

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวอย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1

บรรยากาศ

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



รฟ.
ร151ก
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....71948...
วัน,เดือน,ปี.....6.สิ.ย.2550

b. 11760721
i.

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2549

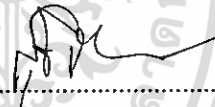
ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวอย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1
บรรยากาศ

ผู้จัดทำ

นาย ทรงศักดิ์ น้อยทรัพย์ รหัส 47015207



(ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ สามารถสำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วย ความกรุณา ความเอาใจใส่ของ ผศ. ดร. สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ เป็นอย่างมากที่ให้คำปรึกษา ความรู้ และความอนุเคราะห์ เครื่องมือในห้องวิจัย วัสดุและอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nano Electronics Materials and Devices : NEMD Lab) ขอขอบคุณ Western Digital สำหรับเครื่องมือต่างๆ และขอขอบคุณ พี่ บัณฑิต ไชยณรงค์ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องแลป NEMD Lab ที่คอยช่วยเหลือและกำลังใจตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา



ทรงศักดิ์ น้อยทรัพย์

(นาย ทรงศักดิ์ น้อยทรัพย์)

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์อย่างง่ายด้วยวิธี CVD แบบลด ลดความร้อน ที่ความดัน 1 บรรยากาศ โดยใช้แอลกอฮอล์ และ อาร์กอนเป็นก๊าซพาหะ

นาย ทรงศักดิ์ น้อยทรัพย์ รหัส 47015207
ดร. สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์อย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ เพื่อให้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้อย่างต่อเนื่องในปริมาณมากๆ โดยใช้เอทานอลผสม Ferrocene เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอนุภาคเหล็กตามลำดับ ทำการทดลองโดยการพาละออง น้ำ DI และพาละออง Thiophene ผสมเอทานอล เข้าไประหว่างที่ทำการพาละอองฟลูโรเซนผสมกับเอทานอล โดยเงื่อนไข เวลาที่ใช้ในการพาละออง น้ำ DI และพาละออง Thiophene ผสมเอทานอล ที่เป็นตัวแปรสำคัญต่อการทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์มีความบริสุทธิ์ โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์จะได้ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes) และสเปกโตรสโกปีรามาน (Raman Spectroscopy) ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมนี้ สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้

เมื่อนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์ จะพบว่า การเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้การพาละออง น้ำ DI มีผลให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ มีความบริสุทธิ์มากกว่าการเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้การพาละออง Thiophene ผสมเอทานอล

Synthesis of carbon nanotubes by hot-filament CVD at one atmosphere using alcohol and argon as a gas carrier

Mr. SongSak Noisap ID.47015207

Dr. Sutichai Chaisitsak Advisor

Academic Year 2006

ABSTRACT

We present the simplified method to synthesize carbon nanotubes (CNTs) at one atmosphere. Ethanol mix with Ferrocen, were used as a carbon source. We experiment with Flow Deionize water and Flow Ethanol mixed Thiophene while Flow Ethanol mixed with Ferrocen, times of Flow Deionize water and Flow Ethanol mixed Thiophene use a condition of synthesizes carbon nanotubes (CNTs) is pure. The obtained CNTs were analyzed by Scanning Electron Microscopes and Raman Spectroscopy. Under this condition we can extracted the CNT.

When we analyze carbon nanotubes (CNTs) and synthesize carbon nanotubes (CNTs) with Flow Deionize water the result that carbon nanotubes (CNTs) is pure more than synthesize carbon nanotubes (CNTs) with Flow Ethanol mixed Thiophene.

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
บทที่ 4 การทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่อเนื่องจากละอองไอของแอลกอฮอล์	
ที่ความดัน 1 บรรยากาศ	30
4.1 อุปกรณ์และสารเคมี	30
4.2 ขั้นตอนและวิธีทำการทดลอง	31
4.2.1 โปรแกรมและวงจรที่ใช้ในการ Control Valve	31
4.2.2 การเตรียมสารตัวเร่งปฏิกิริยา	34
4.2.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์(ระบบแบบที่ 1)	35
4.2.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์(ระบบแบบที่ 2)	40
4.2.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยใช้ Thiophene เป็น	
ส่วนประกอบ	44
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	46
5.1 ผลของการ Flow น้ำ DI เข้าไประหว่างที่ทำการ Flow ฟลูโรเซน	
ผสมกับแอลกอฮอล์ และใช้ระบบแบบที่ 2 ในการทดลอง	46
5.2 ผลของการ Flow Thiophene เข้าไประหว่างที่ทำการ Flow ฟลูโรเซน	
ผสมกับแอลกอฮอล์ และใช้ระบบแบบที่ 1 ในการทดลอง	53
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	58
6.1 สรุปผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่อเนื่องจากละออง	
ไอแอลกอฮอล์และฟลูโรเซน ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ทำการ Flow น้ำ DI	
เข้าไประหว่างทำการทดลอง และใช้ระบบแบบที่ 2 ในการทดลอง	58
6.2 สรุปผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่อเนื่องจากละออง	
ไอแอลกอฮอล์และฟลูโรเซน ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ทำการ Flow Thiophene	
ผสมแอลกอฮอล์ เข้าไประหว่างทำการทดลองและใช้ระบบแบบที่ 1 ในการทดลอง	60

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	เคมีคัลเซนเซอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ สำหรับตรวจวัดก๊าซหรือสาร โมเลกุลอื่นๆ	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	แสดง Front Panel ของ โปรแกรมที่ใช้ในการ Control Valve	31
รูปที่ 4.2	แสดง Block Diagram ของ โปรแกรมที่ใช้ในการ Control Valve	32
รูปที่ 4.3	แสดง จุดต่อ D0 และ D1 จาก Port LPT1 ที่ใช้ในการทดลอง	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.4 แสดงวงจรที่ใช้ในการต่อสัญญาณเพื่อ Control Valve	33
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจริงของขั้นตอนการเตรียมสารละลายโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา	34
รูปที่ 4.6 โครงสร้างของระบบแบบที่ 1 ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	35
รูปที่ 4.7 กระบวนการไล่อากาศออกจากระบบ	36
รูปที่ 4.8 คาบเวลาของระบบ ON/OFF Valve ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	37
รูปที่ 4.9 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในขั้นตอนที่ 1	38
รูปที่ 4.10 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในขั้นตอนที่ 2	39
รูปที่ 4.11 โครงสร้างของระบบแบบที่ 2 ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	40
รูปที่ 4.12 กระบวนการไล่อากาศออกจากระบบ	41
รูปที่ 4.13 คาบเวลาของระบบ ON/OFF Valve ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	42
รูปที่ 4.14 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	43
รูปที่ 4.15 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้ Thiophene เป็นส่วนประกอบ	44
รูปที่ 5.1 ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายได้จากแผ่นตัวอย่างที่ใช้การ Flow น้ำ DI ในการสังเคราะห์ต่างกัน	46-48
รูปที่ 5.2 โครงสร้างกราฟ Raman Spectroscopy ที่วัดได้จากแผ่นตัวอย่างที่ใช้การ Flow น้ำ DI ในการสังเคราะห์ต่างกัน	48-50
รูปที่ 5.3 กราฟอัตราส่วน I_G/I_D ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างที่ใช้การ Flow น้ำ DI ในการสังเคราะห์ต่างกัน	51
รูปที่ 5.4 ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายได้จากแผ่นตัวอย่างที่ผสม Thiophene ในการสังเคราะห์ต่างกัน และใช้การ Flow Thiophene 30 วินาที	53
รูปที่ 5.5 กราฟ Raman Spectroscopy ที่วัดได้จากแผ่นตัวอย่าง ที่ใช้ Thiophene ในการสังเคราะห์ต่างกัน และทำการ Flow Thiophene 30 วินาที	54
รูปที่ 5.6 กราฟ Raman Spectroscopy ที่วัดได้จากแผ่นตัวอย่าง ที่ใช้ Thiophene ในการสังเคราะห์ต่างกัน และทำการ Flow Thiophene ตลอด	55

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 5.7 กราฟอัตราส่วน I_p/I_0 ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างที่ใช้ Thiophene ในการสังเคราะห์ต่างกัน และใช้เวลาในการ Flow Thiophene ในการสังเคราะห์ต่างกัน

56



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติต่างของคาร์บอนนาโนทิวป์

11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

หลังจากที่มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์ carbon nanotubes : CNTs เมื่อปี ค.ศ.1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อิิจิมะ (Sumio Iijima) งานวิจัยด้านนี้ก็ได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากคุณสมบัติที่เด่นในหลายทาง กล่าวคือ คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น มีค่าความความแข็งแรง 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 เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง 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 โดยใช้โดยก๊าซอาร์กอน (Ar) เป็นก๊าซพาหะ ใช้ขดลวดทังสเตนเป็นขดลวดความร้อน (Hot-Filament) ใช้แอลกอฮอล์ชนิดเอทานอล เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน และใช้เหล็ก (Fe) เป็นโลหะตัวเร่ง

ปฏิกิริยา โดยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะผสมอยู่กับเอทานอล ในการทดลอง โดยเงื่อนไข เวลาที่ใช้ในการพลากรอง น้ำ DI และพลากรอง Thiophene ผสมเอทานอล เป็นตัวแปรสำคัญต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ รวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งข้อมูลที่ได้นั้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทางเช่น นำมาเป็นต้นแบบในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ในเชิงพาณิชย์, นำมาทำเป็นตัวเซนเซอร์ก๊าซ รวมถึงการนำข้อมูลที่ได้นี้ ไปใช้ในงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ในห้องปฏิบัติการต่อไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีเกี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวป์

