

**การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวอย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1**

**บรรยากาศ**

**The Simplified Deposition Method for Carbon nanotubes Using CVD at one  
Atmosphere**



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... **62357**  
วัน,เดือน,ปี. **16 ส.ค. 2549**

**11629515**  
.b.....  
.i.....

**ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวอย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1

บรรยากาศ

The Simplified Deposition Method for Carbon nanotubes Using CVD at one  
Atmosphere



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เรื่อง การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวอย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1  
บรรยากาศ

ผู้จัดทำ

นาย ปฎิคม ศรีชมพล รหัส 46015229

(ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวอย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

นาย ปฎิคม ศรีชมพล

รหัส 46015229

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์อย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ
นักศึกษา	นาย ปฎิคม ศรีชมพล รหัส 46015229
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์
ระดับการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ภาควิชา	อิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา	2548

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

(ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์อย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความ ดัน 1 บรรยากาศ

นาย ปฎิคม ศรีชมพล รหัส 46015229  
ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2548

## บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์อย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ เพื่อให้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้อย่างต่อเนื่องในปริมาณมากๆ โดยใช้แอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน และได้ทำการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสม รวมถึงเงื่อนไขอื่นๆ ที่เป็นตัวแปรสำคัญต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์จะได้นำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes) และสเปกโตรสโกปีรามาน (Raman Spectroscopy) ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมนี้ สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ โดยมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 50 nm แต่อย่างไรก็ตาม คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ยังมีอนุภาคของคาร์บอนเกาะอยู่รอบๆ

# **The Simplified Deposition Method for Carbon nanotubes by using chemical vapor deposition at one Atmosphere**

Mr. Patikom Srichompol ID.46015229

Dr. Sutichai Chaisitsak Advisor

Educational Year 2005

## **ABSTRACT**

We present the simplified method for carbon nanotubes (CNTs) by using chemical vapor deposition (CVD) at atmospheric pressure. In order to synthesize the amount of CNTs continuously. Pure ethanol, were used as a carbon source. The influences of the grow condition, such as temperature, on the formation of CNTs were investigated. The obtained CNTs were characterized by Scanning Electron Microscopes and Raman Spectroscopy. Under the optimal growth condition, CNTs with a diameter less than 50 nm could be obtained. However, the CNTs were contaminated with carbon particles.

## กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ เกิดขึ้นด้วยความกรุณาของ ดร.สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ ในการให้คำแนะนำปรึกษา แนวทางในการแก้ไขปัญหา และการสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ขอขอบคุณ คุณ บัณฑิต สำหรับภาพถ่าย SEM ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่ได้มอบสั่งสอนข้าพเจ้า และขอขอบคุณ คุณ ณชรพรช และรุ่นพี่ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำที่ดี ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา



(นาย ปุ๊กกิม ศรีชมพล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวป์	3
2.1 ประวัติที่มาของคาร์บอนนาโนทิวป์	3
2.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์	4
2.3 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	5
2.3.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว	5
2.3.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น	7
2.4 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	8
2.4.1 Base Growth	8
2.4.2 Tip Growth	8
2.5 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์	9
2.6 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	12
2.6.1 วิธี Arc discharge	12
2.6.2 วิธี Laser ablation	13
2.6.3 วิธี Chemical vapor deposition (CVD)	14
2.6.3.1 วิธี Thermal chemical vapor deposition	14
2.6.3.2 วิธี Plasma enhanced chemical vapor deposition	15
2.6.3.3 วิธี Vapor phase growth	16
2.6.3.4 วิธี High pressure CO disproportionate process	17
2.6.3.5 วิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition	18
2.7 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งาน	18
2.7.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ	19
2.7.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน	19
2.7.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	20
2.7.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ ( Probe) เซนเซอร์	21
2.7.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน	23
บทที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	24
3.1 หลักการทำงานทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	24
3.2 ประเภทและการนำไปใช้งานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

3.2.1 TEMs	25
3.2.2 SEMs	25
3.3 ระบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	26
3.3.1 ระบบการทำงานของ TEMs	26
3.3.2 ระบบการทำงานของ SEMs	28
3.4 วิธีการการใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพ	29
<b>บทที่ 4 การทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Hot-filament CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ</b>	<b>30</b>
4.1 อุปกรณ์และสารเคมี	30
4.2 ขั้นตอนและวิธีทำการทดลอง	31
4.2.1 การเตรียมสารตัวเร่งปฏิกิริยา	31
4.2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ผลการทดลอง	32
4.3 ผลการทดลอง	34
4.3.1 ผลของอุณหภูมิฐานรอง	34
4.3.2 ผลของอัตราการใช้ของก๊าซนำพา	37
4.3.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์	42
4.3.4 ผลของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา	44
<b>บทที่ 5 การทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่อเนื่องจากละอองไอของแอลกอฮอล์ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ</b>	<b>47</b>
5.1 อุปกรณ์และสารเคมี	47
5.2 ขั้นตอนและวิธีทำการทดลอง	48
5.2.1 การเตรียมสารตัวเร่งปฏิกิริยา	48
5.2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ผลการทดลอง	49
5.3 ผลการทดลอง	51
5.3.1 ผลของผลของอุณหภูมิ	51
5.3.2 ผลของตำแหน่งการวางแผ่นตัวอย่างในท่อแก้ว	53
5.3.3 ผลของปริมาณละอองหมอก	56
5.3.4 ผลของน้ำที่ผสมเข้าไปในสารละลายระหว่างฟลูโรเซนกับแอลกอฮอล์	59
5.3.5 ผลของการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	62
6.1 สรุปผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Hot-filament CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ	62
6.2 สรุปผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่อเนื่องจากละอองไอ แอลกอฮอล์และฟลูโรเซน ที่ความดัน 1 บรรยากาศ	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติต่างของคาร์บอนนาโนทิวป์

11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	วัสดุที่มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนที่แตกต่างกัน	4
รูปที่ 2.2	การม้วนของแผ่นกราฟีน	5
รูปที่ 2.3	ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (SWNTs)	6
รูปที่ 2.4	ภาพอธิบายการม้วนแผ่นกราฟีนเป็นท่อคาร์บอนนาโนทิวป์	6
รูปที่ 2.5	คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดจากการม้วนแต่ละแบบ (Armchair, Zigzag, Chiral)	7
รูปที่ 2.6	ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (MWNTs)	7
รูปที่ 2.7	กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	9
รูปที่ 2.8	ภาพการทดสอบความยืดหยุ่นของคาร์บอนนาโนทิวป์	10
รูปที่ 2.9	การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์	10
รูปที่ 2.10	วิธี Arc discharge	12
รูปที่ 2.11	วิธี Laser ablation	13
รูปที่ 2.12	ระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition	15
รูปที่ 2.13	ระบบของวิธี Plasma enhanced CVD	15
รูปที่ 2.14	ระบบของวิธี Vapor phase growth	16
รูปที่ 2.15	ระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process	17
รูปที่ 2.16	แสดงระบบของวิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition	18
รูปที่ 2.17	ลักษณะ Single-molecule Transistor	20
รูปที่ 2.18	เซมิคอนดักเตอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ สำหรับตรวจวัดก๊าซหรือสารโมเลกุลอื่นๆ	21
รูปที่ 2.19	เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจับกับหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	22
รูปที่ 2.20	ภาพจาก AFM ของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ตรึงอยู่บน SWNTs	23
รูปที่ 3.1	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEMs	25
รูปที่ 3.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEMs	26
รูปที่ 3.3	แผนภาพการทำงานของ TEMs	26
รูปที่ 3.4	แผนภาพการทำงานของ SEMs	28
รูปที่ 4.1	ภาพถ่าย SEM ของแผ่นตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมสารตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว	31
รูปที่ 4.2	แสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Hot-filament CVD (HF-CVD) ที่ความดัน 1 บรรยากาศ	32
รูปที่ 4.3	การไล่อากาศออกจากระบบ	33

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.4	กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	33
รูปที่ 4.5	ภาพถ่ายขณะทำการทดลอง	34
รูปที่ 4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่ฐานรองที่ระยะระหว่างฐานรองกับขดลวดความร้อนค่าต่างๆ	35
รูปที่ 4.7	ภาพถ่าย SEM ที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่างๆ	37
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ของก๊าซนำพา กับปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เข้าไปใน Chamber	38
รูปที่ 4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ของก๊าซนำพา กับอุณหภูมิที่ฐานรอง	39
รูปที่ 4.10	ภาพถ่าย SEM ที่อัตราการใช้ของก๊าซนำพา ค่าต่างๆ	41
รูปที่ 4.11	ภาพถ่ายขดลวดความร้อน ก่อนทำการทดลอง และหลังทำการทดลองที่อัตราการใช้ของก๊าซนำพา ค่าต่างๆ	41
รูปที่ 4.12	ภาพถ่าย SEM ที่การสังเคราะห์ในเวลาต่างๆ กัน	43
รูปที่ 4.13	แบบจำลองผลของการเตรียมแผ่นตัวอย่างในจำนวนครั้งที่ต่างกัน	44
รูปที่ 4.14	ภาพถ่าย SEM ของแผ่นตัวอย่างที่ความหนาแน่นของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน	46
รูปที่ 5.1	ภาพถ่ายจริงของขั้นตอนการเตรียมสารละลายโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา	48
รูปที่ 5.2	โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	49
รูปที่ 5.3	กระบวนการไล่อากาศออกจากระบบ	50
รูปที่ 5.4	กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	50
รูปที่ 5.5	ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายได้จากแผ่นตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน	52
รูปที่ 5.6	กราฟ Raman Spectroscopy ที่วัดได้จากแผ่นตัวอย่าง ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน	53
รูปที่ 5.7	กราฟอัตราส่วน $I_G/I_D$ ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน	53
รูปที่ 5.8	กราฟแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในท่อควอทซ์ เมื่ออุณหภูมิภายในท่อแก้วมีค่า $830^{\circ}\text{C}$ (ควบคุมอุณหภูมิภายนอกให้คงที่ที่ $700^{\circ}\text{C}$ )	54
รูปที่ 5.9	ภาพแสดงตำแหน่งการวางแผ่นตัวอย่างในการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	54

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 5.10 ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายจากแผ่นตัวอย่างที่มีตำแหน่งการวางที่ต่างกัน	55
รูปที่ 5.11 ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายจากแผ่นตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการจ่ายแรงดันที่ค่าต่างๆกัน	58
รูปที่ 5.12 ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายจากแผ่นตัวอย่างที่ได้มีผสมน้ำ DI และแผ่นตัวอย่างที่ไม่ได้มีผสมน้ำ DI เข้าไปในสารละลายระหว่างฟลูโรเซนกับแอลกอฮอล์	59
รูปที่ 5.13 ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายจากแผ่นตัวอย่างที่ไม่ได้มีการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์ และแผ่นตัวอย่างที่ได้มีการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

หลังจากที่มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์ carbon nanotubes : CNTs เมื่อปี ค.ศ.1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) งานวิจัยด้านนี้ก็ได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากคุณสมบัติที่เด่นในหลายทาง กล่าวคือ คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น มีค่าความแข็งแรง และความยืดหยุ่นมากกว่าวัสดุใดๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีความสามารถในการนำกระแสได้ดี และเป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวกเตอร์การม้วนตัว หรือที่เรียกว่า “Chirality” หลังจากการค้นพบ นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลกต่างทำการศึกษาวิธีการผลิต คุณสมบัติ ตลอดจนวิธีการประยุกต์ใช้ อย่างมากมาย คาร์บอนนาโนทิวป์นั้นสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้าน ของนาโนเทคโนโลยี การประยุกต์ใช้งานนั้น จะเน้นไปทางด้านอุปกรณ์เครื่องมือกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ การกักเก็บพลังงาน ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงเซ็นเซอร์และโพรบ ซึ่งก็นับว่าเป็นความหวังของการพัฒนาอุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเคมี รวมทั้งการแพทย์ในอนาคตอีกด้วย ปัจจุบันวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์นั้นจะมี 3 วิธีหลักๆ คือ 1. การอาร์คดิสชาร์จ (Arc-discharge) 2. การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization) และ 3. CVD (Chemical Vapor Deposition) วิธี CVD เป็นวิธีที่ได้รับความสนใจมากที่สุดวิธีหนึ่ง เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีนี้มีคุณภาพและความบริสุทธิ์ที่สูง เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ และเป็นวิธีที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ วิธี CVD สามารถแบ่งแยกได้อีกหลายวิธี คือ 1) CVD แบบความร้อน (thermal CVD) 2) CVD แบบพลาสมา (Plasma enhanced CVD; PE-CVD) 3) CVD แบบ Vapor phase growth 4) CVD แบบ High pressure CO disproportionate process) 5) CVD แบบขดลวดความร้อน (hot-filament CVD; HF-CVD) ในบรรดาวิธี CVD นั้น HF-CVD เป็นวิธีที่ใช้อุปกรณ์ที่ไม่สลับซับซ้อน ใช้ค่าใช้จ่ายต่ำและสามารถสังเคราะห์ได้ทั้งคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียว (Single-wall CNTs; SWNTs) และแบบผนังหลายชั้น (Multiwalled CNTs; MWNTs) ซึ่งเหมาะกับการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ และยังสามารถเป็นต้นแบบในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้อีกด้วย

โดยการทดลองนี้ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ด้วยวิธี HF-CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ โดยใช้โดยก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) เป็นก๊าซพาหะ ใช้ขดลวดทั้งเสดตเป็นขดลวดความร้อน (Hot-Filament) ใช้แอลกอฮอล์ชนิดเอทานอล เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน และใช้เหล็ก (Fe) และ โคบอลต์

(Co) เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะผสมอยู่กับซีโอไลต์ Zeolite(ในการทดลอง ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของของอุณหภูมิที่ฐานรอง อัตราการไหลของก๊าซนำพา และระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ รวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งข้อมูลที่ได้นั้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทางเช่น นำมาเป็นต้นแบบในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ในเชิงพาณิชย์, นำมาทำเป็นตัวเซนเซอร์ก๊าซ รวมถึงการนำข้อมูลที่ได้นี้ ไปใช้ในงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ในห้องปฏิบัติการต่อไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีเกี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวป์

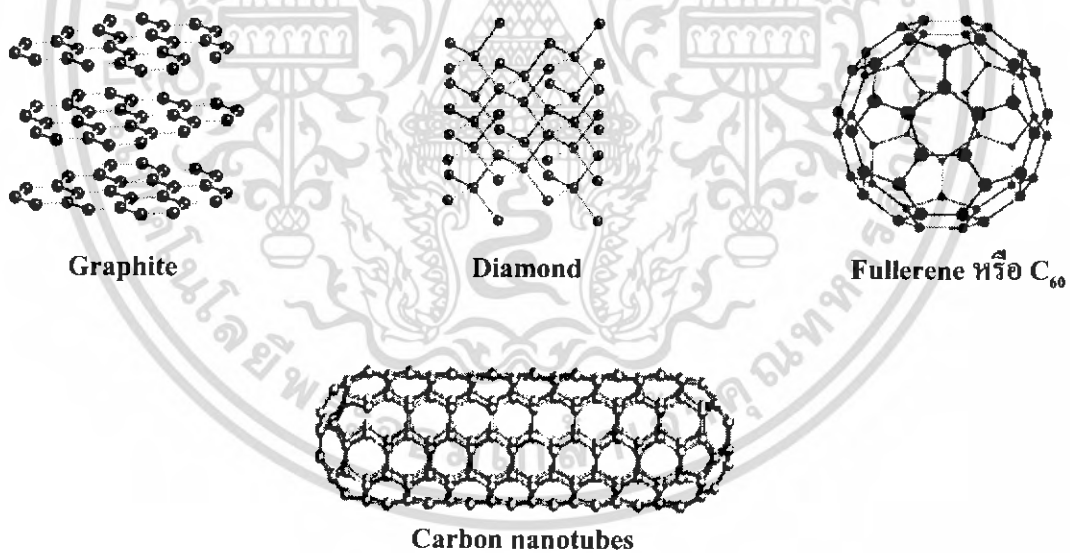
#### 2.1 ประวัติที่มาของคาร์บอนนาโนทิวป์

เมื่อกลางปี ค.ศ. 1985 ทีมวิจัยนำโดย Prof. Smalley ที่ Rice University ได้สังเคราะห์ Fullerene ที่มีโครงสร้างคล้ายทรงของอะตอมคาร์บอนที่ประกอบด้วยผิวหน้าหกเหลี่ยมและห้าเหลี่ยม โมเลกุลของ Fullerene มีคาร์บอน 60 อะตอม ซึ่งหลังจากนั้นมีการตั้งชื่อเป็น Buckminsterfullerene ตามชื่อของสถาปนิกที่ออกแบบโดมลักษณะคล้าย  $C_{60}$  ซึ่งมีหน้าห้าเหลี่ยมชิดกับหกเหลี่ยมคล้ายกับลูกฟุตบอล สองถึงหกปีต่อมาการค้นพบนี้ได้นำไปสู่การสังเคราะห์ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งเป็นท่อ Fullerene ที่ยาวได้สัดส่วน มีผนังของท่อคาร์บอนหกเหลี่ยมซึ่งมีโครงสร้างแบบกราฟไฟท์และมักมีปลายปิด ผู้ที่ค้นพบคนแรกคือ นาย สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น เป็นนักอิเล็กทรอนิกส์ไมโครสโคปปีของบริษัท NEC ค้นพบเมื่อปี ค.ศ.1991 ในห้องทดลองที่เมืองสึกุบา (Tsukuba) [1] โดยการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์ของเขานั้น เป็นความบังเอิญที่เขาทำการสังเคราะห์ Fullerene โดยวิธี Arc-evaporation แล้วพบว่าที่ขั้วคาโทดเกิดมีวัสดุโครงสร้างแบบกราฟไฟท์ ที่เป็นอนุภาคขนาดนาโน และท่อในลักษณะนี้ ไม่มีผู้ใดเคยสังเกตเห็นมาก่อน ต่อมาทีมงานของ สุมิโอะ อิจิมะ สามารถที่จะสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวได้ในปริมาณที่มาก โดยปรับสภาวะของการทำ Arc-evaporation ซึ่งท่อคาร์บอนที่ค้นพบครั้งแรกนั้นคือท่อชนิดผนังหลายชั้น จากนั้นในปี ค.ศ. 1993 หรือในสองปีถัดมา นาย สุมิโอะ อิจิมะ และนักวิจัยของบริษัทไอบีเอ็ม (IBM) ชื่อ ดอน เบทูน (Don Bethune) ได้นำเสนอรายงานวิจัยว่าสามารถสร้างท่อคาร์บอนผนังชั้นเดียวได้ โดยการเติมโลหะตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อย ในระหว่างการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนเพื่อป้องกันการม้วนตัวด้วยตัวเองของแผ่นกราฟไฟท์ และป้องกันการเกิดเป็น Fullerene ขนาดเล็ก

หลังจากที่ได้มีการค้นพบ คาร์บอนนาโนทิวป์ก็กลายเป็นที่กล่าวถึงกันมากในปัจจุบันทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเหตุผลของการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้อย่างมากมาย นับตั้งแต่การนำมาเป็นองค์ประกอบสำคัญในการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรง ชีงงานด้านอิเล็กทรอนิกส์และแสงคะตะลิสต์แบตเตอรี่ ถักเก็บพลังงานและเซนเซอร์ เพราะคาร์บอนนาโนทิวป์นี้มีเอกลักษณ์ที่เด่นในทางอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถนำความร้อนได้สูง นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีค่าความเหนียวความแข็งแรงและความยืดหยุ่นกว่าวัสดุใดๆ ในปัจจุบัน

## 2.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์

คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ประกอบขึ้นจากราตุคาร์บอน เช่นเดียวกับ เพชร (Diamond) กราไฟท์ (Graphite) ถ้ำถ่าน และ Fullerene หรือ  $C_{60}$  (รูปที่ 2.1) แต่จะมีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เพชรมีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่ 4 ตัว เกิดเป็นโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อของพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนจึงทำให้เพชรมีความแข็งแรงและคงทนมาก ขณะที่กราฟิทมีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่เพียง 3 ตัว พันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายกับรังผึ้งหรือตาข่าย เรียงกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกัน เรียกว่า แผ่นกราเฟนและมีพันธะเชื่อมต่อกันระหว่างระนาบเป็นชั้นๆ พันธะของคาร์บอนในระนาบเดียวกันของแผ่นกราฟิทนั้นแข็งแรงมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ส่วนถ้ำถ่านจากการเผาไหม้จะมีโครงสร้างคล้ายกราฟิท แต่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือที่เรียกว่า “คาร์บอนอสัณฐาน หรือ Amorphous carbon” และ Fullerene หรือ  $C_{60}$  ซึ่งมีโครงสร้างของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลมคล้ายลูกฟุตบอล ซึ่งต่างจากคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวงที่เกิดจากการม้วนของแผ่นกราเฟน



รูปที่ 2.1 วัสดุที่มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนที่แตกต่างกัน

ลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ กล่าวอย่างง่าย ๆ คือ แผ่นกราฟีนม้วนปิดเป็นท่อทรงกระบอก (รูปที่ 2.2) ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์ นั้นเป็นโมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของโครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดเล็ก สร้างมาจากคาร์บอน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตั้งกล่าวอยู่ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) และมีความตั้งแต่ระดับนาโนเมตร จนถึงระดับเซนติเมตร คาร์บอนนาโนทิวป์ จึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายล้านเท่า



รูปที่ 2.2 การม้วนของแผ่นกราฟีน

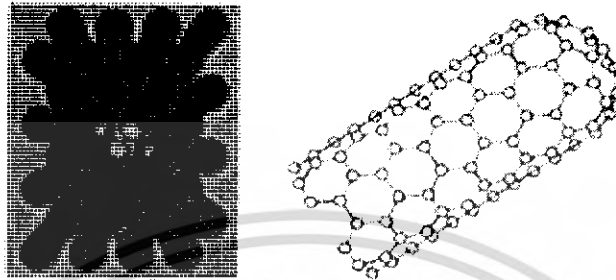
### 2.3 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ อาจแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักๆ ตาม จำนวนชั้นของผนังท่อคือ ถ้าท่อมีผนังชั้นเดียวจะเรียกว่า ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (Single-Walled Nanotubes : SWNTs) ส่วนท่อที่มีผนังหลายชั้นจะเรียกว่า ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (Multiple-Walled Nanotubes : MWNTs) ส่วนใหญ่ขนาดของ ท่อที่สังเคราะห์ได้พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณตั้งแต่ 0.4 นาโนเมตร ไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร และมีความยาว ไปจนถึงหลายเซนติเมตร และเป็นที่น่าสนใจว่าในกรณี ท่อนาโนคาร์บอนแบบมีผนังหลายชั้นนั้น ระยะห่างระหว่างแต่ละชั้นจะเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร ซึ่งระยะนี้มีค่าประมาณระยะห่างระหว่างชั้นของกราฟไฟท์

#### 2.3.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว หรือ (Single-walled nanotubes: SWNTs)

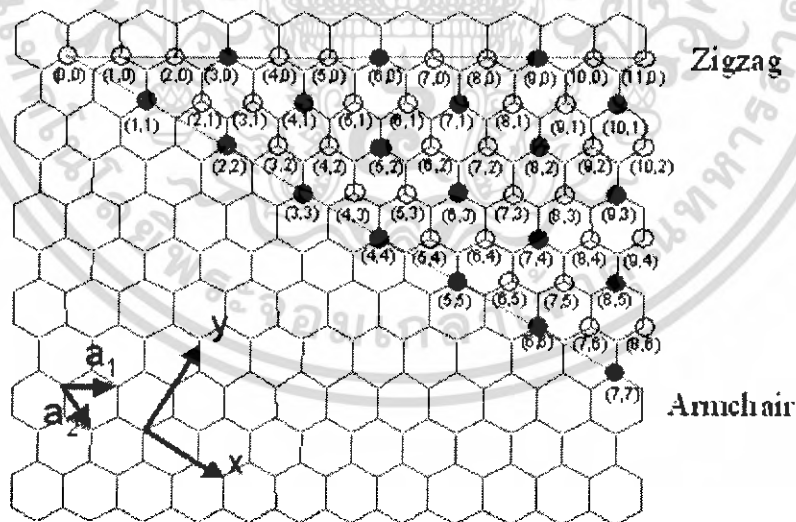
จะมีลักษณะ โครงสร้างที่คล้ายกับแผ่นกราฟไฟท์ที่ม้วนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์จึงมีผนังของอะตอมคาร์บอน ที่จัดเรียงพันธะ โคเวเลนซ์ระหว่างอะตอมเป็นวง

แหวนหกเหลี่ยม และอาจมีบริเวณที่ปลายของท่อปิดด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของคาร์บอน ที่มีโครงสร้างคล้ายครึ่งหนึ่งของ Fullerene ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (SWNTs)

ลวดลายตามผนังของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียวนั้น อาจมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันอาจแบ่งออกได้ 3 แบบ ตามการม้วนแผ่นกราฟิตด้วยมุมบิดที่ต่างกัน คือ โครงสร้างท่อแบบ Armchair ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟิตตามแนวสมมาตรแกนตั้ง โครงสร้างท่อแบบ Zigzag ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟิตตามแนวสมมาตรแกนนอน และ โครงสร้างท่อแบบ Chiral ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟิตด้วยมุมบิดอื่นๆ ต่างจากสองแบบแรก ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพอธิบายการม้วนแผ่นกราฟิตเป็นท่อคาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

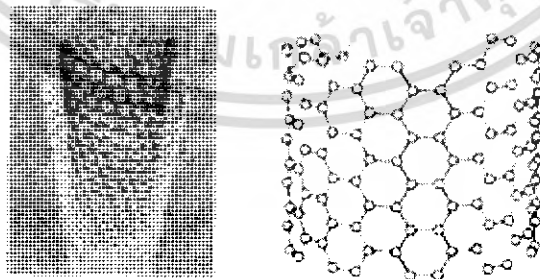
จากรูปที่ 2.4 ลักษณะของการม้วนของคาร์บอนนาโนทิวป์ แบบ Zigzag แบบ Armchair และแบบ Chiral สามารถอธิบายได้คือ การม้วนแบบ Zigzag นั้นจากรูปจะพิจารณาเส้นที่ลากจากจุด (0,0) ไปยังจุด (0,10) เป็นแกนและทำการม้วนตามแนวแกน ซึ่งมุมในการม้วนก็คือ  $0^{\circ}$  ก็จะได้เป็น Zigzag nanotubes และเส้นที่ลากจากจุด (0,0) ไปยังจุด (7,7) ซึ่งเป็นมุม  $30^{\circ}$  และม้วนตามมุมนั้นก็จะได้ Armchair nanotubes แต่ถ้าทำการม้วนตามมุมอื่นๆ ที่ไม่ใช่มุม  $0^{\circ}$  และมุม  $30^{\circ}$  คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะเรียกว่า Chiral nanotubes [3] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดจากการม้วนแต่ละแบบ (Armchair, Zigzag, Chiral)

### 2.2.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น หรือ (Multi-walled nanotubes : MWNTs)

ผนังของท่อมีลักษณะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกัน และมีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (MWNTs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

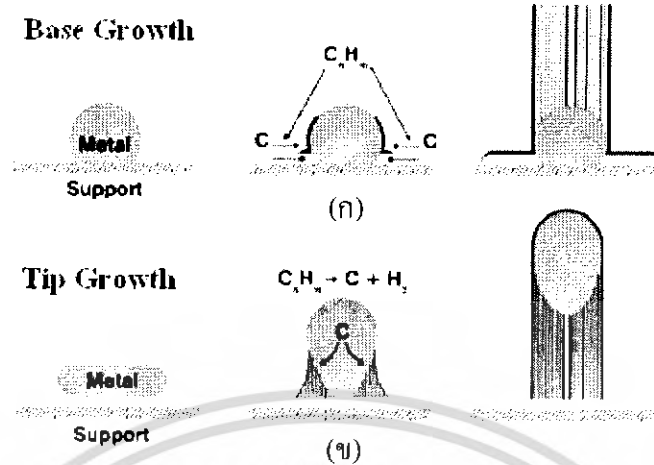
กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ยังไม่สามารถสรุปได้เป็นที่แน่ชัด และยังคงเป็นหัวข้อให้ถกเถียงกันในปัจจุบัน ซึ่งกลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ อาจจะถูกเปิดเผยขึ้นในระหว่างที่คาร์บอนนาโนทิวป์ก่อตัวขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดอาจแบ่งได้ 2 ลักษณะตามลักษณะการก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์คือ กลไกการเกิดแบบ Base Growth และกลไกการเกิดแบบ Tip Growth ซึ่งจะมีความแตกต่างกันโดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.4.1 Base Growth

จะเป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ คือในอุณหภูมิที่สูงพอเหมาะที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิที่สูงจะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าด้านบน ทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบน ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.7 (ก)

### 2.4.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ปลายท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ คือที่อุณหภูมิสูงพอเหมาะที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิที่สูงจะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะสูงกว่าด้านล่างทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาดกกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.7 (ข)



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) เกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Base Growth (ข) เกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Tip Growth

## 2.5 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์

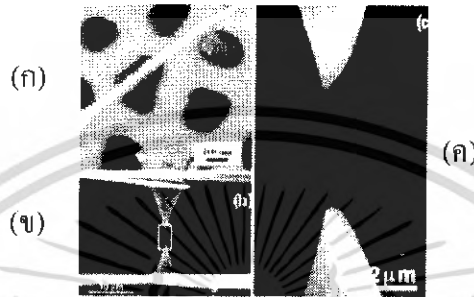
คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น มีคุณสมบัติหลายประการด้วยกันโดยสามารถยกตัวอย่างคุณสมบัติที่เด่นๆได้ดังต่อไปนี้ เช่น

- ความแข็งแรง ซึ่งก็เป็นที่รู้กันดีว่าโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์แข็งแรงมาก มากกว่าเพชรและกราไฟท์ เพชรนั้นมีความแข็งแรงมากด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของกราไฟท์นั้นคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกัน และอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราไฟท์ (กราเฟน) มีความแข็งแรงมาก(มากกว่าเพชร) แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังกล่าวรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ แข็งแรงกว่าเพชรและกราไฟท์

- ความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ค่าความยืดหยุ่นของคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่าสูงถึง 1 เทราปาสคาล (Tpa) หรือ 1000 กิกะปาสคาล (Gpa) วิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นนี้ทำได้หลายวิธีเช่น โดยอาศัย Thermal Vibration หรือใช้ Scanning Force Microscopy ไปงอคาร์บอนนาโนทิวป์โดยยึดปลายหนึ่งไว้แล้ววัดการสั่นสะเทือนในสนามไฟฟ้า และมีการใช้ Atomic Force Microscopy (AFM) เพื่อวัดตรงกลางแท่งนาโนที่วางอยู่บน Nanopores เพื่อวัดค่าความยืดหยุ่น ได้มีการ

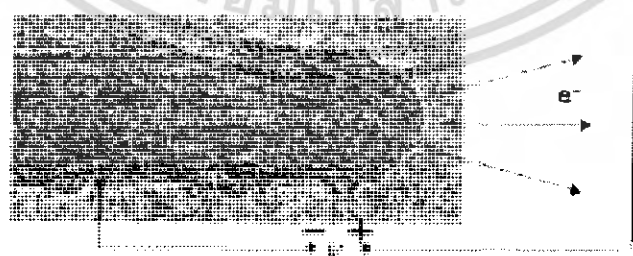
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ AFM จับคาร์บอนนาโนทิวป์ทั้งสองข้างแล้วดึงจนขาดเพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) (รูปที่ 2.8) ความแข็งแรงของคาร์บอนนาโนทิวป์ มีค่าอยู่ระหว่าง 11 ถึง 63 Gpa ขณะที่ค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้าอัลลอยมีเพียง 2 Gpa นอกจากนี้ SWNTs สามารถยึดตัวได้ถึง 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่จะขาดออกจากกัน



รูปที่ 2.8 ภาพการทดสอบความยืดหยุ่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) AFM microscope ของ MWNT วางผ่านรูเพื่อวัดค่า Young's modulus (ข) และ (ค) SEM ของ MWNT ที่อยู่ระหว่างปลายทั้งสองด้านของ AFM เพื่อวัดค่า tensile strength

- ความสามารถด้านการนำไฟฟ้า คาร์บอนนาโนทิวป์มีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง หนึ่งมัดของคาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง  $10^9$  A/cm<sup>2</sup> ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> สมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของคาร์บอนนาโนทิวป์ คือ สามารถในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์ในสภาวะสุญญากาศได้ (รูปที่ 2.9) เมื่อคาร์บอนนาโนทิวป์วางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ศักย์ต่ำกว่า เช่นจะกระตุ้น Phosphors ที่วางไว้ห่าง 1 mm ใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว Molybdenum



รูปที่ 2.9 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความสามารถในการนำความร้อน ค่าการนำความร้อนของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นสูงถึง 2000 W/m. K โดยมีบางรายงานกล่าวว่าคาร์บอนนาโนทิวป์ มีค่าการนำความร้อนได้ถึง 6000 W/m. K เมื่อเปรียบเทียบกับเพชรที่มีค่าการนำไฟฟ้าเพียง 3320 W/m. K นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2800 °C ภายใต้สุญญากาศ และ 750 °C ในสภาวะอากาศปกติ

นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีคุณสมบัติเด่นอีกหลายประการด้วยกันนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น เช่น เป็นได้ทั้งตัวนำและกึ่งตัวนำ สามารถจับยึด โมเลกุลและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของทิวป์ เส้นผ่าศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนของทิวป์ โดยคุณสมบัติทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติต่างของคาร์บอนนาโนทิวป์

ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 ~ 2 nm
พื้นที่พื้นผิว	1,500 m <sup>2</sup> /g
ความหนาแน่น	1.33 – 1.40 cm <sup>3</sup>
กำลังต้านทานแรงดึง	> 60 GPa (ประมาณ 50 เท่าของเหล็กแรงๆ แต่มีน้ำหนักแค่ประมาณ 1/6 เท่า)
ความยืดหยุ่น	ถึงจะถูกงอ ก็สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้โดยไม่เสียหาย
การทนต่อความร้อน	ในสุญญากาศ : ~ 2,800 °C ในอากาศ : ~ 750 °C
การนำความร้อน	MWNTs: > 3,000 W/m. K SWNTs: คาดประมาณ 6,000 W/m. K (มากกว่าเพชรและกราไฟท์ 2,000 W/m. K)
ความสามารถในการนำไฟฟ้า	~ 10 <sup>9</sup> A/cm <sup>2</sup> (ประมาณ 1,000 เท่าของทองแดง)
การปลดปล่อยอิเล็กตรอน	สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ที่ 1 – 3 V/um
การทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี	ตามปกติจะไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ

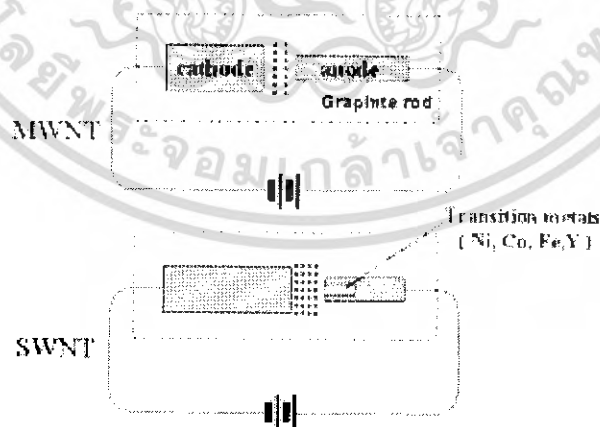
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ต้องการ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น สามารถแบ่งออกได้ 3 วิธีหลักๆ คือ 1.วิธี Arc discharge 2.วิธี Laser ablation 3.วิธี Chemical vapor deposition (CVD) [2,3] แต่ละวิธีก็จะวิธีการและเทคนิค รวมถึงข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.6.1 วิธี Arc discharge

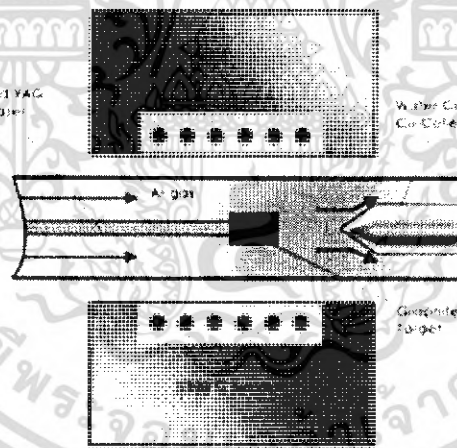
เทคนิคนี้เป็นวิธีเริ่มแรกที่ใช้สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งแต่เดิมนั้นใช้ในการสังเคราะห์ Fullerene โดยใช้การป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 100 แอมแปร์ และศักย์ไฟฟ้าประมาณ 20 กิโลโวลต์ที่ระหว่างขั้วคาร์บอน และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ 2000 °C ถึง 3000 °C ทำให้คาร์บอนเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมาร้อน จากนั้นคาร์บอนที่แตกตัวจะเกิดการควบแน่นและก่อตัวใหม่เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ขั้วแคโทด คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้นี้ จะเป็นท่อชนิดผนังหลายชั้น MWNTs มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในประมาณ 1-3 nm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกประมาณ 10 nm แต่ถ้าใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาจะได้ท่อชนิดผนังชั้นเดียว SWNTs ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6-1.4 nm ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย และค่าใช้จ่ายถูก แต่อย่างไรก็ตาม คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก ระบบของวิธี Arc discharge สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วิธี Arc discharge

### 2.6.2 วิธี Laser ablation

เทคนิคนี้คิดค้นขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของ (Smalley) โดยใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงยิงกระทบแท่งคาร์บอนผสมโลหะในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 1200 ถึง 1500 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนและอะตอมคาร์บอนที่ร้อนขึ้น และใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) หรือไนโตรเจน ( $N_2$ ) ไปกวาดเอาท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่เกิดขึ้นออกจากเตาเผาแล้วนำไปหล่อเย็นที่ตัวกักเก็บที่ทำมาจากทองแดงด้านนอกเตาเผา โดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะมี 2 ชนิดคือ pulsed laser และ continuous laser สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง pulsed laser และ continuous laser คือ pulsed laser ต้องใช้ความเข้มของแสงสูงมากแต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่องส่วน continuous laser นั้น จะใช้ความเข้มแสงน้อยกว่า แต่จะยิงเลเซอร์ไปที่เป้าหมายอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีมากกว่า 70เปอร์เซ็นต์ และมีความบริสุทธิ์สูงมาก ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ได้จะอยู่ในช่วงประมาณ 1-2 nm เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงจึงนิยมใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว SWNTs เท่านั้น ระบบของวิธี Laser ablation สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วิธี Laser ablation

ที่กล่าวมาทั้งสองวิธี คือวิธี Laser ablation และวิธี Arc discharge นั้นเป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ใช้อุณหภูมิสูง โดยใช้การยิงแผ่นแกรไฟต์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1500 °C เพื่อให้เกิดการแตกตัวของอะตอมคาร์บอนและตัวเร่งปฏิกิริยา ความ

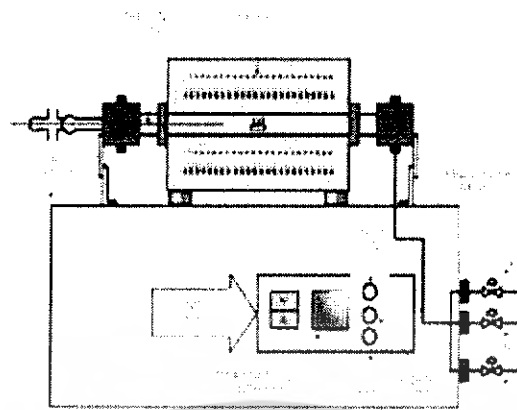
หนาแน่นของอะตอมทั้งสองชนิดที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวแปรที่สำคัญของการสร้างพันธะของคาร์บอนจนได้เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์

### 2.6.3 วิธี Chemical vapor deposition (CVD)

เทคนิคนี้จะเป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วยที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัตถุที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ วิธี Chemical vapor deposition (CVD) นั้นยังสามารถแยกย่อยตามความแตกต่างของวิธีการแยกก๊าซและวิธีการเตรียมโลหะตัวเร่งออกเป็น 5 วิธีใหญ่ คือ

#### 2.6.3.1 วิธี Thermal chemical vapor deposition

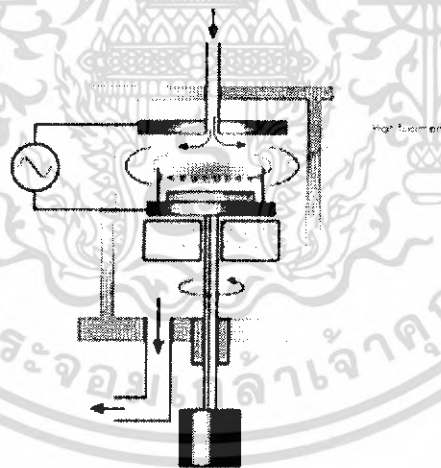
วิธีนี้จะใช้ Fe, Ni, Co หรือโลหะผสมทั้งสามชนิดผสมกันทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะทำการกัดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาด nanometer-sized โดยใช้  $\text{NH}_3$  หรือ แอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ 750°C - 1050°C ในการกัด และใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบปล่อยเข้ามาในระบบเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน และใช้ความร้อนจากเตาความร้อนทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ถูกกัดให้มีอนุภาคขนาด nanometer-sized เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยส่วนมากจะนิยมใช้วิธีนี้ในการศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะเกี่ยวข้องกับขนาดของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 13 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 30-40 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ MWNTs เมื่อความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 2-3 นาโนเมตรจะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 1 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ SWNTs รูปที่ 2.12 แสดงระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition



รูปที่ 2.12 ระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition

### 2.6.3.2 วิธี Plasma enhanced chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการกำเนิดประจุไอออนภายใน Chamber หรือเตาปฏิกรณ์ โดยใช้แรงดันความถี่สูงเข้ามาทำให้ไอออนของก๊าซที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัวเกิดเป็นพลาสมาขึ้นและเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา รูปที่ 2.13 แสดงระบบของวิธี Plasma enhanced CVD



รูปที่ 2.13 ระบบของวิธี Plasma enhanced CVD

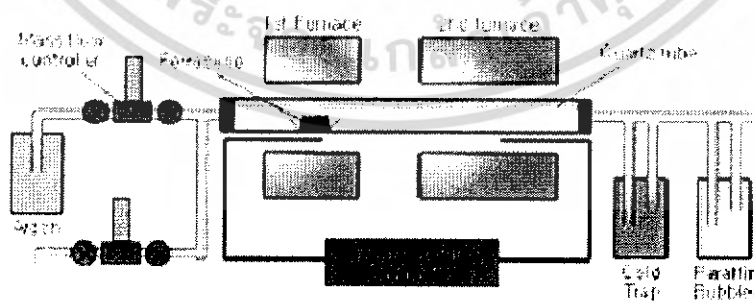
จากรูปที่ 2.13 แผ่นเพลทจะต่อกับขั้วไฟฟ้า ที่วางขนานกับฐานรอง และฐานรองจะต่ออยู่กับกราวด์ของขั้วไฟฟ้า เมื่อก๊าซเข้ามาตามท่อจากแผ่นเพลทตรงกันข้ามด้านบนกับฐานรอง ถูกแรงดันที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่สูง เกิดเป็นพลาสมา ทำให้ไอของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัว และลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นจะก่อตัวบนอนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นโลหะจำพวก Fe, Ni, Co เคลือบบนชั้นซิลิกอนหรือชั้นไดออกไซด์ หรือบนแก้วซึ่งการสร้างขึ้นเคลือบสามารถทำได้ด้วยวิธี Evaporation หรือวิธี Sputtering โดยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถยึดติดกับฐานรองได้หนาแน่นจะมีผลต่อ ขนาดของท่อ, อัตราการเจริญเติบโต, ความหนาของผนัง, รูปร่าง และโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทั่วไปแล้ว Ni เหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการปลูก MWNTs โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ที่ 15 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตของการใช้ Ni เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 50 % และสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400 °C) ก๊าซที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ , CO เป็นต้น การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถที่จะกำหนดทิศทางการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ให้สอดคล้องกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือโดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด MWNTs ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิด SWNTs ได้ง่ายนัก (ในปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด SWNTs ได้ โดยใช้พลาสมาระบบ RF glow-discharge (13.56 MHz) โดยใช้ก๊าซผสมของ  $CH_4$  กับ  $H_2$ ) [5]

### 2.6.3.3 วิธี Vapor phase growth

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบนำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาภายใน Chamber โดยไม่ใช้ฐานรอง รูปที่ 2.14 แสดงระบบของวิธี Vapor phase growth



รูปที่ 2.14 ระบบของวิธี Vapor phase growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.14 ในระบบของวิธี Vapor phase growth จะมีเตาความร้อนอยู่ 2 เตาครอบอยู่ระหว่าง Chamber โดยเตาความร้อนที่ 1 จะทำให้ก๊าซโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากลายเป็นไอและก่อตัวกันขึ้นและคงสภาพไว้ เมื่อมาถึงเตาความร้อนที่ 2 อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนเนื่องจากโดนความร้อนจะแพร่และซึมทรานลงบนอนุภาคของก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทั่วไปแล้วการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะอยู่ที่ประมาณ 2-4 นาโนเมตร สำหรับ SWNTs และ 70-100 นาโนเมตร สำหรับ MWNTs การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ได้ครั้งละมากๆและมีความบริสุทธิ์สูง แต่ยังคงยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้

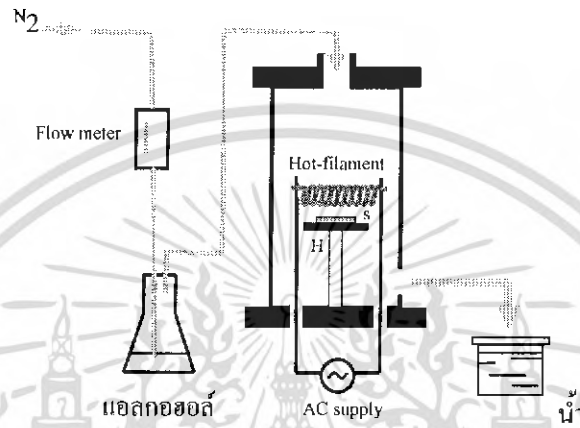
#### 2.6.3.4 วิธี High pressure CO disproportionate process

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์ SWNTs โดยการปล่อยก๊าซ CO ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เข้ามาอย่างต่อเนื่องให้เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซโลหะ เช่น Ferrocene,  $Fe(CO)_5$  ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้น คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก โดยขนาดของท่ออยู่ที่ประมาณ 0.7 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าเป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้มีขนาดของท่อเล็กที่สุด โดยขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง SWNTs อยู่ที่ประมาณ 1.1 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตอยู่ที่ประมาณ 70 % แต่ยังคงยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ และเป็นอันตรายต่อร่างกายเนื่องจากใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นก๊าซอันตราย รูปที่ 2.15 แสดงระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process

รูปที่ 2.15 ระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process

### 2.6.3.5 วิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ที่มีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (Filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแทนการใช้เตาความร้อน โดยระบบของวิธี Hot-filament enhance Chemical vapor deposition แสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงระบบของวิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition

จากรูป สามารถอธิบายการทำงานของระบบได้ดังนี้คือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน (Filament) เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวดความร้อน ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะถูกปล่อยเข้ามาในระบบ เจอความร้อนของขดลวดความร้อนจะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนและลงมาทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ จะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ ไอของแอลกอฮอล์ หรือ มีเทน (CH<sub>4</sub>) เป็นต้น ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้โลหะจำพวก เหล็ก (Fe) และ โคบอลต์ (Co) วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ไม่ยากและประหยัดค่าใช้จ่าย ส่วนคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้ นั้น จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิของฐานรอง, ชนิดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหลของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เป็นต้น

## 2.7 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งาน

หลังจากการค้นพบในปี ค.ศ .1991 เป็นต้นมา นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลกต่างก็ศึกษาถึงคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ ตลอดจนถึงวิธีการผลิต วิธีการนำไปใช้และการประยุกต์อย่างมากมาย ทั้งนี้ก็เนื่องมาจาก คุณสมบัติเด่นหลายประการด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น เป็นได้ทั้งตัวนำและกึ่ง

ตัวนำ มีความแข็งแรงสูง เหนียว และมีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถจับยึดโมเลกุลและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ในสาขาของนาโนเทคโนโลยี ดังตัวอย่างต่อไปนี้

### 2.7.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต เพราะด้วยคุณสมบัติที่มันมีน้ำหนักเบา ราคาถูก และมี ค่าความยืดหยุ่นสูงซึ่งจะไม่แตกหักง่าย อีกทั้งยังสามารถหด โคลงงอได้เหมือนสปริง เมื่อออกแรงกดแล้วคืนรูปสู่สภาพ เดิมได้ ทำให้ได้วัสดุคอมโพสิต ที่มีคุณสมบัติพิเศษคือ จะแข็งแรงกว่าพวกไฟเบอร์ทั้งหลายเท่าที่เคยมีมา จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่นเป็นส่วนประกอบใน รถยนต์ เครื่องบิน สิ่งปลูกสร้างต่างๆ หรือแม้กระทั่งใช้ทำ เสื้อเกราะกันกระสุน เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถเอาไปใช้ ทำเป็นหลอดทดลองขนาดนาโนเพื่อเก็บของเหลวบางอย่าง หรือทำเป็นเส้นใยแก้วใยคาร์บอน (Carbon nanotube fibers) ได้

NASA สามารถสังเคราะห์คอมโพสิตของ SWNT-polyimide ที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพทั้งความแข็งแรง การทนอุณหภูมิ และการนำไฟฟ้า ซึ่งทั้งหมดนี้มีความสำคัญมากสำหรับวัสดุประกอบเครื่องบินและยานอวกาศ กล่าวอย่างง่ายคือ คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถช่วยเสริมความแข็งแรง (reinforce) ของวัสดุเดิมให้มากยิ่งขึ้น น้ำหนักเบา และสามารถสร้างได้หลายรูปแบบได้แก่ ฟิล์มบาง ไฟเบอร์ โฟม สารเคลือบ และ ผง เป็นต้น

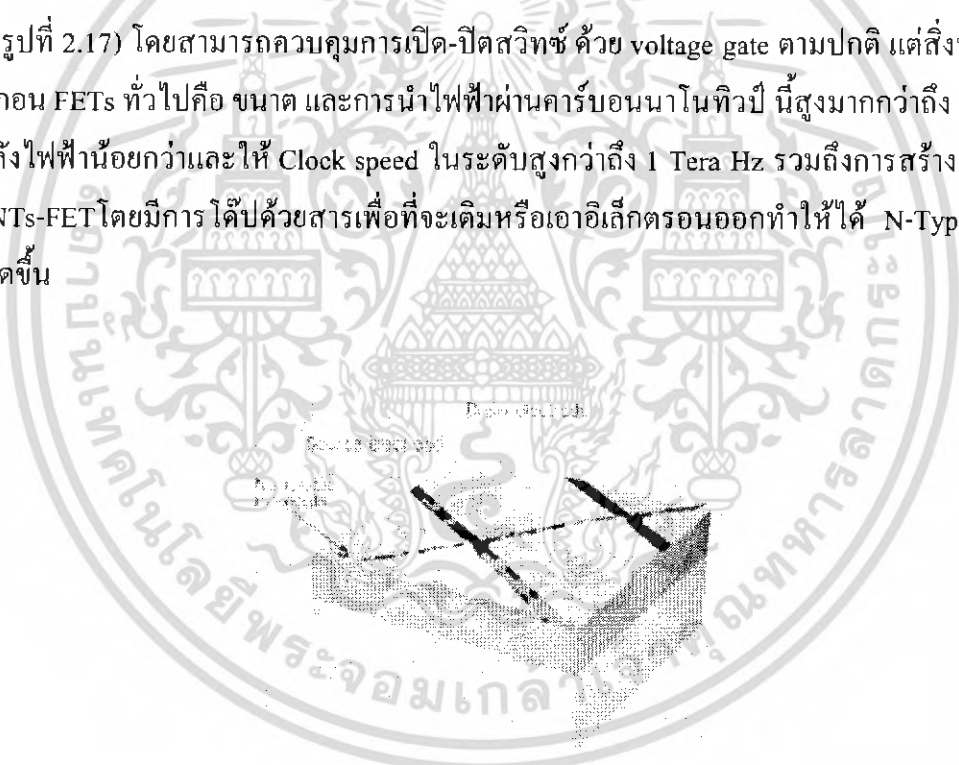
### 2.7.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวน้อยมากๆ (ค่า Aspect-ratio สูง) ทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ มีเสถียรภาพที่ดี และทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าต่ำจึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน นักวิจัยชาวญี่ปุ่นชื่อ ยาฮาชิ ซาโตะ (Yahachi Saito) สามารถประดิษฐ์จอภาพแบบรังสีแคโทด ที่ใช้ในจอทีวี หรือจอ คอมพิวเตอร์ โดยใช้คาร์บอนนาโนทิวป์แทนโลหะในส่วนที่เป็น ขั้วในหลอดสำหรับจ่ายอิเล็กตรอน ด้วยคุณสมบัติที่ เหนือกว่าคือมันให้ความสม่ำเสมอ ให้ปริมาณที่เพียงพอ และมีอายุการใช้งานของการจ่ายอิเล็กตรอนนานกว่า นอกจากนั้นแล้วยังไม่จำเป็นต้องใช้ในสุญญากาศและยังเป็นการประหยัด พลังงาน เนื่องจากมันสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่จำเป็นต้องเผาไส้หลอดให้แดง อย่างกรณีการใช้โลหะ ซึ่งตัวอย่างนี้อาจจะ

กำลังพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการค้าชิ้นแรกของญี่ปุ่นที่ได้มีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากคาร์บอนนาโนทิวป์

### 2.7.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในระดับหนึ่งไมโครเมตร ถ้าก้าวต่อไปเป็นนาโนอิเล็กทรอนิกส์นั้นก็ต้องลดขนาด Component ลง 10 ถึง 1000 เท่าจากเดิม ดังนั้นกระบวนการขั้นของอิเล็กทรอนิกส์ component ขนาด นาโนทั้งทรานซิสเตอร์ ไคโอดรีเลย์ และลอจิกเกตต้องเปลี่ยนใหม่ เช่น ทรานซิสเตอร์จากเดิมระดับไมครอนที่เป็นซิลิกอนเซมิคอนดักเตอร์ ต้องหันมาใช้โครงสร้างโมเลกุลอินทรีย์ (organic molecules) หรืออนินทรีย์ (Inorganic) ในระดับนาโน มีการใช้คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นช่อง (Channel) อิเล็กตรอนผ่านระหว่างsource-drain อิเล็กโทรดสำหรับ field-effect transistor (FET) (รูปที่ 2.17) โดยสามารถควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ ด้วย voltage gate ตามปกติ แต่สิ่งที่แตกต่างจากซิลิกอน FETs ทั่วไปคือ ขนาด และการนำไฟฟ้าผ่านคาร์บอนนาโนทิวป์ นี้สูงมากกว่าถึง 1 ล้านเท่า ด้วยกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าและให้ Clock speed ในระดับสูงกว่าถึง 1 Tera Hz รวมถึงการสร้างลอจิกเกตด้วย CNTs-FETโดยมีการได้ปด้วยสารเพื่อที่จะเติมหรือเอาอิเล็กตรอนออกทำให้ได้ N-Typeหรือ P-Type เกิดขึ้น



รูปที่ 2.17 ลักษณะ Single-molecule Transistor

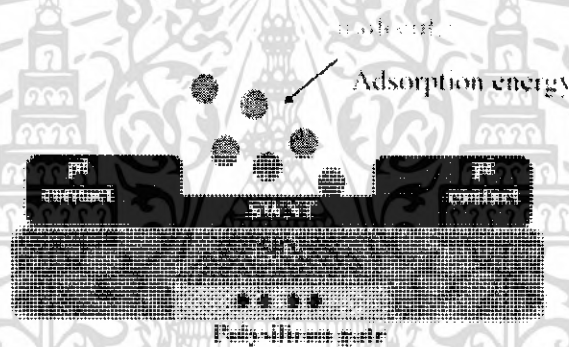
ถึงแม้จะสามารถสร้างอุปกรณ์เหล่านั้นได้ในระดับนาโนแต่สิ่งที่ท้าทายกว่าคือการเชื่อมต่อ (Wire) อุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกัน เพื่อจะปฏิบัติการเชิงคณิตศาสตร์หรือลอจิกได้ จึงเกิดแนวคิดที่ต้องทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้คาร์บอนนาโนทิวป์ เป็นทั้งตัวเชื่อมและเป็นอุปกรณ์ในทีเดียว อย่างไรก็ตามสิ่งนี้ยังไม่รวมถึงในระดับโครงสร้างของระบบวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์หรือระบบการทำงานอิสระอื่นๆ

#### 2.7.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์

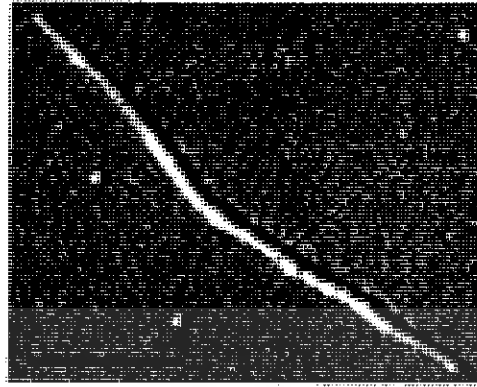
การที่คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถทำให้อยู่ในรูปของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และในขณะเดียวกันสารกึ่งตัวนำตอบสนองต่อสารพวก อัลคาไลน์ ฮาโลเจน และ ก๊าซต่างๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อเป็น Semiconducting CNTs จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ดีขึ้นอย่างมาก ทำให้เซนเซอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ นี้มีความไวมากขึ้น ซึ่งก็มีการพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัด Cytochrome , Methane , Krypton และ โมเลกุลของ Alkylamine แบบสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น ลักษณะภาพของโคอะแกรม แสดงได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 เซมิคัลเซนเซอร์ที่ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์ สำหรับตรวจวัดก๊าซ หรือสารโมเลกุลอื่น

แต่การประยุกต์ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นเซนเซอร์แบบนี้มีปัญหา คือไม่สามารถแยกชนิดของก๊าซที่ความเข้มข้นต่ำได้และยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ และความเร็วก๊าซที่ไหลผ่าน ทำให้ขาดความสามารถเชิงจำเพาะ แนวทางสำหรับประยุกต์เชิงเซนเซอร์ให้ดีขึ้นสามารถทำได้ด้วยเหตุที่คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถ functionalize (เช่นหมู่ -OH และ -COOH เป็นต้น) ได้ ทำให้สามารถตรึงด้วยสารทางชีวภาพได้แก่ โปรตีน เอนไซม์ หรือ ดีเอ็นเอ จึงสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับงานด้านไบโอเซนเซอร์ เพื่อประโยชน์ในการวินิจฉัยทางการแพทย์ หรือใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารต่างๆ ได้ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ มีพื้นผิวสำหรับการตรึงสารทางชีวภาพสูงทำให้สามารถเพิ่มขนาดสัญญาณได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีของไบโอเซนเซอร์เดิม





รูปที่ 2.20 ภาพจาก AFM ของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ตรึงอยู่บน SWNTs

### 2.7.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน

แนวความคิดที่จะนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาใช้ในการกักเก็บพลังงานนั้น เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์มีลักษณะเป็นท่อกลวง เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวที่เรียบ ลักษณะโครงสร้างพิเศษนี้เป็นสิ่งที่สร้างความสนใจให้กับนักวิจัยทั่วโลกที่จะนำมาใช้ในการเก็บ  $H_2$  (ซึ่งพลังงาน  $H_2$  - ไฮโดรเจน- เป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อม) นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dillon ได้แสดงผลการคำนวณไว้ว่า SWNTs จะสามารถกักเก็บ  $H_2$  ได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมักขึ้น และมีความเป็นไปได้ที่จะกักเก็บ  $H_2$  ได้ถึง 6.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าที่จะสามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้ นอกเหนือจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังสามารถนำไปใช้ใน Fuel cell ชนิด Methane, Ethanol หรือใช้เป็นขั้วในแบตเตอรี่ได้อีกด้วย

### บทที่ 3

## เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงเครื่องมือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยจะกล่าวถึงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ผลการทดลองในครั้งนี้ โดยจะกล่าวถึงหลักการการทำงานทั่วไป, ประเภทและการนำไปใช้งาน ระบบการทำงาน รวมถึงวิธีการการใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 หลักการทำงานทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถให้กำลังขยาย (Magnification) และแจกแจงรายละเอียด (resolution) ได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา โดยในปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงถึง 500,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสงในการสะท้อนวัตถุ เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้มีประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูง กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาจะแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะมีประสิทธิภาพถึง 0.1 นาโนเมตร โดยลำแสงอิเล็กตรอนที่มีศักย์สูงจากแคโทดที่ถูกให้ความร้อนในสุญญากาศ จะถูกเร่งและผ่านออกมาตามท่อสุญญากาศไปยังระบบคอนเดนเซอร์ (condenser system) ซึ่งประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic coils) 4 ชุด โดยขดลวดแม่เหล็กชุดแรกจะทำให้อิเล็กตรอนผ่านไปยังด้านล่างของตัวอย่าง ส่วนชุดที่สองจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้วัตถุที่จะรวบรวมอิเล็กตรอนให้ผ่านหรือกระจายอยู่รอบๆ ตัวอย่าง จากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่านไปยังขดลวดสนามแม่เหล็กชุดที่สามที่ทำหน้าที่ในการขยายภาพ โดยภาพเกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนผ่านไปยังตัวอย่างและมีการโฟกัสภาพไปยังจอรับภาพ เช่น จอรับภาพเรืองแสง หรือเซนเซอร์ไวแสง และขดลวดสนามแม่เหล็กชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้ตา ซึ่งภาพที่ได้สามารถบันทึกลงบนเพลท แผ่นฟิล์ม หรือทำการแปลงสัญญาณภาพลงสู่จอคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งภาพที่ได้นี้จะเรียกว่า Electron Micrograph (EM)

#### 3.2 ประเภทและการนำไปใช้งานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมี 2 ชนิด คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopes; TEMs) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes; SEMs)

