

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว

โดยใช้วิธี MIST-CVD

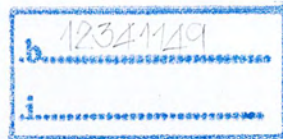
SYNTHESIS OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES

USING MIST-CVD TECHNIQUE



T117532

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 117532
วัน,เดือน,ปี..... - 5 ค.ศ. 2554



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SYNTHESIS OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES
USING MIST-CVD TECHNIQUE**



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว

โดยใช้วิธี MIST-CVD

**SYNTHESIS OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES
USING MIST-CVD TECHNIQUE**

โดย
นางสาวชนกพร ยังพะกุล รหัส 50010292
นางสาวณัฐพร ดีมา รหัส 50010478
นางสาวธิดารัตน์ บุญมี รหัส 50010691

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียวโดยใช้วิธี Mist-CVD

ผู้จัดทำ

1. นางสาวชนกพร ยังพะกุล
2. นางสาวณัฐพร ลีมา
3. นางสาวธิดารัตน์ บุญมี



(รศ.ดร.สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียวโดยใช้วิธี MIST-CVD

นางสาวชนกพร ยังพะกุล รหัส 50010292

นางสาวณัฐพร ถิมา รหัส 50010478

นางสาวธิดารัตน์ บุญมี รหัส 50010691

รศ.ดร.สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

คาร์บอนนาโนทิวป์ (CNTs) ได้สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้เทคนิค Mist-CVD ที่ความดันบรรยากาศ (1บรรยากาศ) โดยไอหมอกของเหล็ก หรือ โคบอลอะซิเตตและเอทานอล สร้างโดยเครื่อง Atomizer ที่ความถี่สูง โดยใช้โลหะและเหล็กเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ตามลำดับ โดยศึกษาถึงผลกระทบของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา , ตัวรองรับ , อัตราการไหลของก๊าซนำพา (Ar) และเวลาในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยวิเคราะห์ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และรามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

SYNTHESIS OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES USING MIST-CVD TECHNIQUE

MissChanokporn Yongpakool ID 50010292

MissNattaporn Leema ID 50010478

MissTidarat Boonmee ID 50010691

Asst.Prof.Dr. Sutichai Chaisitsak Advisor

Educational Year 2010

Abstract

Single-walled carbon nanotubes (CNTs) were synthesized using mist – CVD technique at atmospheric pressure (1 atm). In this technique the mist of $C_{10}H_{10}Fe$ or $Co(CH_3Coo)_2 \cdot 4H_2O$ and C_2H_5OH , generated by a high – frequency ultrasonic atomizer, were used as a catalyst and a carbon source, respectively. The effects of various parameters including types of catalyst of supporter, flow rate of carrier gas (Ar) and concentrations synthesis time on the formation of CNTs was investigation, using scanning electron microscope (SEM) and Raman spectroscopy.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการ เรื่อง การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียวโดยใช้วิธี MIST-CVD ต้องขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สุรัชย์ ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้ กำลังใจ คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการนี้ ทำให้การทำโครงการชิ้นนี้ประสบความสำเร็จดังหวัง ขอกราบขอบพระคุณ นักศึกษาปริญญาโททุกท่าน โดยเฉพาะ นายจ่านง บุญลอย และนายโสรัจ บัวศรีแก้ว ที่ช่วยให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี และเพื่อนนักศึกษาปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในหลายๆด้าน

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติ พี่ น้องของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจทางด้านการเรียนมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำโครงการชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาบัตรฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ผู้จัดทำ

นางสาวชนกพร ยังพะกุล

นางสาวณัฐพร ถีมา

นางสาวธิดารัตน์ บุญมี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 พื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานของท่อนาโนคาร์บอน	4
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวป์	4
2.1.1 การค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์	4
2.1.2 รูปแบบของคาร์บอน	5
2.1.3 โครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์	7
2.1.3.1 แบบมีผนังชั้นเดียวหรือผนังเดี่ยว (SWCNTs)	9
2.1.3.2 แบบที่เป็นผนังหลายชั้น (MWCNTs)	9
2.1.4 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์	10
2.1.5 การใช้ประโยชน์ของคาร์บอนนาโนทิวป์	12
2.2 การสังเคราะห์และเทคนิคในการผลิตคาร์บอนนาโนทิวป์	13
2.2.1 อาร์คดิสชาร์จ (Arc-discharge)	13
2.2.2 ระเหยด้วยเลเซอร์ (Pulsed-Laser vaporization)	14
2.2.3 ตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition)	14
2.2.3.1 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD	15
2.2.3.1.1 แบบ Hot filament enhance Chemical vapor deposition	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.3.1.2 แบบ Vapor phase growth	16
2.2.3.1.3 แบบ High pressure CO disproportionate process	17
2.2.3.1.4 แบบ Plasma enhanced chemical vapor deposition	18
2.2.3.1.5 แบบ Thermal chemical vapor deposition	19
2.3 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	22
2.3.1 Base Growth	22
2.3.2 Tip Growth	22
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา(Catalyst)	23
2.4.1 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา	23
2.4.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา	24
2.5 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	27
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope)	28
2.5.1.1 ประเภทและการนำไปใช้งานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	29
2.5.1.2 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM	31
2.5.1.3 ระบบการทำงานของ SEM	31
2.5.2 วิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโกปี	32
2.5.2.1 ระบบการทำงานของ Raman Spectroscopy	33
2.5.2.2 การประยุกต์ใช้วัดคาร์บอนนาโนทิวป์	34
2.5.2.3 Radial Breathing Mode (RBM)	35
2.5.2.4 G-band	37
2.5.2.5 D-band และ G'-band	39
บทที่ 3 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	41
3.1 ปัจจัยในการศึกษาเพื่อสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	41
3.1.1 ศึกษาปัจจัยการเติมตัวรองรับ (Supporter)	41
3.1.2 ศึกษาอัตราการไหลของก๊าซนำพา (Ar)	42
3.1.3 ศึกษาทดลองเปลี่ยนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็น Co	42
3.1.4 ศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ	43
3.1.5 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยเทคนิค Floating catalysts	44
3.2.1 การเตรียมฐานรองชนิดคอน	44
3.2.2 การเตรียมสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน	44
3.2.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	45
3.3 ทดสอบความเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์และศึกษาคุณสมบัติ	47
3.3.1 การวิเคราะห์ด้วย SEM	47
3.3.2 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy	47
บทที่ 4 ผลการทดลอง	48
4.1 ศึกษาปัจจัยการเติมตัวรองรับ (Supporter)	48
4.2 ศึกษาอัตราการใช้ของก๊าซนำพา(Ar)	51
4.3 ศึกษาทดลองเปลี่ยนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็น Co	52
4.4 ศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ	55
4.5 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา	58
4.6 สรุปปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์	60
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	61
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 สรุปวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ 3 วิธี	21
ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของ Ferrocene	25
ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของ Cobalt Acetate	26
ตารางที่ 3.1 ศึกษาปัจจัยการเติมตัวรองรับ (Supporter)	41
ตารางที่ 3.2 ศึกษาอัตราการไหลของก๊าซนำพา (Ar)	42
ตารางที่ 3.3 ศึกษาทดลองเปลี่ยน โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็น Co	42
ตารางที่ 3.4 ศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ	43
ตารางที่ 3.5 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา	43
ตารางที่ 4.1 ศึกษาปัจจัยการเติมตัวรองรับ (Supporter)	48
ตารางที่ 4.2 ศึกษาอัตราการไหลของก๊าซนำพา (Ar)	51
ตารางที่ 4.3 ศึกษาทดลองเปลี่ยน โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็น Co	52
ตารางที่ 4.4 ศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ	55
ตารางที่ 4.5 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา	58
ตารางที่ 4.6 ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์	60

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์	4
รูปที่ 2.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ที่พบโดย NEC	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเพชร	6
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของกราไฟต์	6
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของคาร์บอนหกสปี (C ₆₀)	7
รูปที่ 2.6 คาร์บอนนาโนทิวป์	7
รูปที่ 2.7 การม้วนตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์	8
รูปที่ 2.8 โครงสร้างคาร์บอนแบบ armchair, zigzag และ chiral	8
รูปที่ 2.9 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังเดี่ยว	9
รูปที่ 2.10 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (MWCNTs)	9
รูปที่ 2.11 รูปแบบต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวป์	10
รูปที่ 2.12 แสดงวิธีอาร์คคิซาร์จ	13
รูปที่ 2.13 แสดงวิธีระเหยด้วยเลเซอร์	14
รูปที่ 2.14 แสดงวิธีการตกสะสมไอเคมี	15
รูปที่ 2.15 ระบบ Hot-filament enhance Chemical vapor deposition	15
รูปที่ 2.16 ระบบ Vapor phase growth	16
รูปที่ 2.17 High pressure CO disproportionate process	17
รูปที่ 2.18 Plasma enhanced chemical vapor deposition	18
รูปที่ 2.19 ระบบ Thermal chemical vapor deposition	20
รูปที่ 2.20 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์	23
รูปที่ 2.21 Ferrocene	24
รูปที่ 2.22 Cobalt Acetate	25
รูปที่ 2.23 ฟงอะลูมินา	27
รูปที่ 2.24 ฟง Aluminium acetylacetonate	27
รูปที่ 2.25 แผนภาพการทำงานของ TEM และ SEM	29
รูปที่ 2.26 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
รูปที่ 2.27 ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยายต่างๆกัน	32
รูปที่ 2.28 เทคนิค Raman Spectroscopy	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.29 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering	33
รูปที่ 2.30 ตัวอย่างกราฟความถี่รามานแสดง โหมดต่างๆ	35
รูปที่ 2.31 แบบจำลองการสั่นของอะตอมคาร์บอนสำหรับ (ก) โหมด RBM และ (ข) โหมด G-band	36
รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่รามานในโหมด RBM (ω_{RBM}) กับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ (d)	36
รูปที่ 2.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ω_G^- และ ω_G^+ กับ ขนาดของนาโนทิวป์ สำหรับ SWCNTs	38
รูปที่ 3.1 แผ่นซิลิกอนทำหน้าที่เป็นฐานรอง	44
รูปที่ 3.2 การเตรียมสารเคมี	44
รูปที่ 3.3 นำสารเคมีที่ได้ไป Ultrasonic	45
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	45
รูปที่ 3.5 กระบวนการไล่อากาศออกจากระบบ	46
รูปที่ 3.6 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	47
รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	47
รูปที่ 3.8 เทคนิค Raman Spectroscopy	47
รูปที่ 4.1.1 (ก) : F39 กำลังขยาย 20K	48
(ข) : F39 กำลังขยาย 100K	48
รูปที่ 4.1.2 (ก) : S11-Fr1 กำลังขยาย 10K	49
(ข) : S11-Fr1 กำลังขยาย 30K	49
รูปที่ 4.1.3 (ก) : FAI33 กำลังขยาย 20K	49
(ข) : FAI33 กำลังขยาย 100K	49
รูปที่ 4.1.4 (ก) : AIS15-NR กำลังขยาย 3.50K	50
(ข) : AIS15-NR (EDX) กำลังขยาย 100K	50
(ค) : กราฟแสดงปริมาณสารเคมีที่พบ	50

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ง) : แสดงตารางของปริมาณสาร	50
รูปที่ 4.2.1 (ก): S10-Fr0.5 กำลังขยาย 30 K	51
(ข): S10-Fr0.5 กำลังขยาย 50 K	51
รูปที่ 4.2.2 (ก) : S11-Fr1 กำลังขยาย 10K	51
(ข) : S11-Fr1 กำลังขยาย 30K	51
รูปที่ 4.2.3 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อศึกษาอัตราการใช้ของก๊าซนำพา (Ar)	
(ก) : ความถี่ RBM	52
(ข) : ความถี่สูง	52
รูปที่ 4.3.1 (ก) : S11-Fr1 กำลังขยาย 10K	52
(ข) : S11-Fr1 กำลังขยาย 30K	52
รูปที่ 4.3.2 (ก) : CoS19-N1 กำลังขยาย 10K	53
(ข): CoS19-N1 กำลังขยาย 30 K	53
รูปที่ 4.3.3 (ก) : CoS13-N1กำลังขยาย 10K	53
(ข): CoS13-N1 กำลังขยาย 50 K	53
รูปที่ 4.3.4 (ก) : CoS16-N1กำลังขยาย 10K	54
(ข): CoS16-N1 กำลังขยาย 50 K	54
รูปที่ 4.3.5 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อศึกษาทดลองเปลี่ยนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็น Co	
(ก) : ความถี่ RBM	54
(ข) : ความถี่สูง	54
รูปที่ 4.4.1 (ก) : S11-Fr1 กำลังขยาย 10K	55
(ข) : S11-Fr1 กำลังขยาย 30K	55
รูปที่ 4.4.2 (ก): FAS8-N0.2 กำลังขยาย 10K	55
(ข): FAS8-N0.2 กำลังขยาย 30K	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.4.3 (ก): FS24-Fr0.5 กำลังขยาย 10K	56
(ข): FS24-Fr0.5 กำลังขยาย 30K	56
รูปที่ 4.4.4 (ก): FAIS27-Fr0.5 กำลังขยาย 10K	56
(ข): FAIS27-Fr0.5 กำลังขยาย 30K	56
รูปที่ 4.4.5 (ก): FAIS28-Fr0.5 กำลังขยาย 10K	57
(ข): FAIS28-Fr0.5 กำลังขยาย 30K	57
รูปที่ 4.4.6 มาตรฐานสเปคตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์เมื่อศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ	
(ก) : ความถี่ RBM	57
(ข) : ความถี่สูง	57
รูปที่ 4.5.1 (ก) : S11-Fr1 กำลังขยาย 10K	58
(ข) : S11-Fr1 กำลังขยาย 30K	58
รูปที่ 4.5.2 (ก): FAS26-Fr1 กำลังขยาย 10K	58
(ข): FAS26-Fr1 กำลังขยาย 30K	58
รูปที่ 4.5.3 มาตรฐานสเปคตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์เมื่อศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา	
(ก) : ความถี่ RBM	59
(ข) : ความถี่สูง	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของโครงการ

ตั้งแต่ที่ได้มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotubes : CNTs) ในปี ค.ศ. 1991 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CNTs ไม่ว่าจะเป็นชนิดผนังเดี่ยว (Single-walled CNTs : SWCNTs) หรือชนิดหลายผนัง (Multi-walled CNTs: MWCNTs) ซึ่งเป็นโครงสร้างนาโนที่เป็นวัสดุสังเคราะห์ ได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลก มีการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติอันโดดเด่นในหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กหลายเท่า สามารถนำไฟฟ้าได้ดี หรือเป็นสารกึ่งตัวนำก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางของแนวการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งปัจจุบันสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่นในอิเล็กทรอนิกส์ ถูกใช้เป็นสายไฟจิ๋วในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ระดับนาโน หรือถูกใช้เป็นทรานซิสเตอร์หรือเป็นฟิล์มบาง โปร่งแสงนำไฟฟ้าเป็นก๊าส เป็นต้น จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจในการ์บอนนาโนทิวป์เป็นอย่างมาก ปัจจุบันวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์นั้นสามารถทำได้ 3 วิธีหลักๆ คือ 1.การอาร์คดิสชาร์จ (Arc-discharge) 2.การระเหยด้วยเลเซอร์(Laser vaporization) และ 3.การตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition : CVD) สำหรับโครงการนี้ได้เลือกใช้สังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยกรรมวิธี Chemical Vapor Deposition : CVD เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ไม่ยากและประหยัดค่าใช้จ่าย สามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นเป็นรูปแบบตามที่เราต้องการได้ อีกทั้งสามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่น และเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์เชิงพาณิชย์ โดยวิธี CVD เป็นเทคโนโลยีสำหรับการเคลือบผิววัตถุ เพื่อให้วัตถุนั้นมีความคงทน แข็งแกร่ง และเหนียวขึ้น โดยใช้ก๊าสไปทำปฏิกิริยากับไอของวัตถุ เมื่อไอทั้งสองทำปฏิกิริยากัน จะเกิดการตกผลึกของสารบนผิววัตถุนั้น และเกิดการก่อรูปขึ้นบนผิววัตถุ

ในโครงการนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เป็นชนิดผนังชั้นเดียว ในปริมาณมาก ด้วยวิธี CVD เพื่อให้การประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ เป็นไปได้จริงในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1 เพื่อศึกษาหาวิธีการสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว (SWNTs) ด้วยวิธีการ Mist-CVD โดยเทคนิค Floating Catalyst
- 2 เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์
- 3 เพื่อศึกษาผลการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์โดยการเติมตัวรองรับ อลูมิเนียมออกไซด์

1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว (SWNTs) เริ่มต้นจากการศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว ด้วยวิธี Mist-CVD ซึ่งโครงการนี้จะศึกษาเทคนิคการสร้างแบบ Floating โดยศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา, การเติมตัวรองรับ, อัตราการไหลของก๊าซนำพา(Ar), เวลาในการทำปฏิกิริยา เพื่อให้ได้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน จุดเด่นของวิธี CVD แบบ Floating catalyst คือ การป้อนละอองหมอกของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ ให้ระบบ CVD ด้วยเครื่องทำละอองหมอก ที่ความถี่สูง ทำให้สามารถได้ละอองหมอกขนาดเล็ก และสม่ำเสมอ จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการทำ CVD เรียบร้อยแล้ว มาเก็บเอาเป็นตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopes : SEM) เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานว่าเงื่อนไขใดที่เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ และวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีรามาน (Raman Spectroscopy) เพื่อศึกษาขนาดและชนิดของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ และนำผลที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์เป็นชนิดผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotube)

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

- 1 ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ และชนิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ทั้งชนิดผนังชั้นเดียวและผนังหลายชั้น
- 2 ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD
- 3 ทดลองสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ แบบใช้แอลกอฮอล์ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ ทำเป็นหมอกไปทำปฏิกิริยาตกลงบนฐานรอง และเก็บตัวอย่างชิ้นงานที่ทำบางเงื่อนไขไปดูไปศึกษาด้วยเครื่อง SEM
- 4 นำชิ้นงานที่ผ่านการ SEM แล้วมาวิเคราะห์ด้วย เครื่อง RAMAN
- 5 นำผลการทดลองที่ได้ทุกเงื่อนไขมาวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่ดีที่สุด

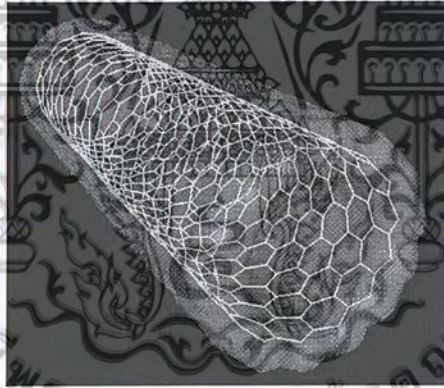
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 เรียนรู้ถึงทฤษฎีของคาร์บอนนาโนทิวป์
- 2 เรียนรู้ถึงหลักการการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Mist-CVD
- 3 สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียวได้

บทที่ 2

พื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานของคาร์บอนนาโนทิวป์

ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes, CNTs) เป็นโมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของโครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดเล็ก สร้างมาจากวัสดุที่เป็นธาตุพื้นฐานก็คือ คาร์บอน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดังกล่าวอยู่ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) และมีความยาวถึงประมาณ 10 ไมโครเมตร คาร์บอนนาโนทิวป์จึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่า มีคุณสมบัติที่แข็งแกร่งกว่าเหล็กกล้า แต่ในขณะเดียวกันก็มีความยืดหยุ่นและน้ำหนักเบา สมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญอย่างมากของคาร์บอนนาโนทิวป์คือ ความสามารถในการเป็นตัวนำหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้า และยังสามารถนำความร้อนที่ดีอีกด้วย จึงทำให้เกิดความคิดในการนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปใช้ประโยชน์ในงานหลายประเภท เช่น การทำชิปในเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำสายเคเบิล อุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออุปกรณ์วัดระดับสารเคมี เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์

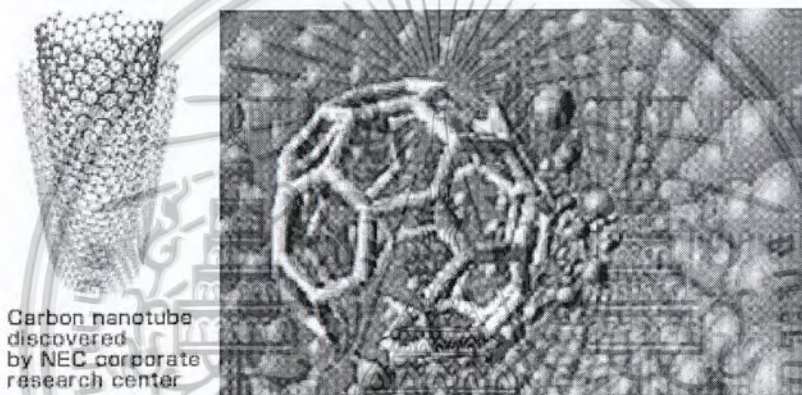
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวป์

