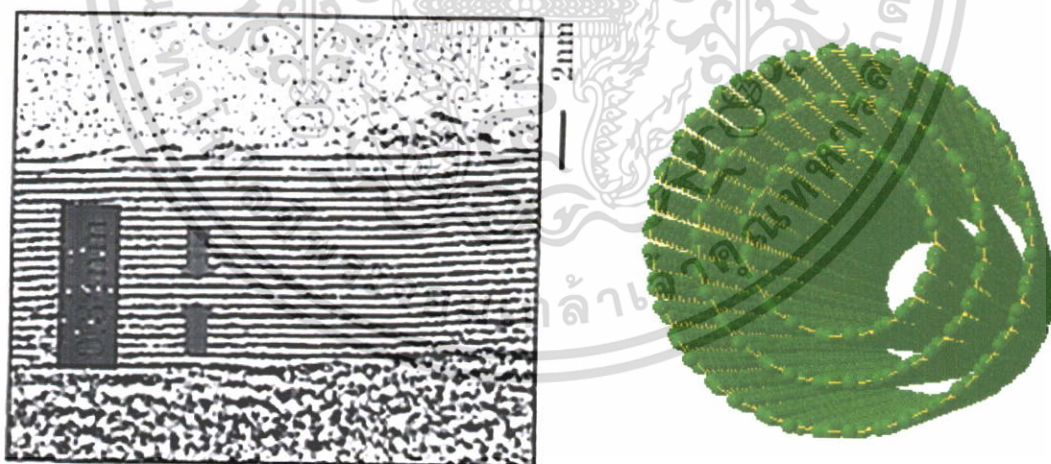
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $dR = d$ ถ้า $n - m$ ไม่เป็นผลคูณของ 3d หรือ $dR = 3d$ ถ้า $n - m$ เป็นผลคูณ 3d และ d ถูกนิยามว่าเป็นตัวหารร่วมที่มีค่ามากที่สุดของ (n,m) ของแต่ละรูปหกเหลี่ยมในพื้นระนาบรูปสี่เหลี่ยม รูปที่ 2.3 ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน 2 อะตอม พื้นที่ของยูนิเซลล์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ คือ N มากกว่าชั้นแกรไฟต์ (graphene layer) และด้วยเหตุนี้พื้นที่ของยูนิเซลล์สำหรับคาร์บอนนาโนทิวป์ในพื้นที่ว่างตรงกันคือ มีจำนวนน้อยกว่า $1/N$ รูปที่ 2.3 ซึ่งให้เห็นว่าคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำและพวกที่เป็นโลหะ

คาร์บอนนาโนทิวป์ถูกสร้างโดยวิธี Laser Vaporization หรือ the carbon arc ปรากฏในภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงให้เห็นกลุ่มคาร์บอน (Carbon bundle) หรือสายคาร์บอน (Carbon ropes) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 - 20 nm และมากถึง 100 μm หรือมากกว่านั้น ในส่วนของความยาวจากการตรวจสอบด้วย TEM กลุ่มของคาร์บอนนาโนทิวป์นี้สามารถแสดงภาพออกมาได้และแสดงส่วนประกอบที่สำคัญของ SWCNTs ที่จัดให้อยู่ในแนวไปตามจุดรวมของแกนการรวบรวมกลุ่มที่เกี่ยวข้องกันของ SWCNTs ถูกเรียกว่า “Carbon nanotubes ropes”

2.1.2 MWCNTs

คือ การซ้อนทับกันหลายๆชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์โดยที่แต่ละชั้นห่างกันประมาณ 0.34 nm โดยระยะห่างระหว่างของชั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาถ้าขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ขึ้นจะเป็นการเพิ่มชั้นของ MWCNTs

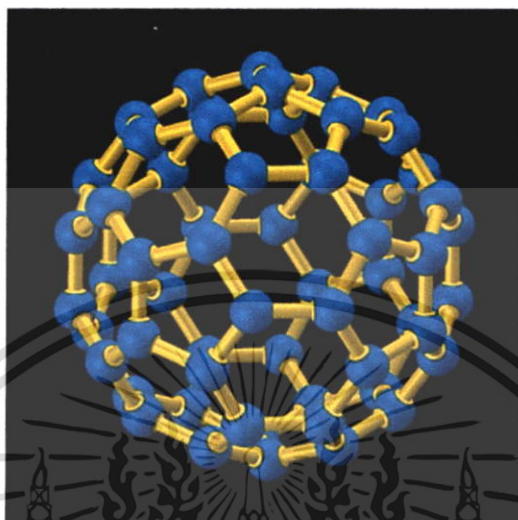


รูปที่ 2.4 โครงสร้าง MWCNTs

2.1.3 บัคกิบอลล

มินสเตอร์ ฟูลเลอร์ิน หรือที่เรียกสั้นๆ ว่าบัคกิบอลล เป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน 60 อะตอม (C_{60}) เชื่อมต่อกันเป็นรูปทรงกลมคล้ายกับลูกฟุตบอล จัดเป็นสารในกลุ่มฟูลเลอร์ินส์ (fullerenes, C_n) ซึ่งเป็นอัญรูป (allotrope) แบบที่สามของคาร์บอนต่อจากเพชรและเอกสารนี้ เป็นเอกสารที่สวางไว้มสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

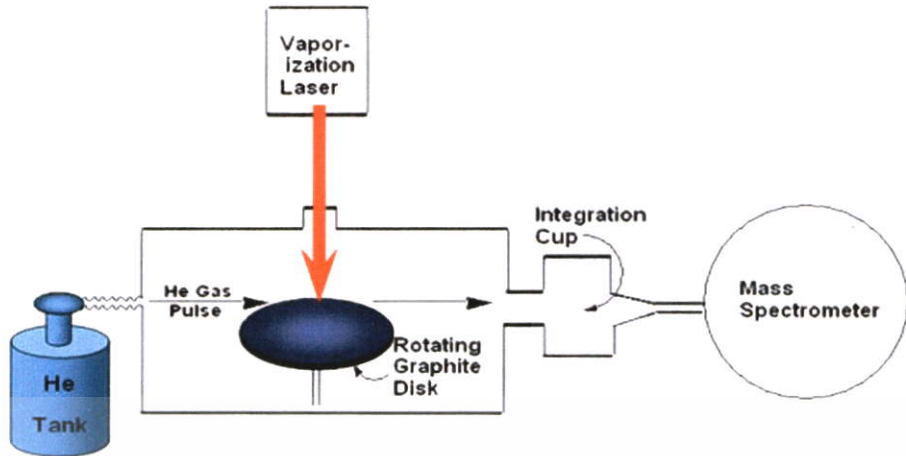
แกรไฟต์บัลล์บอลลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโมเลกุลประมาณ 1 นาโนเมตร ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมของคาร์บอน (hexagons) จำนวน 20 วง และวงห้าเหลี่ยม (pentagons) จำนวน 12 วง โดยที่บัลล์บอลลถือว่าเป็น โมเลกุลสารอินทรีย์ที่มีรูปทรงสมมาตรที่สุดเท่าที่มนุษย์เคยค้นพบจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 2.5 โครงสร้างบัลล์บอลล

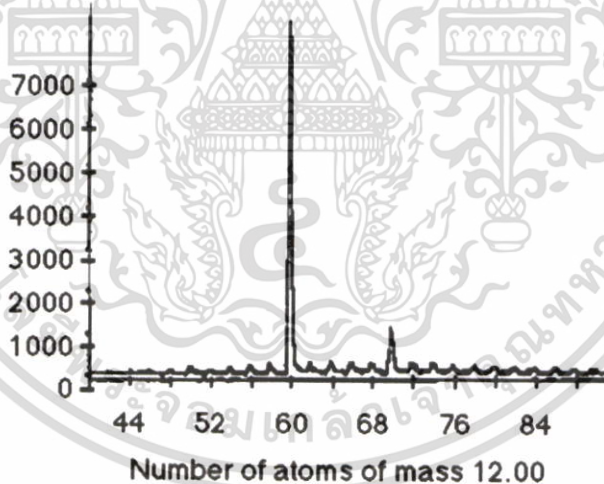
นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกกำลังพากันค้นหาแนวทางในการนำเอาบัลล์บอลลมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ กันอย่างมากมาย ทั้งนี้เป็นเพราะว่าบัลล์บอลลมีคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์และเคมีที่มีความพิเศษหลายประการ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นยารักษาโรคได้หลายชนิด และใช้เป็นพาหนะนำส่งยาแบบนำวิถี (drug delivery) นอกจากนี้ยังสามารถนำบัลล์บอลลไปใช้ประโยชน์ในด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nano electronic) ทั้งนี้เนื่องจากบัลล์บอลลมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) แต่ถ้ามีการเชื่อมกลุ่มโมเลกุลบัลล์บอลลด้วยอะตอมของโลหะอัลคาไลน์ จะทำให้กลุ่มโมเลกุลบัลล์บอลลมีคุณสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวด (superconductor) นอกจากนี้ยังมีการใช้บัลล์บอลลเป็นส่วนประกอบหลักในการพัฒนาเซลล์สุริยะแบบไดแอด (Dyads) รวมทั้งการใช้บัลล์บอลลเป็นตัวบรรจุอะตอมโลหะและโมเลกุลของแก๊สชนิดต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน เป็นต้น และเมื่อทำการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า บัลล์บอลลมีความเสถียรสูงมากและมีคุณสมบัติที่แปลกประหลาดทั้งทางกายภาพและทางเคมีหลายประการ นอกจากนี้ยังสามารถพบบัลล์บอลลได้ในธรรมชาติอีกด้วย เช่น ในเขม่าของเทียนไขและไส้ตะเกียงน้ำมันแก๊ส โมเลกุลมหัศจรรย์ชนิดนี้สามารถเป็นได้ทั้งยารักษาโรคเอดส์ ยารักษาโรคมะเร็ง, ยาปฏิชีวนะ, ยาขับขี้การคายของเซลล์, สารต่อต้านอนุมูลอิสระ, ตัวนำส่งยาและสารพันธุกรรมแบบนำวิถี ฯลฯ ดังนั้นถ้าจะกล่าวถึงบัลล์บอลลเป็นยาครอบจักรวาลในยุคนาโนเทคโนโลยี ก็คงจะไม่ผิดแต่ประการใดในขณะนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบและขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์ที่ริชาร์ด สمولลีใช้ในการสังเคราะห์และตรวจสอบบัลล์บอลล

แมสสเปกตรัมของบัลล์บอลลที่ริชาร์ด สمولลี และทีมงาน ค้นพบโดยบังเอิญจากการระเหยแกรไฟต์ด้วยแสงเลเซอร์พลังงานต่ำ ซึ่งทำให้ทีมนักวิจัยทราบว่าโมเลกุลบัลล์บอลลประกอบด้วยคาร์บอน 60 อะตอมเชื่อมต่อกัน

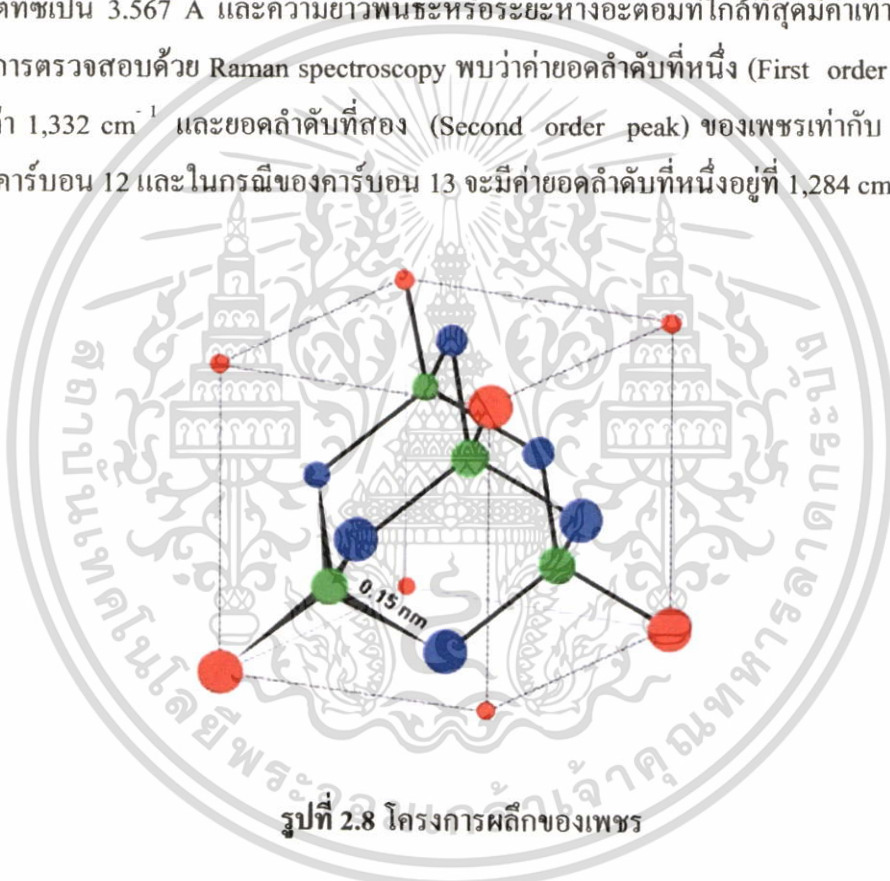


รูปที่ 2.7 โมเลกุลบัลล์บอลลประกอบด้วยคาร์บอน 60 อะตอมเชื่อมต่อกัน

2.1.4 Diamond

ในกรณีของเพชรธรรมชาติอะตอมคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า “Diamond structure” ซึ่งสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 2.8 จากรูปพบว่าภายใน 1 ยูนิตเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอน 8 โดย 1/8 ของอะตอมอยู่ที่มุมทั้งแปด 1/2 อะตอม อยู่ที่แต่ละด้านหน้าของยูนิตเซลล์และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอม ฝังตัวอยู่ในยูนิตเซลล์เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมจากมุมของยูนิตเซลล์คาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ตัวที่อยู่รอบๆ ตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์เป็นเอกลักษณ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นใบไซปรีเยชันด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

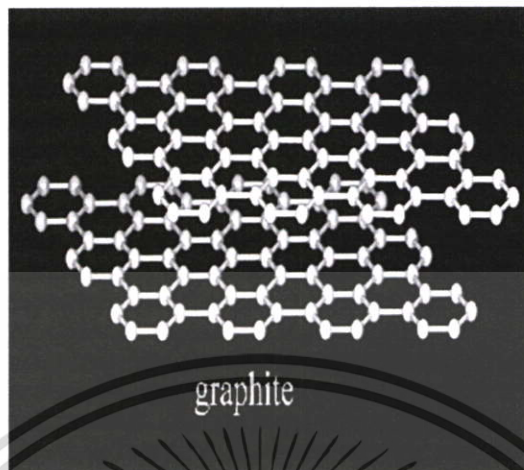
เลนที่แบบ sp^3 ในที่สุดจะได้ว่าใน Diamond structure นี้อะตอมของคาร์บอนจะจับตัวกันมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกัน จะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบหรืออาจมองอีกอย่างหนึ่งว่าวงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอน ที่จับตัวกันเป็นระนาบ [111] 2 อัน วางซ้อนทับกันอยู่ในลักษณะกลับหัวและอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกัน รูปที่ 2.8 แสดงให้เป็นระนาบ [111] ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายจุดและระนาบ [111] ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายขวางวางซ้อนกันอยู่เป็นรูวงแหวนหกเหลี่ยม ความยาวเลตทิซอาจถูกมองว่า คือ การเรียงกันเป็นชั้นๆ ของวงแหวนหกเหลี่ยมโดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกันในทิศทางของระนาบ [111] การเรียงลำดับชั้นจะเป็นแบบ ABC ABC ABC ... ซึ่งทำให้เพชรมีค่าคงที่เลตทิซเป็น 3.567 Å และความยาวพันธะหรือระยะห่างอะตอมที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.54 Å ผลของการตรวจสอบด้วย Raman spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง (First order peak) ของเพชรมีค่า $1,332 \text{ cm}^{-1}$ และยอดลำดับที่สอง (Second order peak) ของเพชรเท่ากับ $2,458 \text{ cm}^{-1}$ สำหรับคาร์บอน 12 และในกรณีของคาร์บอน 13 จะมีค่ายอดลำดับที่หนึ่งอยู่ที่ $1,284 \text{ cm}^{-1}$



2.1.5 Graphite

แกรไฟต์เป็นรูปพื้นฐานของคาร์บอนที่พบได้มากที่สุด ลักษณะโครงสร้างภายในของมันแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 อะตอมคาร์บอนจะจับตัวที่ลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมเช่นเดียวกับเพชร แต่ข้อแตกต่างที่เห็นได้เด่นชัด คืออะตอมคาร์บอนที่จับตัวเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมของแกรไฟต์นั้นจะไม่มี การเหลื่อมกันของอะตอมที่อยู่ใกล้กันเหมือนวงแหวนหกเหลี่ยมของเพชร แต่จะมีลักษณะเป็นแผ่นราบเสมอกัน อีกทั้งคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ Trigonally กับอะตอมทั้งสามตัวที่อยู่ใกล้เคียงด้วยพันธะแบบ sp^2 การเรียงลำดับชั้นของวงแหวนหกเหลี่ยม แกรไฟต์จะเป็นแบบ AB AB AB ...ตามลำดับ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงเท่ากับ 1.42 Å ในขณะที่ค่าคงที่เลตทิซ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ 6.707 \AA สำหรับแกรไฟต์ผลการวัดด้วย Raman spectroscopy จะแสดงตำแหน่งยอดลำดับที่หนึ่ง ที่ค่า $1,580 \text{ cm}^{-1}$ และยอดลำดับที่สองอยู่ที่ $3,240 \text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 โครงสร้างแกรไฟต์

2.1.6 Microcrystalline carbon

ในการสังเคราะห์จะมีคาร์บอนอะตอมแบบ sp^3 และมีพันธะแบบ sp^2 ใกล้เคียง Crystallite grain boundaries สารที่มีคุณลักษณะเช่นนี้จะเรียกว่า Microcrystalline carbon หรือ Microcrystalline graphite กราฟจาก Raman จะแสดงยอดคลื่นที่ตำแหน่ง $1,355 \text{ cm}^{-1}$ เมื่อเนื้อสารมีขนาดของเกรนเล็กมากๆ และยอดคลื่นอันดับสองมีค่า $2,710 \text{ cm}^{-1}$

2.1.7 Amorphous carbon

Amorphous carbon ที่มีพันธะเป็นแบบ sp^2 จะแสดงยอดคลื่นของ Raman มีลักษณะเป็นแถบระหว่างตำแหน่งยอดที่ $1,345 \text{ cm}^{-1}$ ถึงตำแหน่งที่ $1,550 \text{ cm}^{-1}$ โดยยอดคลื่นจะเปลี่ยนจากค่า $1,345 \text{ cm}^{-1}$ เป็นค่า $1,550 \text{ cm}^{-1}$ เมื่อเนื้อสารเกิดสาร Hydrogenated ซึ่งที่ตำแหน่งยอดคลื่น $1,550 \text{ cm}^{-1}$ นี้ สารจะถูกเรียกว่าเป็น Diamond-like carbon (DLC) ส่วน Amorphous carbon ชนิดนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่ง คือ Small size cubic diamond (ขนาดของผลึก $< 0.1 \mu\text{m}$)

2.1.8 Lonsdaleite

ถ้าในชนิดเซลมีการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นแบบ Hexagonal และวงแหวนหกเหลี่ยมของอะตอมคาร์บอนมีการเรียงตัวเป็นชั้นแบบ AB AB AB ... อะตอมคาร์บอนที่มีการจัดตัวโครงสร้างเช่นนี้ จะถูกเรียกว่า “Lonsdaleite” หรือ “Hexagonal diamond” ค่าคงที่แลตทิซในทิศทาง a และ c จะเท่ากับ 2.52 \AA และ 4.12 \AA ตามลำดับ โดยที่ระยะห่างระหว่างอะตอมที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ 152 \AA จะแสดงค่ายอดคลื่นของ Raman ที่ตำแหน่งตั้งแต่ $1,315 - 1,326 \text{ cm}^{-1}$ ส่วนมากแล้วเรามักพบการเรียงตัวของคาร์บอนแบบนี้ ได้ในเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์แบบ Shock wave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คุณสมบัติต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวป์

แกรไฟต์เป็นรูปแบบหนึ่งของ คาร์บอนเนื่องจากอะตอมคาร์บอนที่เรียงตัวกัน ในแนวระนาบ โดยอะตอมคาร์บอนเหล่านี้ จะเชื่อมโยงกันในลักษณะของตาข่ายรูปหกเหลี่ยม เมื่อเกิดการม้วนตัว เป็นท่อจะมีคุณสมบัติที่พิเศษหลายประการ โดยท่อเหล่านี้เรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวป์

2.2.1 คุณสมบัติทางกล

จากบทความ [2] มีการคาดคะเนความแข็งแรงของ SWCNTs ในหลายระดับจากการทดลอง หลายครั้งระบุว่า มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้าเกินกว่า 50 เท่าโดยที่ค่า Tensile strength ที่มากกว่า 60 GPA ($60 \times 10^9 \text{ N/m}^2$) ไม่เพียงแต่มีความแข็งแรงแต่ยังเบาและยืดหยุ่นได้ถึงจะโค้งงอก็สามารถคืนสู่สภาพเดิม โดยไม่เสียหายมีค่า young's modulus $\sim 1 \text{ T Pa}$ (10^{12} N/m^2) ทนต่อความร้อนในสูญญากาศประมาณ $2,800^\circ\text{C}$ ในอากาศ $\sim 750^\circ\text{C}$ มีค่าการนำความร้อน Thermal Conductivity สูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหมด คือ MWCNTs มีมากกว่า 3,000 W/mk และ SWCNTs 6,000 W/mk

2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวป์

ความสามารถ ในการนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวป์ประมาณ 10^9 A/cm^2 หรือประมาณ 1,000 เท่าของทองแดง โดยสิ่งที่เป็นข้อสังเกตในคุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยวนี้ มาจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่ปกติของแกรเฟสชีส (ได้มาจากแผ่นของอะตอมแกรไฟต์เพียง 1 แผ่น อยู่ในรูปแบบ 2 มิติ) แกรเฟสชีสที่มีโครงสร้างเป็น 2 มิติ มีเลขทิสเป็นรูปร่างซึ่งได้มาจากพื้นที่ sp^2 ของอะตอมคาร์บอน การนำไฟฟ้าของแกรเฟสชีสถูกกำหนดโดยธรรมชาติของสถานะทางไฟฟ้าใกล้ๆ กับระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F ; ระดับพลังงานสูงสุดที่อิเล็กตรอนสามารถครอบครองได้ที่ 0 องศาของอุณหภูมิสมบูรณ์) โดยพลังงานของสถานะทางไฟฟ้าจะเป็นฟังก์ชันของเวกเตอร์ (K) ใกล้ๆ กับระดับพลังงานเฟอร์มิ ดังที่แสดงในรูป 2.10 (b) โดยแถบพลังงานนี้แสดงถึงการที่อิเล็กตรอนกระเจิงเนื่องจากอะตอมในผลึกของแกรฟิตซึ่งไม่เป็นปกติเหมือนในโลหะ ที่มีสถานะพลังงานมากมายให้เคลื่อนที่ไปในผลึกที่ระดับเฟอร์มิ หรือในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่จะมีช่องว่างพลังงาน (energy gap) ซึ่งไม่มีสถานะพลังงานใกล้ๆ กับระดับเฟอร์มิ เนื่องจากเกิดการ back scattering ของอิเล็กตรอนเนื่องจากแกรฟิต

แถบพลังงานของแกรเฟสชีสสามารถอธิบายได้โดยในทิศทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิจะเกิดการ back scattering เนื่องจากอะตอมในแกรฟิตทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์มีช่องว่างพลังงานขึ้นมาเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำ

อย่างไรก็ตามในบางทิศทางของการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนจะกระเจิงจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่งในแกรฟิตโดยไม่กระทบกันกับแกรฟิต เป็นผลให้ผลของการเกิด back scattering ลดน้อยลงและก่อให้เกิดคุณสมบัติของโลหะ โดยผลของการลด back scattering นี้จะเกิดในทิศทางของแกน y และทิศทางอื่นๆ ที่มุม 60° , 120° , 180° , และ 240° กับแกน y รูปที่ 2.10 (b) ซึ่งในทิศทาง

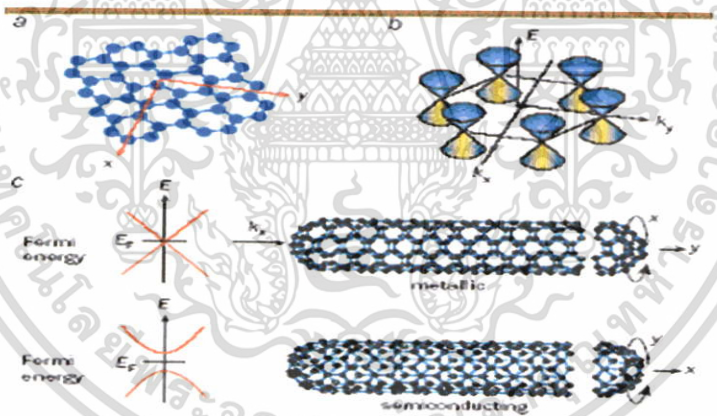
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นแบบฉบับนี้ขอสงวนสิทธิ์ในการคัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี่เราจะได้คาร์บอนนาโนคาร์บอนทิวป์ที่มีคุณสมบัติเป็นเซมิเมทัล ทำให้สรุปได้ว่าถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทางนี้ แกรฟีนจะมีคุณสมบัติเป็นโลหะส่วนในทิศทางอื่นๆ จะเป็นสารกึ่งตัวนำ