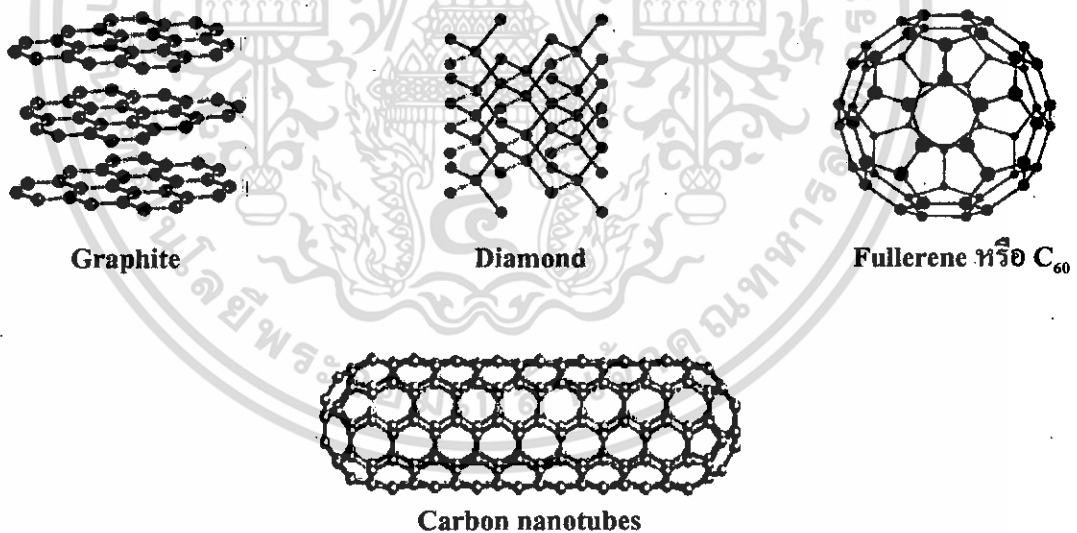
2.1 ประวัติที่มาของคาร์บอนนาโนทิวป์

เมื่อกลางปี ค.ศ. 1985 ทีมวิจัยนำโดย Prof. Smalley ที่ Rice University ได้สังเคราะห์ Fullerene ที่มีโครงสร้างคล้ายทรงของอะตอมคาร์บอนที่ประกอบกันด้วยผิวหน้าหกเหลี่ยมและห้าเหลี่ยม โมเลกุลของ Fullerene มีคาร์บอน 60 อะตอม ซึ่งหลังจากนั้นมีการตั้งชื่อเป็น Buckminsterfullerene ตามชื่อของสถาปนิกที่ออกแบบโดมลักษณะคล้าย C_{60} ซึ่งมีหน้าห้าเหลี่ยมซิกกับหกเหลี่ยมคล้ายกับลูกฟุตบอล 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 ชิ้นงานด้านอิเล็กทรอนิกส์และแสงคะตะลิสต์แบบเตอรี กักเก็บพลังงานและเซนเซอร์ เพราะคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นมีเอกลักษณ์ที่เด่นในทางอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถนำความร้อนได้สูง นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีค่าความเหนียวความแข็งแรงและความยืดหยุ่นกว่าวัสดุใดๆ ในปัจจุบัน

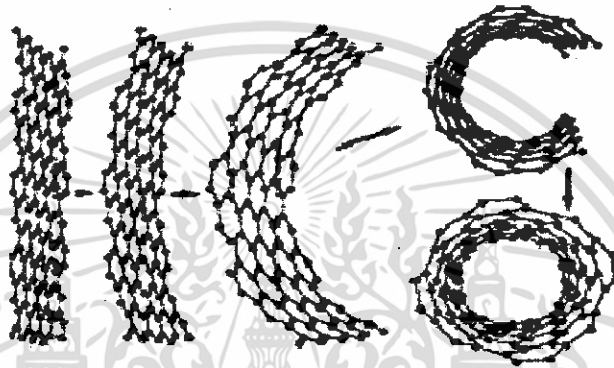
2.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์

คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ประกอบขึ้นจากธาตุคาร์บอน เช่นเดียวกับ เพชร (Diamond) กราไฟท์ (Graphite) เถ้าถ่าน และ Fullerene หรือ C_{60} (รูปที่ 2.1) แต่จะมีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เพชรมีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่ 4 ตัว เกิดเป็นโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อของพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนจึงทำให้เพชรมีความแข็งแรงและคงทนมาก ขณะที่กราฟิทมีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่เพียง 3 ตัว พันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายกับรังผึ้งหรือตาข่าย เรียงกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกัน เรียกว่า แผ่นกราเฟนและมีพันธะเชื่อมต่อระหว่างระนาบเป็นชั้นๆ พันธะของคาร์บอนในระนาบเดียวกันของแผ่นกราฟิทนั้นแข็งแรงมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ส่วนเถ้าถ่านจากการเผาไหม้จะมีโครงสร้างคล้ายกราฟิท 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 นั้นเป็น โมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของโครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดเล็ก สร้างมาจากคาร์บอน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดังกล่าวอยู่ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) และมีความตั้งแต้ระดับนาโนเมตร จนถึงระดับเซนติเมตร คาร์บอนนาโนทิวป์ จึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายล้านเท่า



รูปที่ 2.2 การม้วนของแผ่นกราฟีน

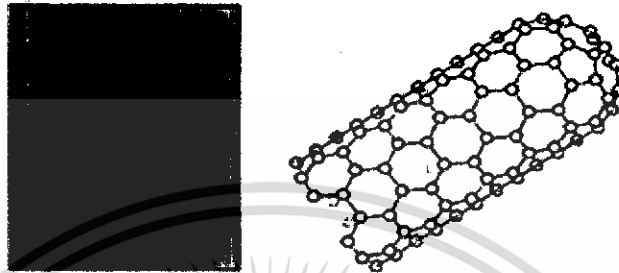
2.3 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

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)

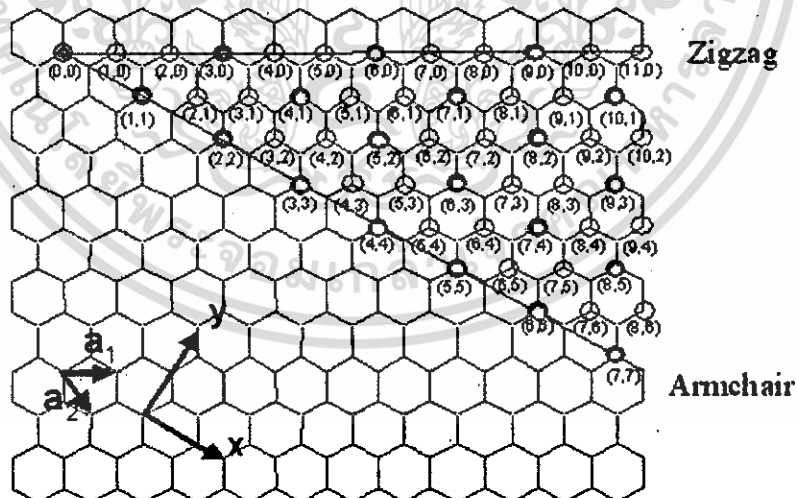
จะมีลักษณะ โครงสร้างที่คล้ายกับแผ่นกราฟไฟท์ที่ม้วนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์จึงมีผนังของอะตอมคาร์บอน ที่จัดเรียงพันธะ โควาเลนซ์ระหว่างอะตอมเป็นวง

แหวนหกเหลี่ยม และอาจมีบริเวณที่ปลายของท่อปิดด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของคาร์บอน ที่มีโครงสร้างคล้ายครึ่งหนึ่งของ Fullerene ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (SWNTs)

ถวลดตามผนังของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียวนั้น อาจมีลักษณะ โครงสร้างที่แตกต่างกันอาจแบ่งออกได้ 3 แบบ ตามการม้วนแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดที่ต่างกัน คือ โครงสร้างท่อแบบ Armchair ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟไฟต์ตามแนวสมมาตรแกนตั้ง โครงสร้างท่อแบบ Zigzag ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟไฟต์ตามแนวสมมาตรแกนนอน และ โครงสร้างท่อแบบ Chiral ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟไฟต์ด้วยมุมบิดอื่นๆ ต่างจากสองแบบแรก ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพอธิบายการม้วนแผ่นกราฟไฟต์เป็นท่อคาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

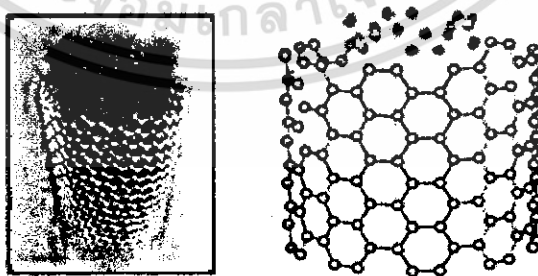
จากรูปที่ 2.4 ลักษณะของการม้วนของคาร์บอนนาโนทิวป์ แบบ Zigzag แบบ Armchair และแบบ Chiral สามารถอธิบายได้คือ การม้วนแบบ Zigzag นั้นจากรูปจะพิจารณาเส้นที่ลากจากจุด (0,0) ไปยังจุด (0,10) เป็นแกนและทำการม้วนตามแนวแกน ซึ่งมุมในการม้วนก็คือ 0° ก็จะได้เป็น Zigzag nanotubes และเส้นที่ลากจากจุด (0,0) ไปยังจุด (7,7) ซึ่งเป็นมุม 30° และม้วนตามมุมดังกล่าว ก็จะได้ Armchair nanotubes แต่ถ้าทำการม้วนตามมุมอื่นๆ ที่ไม่ใช่มุม 0° และมุม 30° 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)

2.4 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

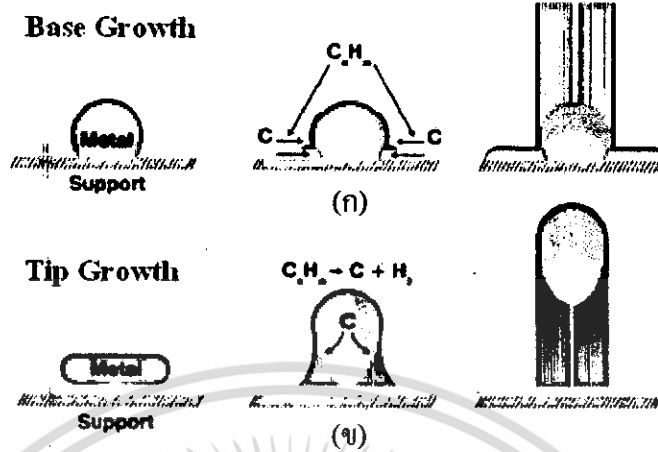
กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ยังไม่สามารถสรุปได้เป็นที่แน่ชัด และยังคงเป็นหัวข้อให้ถกเถียงกันในปัจจุบัน ซึ่งกลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ อาจจะถูกเปิดเผยขึ้นในระหว่างที่คาร์บอนนาโนทิวป์ก่อตัวขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดอาจแบ่งได้ 2 ลักษณะตามลักษณะการก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์คือ กลไกการเกิดแบบ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

2.4.1 Base Growth

จะเป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ คือในอุณหภูมิที่สูงพอเหมาะที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิที่สูงจะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านบน ทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบน ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.7 (ก)

2.4.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ปลายท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ คือที่อุณหภูมิสูงพอเหมาะที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิที่สูงจะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะสูงกว่าด้านล่างทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาคกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.7 (ข)



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

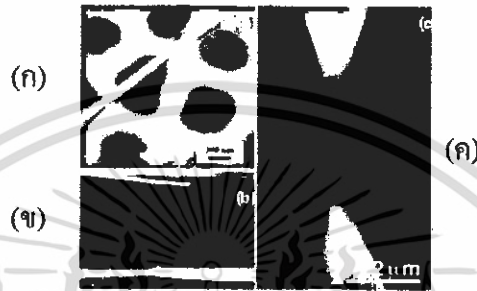
2.5 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์

คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น มีคุณสมบัติหลายประการด้วยกัน โดยสามารถยกตัวอย่างคุณสมบัติที่เด่นๆ ได้ดังต่อไปนี้ เช่น