2.1.1 การค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์

การค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์ครั้งแรกนั้นเกิดขึ้นด้วยความบังเอิญในปี ค.ศ. 1991 ภายหลังจากการค้นพบฟูลเลอร์รีน 6 ปี โดยนักวิจัยของบริษัท เอ็นอีซี (NEC) ในห้องทดลองที่เมืองสึคุบา (Tsukuba) ประเทศญี่ปุ่น ชื่อ ซุมิโอะ อิจิม่า (Sumio Iijima) ขณะที่เขาใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมากตรวจสอบเขม่าสีดำที่ได้จากการเตรียมฟูลเลอร์รีนจากกระบวนการยิงด้วยอิเล็กตรอน (electron arc discharge) แล้วสังเกตเห็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับรากไม้ เป็นเส้นยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บาง และจับกันอยู่เป็นกลุ่ม แต่ที่น่าสนใจคือ วัสดุนี้มีโครงสร้างของอะตอมที่เป็นระเบียบและสมมาตร ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบครั้งแรกนั้นคือท่อชนิดผนังหลายชั้น จากนั้นในปี ค.ศ. 1993 อิจิมาและนักวิจัยของบริษัทไอบีเอ็ม (IBM) ชื่อ คอน เบทูน (Don Bethune) ได้นำเสนอรายงานวิจัยว่าสามารถสร้างท่อนาโนผนังชั้นเดียวได้ โดยการเติมโลหะเร่งปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อยในระหว่างการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อป้องกันการม้วนตัวด้วยตัวเองของแผ่นแกรไฟต์ และป้องกันการเกิดเป็นฟูลเลอร์รีนขนาดเล็ก จากนั้นท่อนาโนของคาร์บอนก็ได้รับความสนใจศึกษามากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างท่อนาโนคาร์บอนให้มีขนาดและคุณสมบัติตามที่ต้องการ รวมทั้งการนำท่อนาโนไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆอีกด้วย



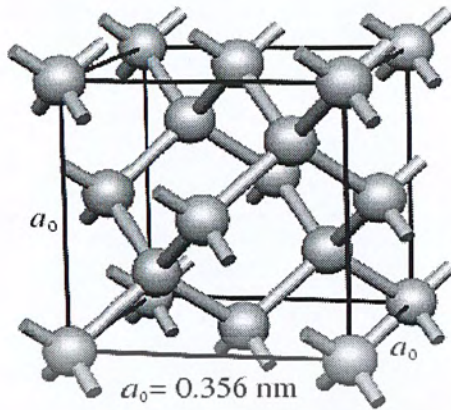
รูปที่ 2.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ที่พบโดย NEC

2.1.2 รูปแบบของคาร์บอน

โมเลกุลของคาร์บอนนาโนทิวป์ ประกอบขึ้นจากราตุคาร์บอนเช่นเดียวกับเพชร แกรไฟต์ (graphite) เต้าถ่าน และบอลนาโนคาร์บอนหรือฟูลเลอร์รีน (Fullerene, C₆₀ หรือ C₇₀) แต่มีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ คาร์บอนเป็นธาตุที่มีลักษณะพิเศษสามารถพบได้ใน หลายๆ รูปแบบโครงสร้าง (allotropic forms) ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิดหลักๆ ดังนี้

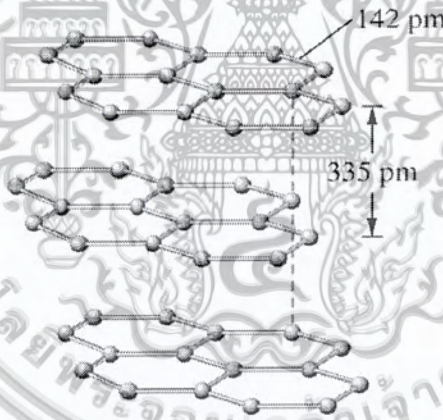
1. แบบมีโครงสร้างแข็งแรงทั้งสามมิติ โดยที่อะตอมของ คาร์บอนทั้งหมดจะเกาะยึดด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) อย่างเดียวกับที่พบได้ในรูปของอัญมณีราคาแพง คือเพชร ซึ่งมีความสวยงามและมีความแข็งที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



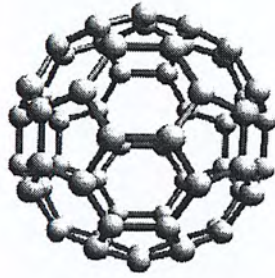
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเพชร

2. แบบมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ หรือเป็นแผ่นสองมิติที่วาง ซ้อนทับและยึดระหว่างชั้นเข้าด้วยกันด้วยแรงที่ต่ำกว่า คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) พบว่าเป็นโครงสร้างของแกรไฟต์ เช่น ไม้ดินสอดที่เราใช้จกกันดี



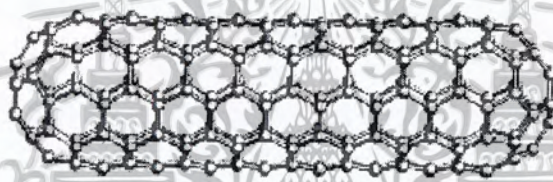
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของกราไฟต์

3. แบบมีโครงสร้างเป็นก้อนขนาดเล็ก จนอาจถือว่าเป็น จุดที่ไม่มีมิติหรือศูนย์มิติ เรียกว่า “ฟูลเลอรีนส์ (fullerenes)” ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบเป็นคาร์บอนหกสิบ (C₆₀) ที่แต่ละ โมเลกุลจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้งหมด 60 อะตอม มาจับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ แล้วได้รูปทรงเป็นแบบก้อนทรงกลมกลวงคล้ายๆ ลูกตะกร้อหรือลูกบอลขนาดจิ๋ว



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของคาร์บอนหกสิบ (C_{60})

4. แบบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นม้วนตัวเป็นท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมากเลยทำให้ดูเหมือนเป็น เส้นยาวๆ ในแนวหนึ่งมิติ เรียกว่า “คาร์บอนนาโนทิวป์” ซึ่งเป็นโครงสร้างของคาร์บอนแบบใหม่ที่เพิ่งค้นพบดังกล่าว



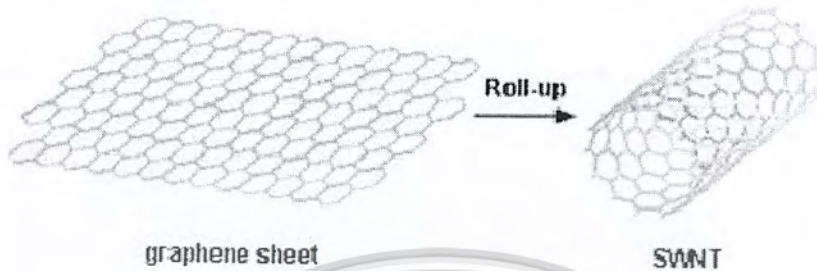
รูปที่ 2.6 คาร์บอนนาโนทิวป์

2.1.3 โครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์

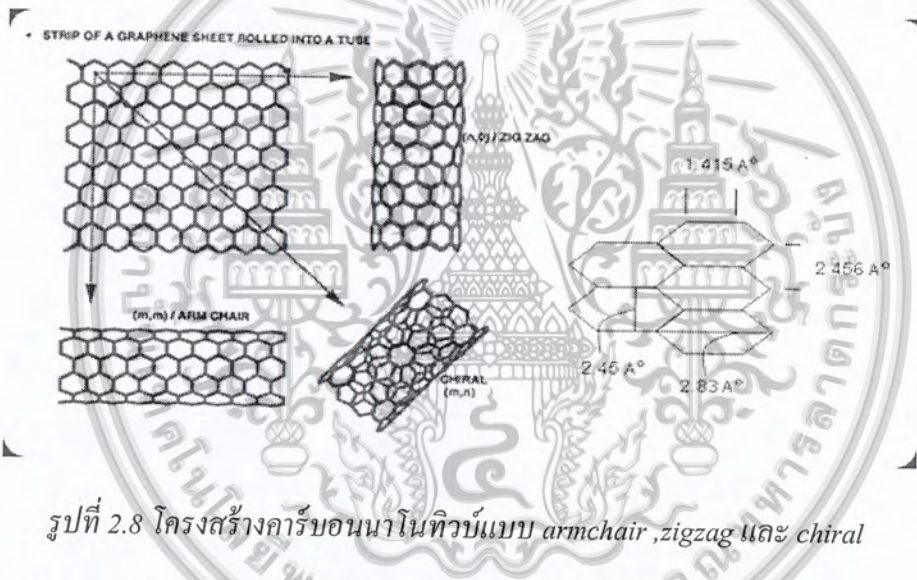
สำหรับโครงสร้างของนั้นมีโครงสร้างเป็นแบบ โมเลกุลเดี่ยวที่มีลักษณะเป็นแถวยาวของคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นแนวขนาบซ้ายขวาของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคาร์บอนเป็นท่อที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร โดยเป็นท่อที่สังเคราะห์ขึ้นมาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ในช่วงระหว่าง 0.4-4.0 นาโนเมตรเท่านั้น และสามารถสังเคราะห์ได้โครงสร้างที่มีความยาวได้ถึง 10 ไมโครเมตร ซึ่งโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์จะคล้ายกับแผ่นแกรไฟต์เพียง 1 แผ่นที่ม้วนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวงเรียงกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกัน เรียกว่า แผ่นกราฟีน คาร์บอนนาโนทิวป์จึงมีผนังของอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงพันธะ โคเวเลนต์ระหว่างอะตอมเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมเช่นเดียวกับแกรไฟต์ และอาจมีบริเวณปลายของท่อปิดด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายครึ่งหนึ่งของฟูลเลอร์รีนซึ่งการม้วนแผ่นแกรไฟต์จะม้วนได้ 3 แบบคือ โครงสร้างท่อแบบ armchair ที่เกิดจากการม้วนแผ่นแกรไฟต์ตามแนวสมมาตรแกนตั้ง โครงสร้างท่อแบบ zigzag ที่เกิดจากการม้วนแผ่นแกรไฟต์ตามแนวสมมาตรแกนนอน และ โครงสร้างท่อแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

chiral ที่เกิดจากการม้วนแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดอื่นๆ ต่างจากสองแบบแรก โดยจะได้ท่อนาโนที่มีลักษณะที่ต่างกันซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์อาจมีผนังซ้อนกันได้มากกว่าชั้น



รูปที่ 2.7 การม้วนตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์

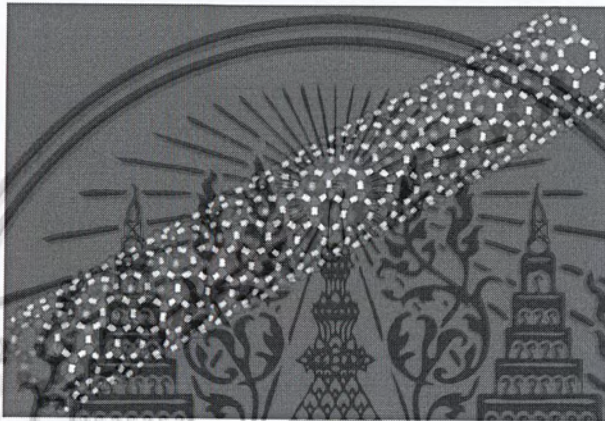


รูปที่ 2.8 โครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ armchair, zigzag และ chiral

คาร์บอนนาโนทิวป์ อาจแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักๆ ตาม จำนวนชั้นของผนังท่อคือ ถ้าท่อมีผนังชั้นเดียวจะเรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (Single-Walled Carbon Nanotubes : SWCNTs) ส่วนท่อที่มีผนังหลายชั้นจะเรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (Multiple-Walled Carbon Nanotubes : MWCNTs) ส่วนใหญ่ขนาดของ ท่อที่สังเคราะห์ได้พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณตั้งแต่ 0.4 นาโนเมตรไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร และมีความยาวตั้งแต่ระดับนาโนเมตรไปจนถึงหลายเซนติเมตร และเป็นที่น่าสังเกตว่าในกรณีคาร์บอนนาโนทิวป์แบบมีผนังหลายชั้นนั้น ระยะห่างระหว่างแต่ละชั้นจะเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร ซึ่งระยะนี้มีค่าประมาณระยะห่างระหว่างชั้นของกราฟไฟท์

2.1.3.1 แบบมีผนังชั้นเดียวหรือผนังเดี่ยว (Single-Walled Carbon Nanotubes : SWCNTs)

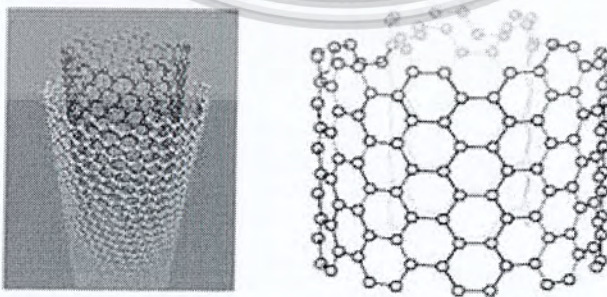
จะมีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกับแผ่นกราฟไฟท์มีวนเป็นท่อทรงกระบอกกลวง มีอะตอมคาร์บอนจัดเรียงพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม โดยท่อขนาดนาโนนี้สามารถเป็นได้ทั้งแบบท่อปลายเปิดหรือปลายปิด (Cap) ถ้าเป็นแบบปลายปิดจะครอบด้วยครึ่งทรงกลมของฟูลเลอร์ C₆₀ ขนาดของท่อสำหรับ SWCNTs มีตั้งแต่ 0.7 ถึง 2 นาโนเมตร



รูปที่ 2.9 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังเดี่ยว

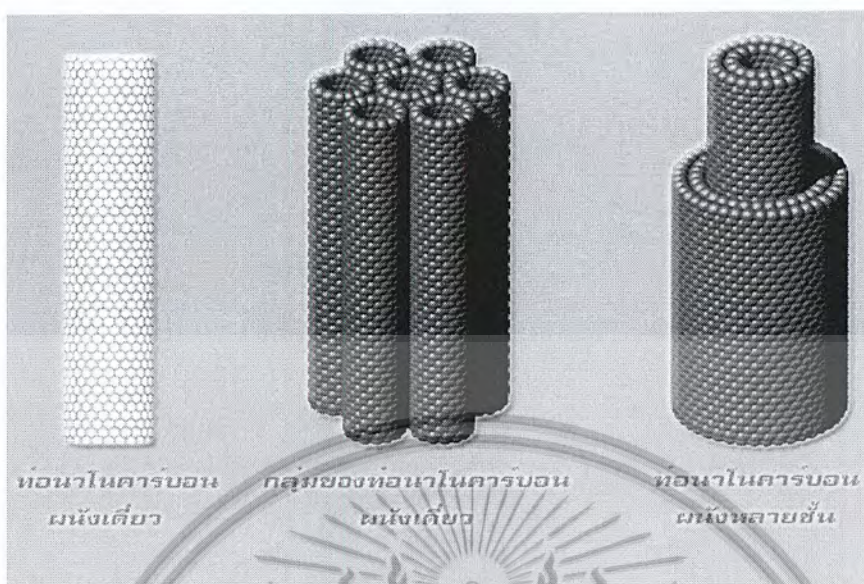
2.1.3.2 แบบที่เป็นผนังหลายชั้น (Multiple-Walled Carbon Nanotube : MWCNTs)

มีลักษณะเป็นท่อกราฟไฟท์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-10 นาโนเมตร และมีความยาวในช่วง 1 ไมโครเมตรซ้อนกัน 2-50 ชั้น โดย MWNTs มีขนาดระหว่าง 10 ถึง 300 นาโนเมตร โดยมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.34 ถึง 0.36 นาโนเมตร



รูปที่ 2.10 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (MWCNTs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 รูปแบบต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวป์

2.1.4 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์

คุณสมบัติเชิงกลที่พิเศษของคาร์บอนนาโนทิวป์ คือเป็น โครงสร้างนาโนที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และมีความยืดหยุ่นอย่างมาก ท่อนาโนคาร์บอนมีพื้นที่ผิวได้ถึง 1500 ตารางเมตรต่อกรัม(m^2/g) มีความหนาแน่น 1.33-1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร(g/cm^3) โดยจากการศึกษาของเหล่านักวิทยาศาสตร์ และได้กล่าวไว้ว่าคาร์บอนนาโนทิวป์นี้เป็น โครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กเกินกว่า 60 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่เท่ากัน อีกทั้งเป็น โครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น(Young's modulus of elasticity) ของคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่าสูงถึง 1 เทอราปาสคาล (Tpa)หรือ 1000 กิกะปาสคาล (Gpa) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสามารถทนต่อแรงดึงได้มากกว่าเหล็กถึง 20 เท่า จึงได้มีการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในผลิตภัณฑ์หลายชนิด อย่างเช่น อุปกรณ์กีฬา กอล์ฟและเทนนิส เป็นต้น (และมีแนวโน้มในการใช้ผลิตเป็น โครงสร้างของเครื่องบินอีกด้วย)

คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับคาร์บอนนาโนทิวป์ คือสามารถเป็นได้ทั้ง สารกึ่งตัวนำหรือเซมิคอนดักเตอร์ และเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือซูเปอร์คอนดักเตอร์ (คือตัวนำที่ไม่มีแรงต้านไฟฟ้าเลย) โดยมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มัดหนึ่งของคาร์บอนนาโนทิวป์สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 109 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm^2) ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง $10^6 A/cm^2$ โดยขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนังของท่อ สัดส่วนของค้ประกอบ และวัตถุนิดอื่นที่ผสมลงไปในโครงสร้างท่อนาโน และเนื่องด้วยเป็นโครงสร้างที่เล็กมากในระดับนาโน คาร์บอนนาโนทิวป์ จึงมีคุณสมบัติควอนตัม คือสามารถควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนแบบไม่ต่อเนื่อง โดยอาจจะสามารถควบคุมการไหลที่ละกลุ่มของอิเล็กตรอน หรือควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทีละตัวได้ จึงได้มีการนำมาใช้งานในการผลิตเป็นทรานซิสเตอร์ที่มีความเร็วสูงและมีความต้านทานต่ำมาก และมีการนำมาพัฒนาในการสร้างเกทพื้นฐานเชิงตรรกะ (logic gate) ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างระบบของคอมพิวเตอร์นาโน รวมทั้งมีการพัฒนาที่จะนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปใช้แทนโลหะ ในส่วนที่เป็นขั้วในตัวหลอดสำหรับจ่ายลำอิเล็กตรอนในการประดิษฐ์จอภาพแบบรังสีแคโทด ที่ใช้ในจอทีวี หรือจอคอมพิวเตอร์ ด้วยคุณสมบัติที่เหนือกว่าคือสามารถให้ความสม่ำเสมอ ให้ปริมาณที่เพียงพอ และมีอายุการใช้งานของการจ่ายอิเล็กตรอนนานกว่า นอกจากนี้แล้วยังไม่จำเป็นต้องใช้ในสุญญากาศ และยังเป็นการประหยัดพลังงาน เนื่องจากสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่จำเป็นต้องเผาไส้หลอดให้แดง อย่างกรณีการใช้โลหะ คาร์บอนนาโนทิวป์ยังทนต่อความร้อนได้สูงมีจุดหลอมเหลวที่ 750 องศาเซลเซียสในสภาวะปกติและ 2800 องศาเซลเซียสภายใต้สุญญากาศ

นอกเหนือจากคุณสมบัติพิเศษ ทั้งในด้านอิเล็กทรอนิกส์และทางด้านวัสดุศาสตร์แล้ว มีรายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวป์ ในด้านนาโนเทคโนโลยีชีวภาพ เพื่อใช้เป็นพาหะในการทำยีนหรือพันธุกรรมบำบัด (gene therapy) โดยปกติแล้วการทำยีนบำบัด คือการนำส่งยีนที่ขาดหายไปหรือต้องการใช้ในการรักษาโรคเข้าสู่ร่างกายของผู้ป่วย เพื่อใช้ในการสร้างโปรตีนที่เหมาะสม ซึ่งเคยมีการนำวิธีการนี้มาใช้ในการรักษาโรคได้หลายชนิด เช่น โรคมะเร็ง โรคเอดส์ โรคติดเชื้อ และในวัคซีน และในปัจจุบันนักวิจัยทั่วโลกมีความตื่นตัวในการทำวิจัย โดยการนำยีนที่ร่างกายขาดหายไป มาทำการตัดต่อในห้องทดลองและให้แก่คนไข้ แต่การนำยีนเดี่ยวๆ เข้าสู่ร่างกายโดยตรงไม่สามารถทำได้ เนื่องจากยีนไม่สามารถเคลื่อนผ่านผนังเซลล์ได้ด้วยตัวเอง จึงได้มีการศึกษาพาหะในการนำส่งไม่ว่าจะเป็นไวรัส ไลโปโซม หรือพอลิเมอร์ ซึ่งในภายหลังกลุ่มนักวิจัยพบว่า การดัดแปลงโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการทำให้มีสายของอะตอมออกซิเจน และคาร์บอนยื่นออกมานอกคาร์บอนนาโนทิวป์ และทำการเชื่อมต่อกับกับหมู่อะมิโนที่มีประจุบวกจากการดัดแปลงนี้ทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถละลายน้ำได้ดีและมีประจุบวกอยู่โดยรอบเนื่องจากประจุของคาร์บอนนาโนทิวป์และดีเอ็นเอที่ตรงข้ามกัน (ดีเอ็นเอมีประจุลบจากหมู่ฟอสเฟต) ทำให้เกิดเป็นแรงดึงดูดขึ้น โดยเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนทิวป์ที่มีดีเอ็นเออยู่รอบๆ และจากผลการวิจัยโดยการเพาะเลี้ยงในเซลล์สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมพบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์บรรจุดีเอ็นเอสามารถเข้าสู่เซลล์และนำส่งสู่นิวเคลียสได้ และเห็นยว่นำทำให้เกิดการสร้างโปรตีนได้ นอกจากนี้ไม่พบการเป็นพิษต่อเซลล์จากคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย

จากการทดลองและการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ท่อกลวงนี้มีความสามารถในการยึดหยุ่นเป็นพิเศษ มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติที่ไม่ธรรมดาอีกหลายประการ ตัวอย่างเช่น สามารถหดกลับจากรูปหนึ่งไปสู่อีกรูปหนึ่งอย่างฉับพลันและสามารถสร้างเป็นเชือกที่มีความแข็งแรงมากเป็นพิเศษ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าจึงทำให้มีการทดลองสร้างเป็น สายโลหะนาโน (Nanowires) และตัวนำไฟฟ้าในขนาดนาโนสเกล (Nanoscale transistors) และในปัจจุบันคาร์บอนนาโนทิวป์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงและประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก การสังเคราะห์ท่อนาโนในปัจจุบันนั้น ไม่ได้มีเพียงแต่การสังเคราะห์จากธาตุคาร์บอนเท่านั้น ยังมีการสร้างท่อนาโนจากธาตุอื่นๆ อีกมากมาย เช่น ท่อนาโนพอร์ไฟริน หรือที่ทำมาจากซิลิกอน แต่โดยมากแล้วท่อนาโนที่ไม่ได้ทำมาจากธาตุคาร์บอน มักจะเรียกกันว่าเป็น เส้นลวดนาโน (nanowire) เช่น เส้นลวดนาโนซิลิกอน เป็นต้น

2.1.5 การใช้ประโยชน์ของคาร์บอนนาโนทิวป์

ด้านพอลิเมอร์ และ เซรามิก

- พอลิเมอร์นำไฟฟ้า
- ป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- เพิ่มความแข็งแรงของพอลิเมอร์
- เพิ่มความทนทานการแตกร้าวของเซรามิก

ด้านพลังงาน

- อิเล็กโทรดของคาปาซิเตอร์
- อิเล็กโทรดของแบตเตอรี่
- ตัวกักเก็บไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง
- เพิ่มประสิทธิภาพเซลล์สุริยะด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกล

ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกล

- จอภาพที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นตัวเปล่งแสง
- อุปกรณ์สำหรับเอกซเรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

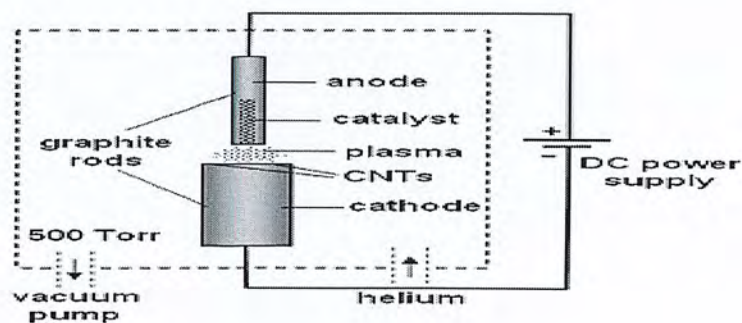
- ชิ้นส่วนวงจรรวมและหน่วยความจำ
- นาโนเซ็นเซอร์
- ตัวเก็บแบตเตอรี่ขนาดเล็ก

2.2 การสังเคราะห์และเทคนิคในการผลิตคาร์บอนนาโนทิวป์

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ทั้งในด้านของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณ คุณภาพ และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้ โดยทั่วไปแล้วอาจแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลักๆ ได้แก่

2.2.1 อาร์คดิสชาร์จ (Arc-discharge)

เป็นเทคนิคแรกเริ่ม โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 20-200 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 20-40 โวลต์ และควบคุมอุณหภูมิที่ 2,000 – 3,000 °C ตกคร่อมแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่วางจ่อใกล้ๆ กัน โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายแท่งประมาณ 1-3 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียม หรือ อาร์กอน ที่ความดันต่ำระหว่าง 100-500 Torr จนทำให้เกิดเป็นสถานะพลาสมา และมีอุณหภูมิสูงบริเวณระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้แท่งแกรไฟต์ระเหิดกลายเป็นไอแล้วมีการควบแน่นกลายเป็นท่อคาร์บอน บริเวณปลายแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ (Cathode) การควบคุมขนาดหรือจำนวนชั้นของท่อคาร์บอน สามารถทำได้โดยการควบคุมความดัน อุณหภูมิ และการเติมผงโลหะcatalyst ปริมาณเล็กน้อย เช่น เหล็ก นิกเกิล หรือโคบอลต์ อย่างไม่อย่างหนึ่ง หรือผสมกันลงในแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วบวก (Anode)ท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นี้อาจเป็นท่อชนิดผนังหลายชั้นหรือผนังชั้นเดียวก็ได้ขึ้นอยู่กับว่าใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ (ถ้าใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาจะได้ท่อชนิดผนังชั้นเดียว) วิธีการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายถูก แต่ท่อคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปน เช่น ออสตรอนของคาร์บอนและซีเถ้า ค่อนข้างมาก

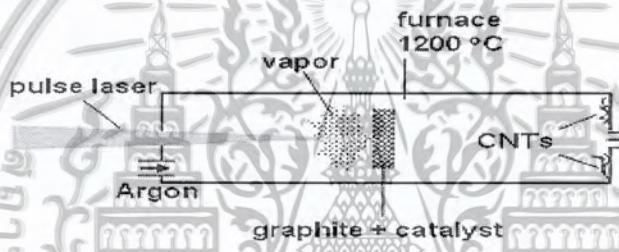


รูปที่ 2.12 แสดงวิธีอาร์คดิสชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ระเบิดด้วยเลเซอร์ (Pulsed-Laser vaporization)

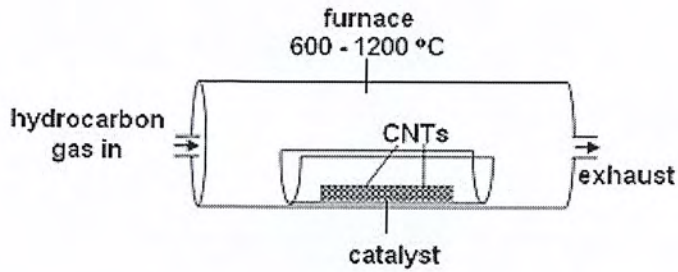
วิธีนี้จะใช้พัลส์แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงยิงไปยังเป้าซึ่งเป็นแกรไฟต์ผสมกับผงโลหะ catalyst ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอนหรือไนโตรเจนไปกวาดคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ออกจากเตาเผาไปหล่อเย็นที่ตัวเก็บกัก (Collector) ทองแดงด้านนอกเตาเผา เทคนิคนี้ใช้โคบอลต์และนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ SWNTs ที่เป็นระเบียบมากกว่าวิธีอาร์คดิซชาร์จ แต่มีข้อเสียคือต้นทุนการผลิตสูงทั้งสองเทคนิค มีปัญหาในเรื่องของการสังเคราะห์ให้ได้ปริมาณมากและทำให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีระเบียบยากที่ความดันต่ำประมาณ 500 Tore และอุณหภูมิ 1200 °C เทคนิคนี้คล้ายกับวิธีอาร์คดิซชาร์จ ซึ่งจะได้ปริมาณและคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ดีกว่า แต่มีข้อเสียที่จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กำลังสูง และมีราคาแพงมาก



รูปที่ 2.13 แสดงวิธีระเบิดด้วยเลเซอร์

2.2.3 ตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition คำย่อ: CVD)

โดยการผ่านไอหรือแก๊สของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เช่น มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อะเซทิลีน (C_2H_2) และเอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เป็นต้น เข้าไปในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณตั้งแต่ 600-1200°C (ที่อุณหภูมิ 600 – 800 °C สำหรับการผลิต MWNT และ 900 – 1200 °C สำหรับการผลิต SWNT ในบรรยากาศปกติ) ซึ่งต้องมีอนุภาคนาโนของโลหะ catalyst อยู่บริเวณนั้นด้วย ทำให้โมเลกุลของแก๊สให้แตกตัว (Decomposed) ออกเป็นอะตอมของคาร์บอน โดยอาศัยการก่อรูปของคาร์บอนนาโนทิวบ์บนวัสดุรองรับ (Substrate) ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของแก๊ส สัดส่วนอะตอมของธาตุ C:O:H ในระบบการคุมขนาดของอนุภาคตะกอน และระยะเวลาในการสังเคราะห์ สามารถกำหนดปริมาณ ขนาด ความยาว ทิศทางการเติบโต และตำแหน่งที่ต้องการปลูกของคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ แต่อาจมีข้อเสียที่ปริมาณข้อบกพร่องหรือความไร้ระเบียบของโครงสร้างสูง ทำให้ท่อที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้มักเป็นท่อโค้งงอ



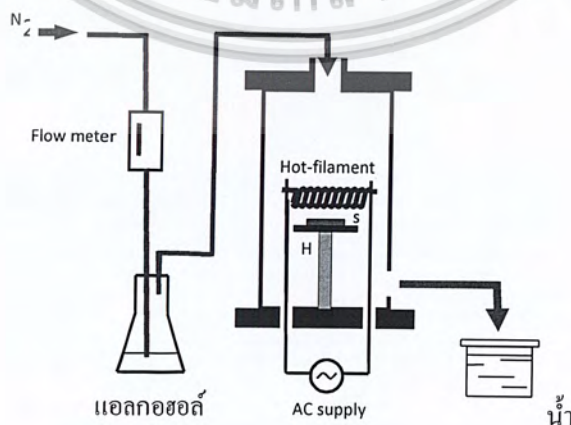
รูปที่ 2.14 แสดงวิธีการตกสะสมไอเคมี

2.2.3.1 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD (Chemical vapor deposition)

เทคนิคนี้จะเป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วยที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 500-1200°C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นเป็นรูปแบบตามที่เราต้องการได้ และที่สำคัญที่สุดคือวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ และ วิธี Chemical vapor deposition (CVD) นั้นยังสามารถแยกได้ 5 แบบ ได้แก่

2.2.3.1.1. แบบ Hot filament enhance Chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ที่มีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (Filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแทนการใช้เตาความร้อน โดยระบบของวิธี Hot-filament enhance Chemical vapor deposition แสดงได้ดังรูป 2.15



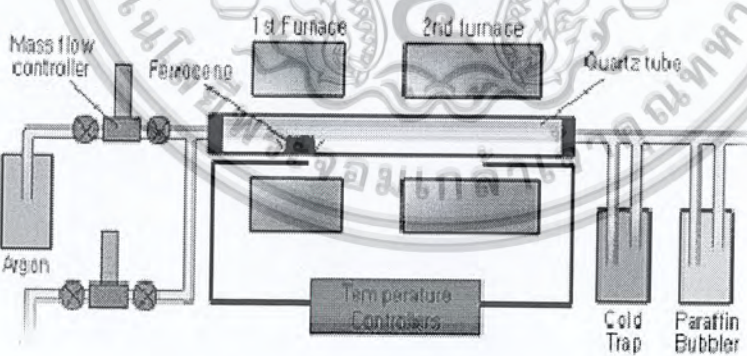
รูปที่ 2.15 ระบบ Hot-filament enhance Chemical vapor deposition : CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.15 สามารถอธิบายการทำงานของระบบได้ดังนี้คือ จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน (Filament) เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวดความร้อน แล้วปล่อยก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนเข้ามาในระบบ เมื่อก๊าซโคคนความร้อนของขดลวดความร้อน จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนและลงมาทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ จะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ ไอของแอลกอฮอล์ หรือ มีเทน(CH_4) เป็นต้น ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้โลหะจำพวก เหล็ก(Fe) และ โคบอล(Co) วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ไม่ยากและประหยัดค่าใช้จ่าย ส่วนคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้ นั้น จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิของฐานรอง, ชนิดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหลของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เป็นต้น

2.2.3.1.2. แบบ Vapor phase growth

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบนำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาภายใน Chamber โดยไม่ใช้ฐานรอง รูปที่ 2.9 แสดงระบบของวิธี Vapor phase growth



รูปที่ 2.16 ระบบ Vapor phase growth

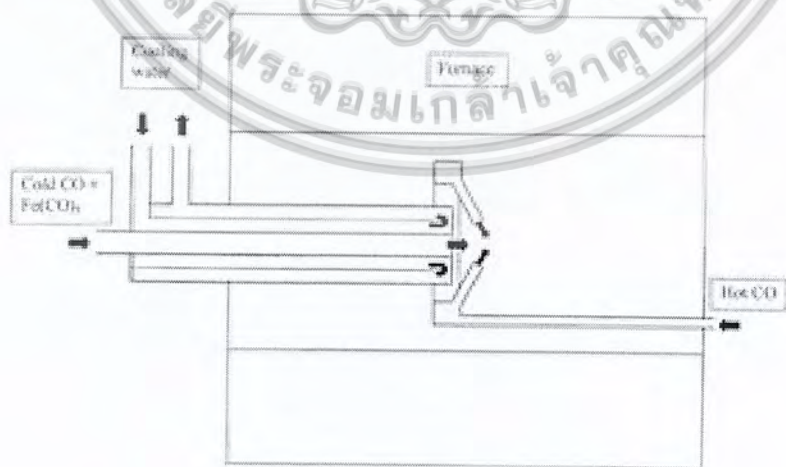
จากรูป 2.16 ในระบบของวิธี Vapor phase growth จะมีเตาความร้อนอยู่ 2 เตาครอบอยู่ระหว่าง Chamber โดยเตาความร้อนที่ 1 จะทำให้อุณหภูมิของก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาละลายเป็นไอและก่อกำเนิดขึ้นและคงสภาพไว้ เมื่อมาถึงเตาความร้อนที่ 2 อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนเนื่องจากโคคนความร้อนจะแพร่และซึมทรานลงบนอนุภาคของก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทั่วไปแล้วการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะอยู่ที่ประมาณ 2-4 นาโนเมตร สำหรับ SWNTs และ 70-100 นาโนเมตร สำหรับ MWNTs การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ได้ครั้งละมากๆและมีความบริสุทธิ์สูง แต่ยังคงยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้

2.2.3.1.3. แบบ High pressure CO disproportionate process

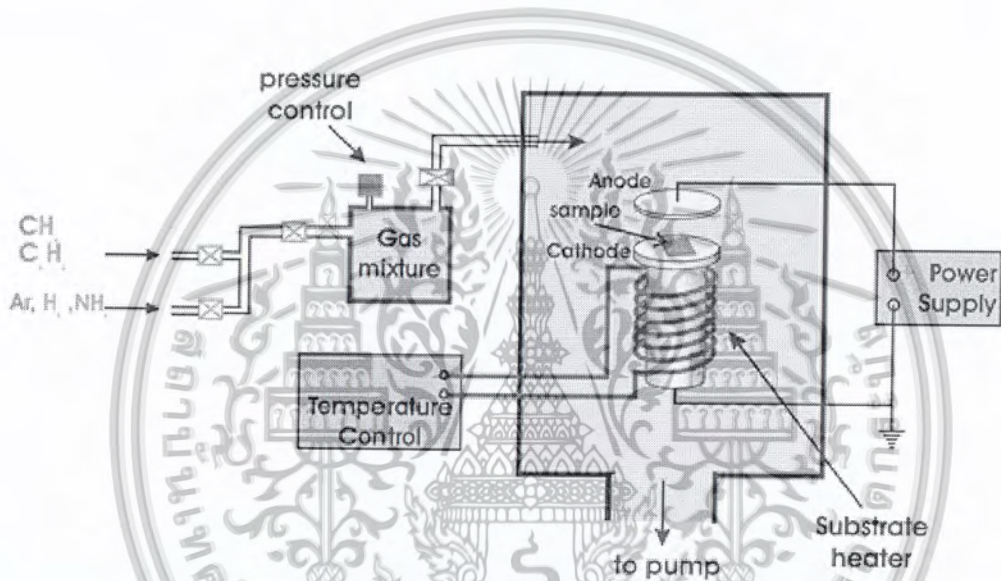
วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์ SWCNTs โดยการปล่อยก๊าซ CO ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เข้ามาอย่างต่อเนื่องให้เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซโลหะ เช่น Ferrocene, $Fe(CO)_5$ ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้น คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก โดยขนาดของท่ออยู่ที่ประมาณ 0.7 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้มีขนาดของท่อเล็กที่สุด โดยขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง SWCNTs อยู่ที่ประมาณ 1.1 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ แต่ยังคงยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้อีกทั้งยังเป็นอันตรายต่อร่างกายเนื่องจากใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นก๊าซอันตราย รูป 2.17แสดงระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process



รูปที่ 2.17 High pressure CO disproportionate process

2.2.3.1.4. แบบ Plasma enhanced chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการกำเนิดประจุไอออนภายใน Chamber หรือเตาปฏิกิริยา โดยใช้แรงดันความถี่สูงเข้ามาทำให้ไอออนของก๊าซที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัวเกิดเป็นพลาสมาขึ้นและเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา รูป 2.18 แสดงระบบของวิธี Plasma enhanced chemical vapor deposition



รูปที่ 2.18 Plasma enhanced chemical vapor deposition

จากรูปที่ 2.18 แผ่นเพลทจะต่อกับขั้วไฟฟ้า ที่วางขนานกับฐานรอง และฐานรองจะต่ออยู่กับกราวด์ของขั้วไฟฟ้า เมื่อก๊าซเข้ามาตามท่อจากแผ่นเพลทด้านบนตรงกันข้ามกับฐานรอง ถูกแรงดันที่มีความถี่สูง เกิดเป็นพลาสมา ทำให้ไอของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัว และลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นจะก่อตัวบนอนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง สำหรับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็น โลหะจำพวก Fe, Ni, Co เคลือบบนชั้นซิลิกอนหรือชั้นไดออกไซด์ หรือบนแก้วซึ่งการสร้างชั้นเคลือบสามารถทำได้ด้วยวิธี Evaporation หรือวิธี Sputtering โดยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถยึดติดกับฐานรองได้หนาแน่นจะมีผลต่อ ขนาดของท่อ, อัตราการเจริญเติบโต, ความหนาของผนัง, รูปร่างและโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทั่วไปแล้ว Ni เหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการปลูก MWCNTs โดยขนาดของเส้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

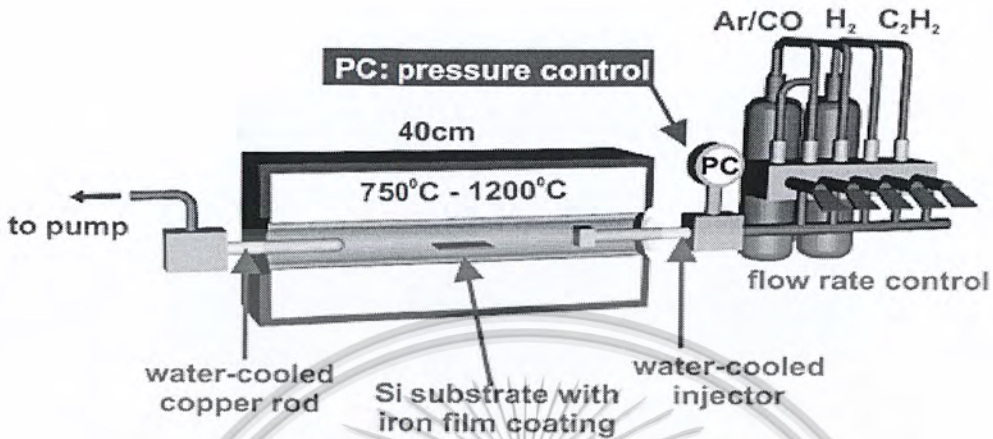
ผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ที่ 15 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตของการใช้ Ni เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 50 % และสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400 °C) ก๊าซที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 และ CO เป็นต้น นอกจากนี้การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถที่จะกำหนดทิศทางการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ให้ทอดงจากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือโดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้ เฉพาะคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด MWCNTs ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิด SWCNTs ได้ง่ายนัก (ในปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด SWCNTs ได้ โดยใช้พลาสมาระบบ RF glow-discharge (13.56 MHz) โดยใช้ก๊าซผสมของ CH_4 กับ H_2)

2.2.3.1.5. แบบ Thermal chemical vapor deposition

วิธีนี้จะใช้ Fe, Ni, Co หรือโลหะผสมทั้งสามชนิดผสมกันทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะทำการกัดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาด nanometer-sized โดยใช้ NH_3 หรือแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ 500°C - 1200°C และใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบปล่อยเข้ามาในระบบ เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน แล้วใช้ความร้อนจากเตาความร้อนทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ถูกกัดให้มีอนุภาคขนาด nanometer-sized เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์โดยส่วนมากจะนิยมใช้วิธีนี้ในการศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะเกี่ยวข้องกับขนาดของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 13 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 30-40 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ MWNTs เมื่อความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 2-3 นาโนเมตรจะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 1 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ SWCNTs รูป 2.19 แสดงระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition

โดยข้อดีของวิธีนี้คือ 1. สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และ ทิศทางของ CNTs ได้ 2. สามารถสังเคราะห์ CNTs ให้มีลวดลาย (patterned CNTs) บนฐานรองตามที่ต้องการได้ และ 3. สังเคราะห์ในเชิงพาณิชย์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ระบบ Thermal chemical vapor deposition

ถ้าพิจารณาตามอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ สามารถแบ่งเทคนิคการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ต่างๆ ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้อุณหภูมิต่ำ และ กลุ่มที่ใช้อุณหภูมิปานกลาง วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc-discharge) และวิธี ระเหยด้วยเลเซอร์ (Pulsed-Laser vaporization) นั้นเป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ใช้อุณหภูมิต่ำ โดยใช้อิฐแกรไฟต์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำถึงประมาณ 1500 °C เพื่อให้เกิดคาร์บอนได้ในปริมาณมาก ดังนั้นคาร์บอนที่ได้จึงมีโครงสร้างผลึกที่มีการยึดติดที่สูง และวิธีตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition) เป็นกลุ่มที่ใช้อุณหภูมิปานกลาง อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าทั้งสองกลุ่มต่างก็ให้ท่อนาโนที่มีสิ่งเจือปนด้วยกันทั้งคู่ ซึ่งสิ่งเจือปนที่มักพบในท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ คือ โครงสร้างอสัณฐานของคาร์บอนตัวเร่งปฏิกิริยาที่หลงเหลือ และอนุภาคระดับนาโนของแกรไฟต์ เป็นต้น แต่กระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนที่ใช้อุณหภูมิต่ำมีข้อดีกว่าตรงที่เป็นวิธีนี้ให้โครงสร้างที่มีคุณภาพสูงกว่ากล่าวคือ ให้ท่อนาโนเพียงประเภทเดียว (เป็นท่อนาโนผนังชั้นเดียว หรือท่อนาโนผนังหลายชั้น 100 เปอร์เซ็นต์) และสามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนได้ แต่มีข้อจำกัดตรงที่ไม่สามารถสังเคราะห์ปริมาณมากได้