ในการที่เราจะสร้างตัวนำไฟฟ้าในแบบ 1 มิติ (1 - D) จาก 2 มิติ (2 - D) เราอาจใช้ทฤษฎีสตริง (String Theory) และการม้วนท่อในทิศทางต่างๆ เพื่อสร้างเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ รูปที่ 2.10 (c) โดยผลจากการม้วนนี้จะทำให้เกิดขอบเขตเงื่อนไขที่เป็นคาบของฟังก์ชันคลื่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ควอนไทซ์กับค่า k_y โดยส่วนประกอบของ k นี้จะตั้งฉากกับแกนของคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่ง $k_y = 2\pi n/c$ โดย c คือ ความยาวเส้นรอบวงของท่อและ n คือ จำนวนเต็มโดยส่วนประกอบของ k จะอยู่ตามแนวยาวของคาร์บอนนาโนทิวป์

ถ้าแกนของคาร์บอนนาโนทิวป์อยู่ในทิศทางเดียวกันกับแกน y พลังงานจะเป็นฟังก์ชันของค่า k จากแถบพลังงานที่ตัดผ่านกับศูนย์กลางของสถานะพลังงานรูปทรงกรวย ซึ่งจะทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์จะมีคุณสมบัติเป็นโลหะใน 1 มิติ คล้ายกับโลหะทั่วไป

อย่างไรก็ตาม ถ้าแกนของคาร์บอนนาโนทิวป์อยู่ในทิศทางอื่นๆ เช่น อยู่ตามแนวแกน x แถบพลังงานของคาร์บอนนาโนทิวป์จะแตกต่างจากรูปกรวยทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำในแบบ 1 มิติ ที่มีช่องว่างพลังงานอยู่ระหว่างสถานะที่มีไฮลอคอยู่เต็มกับสถานะว่างของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.10 การม้วนของคาร์บอนนาโนทิวป์ (a) โครงสร้างของแลตทิซของแกรฟีน (b) พลังงานในสถานะนำไฟฟ้าของแกรฟีน (c) ทิศทางการม้วนตัวรอบแกน y และ แกน X

(a) โครงสร้างของแลตทิซของแกรฟีน – วัสดุใน 2 มิติ ที่ใช้ในการม้วนเพื่อสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยแลตทิซมีลักษณะเป็นรังผึ้งของอะตอมคาร์บอน (b) พลังงานในสถานะนำไฟฟ้าของแกรฟีนซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวกเตอร์ k ของอิเล็กตรอน โดยจะไม่นำไฟฟ้ายกเว้นในกรณีพิเศษที่เวกเตอร์ ผ่านในทิศทางที่มีทรงกรวยอยู่ (c) ถ้าแกรฟีนม้วนรอบแกน y จะทำให้เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่โลหะ (รูปบน) ส่วนถ้าม้วนรอบแกน x คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (รูปล่าง) ได้มาจาก แถบพลังงานใน 2 มิติ ที่แสดงในรูป 2.10 (b) โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวกเตอร์ที่มีได้เป็นค่าตามแนวยาวของคาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถเป็นได้ทั้งสารกึ่งตัวนำ หรือ โลหะขึ้นอยู่กับขนาดที่ทำการหมุน ซึ่งจากทฤษฎีและจากการใช้เทคนิค STM ในการตรวจสอบ โครงสร้างของอะตอมของคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งสามารถยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง ของอะ ตอมของคาร์บอนนาโนทิวป์กับคุณสมบัติทางๆ ไฟฟ้าโดย [8]

2.2.3 คุณสมบัติคาร์บอนนาโนทิวป์ เมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น

คาร์บอนนาโนทิวป์มีลักษณะเด่นหลายประการ เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติกับวัสดุชนิดอื่นจะ เห็นว่าคาร์บอนนาโนทิวป์มีคุณสมบัติที่ดีกว่าดังนี้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบค่า Thermal conductivitys

Materials	Thermal Conductivity (W/mk)
Carbon nanotubes	3000 – 6000
Diamond	2000
Silicon	150
Copper	380
Iron	82
Aluminum	238

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบค่า young's modulus

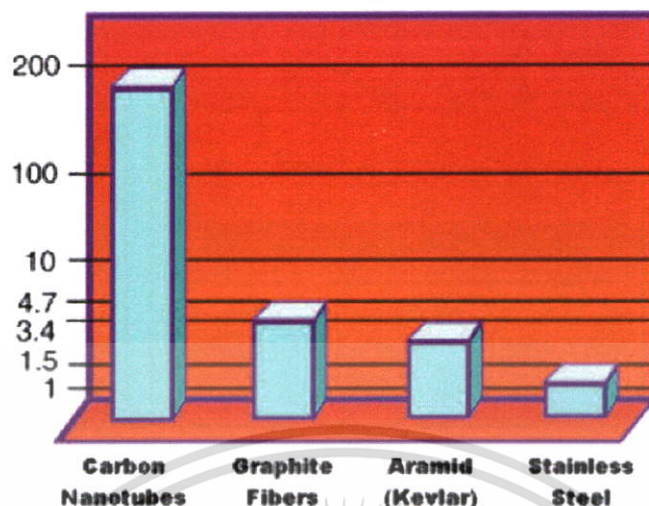
Materials	Value (N/m ²)
Carbon nanotubes	1×10^{12}
Diamond	1000×10^9
Silicon	107×10^9
Tungsten	340×10^9
Copper	124×10^9
Steel	200×10^9

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบ ค่า Energygap

Materials	Energygap
Carbon nanotubes	340 meV – 1.2 eV
Diamond	5.45 eV
Silicon	1.2 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tensile Strength of Engineering Materials
GPa, log scale



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบค่า Tensile strength ของคาร์บอนนาโนทิวป์ กับวัสดุชนิดอื่น

1. คำนำความร้อนของคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่า 3,000 – 6,000 W/mk ซึ่งมีค่ามากกว่าวัสดุชนิดอื่นจึงสามารถที่จะนำมาทำเป็นอุปกรณ์ช่วยระบายความร้อนได้ดี
2. ค่าความยืดหยุ่นสูงเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ถึงจะโค้งงอก็สามารถคืนสู่สภาพได้โดยไม่เสียหาย
3. คาร์บอนนาโนทิวป์มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกันจะมีค่า Energy gap ที่ต่างกันโดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางจะแปรผกผันกับค่า Energy gap จากตารางจะมีค่าอยู่ 340 meV ถึง 1.2 eV ซึ่งสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์ ไปใช้งานในลักษณะที่เหมาะสมกว่าวัสดุชนิดอื่น
4. มี Tensile strength ที่สูงประมาณ 50 เท่าของเหล็กแต่มีน้ำหนักเบามากกว่าเหล็กมาก

2.3 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD [20, 7]

กระบวนการทาง CVD จะมีเทคนิคและมีอุปกรณ์ที่ต่างกันแต่พื้นฐานที่สำคัญ คือในกระบวนการจะต้องมีการเกิดของทั้ง 4 หัวข้อนี้ มิเช่นนั้นจะเป็นเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสม ทำให้ไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์

2.3.1 อะตอมของไฮโดรเจน

การสังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD เป็นการใช้แก๊สไฮโดรคาร์บอนเป็นแหล่งจ่ายอะตอมคาร์บอน ในการสังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น มีเทน, อะซิโตน, โพรเพน, อีเทน, อะเซทิลีน, ส่วนแก๊สไฮโดรเจนจะเป็นตัวควบคุมในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ทั้งนี้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนและอนุภาคคาร์บอนจะต้องมีความเหมาะสม เนื่องจากในบรรยากาศที่มีอะตอมของไฮโดรเจน เป็นเครื่องยืนยันให้เห็นว่า เพชรจะมีความเสถียรในสภาวะที่มีอะตอมไฮโดรเจนมากกว่าแกรไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ ในโครงสร้างเพชรถ้าหากมีอะตอมคาร์บอนข้างเคียงสองอะตอมถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจน จะพบว่าพันธะ sp^3 ยังคงมีอยู่ในกรณีเดียวกัน โดยแกรไฟต์จะมีการเปลี่ยนแปลงหรือถูกกำจัดไปด้วยอะตอมของไฮโดรเจนที่มีความหนาแน่นขึ้นอาจกล่าวสรุปได้ว่าอะตอมของไฮโดรเจนที่เหมาะสมสามารถที่เปลี่ยนแปลงแกรไฟต์ให้เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ได้เช่นกัน โดยอาจใช้แก๊สอื่นแทนแก๊สไฮโดรเจนได้

2.3.2 การกระตุ้นแก๊สให้เกิดอนุภาคคาร์บอน

ไม่ว่าจะกระตุ้นด้วยความร้อนพลาสมาเพื่อให้ได้อะตอมคาร์บอนออกมา โดยอัตราการก่อตัวขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งผ่านอะตอมคาร์บอนสู่ฐานรอง ซึ่งส่วนมากแล้วในกระบวนการ CVD แรงที่ใช้ส่งอะตอมคาร์บอน จะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างบริเวณที่แก๊สเฟสถูกกระตุ้นกับพื้นผิวฐานรองหรืออาจใช้การเป่าแก๊สเฟสไปยังฐานรองรวมไปถึงการใช้สนามไฟฟ้าในการช่วยการส่งผ่าน

2.3.3 อุณหภูมิฐานรอง

วิธี CVD แบบความร้อนคาร์บอนนาโนทิวป์จะก่อตัวบนผิวของฐานรองที่อุณหภูมิ 400 - 600°C แล้วแต่กระบวนการที่ใช้ ถ้าอุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูงหรือต่ำเกินไปจากนี้ อาจจะเป็นเพชรหรือ อมอร์ฟัสคาร์บอน การควบคุมฐานรองทำได้หลายกรณี เช่น การระบายความร้อนด้วยน้ำ การให้ความร้อนด้วยเครื่องกำเนิดความร้อนในกรณีฐานรองมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมจุดประสงค์ เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมและคงที่

2.3.4 การเตรียมพื้นผิวฐานรอง

เปรียบเสมือนตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) ซึ่งต้องเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ง่าย โดยบริเวณพื้นผิวนี้อาจต้องเป็นตัวเร่งที่ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในการทดลองนี้ จะใช้ Mo และ NiFe เป็นตัว Catalysis

2.4 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ของวิธี CVD

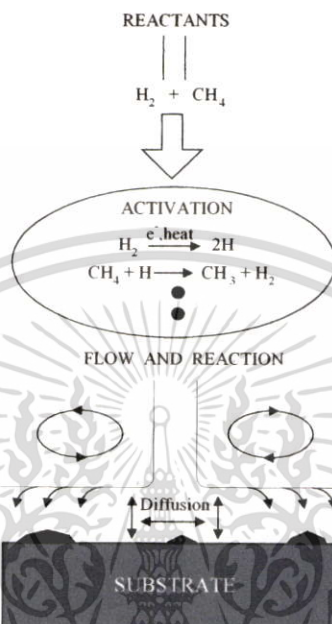
2.4.1 กระบวนการของแก๊สเฟสซิส

การสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยกระบวนการ CVD มีหลักการพื้นฐาน [20, 7] คือ ต้องมีการกระตุ้นแก๊สเฟสซิสด้วยพลังงานสถานะสูง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่าง คือ ทำให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็น โมเลกุลซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยาก่อตัวที่พื้นผิว และแยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุลของความหนาแน่นสูงของแก๊สเฟสซิสของอะตอมไฮโดรเจน

แม้ว่าแต่ละระบบการสร้างต่างๆ จะมีความแตกต่างกันในแง่ของรูปแบบทางวิศวกรรมแต่ทั้ง

หมดจะมีลักษณะสำคัญพื้นฐานเหมือนกัน พลังงานจำนวนมากที่ใช้จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

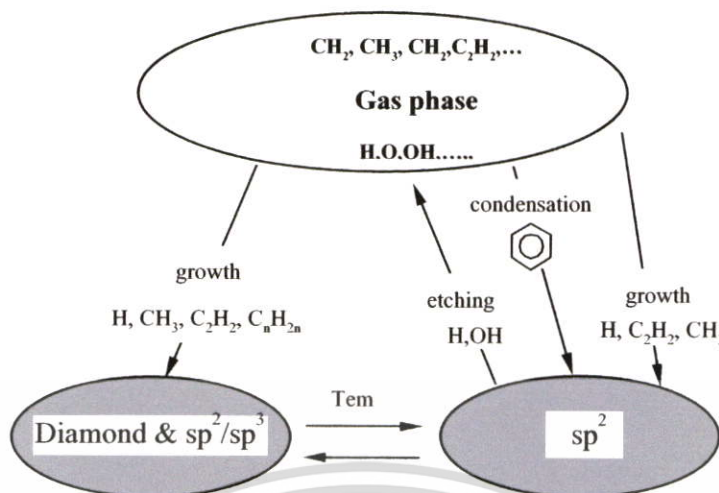
หรือเคมี ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนแตกตัว การสร้างจะกระทำที่ความดันต่ำ (ประมาณ 10 torr - 1 atm) เพื่อป้องกันการรวมตัวของอะตอมของไฮโดรเจนกลับไปสู่รูปของโมเลกุล อุณหภูมิของแก๊สเฟสมีค่าสูงกว่า $1,700^{\circ}\text{C}$ เกิดขึ้นที่บริเวณ Activation zone การระบายความร้อนทั้งแบบแอกทีฟหรือพาสซีฟ เป็นตัวรักษาระดับอุณหภูมิของฐานรองให้มีค่าประมาณ 925°C



รูปที่ 2.12 กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD ของคาร์บอนนาโนทิวป์

จากแผนภาพในรูปที่ 2.12 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD รีแอกเตนต์หรือแก๊สที่ใส่เข้าไป คือ แก๊สผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนซึ่งเป็นที่นิยมใช้สำหรับรีแอกเตอร์แบบ Hot-filament และ Plasma รีแอกเตนต์ที่เข้าไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง หรือพลังงานสูงจะถูกกระตุ้นภายในบริเวณนั้น ปฏิกิริยาเคมีเริ่มเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลไฮโดรเจนแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนอะตอมเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10^{-5} s และเกิดการชนกันของแก๊สในรีแอกเตอร์โดยใช้เวลาดั้งแต่ 10^{-4} s ถึง 10s จากนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่างๆ จะถูกส่งผ่าน โดยการไหล, การแพร่และการพาจากรีแอกเตอร์ไปยังฐานรองที่บริเวณใกล้ฐานรอง การแพร่จะเข้าสู่บริเวณที่การไหลหยุดนิ่งซึ่งถูกเรียกว่า Boundary layer พื้นผิวบนฐานรองจะเกิดการดูดกลืน, การคาย, การแพร่ที่พื้นผิวหรือเข้าไปในเนื้อสารและเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมด เป็นกลไกของการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์และมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่แปรผันกับอุณหภูมิและองค์ประกอบของพื้นผิว จากรูปที่ 2.13 คาร์บอนที่เกิดขึ้นสามารถจับตัวเป็นพันธะเคมีได้หลายรูปทั้งแบบ sp^1 , sp^2 หรือ sp^3 หากแต่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดลอง เช่น อุณหภูมิ, ความดัน, โหมดการกระตุ้น, ความเข้มข้นของแก๊สที่ใช้หรือแม้แต่รูปทรงของรีแอกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แบบจำลองการก่อตัวของไอเคมีจะก่อตัวเป็นคาร์บอน sp^2 หรือ sp^3

2.4.2 ปฏิริยาที่ไส้หลอด

Langmuir เป็นคนแรกที่ค้นพบการแตกตัวของไฮโดรเจนบนไส้หลอดทั้งสแตนที่มีอุณหภูมิสูง ทั้งยังมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดอะตอมไฮโดรเจน ต่อมาจึงได้มีการนำมาใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร โดยทำเป็นรีเอเลคเตอร์ ชนิด Hot - filament Jansen et al.[19] ได้ศึกษาถึงการแตกตัวของแก๊สไฮโดรเจนที่บริเวณไส้หลอด โดยอาศัยการแตกต่างกันในกำลังที่ใช้ไปโดยไส้หลอดในสภาวะสูญญากาศ และในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน วัดค่าของอัตราการแตกตัวของแก๊สไฮโดรเจน พบว่าอัตราการแตกตัวขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของไส้หลอดทั้งสแตนและจากการวิเคราะห์อัตราของอะตอมไฮโดรเจนที่ได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่นๆ อีกตัวอย่างเช่น สัมประสิทธิ์การแพร่, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดและค่าคงที่อัตราการแตกตัว

2.4.3 ผลของอุณหภูมิฐานรอง

ในกระบวนการสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์อุณหภูมิฐานรองมีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์จากการวิจัยของ A Huczko warsaw University [6] พบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิฐานรอง $500 - 1,200^\circ\text{C}$ โดยที่อุณหภูมิ $500 - 700^\circ\text{C}$ จะเกิดเป็น MWCNTs ส่วนอุณหภูมิ $700 - 1,200^\circ\text{C}$ จะเกิดเป็น SWCNTs

2.4.4 บทบาทของแก๊สไฮโดรเจน [15]

อะตอมของไฮโดรเจนเป็นตัวควบคุมในการเปลี่ยนพันธะ sp^3 ไปเป็น sp^2 หรือ sp^1 โดยอะตอมของไฮโดรเจนที่หนาแน่นสูง จะเป็นการป้องกันเปลี่ยนพันธะ sp^3 เป็น sp^2 อะตอมของไฮโดรเจนที่หนาแน่นน้อยจะเกิดเป็นพันธะ sp^2 ซึ่งจะพบแกรไฟต์หากอะตอมของไฮโดรเจนที่เหมาะสมจะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อ C_d คืออะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของคาร์บอนนาโนทิวป์และ C_d^* คืออะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าที่ถูกกระตุ้น นอกจากนี้ยังมีผู้ให้ความเห็นเกี่ยวกับหน้าที่อื่นๆ ของไฮโดรเจนอีก เช่น Lawrence S. pan, Dom R. kania [15] อะตอมไฮโดรเจนยังช่วยในการเกิดแกรเฟฟชีส และอะตอมไฮโดรเจนช่วยในการกำจัดออกซิเจนที่บริเวณผิวหน้าของฐานรอง

2.4.5 บทบาทของแก๊สออกซิเจน

หน้าที่ ของออกซิเจนที่มีผู้ศึกษาไว้ได้แก่ J.E Field [13] เสนอว่าออกซิเจนมีคุณสมบัติที่จะลดความหนาแน่นของอะเซทิลีนซึ่งถูกสันนิษฐานว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดแกรไฟต์และอมอร์ฟัสคาร์บอน

2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis) [5]

2.5.1 คำจำกัดความของคะตะไลซิส [5]

คำว่า คะตะไลซิส (catalysis) มาจากคำภาษากรีกสองคำได้แก่คำว่า คะตะ (cata) หมายถึงการหัก (down) ส่วน ไลซิสมาจากคำว่า ไลไซน์ (lysein) หมายถึง การแยกหรือการแตก (split or break) ดังนั้น “ตัวเร่งปฏิกิริยา” จึงมีความหมายว่า เป็นตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักของแรงที่เกิดขึ้นบนโมเลกุล และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็น โมเลกุลขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามเบอร์เซเลียส ได้ให้คำจำกัดความของตัวเร่งปฏิกิริยาไว้อีกแห่งหนึ่งว่า “ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเร่งโดยไม่เกิดการสูญเสียในกระบวนการ”

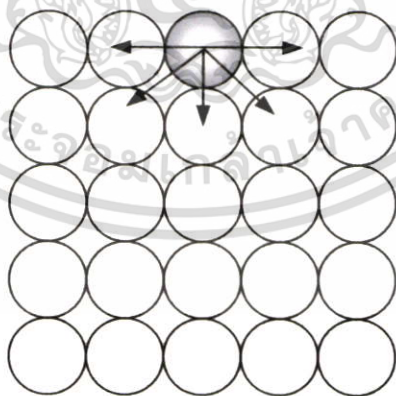
ตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับการค้นพบในต้นศตวรรษที่ 19 เริ่มจากการค้นพบว่ากรดปริมาณน้อย ๆ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือปฏิกิริยาไฮดรอลายเป็ง และต่อมา ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) แสดงให้เห็นว่าแพลทินัมพูน (Pt-sponge) สามารถช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) คอเอทานอล (ethanol) ที่มีสภาพเป็นไอ หลังจากนั้นเดอเบอร์เนออร์ (J.W.Dobereiner) ค้นพบว่าโลหะแพลทินัม (Pt) สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อแก๊สไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามได้มีการนำเอาแพลทินัมพูนผสมดินนั้น นับว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีตัวยึดเกาะหรือตัวพุง (support) ที่ถูกนำมาใช้ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นครั้งแรกลักษณะทั่วไปของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวพุงนั้นพบว่าตัวพุงสามารถเป็นตัวสนับสนุนตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเพิ่มความสามารถในปฏิกิริยาให้สูงขึ้น ดังนั้น จึงมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีตัวพุงเพิ่มมากขึ้นซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะเคลือบบนผิวของซีโอไลต์ (zeolite) ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจึงไวต่อปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ในปี ค.ศ. 1831 ปีลลิปส์ (Peregrine Phillips) ได้ทำการทดลองโดยใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาออกซิเดชันของอัลเฟอร์ได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เสนอแนะให้เห็นว่าใบเสร็จรับเงินด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ (SO_2) ซึ่งต่อมาสารตัวนี้ได้กลายเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญสำหรับการผลิตกรดซัลฟูริกในทางอุตสาหกรรมในปี ค.ศ.1836 เบอริเซเลียส (J.J.Berzelius) ได้กล่าวถึงตัวเร่งปฏิกิริยาว่าเป็นพลังงานตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถแยกส่วนต่างๆ ของสารประกอบโดยแรงทางเคมี

2.5.2 การดูดซับโมเลกุลบริเวณผิว[5]

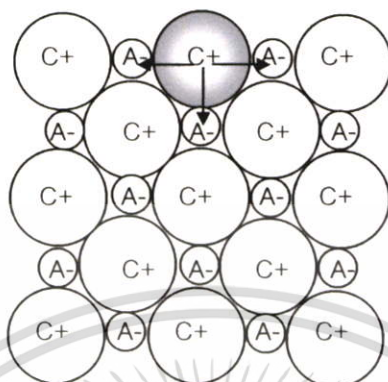
ผิวของของแข็งเกิดจากการแตกตัว (fracture) ของผลึกโควาเลนต์ (covalent solid) อันได้แก่เพชรและโลหะต่างๆ การแตกหักของพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอม ทำให้อะตอมตรงบริเวณผิวเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free valency) จำนวนประจุนอิสระขึ้นกับการเกิดพันธะระหว่างอะตอมในเนื้อผลึก (bulk solid) และมุมของการแตกตัวของผลึก ทำให้อะตอมบริเวณผิวอยู่ในตำแหน่งเคลื่อนไปจากตำแหน่งปกติทำให้จำนวนอะตอมข้างเคียงมีจำนวนลดลง หรือกล่าวได้ว่าจำนวนอะตอมข้างเคียงของอะตอมบริเวณผิวมีจำนวนอะตอมล้อมรอบน้อยกว่าอะตอมในเนื้อผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงให้เห็นความไม่สมดุลของแรงที่บริเวณผิว ทำให้แรงรวมที่เกิดขึ้นบนอะตอมบริเวณผิวมีทิศทางชี้ไปทางใดทางหนึ่ง ทำให้เกิดปรากฏการณ์ของพลังงานผิว (surface energy) หากความไม่สมดุลของแรงเกิดขึ้นบนผิวของเหลวแรงนั้นถูกเรียกว่าแรงตึงผิว (surface tension) สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็นการกล่าวถึงปฏิกิริยาเร่งที่เกี่ยวข้องกับเคมีบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งเท่านั้น การเกิดปฏิกิริยาการดูดซับของโมเลกุลบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระบนผิวตัวเร่ง ปฏิกิริยาดูดซับโมเลกุลของแก๊สหรือของเหลว ทำให้โมเลกุลดังกล่าวเกาะติดกับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการวางตัวของโมเลกุล (rearrangement) โดยบทบาทของอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุล ดังนั้นการดูดซับชนิดนี้จึงถูกเรียกว่าการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption)