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

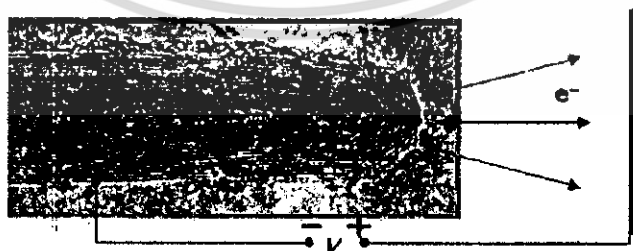
- ความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ค่าความยืดหยุ่นของคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่าสูงถึง 1 เทราปาสคาล (Tpa) หรือ 1000 กิกะปาสคาล (Gpa) วิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นนี้ทำได้หลายวิธีเช่น โดยอาศัย Thermal Vibration หรือใช้ Scanning Force Microscopy ไปงอคาร์บอนนาโนทิวป์โดยยึดปลายหนึ่งไว้แล้ววัดการสั่นสะเทือนในสนามไฟฟ้า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

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/cm² ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง 10^6 A/cm² สมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของคาร์บอนนาโนทิวป์ คือ สามารถในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์ในสภาวะสุญญากาศได้ (รูปที่ 2.9) เมื่อคาร์บอนนาโนทิวป์วางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ค่าศักย์ต่ำกว่า เช่นจะกระตุ้น Phosphors ที่วางไว้ห่าง 1 mm ใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว Molybdenum



รูปที่ 2.9 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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 สามารถจับยึดโมเลกุลและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของทิวป์ เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนของทิวป์ โดยคุณสมบัติทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติต่างของคาร์บอนนาโนทิวป์

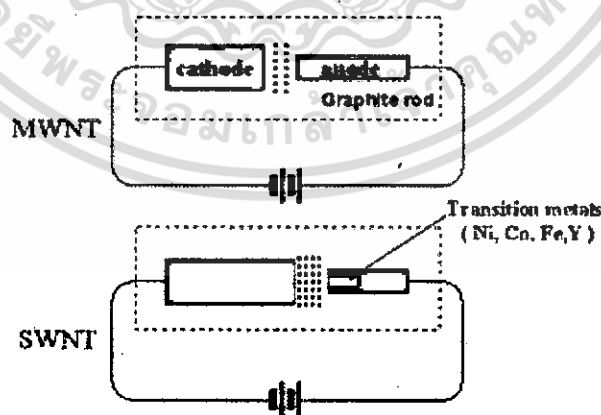
ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 ~ 2 nm
พื้นที่พื้นผิว	1,500 m ² /g
ความหนาแน่น	1.33 – 1.40 cm ³
กำลังต้านทานแรงดึง	> 60 GPa (ประมาณ 50 เท่าของเหล็กแรง แต่มีน้ำหนักแค่ประมาณ 1/6 เท่า)
ความยืดหยุ่น	ถึงจะถูกงอ ก็สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้โดยไม่เสียหาย
การทนต่อความร้อน	ในสุญญากาศ : ~ 2,800 °C ในอากาศ : ~ 750 °C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

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

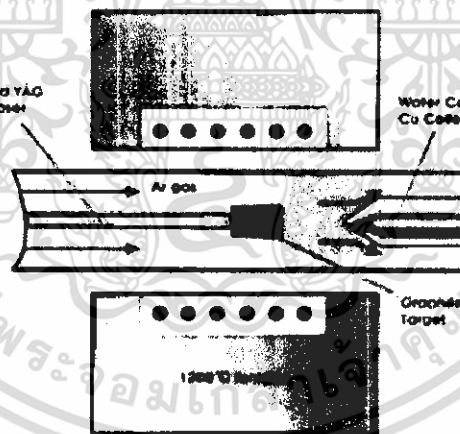
เทคนิคนี้เป็นวิธีเริ่มแรกที่ใช้สังเคราะห์ท่อคาร์บอน ซึ่งแต่เดิมนั้นใช้ในการสังเคราะห์ Fullerene โดยใช้การป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 100 แอมแปร์ และศักย์ไฟฟ้าประมาณ 20 กิโลโวลต์ที่ระหว่างขั้วคาร์บอน และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ 2000 °C ถึง 3000 °C ทำให้คาร์บอนเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมาร้อน จากนั้นคาร์บอนที่แตกตัวจะเกิดการควบแน่นและก่อตัวใหม่เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ขั้วแคโทด คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้นี้ จะเป็นท่อชนิดผนังหลายชั้น MWNTs มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในประมาณ 1-3 nm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกประมาณ 10 nm แต่ถ้าใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาจะได้ท่อชนิดผนังชั้นเดียว SWNTs ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6-1.4 nm ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ 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) หรือ ไนโตรเจน (N_2) ไปกวาดเอาท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่เกิดขึ้นออกจากเตาเผาแล้วนำไปหล่อเย็นที่ตัวกักเก็บที่ทำมาจากทองแดงด้านนอกเตาเผา โดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะมี 2 ชนิดคือ pulsed laser และ continuous laser สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง pulsed laser และ continuous laser คือ pulsed laser ต้องใช้ความเข้มของแสงสูงมากแต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายเป็นจังหวะ ไม่ต่อเนื่อง ส่วน continuous laser นั้น จะใช้ความเข้มแสงน้อยกว่า แต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ 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 โดยใช้อิทธิพลของไฟต์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1500 °C เพื่อให้เกิดการแตกตัวของอะตอมคาร์บอนและตัวเร่งปฏิกิริยา ความ

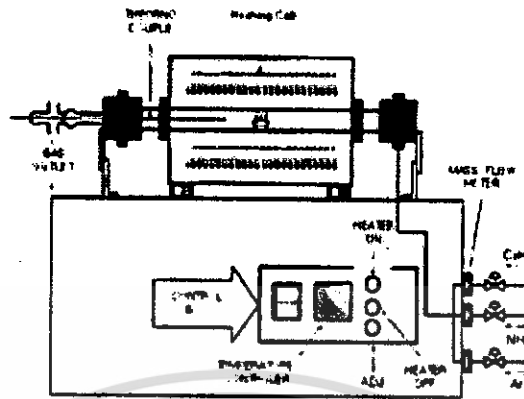
หนาแน่นของอะตอมทั้งสองชนิดที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวแปรที่สำคัญของการสร้างพันธะของคาร์บอนจนได้เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์

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

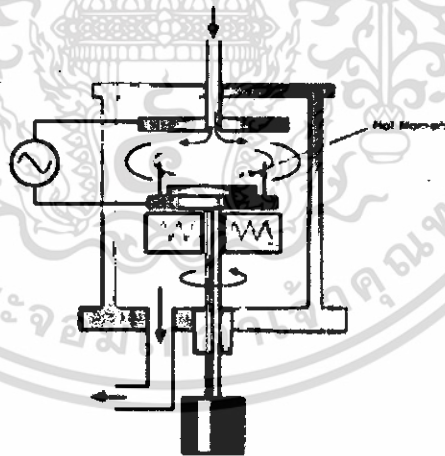
วิธีนี้จะใช้ Fe, Ni, Co หรือ โลหะผสมทั้งสามชนิดผสมกันทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะทำการกัดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาด nanometer-sized โดยใช้ NH_3 หรือ แอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ 750°C - 1050°C ในการกัด และใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบป้อนเข้ามาในระบบเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน และใช้ความร้อนจากเตาความร้อนทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และเข้าไปทำปฏิกิริยากับ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา 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



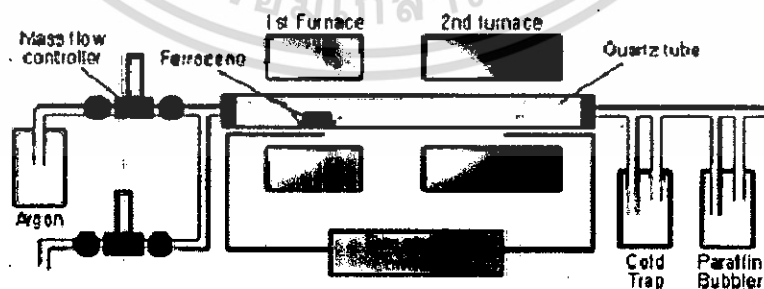
รูปที่ 2.13 ระบบของวิธี Plasma enhanced CVD

จากรูปที่ 2.13 แผ่นเพลทจะต่อกับขั้วไฟฟ้า ที่วางขนานกับฐานรอง และฐานรองจะต่ออยู่กับกราวด์ของขั้วไฟฟ้า เมื่อก๊าซเข้ามาตามท่อจากแผ่นเพลทตรงกันข้ามด้านบนกับฐานรอง ถูกแรงดันที่มี

ความถี่สูง เกิดเป็นพลาสมา ทำให้ไอของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัว และลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นจะก่อตัวบนอนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นโลหะจำพวก Fe, Ni, Co เคลือบบนชั้นซัลฟิดอนหรือชั้นไดออกไซด์ 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 การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถที่จะกำหนดทิศทางการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ให้ทอดงจากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้ แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด 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

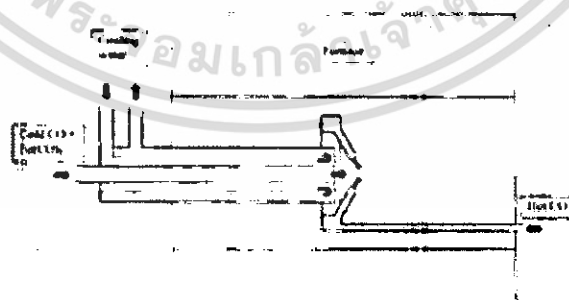


รูปที่ 2.14 ระบบของวิธี Vapor phase growth

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

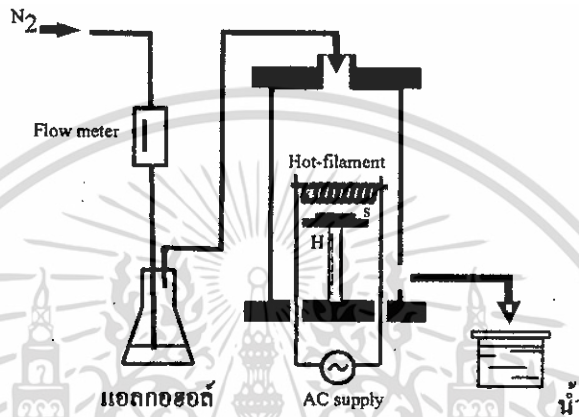
วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์ SWNTs โดยการปล่อยก๊าซ CO ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เข้ามาอย่างต่อเนื่องให้เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซโลหะ เช่น Ferrocene, Fe(CO), ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้น คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก โดยขนาดของท่ออยู่ที่ประมาณ 0.7 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าเป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้มีขนาดของท่อเล็กที่สุด 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 เจอความร้อนของขดลวดความร้อนจะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนและลงมาทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ จะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ ไอของแอตทอสอล์ หรือ มีเทน (CH_4) 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 เบาละมีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถจับยึดโมเลกุลและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ในสาขาของนาโนเทคโนโลยี ดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.7.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต เพราะด้วยคุณสมบัติที่มันมีน้ำหนักเบา ราคาถูก และมี ค่าความยืดหยุ่นสูงซึ่งจะไม่แตกหักง่าย อีกทั้งยังสามารถหด โคงงอได้เหมือนสปริง เมื่อออกแรงกดแล้วคืนรูปสู่สภาพ เดิมได้ ทำให้ได้วัสดุคอมโพสิต ที่มีคุณสมบัติพิเศษคือ จะแข็งแรงกว่าพวกไฟเบอร์ทั้งหลายเท่าที่เคยมีมา จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่นเป็นส่วนประกอบใน รถยนต์ เครื่องบิน สิ่งปลูกสร้างต่างๆ หรือแม้กระทั่งใช้ทำ เสื้อเกราะกันกระสุน เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถเอาไปใช้ ทำเป็นหลอดทดลองขนาดนาโนเพื่อเก็บของเหลวบางอย่าง หรือทำเป็นเบ้าหล่อวัสดุเซรามิก (Nan ceramic fibers) ได้