ตารางที่ 2.1 สรุปวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ 3 วิธี

วิธี	Arc Discharge	Laser Ablation	CVD
วิธีการสังเคราะห์	ป้อนกระแสไฟสูงประมาณ 100A ระหว่างแท่งกราฟไฟต์ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm เพื่อให้เกิด hot-plasma ขึ้นคาร์บอนนาโนทิวป์จะก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว (โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ในบรรยากาศของก๊าซ He)	ใช้เลเซอร์พลังสูงยิงใส่แท่งคาร์บอนที่มีโลหะผสม ทำให้เกิดการระเหยของคาร์บอน หลังจากนั้นคาร์บอนนาโนทิวป์ จะก่อรูปขึ้น (โดยส่วน มากสังเคราะห์ในบรรยากาศ ของก๊าซ Ar ที่อุณหภูมิประมาณ 1,200 °C)	เป็นการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น มีเทน) โดยใช้ความร้อน หรือ Plasma เข้าช่วยมีโลหะเป็นตัวเร่งการ(สังเคราะห์ที่อุณหภูมิประมาณ (400 ~ 1200 °C)
ประสิทธิภาพของผลผลิต	30~90%	มากกว่า 70%	20~90%
SWNTs	- ขนาดสั้น - Ø: 0.6~1.4 nm	- ขนาดยาว (5~20 nm) - Ø: 1~2 nm	- ขนาดยาวมาก - Ø: 0.6~4 nm
MWNTs	- ขนาดสั้น - Ø: (ใน) 1~3 nm (นอก) ~10 nm	เนื่องจากวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงไม่นิยมใช้ในการสังเคราะห์MWCNTs แต่สามารถสังเคราะห์ได้	- ยาวมาก (> 20 nm) - Ø: 10~200 nm
ข้อดี	- เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายถูก - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย - สามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้โดยไม่ต้องใช้ โลหะเป็นตัวเร่ง - สามารถทำได้ทั้งความดันบรรยากาศห้อง	- ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่เป็น SWCNTs - ความบริสุทธิ์สูง - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย	- สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีอื่น - ขนาดของ SWCNTs ยาว - สามารถกำหนดทิศทางของการเกิดและตำแหน่งของ ทิวป์ได้ง่าย - ความบริสุทธิ์อยู่ในเกณฑ์ดี - สามารถที่จะสังเคราะห์ในเชิงอุตสาหกรรมได้
ข้อเสีย	- ความยาวของทิวป์สั้นและมีขนาดไม่สม่ำเสมอ - มีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก	- เป็นวิธีที่แพงเนื่องจากต้องใช้เลเซอร์ที่มีกำลังสูง	- เมื่อเทียบกับวิธี Laser ablation ทิวป์ที่ได้มี Defect อยู่บ้างแต่ไม่มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

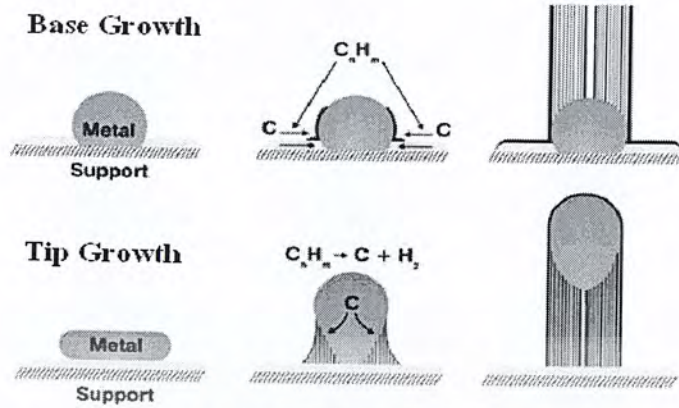
กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ยังไม่สามารถสรุปได้เป็นที่แน่ชัดและยังคงเป็นหัวข้อให้ถกเถียงกันในปัจจุบันซึ่งกลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ อาจจะถูกเปิดเผยขึ้นในระหว่างที่คาร์บอนนาโนทิวป์ก่อตัวขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดอาจแบ่งได้ 2 ลักษณะตามลักษณะการก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์คือ กลไกการเกิดแบบ Base Growth และกลไกการเกิดแบบ Tip Growth ซึ่งจะมีความแตกต่างกันโดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.3.1 Base Growth

จะเป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยในอุณหภูมิที่สูงพอเหมาะจะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิที่สูงพอนี้จะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนก็จะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าด้านบน ทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบน ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์

2.3.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนที่ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ปลายคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยในอุณหภูมิที่สูงพอเหมาะจะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และที่อุณหภูมิต่ำนี้จะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนก็จะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิต่ำของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะต่ำกว่าด้านล่างทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาตกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์



รูปที่ 2.20 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยามีความหมายที่ขอมรับโดยทั่วไปคือ สารที่เพิ่มอัตราการวิ่งเข้าหาจุดสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยที่ตัวมันเองไม่ได้ถูกใช้ในกระบวนการ ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานโดยการสร้างให้เกิดเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาที่ต้องการพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

2.4.1 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา

การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา นิยมทำโดยการพิจารณาว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในวัฏภาค(Phase) เดียวกับสารตั้งต้นหรือไม่ การใช้เกณฑ์นี้ทำให้เราสามารถแบ่งตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

- ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้น โดยทุกโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมเข้าไปในระบบ จะมีลักษณะที่เหมือนกันดังนั้นรูปแบบการทำปฏิกิริยาจึงเหมือนกันด้วย
- ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ คือตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่คนละวัฏภาคกับสารตั้งต้น ส่วนมากเป็นของแข็ง โดยส่วนของโครงสร้างที่อยู่บนพื้นผิวเท่านั้นที่มีการทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น อะตอม ไอออน หรือหมู่โครงสร้างที่อยู่ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้างผลึก เช่น ที่มุม ขอบ หรือบริเวณตอนกลาง จะมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน จึงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยานอกเหนือไปจากปฏิกิริยาที่ต้องการได้ง่าย

ถึงแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์จะให้ค่าการเลือกทำปฏิกิริยา ที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มีเสถียรภาพ ที่ต่ำกว่าเพราะ โครงสร้างอาจเกิดการสลายตัวใดที่อุณหภูมิสูง ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นช่วงที่ปฏิกิริยาเกิดรวดเร็วได้และยังก่อให้เกิดปัญหาในการแยกเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออกมาจากผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ในบางครั้งยังมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหา ในการเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านความสามารถในการละลาย ดังนั้น การใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ ในอุตสาหกรรมเคมี การกลั่นน้ำมันและปิโตรเคมี จึงอยู่ในวงแคบกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

2.4.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย 3 ประเภทคือ

- สารที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา

ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แท้จริง ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจประกอบด้วยสารที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาแต่ถ้าสารที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เป็นสารที่มีราคาแพงหรือมีพื้นที่ผิวต่ำ จะนิยมใช้วิธีเคลือบสารที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับ

Ferrocene



ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยบังเอิญ ในปี 1951 Pauson และ Kealy แห่ง Duquesne University รายงานปฏิกิริยาระหว่าง magnesium bromide และ ferric chloride ซึ่งเดิมมีจุดประสงค์จะทำให้เกิด coupling ของ diene แต่กลับได้สารเป็นผงสีส้มอ่อนที่มีความเสถียรสูงมาก อย่างไรก็ตาม Ferrocene สามารถเตรียมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าโดยใช้ sodium cyclopentadienyl และ anhydrous ferrous chloride ใน ether

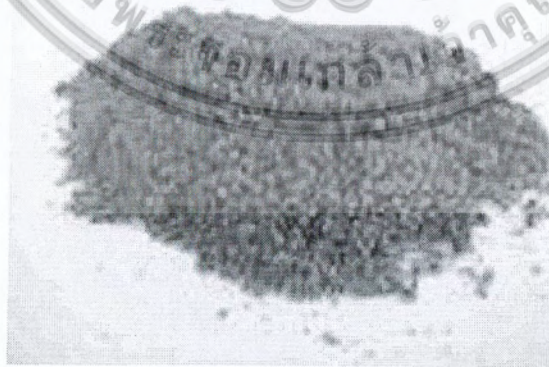
สมบัติทางกายภาพ คือ Ferrocene เป็นของแข็งสีส้มที่มีความเสถียรในบรรยากาศปกติ และจะระเหิดได้ทันทีในสภาวะสุญญากาศ จากสมมาตรและความไม่มีประจุ Ferrocene ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น benzene แต่ไม่ละลายในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของ Ferrocene

คุณสมบัติ	
สูตรเคมี	$C_{10}H_{10}Fe$
มวลต่อหนึ่ง โมล	186.04 g/mol
ลักษณะทางกายภาพ	ผงสีส้มอ่อน
ความหนาแน่น	2.69 g/cm ³ (20 °C)
จุดหลอมเหลว	174 °C
จุดเดือด	249 °C
ความสามารถละลาย ได้ในน้ำ	ไม่ละลายในน้ำ ละลาย ในตัวทำละลายอินทรีย์

Cobalt Acetate



รูปที่ 2.22 Cobalt Acetate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของ Cobalt Acetate

คุณสมบัติ	
สูตรเคมี	$\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
มวลต่อหนึ่ง โมล	284.93 g/mol
ลักษณะทางกายภาพ	ผลึกสีชมพูอ่อน
ความหนาแน่น	1.71 g/cm^3
จุดหลอมเหลว	$140 \text{ }^\circ\text{C}$
ความสามารถละลายได้ ใน น้ำ	ละลายน้ำได้ดีมาก

- **ตัวรองรับ**

มักเป็นสารรองรับที่มีราคาถูกและพื้นที่ผิวสูง หน้าที่หลักของตัวรองรับ คือการเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่สารที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ในบางกรณีจะมีปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างตัวรองรับและสารที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ซึ่งทำให้สารที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น โดยทั่วไปจะเลือกใช้ตัวรองรับที่เฉื่อยและไม่ทำปฏิกิริยา แต่ในบางกรณีตัวรองรับจะมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยาดังเช่น ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นทั้งตัวรองรับและตัวส่งเสริม

อะลูมินา เป็นตัวรองรับที่ถูกใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีราคาไม่แพงมีโครงสร้างที่เสถียรภาพสูง จุดหลอมเหลวสูงและสามารถเตรียมให้มีขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของรูพรุนต่างๆได้ อะลูมินามีโครงสร้างแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมและแหล่งที่มา โดยทั่วไปอะลูมินาที่นิยมใช้เป็นตัวรองรับอย่างกว้างขวาง ได้แก่ แกมมา-อะลูมินา ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) ทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างนี้มีพื้นที่ผิวสูง และมีเสถียรภาพในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง

Alumina



รูปที่ 2.23 ผงอะลูมินา

Aluminium acetylacetonate



รูปที่ 2.24 ผง Aluminium acetylacetonate

สูตรเคมี $C_{15}H_{21}AlO_6$ เป็นสารประกอบออลูมิเนียมที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ มีความบริสุทธิ์สูง Aluminium acetylacetonate ใช้ในปฏิกิริยาต่างๆ มีลักษณะเป็นผงสีขาว น้ำหนักโมเลกุล 324.31 g/mol จุดหลอมเหลว $190^{\circ}C$ จุดเดือด $320^{\circ}C$

2.5 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

หลังจาก ที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้นมาแล้ว จะนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆ เพื่อใช้หาถึงคุณสมบัติ ขนาด และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นมา นอกเหนือจากคาร์บอนนาโนทิวป์ไม่ว่าจะเป็นชนิด SWCNTs หรือ MWCNTs แล้ว ยังมีผลิตภัณฑ์อื่นๆของคาร์บอนและโลหะปะปนมาด้วยเสมอ ดังนั้น การวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน จึงเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นอย่างมาก โดยเครื่องมือที่ใช้ในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์มีด้วยการ 2 ชนิด คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) และ Raman spectroscopy ซึ่งเครื่องมือที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะบอกถึงคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป โดยที่เทคนิคของ SEM จะบอกรูปร่างของชิ้นงานในรูปภาพสามมิติ และสำหรับเทคนิคของ Raman จะบอกถึงพันธะของชิ้นงานที่นำมาวัดโดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้หาความบริสุทธิ์ของชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้และยังสามารถบอกชนิดและขนาดของคาร์บอนนาโนทิวป์โดยประมาณได้อีกด้วย

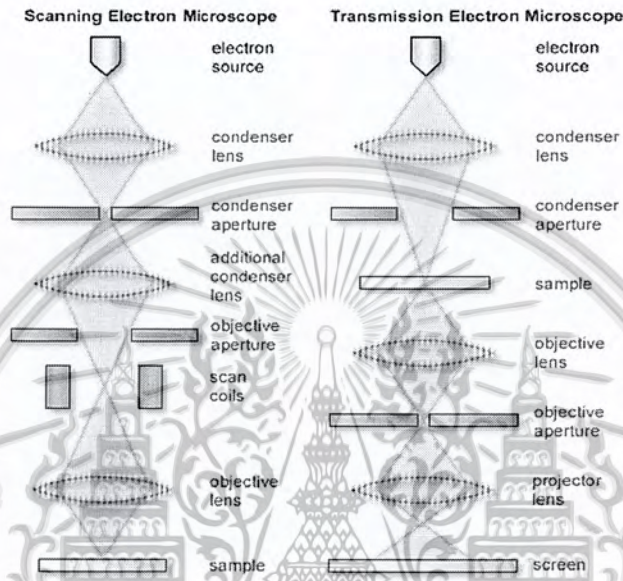
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope)

กล้องจุลทรรศน์เลนส์ทั้งแบบใช้แสงธรรมดาและใช้รังสีแบบอื่นๆ มีข้อจำกัดในการขยายภาพ เพราะกำลังขยายและกำลังแยกนอกจากขึ้นอยู่กับลักษณะของเลนส์แล้วยังขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่ใช้อีกด้วย จึงมีการคิดค้นหาวิธีประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์ให้มีกำลังขยายมากกว่านี้พบว่า อิเล็กตรอนมีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมากจึงมีการนำเอาอิเล็กตรอนเข้ามาใช้ในกล้องจุลทรรศน์แทนคลื่นแสงและใช้เลนส์แม่เหล็กแทนเลนส์กระจก เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน หลักการทั้งหมดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนคล้ายกับกล้องที่ใช้เลนส์กระจก เพียงแต่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถให้กำลังขยายและแจกแจงรายละเอียดได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา เนื่องจากสามารถปรับอิเล็กตรอนให้สั้นแล้ววิ่งไปตามเลนส์แม่เหล็กภาพจึงขยายได้มาก สามารถส่องดูวัตถุขนาดเล็กที่สุดประมาณ 0.0005 ไมโครเมตร หรือเล็กกว่าวัตถุที่มองเห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์เลนส์ประกอบธรรมดาถึง 400 เท่า ปัจจุบันกล้องนี้มีกำลังขยาย ได้สูงสุดถึง 500000 เท่าหรือมากกว่า เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะมีประสิทธิภาพถึง 0.1 นาโนเมตร โดยลำแสงอิเล็กตรอนที่มีศักย์สูงจากแคโทด ที่ถูกให้ความร้อนในสุญญากาศ จะถูกเร่งและผ่านออกมาตามท่อสุญญากาศไปยังระบบคอนเดนเซอร์ (condenser system) ซึ่งประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า 4 ชุด โดยขดลวดแม่เหล็กชุดแรกจะทำให้อิเล็กตรอนผ่านไปยังด้านล่างของตัวอย่าง ส่วนชุดที่สองจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้วัตถุที่จะรวบรวมอิเล็กตรอนให้ผ่านหรือกระจายอยู่รอบๆ ตัวอย่าง จากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่านไปยังขดลวดสนามแม่เหล็กชุดที่สามที่ทำหน้าที่ในการขยายภาพ โดยภาพเกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนจะผ่าน ไปยังตัวอย่างและมีการโฟกัสภาพไปยังจอรับภาพ เช่นจอรับภาพเรืองแสง หรือเซนเซอร์ไวแสง และขดลวดสนามแม่เหล็กชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้ตา ซึ่งภาพที่ได้สามารถบันทึกลงบนเพลทแผ่นฟิล์ม หรือทำการแปลงสัญญาณ ภาพลงสู่จอคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งภาพที่ได้นี้จะเรียกว่า Electron Micrograph (EM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.1 ประเภทและการนำไปใช้งานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(Transmission Electron Microscope: TEM)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope:SEM)



รูปที่ 2.25 แผนภาพการทำงานของ TEM และ SEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ประเภท กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน ฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็น ได้ด้วยตาเปล่าหรืออาจบันทึกภาพที่บนแผ่นฟิล์ม ได้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนมีชื่อภาษาอังกฤษคำเต็มว่า Scanning Electron Microscope และ โดยทั่วไปแล้วมักจะเรียกชื่อย่อเป็นภาษาอังกฤษว่า "SEM" ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อีกชนิดหนึ่งซึ่งเป็นต้นกำเนิดของSEM นั้นเป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดที่เรียกว่า "TEM" (อ่านว่าทีอีเอ็ม) คำนี้ย่อมาจากTransmission Electron Microscope ซึ่งหมายถึงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องผ่านตัวอย่างที่บางมากและภาพที่เกิดขึ้นก็คือเงาที่ปรากฏบนแผ่น รับภาพซึ่งสามารถบันทึกบนแผ่นฟิล์ม(ถ่ายภาพ)ได้เช่นกันทั้ง SEM และ TEM มีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานคล้ายคลึงกันในระบบ โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้อง กับระบบสุญญากาศการทำให้มีลำแสงอิเล็กตรอนและระบบเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีบทบาทในการรวมหรือกระจายลำแสงอิเล็กตรอนตัวอย่าง ที่

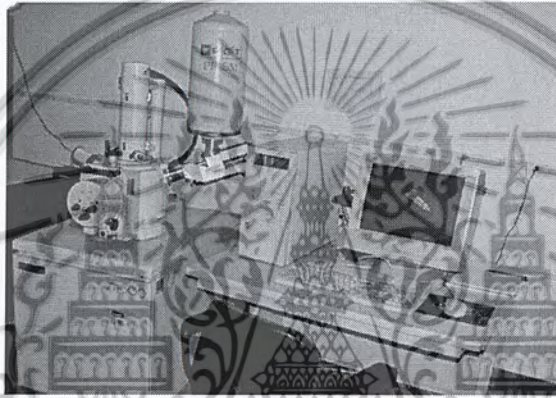
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการศึกษาหรือตรวจสอบระบบอื่นๆของกล้องทั้งสองประเภทมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดคือระบบของการสร้างภาพและลักษณะของภาพ ที่ปรากฏ นั่นคือTEMมีระบบของการเกิดภาพได้ง่ายๆภาพที่เกิดขึ้นจะปรากฏให้ผู้สังเกตเห็นได้โดยตรงบนแผ่นรับภาพและภาพนั้นเกิดความแตกต่างระหว่างความโปร่งใสและความทึบแสงที่ลำแสงอิเล็กตรอนผ่านหรือไม่สามารถจะผ่านได้ภาพที่ปรากฏก็คือเงาของตัวอย่างส่วนระบบการเกิดภาพใน SEM เป็นระบบที่ค่อนข้างจะยุ่งยากไม่ใช่เป็นเงาที่ภาพที่เกิดขึ้น โดยตรงอันเกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนผ่านหรือไม่สามารถจะผ่านตัวอย่างภาพใน SEM จึงเป็นภาพที่เกิดโดยทางอ้อมซึ่งเป็นการรวบรวมสัญญาณที่เกิดภายหลังการกระทบลำแสงอิเล็กตรอนแล้วเปลี่ยนไปเป็นภาพให้ปรากฏบนจอภาพที่มี ลักษณะคล้ายจอ โทรทัศน์หรืออีกนัยหนึ่งภาพที่เกิดขึ้น ในSEMก็คือผลจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นภาพถึงแม้ว่าภาพซึ่งเป็นผลหรือ ข้อมูลที่ได้รับมา โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้ง2ประเภทดังกล่าวคือทั้ง TEMและSEMจะเป็นภาพของตัวอย่างที่เป็นภาพขยายและมีรายละเอียด สูงก็ตามภาพที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์ทั้ง2ประเภทมีลักษณะที่แตกต่างกันมากภาพที่ได้รับจากการใช้TEMเป็นภาพขยายที่มีการแจ่มแจ้งรายละเอียดสูง และมีลักษณะ2มิติ ส่วนภาพที่ได้รับจากSEMนั้นนอกเหนือจากเป็นภาพที่มีคุณสมบัติในด้านกำลังขยายและรายละเอียดแล้วภาพที่ปรากฏจาก การใช้SEMยังมีลักษณะพิเศษอีกหนึ่งคือเป็นภาพที่มีความลึกหรือเป็นภาพประเภท3มิติ ซึ่งทำความประทับใจแก่ผู้ใช้SEMเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นที่นิยมกันในปัจจุบันเพื่อการประยุกต์ใช้สำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยทางวิทยาศาสตร์แทบทุกแขนงหรือสาขากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน(SEM)เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมมาตั้งแต่ปีค.ศ.1965หรือเมื่อประมาณ20ปีที่แล้วมานี้เองทั้งๆที่การประดิษฐ์อุปกรณ์ชนิดนี้ได้มีมาในระยะเวลาไล่เลี่ยกันกับประดิษฐ์TEMคือในระหว่างปีค.ศ.1929-1931ทั้งนี้เพราะการตัดแปลงอุปกรณ์ที่รวบรวมสัญญาณอันเกิดจาก ลำแสงอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอภาพที่ปรากฏที่ออกมาในจอภาพจึงพรมัวขาดรายละเอียดหรืออีกนัยหนึ่งคือมีการแจ่มแจ้งรายละเอียดต่ำ(Low resolution)ฉะนั้นความสนใจด้านSEMจึงหยุดชะงักไประยะหนึ่งจนถึงปีค.ศ.1965เมื่อSEMเครื่องแรกได้ปรากฏ ออกสู่วงการวิทยาศาสตร์อีกครั้งอันเป็นผลจากการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงทั้งระบบเลนส์สนามแม่เหล็กและระบบภาพให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้ บรรดานักวิทยาศาสตร์ด้านวิทยาศาสตร์กายภาพสนใจอุปกรณ์ชนิดนี้เป็นอย่างมากนับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.2 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษารายละเอียดของพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น การสร้างภาพทำโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะเป็นภาพสามมิติ นอกจากนี้ยังอาจดัดแปลงโดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น การวิเคราะห์ธาตุ การคำนวณหามวลและปริมาตร ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบนี้เหมาะสำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยพื้นฐาน