รูปที่ 2.14 ภาพพลังงานผิวของของแข็ง โควาเลนต์

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวของแข็งไอออนิก (ionic solid) เป็นสถานการณ์เช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวของของแข็งโควาเลนต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวของของแข็งไอออนิก ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เป็นการแสดงให้เห็นความไม่สมดุลของแรงที่เกิดขึ้นบนผิวของของแข็งไอออนิก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิก ซึ่งเกิดเนื่องจากการที่ไอออนแต่ละตัวถูกล้อมรอบด้วยจำนวนไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามที่มีจำนวนน้อยกว่าไอออนในผลึกทำให้ผิวของของแข็งมีความเป็นขั้วสูง (polarization) ดังนั้น โมเลกุลที่อิเล็กตรอนเกิดเป็นขั้วได้ยากจึงถูกดูดซับบนผิวของของแข็งไอออนิกได้ยากเช่นกัน



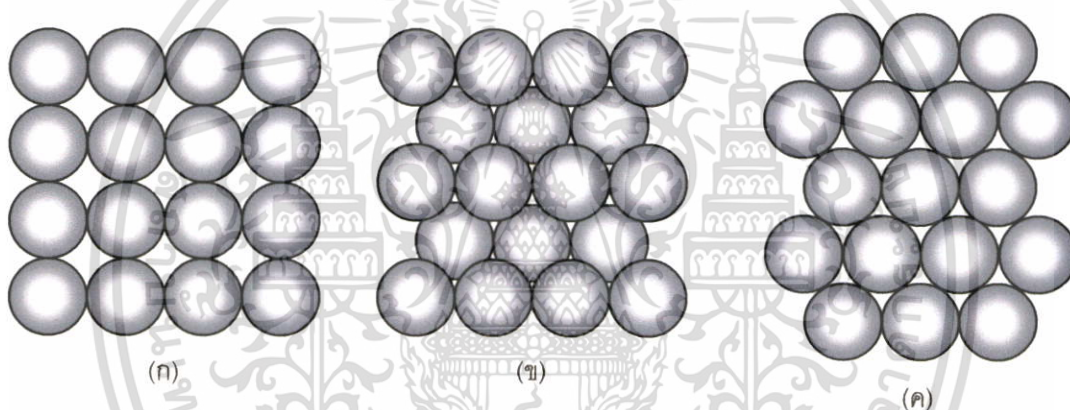
รูปที่ 2.15 ภาพพลังงานผิวของของแข็งไอออนิก

การดูดซับอีกแบบหนึ่งเกิดขึ้นบนผิวของของแข็งเนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) แรงนี้ได้รวมถึงแรงดึงดูดระหว่างประจุ (electrostatic attraction) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเหล่านี้เกิดเนื่องมาจากแรงกระทำของความเป็นขั้วถาวร (dipole moment) ของโมเลกุลและรวมถึงแรงดึงดูด อันเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำของโมเลกุลจนสามารถเกิดเป็นขั้ว อันเป็นผลจากการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (electron density) ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (non-polar atoms or molecules) โดยแรงชนิดนี้ถูกเรียกว่าแรงดึงดูดของขั้วเหนี่ยวนำ (induced dipolar attraction) แรงเหล่านี้เกิดขึ้นระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลทำให้เกิดแรงดึงดูดทางกายภาพบริเวณผิวโดยทำให้โมเลกุลไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกล่าวคือ ไม่มีการแตกหรือเกิดพันธะใดๆ ซึ่งการดูดซับที่เกิดจากแรงเหล่านี้เรียกว่า การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) ความแรงของการดูดซับทางกายภาพ มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพของอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ (adsorbing species) ภาพการดูดซับทางกายภาพที่ชัดเจนที่สุดได้แก่การดูดซับแก๊สเฉื่อย เช่น การดูดซับแก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจนบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำๆ พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแรงที่อ่อนมากแต่การดูดซับของน้ำและเบนซีนที่อุณหภูมิมากกว่า 373 K พบว่าแรงที่เกิดขึ้นแข็งแรงกว่าปฏิกิริยาการดูดซับของแก๊สเฉื่อยเป็นอย่างมากซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับทางกายภาพนั้นแทบไม่ขึ้นกับธรรมชาติทางเคมีของของแข็งเลย ดังนั้นการทดลองการดูดซับทางกายภาพของไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่ำบนผิวของโลหะและบนผิวรูพรุน (porous solid) พบว่ามีความแรงของการดูดซับเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การดูดซับของผิวโลหะ[5]

โมเลกุลที่เกิดปฏิกิริยาบนผิวของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น เป็นการดูดซับทางเคมี ดังนั้น การศึกษาเกี่ยวกับผิวโลหะและปฏิกิริยาบนผิวโลหะจึงเป็นงานวิจัยพื้นฐานที่สำคัญประเด็นของการศึกษาเกี่ยวกับผิวโลหะอาจแบ่งออกเป็น (1) การหาสัดส่วนทางเคมีของโลหะ (2) การเตรียมผิวโลหะโดยการทำความสะอาดผิวโลหะด้วยวิธีทำให้ไอออนแตกสลาย (ion bombardment) หรือการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า เป็นต้น และ (3) ศึกษาลักษณะผลึกของโลหะหรือระนาบในผลึกของโลหะ ซึ่งถูกกำหนดโดยเลขดัชนีของมิลเลอร์ (miller index) สำหรับโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนมากมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ FCC (Face-Centred Cubic structure) ดังแสดงตามรูปที่ 2.16 ในทางปฏิบัติโลหะที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยผลึกเล็กๆ จำนวนมากที่ถูกจัดวางอย่างอิสระ ซึ่งลักษณะของผลึกแบบนี้ถูกเรียกว่า พอลิคริสตัลไลน์ (polycrystalline) ดังนั้นพื้นที่ของแต่ละระนาบของผลึกจึงมีขนาดเล็กมาก



รูปที่ 2.16 การจัดวางอะตอมของผิวของโลหะ 3 ระนาบตามเลขดัชนี มิลเลอร์

(ก) {100}, (ข) {111} และ (ค) {110}

การศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับทางเคมีของโลหะหรือของแข็งพบว่า ผลึกที่เหมาะสมสำหรับการทดลองเพื่อสามารถนำไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีนั้นได้แก่ ผลึกเดี่ยว (single crystal) โดยผลึกเดี่ยวของของแข็งหลายชนิดสามารถทำให้มีขนาดใหญ่ประมาณหนึ่งลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งผลึกเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่เช่นนี้สามารถนำไปวัดหาลักษณะทางภาพโดยเครื่องมือต่างๆ ได้หลายชนิด

การศึกษาการดูดซับอะตอมหรือโมเลกุลของโลหะหรือของแข็ง สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคและวิธีต่างๆ อันได้แก่ วิธี AES (Auger Spectroscopy), CPS และ UPS (Photo-electron Spectroscopy), EELS (Electron Energy Loss Spectroscopy) และ LEED (Low Energy Electron Diffraction) สำหรับเทคนิควิธี LEED นั้นใช้หลักการเบี่ยงเบนอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำโดยอะตอมในโมเลกุลที่เกาะบนผิวของแข็ง ซึ่งอะตอมเหล่านี้ประพฤติตัวเหมือนเป็นแกรตติ้ง (grating) ที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนจากแนวคกกระทบของอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานต่ำ ทำให้เกิดภาพที่มีแบบ

เฉพาะตัวเช่นเดียวกับแบบของ X-ray ซึ่งเรียกว่า แบบของการเบี่ยงเบน (diffraction pattern) ความ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มของแบบของการเบี่ยงเบนทำให้รู้ถึงโครงสร้างของชั้นของการดูดซับทางเคมี อย่างไรก็ตาม ผลึกเดี่ยวไม่สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่การศึกษาการดูดซับทางเคมีของผลึกเดี่ยวทำให้เข้าใจสิ่งที่เกิดขึ้นบนสารที่เป็นผลึกผสมได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไปเป็นเพียงอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งมีลักษณะไม่เหมือนกับผลึกเดี่ยว ดังนั้นในการทดลองจึงอาจตัดผลึกเดี่ยวให้มีขนาดบางจนมีลักษณะเป็นขนาดอนุภาคเล็กซึ่งใช้แทนตัวเร่งปฏิกิริยาได้

ในการหาโครงสร้างของสปีชีส์ที่ถูกดูดซับบนผิวของโลหะ นอกจากจะใช้วิธี LEED และ EELS แล้วยังสามารถวัดค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (electrical conductivity) ที่เปลี่ยนแปลงไปบนผิวโลหะ สำหรับวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการหาโครงสร้างของสปีชีส์ที่ถูกดูดซับบนผิวของโลหะได้แก่ วิธี IR (Infrared Spectroscopy) ซึ่งวิธีนี้ได้ถูกนำไปใช้ศึกษาการดูดซับทางเคมีบนผิวของโลหะ โดยโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ในโตรเจนออกไซด์ และโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด

2.7 สถานะการดูดซับของโมเลกุลบนโลหะ[5]

โมเลกุลที่เป็นแก๊สและเป็น โมเลกุลแบบง่ายที่สุด ได้แก่โมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นโมเลกุลที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาหลายชนิดและมักถูกพิจารณาเป็นลำดับแรก โดยเริ่มจากปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลของไฮโดรเจนและเกิดการสลายตัวให้ไฮโดรเจนอะตอมคังสมการ



เมื่อ M เป็นสัญลักษณ์แทนอะตอมของผิวโลหะ และถ้าโมเลกุลที่ถูกดูดซับเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัว (saturated hydrocarbon) อย่างเช่นแก๊สมีเทน (CH_4) ซึ่งการดูดซับทางเคมีที่เกิดขึ้นเป็นไปตามปฏิกิริยาต่อไปนี้

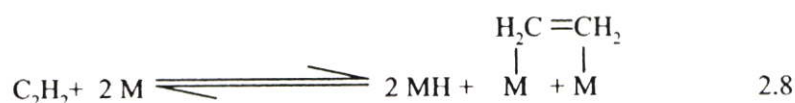


แต่สำหรับโมเลกุลที่ประกอบด้วย d - อิเล็กตรอน (d - electron) หรือ อิเล็กตรอนคู่ (lone - pair electron) การดูดซับทางเคมีไม่ทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมในโมเลกุล ดังอย่างเช่นการดูดซับสารประกอบอีthin (ethene) แต่กลับเป็นการเกิดรีไฮบริไดเซชัน (rehybridization) ของออร์บิทัลของโมเลกุล ดังสมการ

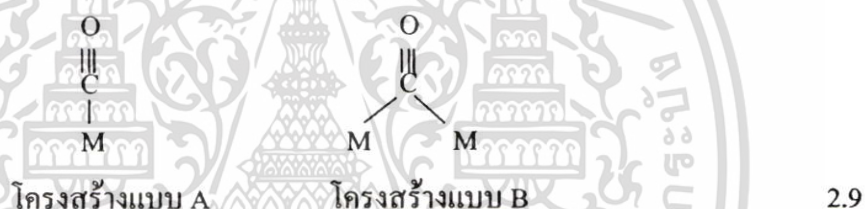


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอะตอมของคาร์บอนถูกเปลี่ยนจากออร์บิทัลชนิด sp^2 ไปเป็น sp^3 สำหรับการดูดซับทางเคมีของสารประกอบอีไทม์ (ethyne) อะตอมของคาร์บอนถูกเปลี่ยนจากออร์บิทัลชนิด sp ไปเป็น sp^2 คังสมการ



กรณีโมเลกุลของคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งโมเลกุลเป็นเส้นตรง การดูดซับทางเคมีมีลักษณะเป็นเส้นตรงเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง π - อิเล็กตรอนกับตำแหน่งผิวที่ว่างของโลหะ ดังโครงสร้างแบบ A หรืออาจเป็นการรีไฮบริไดเซชันบนอะตอมสองตัวของโลหะคังภาพการเกิดโครงสร้างแบบ B หรือถ้าอุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงมากโมเลกุลบนผิวของโลหะทั้งหมดอาจแตกตัวได้เป็นอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจน ความแตกต่างระหว่างโครงสร้างแบบ A และแบบ B สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยหลักการตรวจวัดความถี่การสั่นสะเทือนของพันธะ $C \equiv O$ กับ $C=O$ ซึ่งแตกต่างกัน



พบว่าโครงสร้างแบบ A ของคาร์บอนมอนอกไซด์บนผิวแพลทินัม ให้ความถี่การสั่นสะเทือนของพันธะเท่ากับ $2,060 \text{ cm}^{-1}$ ส่วนโครงสร้างแบบ B ให้ความถี่สองแห่งคือ $1,960 \text{ cm}^{-1}$ และ $1,920 \text{ cm}^{-1}$

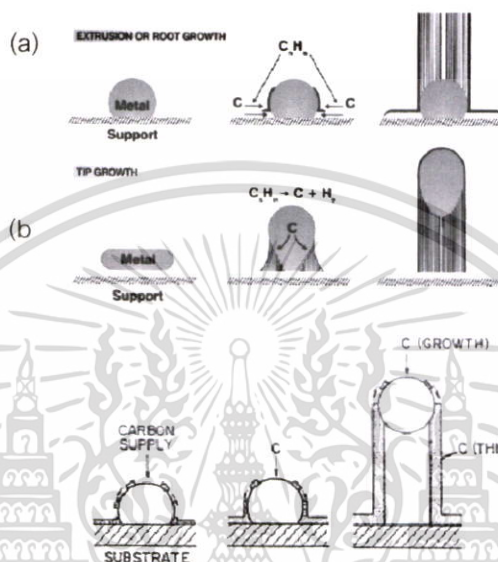
โครงสร้างของโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมีโดยผิวของโลหะสามารถอธิบายได้ด้วยออร์บิทัลของโมเลกุลได้ดังนี้ เนื่องจากอะตอมของผิวโลหะ ซึ่งประกอบด้วยออร์บิทัลที่ยังว่างเปล่าอยู่ (unoccupied orbital) ซึ่งยังสามารถรับอิเล็กตรอนจากสปีชีส์ที่ถูกดูดซับได้อีก ดังนั้นสารประกอบที่มีอิเล็กตรอนคู่อิสระ ซึ่งได้แก่สารประกอบที่มีอะตอมซัลเฟอร์ ไนโตรเจน แลหะคลอรีน จึงถูกดูดซับอย่างรุนแรงโดยอะตอมของผิวโลหะสารประกอบพวกนี้จึงถูกจัดเป็นสารที่เรียกว่า สารพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis poison) เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้สามารถเกาะติดแน่นบนผิวของโลหะ ทำให้สปีชีส์อื่นๆ ไม่สามารถเกาะติดผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้

2.8 การก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์

การ Growth Mechanism มี 2 ประเภท คือ

1. Root Growth

2. Tip Growth

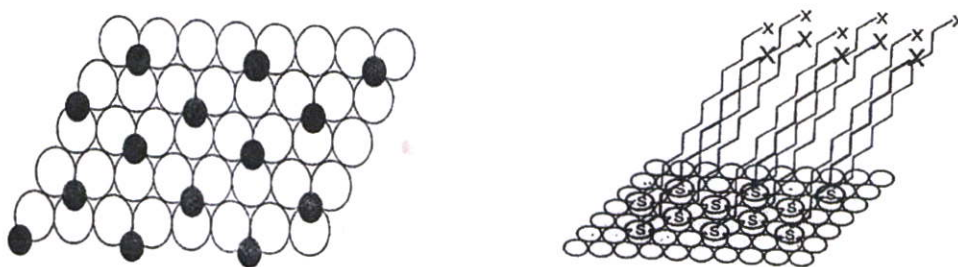


รูปที่ 2.17 Growth mechanism of Carbon nanotubs (a) Root Growth (b) Tip Growth

2.8.1 Root Growth [16]

รูปที่ 2.17 (a) เริ่มต้นมีการดูดซับอะตอมคาร์บอนโดยอนุภาคอิสระของแก๊สเฟส เข้าไปยังผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะจะก่อตัวกันด้วยพันธะ sp^2 เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนวงแหวน (Polycyclic Aromatic Hydro carbons; PAHs) จากนั้นอะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้าสู่ฐานรองค้ำหนึ่ง ซึ่งอะตอมคาร์บอนไม่สามารถแพร่ซึมได้อีกจากวิธี self assembly โดยแนวคิดพื้นฐาน คือ อะตอมหรือโมเลกุล จะพยายามอยู่ในสภาวะพลังงานระดับต่ำสุดเท่าที่จะทำได้ ธรรมชาติของอะตอมหรือโมเลกุลจะดำเนินไปตามแบบ ไม่ว่าจะเป็นการยึดติดกับโมเลกุลอื่น หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตำแหน่งของตัวเอง โดยกระทำเพื่อให้อยู่ในสภาวะที่ใช้พลังงานต่ำสุดซึ่งเป็นการนำอะตอมหรือโมเลกุล วางลงพื้นผิวโครงสร้างนาโนหรือตัวเร่งปฏิกิริยาจากนั้นคาร์บอนจะเรียงตัวสูงขึ้นในตำแหน่งที่ต้องการได้เองก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

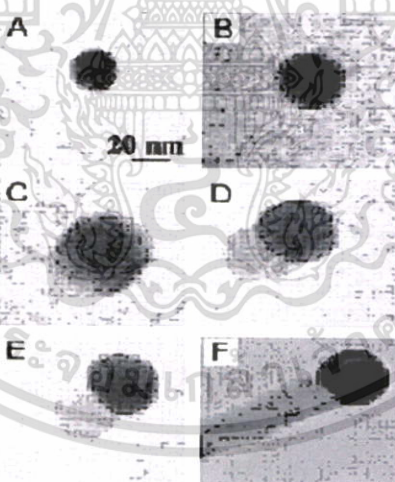


รูปที่ 2.18 กระบวนการแพร่ซึมแบบ Root Growth

จากรูปที่ 2.18 คาร์บอนจะดูดซึมเข้าไปยังฐานรองที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ก่อตัวขึ้นเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์

2.8.2 Tip Growth

รูปที่ 2.17 (b) เริ่มต้นมีการดูดซับอะตอมคาร์บอนโดยอนุภาคอิสระของแก๊สเฟสเข้าไปยังผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ อะตอมของคาร์บอนจะแทรกสอดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาให้สูงขึ้น ก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ จากรูปที่ 2.19 จะเห็นว่าคาร์บอนนาโนทิวป์จะก่อตัวแบบ Tip Growth ยกตัวเร่งปฏิกิริยาให้สูงขึ้นดังจากรูป A ไปยังรูป F



รูปที่ 2.19 การก่อตัวแบบ Tip Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

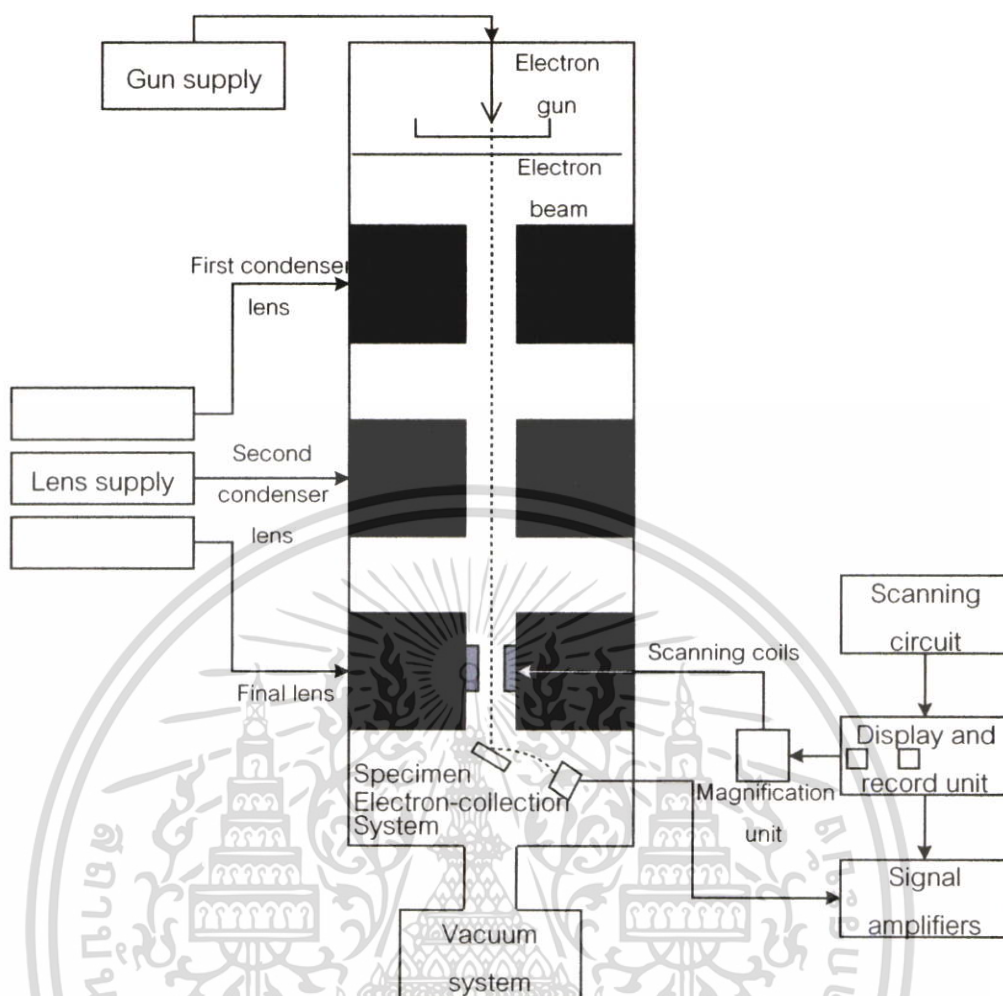
วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์

การศึกษาหรือการวิเคราะห์คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์จำเป็นต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์หลายๆ ชนิดที่มีหลักการทำงานแตกต่างกันไปประกอบรวมกันเพื่อให้สามารถเข้าใจถึงลักษณะพื้นผิวขนาดชนิดต่างๆ ของคาร์บอนนาโนทิวป์ การแยกชนิดของคาร์บอนและองค์ประกอบของธาตุให้ดียิ่งขึ้น คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จึงต้องทำการวิเคราะห์ด้วยหลายเทคนิค เช่น

3.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและขนาดด้วย SEM

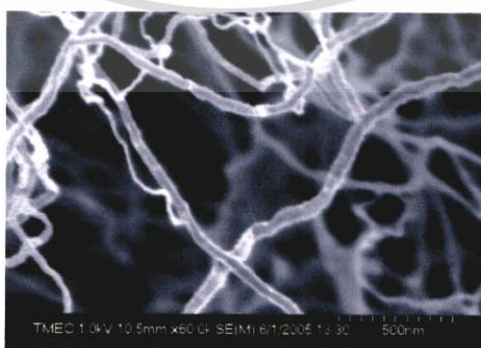
SEM [4] เป็นเทคนิคที่ใช้ดูลักษณะของพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดระดับไมครอน เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการดูลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของคาร์บอนนาโนทิวป์ ทำงานด้วยการยิงลำอิเล็กตรอนให้ไปโฟกัสตกเป็นจุดเล็กๆ บนเป้าซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่าง แล้วเก็บรวบรวมและแสดงสัญญาณอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาโดยวัสดุที่ใช้เป้าแล้วขยายเป็นภาพบนหลอดรังสีแคโทด (cathode - ray tube; CRT) ดังแผนภาพแสดงการทำงานของ SEM ในรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงรายละเอียดการทำงาน โดยเริ่มจากปืนอิเล็กตรอนจะผลิตอิเล็กตรอนในช่องว่างขนาด 10 - 20 nm แล้วควบคุมให้พุ่งมากระทบเป้าขดลวดสแกนจะปล่อยให้ลำอิเล็กตรอนแยกภาพพื้นที่เล็กๆ ของพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับด้วยมุมเล็กๆ จะทำอันตรกิริยา (interact) กับส่วนที่นุ่มของพื้นผิวและทำให้เกิดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับลำดับที่สองเพื่อสร้างสัญญาณของอิเล็กตรอน ความสว่างหรือความเข้มของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สองจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง และอิเล็กตรอนลำดับสองนี้จะเป็นตัวสร้างสัญญาณทำให้เกิดภาพขึ้น

SEM มีข้อได้เปรียบกว่ากล้องจุลทรรศน์ทั่วไปอยู่มาก เนื่องจากมีกำลังขยายที่สูงกว่ามากโดยปกติอยู่ในช่วง 50 - 40,000 เท่า มีความละเอียดสูง 2.5 - 10 nm มีความลึกสนามมากกว่า 500 เท่า และเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเทคนิค TEM ซึ่งต้องใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่มีความบางพอเพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM ใช้ได้แม้กับชิ้นงานที่เป็นก้อนแข็ง ชิ้นงานที่มีความนำจะถูกวิเคราะห์ได้ด้วยเงื่อนไขตามปกติ ส่วนชิ้นงานที่ไม่มีความนำโดยทั่วไปแล้ว จำเป็นต้องมีการเคลือบด้วยวัสดุที่มีความนำ เช่น ทองหรือคาร์บอนบางๆ ก่อน