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

2.7.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

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

กำลังพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการค้าชิ้นแรกของญี่ปุ่นที่ได้มีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากคาร์บอนนาโนทิวป์

2.7.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในระดับหนึ่งไมโครเมตร ถ้าก้าวต่อไปเป็นนาโนอิเล็กทรอนิกส์นั้นคือต้องลดขนาด Component ลง 10 ถึง 1000 เท่าจากเดิม ดังนั้นกระบวนการที่สนใจของอิเล็กทรอนิกส์ component ขนาดนาโนทั้งทรานซิสเตอร์ ไดโอด รีเลย์ และลอจิกเกตต้องเปลี่ยนใหม่ เช่น ทรานซิสเตอร์จากเดิมระดับไมครอนที่เป็นซิลิกอนเซมิคอนดักเตอร์ ต้องหันมาใช้โครงสร้างโมเลกุลอินทรีย์ (organic molecules) หรืออนินทรีย์ (Inorganic) ในระดับนาโน มีการใช้คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นช่อง (Channel) อิเล็กตรอนผ่านระหว่าง source-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-FET โดยมีการโต้ปด้วยสารเพื่อที่จะเติมหรือเอาอิเล็กตรอนออกทำให้ได้ N-Type หรือ P-Type เกิดขึ้น



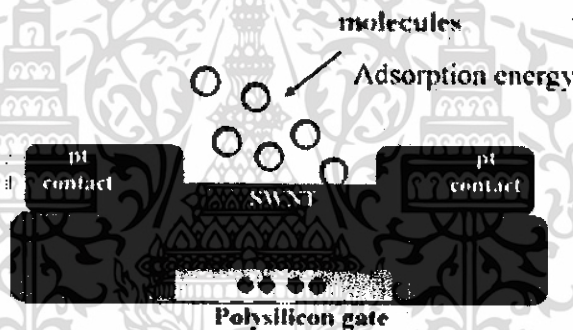
รูปที่ 2.17 ลักษณะ Single-molecule Transistor

ถึงแม้จะสามารถสร้างอุปกรณ์เหล่านั้นได้ในระดับนาโนแต่สิ่งที่ท้าทายกว่าคือการเชื่อมต่อ (Wire) อุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกัน เพื่อจะปฏิบัติการเชิงคณิตศาสตร์หรือลอจิกได้ จึงเกิดแนวคิดที่ต้องทำ

ให้คาร์บอนนาโนทิวป์ เป็นทั้งตัวเชื่อมและเป็นอุปกรณ์ในทีเดียว อย่างไรก็ตามสิ่งนี้ยังไม่รวมถึงในระดับโครงสร้างของระบบวงจรเชื่อมต่อกอมพิวเตอร์หรือระบบการทำงานอิสระอื่นๆ

2.7.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์

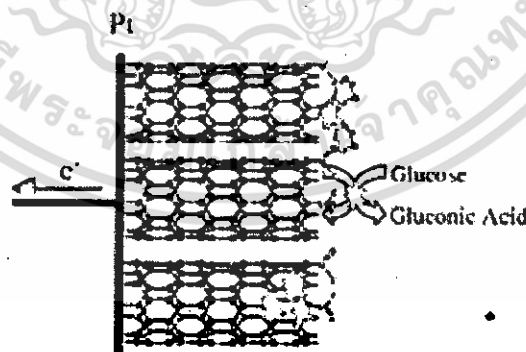
การที่คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถทำให้อยู่ในรูปของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และในขณะเดียวกันสารกึ่งตัวนำตอบสนองต่อสารพวก อัลคาไลน์ ฮาโลเจน และ ก๊าซต่างๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อเป็น Semiconducting CNTs จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ดีขึ้นอย่างมาก ทำให้เซนเซอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์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



รูปที่ 2.18 เซมิคัลเซนเซอร์ที่ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์ สำหรับตรวจวัดก๊าซ หรือสาร โมเลกุลอื่น

แต่การประยุกต์ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นเซนเซอร์แบบนี้มีปัญหา คือ ไม่สามารถแยกชนิดของก๊าซที่ความเข้มข้นต่ำได้และยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ และความเร็ว ก๊าซที่ไหลผ่าน ทำให้ขาดความสามารถเชิงจำเพาะ แนวทางสำหรับประยุกต์เชิงเซนเซอร์ให้ดีขึ้นสามารถทำได้ด้วยเหตุที่คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถ functionalize (เช่น หมู่ -OH และ -COOH เป็นต้น) ได้ ทำให้สามารถตรึงด้วยสารทางชีวภาพได้แก่ โปรตีน เอนไซม์ หรือ ดีเอ็นเอ จึงสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังกล่าว ไปประยุกต์ใช้กับงานด้านไบโอเซนเซอร์ เพื่อประโยชน์ในการวินิจฉัยทางการแพทย์ หรือใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารต่าง ๆ ได้ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ มีพื้นผิวสำหรับการตรึงสารทางชีวภาพสูงทำให้สามารถเพิ่มขนาดสัญญาณได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีของไบโอเซนเซอร์เดิม

การตรึงสารทางชีวภาพบนคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นมีหลายวิธี ได้แก่ การทำ simple adsorption ที่ช่องของปลายเปิดหรือผนังด้านนอกของคาร์บอนนาโนทิวป์ (วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกแต่มีข้อเสียคือ มีปริมาณสารทางชีวภาพที่ติดอยู่น้อย) การทำ hydrophobic หรือ Electrostatic interaction ระหว่างสารชีวโมเลกุลกับการทำให้เกิดพันธะ โควาเลนต์ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์หรืออาจ Functionalize ด้านข้างของคาร์บอนนาโนทิวป์โดยการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ ได้มีการพัฒนาใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ สร้างเป็นหัววัดไบโอเซนเซอร์สำหรับตรวจวัด น้ำตาลกลูโคส คีเอ็นเอ H_2O_2 และ NADH เป็นต้น การตรึงสารทางชีวภาพที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นต้องเปิดปลายหรือเอาส่วนของครึ่งทรงกลม C_{∞} ออกโดยสองวิธีหลัก ๆ คือ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับคาร์บอนนาโนทิวป์ ด้วยกรด (Acid oxidation) วิธีนี้ทำให้เกิดหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดและสามารถตรึงเอนไซม์ลงบนคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ ดังรูปที่ 2.19 ส่วนวิธีที่สองคือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศ (Air oxidation) ด้วยความร้อนสูง $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ประมาณ 5 นาที แต่การเปิดปลายวิธีที่สองนั้นจะตรึงเอนไซม์ได้ในปริมาณน้อยกว่าวิธีแรกเพราะไม่สามารถเพิ่มหมู่ function ของ คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ และยังส่งผลถึงความคงตัว (stability) ของเอนไซม์ด้วย ดังนั้นวิธีการเปิดปลายคาร์บอนนาโนทิวป์ จึงมีผลต่อการเข้าจับของเอนไซม์ภายในท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ บางรายงานใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นเพื่อทำให้ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์และมีหมู่ Carboxyl เพิ่มมากขึ้น นอกจากการใช้กรดทำปฏิกิริยากับคาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อทำให้เกิดหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์แล้วยังสามารถใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 V กับคาร์บอนนาโนทิวป์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นหมู่เอมีนที่มีอยู่ในสารชีวภาพจะสามารถจับกับหมู่ Carboxyl บนคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ [6]



รูปที่ 2.19 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจับกับหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์



รูปที่ 2.20 ภาพจาก AFM ของเอ็นไอซ์มีกดูโคสออกซิเดสที่ตรึงอยู่บน SWNTs

2.7.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน

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

บทที่ 3

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยจะกล่าวถึงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ผลการทดลองในครั้งนี้ โดยจะกล่าวถึงหลักการการทำงานทั่วไป, ประเภทและการนำไปใช้งาน ระบบการทำงาน รวมถึงวิธีการการใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 หลักการทำงานทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถให้กำลังขยาย (Magnification) และแจกแจงรายละเอียด (resolution) ได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาโดยในปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงถึง 500,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสงในการสะท้อนวัตถุ เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้มีประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูง กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาคะแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 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 ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก



รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEMs

3.2.2 SEMs

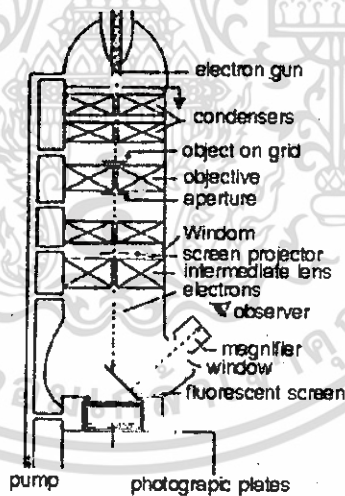
เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษารายละเอียดของพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะเป็นภาพสามมิติ นอกจากนี้ยังอาจดัดแปลงโดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ 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) ประกอบด้วยเครื่องสูดอากาศ 2 แบบ ได้แก่ เครื่องสูดอากาศแบบ mechanical pump และเครื่องสูดอากาศที่ใช้น้ำมันแบบ diffusion pump หรืออาจเป็น