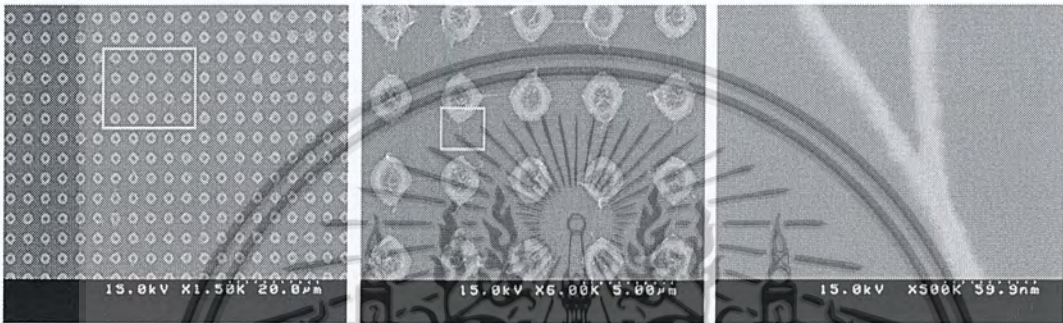
รูปที่ 2.26 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.5.1.3 ระบบการทำงานของ SEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีระบบการทำงานเหมือนกับแบบส่องผ่านแต่มีสิ่งที่แตกต่างกันคือ ระบบภาพและแสดงผล โดยภาพที่ได้จะถูกส่งสัญญาณเพื่อไปขยาย แล้วจึงแปลภาพบนจอ CRT (Cathode Ray Tube) หลอดนี้ของ SEM จะประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์เช่นเดียวกับ TEM ลำอิเล็กตรอนที่ผ่าน objective lens ไปตกลงบนตัวอย่างนั้นสามารถที่จะบังคับทิศทางเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างได้ด้วย และมี scanning generator อยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวสุดท้ายกับ objective lens ลำอิเล็กตรอนนี้เป็น Primary electron โดยจะถูกโฟกัสลงบนตัวอย่างทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวอย่างส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เรียกว่า Secondary electron และถูกรวบรวมโดย electron collector ซึ่งจะถูกนำไปขยายและแปลสัญญาณให้เกิดเป็นภาพบนจอ CRT ซึ่งสามารถดูได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกไว้บนฟิล์มความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับพื้นผิวตัวอย่าง ถ้าพื้นผิวของตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่ขรุขระ นอกจากนี้ที่ objective lens จะมีช่อง Aperture เช่นกันเพื่อช่วยเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

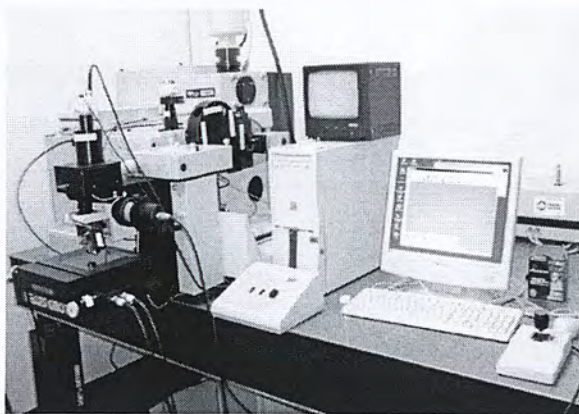
ความลึกของภาพ SEM นี้อาจติดตั้งและต่อเติมอุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เช่น Backscattered electron detector อิเล็กตรอนที่เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้จะช่วยในการบอก รายละเอียดของรูปร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนที่ลึกเกินกว่าที่ Secondary electron ทำการตรวจสอบได้หรือทำการติดตั้งระบบ EDS เพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุ หรือ ติดตั้ง Transmitted electron detector เพื่อศึกษาลักษณะภายในของตัวอย่างที่ทำให้บาง เป็นต้น



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยายต่างกัน (1,500 เท่า 6,000 เท่า 500,000 เท่า)

2.5.2 วิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโกปี

รามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้หาโครงสร้างของวัสดุ สารจากการวัดสเปกตรัมที่เลื่อนไปของ Raman shift และตำแหน่งของสเปกตรัม ซึ่งสัมพันธ์กับ ลักษณะพันธะของชิ้นงานที่นำมาวัด โดยสารแต่ละชนิดจะมีสเปกตรัมเฉพาะของแต่ละสารที่แตกต่างกัน เทคนิคของ Raman spectroscopy มีหลักการที่สำคัญ คือ การใช้การกระเจิงไม่ยืดหยุ่น (Raman scattering) และการสั่นของโครงสร้าง

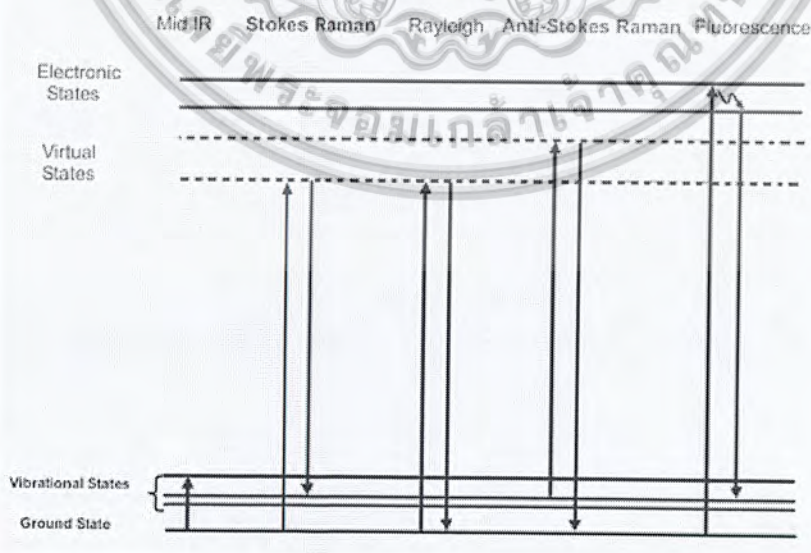


รูปที่ 2.28 เทคนิค Raman Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.1 ระบบการทำงานของ Raman Spectroscopy

เมื่อลำแสงที่มีความเข้มสูงผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งใส แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้ แต่จะมีแสงส่วนน้อยเกิดการกระเจิงไปทุกทิศทางและเกิดการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) หรือแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) กับ โมเลกุลของสาร เมื่อโฟตอนผ่านเข้าไปในโมเลกุลสาร จะมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไปซึ่งพลังงานที่เหลือจะให้สเปกตรัมออกมา ลักษณะสเปกตรัมจะเป็น peak แหวม โดยส่วนใหญ่โฟตอนที่กระเจิงออกมาจะมีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่ตกกระทบ เรียกส่วนนี้ว่า Rayleigh scatter ซึ่งอิเล็กตรอนจะกลับสู่ระดับพลังงานเดิม ก่อนที่จะได้รับการกระตุ้นจากโฟตอนแต่มีโฟตอนบางส่วน (ประมาณ 1 ใน 10^7) ที่กระเจิงออกมา มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไป โฟตอนที่มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปนี้ เรียกว่า Raman scatter โฟตอนที่ เป็น Raman scatter นี้ส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นมากกว่า ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (Stoke shift) แต่ก็มีส่วนน้อยที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (anti-Stokes shift) ซึ่ง Raman scattering ทั้งสองแบบ อิเล็กตรอนจะไม่ได้กลับมาสู่ระดับพลังงานเดิม Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนจะสูงกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น ส่วน anti-Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนจะมีพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น และ Stokes scattering จะมีปริมาณมากกว่า anti-Stokes scattering



รูปที่ 2.29 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering

และ anti-Stokes scattering

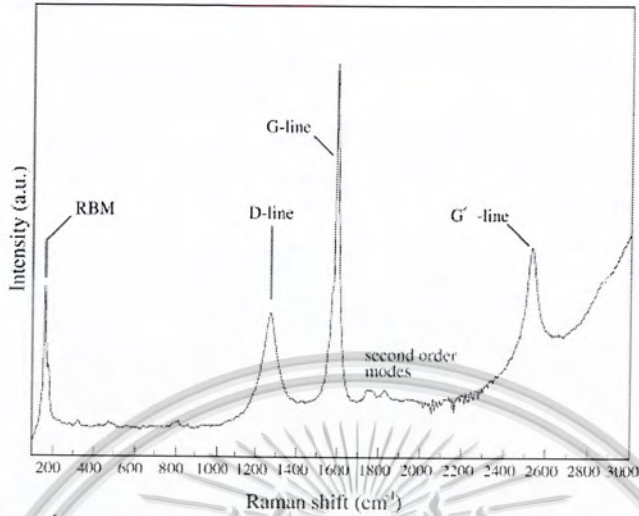
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.29 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering แต่ละกรณี โฟตอนที่ตกกระทบจะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า (virtual state) และ เมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ก็จะปล่อยโฟตอนออกมา

2.5.2.2 การประยุกต์ใช้วัดคาร์บอนนาโนทิวป์

รามานสเปกโตรสโคปี เป็นเครื่องมือที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ทำการวัดคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องเสียเวลาในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน และ ชิ้นงานที่ทำการวัดแล้วก็ไม่เกิดการเสียหาย รามานสเปกโตรสโคปีสามารถวิเคราะห์ถึงทุกพันธะของคาร์บอน ไม่ว่าจะเป็น ฟูลเรอเรนซ์ คาร์บอนนาโนทิวป์ อะมอร์ฟัสคาร์บอน หรือเพชร ในกรณีของคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังเดี่ยว (SWCNTs) ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องรามานมีช่วงความถี่ที่น่าสนใจอยู่ 4 ช่วง ดังนี้ คือ

- 1) ความถี่ที่อยู่ในช่วง $<200 \text{ cm}^{-1}$ จะเรียกว่า โหมด RBM (radial breathing mode) พิกัดที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่นี้จะแสดงถึงการมีทิวป์ชนิด SWCNTs ปั่นอยู่ ซึ่งเกิดจากโหมด “ A_{1g} breathing mode” ของทิวป์ และความถี่รามานในโหมดนี้จะขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์
- 2) ความถี่ที่ประมาณ 1330 cm^{-1} เราจะเรียกพิกัดในย่านนี้ว่า D-band (D ย่อมาจาก Disorder) จะเกี่ยวข้องกับพันธะที่ไม่สมบูรณ์หรือผิดระเบียบของแกรไฟต์เช่น อะมอร์ฟัสคาร์บอน เป็นต้น
- 3) ความถี่ที่อยู่ในช่วง $1500-1600 \text{ cm}^{-1}$ เราจะเรียกพิกัดต่างๆที่อยู่ในช่วงนี้ว่า G-band (G ย่อมาจาก Graphite) แสดงถึงพันธะของ CNTs ซึ่งเกิดจากการแยกของโหมด “ A_{1g} stretching mode” ของแกรไฟต์ ซึ่งตำแหน่งของพิกัดในโหมด G-band ของ CNTs อาจจะซ้อนทับกับพิกัด G-band ของแกรไฟต์
- 4) ความถี่ที่อยู่ในช่วง $2450-2650 \text{ cm}^{-1}$ เป็นโอเวอร์โทนของ D-band (overtone of D-band) มักจะเรียกว่า G'-band ตำแหน่งของพิกัด $\approx 2\omega_D$



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างกราฟความถี่รามานแสดงโหมดต่างๆ

2.5.2.3 Radial Breathing Mode (RBM)

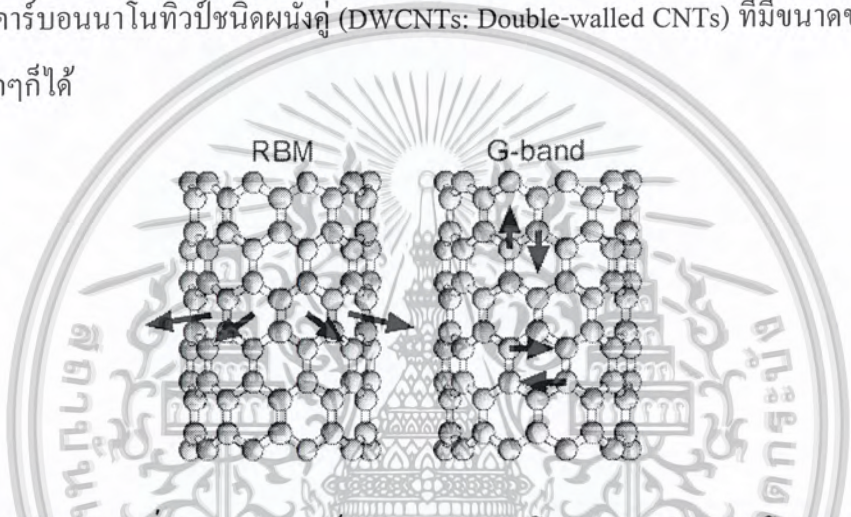
ความถี่ในโหมด RBM (radial breathing mode) ไม่มีความสัมพันธ์กับมุมไครลของคาร์บอนนาโนทิวป์ (chiral angle) แต่เป็นการตอบสนองของการสั่นของอะตอมคาร์บอนในทิศทางที่แผ่ออกมาในทิศทางของรัศมีดังแสดงในรูปที่ 2.30 (ก) จึงทำให้สามารถนำการตอบสนองความถี่รามานในโหมดนี้ (ω_{RBM}) มาหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ (d) ได้ โดยทำการหาค่าผ่านสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\omega_{RBM} = \frac{A}{d} + B$$

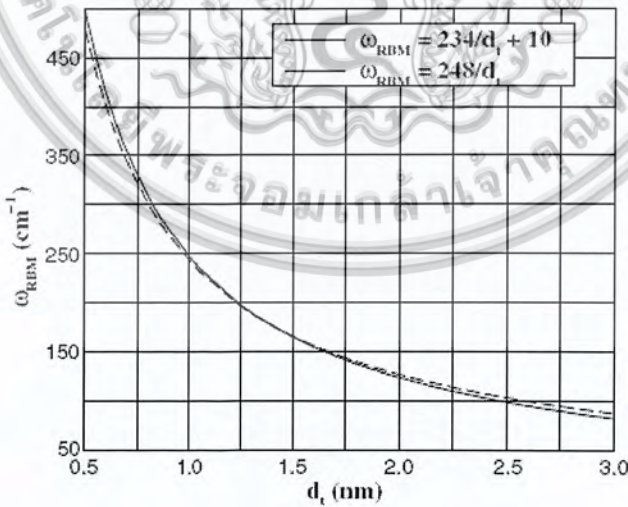
โดยที่ ตัวแปร A และ B เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง จากผลการรายงานที่ผ่านมาพบว่า ค่าของพารามิเตอร์ A และ B จะแตกต่างกันไม่มากนัก รูป 2.29 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของพีค RBM และขนาดของทิวป์ที่ได้จากรายงานบางฉบับ เช่น ในกรณีของ SWCNTs ที่อยู่โดดๆบนฐานรอง Si/SiO₂ จะมีค่า $A = 248 \text{ nm cm}^{-1}$ และค่า $B = 0 \text{ cm}^{-1}$ แต่ถ้าเป็น SWCNT ที่อยู่รวมกันเป็นช่อ (bundle) ซึ่งจะมีแรงที่กระทำต่อกันระหว่างทิวป์ ซึ่งจะทำให้ตำแหน่งของพีคจะเลื่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยจะมีค่า $A = 234 \text{ nm cm}^{-1}$ และได้ค่า $B = 10 \text{ cm}^{-1}$ นอกจากนี้แล้วยังพบว่า สิ่งแวดล้อมรอบตัวทิวป์ เช่น แรงที่กระทำต่อกันระหว่างทิวป์ในกรณีของทิวป์ที่อยู่รวมกันเป็นช่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ แรงที่กระทำต่อกันระหว่างแผ่นแกรฟีนในกรณีของ MWCNTs ก็มีผลอย่างมากต่อตำแหน่งของพีค RBM อย่างไรก็ตาม สัมพันธในสมการดังกล่าว จะเป็นจริงเฉพาะกับทิวป์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงจำกัดเท่านั้น กล่าวคือ $1 \text{ nm} < d < 2 \text{ nm}$ เนื่องจาก ถ้าขนาดใหญ่กว่า 2 nm แล้ว ความเข้มของพีคที่ได้จะต่ำมากจนถึงไม่มีพีคเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม อีกสิ่งที่ควรตระหนักก็คือ พีคที่เกิดในช่วงรามานชิฟท์ (Raman shift) ที่ความถี่สูง ($250\text{--}350 \text{ cm}^{-1}$) ซึ่งเป็นการตอบสนองของการสั่นของทิวป์ที่มีขนาดเล็กมากเท่านั้น อาจเกิดจาก คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังเดี่ยวที่อยู่อิสระ หรืออาจเป็น คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังคู่ (DWCNTs: Double-walled CNTs) ที่มีขนาดของทิวป์ภายในเล็กมากก็ได้



รูปที่ 2.31 แบบจำลองการสั่นของอะตอมคาร์บอนสำหรับ (ก) โหมด RBM และ (ข) โหมด G-band



รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่รามานในโหมด RBM (ω_{RBM}) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ (d)

- (ก) $A=234\text{cm}^{-1}$ และ $B=10\text{cm}^{-1}$ ในกรณีของของ SWCNT-bundle(เส้นประ) และ
- (ข) $A=248\text{cm}^{-1}$ และ $B=0$ ในกรณีของของ Isolated SWCNTs (เส้นทึบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.4 G-band

โดยปรกติแล้ว ความถี่รามาน โหมดขนานเส้นสัมผัส (tangential mode) ของแกรไฟต์จะสามารถสังเกตได้ที่ความถี่รามานรอบๆ 1582cm^{-1} และเราจะเรียกว่า “G band” จากแกรไฟต์ แต่ในกรณีโหมดขนานเส้นสัมผัสของคาร์บอนนาโนทิวป์จะไม่เหมือนของแกรไฟต์เนื่องจากความถี่รามานที่เกิดขึ้น เป็นผลรวมของพีกหลายพีก แต่ก็มักจะเรียกว่า G-band เหมือนกัน โดยจะตอบสนองในช่วงความถี่ที่ประมาณ $1500\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งจะเป็นพีกที่ประกอบจากพีก 6 พีก (6 โหมด) และตำแหน่งของพีกจะไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ใช้ในการวัด

ในกรณีของ SWNTs เราสามารถวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและคุณสมบัติทางไฟฟ้า (เป็นโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ) ได้จากรูปร่างและตำแหน่งพีกในโหมด G-band ได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ขนาดของทิวป์จาก G-band จะมีความแม่นยำน้อยกว่าที่ได้จากโหมดของ RBM และเนื่องจากรูปร่างของพีก G-band ของทิวป์ที่เป็นโลหะกับทิวป์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ทำให้สามารถแยกแยะได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นๆเป็นโลหะหรือสารกึ่งตัวนำได้

ในบรรดาพีก 6 พีกที่รวมกันเป็นรูปร่างของ G-band จะมีเพียง 2 พีกที่มีความเข้มสูงที่สุดเท่านั้นที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีต้นกำเนิดจากการทำลายความสมมาตรของการสั่นในแนวขนานเส้นสัมผัสเมื่อแผ่นแกรไฟีนถูกม้วนตัวกลายเป็นท่อทรงกระบอก (รูป 2.31 (ข)) ความเข้มสูงสุดของพีก G จำนวน 2 พีก จะมีสัญลักษณ์เป็น ω_G^+ สำหรับการเลื่อนตำแหน่งของอะตอมในแนวของแกนของทิวป์ และ ω_G^- สำหรับการเลื่อนตำแหน่งของอะตอมในทิศทางของเส้นรอบวงของทิวป์ ความถี่รามาน ω_G^- จะมีความถี่ต่ำกว่า เนื่องจากบริเวณส่วนโค้งของทิวป์ ทำให้การสั่นในทิศทางเส้นรอบวงของทิวป์อ่อนลง

การบ่งบอกว่าคาร์บอนนาโนทิวป์มีคุณสมบัติเป็นโลหะหรือสารกึ่งตัวนำนั้น สามารถดูได้จากรูปร่างของ G-band ในกรณีของทิวป์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ จะมีพีกของ ω_G^- และ ω_G^+ ที่สมมาตรและแคบ ซึ่งสามารถฟิต (fit) ได้ด้วยรูปร่างเส้นแบบ Lorentzian¹ แต่ในกรณีของทิวป์ที่เป็นโลหะความกว้างของพีก ω_G^- จะกว้างมากขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีคุณสมบัติ

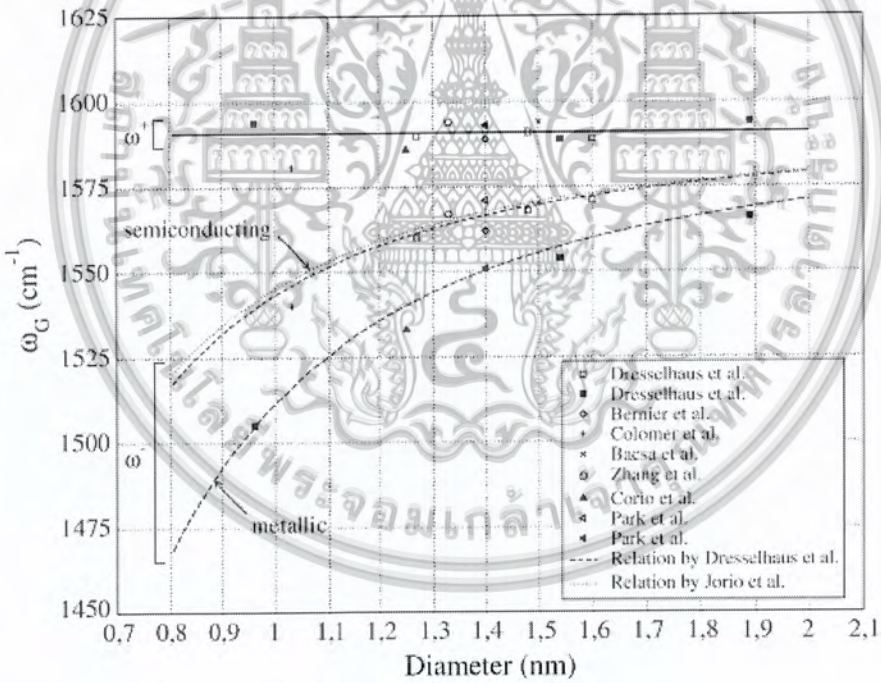
¹ Lorentzian:
$$I(\omega) = \frac{A\Gamma^2}{[(\omega - \omega_L)^2 + \Gamma^2]}$$
 โดยที่ ω_L, I_0 และ Γ เป็นความถี่กึ่งกลางของพีก ความเข้มของพีก และตัวปรับ

ความกว้างของพีก ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกรไฟต์ที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะ เช่น แกรไฟต์ที่ถูกเจือให้เป็นชนิด n และ พูลเลอร์เร็นซ์ที่ถูกเจือให้เป็นโลหะ พิกของ ω_G^- จะไม่สมมาตรและสามารถถูกฟิตได้ด้วยรูปร่างเส้นแบบ Breit-Wigner-Fano (BWF)¹ พิกที่มีลักษณะรูปร่างแบบ BWF นี้จะเป็นคุณสมบัติร่วมเฉพาะของวัสดุเป็นชนิด n และคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เป็นโลหะ

ในรูป 2.32 แสดงถึงสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ω_G^- และความถี่ ω_G^+ กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ จากรูปจะเห็นได้ว่า ค่าความถี่ ω_G^+ จะไม่ขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์ (อยู่ที่ประมาณ 1591 cm^{-1}) ในขณะที่ค่าความถี่ ω_G^- ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยค่าความถี่ของ ω_G^- จะลดลงเมื่อขนาดของทิวป์ (d) มีขนาดเล็กลง มีความสัมพันธ์ $\omega_G^+ - \omega_G^- = 47.7/d^2$ สำหรับทิวป์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ และ $\omega_G^+ - \omega_G^- = 49.5/d^2$ สำหรับทิวป์ที่เป็นโลหะ ณ ที่นี้ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์



รูปที่ 2.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ω_G^- และ ω_G^+ กับขนาดของนาโนทิวป์ สำหรับ SWCNTs

¹ Breit-Wigner-Fano (BWF): $I(\omega) = I_0 \frac{[1 + (\omega - \omega_{BWF} / q\Gamma)^2]}{[1 + (\omega - \omega_{BWF} / \Gamma)^2]}$ โดยที่ $1/q$ เป็นพารามิเตอร์แสดงความไม่สมมาตรของพิก

ω_{BWF}, I_0 และ Γ เป็นค่าที่กึ่งกลางของพิก ความเข้มของพิก และตัวปรับความกว้างของพิก ตามลำดับ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.5 D-band และ G'-band

พีคของ D-band (1300 cm^{-1}) และ G'-band ($\approx 2\omega_D$; $2450\text{-}2650\text{ cm}^{-1}$) สามารถเห็นได้ทั้งในคาร์บอนนาโนทิวป์และในแกรไฟต์ มีความสัมพันธ์กับขนาดและมุมไครเรลของคาร์บอนนาโนทิวป์ และขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ใช้ในการวัด อย่างไรก็ตาม เราสามารถวิเคราะห์ชนิดพันธะของคาร์บอนได้จากตำแหน่งและขนาดความกว้างของพีคของ D-band ได้ กล่าวคือ อะตอมคาร์บอนจะมีความกว้างของพีคที่กว้างมาก ($> 100\text{ cm}^{-1}$) แต่ถ้าเป็น SWCNTs พีคของ D-band จะอยู่ที่ $1285\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ และมีความกว้างของพีคที่แคบเพียง $10\text{-}30\text{ cm}^{-1}$ ในขณะที่ แกรไฟต์ จะมีพีคของ D-band อยู่ที่ $1305\text{-}1330\text{ cm}^{-1}$ และมีความกว้างของพีคประมาณ $30\text{-}60\text{ cm}^{-1}$ และในกรณีของ MWCNTs ก็มีลักษณะพีคเหมือนกับแกรไฟต์

พีคของ D-band จะเกี่ยวข้องกับพันธะที่ไม่สมบูรณ์หรือผิดระเบียบของแกรไฟต์เช่น อะมอร์ฟัสคาร์บอน เป็นต้น ส่วนพีคของ G'-band แทบจะไม่ขึ้นกับพันธะที่ไม่สมบูรณ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์เลย ในกรณีของตัวอย่างที่มีความบริสุทธิ์สูงมากๆ ความเข้มของพีค G'-band จะสูงพอๆกับ G-band นอกจากนี้ G'-band ยังสามารถนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า (สารกึ่งตัวนำหรือโลหะ) ได้อีกด้วย

ในกรณีของคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดหลายผนัง (MWCNTs) จะมีลักษณะของสัญญาณรบกวนแตกต่างจาก SWCNTs เนื่องจาก MWCNTs มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกที่ใหญ่และประกอบด้วยทิวป์ที่มีขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ ยกตัวอย่างเช่น MWCNTs ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในสุด เล็กมากๆ ($< 2\text{ nm}$) จะแสดงความถี่ในโหมด RBM ได้ชัดเจนเช่นกัน แต่ต้องมีสภาวะการเรโซแนนซ์ที่เหมาะสมเท่านั้น แต่โดยทั่วไปแล้ว ความถี่ในโหมด RBM ของ MWCNTs จะอ่อนมาก จนไม่สามารถสังเกตได้ ซึ่งเกิดจากทิวป์มีขนาดใหญ่และความหลากหลายของขนาดของผ่านศูนย์กลางในสุด (ทำให้สัญญาณที่ได้ไม่ชัดเจน) นอกจากนี้ พีคของ G-band ของ MWNTs จะอยู่ที่ประมาณ 1582 cm^{-1} ใกล้เคียงกับของแกรไฟต์ ความไม่สมมาตรของพีคจะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แตกต่างจากของ SWNTs ที่เกิดการแยกของพีค ความถี่ ω_G^- และ ω_G^+ อย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากความหลากหลายของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ MWCNTs อย่างไรก็ตาม MWCNTs ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในสุดที่เล็กมากๆ ก็สามารถเกิดการแยกตัวของพีค G-band ได้เช่นกัน

หมายเหตุ: คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดหลายผนัง --- MWCNTs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณ ปัจจุบัน การวิเคราะห์ MWCNTs ด้วยรามานสเปกโตรสโคปียังไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้ เนื่องจากการเตรียม MWCNTs ที่ไม่มีความบกพร่องทางโครงสร้างเลยเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกวิธีหนึ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลองและเงื่อนไขในการทดลอง

บทนี้จะกล่าววิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยเทคนิค Floating catalysts และ เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองต่างๆ เพื่อให้ได้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เป็นผนังชั้นเดียว (SWCNTs) ที่มีความบริสุทธิ์สูง

3.1 เงื่อนไขที่ใช้ศึกษาเพื่อสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

- 3.1.1 ศึกษาปัจจัยการเติมตัวรองรับ (Supporter)
- 3.1.2 ศึกษาอัตราการไหลของก๊าซนำพา (Ar)
- 3.1.3 ศึกษาทดลองเปลี่ยนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็น Co
- 3.1.4 ศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ
- 3.1.5 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา

3.1.1 ศึกษาปัจจัยการเติมตัวรองรับ (Supporter)

ตารางที่ 3.1 การสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลของการเติมตัวรองรับ (Supporter) ได้แก่ Al_2O_3 , $C_{15}H_{21}AlO_6$ โดย อัตราการไหลของก๊าซนำพา (Ar) คงที่ที่ 1 L/min , เวลาในการทำปฏิกิริยาคงที่ 30 นาที , อุณหภูมิ 650 °C , ใช้ Ethanol 100 g เป็นต้นกำเนิดคาร์บอน

ตารางที่ 3.1 ศึกษาปัจจัยการเติมตัวรองรับ (Supporter)

ลำดับ	ชื่อชิ้นงาน	ชนิดสารเคมีที่ใช้	เวลา	อัตราการไหลของก๊าซ (L/min)	สัดส่วนในการผสมสาร				
					Fe(g)	Co(g)	Al_2O_3 (g)	$C_{15}H_{21}AlO_6$ (g)	C_2H_5OH (g)
1	F39	Fe+C ₂ H ₅ OH	30	1	1	-	-	-	100
2	S11-Fr1	Fe+Al ₂ O ₃ +C ₂ H ₅ OH	30	1	1	-	0.1	-	100
3	FA133	Fe+C ₁₅ H ₂₁ AlO ₆ +C ₂ H ₅ OH	30	1	0.9	-	-	0.1	100
4	AI515-N1	C ₁₅ H ₂₁ AlO ₆ +C ₂ H ₅ OH	30	1	-	-	-	1	100

หมายเหตุ ชื่อชิ้นงาน **S | I | - | Fr | I** S=ฐานรองsilicon, Fr=Flow rate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ศึกษาอัตราการไหลของก๊าซนำพา (Ar)

ตารางที่ 3.2 การสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของก๊าซนำพา (Ar) ที่ 0.5 L/min และ 1L/min โดยมีการเติมตัวรองรับ (Supporter) Al_2O_3 0.1% wt, เวลาในการทำปฏิกิริยาครั้งที่ 30 นาที, อุณหภูมิ 650 °C, ใช้Ethanol 100 g

ตารางที่ 3.2 ศึกษาอัตราการไหลของก๊าซนำพา (Ar)

ลำดับ	ชื่อชิ้นงาน	ชนิดสารเคมีที่ใช้	เวลา	อัตราการไหลของก๊าซ (L/min)	สัดส่วนในการผสมสาร				
					Fe(g)	Co(g)	Al_2O_3 (g)	$C_{15}H_{21}AlO_6$ (g)	C_2H_5OH (g)
1	S10-Fr0.5	$Fe+Al_2O_3+C_2H_5OH$	30	0.5	1	-	0.1	-	100
2	S11-Fr1	$Fe+Al_2O_3+C_2H_5OH$	30	1	1	-	0.1	-	100

หมายเหตุ ชื่อชิ้นงาน **S10 - Fr0.5** S=ฐานรองsilicon, Fr=Flow rate

3.1.3 ศึกษาทดลองเปลี่ยนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็น Co

ตารางที่ 3.3 การสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจาก Fe เป็น Co (98.999%) และ Co (99.999%) โดยมีอัตราการไหลของก๊าซนำพา 1 L/min, การเติมตัวรองรับ (Supporter) Al_2O_3 0.1% wt, เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที, อุณหภูมิ 650 °C, ใช้Ethanol 100 g

ตารางที่ 3.3 ศึกษาทดลองเปลี่ยนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็นCo

ลำดับ	ชื่อชิ้นงาน	ชนิดสารเคมีที่ใช้	เวลา	อัตราการไหลของก๊าซ (L/min)	สัดส่วนในการผสมสาร				
					Fe(g)	Co(g)	Al_2O_3 (g)	$C_{15}H_{21}AlO_6$ (g)	C_2H_5OH (g)
1	S11-Fr1	$Fe+Al_2O_3+C_2H_5OH$	30	1	1	-	0.1	-	100
2	CoS19-N1	$Co_{(98.999\%)}+C_2H_5OH$	30	1	-	1	-	-	100
3	CoS13-N1	$Co_{(98.999\%)}+Al_2O_3+C_2H_5OH$	30	1	-	1	0.1	-	100
4	CoS16-N1	$Co_{(99.999\%)}+Al_2O_3+C_2H_5OH$	30	1	-	1	0.1	-	100

หมายเหตุ ชื่อชิ้นงาน **CoS 19 - N 1** Co= Cobalt , S=ฐานรองsilicon , N= ความเข้มข้น

3.1.4 ศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ

ตารางที่ 3.4 การสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนความเข้มข้นของตัวรองรับ (Supporter) เป็น 0.1 %wt และ 0.2 %wt โดยมีอัตราการไหลของก๊าซนำพาที่ 0.5 L/min และ 1 L/min , เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที , อุณหภูมิ 650 °C , ใช้Ethanol 100 g

ตารางที่ 3.4 ศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ

ลำดับ	ชื่อชิ้นงาน	ชนิดสารเคมีที่ใช้	เวลา	อัตราการไหลของก๊าซ (L/min)	สัดส่วนในการผสมสาร				
					Fe(g)	Co(g)	Al ₂ O ₃ (g)	C ₁₅ H ₂₁ AlO ₆ (g)	C ₂ H ₅ OH (g)
1	S11-Fr1	Fe+Al ₂ O ₃ +C ₂ H ₅ OH	30	1	1	-	0.1	-	100
2	FAS8-N0.2	Fe+Al ₂ O ₃ +C ₂ H ₅ OH	30	1	1	-	0.2	-	100
3	FS24-Fr0.5	Fe+C ₂ H ₅ OH	30	0.5	1	-	-	-	100
4	FAI27-Fr0.5	Fe+C ₁₅ H ₂₁ AlO ₆ +C ₂ H ₅ OH	30	0.5	0.9	-	-	0.1	100
5	FAI28-Fr0.5	Fe+C ₁₅ H ₂₁ AlO ₆ +C ₂ H ₅ OH	30	0.5	0.8	-	-	0.2	100

หมายเหตุ ชื่อชิ้นงาน **F** A S 8 - N 0.2 **F**=Fe, **A**=Alumina, **S**=ฐานรองรับsilicon, **N**=ความเข้มข้นของสารเคมี

3.1.5 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ 3.5 การสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา 30นาที, 120นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซนำพา 1 L/min, ความเข้มข้นของตัวรองรับ (Supporter) Al₂O₃ 0.1%wt, อุณหภูมิ 650 °C, ใช้Ethanol 100 g

ตารางที่ 3.5 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา

ลำดับ	ชื่อชิ้นงาน	ชนิดสารเคมีที่ใช้	เวลา	อัตราการไหลของก๊าซ (L/min)	สัดส่วนในการผสมสาร				
					Fe(g)	Co(g)	Al ₂ O ₃ (g)	C ₁₅ H ₂₁ AlO ₆ (g)	C ₂ H ₅ OH (g)
1	S11-Fr1	Fe+Al ₂ O ₃ +C ₂ H ₅ OH	30	1	1	-	0.1	-	100
2	FS26-Fr1	Fe+Al ₂ O ₃ +C ₂ H ₅ OH	120	1	1	-	0.1	-	100

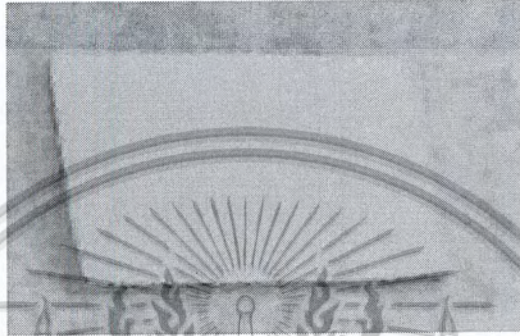
หมายเหตุ ชื่อชิ้นงาน **S 11 - Fr 1** **S**= ฐานรองรับsilicon, **Fr**= Flow rate

3.2 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยเทคนิค Floating Catalysts

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การเตรียมฐานรองซิลิกอน

นำแผ่นซิลิกอน ที่เตรียมไว้ นำมาตัดด้วยปากกาหัวเพชร จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนที่ได้ไปทำความสะอาดด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 30 นาที และ Ethanol เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เครื่อง Ultrasonic



รูปที่ 3.1 แผ่นซิลิกอนทำหน้าที่เป็นฐานรอง

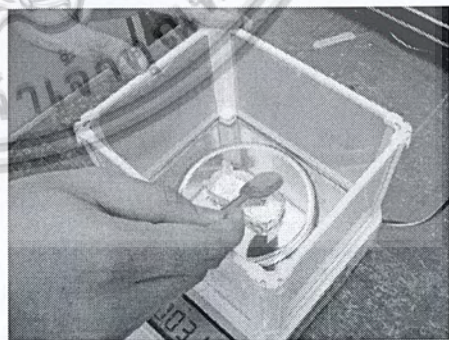
3.2.2 การเตรียมสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาและสารละลายที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน

โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่ความจำเป็นต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยในการสังเคราะห์นี้ ใช้ผงโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆตามตารางข้างต้น ขั้นตอนและวิธีการเตรียมสารละลายสามารถอธิบายได้ดังนี้ โดยเริ่มจาก

1. การเตรียมซังสารเคมีตามเงื่อนไขที่กำหนดตามตาราง นำมาผสมกัน



(ก)

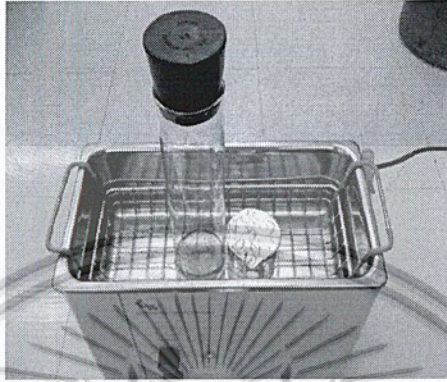


(ข)

รูปที่ 3.2 การเตรียมสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

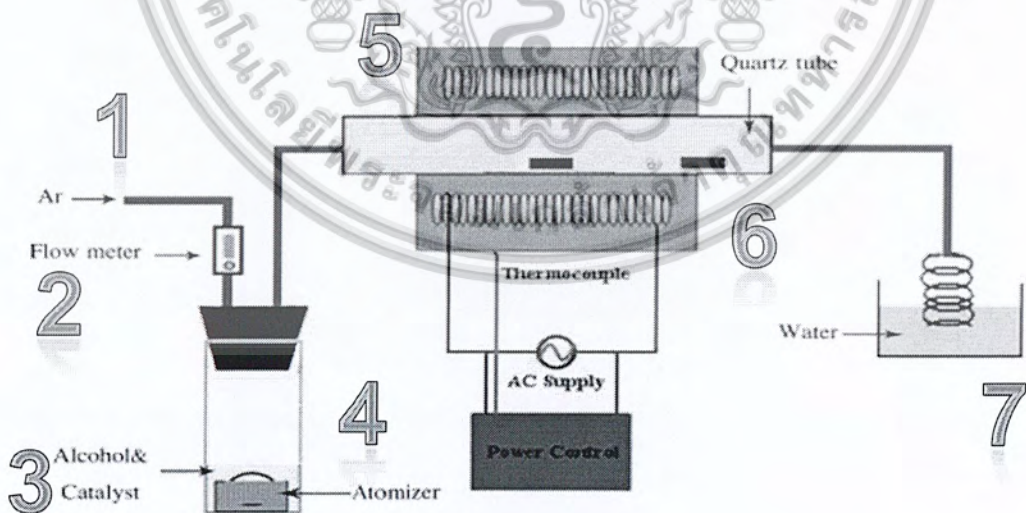
2. นำสารเคมีที่ได้ไป Ultrasonic เป็นเวลา 30 นาที เพื่อผสมสารเคมีให้ละลายเข้ากัน



รูปที่ 3.3 นำสารเคมีที่ได้ไป Ultrasonic

3.2.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

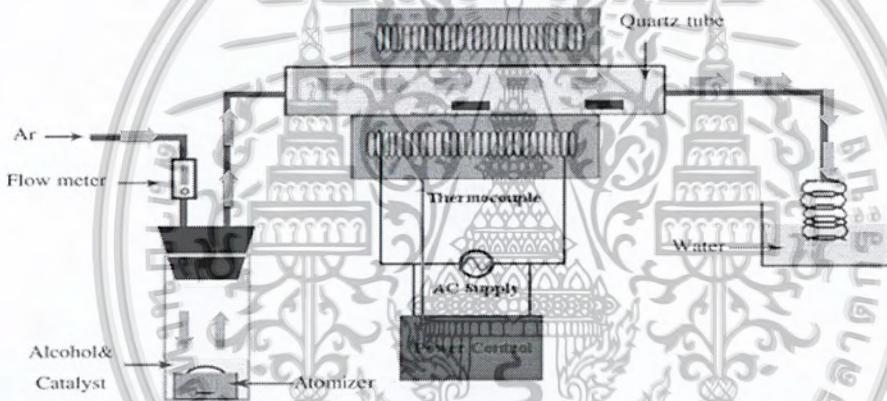
รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์เชิงปริมาณ ซึ่งประกอบไปด้วย