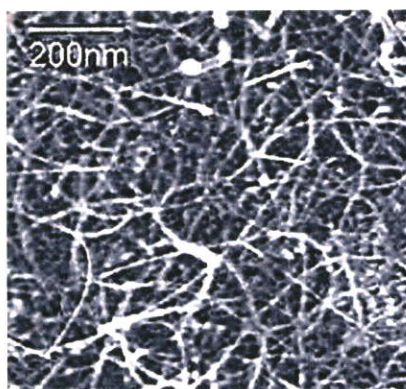
รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของ SEM [4]

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าลักษณะพื้นผิวและขนาดของคาร์บอนนาโนทิวป์ จากรูปที่ 3.2 จะเป็นลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นไม่เป็นกลุ่ม โดยจะเกิดขึ้นแบบแยกตัวไม่เกี่ยวพันกัน เป็นกลุ่มส่วนรูปที่ 3.3 จะเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นเป็นกลุ่ม มีการจับตัวแบบหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวป์โดยจะเกี่ยวพันกันหลายๆ เส้นรวมกัน



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นไม่เป็นกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างภาพถ่าย SEM ของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบกลุ่ม

SEM จะใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบอัดอิเล็กตรอนให้มีเป็นมุมแคบๆ ได้ ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) เพื่อให้ข้อมูลเชิงเคมีได้อีกด้วย

3.1.1 สัญญาณแบบต่างๆ (Various Types of Signal)

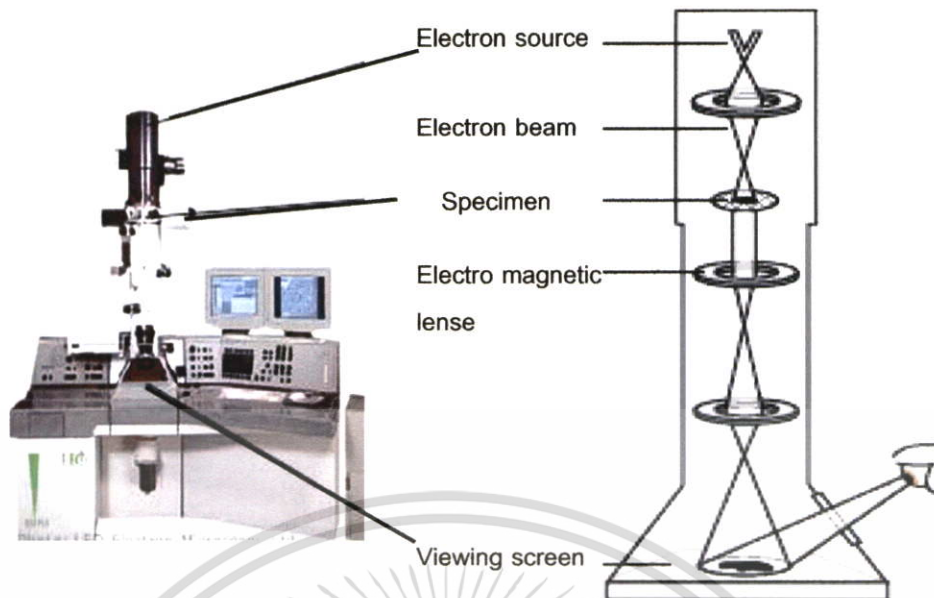
สัญญาณแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสสารและอันตรกิริยาอื่นๆ ที่เกิดขึ้น ดังนี้

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons, SE): ให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว และเป็นสัญญาณที่เกรานำมาสร้างภาพมากที่สุด อิเล็กตรอนทุติยภูมิยังมีแบบย่อยๆ อีกหลายแบบตามกลไกและแหล่งกำเนิด
2. อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back scattered Electrons, BSE): ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมี และลักษณะ โทโพกราฟีของพื้นผิว
3. เอกซเรย์ (X-Ray): ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบเป็นสัญญาณที่ใช้ในเทคนิค EDS และ WDS

3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM [1]

เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิSSION หรือ TEM เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุ โดยยิงลำอิเล็กตรอนผ่านชิ้นงานซึ่งได้รับการเตรียมให้มีลักษณะบาง แล้วศึกษาอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานหรือเลี้ยวเบนจากระนาบต่างๆ ในชิ้นงานในบทนี้จะแนะนำหลักการทำงานเบื้องต้น พร้อมทั้งขีดความสามารถและข้อจำกัดของเทคนิค TEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 กล้อง TEM และ ตำแหน่งของเลนส์แม่เหล็กชิ้นงานและการเกิดภาพต่างๆ ใน TEM

รูปที่ 3.4 เป็นตัวอย่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิชัน หรือ กล้อง TEM และเป็นส่วนประกอบภายในของกล้อง TEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน หรือปืนอิเล็กตรอน ซึ่งทำมาจากทังสเตน (W) แคนธาเนียมเฮกซะโบไรด์ (LaB_6) หรือ ทังสเตนเคลือบเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) ในลักษณะเดียวกับกล้อง SEM แต่ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนในกล้อง TEM สูงถึง 100 – 400 กิโลโวลต์ (kV) กล้อง TEM ทำงานโดยใช้เลนส์คอนเดนเซอร์ (con denser lens) 2 อันโฟกัสลำอิเล็กตรอน ให้นานกับคอลลิมน์ของกล้อง จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะผ่านชิ้นงานที่เตรียมให้บาง (≤ 500 นาโนเมตร) และเกิดการเลี้ยวเบน ลำอิเล็กตรอนที่เลี้ยวเบนจะถูกโฟกัสมารวมกันเป็นจุดเลี้ยวเบน (diffraction spots) ที่ระนาบโฟกัสด้านหลัง (back focal plane) โดยเลนส์วัตถุ (objective lens) จากนั้นจะผ่านไปยังเลนส์แม่เหล็กอีก 3 ตัวเพื่อขยายภาพและแสดงภาพบนจอของกล้อง TEM

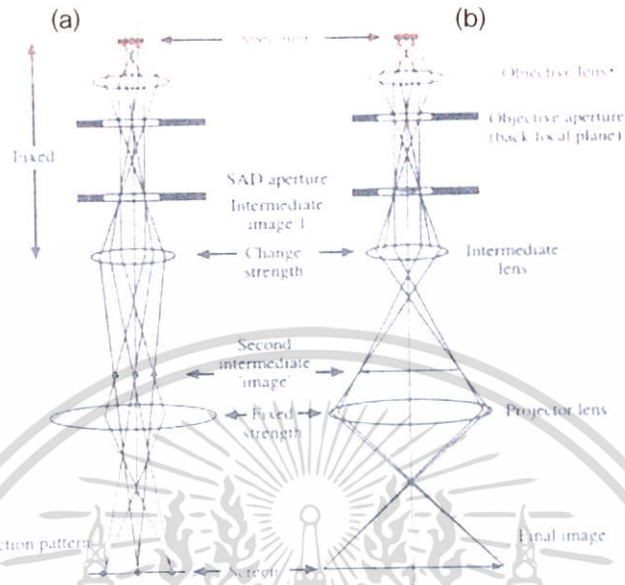
3.2.1 ข้อมูลที่ได้จากเทคนิค TEM

เทคนิค TEM จะให้ข้อมูลภาพใน 2 ลักษณะ ได้แก่

1. ภาพขยาย (image) : ซึ่งให้รายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคในช่วงกำลังขยายตั้งแต่ 10,000 ถึง 1,000,000 เท่า
2. รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) : ซึ่งให้รายละเอียดโครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมในวัสดุ

รูปที่ 3.5 เป็นลักษณะการเกิดภาพทั้ง 2 ชนิด จากรูปที่ได้ผู้ใช้จะสามารถแปลผลข้อมูลที่ได้ อย่างกว้างขวาง เช่น หากชิ้นงานมีข้อบกพร่องในโครงสร้าง (structural defects) ข้อมูลที่ได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEM ทั้งภาพถ่ายและรูปแบบการเลี้ยวเบนจะแสดงตำแหน่งและลักษณะการเกิดข้อบกพร่องดังกล่าวให้เห็นอย่างชัดเจน

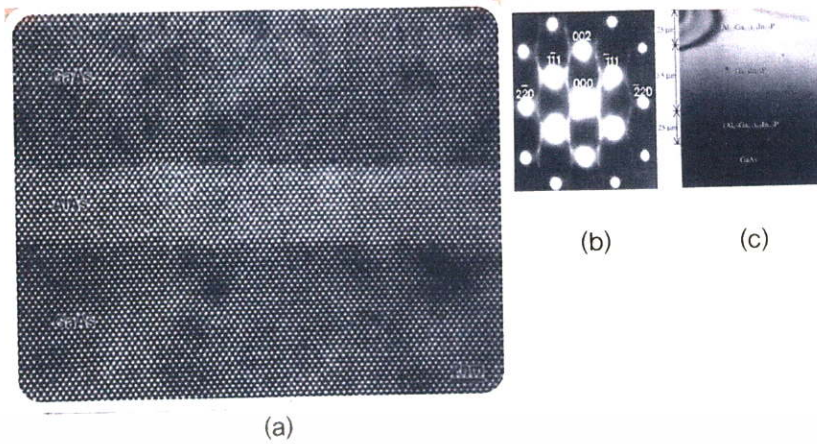


รูปที่ 3.5 แผ่นภาพลักษณะการเกิด (a) รูปแบบการเลี้ยวเบน และ (b) ภาพถ่าย

นอกจากการถ่ายภาพแล้ว กล้อง TEM สามารถใช้ร่วมกับเทคนิคสเปกโตรโคป (spectroscopy) อื่น ๆ เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ/หรือ Electron Energy Loss Spectrometry (EELS) เทคนิคเหล่านี้สามารถใช้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุซึ่งจะให้ข้อมูลเสริมที่สำคัญในหลายกรณีการถ่ายภาพ TEM ขึ้นอยู่กับกลไกสำคัญ 2 ลักษณะ ได้แก่

1. กลไกเฟสคอนทราสต์ที่มีกำลังแยกแยะสูง (high-resolution phase contrast mechanism) ที่ใช้ในการถ่ายภาพที่มีกำลังแยกแยะน้อยกว่า 10 \AA ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (a)

2. กลไกดิฟแฟรกชันคอนทราสต์ (diffraction contrast mechanism) ที่ใช้ในการถ่ายภาพที่มีกำลังแยกแยะสูงกว่า 10 \AA ดังรูปในภาพที่ 3.6 (b) แต่ไม่ว่าจะเป็นการถ่ายภาพโดยใช้กลไกแบบใด ผู้ใช้ TEM จำเป็นต้องเริ่มการทำงานจากรูปแบบการเลี้ยวเบน รูปที่ 3.6 (c) แล้วใส่แอฟเพอเจอร์เจอร์วัตถุ (objective aperture) รอบๆ จุดเลี้ยวเบน (diffraction spot) ที่ต้องการศึกษา ทั้งนี้กลไกหลักที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ กลไกดิฟแฟรกชันคอนทราสต์ซึ่งจะกล่าวถึงโดยสังเขปในบทนี้



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างภาพและข้อมูล TEM ในลักษณะต่างๆ (a) ภาพขยายกำลังแยกแยะสูง
(b) ภาพขยายแผ่นชั้นอพิแทกซี (c) ภาพดิฟแฟรกชันที่ได้จากแผ่นชั้นอพิแทกซี

รูปที่ 3.6 (a) จะเป็นภาพขยายกำลังแยกแยะสูง (high resolution image) ที่ถ่ายด้วยกำลังเฟสคอนทราสต์กำลังแยกแยะสูง (high resolution phase contrast mechanism) ภาพนี้ถ่ายจากโครงสร้างซูเปอร์แลตทิซ (superlattice structure) GaAs - AlAs (ด้วยความอนุเคราะห์จาก JEOL) รูปที่ 3.6 (b) ตัวอย่างภาพขยายแผ่นชั้นอพิแทกซี (epitaxial layers) AlGaInP - GaInP - AlGaInP บนชั้นเบสเกรด GaAs ที่ถ่ายด้วยกลไกดิฟแฟรกชันคอนทราสต์ (diffraction contrast mechanism) [1] รูปที่ 3.6 (c) ภาพดิฟแฟรกชันที่ได้จากแผ่นชั้นอพิแทกซี (epitaxial layers) GaInP บนชั้นเบสเกรด GaAs [1]

3.2.2 ความรู้พื้นฐานในการใช้งาน TEM

ในการใช้เทคนิค TEM ผู้ใช้เครื่องควรมีความรู้พื้นฐานทางด้านผลึกวิทยา (crystallography) แลตทิซส่วนกลับ (reciprocal lattice) และการเลี้ยวเบน (diffraction) ของคลื่น ทั้งนี้การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนมีหลักการพื้นฐาน เช่น เดียวกันกับการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และแสงสีขาว ความรู้พื้นฐานเหล่านี้ผู้อ่าน สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงที่ให้ไว้

การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (electron diffraction) ใน TEM เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนตกกระทบบนระนาบต่างๆ ในแผ่นชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนเป็นมุมเท่าๆ กัน เมื่อลำอิเล็กตรอนที่เกิดการเลี้ยวเบนจากระนาบหนึ่งๆ ผ่านชิ้นงานออกมา ก็จะถูกโฟกัสโดยเลนส์วัตถุให้มารวมกันที่จุดดิฟแฟรกชัน รูปที่ 3.6 (c) การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนใน TEM เป็นไปตามสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) ดังนี้

$$2 d_{hkl} \sin \theta = n \lambda \quad 3.1$$

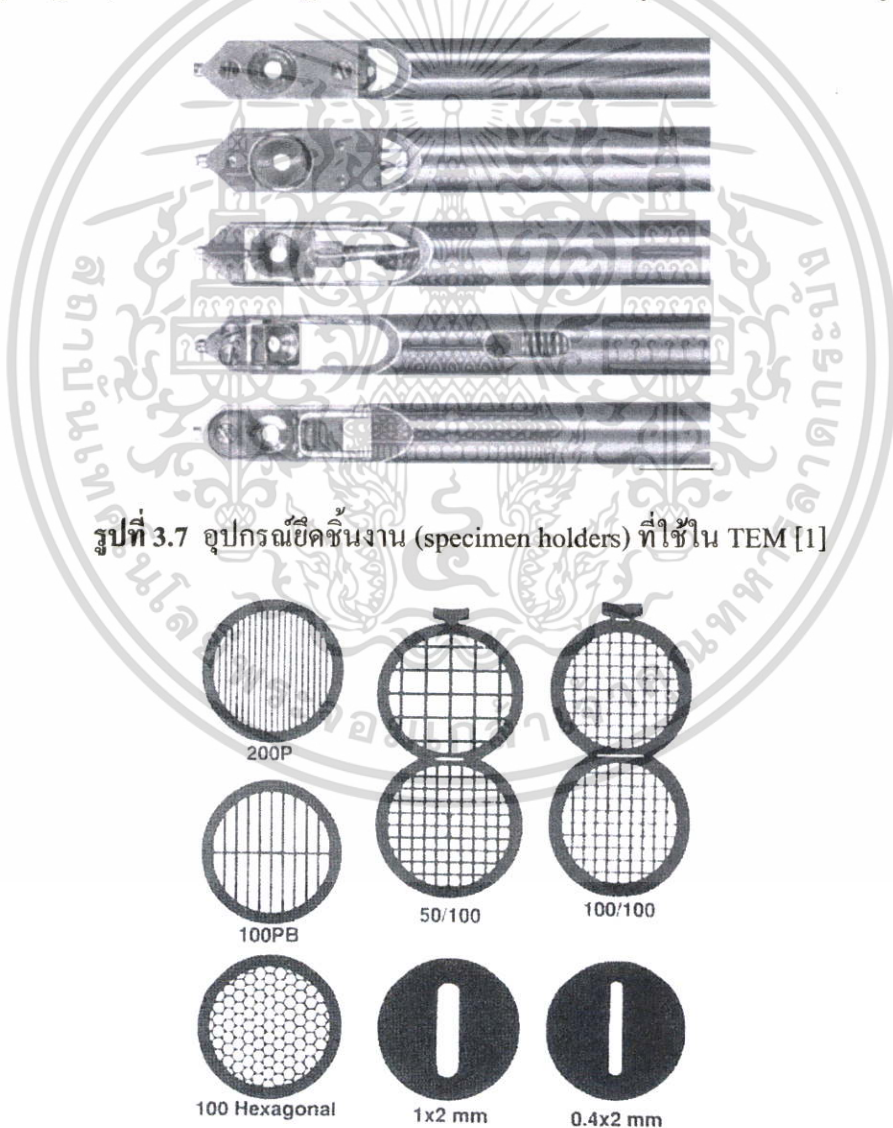
โดยที่ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ (hkl), θ คือ มุมตกกระทบ, λ คือ ความยาวคลื่นและ n คือ เลขจำนวนเต็ม (1,2,3) สำหรับภาพดิฟแฟรกชันที่ศึกษากันโดยทั่วไปในกล้อง TEM จะใช้ค่า

$$n = 1$$

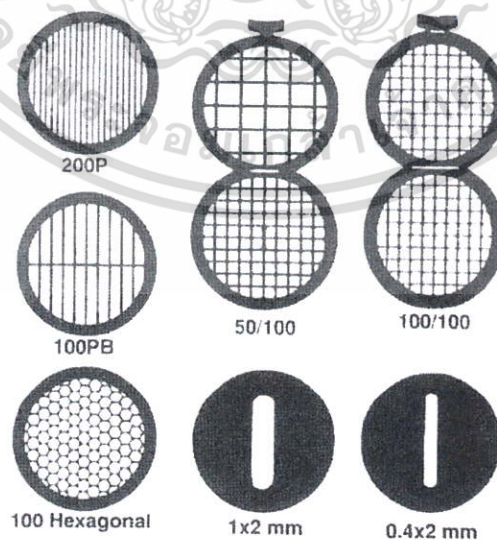
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้เข้าใจถึงหลักการทำงานของ TEM โดยสังเขปแล้ว สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งของการใช้เทคนิค TEM คือ การเตรียมชิ้นงาน วิธีการเตรียมชิ้นงานของวัสดุแต่ละชนิดจะมีหลักการพื้นฐานคล้ายกัน แต่แตกต่างกันไปในรายละเอียดดังจะกล่าวถึงในบทอื่นๆ ในที่นี้ขอเน้นว่าการเตรียมชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์ด้วย TEM นั้น จำเป็นต้องใช้เวลาและทักษะอย่างสูง ชิ้นงานที่ดีจะให้ข้อมูลที่ต้องการและเชื่อถือได้

เนื่องจากอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน (specimen holder) ที่ใช้ใน TEM มีลักษณะเป็นแท่งที่ต้องใส่เข้าไปในสูญญากาศดังรูปที่ 3.7 ชิ้นงานที่ศึกษาต้องมีขนาดเท่ากับฐานวางชิ้นงานตรงปลายของอุปกรณ์ยึดชิ้นงานที่เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 3 มิลลิเมตร ในการเตรียมชิ้นงานที่บางมากและขนาดจำกัด เช่นนี้ผู้เตรียมชิ้นงานจำเป็นต้องยึดชิ้นงานไว้กับแผ่นตารางสำหรับวางชิ้นงาน (specimen support grids) ที่มีขนาดเท่ากับฐานวางชิ้นงานตรงปลายของอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.8



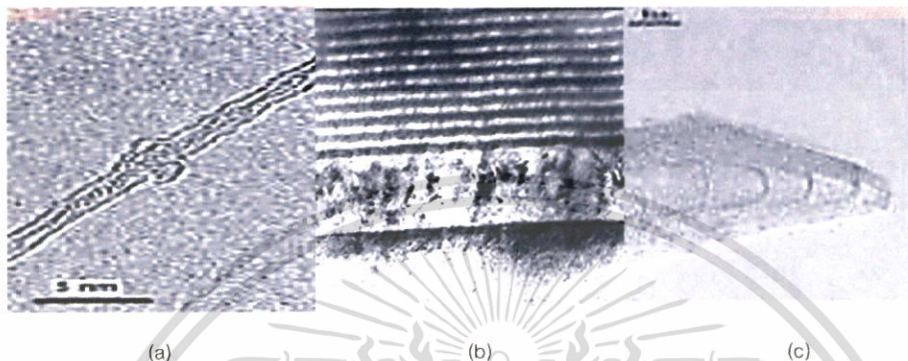
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ยึดชิ้นงาน (specimen holders) ที่ใช้ใน TEM [1]



รูปที่ 3.8 แผ่นวางชิ้นงาน (specimen grids) ที่ใช้ใน TEM [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความลำบากในการเตรียมชิ้นงาน และเวลาที่ต้องใช้ในการศึกษาการใช้กล้อง TEM รวมทั้งการแปลผล นับเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้การใช้เทคนิค TEM สำหรับการศึกษาวัดสารในประเทศเรายังอยู่ในวงจำกัด อย่างไรก็ตาม เชื่อว่าเทคนิค TEM มีประโยชน์อย่างสูงสำหรับงานวิจัยในแขนงต่างๆ และเมื่อนักวิจัยในประเทศมีความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคนี้เพิ่มขึ้นแล้ว คงจะให้ความสำคัญและมีการใช้เทคนิคนี้อย่างแพร่หลายเพิ่มขึ้นในอนาคต



รูปที่ 3.9 ภาพถ่าย TEM (a) ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ (b) ลักษณะ MWCNTs (c) ลักษณะส่วนปลายปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

ลักษณะของนาโนทิวป์จากภาพขยายของ TEM จากรูป 3.9 (a) เป็นลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ภายในเห็นเป็นช่องกลวง ได้อย่างชัดเจน (b) ลักษณะของผนังที่ได้เป็น MWCNTs ซึ่งเป็นท่อซ้อนกันหลายชั้น (c) ลักษณะส่วนปลายปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

ในช่วง 70 ปี มาแล้ว นักวิทยาศาสตร์ได้เริ่มนำเทคนิค Raman spectroscopy [14] มาใช้ในงานวิจัยพื้นฐานเพื่อหาโครงสร้างของวัสดุสารจากการวัดสเปกตรัมที่เลื่อนไปของ Raman shift และตำแหน่งของสเปกตรัม ซึ่งสัมพันธ์กับคุณลักษณะของพันธะอย่างมีนัยสำคัญที่แน่นอน โดยสารแต่ละชนิดจะมีสเปกตรัมเฉพาะเป็นของตัวเอง เทคนิค Raman spectroscopy นี้ มีหลักการสำคัญ คือ การใช้การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Raman scattering) และการสั่นของโครงสร้าง เมื่อฉายแสงสีเดียวที่มีความเข้มให้กับวัสดุสาร จะเกิดการแผ่รังสีจากวัสดุสารด้วยความยาวคลื่นที่สั้นหรือยาวกว่าแสงที่ใช้ในการกระตุ้น (exciting light) โดยกลไกการกระเจิงของแสงนี้สามารถอธิบายได้ว่าเป็นการรวมกันของการโพลาไรซ์ (polarisation) ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน ตามสมการ (3.2) ทำให้เกิดภาวะไม่สมดุล ระบบจึงพยายามเข้าสู่สมดุลโดยการแผ่รังสี

$$P = \alpha E$$

3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ P คือ โมเมนต์สนามเหนี่ยวนำ

α คือ polarizability

E คือ สนามไฟฟ้า

การสั่นของโครงสร้างผลึกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบโพลาไรซ์จะเป็นการกระตุ้นแบบ Raman โฟตอนบางตัวจะถูกปล่อยออกจากการสั่นของไดโพลซึ่งมีทั้งที่มีความถี่เหมือนกับลำแสงตกกระทบ (elastic Rayleigh scattering) หรือเป็นความถี่ที่ถี่ออกไปโดยมีค่าความถี่การสั่นของโครงสร้างเป็น $\nu_0 \pm \nu_m$ เมื่อ ν_m คือ ความถี่การสั่นของโมเลกุลคั่งรูปที่ 3.1 โดยที่ $\nu_0 - \nu_m$ และ $\nu_0 + \nu_m$ จะถูกเรียกว่า Stokes และ anti - Stokes scattering ตามลำดับ เมื่อใช้อนุกรมเทย์เลอร์สามารถเขียนสมการ (3.2) ใหม่ได้เป็น

$$P = \alpha_0 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)_0 q_0 E_0 \left[\cos 2\pi(\nu_0 + \nu_m)t + \cos 2\pi(\nu_0 - \nu_m)t \right] \quad 3.3$$