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

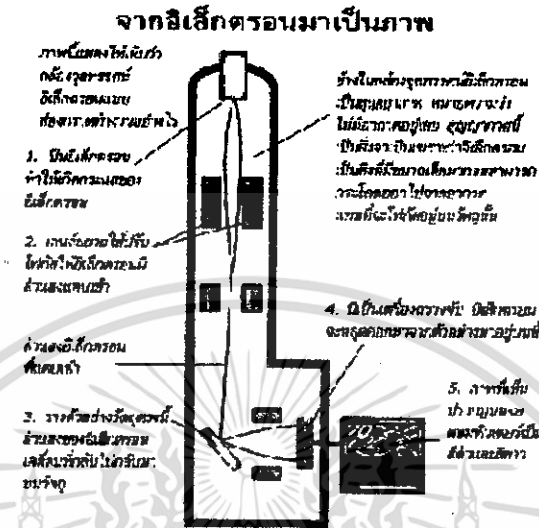
ระบบแสงสว่าง (Illuminating) ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์ โดยปืนอิเล็กตรอนจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และคอนเดนเซอร์เลนส์จะทำหน้าที่รวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยใช้สนามแม่เหล็กเพื่อส่งไปยังตัวอย่าง ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า ถ้าให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงมากขึ้น ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนจะสั้นลง ทำให้การแจกแจงรายละเอียดดีขึ้น ดังนั้นการปรับเปลี่ยนความยาวโฟกัสจึงทำได้โดยการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้านั่นเอง คอนเดนเซอร์อาจมีได้มากกว่าหนึ่งชุด เพื่อควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนมีความเข้มและขนาดเล็กลง ทำให้ภาพที่ได้มีความสว่างมากขึ้น และยังเป็นกำบังกันตัวอย่างไม่ให้ถูกทำลายด้วยความร้อนที่เกิดจากอิเล็กตรอนด้วย

ระบบคอนเดนเซอร์เลนส์นี้จะมีแผ่นโมลิบดีนัมอยู่ในช่องว่างซึ่งจะมีรูกลมๆ 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 ที่อยู่ได้ช่องใส่ตัวอย่างและคอนเดนเซอร์เลนส์ objective lens จะทำหน้าที่ขยายภาพ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะผ่านไปยัง intermediate lens เพื่อทำการขยายภาพเพิ่มขึ้นอีก จากนั้นผ่านไปยัง projector lens ที่ทำหน้าที่นำภาพที่ขยายไปปรากฏบนจอซึ่งเราสามารถมองเห็นได้จากหน้าต่างสำหรับมองภาพ (viewing window)

ระบบบันทึกภาพ (Photographic system) ประกอบด้วยชัตเตอร์และเครื่องวัดแสง โดยระบบนี้จะอยู่ได้ Projectors lens ชัตเตอร์จะทำหน้าที่ปิดหรือเปิดให้ลำแสงอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนแผ่นรับภาพเรืองแสง

3.3.2 ระบบการทำงานของ SEMs



รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานของ SEMs

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีระบบการทำงานเหมือนกับแบบส่องผ่าน แต่มีสิ่งที่แตกต่างกันคือระบบภาพและแสดงผล โดยภาพที่ได้จะถูกส่งสัญญาณเพื่อไปขยาย แล้วจึงแปลภาพบนจอ CRT (Cathode Ray Tube) คลอัมน์ของ 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 ถ้าพื้นผิวของตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่นูนขึ้น นอกจากนี้ที่ Objective lens จะมีช่อง Aperture เช่นกันเพื่อช่วยเพิ่มความลึกของภาพ SEMs นี้อาจติดตั้งและต่อเติมอุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เช่น Backscattered electron detector อิเล็กตรอนที่เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้จะช่วยในการบอกรายละเอียดของรูปร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในสิ่งที่ลึกเกินกว่าที่ Secondary electron ทำการตรวจสอบได้ หรือทำการติดตั้งระบบ EDS เพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุล

ของธาตุ หรือคิดคั้ง Transmitted electron detector เพื่อศึกษาลักษณะภายในของตัวอย่างที่ทำให้บางเป็นต้น

3.4 วิธีการการใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพ

สิ่งที่แสดงให้เห็นต่อไปนี้เป็นตัวอย่างเป็นตัวอย่างของการใช้งาน การตรวจสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพและยืดอายุการใช้งานของตัวกล้อง

1. ปฏิบัติตามขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง การใช้งานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและอุปกรณ์เสริมอย่างเคร่งครัด โดยเหมาะสมกับชนิดของตัวอย่าง ข้อมูลที่ต้องการ และภาพหรือสิ่งที่จะนำไปวิเคราะห์
2. ตรวจสอบผลหรือภาพ ให้มีคุณภาพก่อนที่จะนำออกจากห้องปฏิบัติการ
3. ทำบันทึกตรวจสอบหน้าที่การทำงานของขั้นตอนการควบคุมคุณภาพทุกรายการ
4. ตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือให้พร้อมสำหรับใช้งานอยู่เสมอ
5. มีการรายงานและปรับปรุงศักยภาพของผู้ใช้งาน
6. ทำการสอบเทียบกล้องเป็นประจำ

บทที่ 4

การทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบต่อเนื่องจากอะลูมิเนียมออกไซด์ และฟลูออรีน ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

ในบทนี้จะเป็นกล่าวถึงการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ โดยจะประกอบไปด้วยขั้นตอนและวิธีทำการทดลอง โดยในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ คือ การทดลองโดยมีการ Flow น้ำ DI เข้าไประหว่างที่ทำการ Flow ฟลูออรีนผสมกับแอลกอฮอล์ และการทดลองโดยมีการ Flow Thiophene ผสมกับแอลกอฮอล์ เข้าไประหว่างที่ทำการ Flow ฟลูออรีนผสมกับแอลกอฮอล์

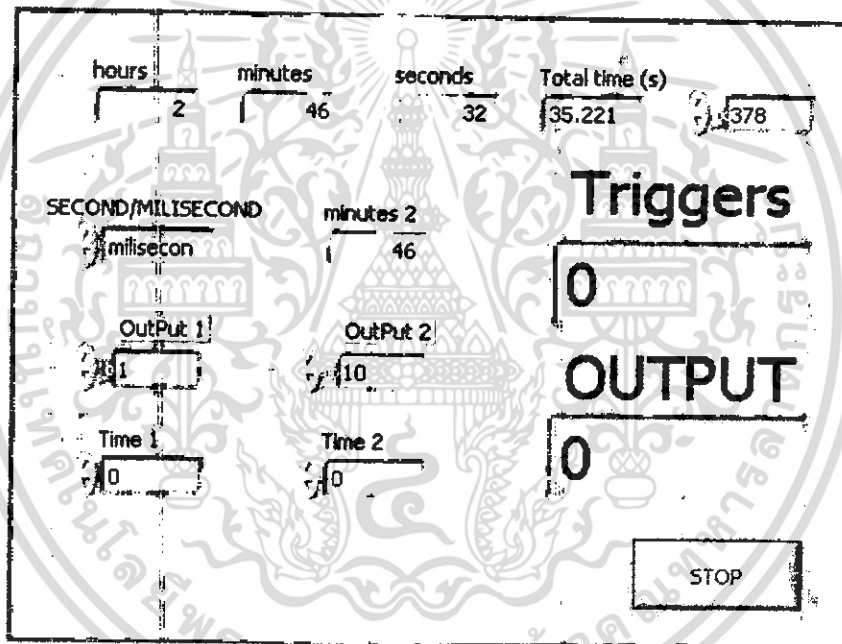
4.1 อุปกรณ์และสารเคมี

1. ท่อแก้วที่ใช้เป็นห้องทำปฏิกิริยา (Quartz tube)
2. ครอบแก้วสำหรับใส่สารละลาย
3. แอลกอฮอล์ (Ethanol)
4. ผงฟลูออรีน (Ferrence)
5. Thiophene (C_4H_4S)
6. ถังเก็บก๊าซอาร์กอน (Ar)
7. แผ่นซิลิคอนขนาดประมาณ 10X10 mm.
8. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง
9. ขดลวดทำความร้อน (Heater)
10. เครื่องทำให้เป็นอะตอม (Atomizer)
11. เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter)
12. เทอร์โมคัปเปิล (Thermo couple)
13. นาฬิกาจับเวลา
14. วงจรที่ใช้ในการ Control Valve

4.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

4.2.1 โปรแกรมและวงจรที่ใช้ในการ Control Valve

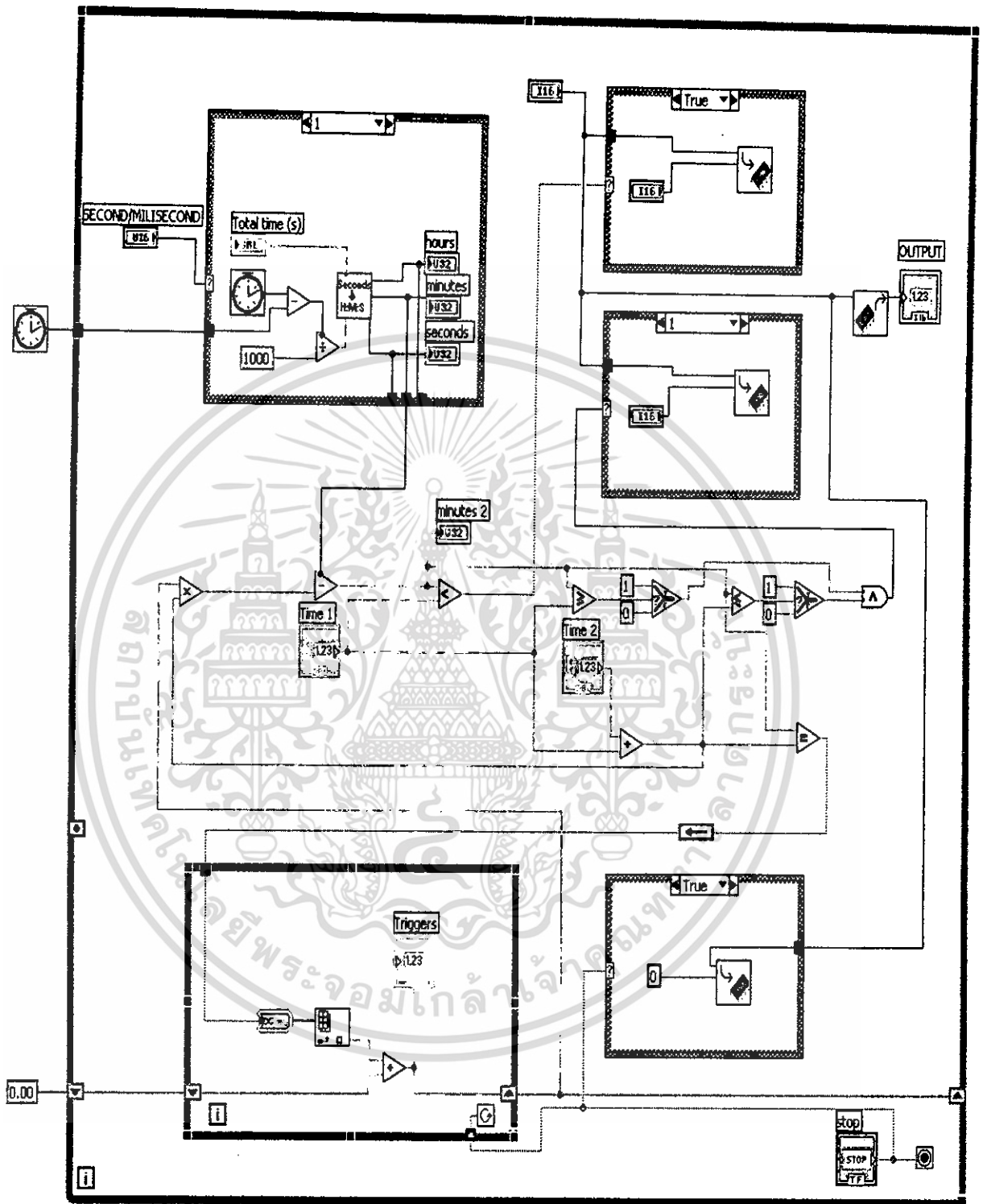
ในการทดลองจำเป็นที่จะต้องกำหนดให้ช่วงเวลาในการที่จะให้พาหะที่ 1 หรือ พาหะที่ 2 เข้าไปทำปฏิกิริยาในห้องทำปฏิกิริยา (Quartz tube) จึงจำเป็นที่จะต้องให้ Valve ในการควบคุม พาหะ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรในการที่จะมาควบคุม Valve เพื่อให้ได้ช่วงเวลาตามต้องการ ในการทดลองนี้ใช้ LabVIEW ในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุม Valve