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

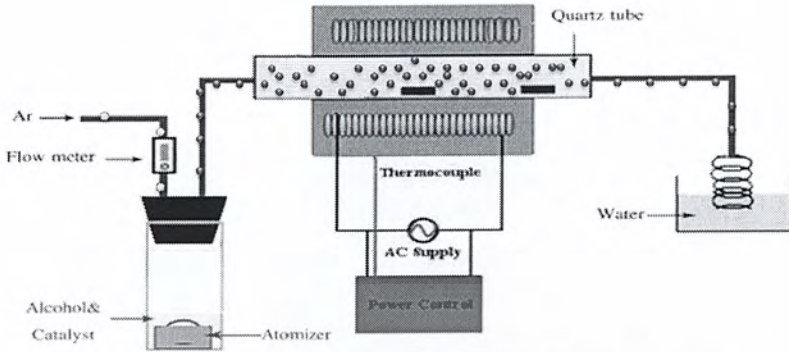
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ก๊าซอาร์กอน (Ar)
2. Flow meter ใช้ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน
3. ใช้ผงตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับEthanol เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน
4. เครื่อง Atomizer (2MHz) ใช้เป็นตัวทำให้สารละลายกลายเป็นละอองหมอก
5. ท่อแก้วควอตซ์ภายในใช้เป็นห้องทำปฏิกิริยา
6. ฮีตเตอร์ใช้เป็นตัวให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา
7. น้ำใช้ป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกไหลย้อนเข้ามาภายในระบบ



รูปที่ 3.5 กระบวนการไล่อากาศออกจากระบบ

โดยในการทดลองขั้นแรกจะทำการไล่อากาศภายในท่อควอตซ์ออกก่อน (รูปที่3.5) โดยการปล่อยก๊าซนำพาเข้ามาด้วยอัตราการไหล 1 L/min เป็นเวลา 10-15 นาที ในระหว่างนี้จะจ่ายกระแสไฟให้แก่ ฮีตเตอร์ จนได้อุณหภูมิตามที่กำหนด หลังจากนั้นจะเริ่มทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทำการปรับอัตราการไหลของก๊าซนำพาตามเงื่อนไขที่กำหนด (0.5 , 1 L/min) จากนั้นเปิดเครื่อง Atomizer เพื่อทำการสังเคราะห์ตามเวลาที่กำหนด เมื่อระบบเย็นลงคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะถูกเคลือบบนแผ่นซิลิกอนเป็นฟิล์มบางซึ่งมีสีดำ จากนั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และสเปกโตรสโคปีรามาน



รูปที่ 3.6 กระบวนการการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

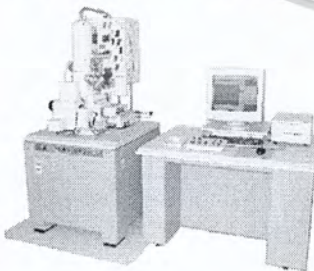
3.3 ทดสอบความเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์และศึกษาคุณสมบัติ

3.3.1 การวิเคราะห์ด้วย SEM

หลังจากที่สังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์เสร็จเรียบร้อยแล้วเก็บตัวอย่างชิ้นงานของแต่ละเงื่อนไขมาทดสอบหาความเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีขนาดเล็กมากไม่สามารถดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา จึงใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes : SEM) ในการทดสอบ ดังรูป 3.7

3.3.2 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy

หลังจากผ่านการทดสอบความเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยเครื่อง SEM เสร็จแล้วนำตัวอย่างงานที่มีความเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์มาศึกษาคุณสมบัติด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ดังรูป 3.8 ซึ่งจะวิเคราะห์ในระดับโมเลกุลของคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งในการทดสอบจะใช้กำลังงานของเลเซอร์ 50 mW เป็นเวลา 3 นาทีแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์อย่างละเอียด



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.8 เทคนิค Raman Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

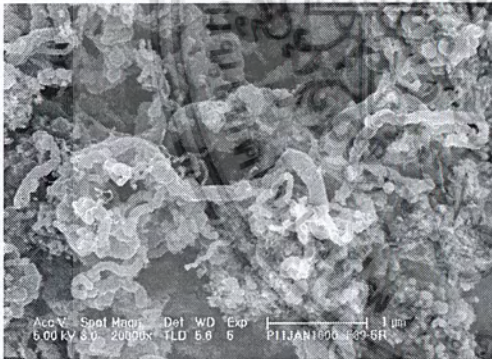
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาเงื่อนไขต่างๆที่มีผลต่อการปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อให้ได้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เป็นผนังชั้นเดียวที่มีปริมาณมาก ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองจาก SEM และ RAMAN

4.1 ศึกษาปัจจัยการเติมตัวรองรับ (Supporter) โดยการเติมตัวรองรับ Al_2O_3 และ $C_{15}H_{21}AlO_6$

ผลจากภาพถ่าย SEM

4.1.1) F39 : $C_{10}H_{10}Fe + C_2H_5OH : (1:100)$

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



รูปที่ 4.1.1 (ก) : F39 กำลังขยาย 20K



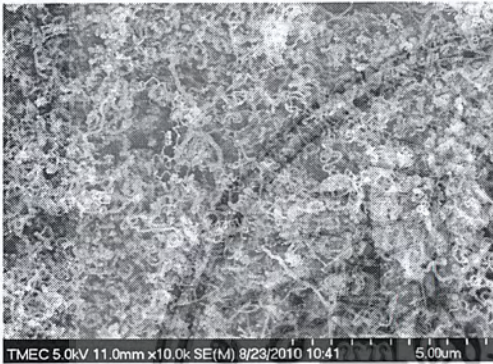
รูปที่ 4.1.1 (ข) : F39 กำลังขยาย 100K

4.1 ศึกษาปัจจัยการเติมตัวรองรับ (Supporter) (ต่อ)

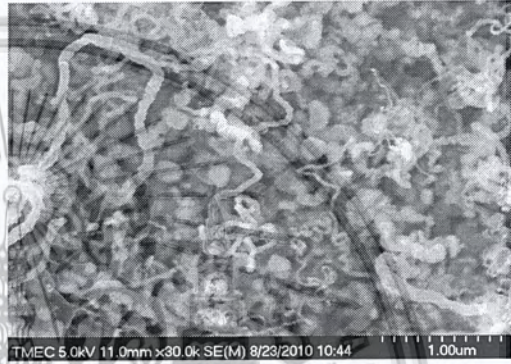
ผลจากภาพถ่าย SEM

4.1.2) S11-Fr1 : $C_{10}H_{10}Fe + Al_2O_3 + C_2H_5OH : (1:0.1:100)$

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



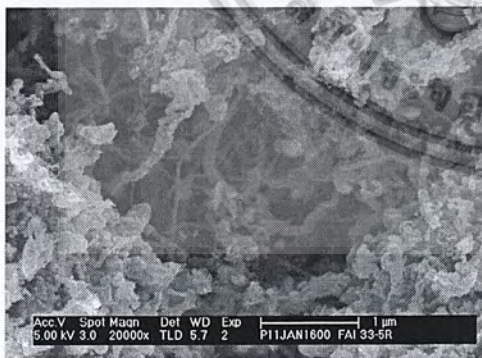
รูปที่ 4.1.2 (ก) : S11-Fr1 กำลังขยาย 10K



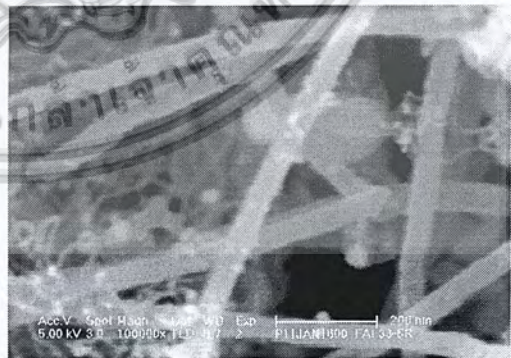
รูปที่ 4.1.2 (ข) : S11-Fr1 กำลังขยาย 30K

4.1.3) FAI33 : $C_{10}H_{10}Fe + C_{15}H_{21}AlO_6 + C_2H_5OH : (0.9:0.1:100)$

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



รูปที่ 4.1.3 (ก) : FAI33 กำลังขยาย 20K



รูปที่ 4.1.3 (ข) : FAI33 กำลังขยาย 100K

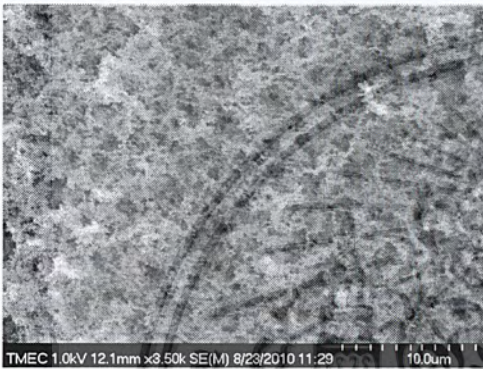
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ศึกษาปัจจัยการเติมตัวรองรับ (Supporter) (ต่อ)

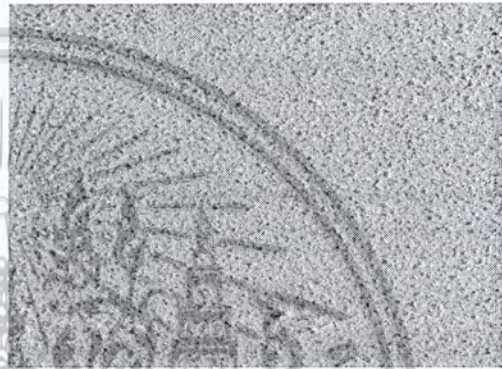
ผลจากภาพถ่าย SEM

4.1.4) AIS15-NR : $C_{15}H_{21}AlO_6 + C_2H_5OH : (1:100)$

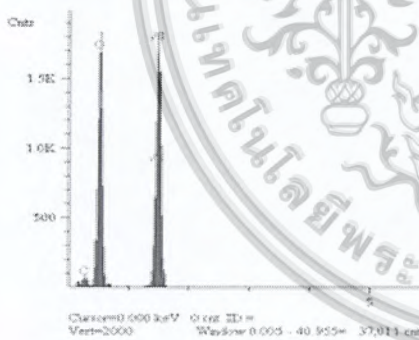
เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



รูปที่ 4.1.4 (ก) : AIS15-NR กำลังขยาย 3.50K



รูปที่ 4.1.4 (ข) : AIS15-NR (EDX)



Elt	Line	Intensity (c/s)	Error2-sig	Conc	Units
C	Ka	15.10	1.099	11.926	wt.%
O	Ka	316.95	5.035	71.205	wt.%
Al	Ka	366.68	5.416	16.868	wt.%
				100.000	wt.%

รูปที่ 4.1.4 (ค) : กราฟแสดงปริมาณสารเคมีที่พบ

รูปที่ 4.1.4 (ง) : แสดงตารางของปริมาณสาร

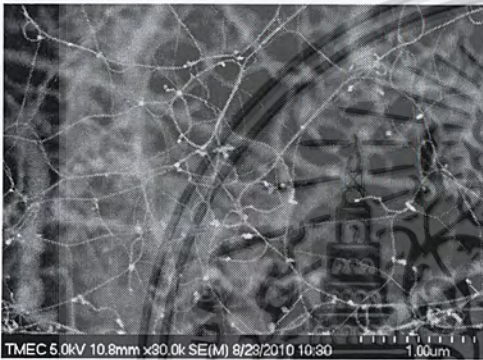
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ศึกษาอัตราการไหลของก๊าซนำพา (Ar) โดยสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่อัตราการไหล 0.5 และ 1 L/min

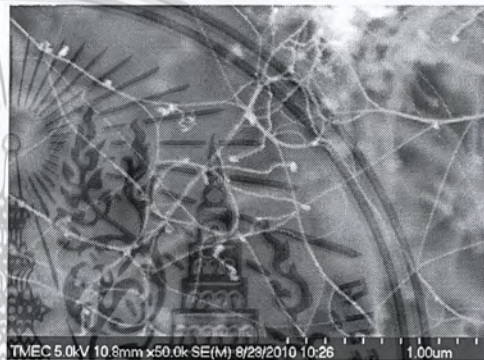
ผลจากภาพถ่าย SEM

4.2.1 S10-Fr0.5 : $C_{10}H_{10}Fe + Al_2O_3 + C_2H_5OH : (1:0.1:100)$

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 0.5 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



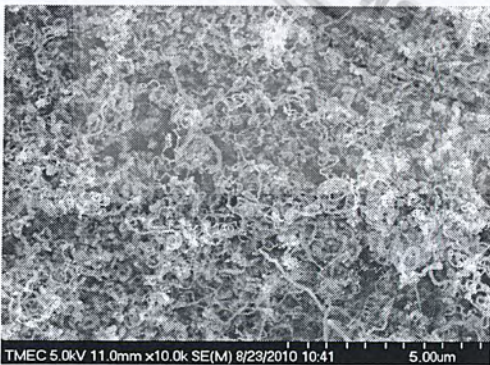
รูปที่ 4.2.1 (ก) : S10-Fr0.5 กำลังขยาย 30 K



รูปที่ 4.2.1 (ข) : S10-Fr0.5 กำลังขยาย 50 K

4.2.2 S11-Fr1 : $C_{10}H_{10}Fe + Al_2O_3 + C_2H_5OH : (1:0.1:100)$

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



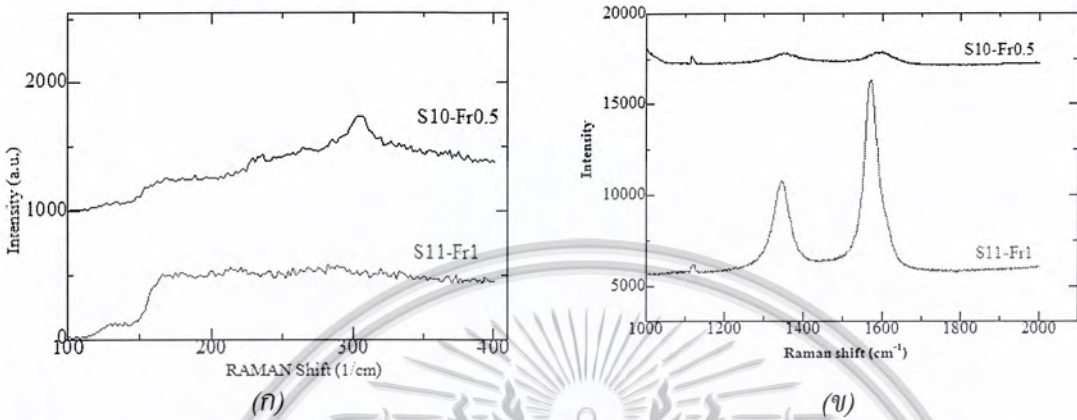
รูปที่ 4.2.2 (ก) : S11-Fr1 กำลังขยาย 10K



รูปที่ 4.2.2 (ข) : S11-Fr1 กำลังขยาย 30 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของ RAMAN เมื่อเปลี่ยนอัตราคาร์บอนไฟลของก๊าซนำพา (Ar)

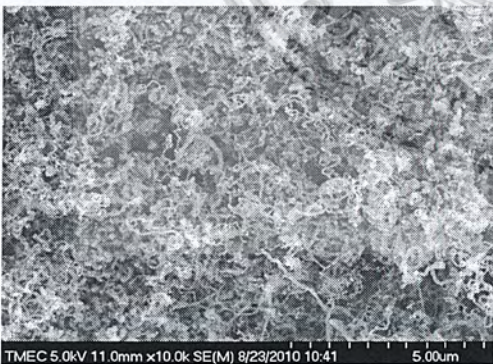


รูปที่ 4.2.3 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์เมื่อศึกษาอัตราคาร์บอนไฟลของก๊าซนำพา (Ar) ในโหมด (ก) ความถี่ RBM, (ข) ความถี่สูง

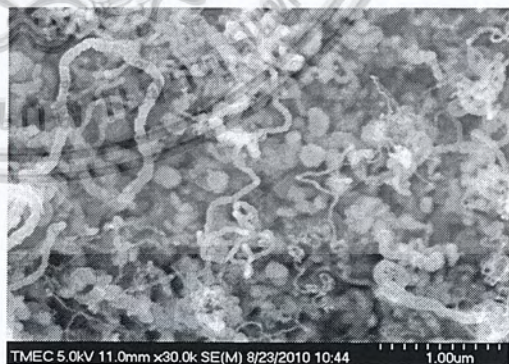
4.3 ศึกษาการทดลองเปลี่ยนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็น Co
ผลจากภาพถ่าย SEM

4.3.1) S11-Fr1 : $C_{10}H_{10}Fe + Al_2O_3 + C_2H_5OH : (1:0.1:100)$

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



รูปที่ 4.3.1 (ก) : S11-Fr1 กำลังขยาย 10K



รูปที่ 4.3.1 (ข) : S11-Fr1 กำลังขยาย 30K

4.3 ศึกษาทดลองเปลี่ยนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็น Co (ต่อ)

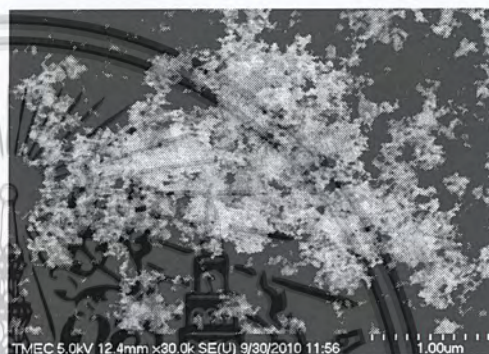
ผลจากภาพถ่าย SEM

4.3.2) CoS19-N1 : $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (98.999%) + $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (1:100)

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



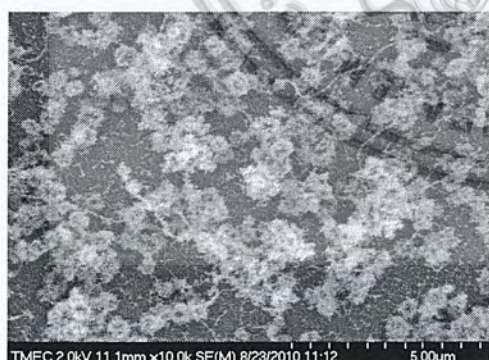
รูปที่ 4.3.2 (ก) : CoS19-N1 กำลังขยาย 10K



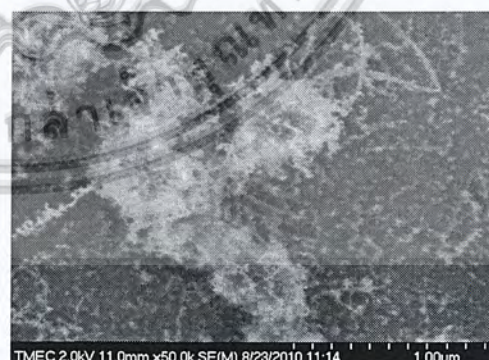
รูปที่ 4.3.2 (ข) : CoS19-N1 กำลังขยาย 30K

4.3.3) CoS13-N1 : $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (98.999%) + Al_2O_3 + $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (1:0.1:100)

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



รูปที่ 4.3.3 (ก) : CoS13-N1 กำลังขยาย 10K



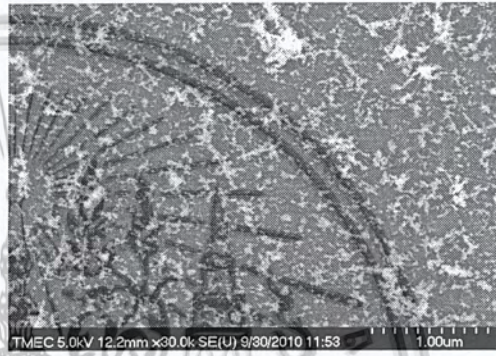
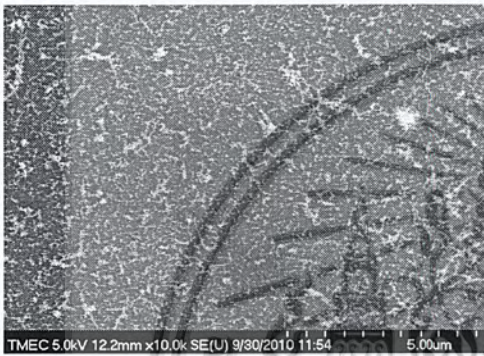
รูปที่ 4.3.3 (ข) : CoS13-N1 กำลังขยาย 50K

4.3 ศึกษาทดลองเปลี่ยนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็น Co (ต่อ)

ผลจากภาพถ่าย SEM

4.3.4 CoS16-N1 : $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (98.999%) + Al_2O_3 + $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (1:0.1:100)

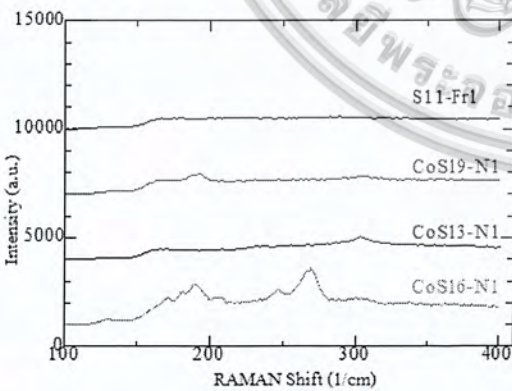
เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



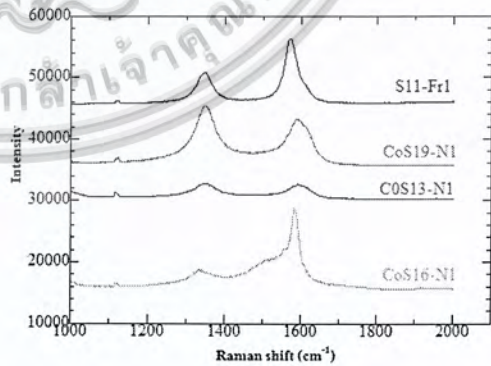
รูปที่ 4.3.4 (ก) : CoS16-N1 กำลังขยาย 10K