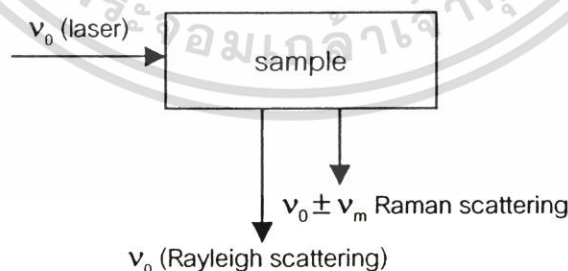
เมื่อ E_0 คือ สนามไฟฟ้าของลำแสงตกกระทบ

ν_0 คือ ความถี่ของแสงตกกระทบ

ν_m คือ ความถี่ของโฟนอน

α_m คือ การโพลาไรซ์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของการสั่น

t คือ เวลา

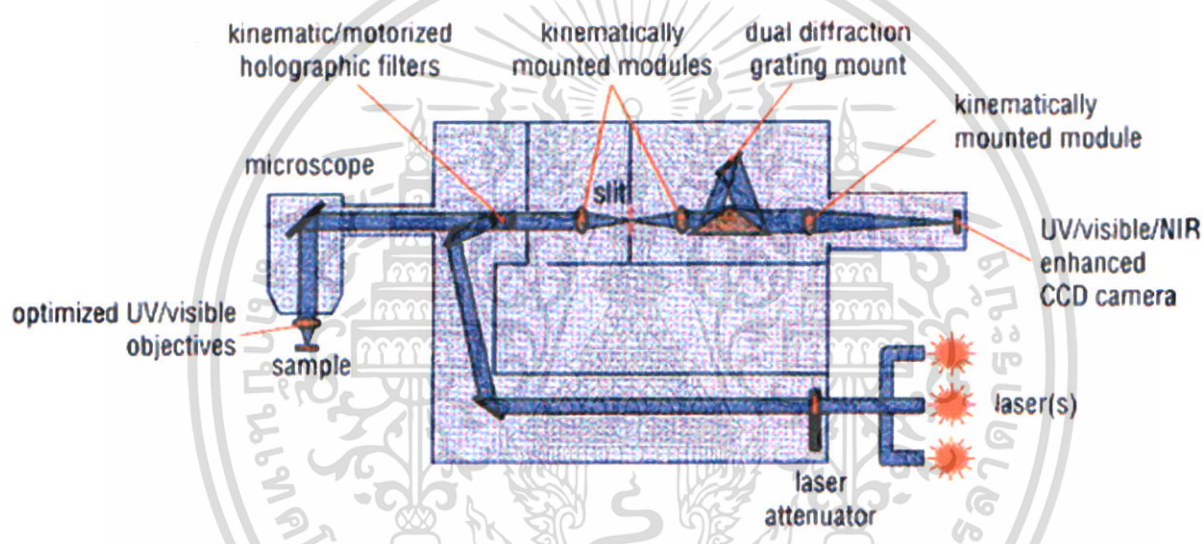


รูปที่ 3.10 กลไกของเครื่อง Raman spectroscope [14]

การเลื่อนไปของความถี่เป็น Raman scattering ซึ่งตั้งชื่อเป็นเกียรติแก่ Sir C.V.Raman ผู้ค้นพบผลนี้ในปี 1928 Stokes scattering (ผลของ Raman ชนิดปกติ) เกิดขึ้นเมื่อผลึกได้รับพลังงานจากลำเอกซารีนเป็นเอกซารีนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงแล้วเกิดการสั่นขณะ anti - Stokes scattering เกิดจากการทำลายของความร้อนที่กระตุ้นการสั่น โหมดการสั่นขึ้นอยู่กับพันธะของอะตอมในของแข็ง ดังนั้น Raman spectrum จึงถูกแปลเป็นโครงสร้างของของแข็งได้ และเนื่องจากความถี่ ν คือ จำนวนคลื่นที่เคลื่อนที่ได้ใน 1 วินาที มีหน่วยเป็น s^{-1} หรือ เฮิร์ตซ์ (Hertz) ในการตรวจวัดการสั่นโดยปกติทั่วไปจึงนิยามพารามิเตอร์ใหม่ขึ้นมาเรียกว่าเลขคลื่น (wavenumber ; $\bar{\nu}$) ซึ่งมีหน่วยที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการ (3.3) และมีแผนภาพโคอะแกรมของ Raman spectroscope ดังรูปที่ 3.11

$$\bar{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{1/s}{cm/s} = cm^{-1} \quad 3.4$$



รูปที่ 3.11 โคอะแกรมของ Raman spectroscope [14]

Raman scattering ใช้ประโยชน์ในการศึกษาทางเคมีและฟิสิกส์ของคาร์บอน โดยจะมีความไวต่อธรรมชาติของพันธะคาร์บอน ดังนั้นจึงสามารถแยกชนิดของคาร์บอนได้เป็น เพชร, แกรไฟต์, อมอร์ฟัส หรือ hydrogenated carbon ยอดความเข้ม Raman สำหรับเพชรมี 2 ค่า คือที่ 1332 cm^{-1} และ 2458 cm^{-1} ส่วนแกรไฟต์มียอดความเข้มอยู่ที่ 1580 cm^{-1} และ 3240 cm^{-1} microcrystalline graphite ซึ่งมีขนาดเล็กมียอดความเข้มอยู่ที่ 1355 cm^{-1} ส่วนอมอร์ฟัส คาร์บอนมีลักษณะเป็นแถบกว้างอยู่ 2 แถบที่ประมาณ 1550 cm^{-1} และ 1355 cm^{-1} ซึ่งถ้าอมอร์ฟัสคาร์บอนถูกไฮโดรจีเนตแถบกว้างจะอยู่ที่ 1355 cm^{-1} ซึ่งเป็นไหล่ของแถบ 1550 cm^{-1} สภาวะความเค้นและความสมบูรณ์ของโครงสร้างสามารถหาได้ โดยใช้ความกว้างและการเลื่อนไปของยอดความเข้มเป็นตัวบอกเทคนิค Raman spectroscopy ใช้ได้อย่างดีเยี่ยมในการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มคาร์บอนที่มีทั้งพันธะ sp^2 และ sp^3 โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

กระบวนการทดลอง

4.1 การเตรียมฐานรอง

ในการเตรียมฐานรองจะเลือกใช้ฐานรอง 3 ชนิด ด้วยกัน คือ ฐานรองโมลิบดีนัม ฐานรองซิลิคอนและฐานรองซิลิคอนเคลือบด้วย NiFe โดยก่อนที่จะนำแผ่นฐานรองซิลิคอนไปใช้ ในการทดลองจำเป็นต้องมีกระบวนการเตรียมแผ่นฐานรอง ดังกระบวนการต่อไปนี้

4.1.1 การเตรียมฐานรองโมลิบดีนัม

1. ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (Deionized water;DI) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning)
2. ล้างด้วยน้ำ DI
3. ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
4. แล้วล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
5. ล้างด้วยน้ำ DI
6. เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

4.1.2 การเตรียมฐานรองซิลิคอน

การเตรียมฐานรองซิลิคอนจะใช้ซิลิคอนขัดมันซึ่งมีลักษณะเรียบและมันเป็นกระจกเงา โดยเริ่มจากการทำความสะอาดเริ่มต้นตามกระบวนการดังนี้

1. ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน ในเครื่องสั่นความถี่สูง
2. ล้างด้วยน้ำ DI
3. กัดผิวหน้าด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (หรือกรดกัดแก้ว; HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัดซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนออก
4. ล้างด้วยน้ำ DI
5. ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษ โลหะที่ผิวหน้า
6. ล้างด้วยน้ำ DI
7. ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
8. ล้างด้วยน้ำ DI
9. เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. คัมในไตรโคลโรเอททีลีนเป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมันแล้วล้างด้วยอะซิโตน ในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
11. ล้างด้วยน้ำ DI
12. จุ่มลงในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 2 นาที
13. ล้างด้วยน้ำ DI
14. เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

หลังจากทำความสะอาดพื้นฐานของซิลิคอนแล้วแยกซิลิคอนเป็นสองส่วน เพื่อเป็นฐานรองสองชนิด คือ ชนิดขจัดมันธรรมดาและชนิดที่ทำการเคลือบ NiFe โดยขบวนการเคลือบได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Western Digital ทำการเคลือบให้โดยใช้วิธี DC plasma sputtering

4.2 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี HFCVD โดยใช้ชุดทดลองที่ประกอบขึ้นซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจากรูปชุดทดลองที่สร้างขึ้นนั้นจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

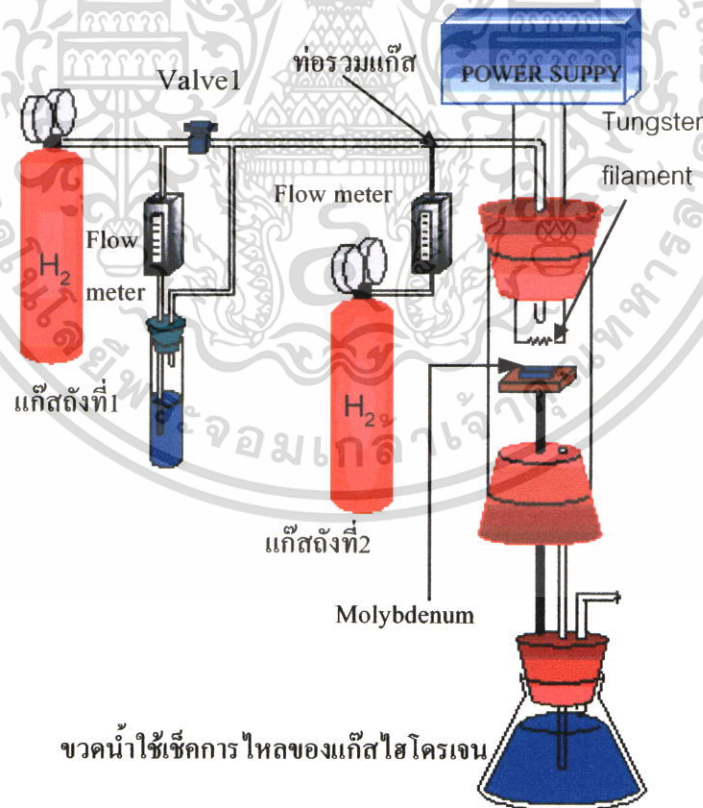
1. ถังแก๊สไฮโดรเจน
2. เรกกูเลเตอร์ (ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของแก๊สไฮโดรเจน)
3. Flow meter (ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ผ่านเข้าไปในแหล่งจ่าย)
4. แหล่งจ่าย (เอทริลแอลกอฮอล์)
5. Chamber ทำจากท่อควอทซ์ทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร
6. ขั้วจ่ายไฟกระแสตรง
7. นาฬิกาจับเวลา
8. สวิตช์พัลลมระบายความร้อน
9. สวิตช์ Power
10. ปุ่มปรับกระแส
11. DC - Ampmeter
12. แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 3 ชุค
13. ขวดใส่น้ำสำหรับเช็ดแก๊สไฮโดรเจนที่ไหลออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

ซึ่งชุดทดลองข้างต้น สามารถเขียนเป็นระบบอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ระบบอย่างง่ายของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี HFCVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากชุดทดลองในรูปที่ 4.1 และระบบอย่างง่ายในรูปที่ 4.2 สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้โดยใช้กระบวนการตามลำดับ ดังนี้

1. ตรวจสอบวาล์ว 1 ให้อยู่ตำแหน่งเปิดออก และปรับปรับกระแสให้อยู่ตำแหน่งซ้ายสุด
2. เปิดถังแก๊สไฮโดรเจนถึงที่ 1 ปรับ Regulator ที่ถังแก๊สเพื่อควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนให้มีค่า 50 sccm เปิดวาล์ว 1 จับเวลา 15 นาที เพื่อไล่อากาศภายในแชมเบอร์ออกจนหมดและแน่ใจได้ว่าเป็นบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน
3. ปิดวาล์ว 1 พร้อมทั้งปรับวาล์ว 2 เพื่อให้ได้อัตราการไหลของแก๊สที่ผ่าน Flaw meter เป็นไปตามอัตราส่วนที่กำหนดเพื่อพาเอาไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์เข้าสู่ระบบ
4. เปิดถังแก๊ส ถึงที่ 2 Regulator ที่ถังแก๊สไฮโดรเจนให้มีค่า 50 sccm ปรับวาล์ว 3 เพื่อให้ได้อัตราการไหลของแก๊สที่ผ่าน Flow meter เป็นไปตามอัตราส่วนที่กำหนด
5. เปิดสวิตช์ Power และเปิดสวิตช์พัดลมเพื่อระบายความร้อนขณะสังเคราะห์
6. จ่ายกระแสให้กับไส้หลอดทั้งสแตนท์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ที่ได้จากการใช้หลอดทั้งสแตนท์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm
7. ปรับระยะห่างระหว่างไส้หลอดทั้งสแตนท์กับฐานรองให้ได้อุณหภูมิของฐานรองเป็นไปตามที่กำหนด
8. สังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ตามเวลาที่ต้องการ
9. เมื่อครบเวลาสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่กำหนดแล้วค่อยๆ ลดการจ่ายกระแสโดยปรับปุ่มจ่ายกระแสไปทางซ้ายมืออย่างช้าๆ พร้อมทั้งปิดถังแก๊สไฮโดรเจนและปิดสวิตช์ Power
10. รอกันกระแทกแก๊สไฮโดรเจนที่ค้างอยู่ในระบบไหลออกหมด โดยสังเกตจากฟองน้ำในขวดรูปชมพู่
11. เปิดวาล์ว 2, 3 รอกันกระแทกระบบเย็นปิดสวิตช์พัดลม เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ นำชิ้นงานที่ได้ไปตรวจสอบต่อไป

4.3 การทดลอง

โมลิตินัมจากรายงานการวิจัย [3] พบว่าสามารถนำมาใช้เป็นฐานรองในการสังเคราะห์คาร์บอนให้มาอยู่ในรูปแบบต่างๆ ได้ดีจึงใช้โมลิตินัมมาเป็นฐานรองในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ คือ อุณหภูมิและอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน เพื่อหาอุณหภูมิและอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์

4.3.1 การทดลองบนฐานรองโมลิตินัม

การทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ได้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฐานรองเป็น 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C, 700°C, 750°C และ 800°C เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ในการสังเคราะห์บน

ฐานรองโมลิบดีนัม โดยในแต่ละอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน ดังนี้

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน

(H ₂ ถังที่ 1) sccm	(H ₂ ถังที่ 2) sccm	(H ₂ ถังที่ 1):(H ₂ ถังที่ 2)
10	90	1:9
20	80	2:8
30	70	3:7
40	60	4:6
50	50	5:5

ใช้เวลาในการสังเคราะห์ครั้งละ 60 นาที จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยวิธี SEM

4.3.1.1 เปลี่ยนแปลงเวลาในการสังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม

จากการทดลอง 4.1 พบว่าอุณหภูมิที่ 550 – 650°C และอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่ 1:1 เหมาะสมที่สุดต่อการสังเคราะห์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ จึงทำการศึกษาคู่ด้วยเงื่อนไขของระยะเวลาในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยเปลี่ยนค่าระยะเวลาในการสังเคราะห์เป็น 10 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที, 50 นาที, 60 นาที, 70 นาที, 80 นาที, 90 นาที, 100 นาที แล้วทำการวิเคราะห์ปริมาณของการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ด้วย SEM

4.3.2 การทดลองบนฐานรองซิลิคอน

การทดลองจะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองเป็น 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C, 700°C, 750°C และ 800°C เพื่อที่หาอุณหภูมิของที่เหมาะสมในการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอน เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยในแต่ละอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง จะเปลี่ยนอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน ดังตารางที่ 4.1

ใช้เวลาในการสังเคราะห์ครั้งละ 60 นาที จากนั้นนำชิ้นงานไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยวิธี SEM

4.3.3 การทดลองบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe

การทดลองบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วย NiFe เป็นการทดลองเพื่อที่จะนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการทดลองจะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C, 700°C, 750°C และ 800°C เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วย NiFe ซึ่งหาระยะงานการวิจัยพบว่า NiFe มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ โดยในแต่ละอุณหภูมิที่เปลี่ยนจะเปลี่ยนอัตราส่วนของแก๊ส ดังตารางที่ 4.1

ใช้เวลาในการสังเคราะห์ครั้งละ 60 นาที จากนั้นนำชิ้นงานที่สังเคราะห์ไปตรวจสอบด้วยวิธี SEM

4.3.3.1 เปลี่ยนแปลงเวลาในการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe

ที่อุณหภูมิ 650 – 700°C โดยอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนทุกอัตราส่วนทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ในการทดลองนี้เลือกอัตราส่วนของแก๊สที่ 1:9 มาทำการทดลองเปลี่ยนระยะเวลาในการสังเคราะห์เป็น 10 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที, 50 นาที, 60 นาที, 70 นาที, 80 นาที, 90 นาที, 100 นาที แล้วทำการวิเคราะห์ปริมาณการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ด้วย SEM



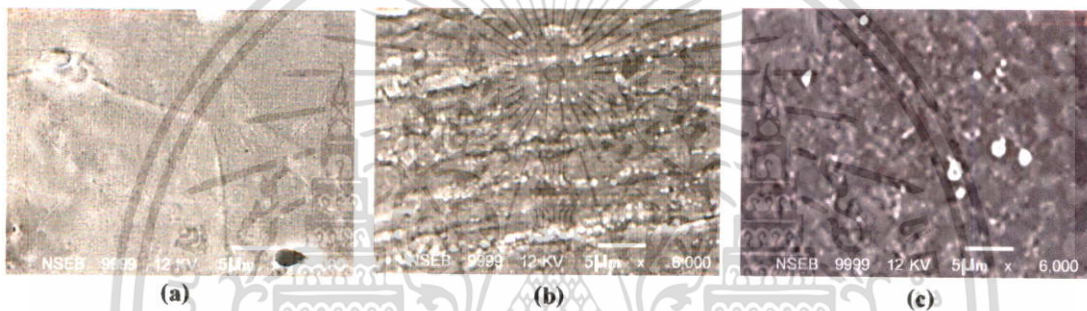
บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองโดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆ นั้น จะถูกนำไปวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค SEM, TEM, Raman spectroscopy, EDS ตามความเหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

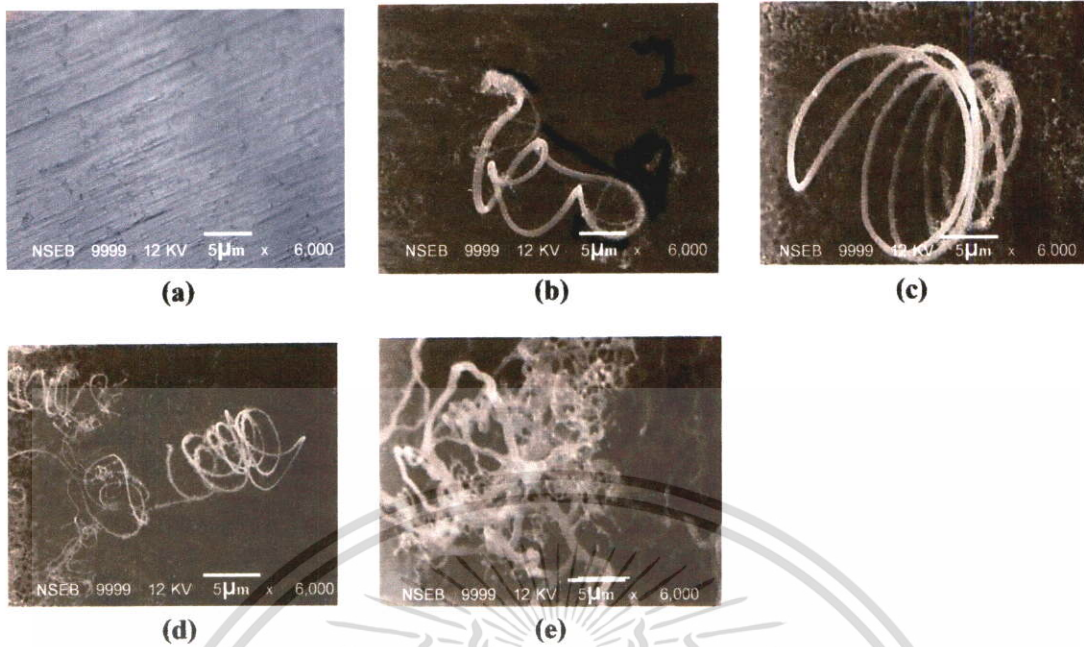
5.1 ผลการทดลองจากการทดลองบนฐานรองโมลิตินัม

ชิ้นงานที่ได้จากการสังเคราะห์บนฐานรองโมลิตินัม ที่ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองและอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ได้ดังรูป



รูปที่ 5.1 ลักษณะชิ้นงานที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิตินัม (a) ที่อุณหภูมิฐานรอง 100 – 200 °C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนเป็นค่าดังตาราง 4.1 (b) ที่อุณหภูมิฐานรอง 200 – 300 °C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9 และ 2:8 (c) ที่อุณหภูมิฐานรอง 200 – 300 °C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 3:7, 4:6 และ 5:5

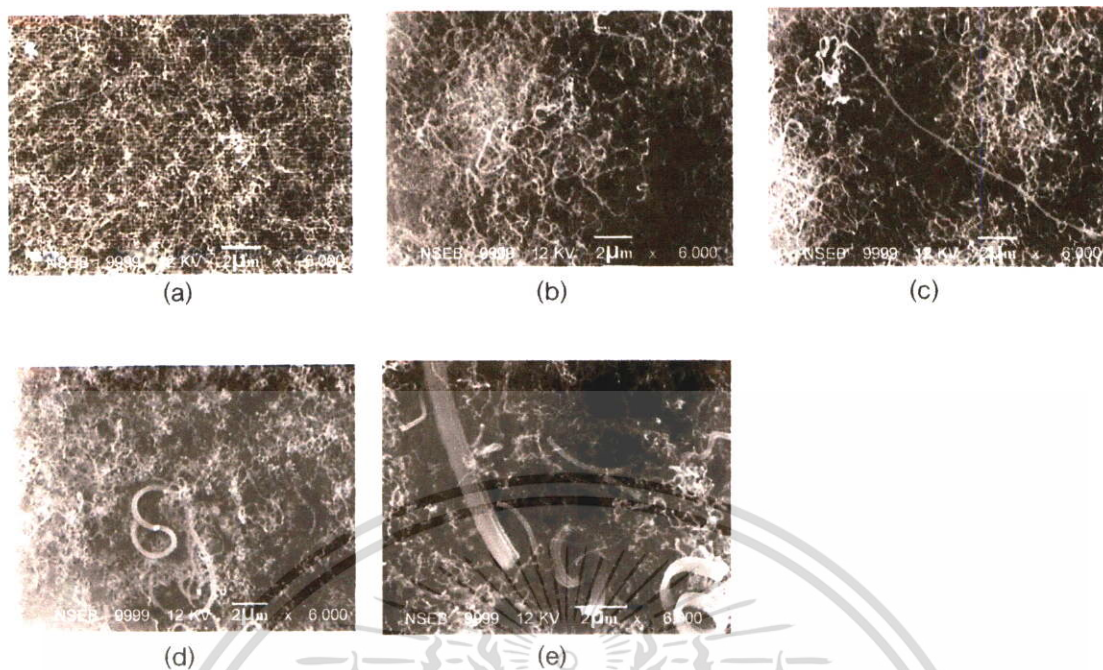
จากรูปที่ได้พบว่า รูปที่ 5.1 (a) จะเป็นลักษณะของพื้นผิวโมลิตินัม โดยไม่ตรวจพบการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ เนื่องจากอุณหภูมิของฐานรองมีค่า 100 – 200 °C ซึ่งเป็นช่วงของอุณหภูมิของฐานรองที่ต่ำจึงไม่เกิดการก่อตัวของอะตอมคาร์บอน รูปที่ 5.1 (b) และ (c) ในอุณหภูมิฐานรองในช่วง 200 - 300 °C เป็นอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมต่อการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยจะมีการก่อตัวของคาร์บอนในรูปแบบเขม่าหรืออมอฟิสซ์คาร์บอน ซึ่งจะเริ่มมีการพบการก่อตัวของอมอร์ฟิสคาร์บอนอันจะนำไปสู่การก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 5.2 ลักษณะชิ้นงานที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม (a) อุณหภูมิฐานรอง 300 – 450°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9 (b) อุณหภูมิฐานรอง 300 – 450°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 2:8 (c) อุณหภูมิฐานรอง 300 – 450°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 3:7 (d) อุณหภูมิฐานรอง 300 – 450°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 4:6 (e) อุณหภูมิฐานรอง 300 – 450°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 5:5

จากรูปที่ 5.2 (a) เนื่องจาก อุณหภูมิในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเป็น 300 – 450°C แต่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนมีค่า 1:9 ซึ่งจะได้อะตอมคาร์บอนที่ปริมาณน้อยการก่อตัวของคาร์บอนจึงไปเกิดขึ้นพบเป็นภาพพื้นผิวของโมลิบดีนัม รูปที่ 5.2 (b), (c), (d) จะเป็นลักษณะของ Corrugated Carbon Fibers (CCFs) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 – 2.5 μm .