รูปที่ 4.1 แสดง Front Panel ของโปรแกรมที่ใช้ในการ Control Valve

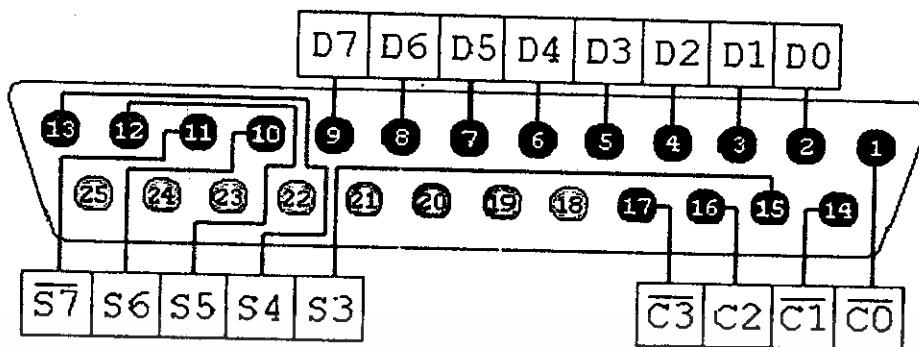
ในหน้าของ Front Panel จะประกอบไปด้วยส่วนแสดงเวลาในการ Run Program ตั้งแต่เริ่มทำการทดลอง และส่วนของ Time1 , OutPut 1 , Time 2 , OutPut 2 , Triggers , OUTPUT

ในส่วนของ Time 1 จะใส่ค่าเวลาที่ให้ Valve 1 ทำงานค่าที่ใส่นั้นเป็นนาที และ Time 2 จะใส่ค่าเวลาที่ให้ Valve 2 ทำงานค่าที่ใส่นั้นเป็นนาที, ส่วนของ Trigger จะเป็นส่วนที่บอกให้รู้ถึงจำนวนรอบในการทดลองคือ Time 1 + Time 2, ส่วนของ OUTPUT จะบอกให้รู้ว่าขณะนี้ Valve ตัวใด ON/OFF



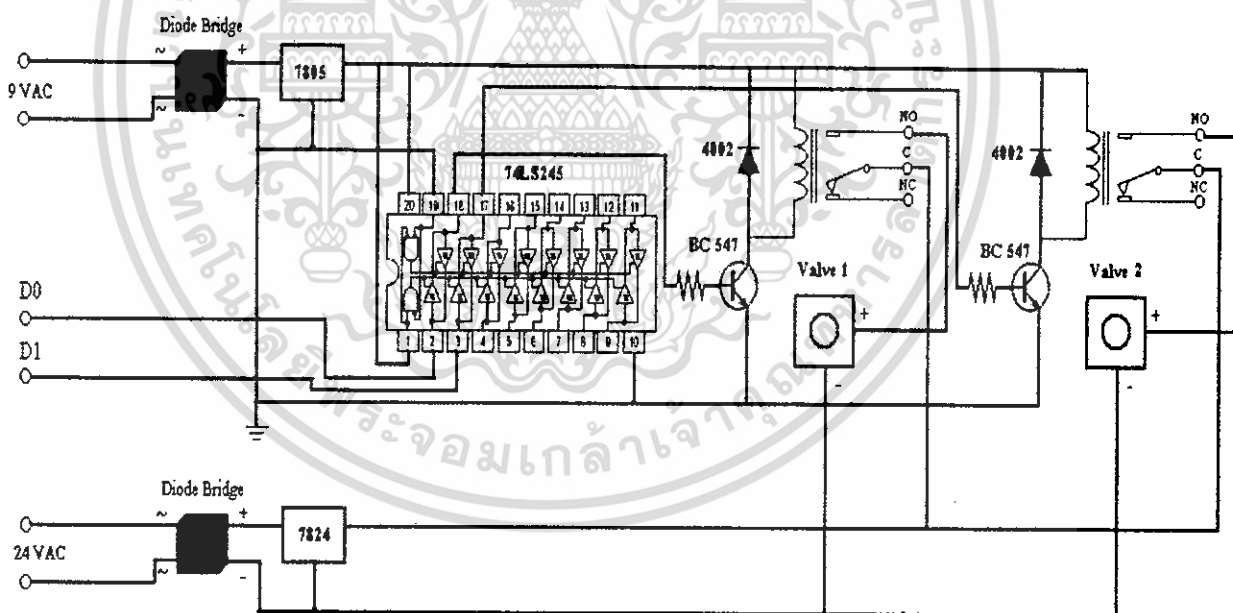
รูปที่ 4.2 แสดง Block Diagram ของโปรแกรมที่ใช้ในการ Control Valve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดง จุดต่อ D0 และ D1 จาก Port LPT1 ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้จะใช้ OutPut Bit D0 และ Bit D1 ในการ Control Valve การทำงานของโปรแกรม เริ่มจากการใส่ค่า Time 1 และ Time 2 โดยที่เวลา Time 1 จะให้ค่า OutPut 1 ออกทาง Bit D0 และ Time 2 จะให้ค่า OutPut 2 ออกทาง Bit D1 โดย Bit D0 จะไป Control Valve 1 ให้ทำงาน และ Bit D1 จะไป Control Valve 2 ให้ทำงาน



รูปที่ 4.4 แสดงวงจรที่ใช้ในการต่อสัญญาณเพื่อ Control Valve

การทำงานของวงจรคือ IC74LS245 ทำหน้าที่เป็นตัว Buffer ส่วน BC547 จะเป็นตัว Driver Relay เพื่อที่จะทำการ Control Valve ให้ เปิด/ปิด ตามเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

4.2.2 การเตรียมสารโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

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



(ก)



(ข)



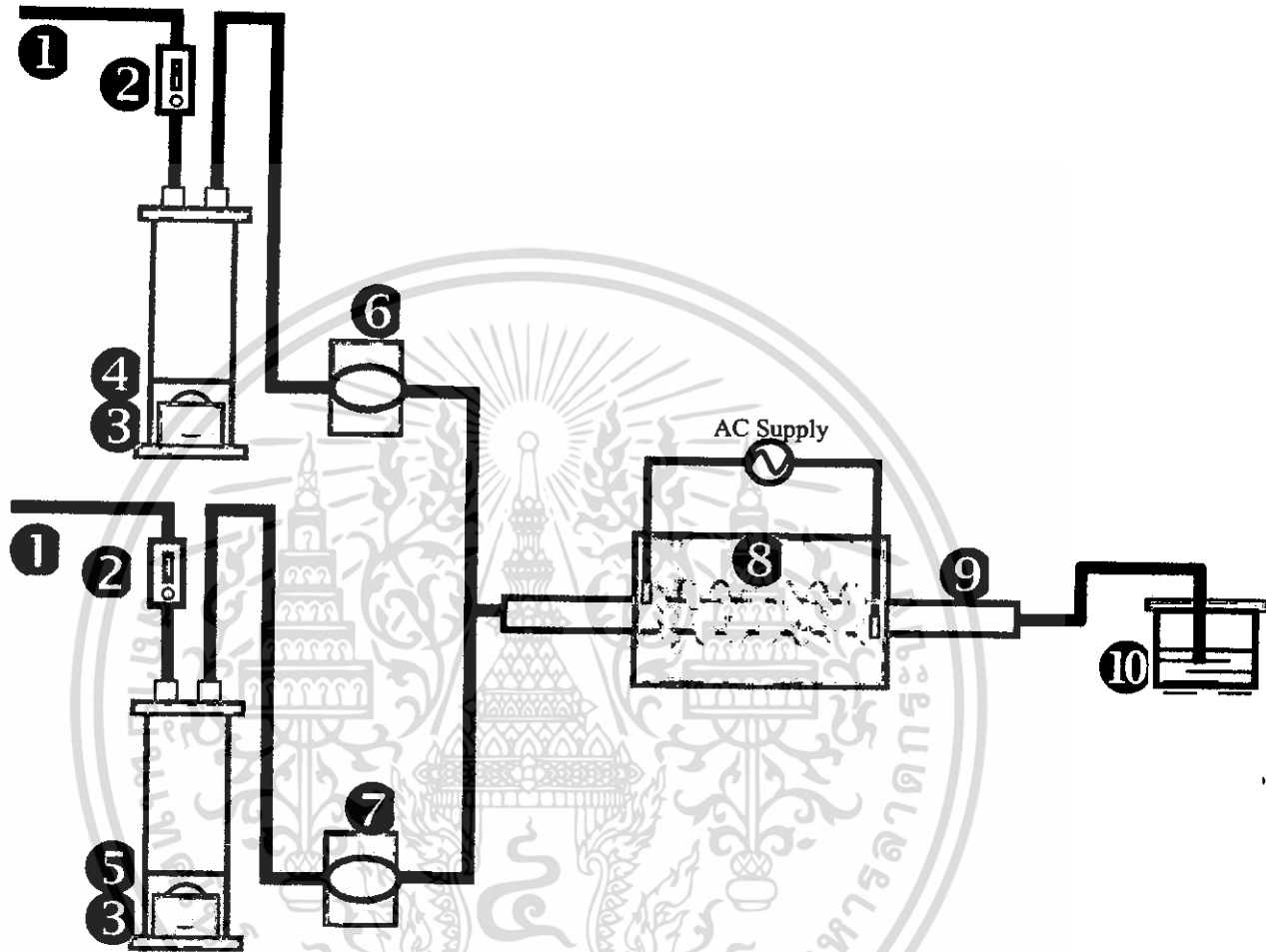
(ค)



(ง)

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจริงของขั้นตอนการเตรียมสารละลายโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) ขั้นตอนการนำแอลกอฮอล์มาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ (ข) ขั้นตอนการนำผงฟลูโรเซนมาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ (ค) ขั้นตอนการนำผงฟลูโรเซนที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์มาอัลตราโซนิก (ง) สารโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมทั้งหมดพร้อมที่จะนำไปทำการทดลอง