รูปที่ 4.3.4 (ข) : CoS16-N1 กำลังขยาย 50K

ผลของ RAMANเมื่อเปลี่ยนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3.5 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์เมื่อศึกษาทดลองเปลี่ยน โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็น Co ในโหมด (ก) ความถี่ RBM, (ข) ความถี่สูง

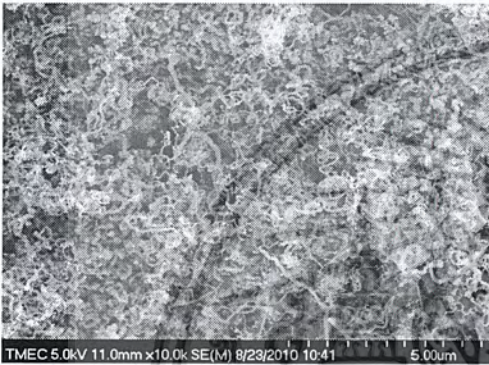
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 0.1 และ 0.2 wt%

ผลจากภาพถ่าย SEM

4.4.1) S11-Fr1 : $C_{10}H_{10}Fe + Al_2O_3 + C_2H_5OH : (1:0.1:100)$

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



รูปที่ 4.4.1 (ก) : S11-Fr1 กำลังขยาย 10K



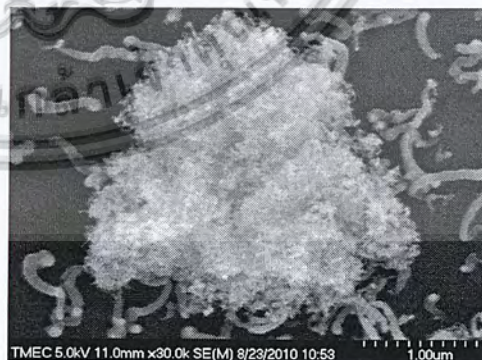
รูปที่ 4.4.1 (ข) : S11-Fr1 กำลังขยาย 30K

4.4.2) FAS8-N0.2 : $C_{10}H_{10}Fe + Al_2O_3 + C_2H_5OH : (1:0.2:100)$

เงื่อนไข : อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



รูปที่ 4.4.2 (ก) : FAS8-N0.2 กำลังขยาย 10K



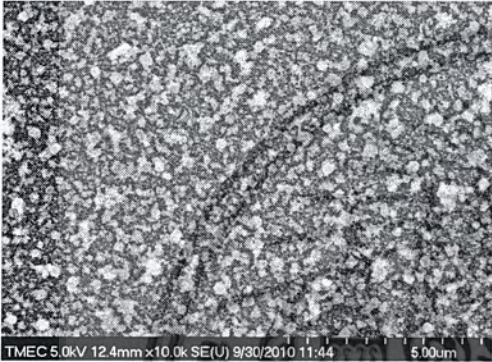
รูปที่ 4.4.2 (ข) : FAS8-N0.2 กำลังขยาย 30K

4.4 ศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ (ต่อ)

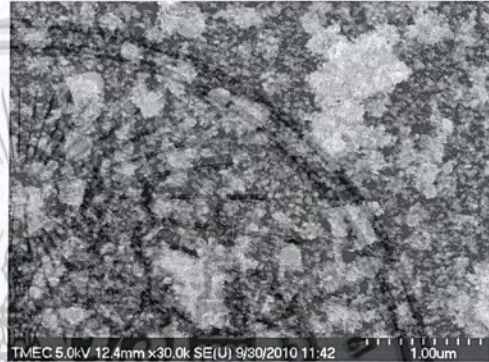
ผลจากภาพถ่าย SEM

4.4.3) FS24-Fr0.5 : $C_{10}H_{10}Fe + C_2H_5OH : (1:100)$

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 0.5 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



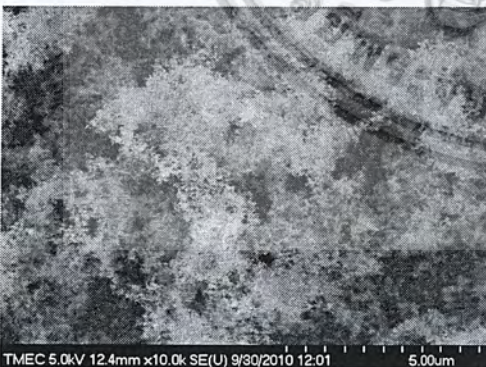
รูปที่ 4.4.3 (ก) : FS24-Fr0.5 กำลังขยาย 10K



รูปที่ 4.4.3 (ข) : FS24-Fr0.5 กำลังขยาย 30K

4.4.4) FAIS27-Fr0.5 : $C_{10}H_{10}Fe + C_{15}H_{21}AlO_6 + C_2H_5OH : (0.9:0.1:100)$

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 0.5 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



รูปที่ 4.4.4 (ก) : FAIS27-Fr0.5 กำลังขยาย 10K



รูปที่ 4.4.4 (ข) : FAIS27-Fr0.5 กำลังขยาย 30K

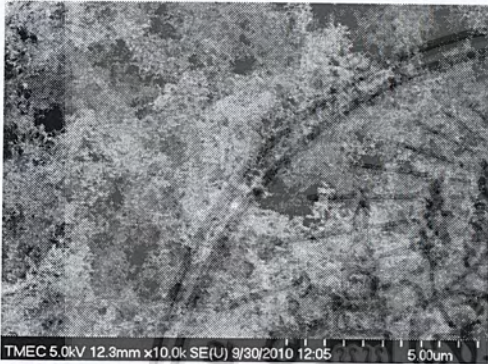
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ (ต่อ)

ผลจากภาพถ่าย SEM

4.4.5 FAIS28-Fr0.5 : $C_{10}H_{10}Fe + C_{15}H_{21}AlO_6 + C_2H_5OH$: (0.8:0.2:100)

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 0.5 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที

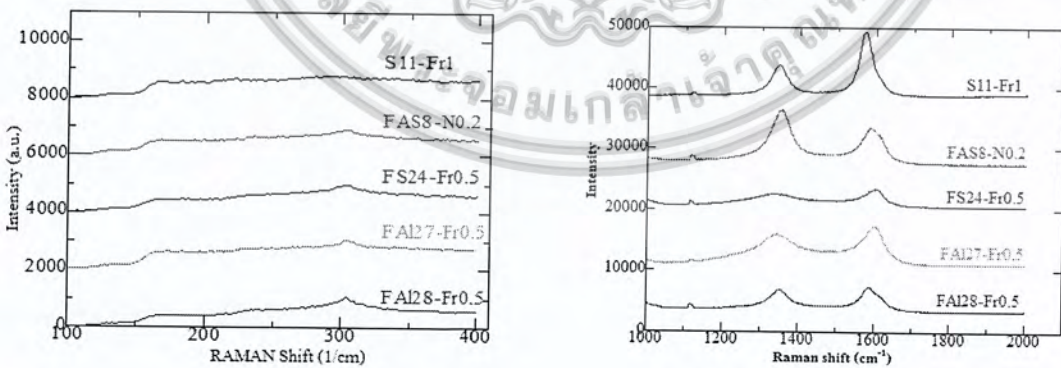


รูปที่ 4.4.5 (ก) : FAIS28-Fr0.5 กำลังขยาย 10K



รูปที่ 4.4.5 (ข) : FAIS28-Fr0.5 กำลังขยาย 30K

ผลของ RAMAN เมื่อศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ



รูปที่ 4.4.6 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์เมื่อศึกษาความเข้มข้นของการเติมตัวรองรับ
ในโหมด (ก) ความถี่ RBM, (ข) ความถี่สูง

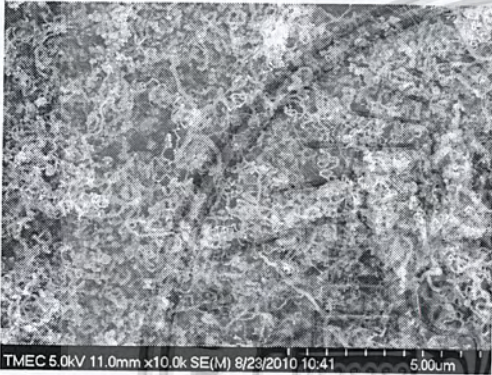
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ 120 นาที ในสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

ผลจากภาพถ่าย SEM

4.5.1) S11-Fr1 : $C_{10}H_{10}Fe + Al_2O_3 + C_2H_5OH : (1:0.1:100)$

เงื่อนไข อุณหภูมิ 650 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 30 นาที



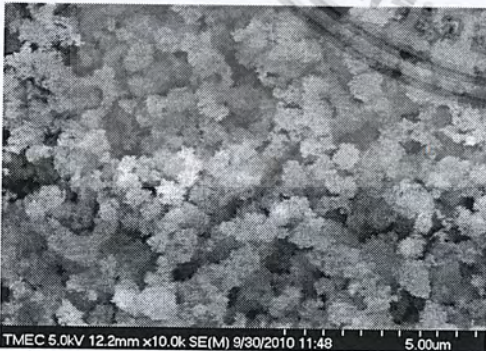
รูปที่ 4.5.1 (ก) : S11-Fr1 กำลังขยาย 10K



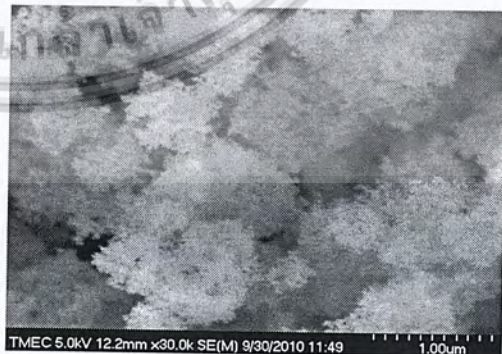
รูปที่ 4.5.1 (ข) : S11-Fr1 กำลังขยาย 30K

4.5.2) FAS26-Fr1 : $C_{10}H_{10}Fe + Al_2O_3 + C_2H_5OH : (1:0.1:100)$

เงื่อนไข อุณหภูมิ 700 องศา Flow rate 1 L/min เวลาตีหมอก 120 นาที



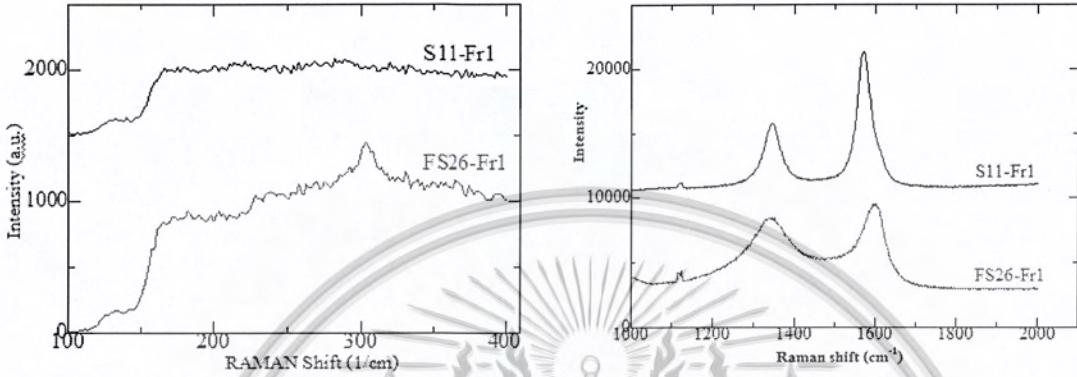
รูปที่ 4.5.2 (ก) : FAS26-Fr1 กำลังขยาย 10K



รูปที่ 4.5.2 (ข) : FAS26-Fr1 กำลังขยาย 30K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของ RAMAN เมื่อศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 4.5.3 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์เมื่อศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา
ในโหมด (ก) ความถี่ RBM, (ข) ความถี่สูง

ตารางที่ 4.6 สรุปปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์

ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา		ผลจากSEM
ศึกษาปัจจัยการเติมตัวรองรับ (Supporter)	-ไม่มี Al_2O_3 เป็นตัวรองรับ	-ทิวป์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่
	-มี Al_2O_3 เป็นตัวรองรับ	-ทิวป์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก
	-มี $C_{15}H_{21}AlO_6$ เป็นตัวรองรับ	-ทิวป์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างเล็ก
ศึกษาอัตราการไหลของก๊าซ นำพา(Ar)	-0.5 L/min	-ทิวป์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก
	-1 L/min	-ทิวป์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่และหนาแน่นมาก
ศึกษาทดลองเปลี่ยนโลหะ ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe เป็น Co	-Co	-ทิวป์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ทิวป์สั้นความหนาแน่นน้อย แต่มีความบริสุทธิ์มาก
ศึกษาความเข้มข้นของการเติม Al_2O_3 และ $C_{15}H_{21}AlO_6$ เป็นตัวรองรับ	-ความเข้มข้นน้อย	-ทิวป์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก และมีความหนาแน่นมาก
	-ความเข้มข้นมาก	-ทิวป์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ทิวป์สั้นและหนาแน่นน้อย
ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา	-30 นาที	-ทิวป์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ และมีความหนาแน่นมาก
	-120 นาที	-เกิดทิวป์ไม่ดี มีสิ่งแปลกปลอมมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

โครงการฉบับนี้เป็นการศึกษาและทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยวิธี Mist-CVD ด้วยเทคนิค Floating Catalysts เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่ดีที่สุดที่ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียวโดยนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์รวมถึงความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์จาก SEM และ Raman Spectroscopy กระบวนการในการสังเคราะห์ในครั้งนี้เริ่มต้นจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยใช้ เอทานอล (C_2H_5OH), เหล็ก ($C_{10}H_{10}Fe$), โคลบอลทอะซิเตท ($Co(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$) เป็นต้นกำเนิดของ C, Fe และ Co ตามลำดับ จากนั้นได้เพิ่ม Al_2O_3 และ $C_{15}H_{21}AlO_6$ เป็นตัวรองรับ (Supporter) เนื่องจากโครงสร้างของสารทั้งสองช่วยเพิ่มพื้นที่ในการปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทุกเงื่อนไขได้ศึกษาในสภาวะ CVD ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้แบ่งการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากตัวรองรับโดยใช้ Al_2O_3 และ $C_{15}H_{21}AlO_6$ เป็นตัวรองรับ (Supporter) เมื่อวิเคราะห์ผลจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างเล็ก เมื่อเทียบกับคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ไม่เติมตัวรองรับ ทั้งนี้เนื่องจาก Al_2O_3 และ $C_{15}H_{21}AlO_6$ ช่วยป้องกันไม่ให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยารวมตัวกัน ทั้งนี้เมื่อโลหะเกิดการรวมตัวกันจะทำให้อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งก็จะส่งผลทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น

เมื่อศึกษาผลจากอัตราการไหลของก๊าซนำพา (Ar) โดยมีอัตราการไหล 0.5 L/min และ 1 L/min จากการวิเคราะห์ผลจาก SEM พบว่าการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่อัตราการไหลของก๊าซนำพาที่ 0.5 L/min คาร์บอนนาโนทิวป์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างเล็ก เมื่อเทียบกับอัตราการไหลที่ 1 L/min ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเร็วก๊าซที่ต่ำกว่าจึงสามารถเคลื่อนที่เข้าใกล้ฐานรองได้ดีกว่ากรณีที่ก๊าซมีความเร็วสูง อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์รามาน พบว่าอัตราไหลของก๊าซนำพาที่ 1 L/min มีความเข้มพีค G ต่อ ความเข้มพีค D สูง ซึ่งพีค G คือค่าที่แสดงถึงความสมบูรณ์ของพันธะกราฟิต์ และค่า D คือค่าที่แสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของผลึก

เมื่อศึกษาเรื่องของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe และ Co ซึ่งมีความบริสุทธิ์สารเคมี 99.999% จากการวิเคราะห์ผลจาก SEM พบว่า Fe มีคาร์บอนนาโนทิวป์ความหนาแน่นค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับ Co และจากการวิเคราะห์ผลจากรามานทำให้ทราบว่า โลหะตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อความบริสุทธิ์ของท่อ

โดยเมื่อใช้ Co เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ผลทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ มีความบริสุทธิ์สูงกว่าใช้ Fe

เมื่อศึกษาเรื่องอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น โดยแบ่งออกเป็น 2 ตอน (1) เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของตัวรองรับ Al_2O_3 เป็น 0.1 wt% และ 0.2 wt% จากการวิเคราะห์ผลจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์จากการสังเคราะห์โดยใช้ Al_2O_3 ที่ 0.1 wt% มีความหนาแน่นและมีความยาวของท่อมากขึ้น แต่ก็พบว่ามีสิ่งแปลกปลอมค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับการสังเคราะห์โดย Al_2O_3 ที่ 0.2 wt% จากการวิเคราะห์ผลรามาน โดยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มี Al_2O_3 ที่ 0.1 wt% มีความสมบูรณ์ของผลึกมากกว่าในตอน (2) การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยเปลี่ยนชนิดของตัวรองรับเป็น $C_{15}H_{21}AlO_6$ และ Fe ที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยเมื่อสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ Fe มีความเข้มข้นมากและ $C_{15}H_{21}AlO_6$ มีความเข้มข้นน้อย พบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก มีความสมบูรณ์ของพันธะมากกว่าการสังเคราะห์จาก Fe ที่มีความเข้มข้นน้อย และ $C_{15}H_{21}AlO_6$ มีความเข้มข้นมาก

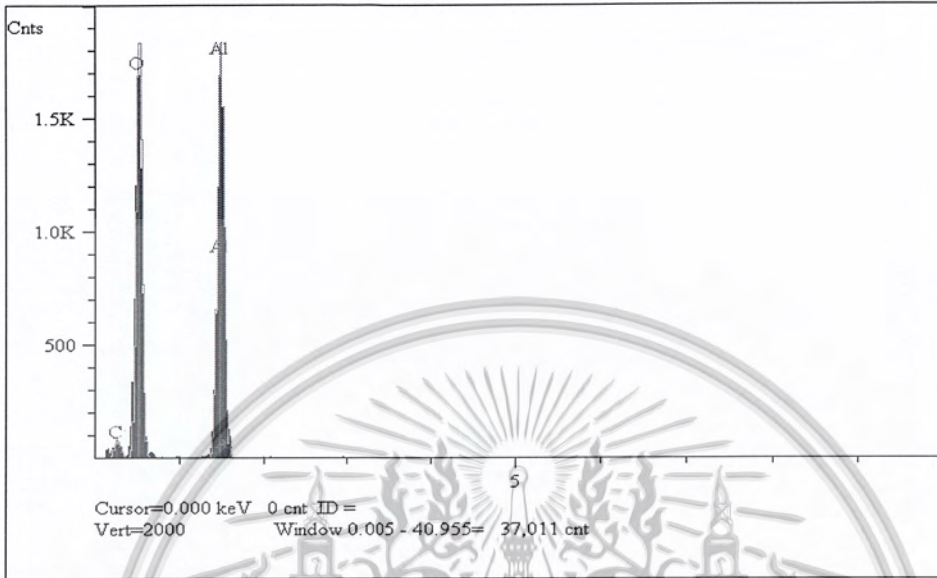
เมื่อศึกษาเรื่องเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างกัน 30 นาทีและ 120 นาที การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ 30 นาที พบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก มีความหนาแน่นของท่อสูง และความสมบูรณ์ของพันธะก็มากกว่าที่เวลา 120 นาที ทั้งนี้คงเป็นเพราะเวลาในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ 120 นาที นานเกินไปเป็นผลให้คาร์บอนเกิดการทับถมกันเป็นฟิล์มที่หนา จึงทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกขึ้น

จากการศึกษาเรื่องปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ ทำให้เราทราบว่าแต่ละปัจจัยส่งผลกระทบต่อ การเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์แตกต่างกันอย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการศึกษาเงื่อนไขปัจจัยต่างๆอีกเพิ่มเติมเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] ทรงศักดิ์ น้อยทรัพย์, “การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์อย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ” ปรินญาณิพนธ์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548, หน้า 48-74
- [2] “ท่อนาโนคาร์บอน”, <http://www.technologymedia.com/article/detail.asp?arid=2484&pid=257>
- [3] พิษณุ นาด จิวสิทธิ์ประไพ, “การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีเทอร์มอลซีวีดีจาก แอลกอฮอล์” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549, หน้า 6-29
- [4] สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์, จิตี หนูแก้ว, “งานวิจัยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยวิธี CVD”, LAB.TODAY, ปีที่ 46, สิงหาคม 2546, หน้า 14-20
- [5] กมลวรรณ อุ่นสมบัติ, กิตติพงษ์ จันทรมัสการ, จริญญา นิ่มบุญ, “การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียวโดยใช้วิธี MIST-CVD” ปรินญาณิพนธ์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550, หน้า 1-40

ภาพผนวก



Elt.	Line	Intensity(c/s)	Error2-sig	Conc	Units
C	Ka	15.10	1.099	11.926	wt.%
O	Ka	316.95	5.035	71.205	wt.%
Al	Ka	366.68	5.416	16.868	wt.%
				100.000	wt.%

คำนวณหาจำนวนอะตอมของธาตุ $\frac{\%wt}{\text{มวลอะตอม}} = \text{จำนวนอะตอม}$

$$C = \frac{11.926}{12} = 0.994 \text{ อะตอม หรือ } 8 \text{ อะตอม หรือ } \% \text{ โดยอะตอม} = 16.67\%$$

$$O = \frac{71.205}{16} = 4.450 \text{ อะตอม หรือ } 35 \text{ อะตอม หรือ } \% \text{ โดยอะตอม} = 72.92\%$$

$$Al = \frac{16.868}{27} = 0.625 \text{ อะตอม หรือ } 5 \text{ อะตอม หรือ } \% \text{ โดยอะตอม} = 10.42\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้