### 3.2.1 TEMs

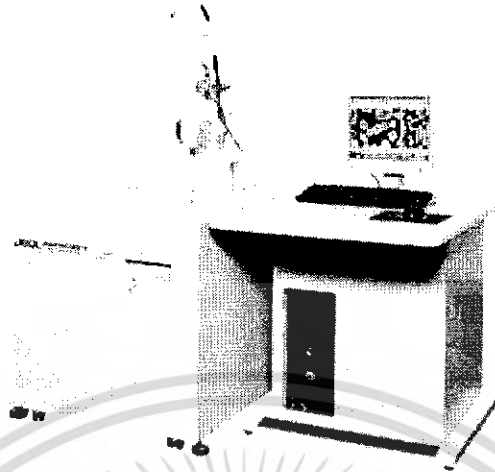
เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบางซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษ เพื่อให้ลำอิเล็กตรอนผ่านได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผันงเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก



รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEMs

### 3.2.2 SEMs

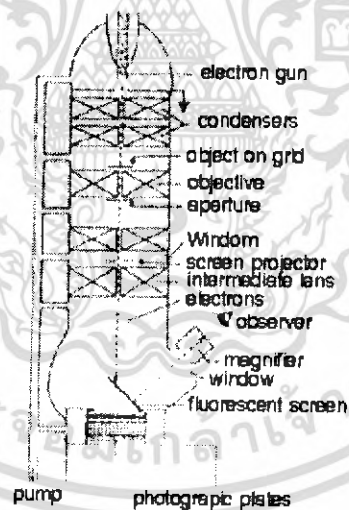
เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษารายละเอียดของพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น การสร้างภาพทำโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะเป็นภาพสามมิติ นอกจากนี้ยังอาจคัดแปลงโดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น การวิเคราะห์ธาตุ การคำนวณหามวลและปริมาตร กล้องจุลทรรศน์แบบนี้เหมาะสำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยพื้นฐาน



รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEMs

### 3.3 ระบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

#### 3.3.1 ระบบการทำงานของ TEMs



รูปที่ 3.3 แผนภาพการทำงานของ TEMs

การทำงานของ TEMs จะประกอบด้วยระบบที่สำคัญ 4 ระบบคือ

ระบบสุญญากาศ (Vacuum system) ประกอบด้วยเครื่องดูดอากาศ 2 แบบ ได้แก่ เครื่องดูดอากาศแบบ mechanical pump และเครื่องดูดอากาศที่ใช้น้ำมันแบบ diffusion pump หรืออาจเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ ion getter pump ซึ่งจะทำงานร่วมกัน โดยเริ่มจากการทำให้ภายในคอลัมน์เป็นสุญญากาศที่มีความดันประมาณ  $10^{-3}$ - $10^{-8}$  torr และต้องกำจัดโมเลกุลของก๊าซต่างๆ ออกให้หมด เนื่องจากโมเลกุลเหล่านี้จะเกิดการดูดกลืนอิเล็กตรอนและทำให้ลำอิเล็กตรอนเกิดการกระเจิง ประจุอิเล็กตรอนกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ภาพที่ได้ไม่ค่อยคมชัด นอกจากนี้ โมเลกุลของก๊าซอาจเกิดปฏิกิริยาการแผ่รังสี (ionization) ซึ่งจะทำให้ลำอิเล็กตรอนไม่คงที่หรือเคลื่อนออกไปจากทิศทางเดิม โมเลกุลของก๊าซอาจจะไปรวมตัวกับไส้หลอดที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจนเกิดการเผาไหม้และขาดในที่สุด หรืออาจไปจับกับตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างเกิดการปนเปื้อนจนไม่สามารถนำไปศึกษาหรือวิเคราะห์ต่อไปได้

ระบบแสงสว่าง (Illuminating) ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์ โดยปืนอิเล็กตรอนจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และคอนเดนเซอร์เลนส์จะทำหน้าที่รวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยใช้สนามแม่เหล็กเพื่อส่งไปยังตัวอย่าง ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า ถ้าให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงมากขึ้น ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนจะสั้นลง ทำให้การแจกแจงรายละเอียดดีขึ้น ดังนั้นการปรับเปลี่ยนความยาวโฟกัสจึงทำได้โดยการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้านั้นเอง คอนเดนเซอร์อาจมีได้มากกว่าหนึ่งชุด เพื่อควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนมีความเข้มและขนาดเล็กลง ทำให้ภาพที่ได้มีความสว่างมากขึ้น และยังเป็นการป้องกันตัวอย่างไม่ให้ถูกทำลายด้วยความร้อนที่เกิดจากอิเล็กตรอนด้วย

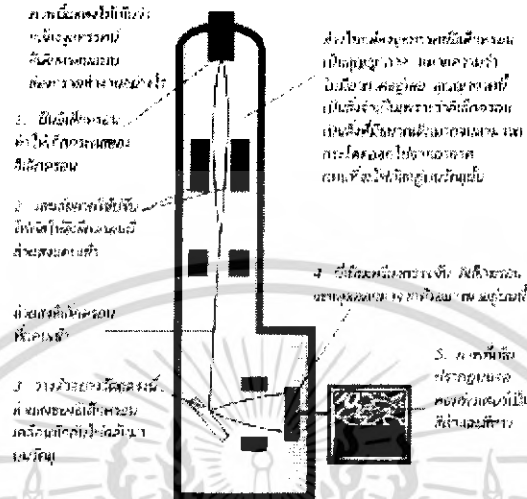
ระบบคอนเดนเซอร์เลนส์จะมีแผ่นโมลิบดีนัมอยู่ในช่องว่างซึ่งจะมีรูกลมๆ ขนาดเล็กที่เรียกว่า Aperture เพื่อควบคุมลำอิเล็กตรอนให้เป็นจุดกลมที่สมบูรณ์ รวมทั้งป้องกันการกระจายตัวของอิเล็กตรอนซึ่งจะส่งผลต่อความคมชัดของภาพ สำหรับขนาดของช่อง aperture นี้ ยังมีขนาดเล็กจะยิ่งทำให้การแจกแจงรายละเอียดของภาพดีขึ้น แต่ความคมชัดจะลดลง

ระบบภาพ (Imaging system) ประกอบด้วยเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า 3 ตัว คือ objective lens, intermediate lens และ projector lens เมื่อทำการฉายลำอิเล็กตรอนบนตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะผ่านตัวอย่างไปยัง objective lens ที่อยู่ใต้ช่องใส่ตัวอย่างและคอนเดนเซอร์เลนส์ objective lens จะทำหน้าที่ขยายภาพ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะผ่านไปยัง intermediate lens เพื่อทำการขยายภาพเพิ่มขึ้นอีก จากนั้นผ่านไปยัง projector lens ที่ทำหน้าที่นำภาพที่ขยายไปปรากฏบนจอซึ่งเราสามารถมองเห็นได้จากหน้าต่างสำหรับมองภาพ (viewing window)

ระบบบันทึกภาพ (Photographic system) ประกอบด้วยชัตเตอร์และเครื่องวัดแสง โดยระบบนี้จะอยู่ที่ Projectors lens ชัตเตอร์จะทำหน้าที่ปิดหรือเปิดให้ลำแสงอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนแผ่นรับภาพเรืองแสง

3.3.2 ระบบการทำงานของ SEMs

จากอิเล็กตรอนมาเป็นภาพ



รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานของ SEMs

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีระบบการทำงานเหมือนกับแบบส่องผ่าน แต่มีสิ่งที่แตกต่างคือระบบภาพและแสดงผล โดยภาพที่ได้จะถูกส่งสัญญาณเพื่อไปขยาย แล้วจึงแปลภาพบนจอ CRT (Cathode Ray Tube) คอลัมน์ของ SEMs จะประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์เช่นเดียวกับ TEM ลำอิเล็กตรอนที่ผ่าน objective lens ไปตกลงบนตัวอย่างนั้นสามารถที่จะบังคับทิศทางเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างได้ด้วย และมี scanning generator อยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวสุดท้ายกับ objective lens ลำอิเล็กตรอนนี้เป็น Primary electron โดยจะถูกโฟกัสลงบนตัวอย่างทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวอย่างส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เรียกว่า Secondary electron และถูกรวบรวมโดย electron collector ซึ่งจะถูกนำไปขยายและแปลสัญญาณให้เกิดเป็นภาพบนจอ CRT ซึ่งสามารถดูได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกไว้บนฟิล์ม ความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับพื้นผิวของตัวอย่าง ถ้าพื้นผิวของตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่ขรุขระ นอกจากนี้ที่ Objective lens จะมีช่อง Aperture เช่นกันเพื่อช่วยเพิ่มความลึกของภาพ SEMs นี้อาจติดตั้งและต่อเติมอุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เช่น Backscattered electron detector อิเล็กตรอนที่เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้จะช่วยในการบอกรายละเอียดของรูปร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนที่ลึกเกินกว่าที่ Secondary electron ทำการตรวจสอบได้ หรือทำการติดตั้งระบบ EDS เพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของธาตุ หรือติดตั้ง Transmitted electron detector เพื่อศึกษาลักษณะภายในของตัวอย่างที่ทำให้บาง เป็นต้น

### 3.4 วิธีการใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพ

สิ่งที่แสดงให้เห็นต่อไปนี้เป็นตัวอย่างของการใช้งาน การตรวจสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพและยืดอายุการใช้งานของตัวกล้อง

1. ปฏิบัติตามขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง การใช้งานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและอุปกรณ์เสริมอย่างเคร่งครัด โดยเหมาะสมกับชนิดของตัวอย่าง ข้อมูลที่ต้องการ และภาพหรือสิ่งที่จะนำไปวิเคราะห์

2. ตรวจสอบผลหรือภาพให้มีคุณภาพก่อนที่จะนำออกจากห้องปฏิบัติการ

3. ทำบันทึกตรวจสอบหน้าที่การทำงานของขั้นตอนการควบคุมคุณภาพทุกรายการ

4. ตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือให้พร้อมสำหรับใช้งานอยู่เสมอ

5. มีการรายงานและปรับปรุงสัภาพของผู้ใช้งาน

6. ทำการสอบเทียบกล้องเป็นประจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลอง

#### การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Hot-filament CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

ในบทนี้จะเป็นกล่าวถึงการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Hot-filament CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ โดยจะประกอบไปด้วยขั้นตอนและวิธีทำการทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง ที่ได้จากการทดลอง

#### 4.1 อุปกรณ์และสารเคมี

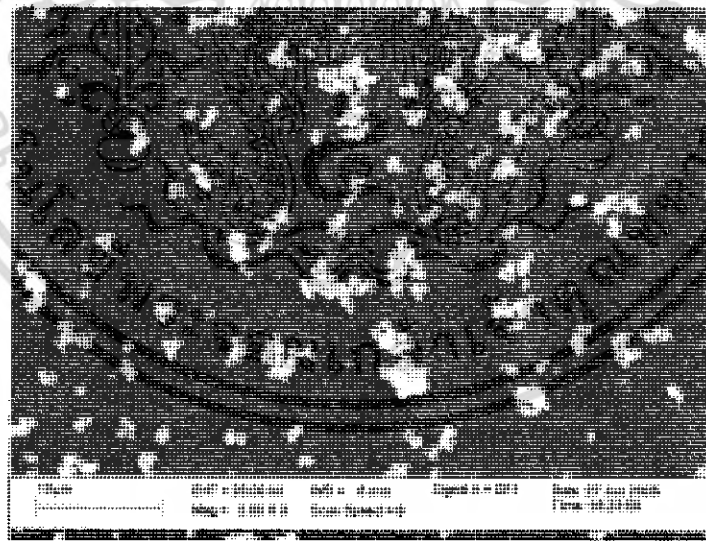
1. ท่อที่ใช้เป็นห้องทำปฏิกิริยา (chamber)
2. แอลกอฮอล์ (Ethanol)
3. Cobalt acetate 0.027 g
4. Iron (II) acetate 0.018 g
5. ผง Zeolite 0.125 g
6. ถังเก็บก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>)
7. ลวดทังสเตน
8. แผ่นซิลิคอนขนาดประมาณ 10X10 mm.
9. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง
10. เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter)
11. เทอร์โมคัปเปิล (Thermo couple)
12. นาฬิกาจับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ขั้นตอนและวิธีทำการทดลอง

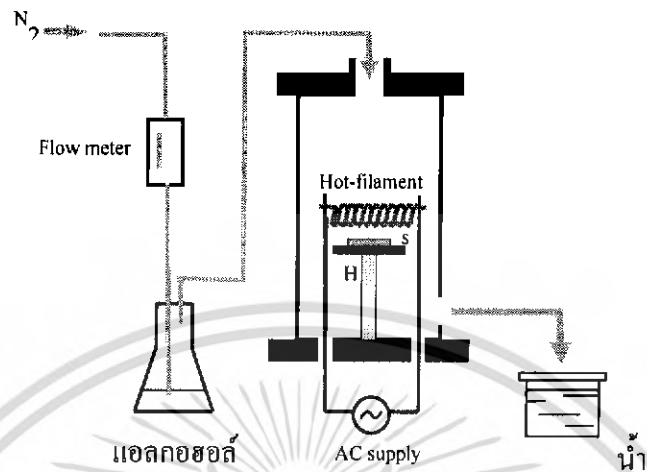
### 4.2.1 การเตรียมสารตัวเร่งปฏิกิริยา

โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยในการทดลองนี้ ได้ใช้ Fe และ Co เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะถูกเคลือบเป็นฟิล์มบางๆ อยู่บนผิวหน้าของฐานรองซิลิกอน ด้วยวิธี Spin-coating technique ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเตรียมได้จากสารละลายของ Iron (II) acetate , Cobalt acetate และผง Zeolite ขั้นตอนและวิธี การเตรียมสารตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้โดย เริ่มต้นจากการนำผง Zeolite ไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำ Iron (II) acetate จำนวน 0.018g และ Cobalt acetate จำนวน 0.027g มาละลายให้เข้ากันในแอลกอฮอล์ ชนิดเอทานอล จำนวน 10 ml [7] ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที เสร็จแล้วนำผง Zeolite ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นมาแล้ว ผสมลงในสารละลายของ Iron (II) acetate และ Cobalt acetate ที่ละลายเข้าแล้ว จากนั้นละลายให้เข้ากันอีกครั้ง ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 30 นาที และสารละลายของตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะถูกนำไปเคลือบบนฐานรองซิลิกอนขนาดประมาณ 10x10 mm โดย Spin coater [8] ที่ความเร็ว 2000 rpm เป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งทำให้เราได้ฟิล์มบางของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบอยู่บนฐานรองซิลิกอน ในขั้นตอนสุดท้ายแผ่นตัวอย่างเหล่านี้จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลาประมาณ 18 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นหรือสารละลายอื่นๆ หลุดออกไป



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมสารตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว

#### 4.2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

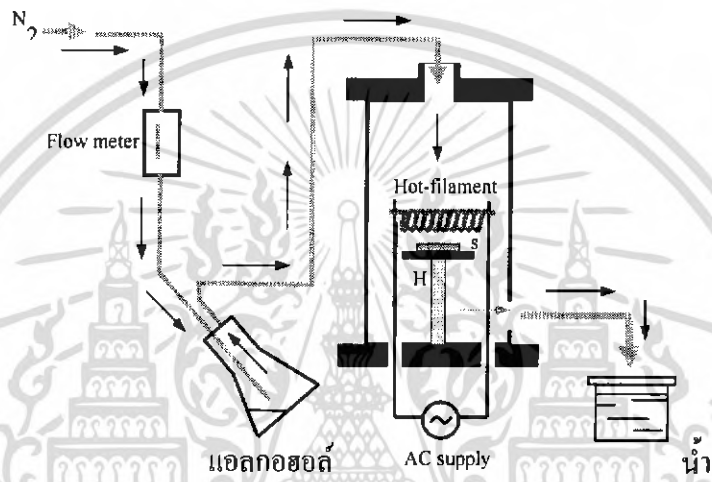


รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Hot-filament CVD (HF-CVD) ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

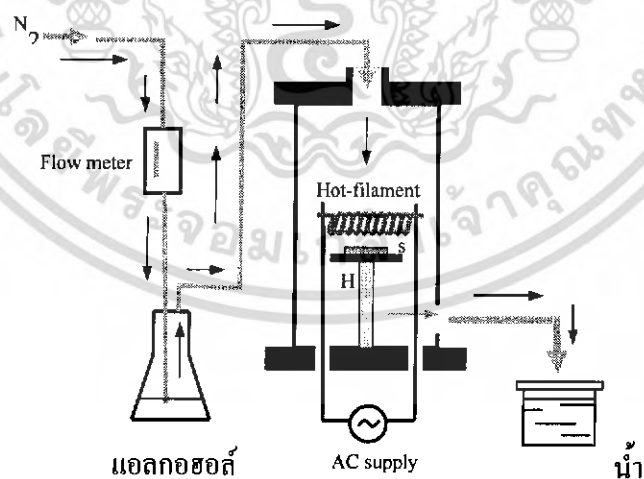
จากรูปที่ 4.2 เป็นภาพแสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Hot-filament CVD (HF-CVD) ที่ความดันบรรยากาศ ประกอบด้วย Chamber ซึ่งภายในใช้เป็นห้องในการเกิดปฏิกิริยา, แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง, ลวดทังสเตน ใช้เป็นขดลวดความร้อน (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm ความยาวประมาณ 40 mm), แอลกอฮอล์ (Ethanol) ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon source), ที่วางฐานรอง, เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter), น้ำ ใช้ป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกเข้ามาภายในระบบ, ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) ใช้เป็นก๊าซนำพา (Carrier gas) และช่วยเร่งการระเหยแอลกอฮอล์

โดยในการทดลองเริ่มแรกจะต้องทำการไล่อากาศภายใน Chamber ออกเสียก่อน เพื่อมิให้เกิดการทำปฏิกิริยากับอากาศ (oxidize) ในขณะที่ทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยการเอียงขวดชมพูโดยที่ปลายหลอดด้านในของขวดชมพูไม่สัมผัสกับแอลกอฮอล์ แล้วปล่อยก๊าซไนโตรเจนให้ไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลเข้าไปในขวดชมพูและ Chamber เพื่อไล่อากาศออก โดยในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 10 นาที ที่อัตราการไหล 500 cc/min หลังจากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน เพื่อให้ความร้อนกับขดลวดความร้อน ที่อุณหภูมิประมาณ 350 °C เพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 3 นาที หลังจากนั้นเริ่มทำการทดลองสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยเริ่มจากการปรับเครื่องวัดอัตราการไหลให้เหลือ 100 cc/min แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนประมาณ 20A ตั้งขวดชมพูโดยให้

ปลายหลอดด้านในของขวดสับผสมกับแอลกอฮอล์ เพื่อให้ก๊าซไนโตรเจนสามารถเป่าแอลกอฮอล์ทำให้แอลกอฮอล์ระเหยได้เร็วขึ้น ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลา 5 นาที จากนั้นเอียงขวดชมพูไว้เหมือนตอนที่ทำการไล่อากาศออก แล้วหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อน แล้วปรับอัตราการไหลให้เพิ่มขึ้นเป็น 500 cc/min เพื่อทำให้อุณหภูมิภายใน chamber เป็นตัวลงใช้เวลา 10 นาที แล้วนำแผ่นตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์มาเก็บในที่เก็บ เพื่อรอนำไปวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และรามานสเปกโตรสโคปี ต่อไป