4.2.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์(ระบบแบบที่ 1)



- | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| (1) ช่องทางเข้าของก๊าซนำพา | (2) เครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ |
| (3) เครื่อง Atomizer (1-2 MHz) | (4) ฟลูโรเซนผสมกับแอลกอฮอล์ |
| (5) น้ำ DI | (6) Valve ตัวที่ 1 |
| (7) Valve ตัวที่ 2 | (8) ฮีตเตอร์ |
| (9) ท่อแก้ว | (10) น้ำ |

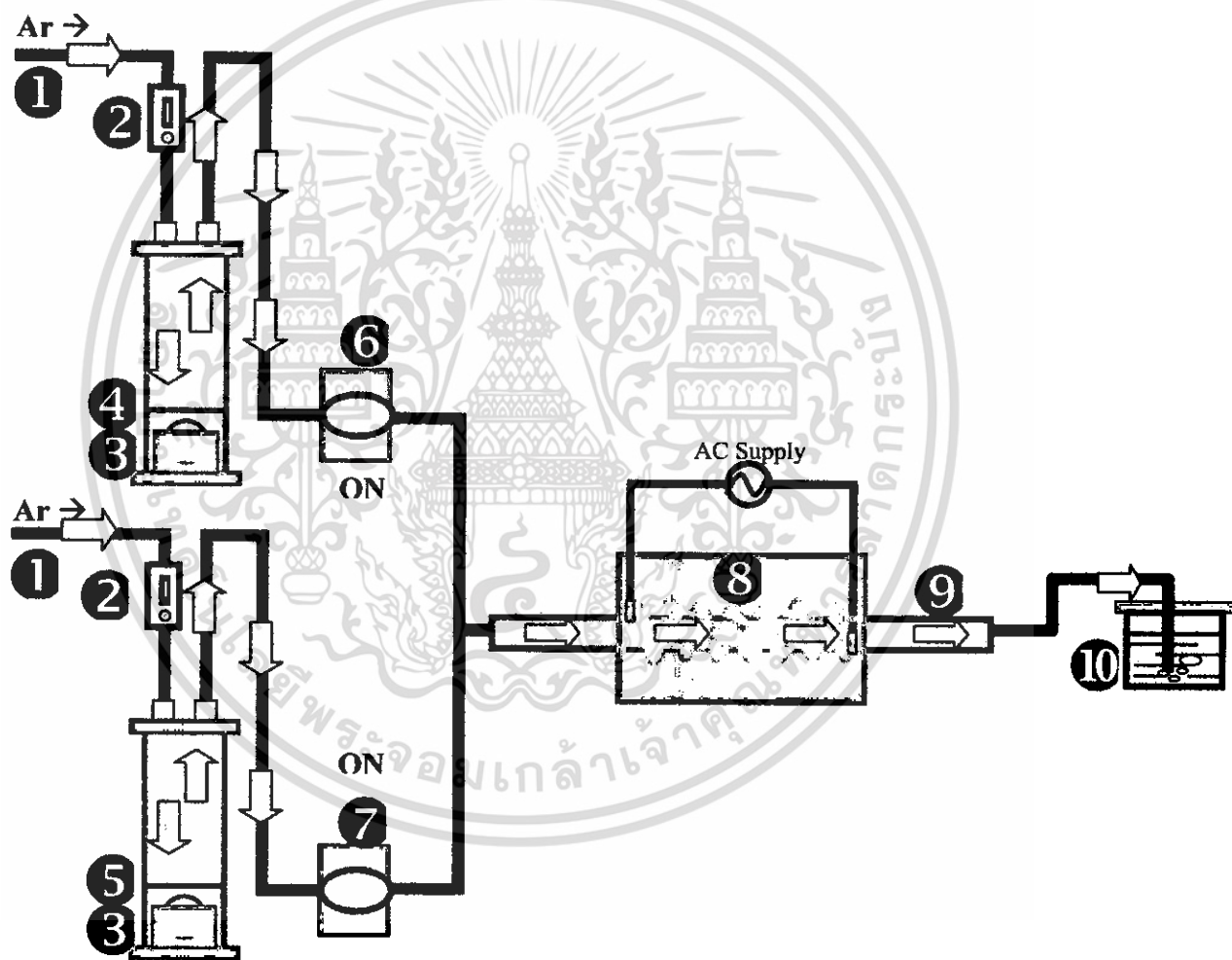
รูปที่ 4.6 โครงสร้างของระบบแบบที่ 1 ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

จากรูปที่ 4.6 เป็นภาพแสดง โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ในเชิงปริมาณ ซึ่งประกอบไปด้วย ก๊าซอาร์กอน (Ar) ใช้เป็นก๊าซนำพา, Flow meter ใช้ในการวัด

อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน, ฟลูโรเซน ใช้เป็น โลหะหะตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะถูกผสมลงใน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน, เครื่อง Atomizer (1-2 MHz) ใช้เป็นตัวทำให้ละตัวแรงปฏิกิริยาที่ผสมในแอลกอฮอล์กลายเป็นละออง, Valve ใช้เป็นตัวควบคุมพาหะในการทำปฏิกิริยาให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง, ท่อแก้ว (Quartz tube) ภายในใช้เป็น Chamber หรือห้องในการทำปฏิกิริยา, ฮีตเตอร์ ใช้เป็นตัวให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา, น้ำ ใช้ป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกไหลย้อนเข้ามาภายในระบบ

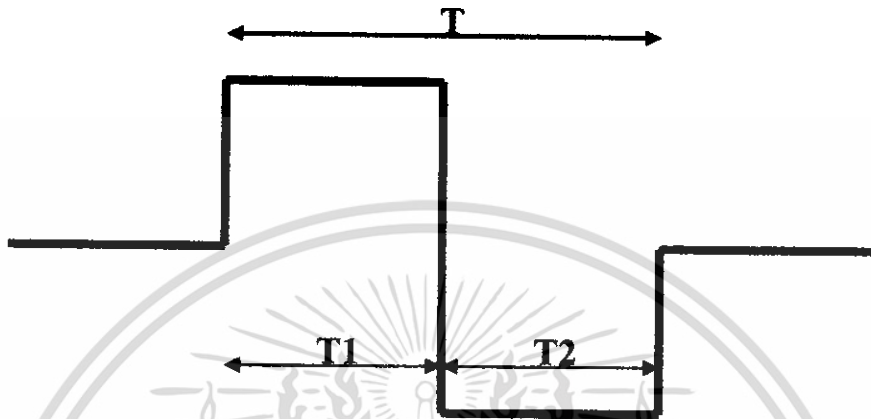
โดยในการทดลองเริ่มแรกจะต้องทำการไล่อากาศภายใน Chamber ออกเสียก่อน เพื่อมิให้เกิดการทำปฏิกิริยากับอากาศ (oxidize) ในขณะที่ทำการทดลอง โดยใช้อาร์กอน (Ar) ในการไล่อากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กระบวนการไล่อากาศออกจากระบบ

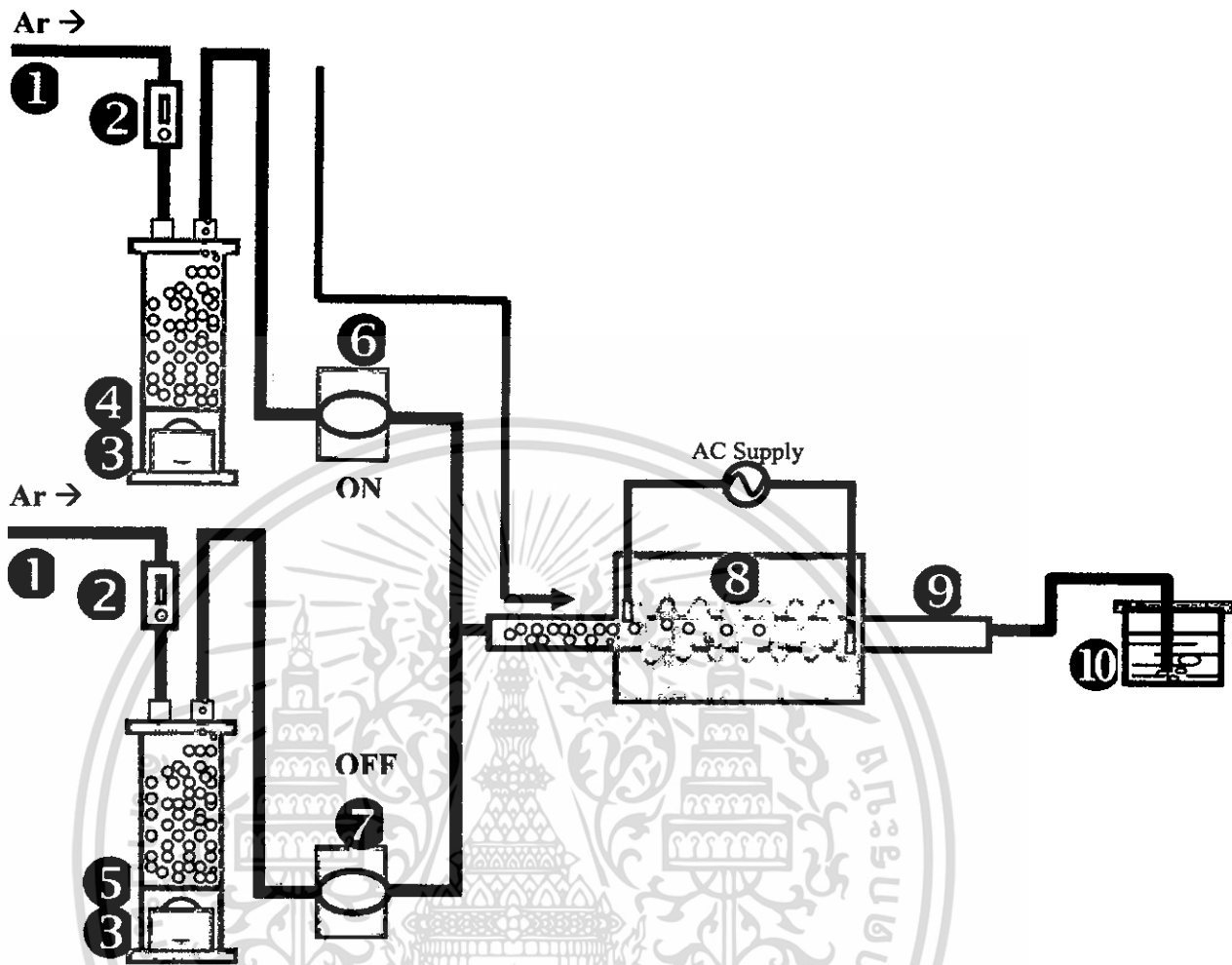
จากรูปที่ 4.7 เราจะเริ่มทำการปล่อยก๊าซอาร์กอน(Ar)ให้ไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลเข้าไปในกระบอกแก้วซึ่งภายในบรรจุ Ferrocene ที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ ที่อัตราการไหล 1 L/min เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อไล่อากาศออกจากระบบ โดยในระหว่างนี้จะเปิดฮีตเตอร์ให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิตามเงื่อนไขที่กำหนด ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15 นาที