โดยการเกิดของ CCFs นั้นเกิดเนื่องจากอุณหภูมิฐานรองที่เหมาะสม และอะตอมของคาร์บอนที่มีปริมาณมากพอต่อการเกิด Fibers ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง มากกว่าคาร์บอนนาโนทิวป์

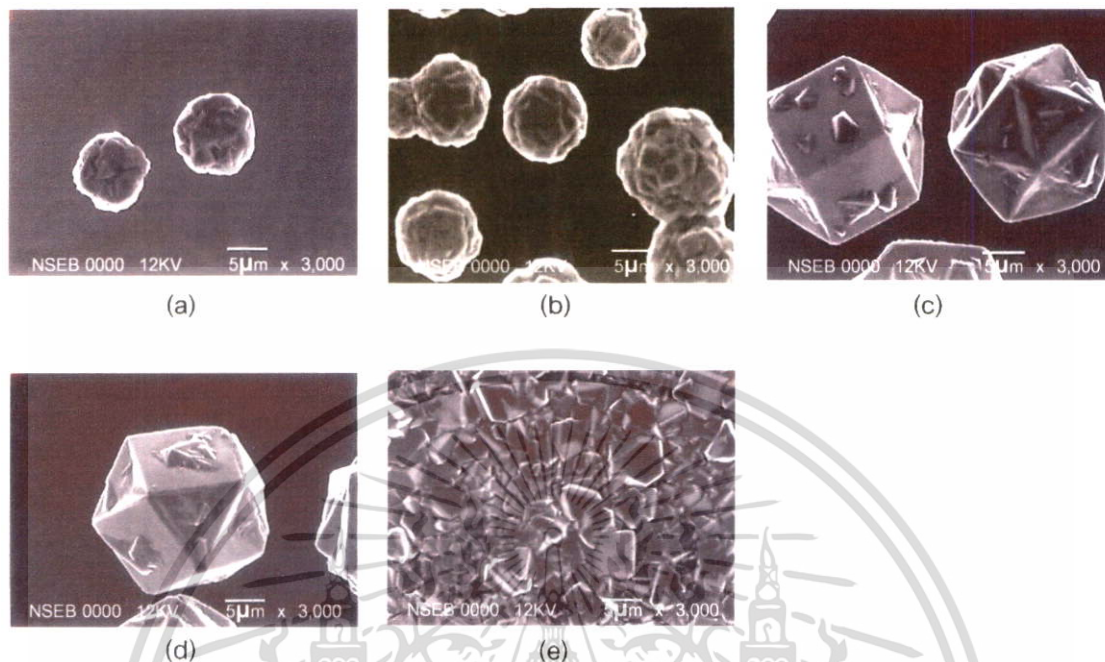


รูปที่ 5.3 ลักษณะชิ้นงานที่สังเคราะห์ฐานรอง โมลิบดีนัม (a) อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9 (b) อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 2:8 (c) อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 3:7 (d) อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 4:6 (e) อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 5:5

จากภาพSEM พบว่าที่อุณหภูมิ 450 - 600°C จะพบการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้น ในรูปที่ 5.3 (a) พบเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 - 50 nm. ใกล้เคียงกันทุกเส้นในรูปที่ 5.3 (b) และ (c) จะพบเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 - 50 nm. และพบCarbon nano Fibers (CNFs) ปะปนอยู่โดย CNFs ที่ตรวจพบมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 70 nm โดยภาพที่ 5.2 (d) จะพบ CNFs ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 125 nm ปะปนอยู่ ซึ่งมีขนาด CNFs ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าภาพ b และ c แต่จากภาพ SEM จะเห็นว่าคาร์บอนนาโนไฟเบอร์ที่ปะปนอยู่นั้นมีจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับการคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นรูปที่ 5.3 (e) จะพบว่ามีคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมี CNFs และ CCFs ปะปนอยู่โดยอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนถึงที่ 1 ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวเพิ่มอะตอมคาร์บอนให้มีปริมาณมากขึ้นอะตอมคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองโมลิบดีนัมจะมีการปะปนของ CNFs และ CCFs เพิ่มขึ้น ในการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนนาโนทิวป์ที่อุณหภูมิ 450 - 600°C ที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้ไม่มีคาร์บอนชนิดอื่นปะปน



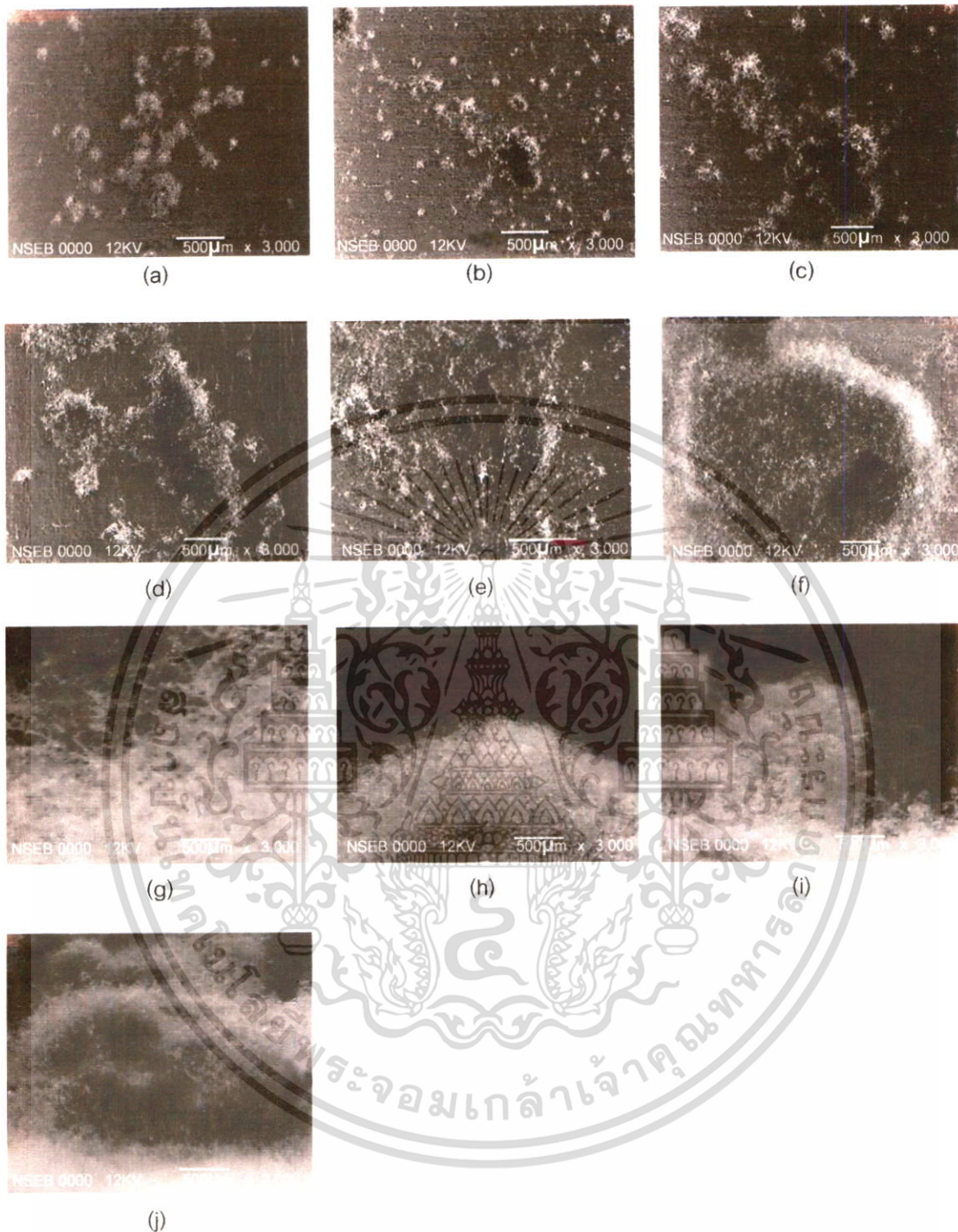
รูปที่ 5.4 ลักษณะชิ้นงานที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม (a) ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9 (b) ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 2:8 (c) ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 3:7 (d) ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 4:6 (e) ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 5:5

จากรูป 5.4 (a), (b) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 600 – 800°C จะเกิดเป็นเพชรขึ้น โดยที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่ 1:9, 2:8 จะเป็นลักษณะของเพชรผลึกเดี่ยว (Single Diamonds) ที่มีผลึกเล็กและไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับรูปที่ 5.4 (c) และ (d) ที่มีผลึกใหญ่ และสมบูรณ์กว่า ส่วนรูปที่ 5.4 (e) จะเกิดเป็นฟิล์มเพชร (Diamonds Films) ขึ้น โดยอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการเกิดผลึกที่สมบูรณ์และมีปริมาณมากพอที่จะทำให้เกิดฟิล์มเพชร

5.2 ผลการทดลองเปลี่ยนแปลงเวลาในการสังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม

จากผลการทดลองที่ 5.1 พบว่าอุณหภูมิฐานรองที่เหมาะสม คือ 450 – 600°C และอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่เหมาะสม คือ 1:9 ซึ่งสังเคราะห์ได้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ไม่มี CNFs และ CCFs ปะปนอยู่โดยทำการทดลองเปลี่ยนแปลงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



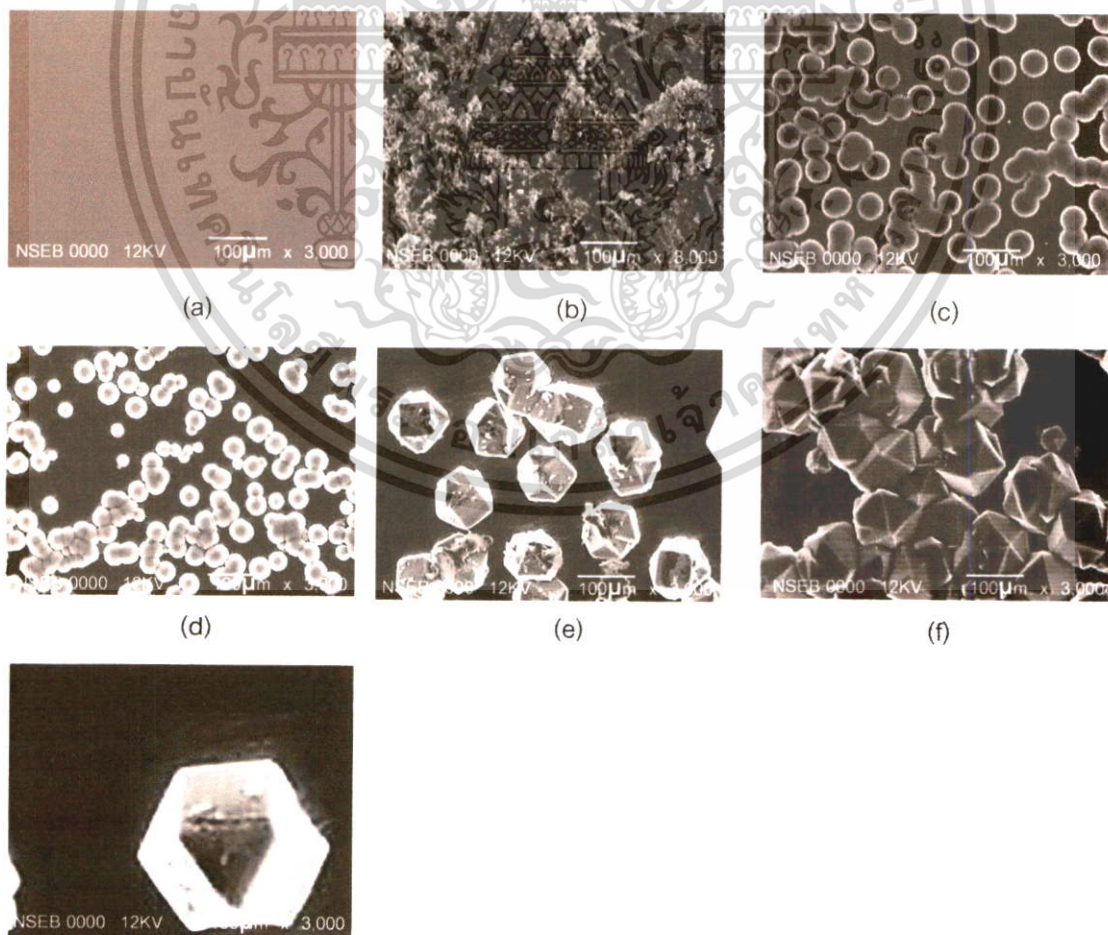
รูปที่ 5.5 ลักษณะชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงเวลาในสังเคราะห์บนฐานรอง โมลิบดีนัม (a)10 นาที, (b) 20 นาที, (c) 30 นาที , (d) 40 นาที, (e) 50 นาที, (f) 60 นาที , (g) 70 นาที, (h) 80 นาที, (i) 90 นาที และ (j) 100 นาที

จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นคาร์บอนนาโนทิวป์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก รูปที่ 5.5 (a) คาร์บอนนาโนทิวป์จะเริ่มต่อตัวขึ้นเป็นกลุ่มๆ ซึ่งแต่ละกลุ่มจะห่างกันเมื่อเพิ่มเวลาเพิ่มขึ้นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์เป็นกลุ่มๆ เล็กๆ เพิ่มขึ้นและแต่ละกลุ่มจะขยายตัวติดเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันดังภาพ (b), (c), (d) และ (e) รูปที่ 5.5 (f) การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เวลา 60 นาที พบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์จะเกิดเต็มพื้นที่ขนาด 3×3 mm โดยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5.5 (g) และ (h) จะแสดงภาพตัดขวางของความหนาแน่นของการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ในแนวตั้งที่มีความหนาแน่นในแนวตั้งเพิ่มขึ้นโดยรูปที่ 5.5 (i) และ (j) จะพบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์จะก่อตัวซ้อนทับกันเป็นกลุ่มทับกลุ่มเดิมในแนวตั้งเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงเวลาจะทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นในแนวระนาบก่อนจนเต็มพื้นที่ของฐานรองแล้วจะก่อตัวในแนวตั้งซ้อนทับกันเป็นกลุ่มขึ้นไป ซึ่งต้องใช้เวลานานถึง 60 นาที จึงจะได้คาร์บอนนาโนทิวป์เต็มพื้นที่ โดยเมื่อเวลาที่เพิ่มขึ้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เพิ่มขึ้นยังคงมีขนาดใกล้เคียงกัน ไม่พบ CNFs และ CCFs ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากกว่า 50 nm. ประปรายอยู่ โดยเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการสังเคราะห์พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 10 – 100 นาที คาร์บอนนาโนทิวป์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น

5.3 ผลการทดลองบนฐานรองซิลิกอนชนิดมัน

เนื่องจากการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิกอนจะนำไปสู่การพัฒนาทางอิเล็กทรอนิกส์จึงทำการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิกอนได้ผลดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.6 ผลการทดลองบนฐานรองซิลิกอนชนิดมัน (a) ที่อุณหภูมิฐานรอง 100 – 600°C ขณะที่
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

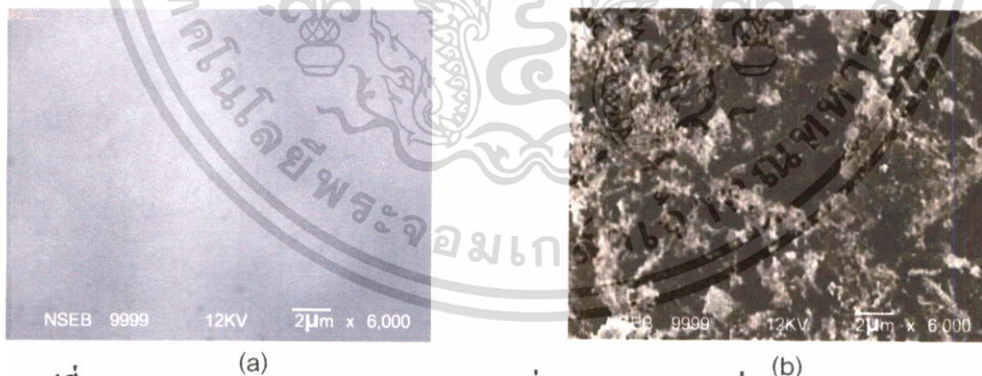
อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนดังตารางที่ 4.1 (b) ที่อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนดังตารางที่ 4.1 (c) ที่อุณหภูมิฐานรอง 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน มีค่า 1:9 (d) ที่อุณหภูมิฐานรอง 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน มีค่า 2:8 (e) ที่อุณหภูมิฐานรอง 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน มีค่า 3:7 (f) ที่อุณหภูมิฐานรอง 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน มีค่า 4:6 (g) ที่อุณหภูมิฐานรอง 800°C ขณะที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน มีค่า 5:5

จากรูป 5.6 (a) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 - 600°C ในขณะที่อัตราส่วน ของแก๊สไฮโดรเจนเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 4.1 จากภาพพบเป็นพื้นผิวของซิลิคอนและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 600 – 800°C จากรูป 5.6 (b) จะพบเป็นเขม่าสีดำหรืออมอร์ฟัสคาร์บอนโดยรูป 5.6 (c) และ (d) จะเป็นลักษณะของผลึกเพชรแต่ผลึกมีขนาดเล็กมีรูปร่างไม่ชัดเจนส่วนรูปที่ 5.6 (e), (f), (g) จะเป็นผลึกเพชรที่มีขนาด 10 μm ซึ่งเป็นผลึกขนาดใหญ่

โดยการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนไม่สามารถที่จะสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์เนื่องจากไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์จึงต้องมีการเคลือบฐานรองซิลิคอนเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

5.4 ผลการทดลองบนซิลิคอนที่เคลือบ NiFe

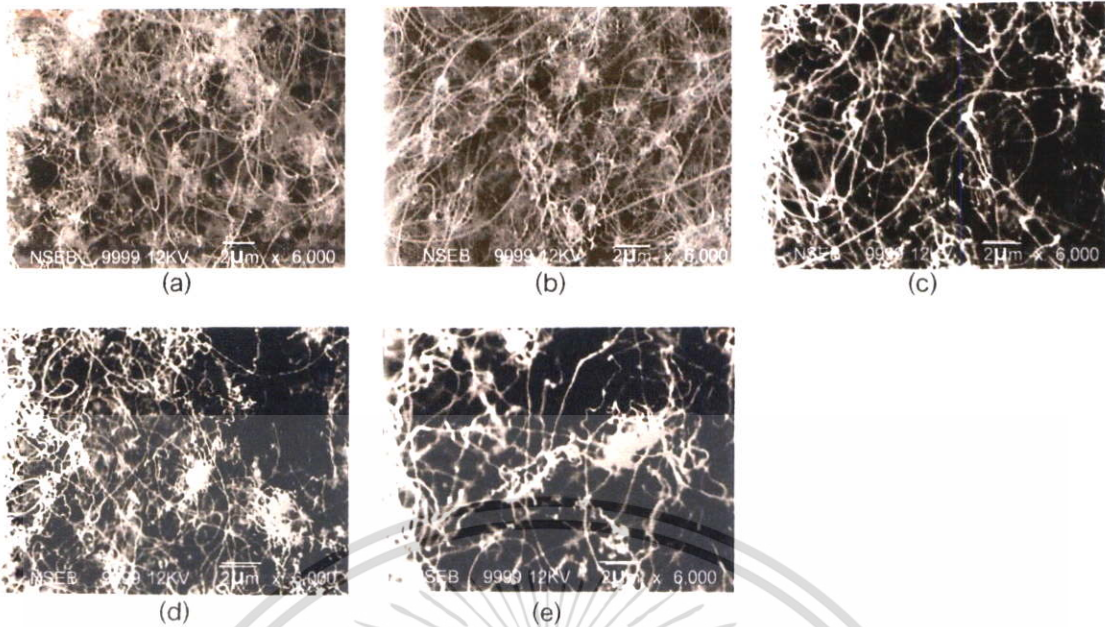
การทดลองเคลือบด้วย NiFe จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ให้มีการก่อตัวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.7 ผลการทดลองบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe (a) ที่อุณหภูมิฐานรอง 100 – 200°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนดังตาราง 4.1(b) ที่อุณหภูมิฐานรอง 200 – 450°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนดังตาราง 4.1

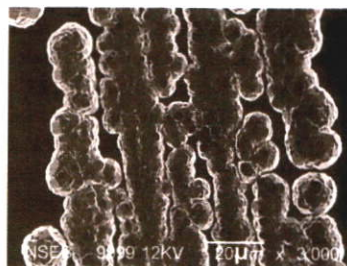
จากรูปที่ 5.7 (a) เป็นลักษณะของพื้นผิวของซิลิคอนที่เคลือบ NiFe โดยเป็นช่วงอุณหภูมิฐานรองที่ต่ำ 100 – 200°C จึงไม่มีอะตอมของคาร์บอนก่อตัวโดยรูปที่ 5.7 (b) จะเกิดเป็นเขม่าหรืออมอร์ฟัสคาร์บอนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 ผลการทดลองบนฐานรองที่เคลือบ NiFe (a) ที่อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1:9 (b) ที่อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 2:8 (c) ที่อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 3:7 (d) ที่อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 4:6 (e) ที่อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C ขณะที่ใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 5:5

จาก SEM พบว่าอุณหภูมิที่ 450 – 600°C จะพบการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์โดยจากรูปที่ 5.8 (a), (b), (c), (d) และ (e) พบเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 - 50 nm มีลักษณะของเส้นที่ได้ยาวจากภาพ SEM พบว่ามีเส้นที่ยาวมากกว่า 15 μm โดยทุกอัตราส่วนของแก๊สที่เปลี่ยนแปลงไม่ตรวจพบ CNFs และ CCFs อันเนื่องมาจาก NiFe เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์จึงเร่งปฏิกิริยาให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์โดยไม่ทำให้มีคาร์บอนรูปแบบอื่นเกิดขึ้นมาในการสังเคราะห์



รูปที่ 5.9 ลักษณะของชิ้นงานที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe ที่

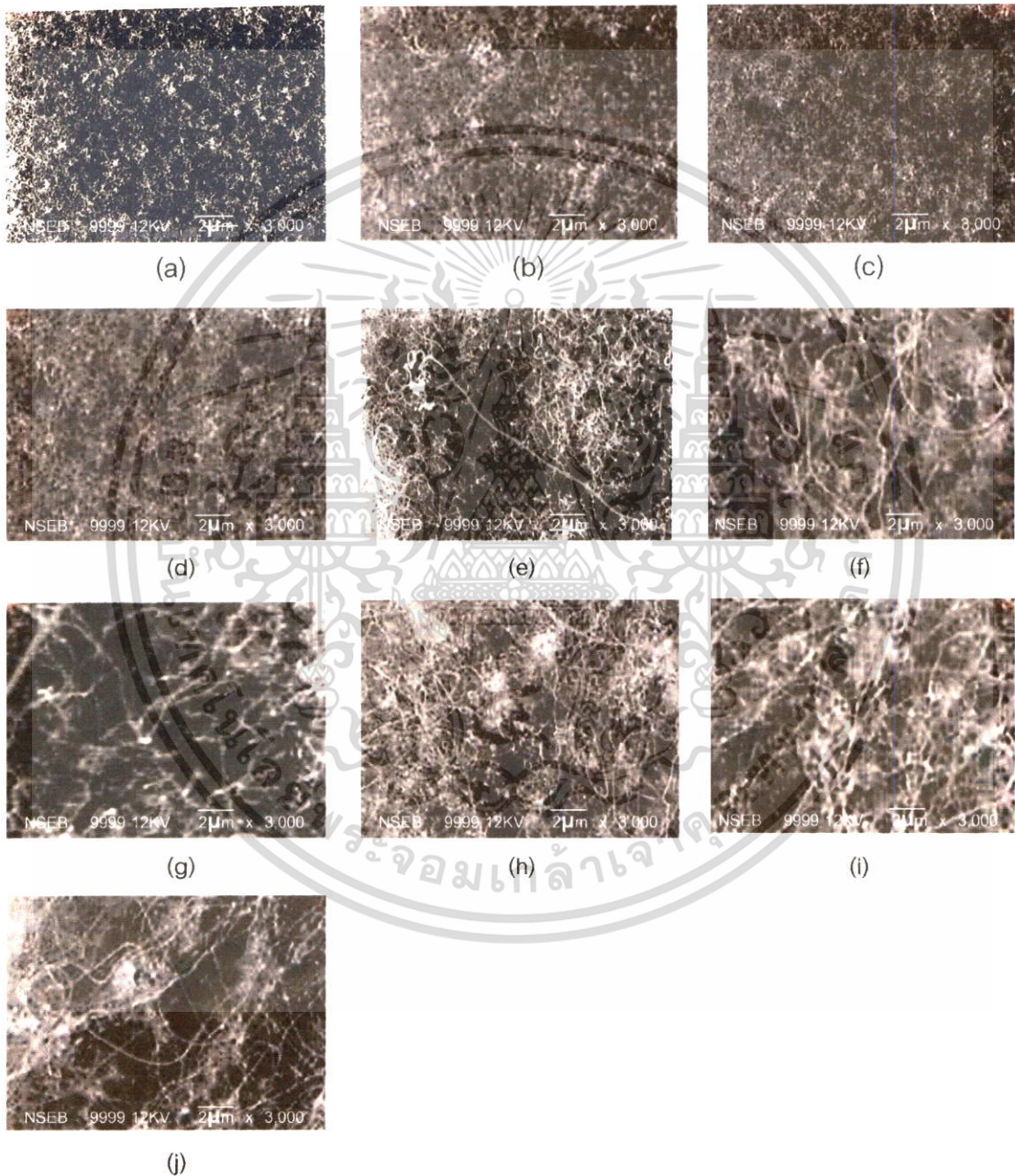
อุณหภูมิฐานรอง 600 – 800°C ของที่อัตราส่วนของแก๊สเป็นดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การดำเนินงานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังโรงเรียนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.9 (a) อุณหภูมิฐานรอง 600 - 800°C มีอุณหภูมิฐานรองที่สูงขึ้นพบเกิดเป็นเพชรที่จับตัวกันเป็นกลุ่มๆ ไม่เป็นฟิล์มเพชร