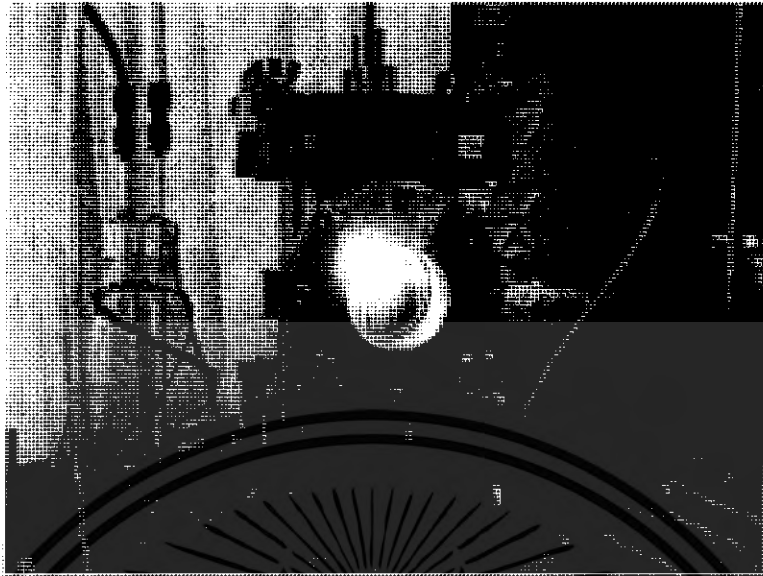


รูปที่ 4.3 การไล่อากาศออกจากระบบ



รูปที่ 4.4 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

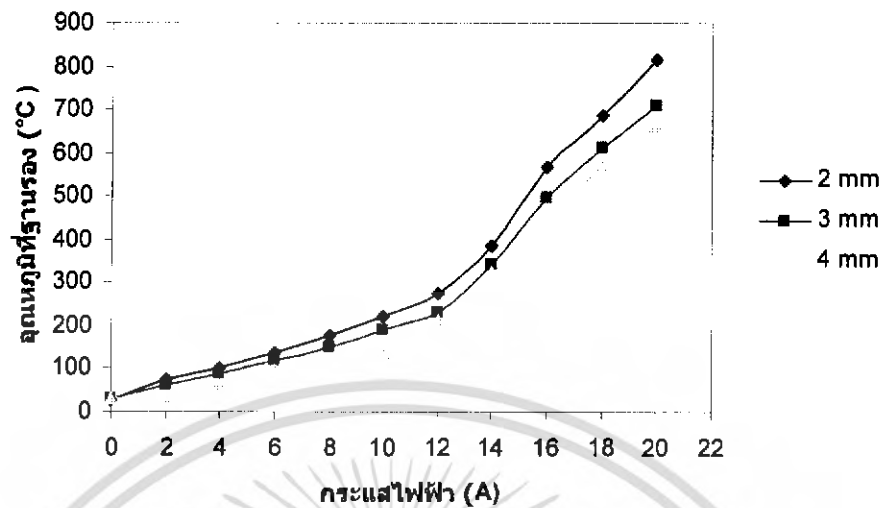


รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายขณะทำการทดลอง

### 4.3 ผลการทดลอง

#### 4.3.1 ผลของอุณหภูมิฐานรอง

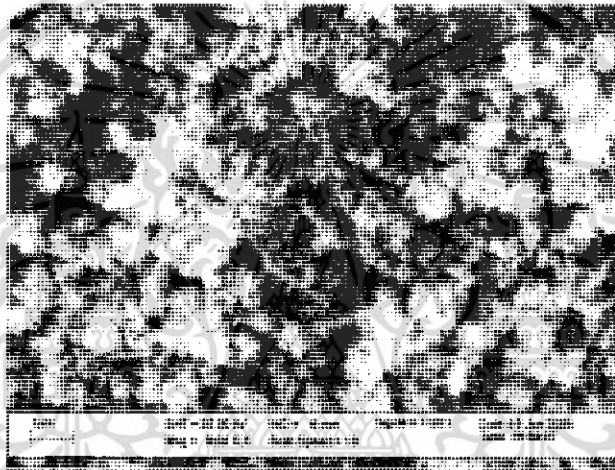
จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ฐานรองจะขึ้นอยู่กับการปรับระยะห่างระหว่างฐานรองกับขดลวดความร้อน และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อน โดยในการทดลองเราได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิที่ฐานรองที่ระยะห่างต่างๆ คือที่ระยะห่าง 2 mm, 3mm และ 4mm ตามลำดับ และทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อนที่ค่าต่างๆ เพื่อหาอุณหภูมิฐานรองที่เปลี่ยนไป เมื่อทำการปรับระยะห่างที่ระยะต่างๆ และการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อนที่ค่าต่างๆ เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเขียนเป็นกราฟ (รูปที่ 4.6) จะเห็นได้ว่า เมื่อเราจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มีค่าเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิที่ฐานรองจะมีค่าสูงขึ้นตาม และที่ระยะห่างระหว่างฐานรองกับขดลวดความร้อนน้อยลง จะทำให้อุณหภูมิมียุ่ค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ฐานรองจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับการปรับระยะห่างระหว่างฐานรองกับขดลวดความร้อน และการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อน ดังนั้นเราจึงสามารถควบคุมอุณหภูมิฐานรองได้ ด้วยการปรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อน และการกำหนดระยะห่างระหว่างฐานรองกับขดลวด ความร้อน ให้มีค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์



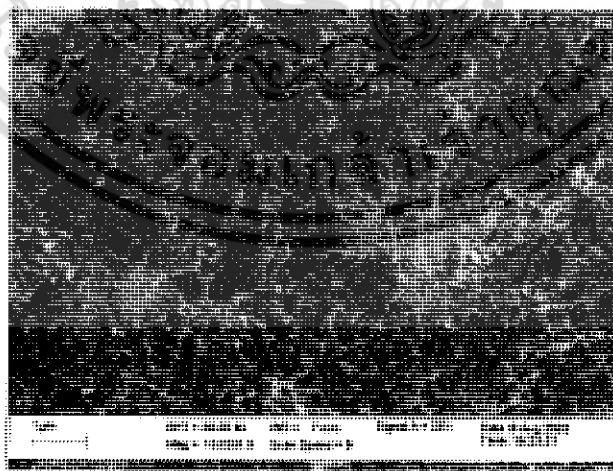
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่ฐานรองที่ระยะระหว่างฐานรองกับขดลวดความร้อนค่าต่างๆ

จากการทดลอง เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันจะพบว่า อุณหภูมิที่ฐานรองจะมีผลต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และขนาดความยาว รวมถึงความหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยที่การสังเคราะห์ที่อุณหภูมิฐานรองต่ำๆ (ต่ำกว่า 600 °C) (รูปที่ 4.7 (ก)) จะไม่พบคาร์บอนนาโนทิวป์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ไม่ต่ำเกินไป ไม่เพียงพอที่จะทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ก่อตัวขึ้นมาได้ ส่วนการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิฐานรองสูงๆ (สูงกว่า 800 °C) (รูปที่ 4.7 (ค)) จะพบคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก แต่จะมีขนาดความยาวที่สั้น และมีปริมาณความหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ค่อนข้างน้อย ต่างจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิฐานรองกลาง (ประมาณ 750 °C) (รูปที่ 4.7 (ข)) จะพบคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้นมาเล็กน้อย เมื่อเทียบการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงๆ แต่จะมีขนาดความยาวของท่อที่ยาวกว่า และมีจำนวนของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่หนาแน่นกว่า ซึ่งอาจเนื่องมาจาก การสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงๆ ความร้อน อาจทำให้อะตอมคาร์บอนที่จะลงมาทำปฏิกิริยากับ โลหะตัวเร่งบนแผ่นตัวอย่าง ระบายออกไปเป็นบางส่วน ก่อนที่จะทำปฏิกิริยากับ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ปริมาณของอะตอมคาร์บอนที่จะทำปฏิกิริยากับ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลดน้อยลง ด้วยปริมาณของอะตอมคาร์บอนที่จะมาทำปฏิกิริยากับ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลดน้อยลง จึงทำให้ปริมาณความหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณที่ลดลงตามไปด้วย และขนาดความยาวของท่อก็จะลดลงตามไปด้วยเช่นกัน แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดเล็ก ซึ่งอาจเนื่องมาจากเหตุผลเดียวกัน ต่างจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิฐานรองกลางๆ (ประมาณ 750 °C) อะตอม

คาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนนั้น สามารถที่จะลงมาทำปฏิกิริยาได้มากกว่า การสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงๆ จึงทำให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น แต่จะมีขนาด ความยาวที่มากขึ้น และมีปริมาณความหนาแน่นที่มากขึ้น เพราะมีอะตอมคาร์บอนที่จะมาทำ ปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า ดังนั้นในการสังเคราะห์ควรปรับอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่ พอเหมาะ หรืออยู่ในช่วงกลางๆ (จากการทดลองประมาณ 750 °C) ถ้าปรับอุณหภูมิให้อยู่ในระดับ ต่ำเกินไป คาร์บอนนาโนทิวป์ก็จะไม่สามารถก่อตัวขึ้นมาได้ แต่ถ้าปรับอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่สูงเกินไป ก็จะทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์มีขนาดความยาวสั้นลง และมีปริมาณความหนาแน่นลดลง

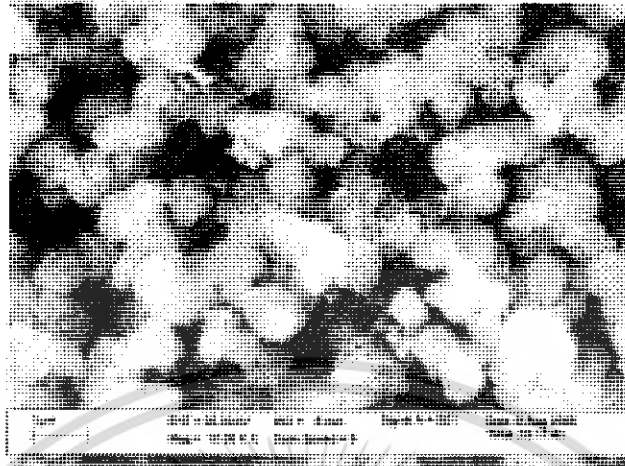


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่างๆ (ก) การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่อุณหภูมิฐานรองต่ำกว่า  $650^{\circ}\text{C}$  ไม่พบคาร์บอนนาโนทิวป์ (ข) การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ  $750^{\circ}\text{C}$  คาร์บอนนาโนทิวป์ที่พบ จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้นมาเล็กน้อย เมื่อเทียบการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงๆ แต่จะมีขนาดความยาวที่มากขึ้น และมีจำนวนของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่หนาแน่น (ค) การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่อุณหภูมิฐานรองสูงกว่า  $800^{\circ}\text{C}$  คาร์บอนนาโนทิวป์ที่พบ จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก แต่จะมีขนาดความยาวสั้นลง และมีปริมาณความหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ค่อนข้างน้อย

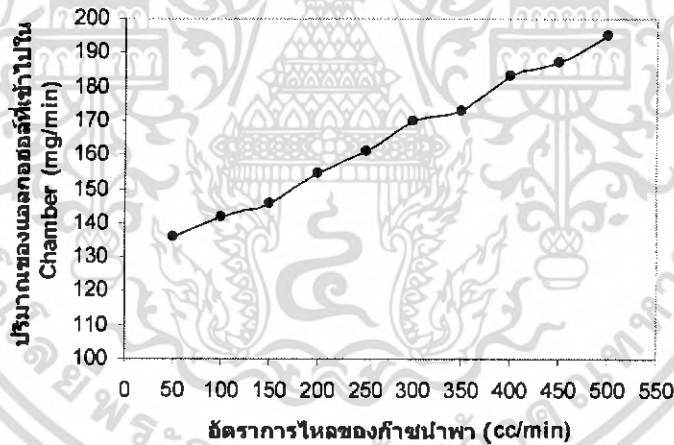
#### 4.3.2 ผลของอัตราการไหลของก๊าซนำพา

อัตราการไหลของก๊าซนำพานั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เข้าไปใน Chamber เนื่องจากก๊าซนำพาเป็นตัวพาไอของแอลกอฮอล์เข้ามาใน Chamber แต่เนื่องจากการทดลอง ปริมาณของแอลกอฮอล์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากๆ ซึ่งเป็นการยากที่จะหาปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เข้าไปใน Chamber หน่วยของ cc/min ได้ ดังนั้นในการทดลองเราจึงทำการหาปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เข้าไปใน Chamber หน่วยของ mg/min แทนหน่วยของ cc/min เพื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลของก๊าซนำพาที่ค่าต่างๆ โดยการชั่งน้ำหนักของแอลกอฮอล์ก่อนทำการทดลองแล้วจากนั้นนำแอลกอฮอล์ที่ชั่งน้ำหนักแล้วไปทำการทดลองตามขั้นตอนการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซนำพาที่ค่าต่างๆ หลังจากทำการทดลองเสร็จตามขั้นตอนการทดลองแล้ว จึงนำแอลกอฮอล์ไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อหาน้ำหนักหลังทำการทดลอง จากนั้นนำน้ำหนัก

แอลกอฮอล์ก่อนทำการทดลอง ลบด้วยน้ำหนักแอลกอฮอล์หลังทำการทดลอง แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาหารด้วยเวลาที่ใช้ในการทดลอง ดังสูตรการคำนวณหาปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เข้าไปใน Chamber ด้านล่าง ซึ่งจะทำให้ทราบค่าปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เข้าไปใน Chamber ในหน่วยของ mg/min ที่อัตราการไหลของก๊าซนำพาต่าง ๆ

น้ำหนักก่อนทำการทดลอง (mg) – น้ำหนักหลังทำการทดลอง (mg)  
เวลาที่ใช้ในการทดลอง (min)

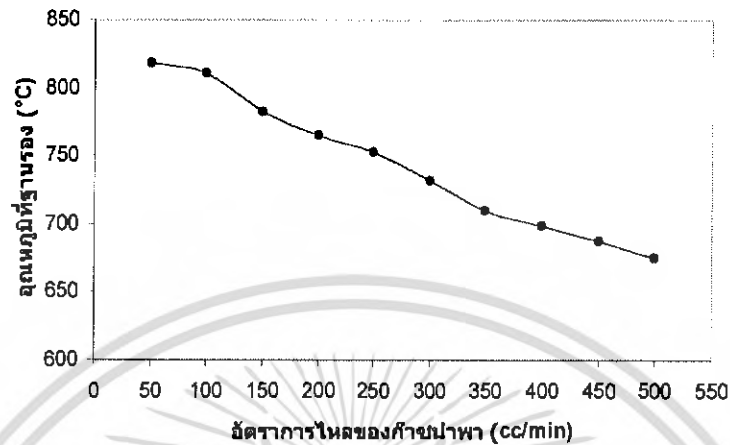
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนเป็นกราฟ (รูปที่ 4.8) จะเห็นได้ว่าปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เข้าไปใน Chamber จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่ออัตราการไหลของก๊าซนำพามีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เข้าไปใน Chamber นั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของก๊าซนำพา ซึ่งเป็นตัวพาไอของแอลกอฮอล์เข้ามาใน Chamber จึงส่งผลให้ปริมาณของแอลกอฮอล์ในขวดชมพูลดลงอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซนำพากับปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เข้าไปใน Chamber

นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของก๊าซนำพา จะมีผลต่ออุณหภูมิฐานรอง โดยในการทดลองเราได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิฐานรอง ที่อัตราการไหลของก๊าซนำพาที่ค่าต่างๆ ด้วยการปรับอัตราการไหลของก๊าซนำพาที่ค่าต่างๆ แล้วใช้เทอร์โมคัปเปิล

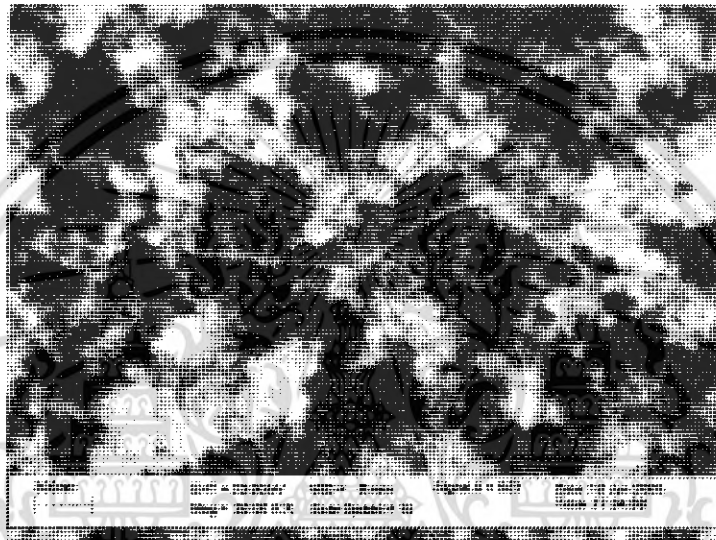
วัดค่าอุณหภูมิฐานรอง เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเขียนเป็นกราฟ (รูปที่ 4.9) จะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราการไหลของก๊าซนำพามีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้อุณหภูมิที่ฐานรองมีค่าลดลง



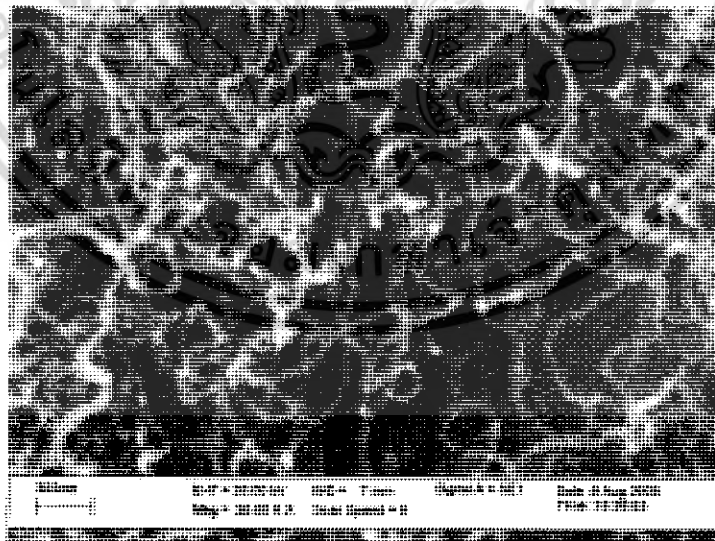
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซนำพากับอุณหภูมิที่ฐานรอง

จากการทดลอง เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันจะพบว่า อัตราการไหลของก๊าซนำพาจะมีผลต่อความบริสุทธิ์และขนาดของคาร์บอนนาโนทิวป์ (รูปที่ 4.10) โดยในการทดลองเรา ได้ทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซนำพา 100 cc/min และ 200 cc/min เมื่อเปรียบเทียบคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ จากอัตราการไหลของก๊าซนำพาที่ 200 cc/min กับอัตราการไหลของก๊าซนำพาที่ 100 cc/min พบว่า ที่อัตราการไหลของก๊าซนำพา 200 cc/min คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะค่อนข้างสกปรก ไม่บริสุทธิ์ เมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ที่อัตราการไหลของก๊าซนำพาที่ 100 cc/min ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อัตราการไหลของก๊าซนำพาสูงๆ จะทำให้ปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เข้าไปใน Chamber มีจำนวนมากเกินไป ทำให้อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนไปเกาะรอบๆหลอดความร้อน สังเกตได้จากขนาดของหลอดที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.11) เมื่อทำการทดลองในเงื่อนไขที่มีอัตราการไหลของก๊าซนำพาสูงๆ ซึ่งอะตอมคาร์บอนที่เกาะอยู่รอบๆหลอดความร้อน สามารถที่จะหลุดออกมาจากหลอดความร้อน และตกลงมายังแผ่นตัวอย่างได้ อะตอมคาร์บอนที่หลุดออกมาเหล่านี้ อาจอยู่ในรูปของ amorphous carbon ที่มีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และเมื่อคาร์บอนนาโนทิวป์ก่อตัวขึ้น amorphous carbon ที่หลุดออกมาจากหลอดความร้อน ก็อาจจะลงมาเกาะที่บริเวณรอบๆท่อ ทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ มีความสกปรก ส่งผลให้ประสิทธิภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ ลดลง และในขณะเดียวกันปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เข้าไปใน Chamber ที่มากเกินไป ก็จะทำให้อุณหภูมิฐานรองลดลง (จากกราฟรูปที่ 4.9) ส่งผลให้ขนาดของท่อมีขนาดใหญ่ขึ้น ในทางกลับกัน หาก

อัตราการไหลของก๊าซนำพามีน้อยเกินไป ก็จะทำให้ปริมาณของแอลกอฮอล์ ที่เข้ามาใน Chamber มีจำนวนน้อย ทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ไม่สามารถก่อตัวขึ้นมาได้ หรือถ้าสามารถก่อตัวขึ้นได้ก็จะมีในปริมาณที่น้อยมาก เนื่องจากไม่มีอะตอมคาร์บอนเพียงพอที่จะลงมาทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแผ่นตัวอย่าง (รูปที่ 4.10 (ก)) ดังนั้นอัตราการไหลของก๊าซนำพาควรจะอยู่ในระดับที่เหมาะสม ไม่มากหรือน้อยจนเกินไป ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้

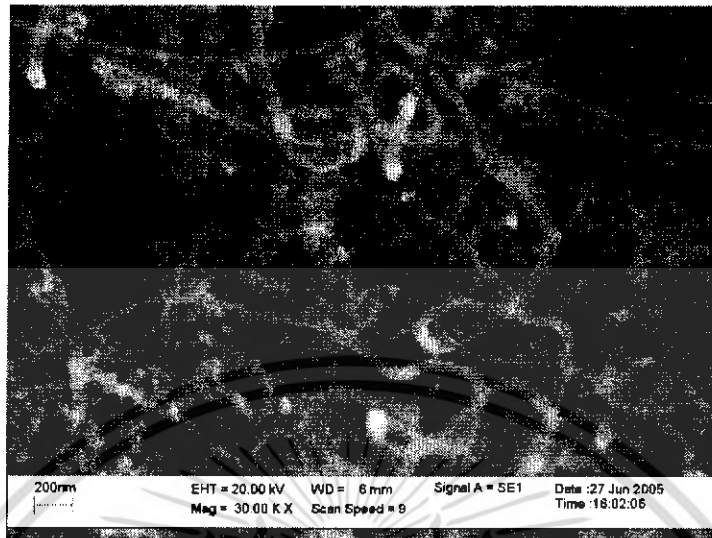


(ก)



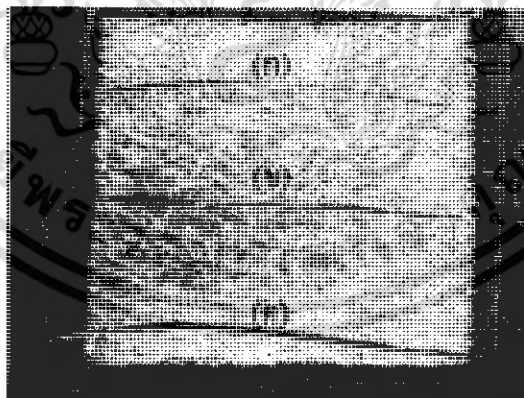
(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ที่อัตราการไหลของก๊าซนำพาค่าต่างๆ (ก) อัตราการไหลของก๊าซนำพา 50 cc/min คาร์บอนนาโนทิวป์ที่พบ จะมีจำนวนน้อยมาก (ข) อัตราการไหลของก๊าซนำพา 100 cc/min คาร์บอนนาโนทิวป์ที่พบ จะมีลักษณะค่อนข้างบริสุทธิ์และมีขนาดเล็ก (ค) อัตราการไหลของก๊าซนำพา 200 cc/min คาร์บอนนาโนทิวป์ที่พบ จะมีลักษณะค่อนข้างสกปรกไม่บริสุทธิ์และมีขนาดใหญ่



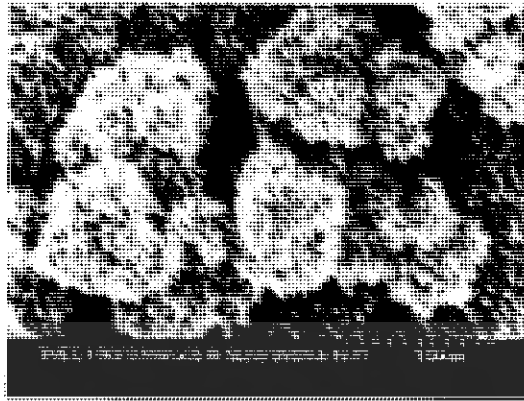
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายขดลวดความร้อน ก่อนทำการทดลอง และหลังทำการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซนำพาค่าต่างๆ (ก) ขดลวดความร้อนก่อนการทำทดลอง (ยังไม่ผ่านการใช้งาน) (ข) ขด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

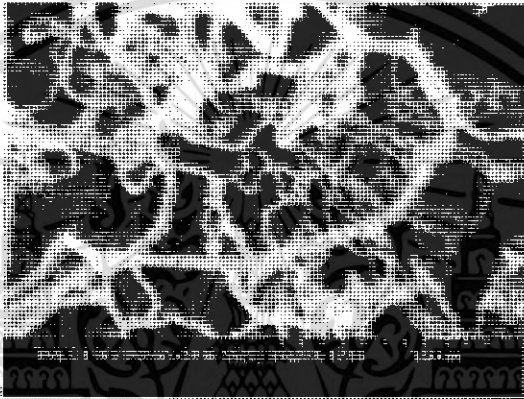
ลวดความร้อนที่ผ่านการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซนำพา 3000 cc/min (ค) ขดลวดความร้อนที่ผ่านการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซนำพา 2500 cc/min

#### 4.3.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์

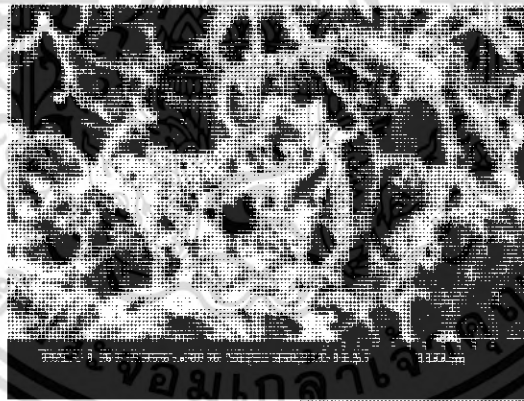
เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้น ก็เป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยจากการทดลองพบว่า เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้น มีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่สามารถสังเคราะห์ได้ ซึ่งจากการทดลองเราได้ทำการทดลองการสังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน โดยทำการทดลองที่ 1 นาที, 2 นาที, 3 นาที, 5 นาที, 10 นาที และ 15 นาที และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่า แผ่นตัวอย่างที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่ 1 นาที (รูปที่ 4.12 (ก)) จะไม่พบคาร์บอนนาโนทิวป์บนแผ่นตัวอย่าง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นสั้นเกินไป ไม่เพียงพอที่จะสามารถทำให้อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาบนแผ่นตัวอย่าง จนสามารถก่อตัวขึ้นเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ ส่วนแผ่นตัวอย่างที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่ 5 นาที (รูปที่ 4.12 (ข)) จะพบคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ เมื่อเปรียบเทียบกับ แผ่นตัวอย่างที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่ 10 นาที (รูปที่ 4.12 (ค)) จากแผ่นตัวอย่างที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่ 10 นาที จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามี nano carbon particle เกาะอยู่ตามบริเวณรอบๆท่อ มองดูแล้วค่อนข้างที่จะสกปรก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ยาวนานเกินไป (10 นาที) อาจทำให้อะตอมคาร์บอน ที่ลงมาทำปฏิกิริยากับ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อทำปฏิกิริยากัน จึงทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถก่อตัวขึ้นมาได้ และขณะเดียวกันเมื่อโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบอยู่บนแผ่นตัวอย่างทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอนจนไม่สามารถแยกที่ฟัดได้อีก จึงไม่เหลือโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะมาทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอน ที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนอย่างต่อเนื่อง ทำให้อะตอมคาร์บอนลงมาเกาะบริเวณรอบๆท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ก่อตัวขึ้นมาก่อนหน้านี้แทน ส่งผลให้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ มีความสกปรก อะตอมคาร์บอนที่ลงมาเกาะนี้อาจจะอยู่ในรูปของ nano carbon particle หรือ amorphous carbon ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายๆ กับกราฟไฟท์ แต่จะมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้น มีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ ถ้าหากใช้เวลาในการสังเคราะห์น้อยเกินไป คาร์บอนนาโนทิวป์ก็จะไม่สามารถก่อตัวขึ้นมาได้ ในทางกลับกัน ถ้าหากใช้เวลาในการสังเคราะห์มากเกินไป ก็จะทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์ลดลง ดังนั้นในการสังเคราะห์ควรจะใช้เวลาที่เหมาะสมอยู่ในระดับกลางๆ ไม่มากน้อยจนเกินไป ก็จะทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ที่การสังเคราะห์ในเวลาที่ต่างๆ กัน (ก) สังเคราะห์ที่เวลา 1 นาที ไม่พบคาร์บอนนาโนทิวป์ (ข) สังเคราะห์ที่เวลา 5 นาที พบคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ (ค) สังเคราะห์ที่เวลา 10 นาที พบคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ค่อนข้างสกปรก มี nano carbon particle เกาะอยู่ตามบริเวณรอบๆท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

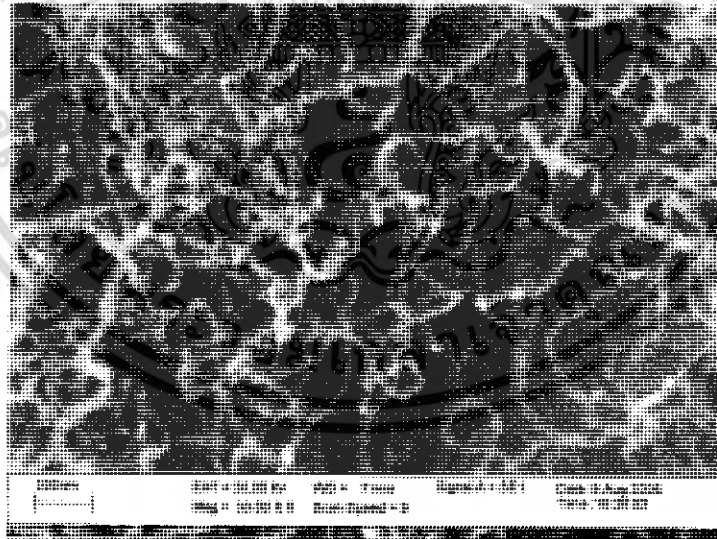
#### 4.3.4 ผลของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการทดลองพบว่า ความหนาของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีผลต่อความหนาแน่นและลักษณะการวางตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ และลักษณะการวางตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวอย่าง โดยในการทดลองเราได้ทำการทดลองโดยใช้แผ่นตัวอย่างที่มีชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนา และแผ่นตัวอย่างที่มีชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบาง โดยแบบบางทำการเตรียมแผ่นตัวอย่างด้วยการ Spin ที่ความเร็ว 2000 rpm เป็นเวลา 10 วินาที จำนวน 1 ครั้ง (รูปที่ 4.13 (ก)) และแบบหนาทำการเตรียมแผ่นตัวอย่างด้วยการ Spin ที่ความเร็ว 2000 rpm เป็นเวลา 10 วินาที จำนวน 4 ครั้ง (รูปที่ 4.13 (ข)) ซึ่งจากการ Spin ในจำนวนครั้งที่ต่างกันนี้ จะได้ความหนาของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา หรือมีจำนวนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยการ Spin ในจำนวนครั้งที่มากกว่า จะให้ความหนาแน่นของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่หนาแน่นกว่า หรือมีจำนวนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากกว่า การ Spin ในจำนวนครั้งที่น้อยกว่าเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ดังแสดงในแบบจำลองผลของการเตรียมแผ่นตัวอย่างในจำนวนครั้งการ Spin ที่ต่างกัน (รูปที่ 4.13) ซึ่งโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไปเกาะอยู่บน Zeolite จะมีจำนวนน้อย เมื่อเราเตรียมแผ่นตัวอย่างด้วยการ Spin จำนวน 1 ครั้ง ต่างจากการเตรียมแผ่นตัวอย่างด้วยการ Spin ในจำนวน 4 ครั้ง ที่มีจำนวนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปเกาะอยู่บน Zeolite ได้มีผิวหนังบนแผ่นตัวอย่าง



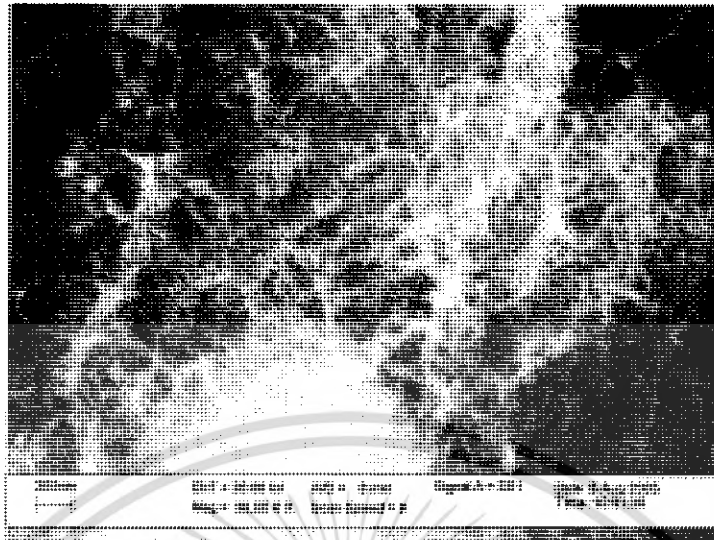
รูปที่ 4.13 แบบจำลองผลของการเตรียมแผ่นตัวอย่างในจำนวนครั้งที่ต่างกัน (ก) แผ่นตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างด้วยการ Spin ที่ความเร็ว 2000 rpm ใช้เวลา 10 วินาที จำนวน 1 ครั้ง จะให้ความหนาแน่นของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่หนาแน่น (ข) แผ่นตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างด้วยการ Spin ที่ความเร็ว 2000 rpm ใช้เวลา 10 วินาที จำนวน 4 ครั้ง จะให้ความหนาแน่นของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ค่อนข้างเบาบาง

จากการทดลอง เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันจะพบว่า แผ่นตัวอย่างที่มีชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบาง คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นน้อยและวางตัวขนานกับฐานรอง (แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์) (รูปที่ 4.14 (ก)) แตกต่างจากแผ่นตัวอย่างที่มีชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนา ซึ่งมีความหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ค่อนข้างมากและเรียงตัวกันเป็นพุ่มตั้งขึ้นจากฐานรอง (รูปที่ 4.14 (ข)) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแผ่นตัวอย่างที่มีชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนา มีจำนวนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากกว่า แผ่นตัวอย่างที่มีชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบาง จึงทำให้อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน สามารถที่จะลงมาทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการกระจายตัวอยู่อย่างหนาแน่นบนแผ่นตัวอย่าง คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ก่อตัวขึ้นจึงมีแรงกระทำซึ่งกันและกันหรือที่เรียกว่า “แรงวานเดอร์วาลส์” ส่งผลให้ลักษณะของท่อตั้งขึ้นจากฐานรอง แต่ในกรณีของแผ่นตัวอย่างที่มีชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบางนั้น จะมีจำนวนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระจายตัวอยู่บนแผ่นตัวอย่างค่อนข้างเบาบางกว่าแผ่นตัวอย่างที่มีชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนา เมื่ออะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนลงมาทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอยู่อย่างเบาบาง คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ก่อตัวขึ้นจึงไม่มีแรงกระทำซึ่งกันและกัน ส่งผลให้ลักษณะของท่อมีการวางตัวราบขนานไปตามฐานรอง



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(๗)

รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นตัวอย่างที่ความหนาแน่นของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน (ก) ชั้นเคลือบ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบาง คาร์บอนนาโนทิวป์ที่พบ จะมีความหนาแน่นน้อยและวางตัวขนานกับฐานรอง (ข) ชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนา คาร์บอนนาโนทิวป์ที่พบ จะมีความหนาแน่นค่อนข้างมาก และเรียงตัวกันเป็นพุ่มตั้งขึ้นจากฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบต่อเนื่องจากอะลูมิเนียมออกไซด์ และฟลูโรเซน ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

ในบทนี้จะเป็นกล่าวถึงการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ โดยจะประกอบไปด้วยขั้นตอนและวิธีการทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ที่ได้จากการทดลอง

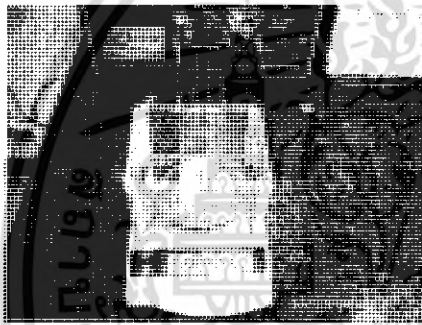
#### 5.1 อุปกรณ์และสารเคมี

1. ท่อแก้วที่ใช้เป็นห้องทำปฏิกิริยา (chamber)
2. ครอบแก้วสำหรับใส่สารละลาย
3. แอลกอฮอล์ (Ethanol)
4. ผงฟลูโรเซน (Ferrocene)
5. ถังเก็บก๊าซอาร์กอน (Ar)
6. แผ่นซิลิกอนขนาดประมาณ 10X10 mm.
7. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง
8. เครื่องทำให้เป็นอะตอม (Atomizer)
9. เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter)
10. เทอร์โมคัปเปิล (Thermo couple)
11. นาฬิกาจับเวลา

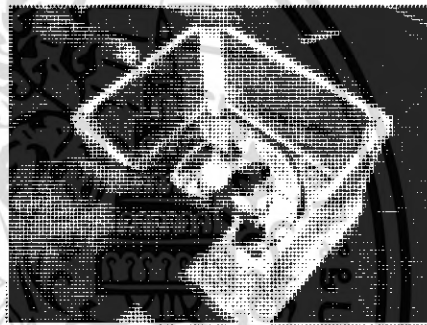
## 5.2 ขั้นตอนและวิธีการทำการทดลอง

### 5.2.1 การเตรียมสารโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

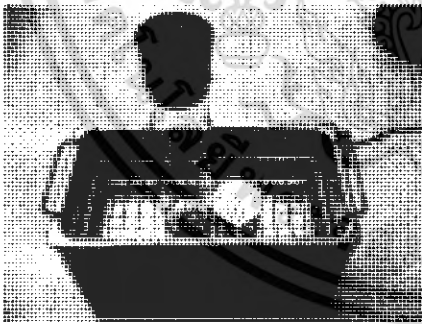
โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยในการทดลองนี้ ได้ใช้ ผงฟลูโรเซนเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโลหะตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะถูกนำไปผสมกับแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอล ขั้นตอนและวิธีการเตรียมสารโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้ โดย เริ่มต้นจากการคำนวณอัตราส่วนน้ำหนักของแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลกับผงฟลูโรเซนตามเงื่อนไขที่จะใช้ในการทดลอง จากนั้นนำแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลกับผงฟลูโรเซนมาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ เมื่อทำการชั่งน้ำหนักจนได้อัตราส่วนแล้ว ก็นำมาผสมกัน และสุดท้ายก็นำไปอัลตราโซนิก ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ผงฟลูโรเซนและแอลกอฮอล์ละลายเข้ากัน



(ก)



(ข)



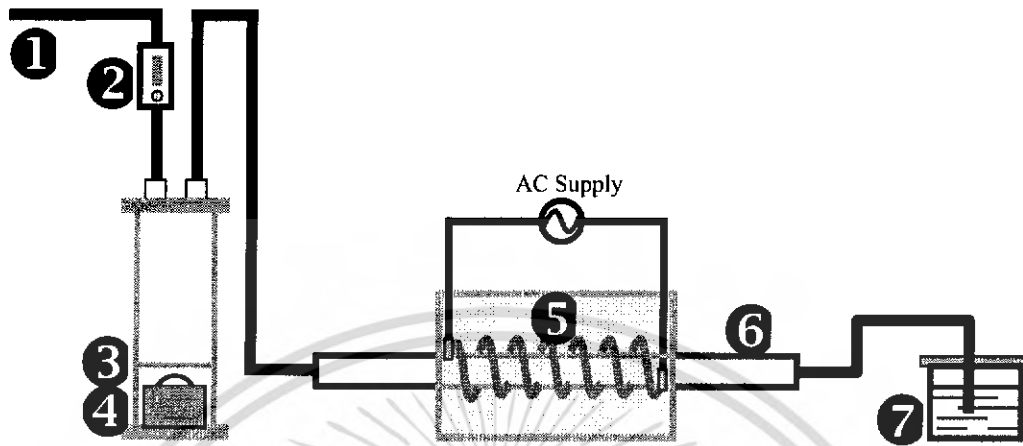
(ค)



(ง)

รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายจริงของขั้นตอนการเตรียมสารละลายโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) ขั้นตอนการนำแอลกอฮอล์มาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ (ข) ขั้นตอนการนำผงฟลูโรเซนมาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ (ค) ขั้นตอนการนำผงฟลูโรเซนที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์มาอัลตราโซนิก (ง) สารโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมทั้งหมดพร้อมที่จะนำไปทำการทดลอง

### 5.2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

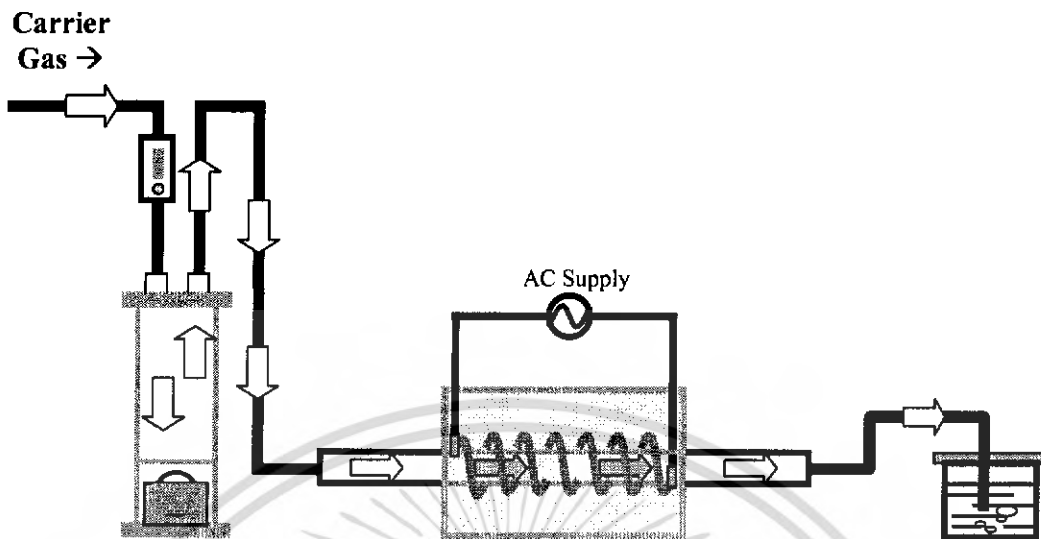


- |                             |                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| (1) ช่องทางเข้าของก๊าซนำพา  | (2) เครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ |
| (3) ฟลูโรเซนผสมกับแอลกอฮอล์ | (4) เครื่องทำหมอก (1-2 MHz)         |
| (5) ฮีตเตอร์                | (6) ท่อแก้ว                         |
| (7) น้ำ                     |                                     |