5.5 ผลการทดลองเปลี่ยนแปลงเวลาในการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe

อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ คือ 1:9 ซึ่งจะได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองบนฐานรองโมลบดีนัม โดยฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วย NiFe มีขนาด 10 x 10 mm



รูปที่ 5.10 ลักษณะชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงเวลาในการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วย NiFe (a) 10 นาที, (b) 20 นาที, (c) 30 นาที, (d) 40 นาที, (e) 50 นาที, (f) 60 นาที, (g) 70 นาที, (h) 80 นาที, (i) 90 นาที และ (j) 100 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.10 (a), (b), (c), (d) และ (e) พบว่าใช้เวลาในการสังเคราะห์ 10 นาทีคาร์บอนนาโนทิวป์จะเกิดเต็มพื้นที่ขนาด 10×10 mm โดยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 20 นาที, 30 นาที, 40 นาทีลักษณะการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ จะก่อตัวหนาแน่นขึ้น โดยรูปที่ 5.10 (f), (g), (h), (I) และ (j) เมื่อใช้กำลังขยายเพิ่มขึ้นเป็น 3,000 เท่าพบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์จะเกิดหนาแน่นซ้อนทับกันโดยลักษณะของเส้นที่ได้เป็นเส้นยาวประมาณ $15 \mu\text{m}$

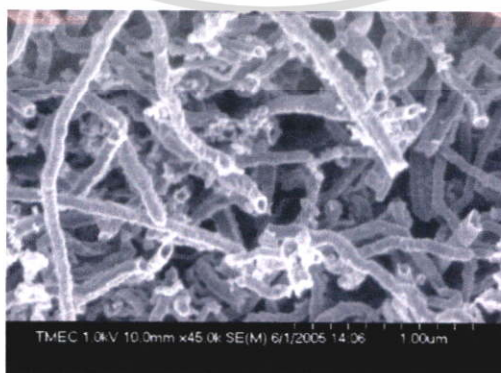
จากการเปลี่ยนแปลงเวลาพบว่าในการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่ทำการเคลือบด้วย NiFe จะสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ปริมาณการก่อตัวต่อพื้นที่มากกว่าการสังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัมเนื่องจากการสังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม 3×3 mm ต้องใช้เวลานาน 60 นาที จึงจะเกิดเต็มแผ่นฐานรองโดยสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วย NiFe ใช้ฐานรองขนาด 10×10 mm ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 10 นาที โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ จะเกิดเต็มพื้นที่

ผลการทดลอง 5.1 ถึงการทดลองที่ 5.5 วิเคราะห์ได้วงที่อุณหภูมิฐานรองที่ต่ำกว่า 800°C โดยจากการทดลองพบว่าในช่วงอุณหภูมิฐานรอง $450 - 600^{\circ}\text{C}$ ซึ่งคาร์บอนจะมีการก่อตัวในสภาวะ SP_2 โดยอุณหภูมิช่วงนี้จะสังเคราะห์ได้คาร์บอนนาโนทิวป์อุณหภูมิที่ 800°C คาร์บอนจะก่อตัวในสภาวะ SP_3 ซึ่งจะสังเคราะห์ได้เป็นเพชร

จากการทดลองสังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัมจะได้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีเส้นขดเกี่ยวพันกันซึ่งผลการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วย NiFe จะ ได้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีเส้นตรงและขนาดยาวประมาณ $15 \mu\text{m}$ กระจายตัวรวมกันเป็นกลุ่มไม่พันกัน

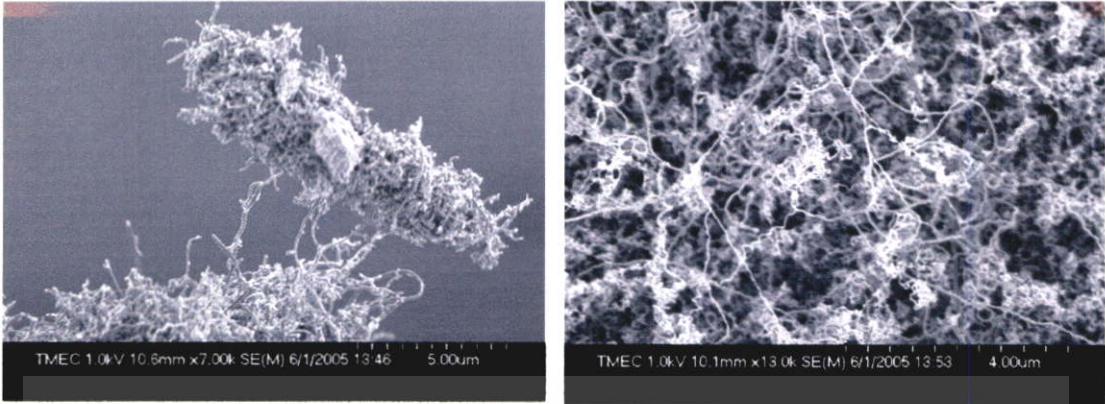
5.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)

การใช้เทคนิค FESEM จะได้ภาพที่มีการขยายที่ประมาณ 3 แสนเท่า โดยจากผลการทดลองจะได้ภาพที่มีความคมชัด โดยผลของเทคนิค FESEM จะเพื่อความเข้าใจถึงลักษณะต่างๆ ของคาร์บอนนาโนทิวป์เพิ่มขึ้น

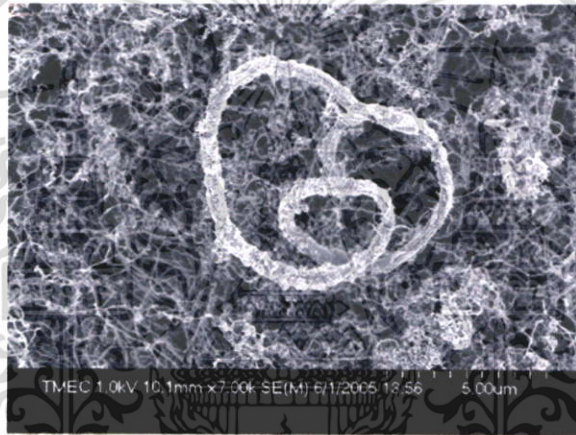


รูปที่ 5.11 ลักษณะปลายที่เปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่โมลิบดีนัมเมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจากเทคนิค FESEM ภาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



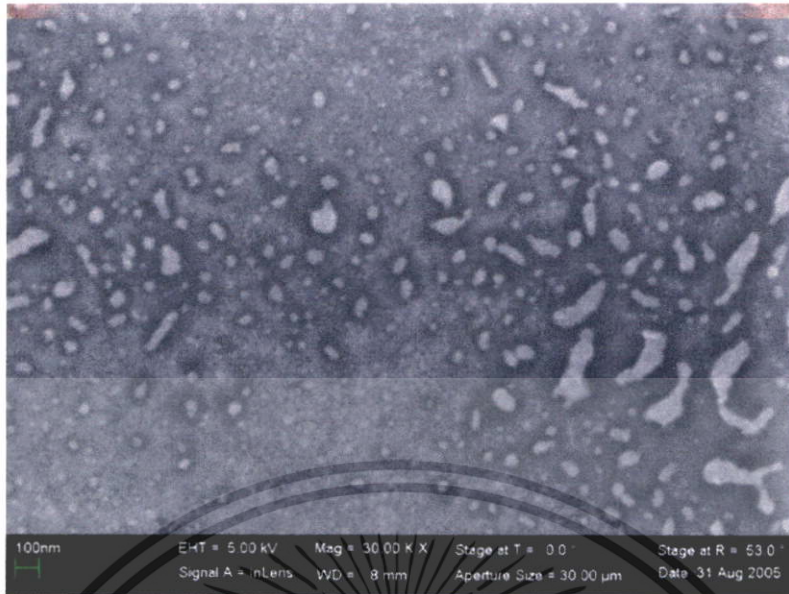
รูปที่ 5.12 ลักษณะการขดกันของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรองโพลีคินัมเมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจากเทคนิค FESEM



รูปที่ 5.13 ลักษณะคาร์บอนไฟเบอร์ที่สังเคราะห์บนฐานรองโพลีคินัมเมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจากเทคนิค FESEM

จากรูปที่ 5.11 จะเป็นลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่สร้างบนฐานรองโพลีคินัมโดยส่วนปลายจะเปิด รูปที่ 5.12 จะเป็นลักษณะคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่เป็นขดพันกัน โดยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้ 30 – 50 nm และพบคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีความยาวประมาณ 5 μm ปะปนอยู่ รูปที่ 5.13 จะเป็นลักษณะของ CNFs ที่เกิดจากการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



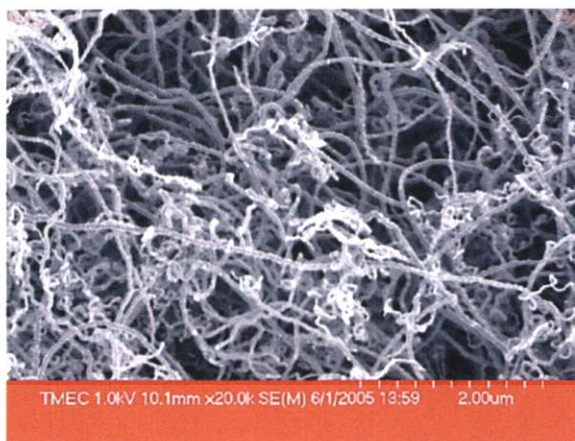
รูปที่ 5.14 ลักษณะพื้นผิวของ NiFe ที่เคลือบบนซิลิคอนจากเทคนิค FESEM



รูปที่ 5.15 ลักษณะของความหนาของชั้น NiFe ที่เคลือบบนซิลิคอน

จากรูปที่ 5.14 เป็นลักษณะของพื้นผิวของ NiFe ที่มีกำลังขยายเพิ่มขึ้น 3 หมื่นเท่า โดยมีลักษณะกระจายตัวของ NiFe ที่เกิดขึ้นบนฐานรองซิลิคอน รูปที่ 5.15 จะเป็นชั้นความหนาของ NiFe ที่เคลือบบนซิลิคอนที่มีความหนา 1 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

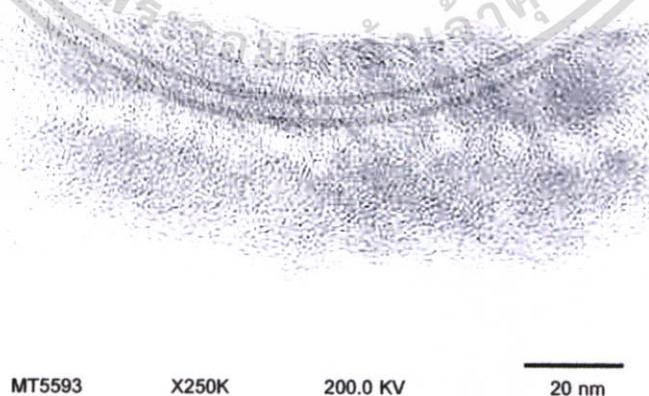


รูปที่ 5.16 ลักษณะคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe จากเทคนิค FESEM

จากรูปที่ 5.16 จะเป็นรูปของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe พบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากการสังเคราะห์มีลักษณะการกระจายตัวเป็นเส้นยาวไม่เกี่ยวพันกัน

5.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM

ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวป์และลักษณะต่างๆ ของคาร์บอนสามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM โดยจะนำมาวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ที่สังเคราะห์บนฐานรองโพลีคีนัมและที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe



รูปที่ 5.17 ลักษณะคาร์บอนนาโนทิวป์เมื่อใช้กำลังขยายสูงด้วยเทคนิค TEM ที่สังเคราะห์บนฐานรองโพลีคีนัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 ลักษณะ WCNTs ที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม เมื่อใช้กำลังการขยายสูงชัน จากเทคนิค TEM

รูปที่ 5.19 ลักษณะปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม เมื่อใช้กำลังการขยายสูงชันจากเทคนิค TEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 ลักษณะ CCFs ของคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม เมื่อใช้กำลังการขยายสูงชันจากเทคนิค TEM

รูปที่ 5.21 ลักษณะ CNFs ที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม เมื่อใช้กำลังการขยายสูงชันจากเทคนิค TEM

จากรูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นช่องว่างภายในเส้นคาร์บอนอันเป็นลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยจากรูปที่ 5.17 แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม จะได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

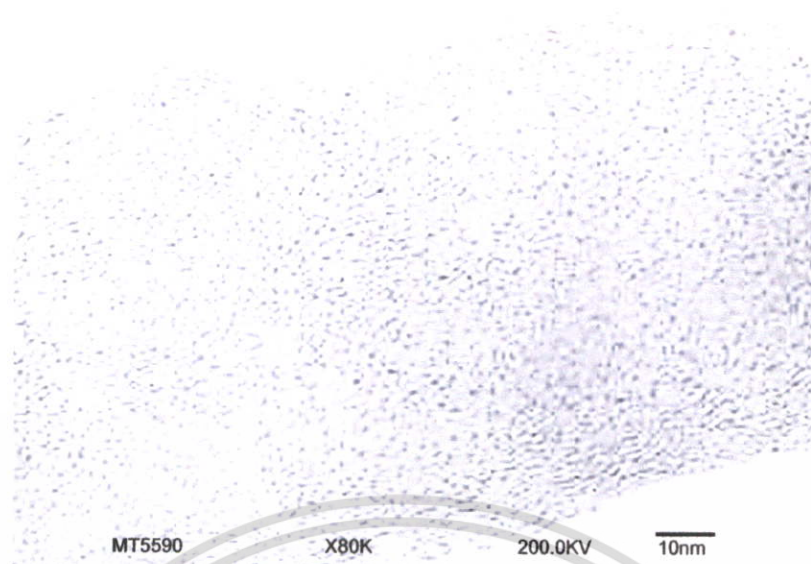
เป็นแบบ MWCNTs โดยจากรูปจะมีผนังที่ซ้อนกันหลายชั้น จากรูปที่ 5.18 ส่วนปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์จะเป็นลักษณะที่เปิดซึ่งแสดงการก่อดวงของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Root Growth จากรูปจะแสดงภาพหน้าตัดของส่วนปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่มีผนังซ้อนกันหลายชั้น จากรูปที่ 5.19 จะเป็นลักษณะของ CCFs ซึ่งเป็นไฟเบอร์ขนาดใหญ่ประมาณ 1 – 2.5 μm ภายในเส้นจะตันไม่เป็นท่อลักษณะของเส้นจะคงอเป็นเกลียวหรือหยักเป็นลอน โดยรูปที่ 5.20 จะเป็นลักษณะของ CNFs



รูปที่ 5.22 ลักษณะคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรองซัลฟิดคอนที่เคลือบ NiFe เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจากเทคนิค TEM

รูปที่ 5.23 ลักษณะ MWCNTs ที่สังเคราะห์บนฐานรองซัลฟิดคอนที่เคลือบ NiFe เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจากเทคนิค TEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



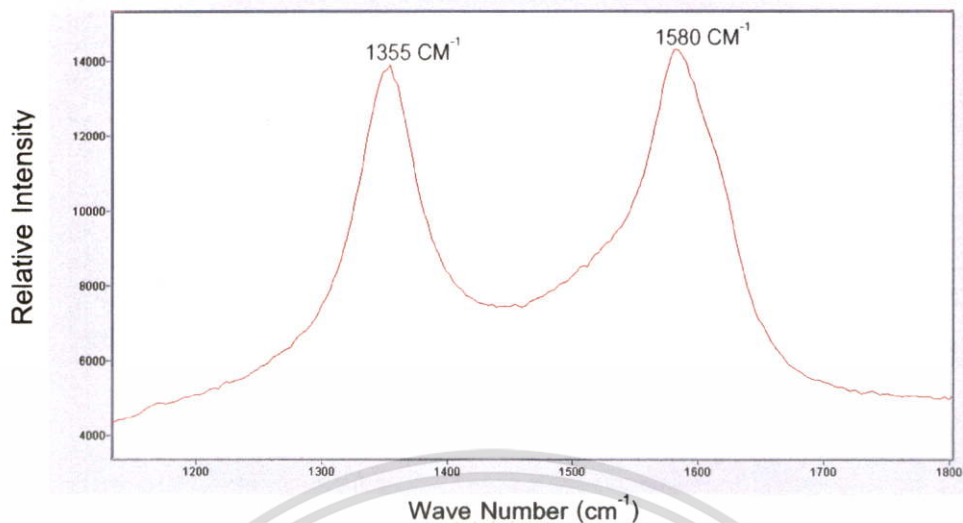
รูปที่ 5.24 ส่วนปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นจากเทคนิค TEM

จากรูปที่ 5.22 แสดงให้เห็นช่องว่างภายในเส้นคาร์บอนอันเป็นลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยจากรูปเป็นลักษณะของเส้นที่มีความยาว $2.5 \mu\text{m}$ รูปที่ 5.23 แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์บนฐานรอง ซิลิคอนที่เคลือบ NiFe จะเป็นแบบ MWCNTs โดยมีผนังที่ซ้อนกันหลายชั้น รูปที่ 5.24 จะแสดงส่วนปลายที่ปิดซึ่งแสดงการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ แบบ Tip growth

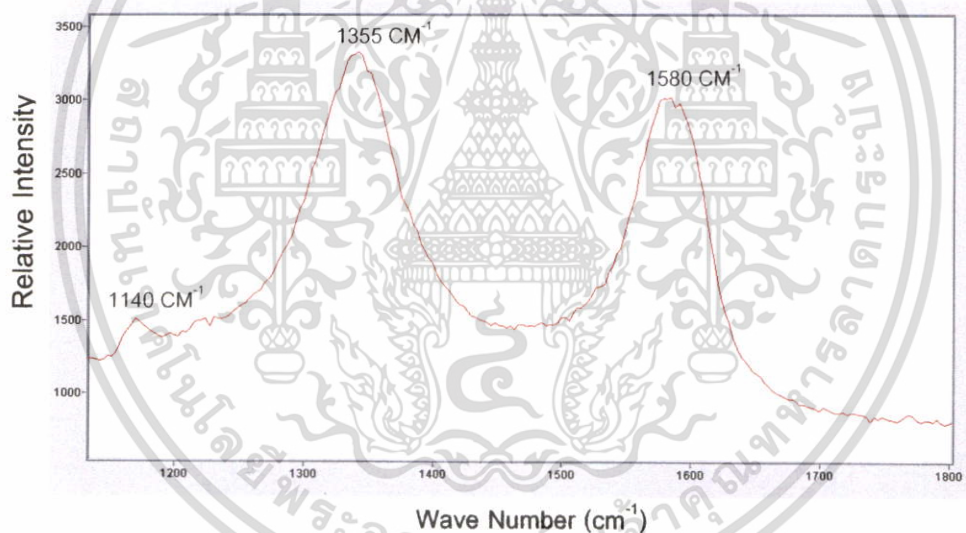
5.8 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

การวัดคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ส่วนมากแล้วมักจะใช้ในการตรวจสอบพันธะของคาร์บอน ดังนั้นผลที่ได้สามารถแยกชนิดของคาร์บอนได้ว่าเป็นแกรไฟต์, เพชร และอะมอร์ฟัสคาร์บอน โดยแสดงออกมาเป็น Raman spectrum จากรูปที่ 5.24 คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมียอดคลื่น Raman spectrum ที่ 1580 cm^{-1} ซึ่งจากตารางแสดงยอดกราฟหลักๆ จากการวัดรูปแบบต่างๆของคาร์บอนด้วยเครื่อง Raman spectroscopy จะได้เป็นแกรไฟต์และมียอดคลื่นที่ 1355 cm^{-1} ซึ่งจากตารางแสดงยอดกราฟหลักๆ จากการวัดรูปแบบต่างๆของคาร์บอนด้วยเครื่อง Raman spectroscopy จะได้เป็น Microcrystalline graphite โดยแถบของยอดคลื่นเป็นลักษณะของแถบที่กว้าง เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์ที่นำมาทดสอบจะเกิดเป็นกลุ่มที่มีคาร์บอนนาโนทิวป์ หลายเส้นรวมกัน Raman Spectrum ที่แสดงออกมาเป็นแถบกว้างเป็นการทดสอบคุณภาพของชนิดพันธะ และสภาวะความเค้น โดย ถ้าความเค้นมีค่ามากแถบ Raman Spectrum จะแคบและความเค้นมีค่าน้อยแถบ Raman Spectrum จะกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



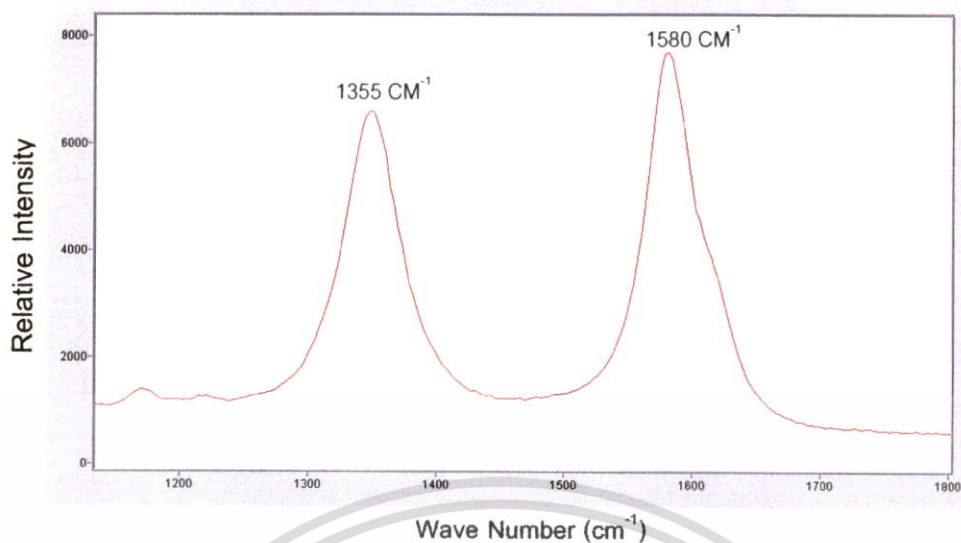
รูปที่ 5.25 Raman spectrum ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างบนฐานรองโมลิบดีนัม ขณะที่ใช้อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจน 1:9



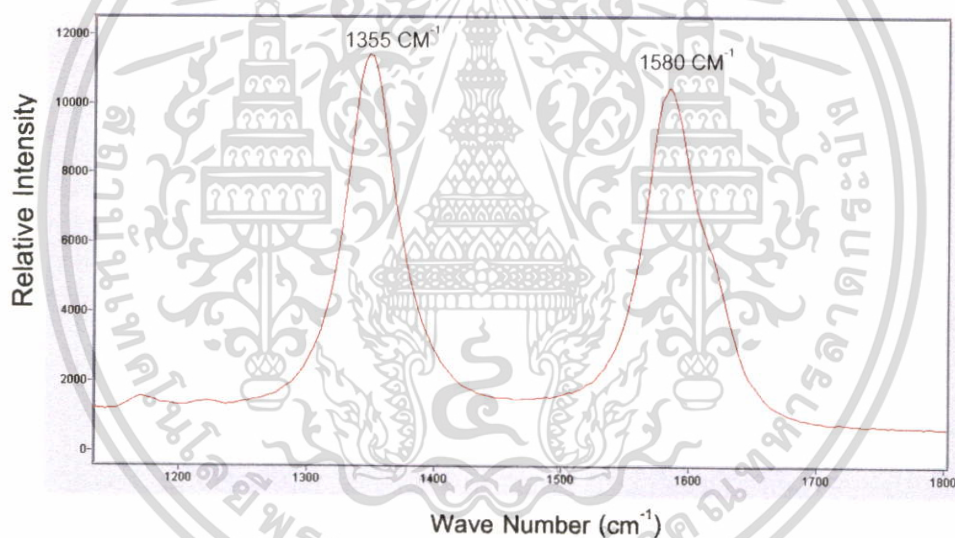
รูปที่ 5.26 Raman spectrum ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างบนฐานรองโมลิบดีนัมขณะที่ใช้อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจน 5:5

เมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 5.25 จะเห็นว่า Raman spectrum ที่ได้มียอดคลื่นอยู่ 2 ตำแหน่ง คือ 1,580 CM⁻¹ ซึ่งเป็นแกรไฟต์ ตำแหน่ง 1,355 CM⁻¹ คือ Microcrystalline graphite รูป 5.26 จะมียอดคลื่นที่ 1,140 CM⁻¹ จาก Raman Spectrum คือ Small Size Cubic Diamond โดยแสดงว่าในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีลักษณะของคาร์บอนรูปแบบ Small Size Nubuc Diamond ประปนอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 Raman Spectrum ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe
ขณะที่ใช้อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจน 1:9



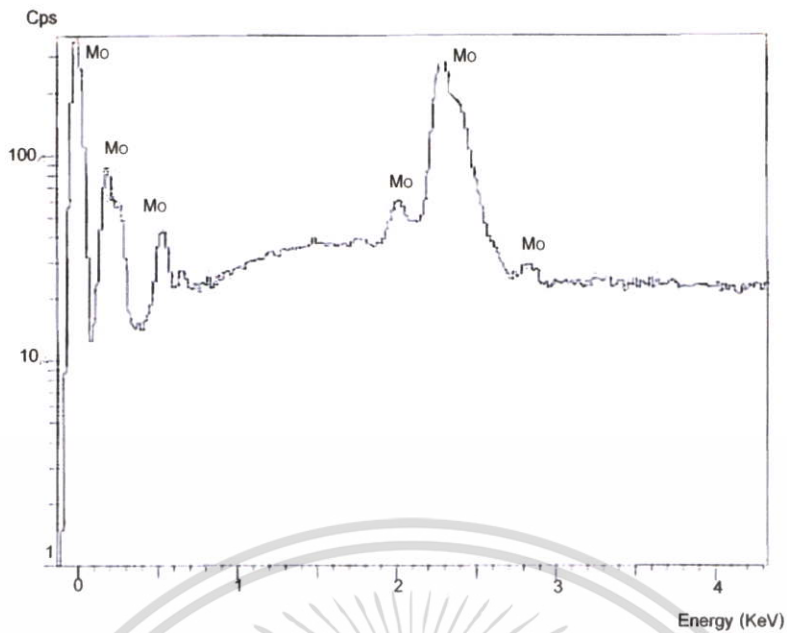
รูปที่ 5.28 Raman Spectrum ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe
ขณะที่ใช้อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจน 5:5

จากรูปที่ 5.27 และ รูปที่ 5.28 Raman spectrum ที่ได้ที่ได้จะมียอดคลื่นที่ 1580^{-1} คือ แกรไฟต์ และยอดคลื่นที่ 1355^{-1} คือ Microcrystalline graphite โดย

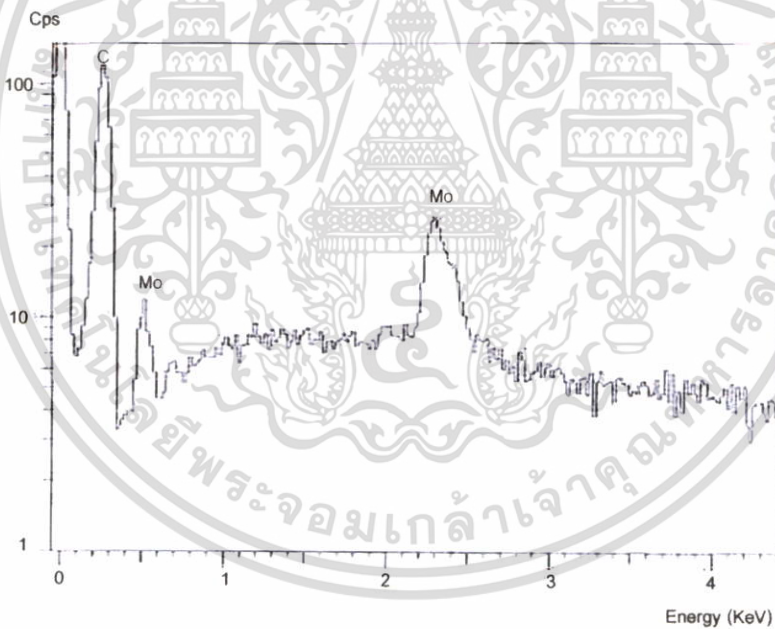
5.9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS จะนำมาตรวจสอบธาตุที่มีอยู่ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยแสดงได้ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองโมลิบดีนัมชิ้นงานก่อนการสังเคราะห์

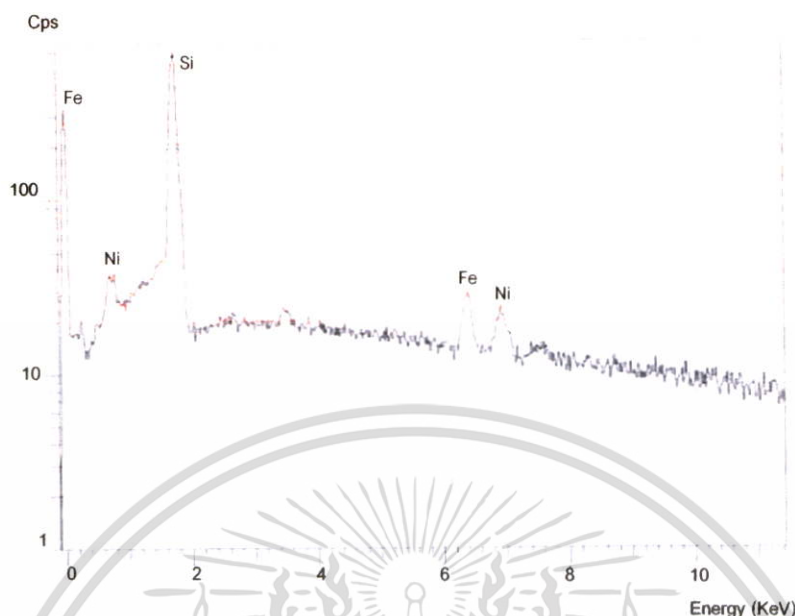


รูปที่ 5.30 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองโมลิบดีนัม ชิ้นงานหลังการสังเคราะห์

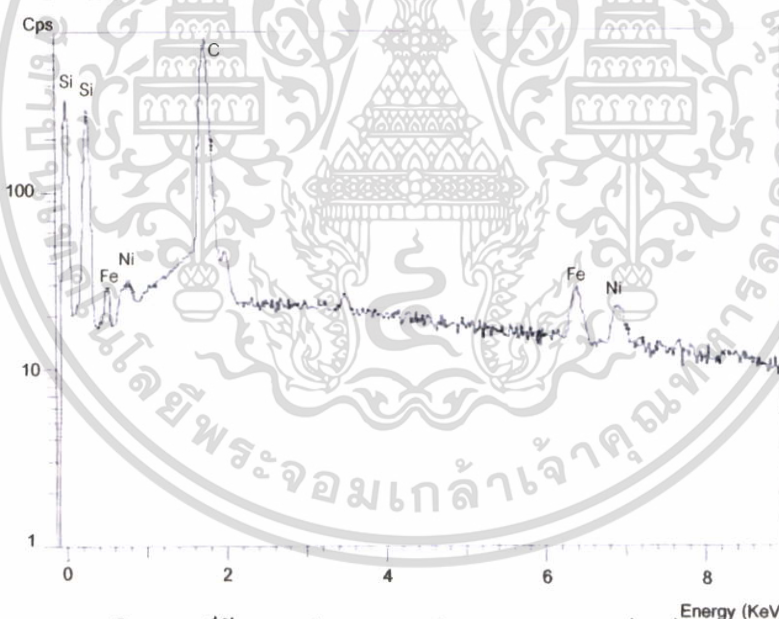
จากรูป 5.29 จากการตรวจสอบชิ้นงานก่อนการสังเคราะห์พบเป็น ธาตุโมลิบดีนัมเมื่อผ่าน ขบวนการสังเคราะห์โดยวิธี HFCVD นำชิ้นงานเดียวกัน มาตรวจสอบอีกครั้ง จากรูป 5.30 พบเป็น ธาตุคาร์บอน และ โมลิบดีนัม จากการเปรียบเทียบรูปที่ 5.29 และ รูปที่ 5.30 แสดงว่ามีคาร์บอนเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นบนฐานรองโพลีคิโน้มหลังจากการสังเคราะห์โดยคาร์บอนนาโนทิวป์เป็นรูปแบบหนึ่งของคาร์บอน



รูปที่ 5.31 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe



รูปที่ 5.32 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe

จากรูป 5.31 จากการตรวจสอบชิ้นงานก่อนการสังเคราะห์พบเป็นธาตุซิลิคอน, เหล็กและนิกเกิล เมื่อผ่านขบวนการสังเคราะห์โดยวิธี HFCVD นำชิ้นงานเดียวกันมาตรวจสอบอีกครั้ง จากรูป 5.32 พบเป็นธาตุคาร์บอน, ซิลิคอน, เหล็กและนิกเกิล แสดงว่ามีคาร์บอนเกิดขึ้นบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบ NiFe หลังจากการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์

ผลการวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆต่อไป คาร์บอนนาโนทิวป์ถูกสังเคราะห์ด้วยระบบ CVD แบบความร้อน โดยมีไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ในแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งอาจจะใช้แก๊สอื่นก็ได้เป็นแหล่งจ่าย ปฏิริยาทางเคมีถูกกระตุ้นโดยพลังงานความร้อนจากสัณหลวดทั้งสแตน ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรอง โดยฐานรองที่เหมาะสมจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการก่อตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังนั้นในงานวิจัย จึงสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรอง 3 ชนิด คือ 1 ฐานรองโมลิบดีนัม 2 ฐานรองซิลิกอนขัดมัน 3 ฐานรองซิลิกอนที่เคลือบด้วย NiFe โดยทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยเงื่อนไขเดียวกันซึ่งผลการทดลองพบว่า กรณิฐานรองโมลิบดีนัมจะสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ในช่วงอุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C โดยอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนไหลผ่านเอทิลแอลกอฮอล์ เพิ่มขึ้นจะทำให้มี CNFs และ CCFs เกิดขึ้นในการสังเคราะห์ซึ่งอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่ไหลผ่านและไม่ไหลผ่านเอทิลแอลกอฮอล์เป็น 1:9 จะได้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ไม่มีคาร์บอนไฟเบอร์ปะปน ในการทดลองบนฐานรองซิลิกอนขัดมันจะไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ส่วนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ บนฐานรอง ซิลิกอนที่เคลือบด้วย NiFe จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในช่วงที่อุณหภูมิฐานรอง 450 – 600°C โดยทุกอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนจะไม่พบ CNFs ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้เป็นเส้นยาวตรงไม่พันกัน สังเคราะห์ได้บนพื้นที่ที่มากกว่าการสังเคราะห์บนฐานรองโมลิบดีนัม โดยฐานรองโมลิบดีนัมมีขนาด 3 x 3 mm² ส่วนฐานรองซิลิกอนที่เคลือบด้วย NiFe จะมีขนาด 10 x 10 mm² ระยะเวลาในการสังเคราะห์ของฐานรองซิลิกอนที่เคลือบด้วย NiFe จะใช้เวลาเพียง 10 นาที คาร์บอนนาโนทิวป์จะเกิดเต็มพื้นที่ ส่วนในฐานรองโมลิบดีนัม จะต้องใช้เวลา 60 นาที จึงจะเกิดเต็มพื้นที่ ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM และ TEM ที่มีกำลังขยายสูงนั้นพบว่า คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้บนฐานรองโมลิบดีนัมจะได้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เป็นแบบ MWCNTs โดยมีส่วนปลายเปิดและมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 – 50 μm ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะขดพันกันส่วนการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิกอนที่เคลือบด้วย NiFe จะได้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่แบบ MWCNTs โดยมีส่วนปลายที่ปิดและมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 – 50 μm ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะเป็นเส้นเดี่ยวกระจายไม่พันกัน ซึ่งจากการนำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยเทคนิค Raman spectroscopy จะได้ Spectrum Raman ที่มี 2 ยอดคู่กัน คือ ยอดคลื่นที่ 1580 CM^{-1} ซึ่งจากตารางแสดงยอดกราฟหลักจากการวัดรูปแบบต่างๆ ของคาร์บอนด้วยเครื่อง Raman spectroscopy จะได้เป็นแกรไฟต์และมียอดคลื่นที่ 1355 CM^{-1} ซึ่งจากตารางแสดงยอดกราฟหลักเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดรูปแบบต่างๆ ของคาร์บอนด้วยเครื่อง Raman spectroscope จะได้เป็น Microcrystalline graphite

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยทั้งหมดสามารถนำไปพัฒนาในการนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากการสังเคราะห์จับตัวกันเป็นกลุ่ม การนำไปประยุกต์ใช้ต้องใช้เทคนิคที่จะทำการแยกคาร์บอนนาโนทิวป์ เช่น เทคนิค AFM จะสามารถแยกคาร์บอนนาโนทิวป์ ออกมาเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้



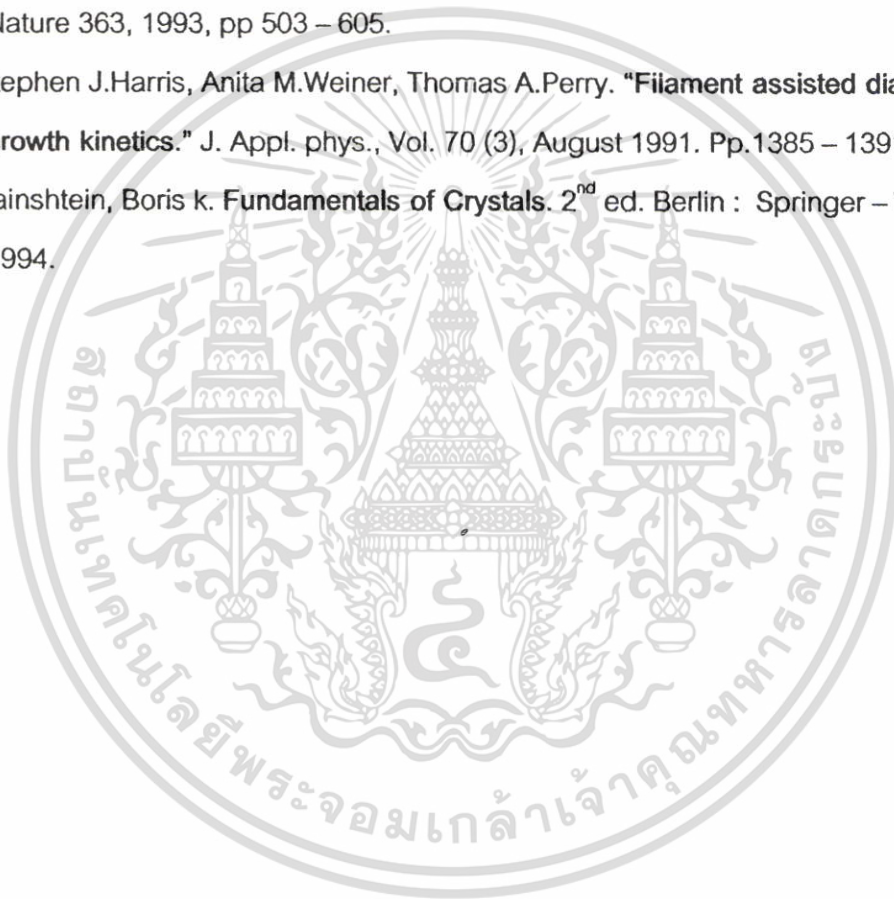
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ้างอิง

- [1] ดร.ชัชฌา ชนชยานนท์, ดร.สิริสุนทร สุโพธิณะ, ดร.จวีร์รัตน์ ประสบ, วิลลาสินี วุฒิกิรสถล, Dr.John T.H.Pearce. การประยุกต์ TEM ในงานด้านวัสดุศาสตร์ และวิศวกรรม. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
- [2] ดร.สุรัชย์ ชัยสิทธิ์ศักดิ์, ดร.ฐิติ หนูแก้ว. “งานวิจัยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยวิธี CVD ” LAB. To DAT. ปีที่ 46, สิงหาคม 2546. หน้า 14 – 20.
- [3] ทวีศักดิ์ มัญญาพันธ์, รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิตรุ่งเรือง. “การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน” วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. ปีที่ 12. ฉบับที่ 3. ธันวาคม 2547
- [4] พรศักดิ์ อรรถวานิช. วัสดุศาสตร์ พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์. พ.ศ.2536.
- [5] รศ.ดร.วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. ปฏิบัติการเร่ง. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทยญี่ปุ่น). พฤษภาคม 2547.
- [6] A. Huczko. Synthesis of aligned carbon nanotubes. Published online 30 August 2001.
- [7] Brain R Pamplin. Crystal Growth. Oxford : university of Bath Pergamon Press. 1975
- [8] C Dekker. “Carbon nanotubes as molecular quantum wires.” Physics Today. May 1999. pp 22 – 28.
- [9] Donald R. Askeland. The science and Engineering of Materials. 3rd ed. Boston : PWS Publishing company. 1987
- [10] Eileen Wilks. Properties and Applications of Diamond. Oxford : Butter worth – Heinemann. 1991
- [11] Glusker, Jenny Pickworth et al. Crystal structure Analysis For Chemists and Biologists. New York : VCH 1994.
- [12] Hidetoshi Miyashita, Takahito Ono, Phan Ngoc Minh, Masayoshi Esashi. Selective Growth of Carbon Nanotubes for Nano Electro Mech anical Device. IEEE, 2001, PP 301 – 304.
- [13] J.E Field. The Properties of Natural and Synthetic Diamond. London : Harcourt Brace Janovich Publisher. 1992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] John R. Ferraro, Kazuo Nakamoto. **Introductory Raman Spectroscopy**. London : Academic Press. Inc. 1994
- [15] Lawrence S. Pan, Dom R. Kania, **Diamond : Electronic Properties and applications**. Boston : kluwer academic Publishers. 1995.
- [16] Richard E. Smalley. **Carbon Nanotubes synthesis**. New York : massachusetts yorktown Heights. January 2001.
- [17] S. Iijima. **Helical microtubules of graphitic carbon**. Nature 345, 1991, pp 56 – 58.
- [18] S. Iijima., T. Ichihashi. **Single shell carbon nanotubes of one nanometers diameter**. Nature 363, 1993, pp 503 – 605.
- [19] Stephen J. Harris, Anita M. Weiner, Thomas A. Perry. **"Filament assisted diamond growth kinetics."** J. Appl. phys., Vol. 70 (3), August 1991. Pp.1385 – 1391.
- [20] Vainshtein, Boris k. **Fundamentals of Crystals**. 2nd ed. Berlin : Springer – Verlag. 1994.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพผนวก ก

ตารางที่ ก-1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal conductivities

Material	Conductivity (w/mk)
Carbon nanotubes	3,000 – 6,000
Diamond (Type II)	2,000
Boron nitride (theory)	1,300
Beryllium oxide	370 – 590
Water	561
Silicon carbide	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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตาราง ข – 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Young's modulus

Material	Value (N/m ²)
Carbon nanotubes	1 x 1,012
Diamond	1,000
Tungsten	340 x
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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

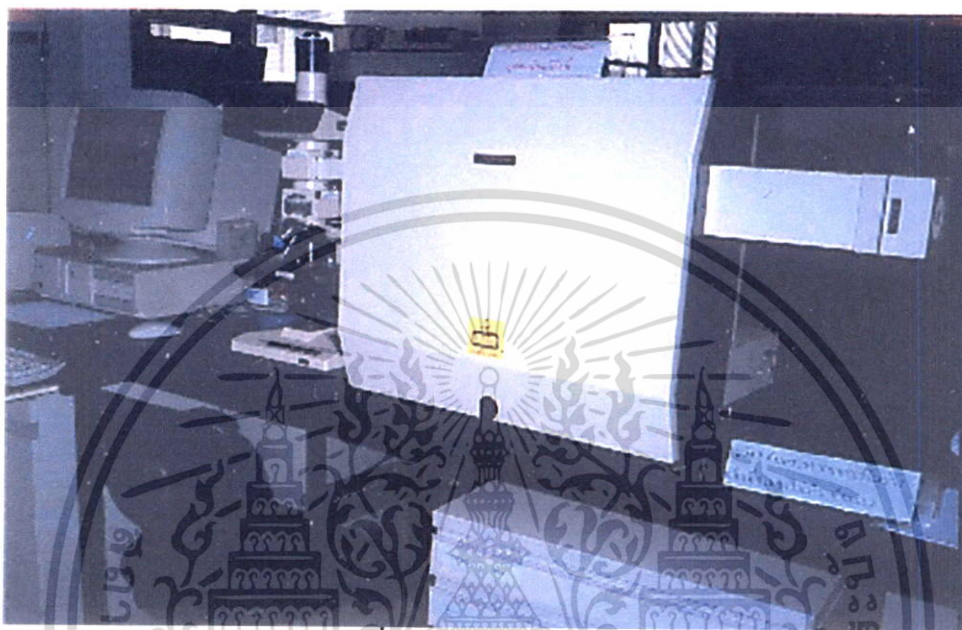
ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 สมบัติทางกายภาพของสารที่นำมาใช้เป็นฉนวนรองในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

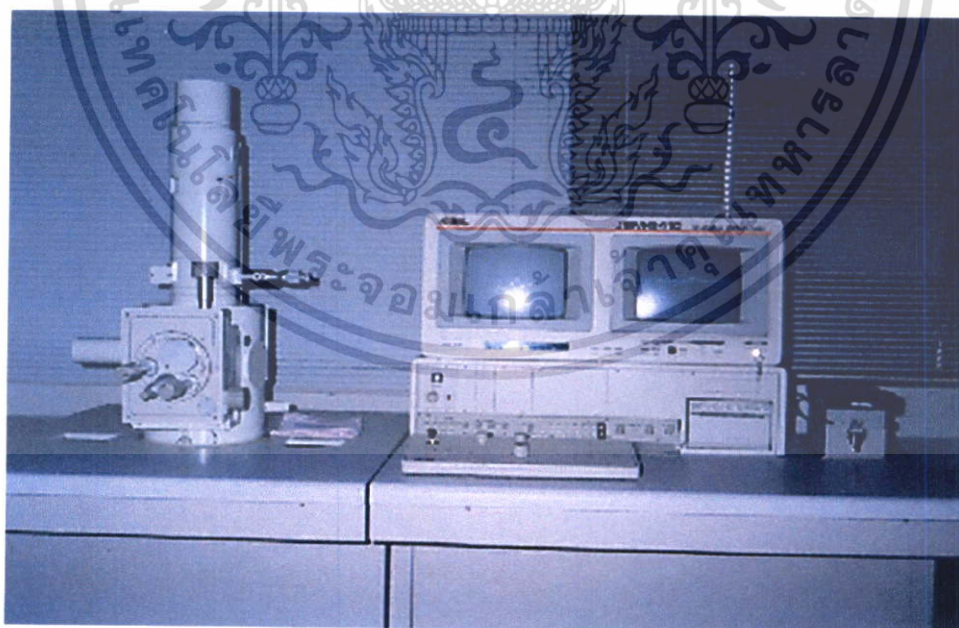
สาร	จุดหลอมเหลว (°C)	ค่าคงที่แลตทิซ (Å)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความนำความร้อน (W/cm deg)	สัมประสิทธิ์การกระจาย ความร้อน (10 ⁻⁶)	พลังงานพื้นผิว (Jm ⁻²)	ความต้านทาน (μΩcm)	ฟังก์ชันงาน (eV)
Si	1412	5.42	2.33	0.83	24	1.46(111)	3.5 x 10 ¹¹	4.1
Al	660	4.04	2.7	2038	23.8	1.085/0.939	2.45	3.74
Cu	1083	3.61	8.96	4.16	16.8	2.08(100)	1.56	4.47
Pt	1769	3.92	21.45	0.699	9.0	2.691/2.055	9.81	5.29
W	3380	3.16	19.3	1.69	4.4	3.468/2.487	4.9	4.50
Mo	2615	3.14	10.22	1.38	5.1	2.877/2.116	5.2	4.27
Au	1063	4.07	19.3	3.11	14.2	1.626/1.345	2.04	4.58

ภาคผนวก ง

เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

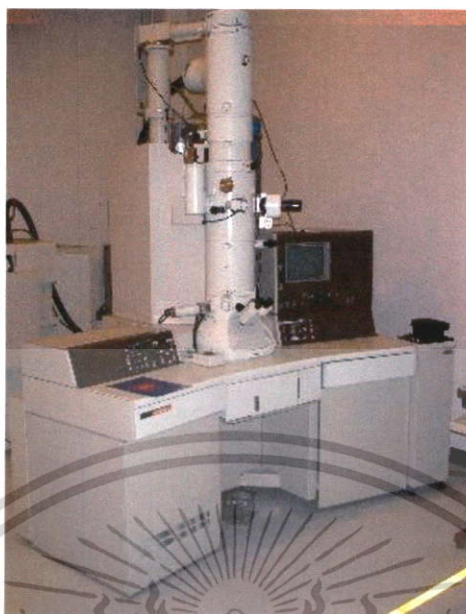


รูปที่ ง-1 Raman spectroscope



รูปที่ ง-2 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓-3 เครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน

นายทวีศักดิ์ มัญญาพันธ์

วันเดือนปีเกิด

วันที่ 13 กรกฎาคม 2517

สถานที่เกิด

จังหวัดชุมพร

วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีบัณฑิต

สถานที่สำเร็จการศึกษา

มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

ปีที่สำเร็จการศึกษา

ปีการศึกษา 2541



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้