รูปที่ 5.2 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

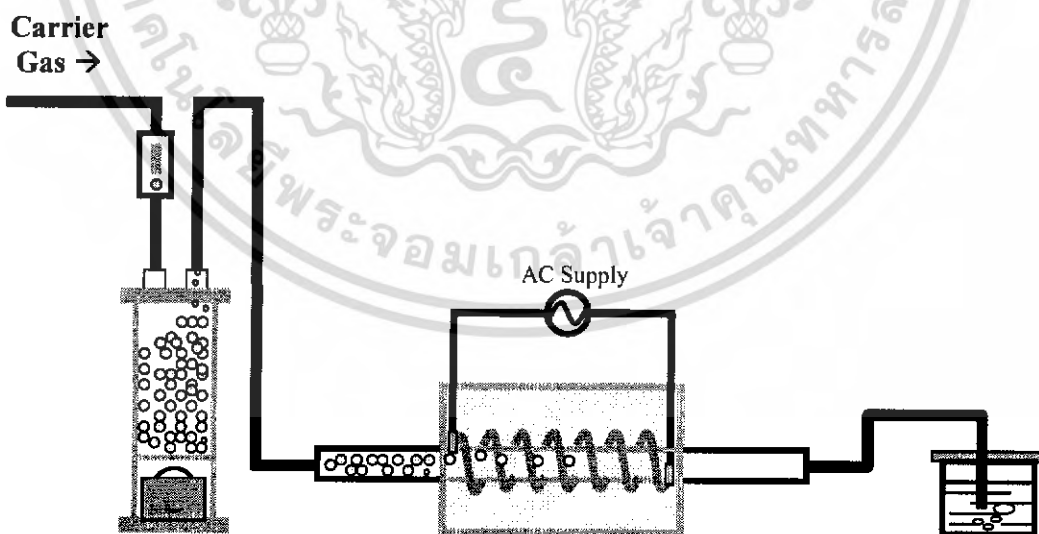
จากรูปที่ 5.2 เป็นภาพแสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในเชิงปริมาณ ซึ่งประกอบไปด้วย ก๊าซอาร์กอน (Ar) ใช้เป็นก๊าซนำพา, Flow meter ใช้ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน, ฟลูโรเซน ใช้เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะถูกผสมลงในแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน, เครื่องทำหมอก (1-2 MHz) ใช้เป็นตัวทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมในแอลกอฮอล์กลายเป็นละออง, ท่อแก้ว ภายในใช้เป็น Chamber หรือห้องในการทำปฏิกิริยา, ฮีตเตอร์ ใช้เป็นตัวให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา, น้ำ ใช้ป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกไหลย้อนเข้ามาภายในระบบ

โดยในการทดลองเริ่มแรกจะต้องทำการไล่อากาศภายใน Chamber ออกเสียก่อน เพื่อมิให้เกิดการทำปฏิกิริยากับอากาศ (oxidize) ในขณะที่ทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 กระบวนการไล่อากาศออกจากระบบ

จากรูปที่ 5.3 เราจะเริ่มทำการปล่อยก๊าซนำพาให้ไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลเข้าไปในกระบอกแก้วซึ่งภายในบรรจุฟลูโรเซนที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ ที่อัตราการไหล 3 L/min เพื่อไล่อากาศออกจากระบบ โดยในระหว่างนี้จะเปิดฮีตเตอร์ให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิตามเงื่อนไขที่กำหนด ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15 นาที หลังจากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

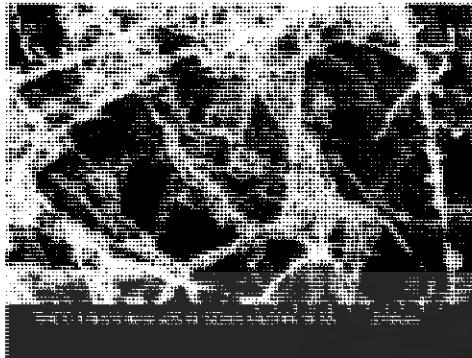
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.4 เราจะเริ่มจากการปรับเครื่องวัดอัตราการไหลให้ได้ตามเงื่อนไขที่เรากำหนด คือ 1 L/min จากนั้นเปิดเครื่องทำหมอก เพื่อให้ฟลูโรเซนที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ เป็นละอองหมอกลอยขึ้นไปตามท่อแก้ว และลงไปในพื้นที่ใช้เป็นห้องในการทำปฏิกิริยา ในขั้นตอนการสังเคราะห์นี้จะใช้เวลา 15 นาที จากนั้น เมื่อครบตามกำหนดเวลาจึงทำการปิดเครื่องทำหมอก และ Heater และปรับเครื่องวัดอัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 3 L/min และปล่อยให้ระบบเย็นลง จึงนำผลที่ได้จากการทดลองไปทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และสเปกโตรสโคปีรามาน (Raman Spectroscopy) เพื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ต่อไป

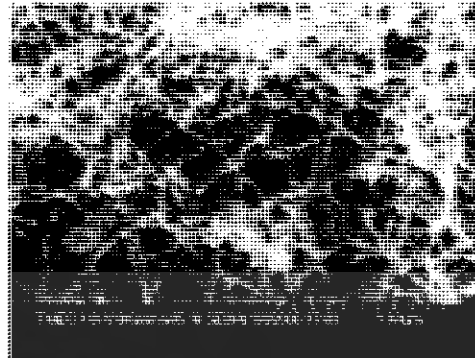
### 5.3 ผลการทดลอง

#### 5.3.1 ผลของอุณหภูมิ

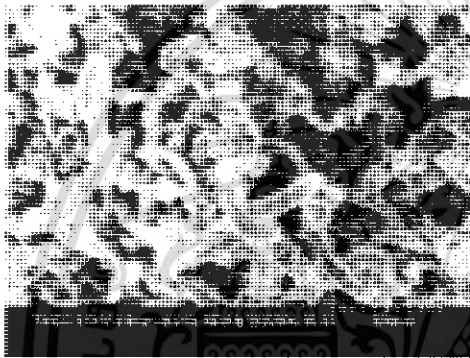
อุณหภูมิมีความสำคัญอย่างมากต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เนื่องจากอุณหภูมิเป็นตัวที่ทำให้อะตอมคาร์บอนสามารถแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนได้ และเป็นตัวช่วยในการทำปฏิกิริยา ในการทดลองเราได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยจะอ้างอิงอุณหภูมิจากจุดที่ทำการวัดภายนอกเป็นหลัก เมื่อเรานำภาพถ่าย SEM ที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่า ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างที่พบในแผ่นตัวอย่างที่มีการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิที่ต่างๆกัน รูปที่ 5.5 (ก), รูปที่ 5.5 (ข) และรูปที่ 5.5 (ค) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะมีขนาดที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งถ้าดูจากภาพ SEMs แล้วทำให้วิเคราะห์ได้ลำบาก แต่ถ้าพิจารณาจากกราฟ Raman Spectroscopy จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นสเปกตรัมจะมีแนวโน้มขยับไปทางรามานชิฟท์ที่ต่ำลง ซึ่งนั่นก็หมายความว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (กราฟรูปที่ 5.6) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก อุณหภูมิที่สูงขึ้น ไปทำให้อุณหภูมิของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (ฟลูโรเซน) รวมตัวกัน กลายเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น และเมื่ออะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอนุภาคใหญ่ ส่งผลให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ก่อตัวขึ้นมา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงของความเร็ว จากกราฟอัตราส่วน  $I_G/I_D$  แล้ว (กราฟรูปที่ 5.7) จะเห็นว่า การสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงๆ จะมีค่าความเร็วที่ดีกว่าการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก การสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงๆ จะทำให้อุณหภูมิของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแตกตัวได้ดีกว่าการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ อาจทำให้อุณหภูมิของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแตกตัวออกมาได้ไม่หมด ส่งผลให้ความเร็วของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ลดลง



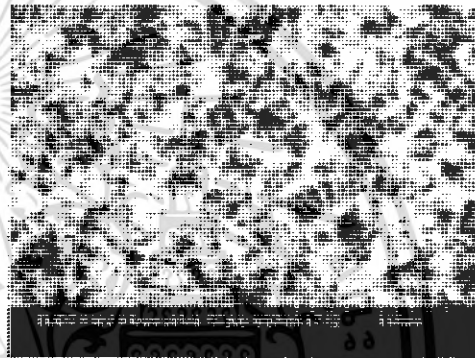
(ก-1) กลางฮีตเตอร์ที่ 800°C



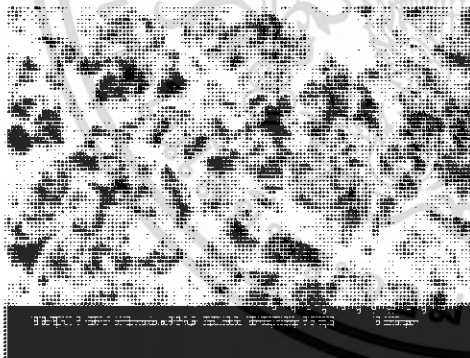
(ก-2) ปลายฮีตเตอร์ที่ 800°C



(ข-1) กลางฮีตเตอร์ที่ 700°C



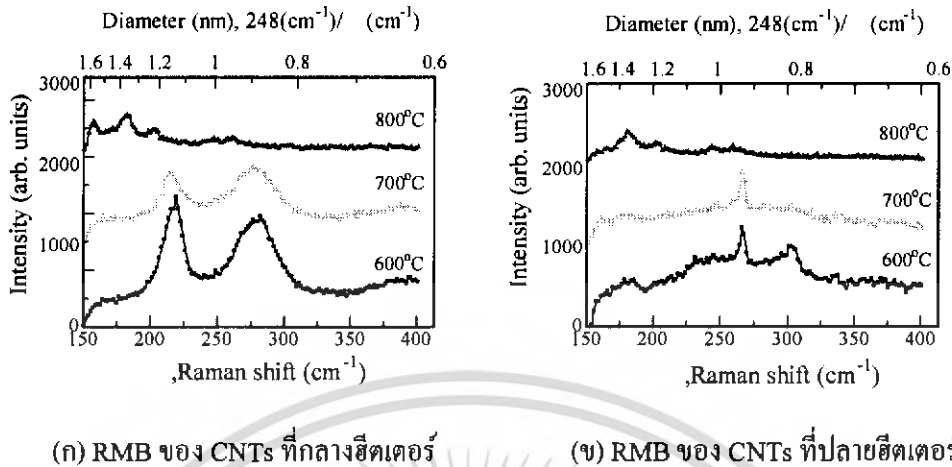
(ข-2) ปลายฮีตเตอร์ที่ 700°C



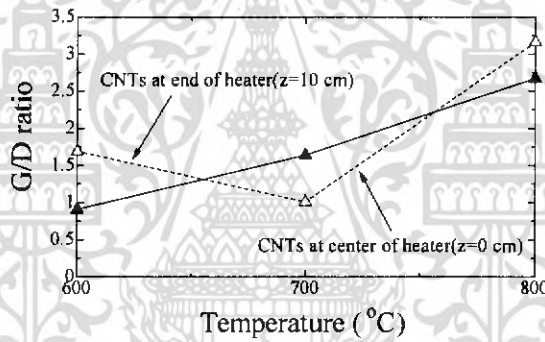
(ค) ปลายฮีตเตอร์ที่ 500°C

รูปที่ 5.5 ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายได้จากแผ่นตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



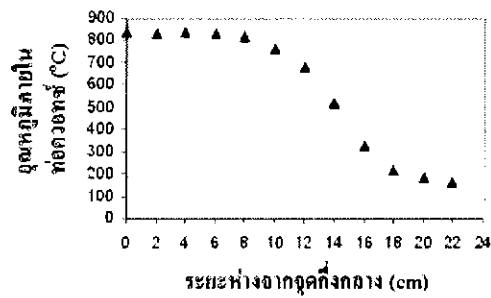
รูปที่ 5.6 กราฟ Raman Spectroscopy ที่วัดได้จากแผ่นตัวอย่าง ที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน



รูปที่ 5.7 กราฟอัตราส่วน  $I_G/I_D$  ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน

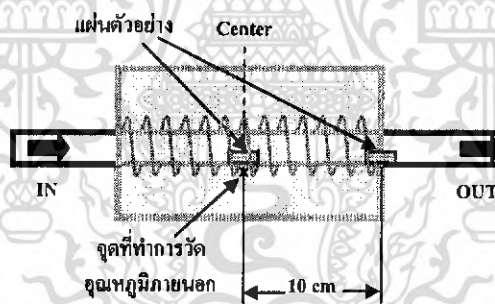
5.3.2 ผลของตำแหน่งการวางแผ่นตัวอย่างในท่อแก้ว

จากการศึกษาผลของตำแหน่งการวางแผ่นตัวอย่างในท่อแก้ว เราได้ทำการทดลองโดยเริ่มจากการวัดอุณหภูมิภายในท่อแก้วที่จุดต่างๆ เพื่อหาตำแหน่งที่มีอุณหภูมิเหมาะสมต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยจะกำหนดให้อุณหภูมิภายนอกคงที่ โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดอย่างคงที่ และทำการวัดที่จุดกึ่งกลางความยาวของฮีตเตอร์ ซึ่งผลจากการวัดพบว่า อุณหภูมิภายในท่อแก้วแต่ละตำแหน่งจะมีค่าที่ต่างกันออกไปและอุณหภูมิภายในท่อแก้วจะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิภายนอกท่อแก้วประมาณ 130°C เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งการวัดที่จุดเดียวกัน (รูปที่ 5.8)



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในท่อควอทซ์ เมื่ออุณหภูมิภายในท่อแก้วมีค่า  $830^{\circ}\text{C}$  (ควบคุมอุณหภูมิภายนอกให้คงที่ที่  $700^{\circ}\text{C}$ )

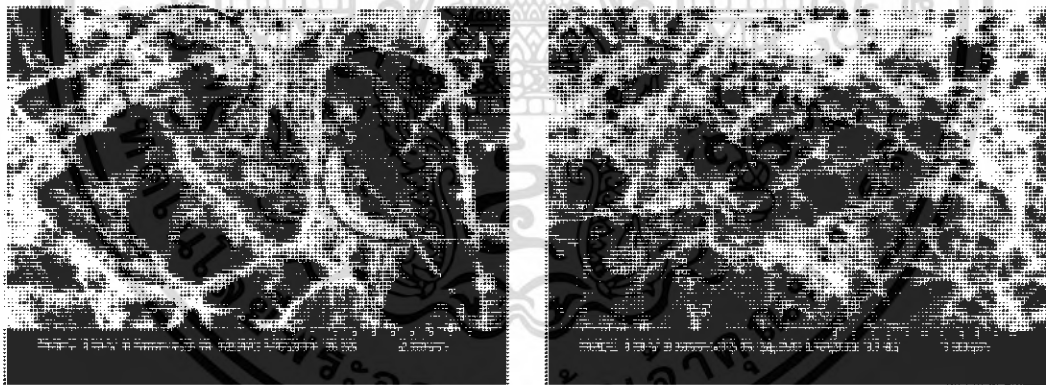
เมื่อดูจากผลการวัดอุณหภูมิภายในท่อแก้วแล้ว ทำให้เราทราบถึงตำแหน่ง ที่มีอุณหภูมิเหมาะสมต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งน่าจะเป็นบริเวณตรงกลางฮีตเตอร์หรือที่ระยะ 0 ซม. และบริเวณปลายฮีตเตอร์หรือที่ระยะ 10 ซม. ดังนั้นในการทดลอง เราจึงจะวางแผนตัวอย่างในตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งก็หมายความว่าในการทดลองหนึ่งครั้งเราจะทำการวางแผนตัวอย่างไว้สองตำแหน่งคือ ตรงกลางของฮีตเตอร์ และตรงปลายของฮีตเตอร์ดังระบบที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ภาพแสดงตำแหน่งการวางแผนตัวอย่างในการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

จากการทดลองเมื่อเรานำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตรงกลางฮีตเตอร์ และแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตรงปลายฮีตเตอร์ เมื่อดูจากภาพถ่าย SEM โดยรวมแล้วจะเห็นว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบจากแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางฮีตเตอร์ (รูปที่ 5.10 (ก)) จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ที่ตำแหน่งตรงปลายฮีตเตอร์ (รูปที่ 5.10 (ข)) แต่เมื่อสังเกตให้ดีแล้วจะพบว่า แผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางฮีตเตอร์จะมีคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็ก

เหมือนกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบในแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ที่ตำแหน่งตรงปลายฮีตเตอร์ แต่มีสิ่งสกปรกมาเกาะตามบริเวณท่อของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จึงทำให้เมื่อดูโดยรวมแล้วคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบในแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางฮีตเตอร์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ที่ตำแหน่งตรงปลายฮีตเตอร์ ซึ่งสิ่งสกปรกที่มาเกาะตามท่อของคาร์บอนนาโนทิวบ์เหล่านี้ อาจเกิดจากการที่ไอของแอลกอฮอล์ที่ไหลเข้ามา เมื่อเจอความร้อนของฮีตเตอร์ที่ตำแหน่งต้นทางของฮีตเตอร์ ซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดที่จะสามารถทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ จึงทำให้เกิดสิ่งสกปรกที่มาจากคาร์บอนที่ไหม้ ซึ่งสกปรกเหล่านี้จะเป็นสารประกอบ ที่อยู่ในรูปของ amorphous carbon ซึ่งมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ หรือเป็นสารประกอบของเหล็กที่ไม่สามารถเป็นตัวเร่งได้ และสิ่งสกปรกเหล่านี้ก็จะถูกก๊าซนำพาพัดมาเกาะตามท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ก่อตัวขึ้นบนแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตรงกลางของฮีตเตอร์มากกว่าแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตรงปลายของฮีตเตอร์ เนื่องจากแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตรงกลางของฮีตเตอร์อยู่ในตำแหน่งใกล้กว่า และเมื่อเวลาผ่านไปสิ่งสกปรกก็จะถูกก๊าซนำพาพัดมาเกาะและพอกพูนขึ้นเรื่อยๆ จึงทำให้ดูเหมือนว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบในแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตรงกลางของฮีตเตอร์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตรงปลายของฮีตเตอร์ แต่แท้จริงแล้วขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอาจไม่แตกต่างกันมากนัก



(ก)

(ข)

รูปที่ 5.10 ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายจากแผ่นตัวอย่างที่มีตำแหน่งการวางที่ต่างกัน (ก) แผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางของฮีตเตอร์ (ข) แผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ที่ตำแหน่งตรงปลายของฮีตเตอร์

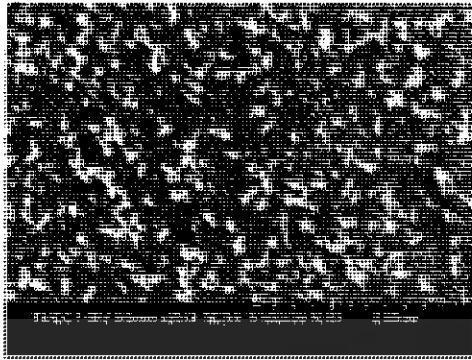
จากการทดลองจึงสรุปได้ว่า ตำแหน่งการวางแผ่นตัวอย่างจะมีผลต่อจำนวนของสิ่งสกปรกที่เข้ามาเกาะตามท่อของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตรงกลางของฮีตเตอร์จะมีสิ่งสกปรกมาเกาะตามท่อของคาร์บอนนาโนทิวบ์มากกว่าแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ปลายของฮีตเตอร์ ส่วนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางนั้นยังไม่สามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งการวางแผ่นตัวอย่างมีผลอย่างไร ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ แต่ถ้าพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิ คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตำแหน่งตรงกลางของหลอดความร้อน น่าจะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตำแหน่งตรงปลายของฮีตเตอร์ เนื่องจากบริเวณตรงกลางของฮีตเตอร์มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณตรงปลายของฮีตเตอร์ แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

### 5.3.3 ผลของปริมาณละอองหมอก

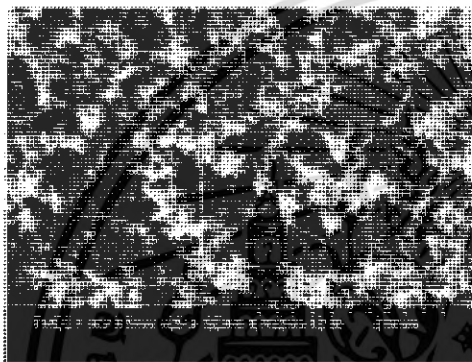
ปริมาณของละอองหมอกของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์นั้น จะแปรผันตรงกับค่าแรงดันที่จ่ายให้กับเครื่องทำหมอก และเราสามารถควบคุมปริมาณของละอองหมอกของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ได้จากการปรับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับที่จ่ายให้กับเครื่องทำหมอก โดยในการทดลองเราจะเริ่มจากการทดลองปรับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับที่จ่ายให้กับเครื่องทำหมอก เพื่อหาค่าแรงดันต่ำสุดที่จะต้องจ่ายให้เครื่องทำหมอก ว่าควรมีค่าแรงดันอย่างน้อยเท่าใด จึงจะสามารถทำให้สามารถเครื่องทำหมอก ทำงานได้ (สามารถผลิตละอองหมอกได้) ซึ่งจากการทดลองพบว่า ค่าแรงดันอย่างน้อยที่เราจะต้องจ่ายให้เครื่องทำหมอก ให้สามารถทำงานได้ คือที่ค่าแรงดัน 140 V ดังนั้นในการทดลองเราจึงจะทำการทดลองโดยปรับแหล่งจ่ายไฟอยู่ 2 ระดับคือ ระดับค่าแรงดันต่ำสุดที่จะสามารถทำให้สามารถเครื่องทำหมอก ทำงานได้ และระดับที่ค่าแรงดันปานกลาง หรือที่ค่าแรงดันระหว่างค่าแรงดันต่ำสุด ที่จะสามารถทำให้สามารถเครื่องทำหมอก ทำงานได้และค่าแรงดันสูงสุด ที่จะสามารถจ่ายให้กับเครื่องทำหมอก ได้ ซึ่งก็คือ 140V และ 180V ตามลำดับ และนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเดิมที่สังเคราะห์ไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งก็คือการจ่ายค่าแรงดันปกติ คือที่ค่าแรงดัน 220V หรือที่ค่าแรงดันสูงสุดที่สามารถป้อนให้กับเครื่องทำหมอก ได้

จากการทดลองเมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบ จะเห็นว่า แผ่นตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการจ่ายแรงดันให้กับเครื่องทำหมอก 140V หรือที่ค่าแรงดันต่ำสุด (รูปที่ 5.11 (ก)) จะมีสิ่งสกปรกเล็กมาเกาะกระจายตามแผ่นตัวอย่าง แต่ไม่พบคาร์บอนนาโนทิวบ์บนแผ่นตัวอย่าง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการที่เราจ่ายแรงดันให้กับเครื่องทำหมอก ที่ค่าแรงดันต่ำสุด ส่งผลให้ปริมาณของละอองหมอกโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์มีปริมาณน้อย และเมื่อถูกก๊าซนำพาไป

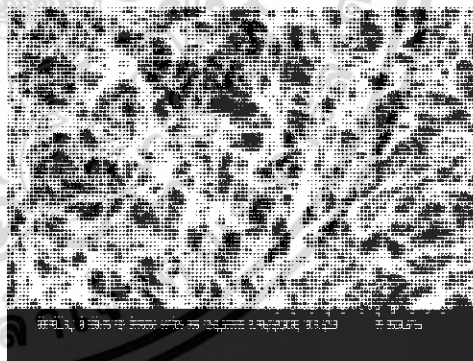
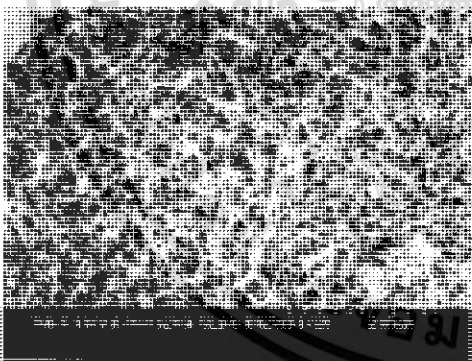
จึงทำให้ละอองหมอกของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์จางหายไปหมด ก่อนที่จะถูกพัดพามาเข้าท่อแก้วที่เราใช้เป็นห้องในการทำปฏิกิริยาดังนั้นเมื่อไม่มีแหล่งกำเนิดคาร์บอนและโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนนาโนทิวบ์จึงไม่สามารถที่จะก่อตัวขึ้นได้ แต่เมื่อเราดูภาพถ่าย SEM จากแผ่นตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการจ่ายแรงดันให้กับเครื่องทำหมอก ที่ค่าระดับแรงดันปานกลางคือที่ 180V (รูปที่ 5.11 (ข)) จะเห็นว่าจะมีสิ่งสกปรกกระจายเป็นกลุ่มก้อน และมีคาร์บอนนาโนทิวบ์พาดเกี่ยวไปมา แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างจะมีปริมาณที่ค่อนข้างเบาบาง กล่าวคือ มีปริมาณความหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวบ์ค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการจ่ายแรงดันที่ค่าสูงสุด หรือที่ 220V (รูปที่ 5.11 (ค)) เมื่อดูจากภาพถ่าย SEMs แล้วจะเห็นว่า มีสิ่งสกปรกกระจายเป็นกลุ่มคล้ายกับการสังเคราะห์ที่ค่าแรงดันปานกลางหรือที่ค่าแรงดัน 180V แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์ที่เงื่อนไขนี้ จะก่อตัวขึ้นเต็มพื้นที่บนแผ่นตัวอย่าง กล่าวคือ มีปริมาณความหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวบ์ค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก การที่เราจ่ายแรงดันที่ค่า 180V ถือว่าเป็นค่าแรงดันระดับปานกลางที่จ่ายให้กับเครื่องทำหมอก ซึ่งละอองหมอกของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ ที่ผลิตได้ก็จะมีปริมาณปานกลาง ไม่มากหรือน้อยจนเกินไป เมื่อถูกก๊าซนำพาเป่า จึงทำให้ละอองหมอกของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์บางส่วนจางหายไป ส่งผลให้ละอองหมอกของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ เข้ามาในท่อแก้วที่เราใช้เป็นห้องในการทำปฏิกิริยาน้อย เมื่อละอองหมอกของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์เข้ามาในท่อแก้วน้อย ทำให้มีแหล่งกำเนิดคาร์บอนและโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาน้อย คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ก่อตัวขึ้นบนแผ่นตัวอย่างจึงมีน้อยตามไปด้วย ซึ่งต่างจากการสังเคราะห์โดยการจ่ายแรงดันให้กับเครื่องทำหมอก ที่ค่าแรงดันสูงสุด หรือที่ 220V เครื่องทำหมอก สามารถที่จะผลิตละอองหมอกของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ได้ในปริมาณที่มาก ทำให้มีจำนวนของแหล่งกำเนิดคาร์บอนและโลหะตัวเร่งปฏิกิริยามาก ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ก่อตัวขึ้นบนแผ่นตัวอย่างมีปริมาณมากตามไปด้วย ดังนั้นจากการทดลองเราจึงสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณละอองหมอกของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ จะมีผลต่อปริมาณความหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ก่อตัวขึ้นบนแผ่นตัวอย่าง แต่ในส่วนของสิ่งสกปรกนั้น มีไม่แตกต่างกันมากนัก



(ค) ถ่ายแรงดันที่ 140V



(ข) ถ่ายแรงดันที่ 180V



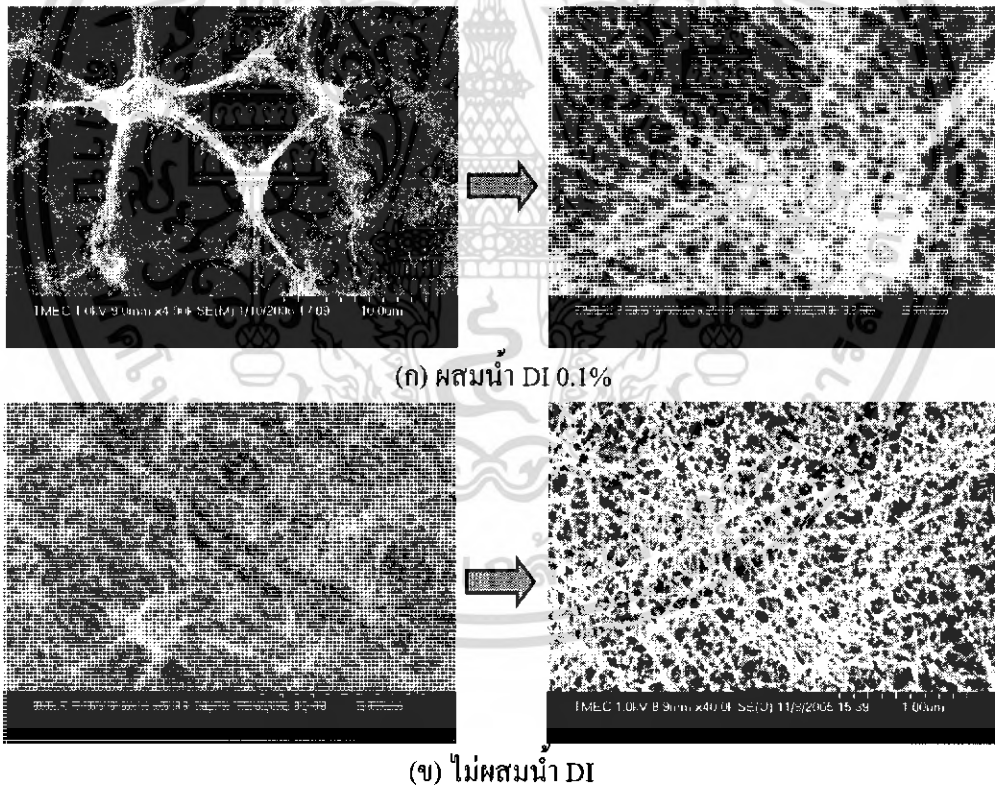
(ค) ถ่ายแรงดันที่ 220V

**รูปที่ 5.11** ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายจากแผ่นตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการจ่ายแรงดันที่ค่าต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.4 ผลของน้ำที่ผสมเข้าไปในสารละลายระหว่างฟลูโรเซนกับแอลกอฮอล์

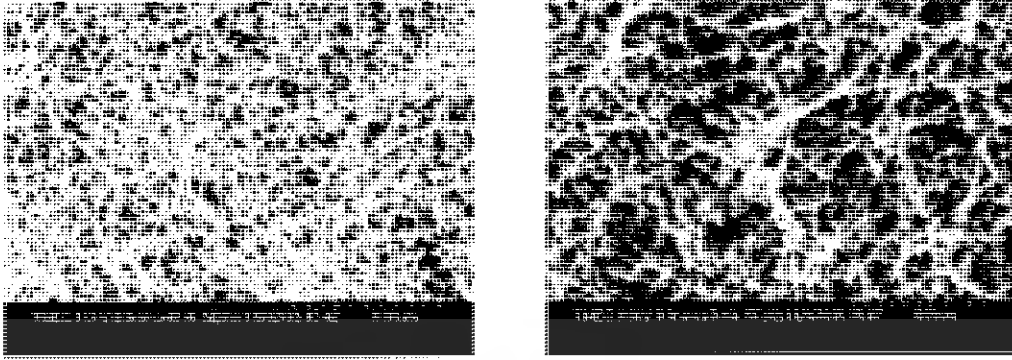
ในส่วนนี้เราจะศึกษาผลของน้ำที่มีต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งในการทดลองเราจะใส่น้ำ DI เข้าไปผสมในสารละลายระหว่างฟลูโรเซนกับแอลกอฮอล์ ในอัตราส่วนของน้ำ DI ต่อสารละลายระหว่างฟลูโรเซนกับแอลกอฮอล์ 1 W% เพื่อดูความแตกต่างที่เกิดขึ้น จากการทดลอง เมื่อนำภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายจากแผ่นตัวอย่างที่ได้มีการผสมน้ำ DI เข้าไปมาวิเคราะห์ (รูปที่ 5.12 (ก)) จะเห็นว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ก่อนตัวขึ้นบนแผ่นตัวอย่าง จะมีการรวมตัวกันลักษณะคล้ายใยแมงมุม ซึ่งต่างจากภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายจากแผ่นตัวอย่างที่ไม่ได้มีการผสมน้ำ DI (รูปที่ 5.12 (ข)) จะเห็นว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่พบบนแผ่นตัวอย่างจะมีการรวมตัวกันน้อยลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก น้ำ DI ที่เราผสมเข้าไป จะเข้าไปเพิ่มแรงตึงผิวของสารละลายระหว่างฟลูโรเซนกับแอลกอฮอล์ ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จับตัวกัน ดังนั้นน้ำที่ผสมเข้าไปในสารละลายระหว่างฟลูโรเซนกับแอลกอฮอล์ จะมีผลทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้รวมตัวกัน โดยมีลักษณะการรวมตัวกัน คล้ายใยของแมงมุม



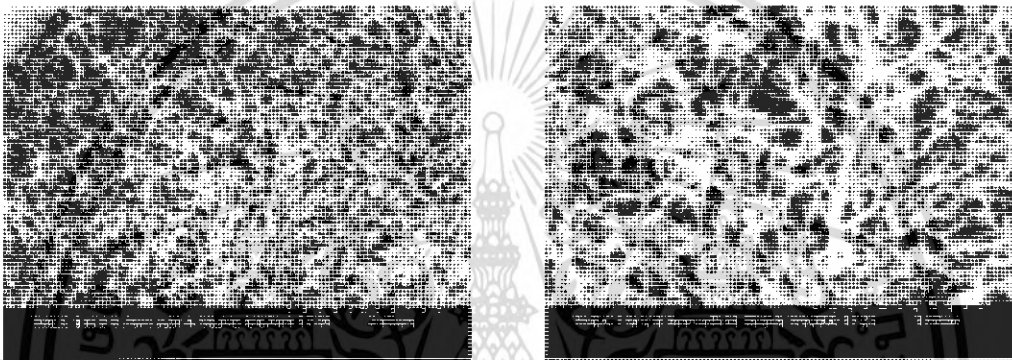
รูปที่ 5.12 ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายจากแผ่นตัวอย่างที่ได้มีผสมน้ำ DI และแผ่นตัวอย่างที่ไม่ได้มีผสมน้ำ DI เข้าไปในสารละลายระหว่างฟลูโรเซนกับแอลกอฮอล์

### 5.3.5 ผลของการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์

การให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์นั้น เราสามารถทำได้โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดต่อไปอีกช่วงเวลาหนึ่งตามที่เราจะกำหนด หลังจากที่เรายุคจ่ายไฟให้กับเครื่องทำหมอก แล้ว ในการทดลองเราได้ทำการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์เป็นเวลา 5 นาที เพื่อดูความแตกต่าง โดยการนำมาเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างที่ไม่ได้มีการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์ จากการทดลองเมื่อนำภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายจากแผ่นตัวอย่างที่ไม่ได้มีการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์ และแผ่นตัวอย่างที่ได้มีการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์มาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่า แผ่นตัวอย่างที่ไม่ได้มีการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์ (รูปที่ 5.13 (ก)) จะมีสิ่งสกปรกที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตร ลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ มาเกาะตามท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งสิ่งสกปรกเหล่านี้ อาจเป็นอนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังมีการแตกตัวไม่หมด เนื่องจากเมื่อเราหยุดจ่ายกระแสไฟให้แก่เครื่องทำหมอก และฮีตเตอร์พร้อมกัน ทำให้ละอองหมอกของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมอยู่แอลกอฮอล์ ที่ยังมีตกค้างอยู่ในกระบอแก้ว ถูกก๊าซนำพาพัดเข้ามาในท่อแก้วที่มีอุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการหยุดให้กระแสไฟ ส่งผลให้อุณหภูมิในท่อแก้วมีไม่สูงพอ ที่จะทำให้อนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแตกตัวได้หมด ทำให้เกิดเป็นสิ่งสกปรก และถูกก๊าซนำพาพัดมาเกาะตามท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ก่อตัวขึ้นมาก่อนหน้านี้ ซึ่งต่างจากแผ่นตัวอย่างที่ได้มีการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์ (รูปที่ 5.13 (ข)) จะเห็นว่า สิ่งสกปรก ลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ ที่มาเกาะตามท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก การให้ความร้อนหลังจากการสังเคราะห์ ทำให้อุณหภูมิในท่อแก้วยังมีค่าสูงคงที่ เมื่อโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังตกค้างในกระบอแก้ว ถูกก๊าซนำพาพัดเข้ามาในท่อแก้วที่ยังมีอุณหภูมิสูงคงที่ ทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแตกตัวได้หมด จึงทำให้สิ่งสกปรกที่มาเกาะตามท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ลดน้อยลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์ มีผลช่วยให้สิ่งสกปรก ลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ ที่มาเกาะตามท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ลดน้อยลงได้



(ก) แผ่นตัวอย่างที่ไม่ได้มีการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์



(ข) แผ่นตัวอย่างที่ได้มีการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์

รูปที่ 5.13 ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายจากแผ่นตัวอย่างที่ไม่ได้มีการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์ และแผ่นตัวอย่างที่ได้มีการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองที่ได้ทำการทดลอง และกล่าวถึงปัญหาหรืออุปสรรคที่เกิดขึ้นในการทดลอง แนวทางแก้ไข รวมถึงประโยชน์ที่จะสามารถไปใช้งาน ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 6.1 สรุปผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี Hot-filament CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

ในการทดลองนี้ ได้นำเสนอการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีการง่ายๆ และมีค่าใช้จ่ายไม่สูง โดยใช้วิธี Hot-filament CVD ซึ่งทำการทดลองที่ความดัน 1 บรรยากาศ (1 atm) โดยใช้แอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน, ใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซนำพา, ใช้หลอดทั้งเส้นเป็นขดลวดความร้อน โดยจากการทดลอง ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม เราสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ได้ โดยมีความยาวของท่อที่มากกว่า 5  $\mu\text{m}$  และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 50 nm โดยทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 750  $^{\circ}\text{C}$  ให้อัตราการไหลของก๊าซนำพา 100 cc/min ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ ยังมีความสม่ำเสมอไม่มากนักและมีปริมาณน้อย กล่าวคือคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ ยังเกิดไม่ทั่วทั้งแผ่นตัวอย่าง ซึ่งน่าจะมาจากสาเหตุของการกระจายความร้อนจากขดลวดความร้อน ที่มีการกระจายความร้อนไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นตัวอย่าง ซึ่งอาจจะแก้ไขด้วยการลดขนาดของแผ่นตัวอย่างให้มีขนาดเล็กลง หรือเพิ่มจำนวนของขดลวดความร้อน เพื่อที่จะทำให้มีการกระจายความร้อนที่ทั่วถึงได้ ซึ่งทั้งนี้ยังต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

แต่อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้ เราสามารถที่จะนำมาเป็นต้นแบบในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ในเชิงพาณิชย์ได้ โดยใช้ค่าใช้จ่ายไม่สูง และยังสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ ไปใช้ในงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในห้องปฏิบัติการต่อไปได้

## 6.2 สรุปผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่อเนื่องจากละอองไอแอลกอฮอล์และฟลูโอโรเซน ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

การทดลองนี้เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่อเนื่องจากละอองไอแอลกอฮอล์และฟลูโอโรเซน โดยทำการสังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศ โดยได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ และวิธีการพัฒนาให้สิ่งปรกที่เข้ามาเจือปนลดน้อยลง จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ และค่าความบริสุทธิ์จะแปรผันกับค่าอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่อเราทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และในทางกลับกันเมื่อเราทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิลดต่ำลง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย, ตำแหน่งการวางของแผ่นตัวอย่างจะมีผลต่อสิ่งสกปรกที่เข้ามาเจือปนกับคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ ซึ่งแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตำแหน่งกลางฮีตเตอร์ จะมีสิ่งสกปรกมาเกาะตามท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ ต่างจากแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตำแหน่งปลายฮีตเตอร์ จะมีสิ่งสกปรกเข้ามาเจือปนน้อยกว่าแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตำแหน่งกลางฮีตเตอร์ แต่ก็ยังสิ่งแปลกปลอมที่มีลักษณะทรงกลมเล็กๆ มาเกาะตามท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ และการให้ความร้อนหลังจากทำการสังเคราะห์ สามารถทำให้สิ่งแปลกปลอมที่มาเกาะตามท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์สลายได้ แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ยังมีสิ่งแปลกปลอมเข้ามาเจือปนอยู่

วิธีการสังเคราะห์นี้ เป็นวิธีที่ง่ายไม่ต้องใช้สุญญากาศ ไม่ต้องใช้ก๊าซอันตราย และที่สำคัญสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์อย่างต่อเนื่องในปริมาณมากๆ โดยผลการทดลองนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กและมีค่าความบริสุทธิ์ที่สูงได้ และใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาขบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ในเชิงพาณิชย์ได้อีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Iijima, Nature (London) 354 (1991) 56-58
- [2] สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ และ จิตติ หนูแก้ว, “งานวิจัยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยวิธี CVD ที่กำลังเริ่มในไทย”, วารสารLAB.TODAY, ฉบับที่ 13, 2547, หน้า 14-20
- [3] “ท่อนาโนคาร์บอน”, <http://www.technologymedia.com/article/detail.asp?arid=2484&pid=257>
- [4] “Wondrous World of Carbon Nanotubes”, <http://students.chem.tue.nl/ifp03/synthesis.html>
- [5] T. Kato et al, Chem. Phys. Lett 381 (2003) 422-426
- [6] “Cover Story”, <http://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue4/covers/cover1.html>
- [7] T. Okazaki, H. Shinohara, “Synthesis and characterization of single-wall carbon nanotubes by hot filament assisted chemical vapor deposition”, Chemical Physics Letters 376 (2003) 606-611
- [8] G.S. Choi, Y.S. Cho, K.H. Son, D.J. Kim, “Mass production of carbon nanotubes using spin-coating of nanoparticles”, Microelectronic Engineering 66 (2003) 77-82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้