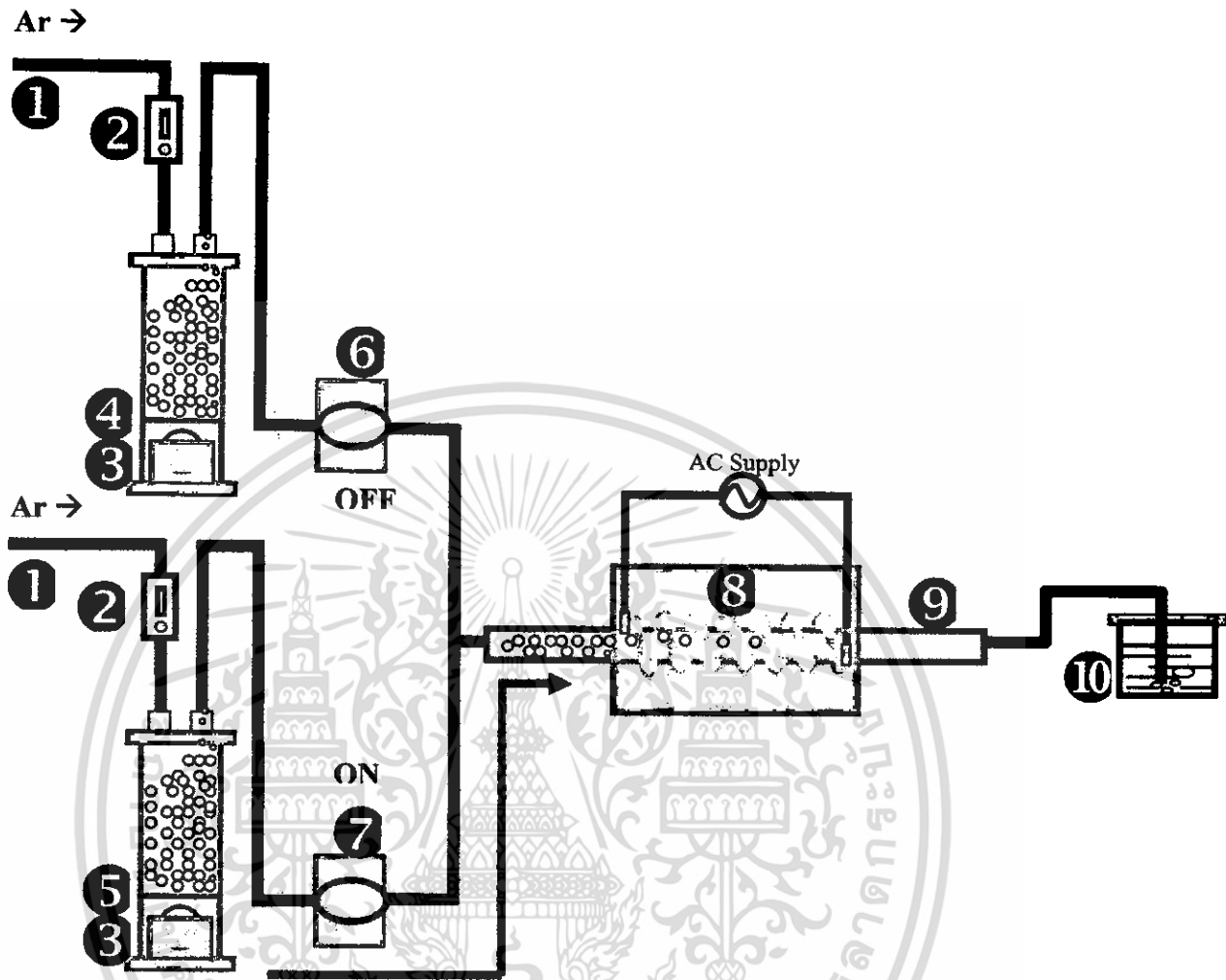
รูปที่ 4.8 คาบเวลาของระบบ ON/OFF Valve ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์

จากรูปที่ 4.8 จะแสดงคาบเวลาของระบบ ON/OFF Valve ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์ ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์จะใช้เวลาในการสังเคราะห์ทั้งหมด 15 นาที ค่า T คือในเวลา 1 นาที จะประกอบด้วย $T1+T2$ ค่า T1 คือเวลาที่ Valve 1 ON และ T2 คือเวลาที่ Valve 2 ON ค่าเวลา T1 และ T2 เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง หลังจากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในขั้นตอนที่ 1

จากรูปที่ 4.9 ในการทดลองในขั้นตอนที่ 1 เราจะให้โปรแกรม Control ให้ Valve ตัวที่ 1 เปิด แล้ว Valve ตัวที่ 2 ปิด จากนั้นเราจะเริ่มจากการปรับเครื่องวัดอัตราการไหลให้ได้ตามเงื่อนไขที่เรากำหนด จากนั้นเปิดเครื่อง Atomizer เพื่อให้ Ferrocene ที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ เป็นละอองหมอกลอยขึ้นไปตามท่อแก้ว และลงไปในห้องที่ใช้เป็นห้องในการทำปฏิกิริยา ในขั้นตอนที่ 1 ใช้เวลาในการสังเคราะห์คือ T1 จากนั้น เมื่อครบตามกำหนดเวลาโปรแกรมจะ Control ให้ Valve ตัวที่ 1 ปิด แล้ว Valve ตัวที่ 2 เปิด จากนั้นเริ่มเข้าสู่การทดลอง ในขั้นตอนที่ 2 ดังรูปที่ 4.9

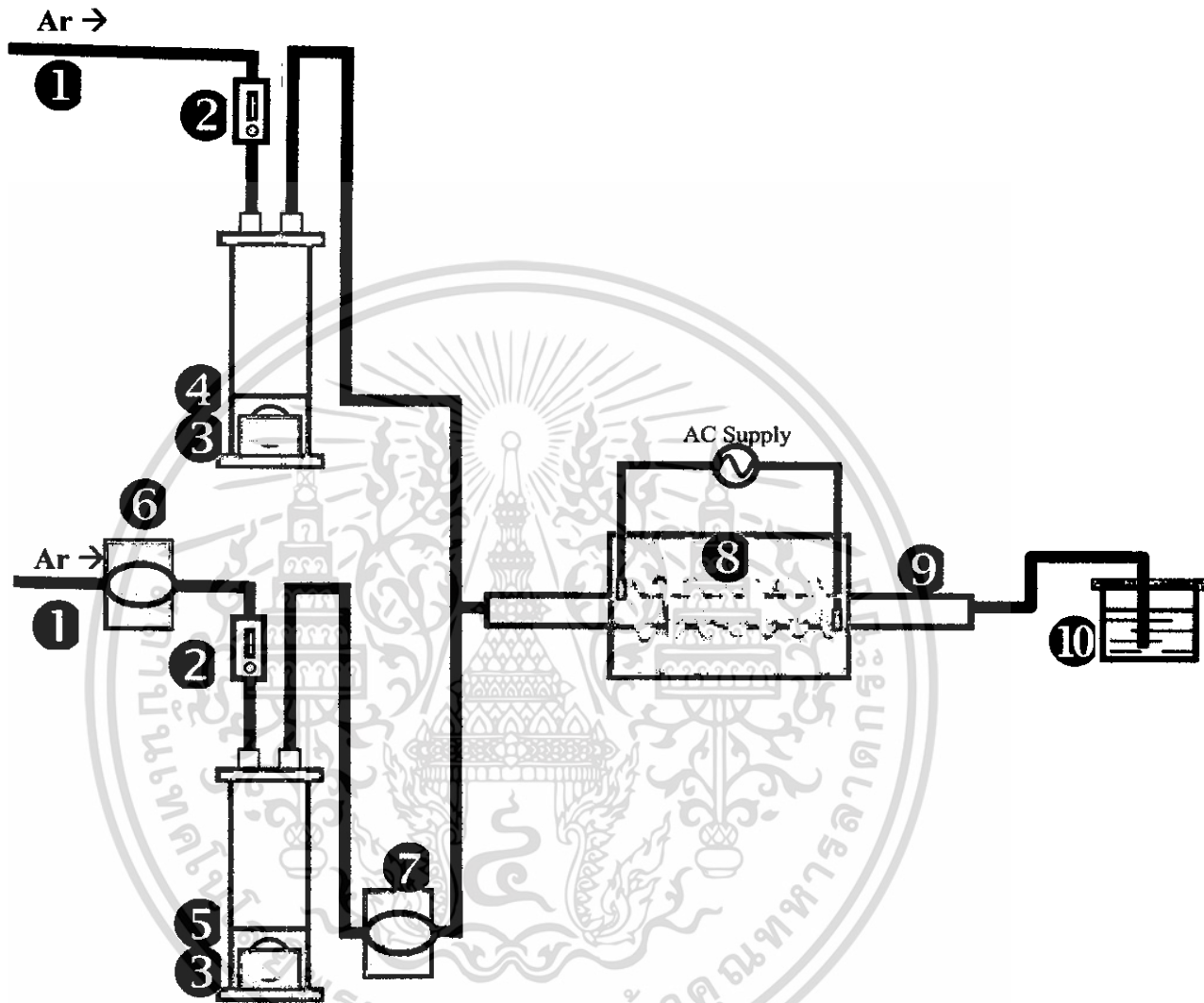


รูปที่ 4.10 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ในขั้นตอนที่ 2

จากรูปที่ 4.10 ในการทดลองในขั้นตอนที่ 2 จะต่อเนื่องกับขั้นตอนที่ 1 โดยโปรแกรม Control ให้ Valve ตัวที่ 1 ปิด แล้ว Valve ตัวที่ 2 เปิด น้ำ DI ที่ เป็นละอองหมอกลอยขึ้นไปตามท่อแก้ว และลงไปในห้องที่ใช้เป็นห้องในการทำปฏิกิริยา ในขั้นตอนที่ 2 ใช้เวลาในการสังเคราะห์คือ T_2 โดยค่าเวลา T_1+T_2 จะอยู่ภายในเวลา 1 นาที และเมื่อถึงนาทีที่ 2 ระบบจะวนลูปไปที่การทดลองในขั้นตอนที่ 1 คือ Valve ตัวที่ 1 เปิด แล้ว Valve ตัวที่ 2 ปิด ดังรูปที่ 4.9 ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์จะใช้เวลาในการสังเคราะห์ทั้งหมด 15 นาที จากนั้นปิดโปรแกรม เพื่อให้ Valve ทั้ง 2 ตัวเปิด ทำการปิด Heater ตอนนี้อย่าปล่อยให้อาร์กอน(Ar) ไหลในระบบอยู่จากนั้นปล่อยให้ระบบเย็นลง จึงนำผงสีดำ (Sample) ที่ได้จากการทดลอง ไปทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และสเปกโตรสโคปีรามาน (Raman Spectroscopy) เพื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์(ระบบแบบที่ 2)

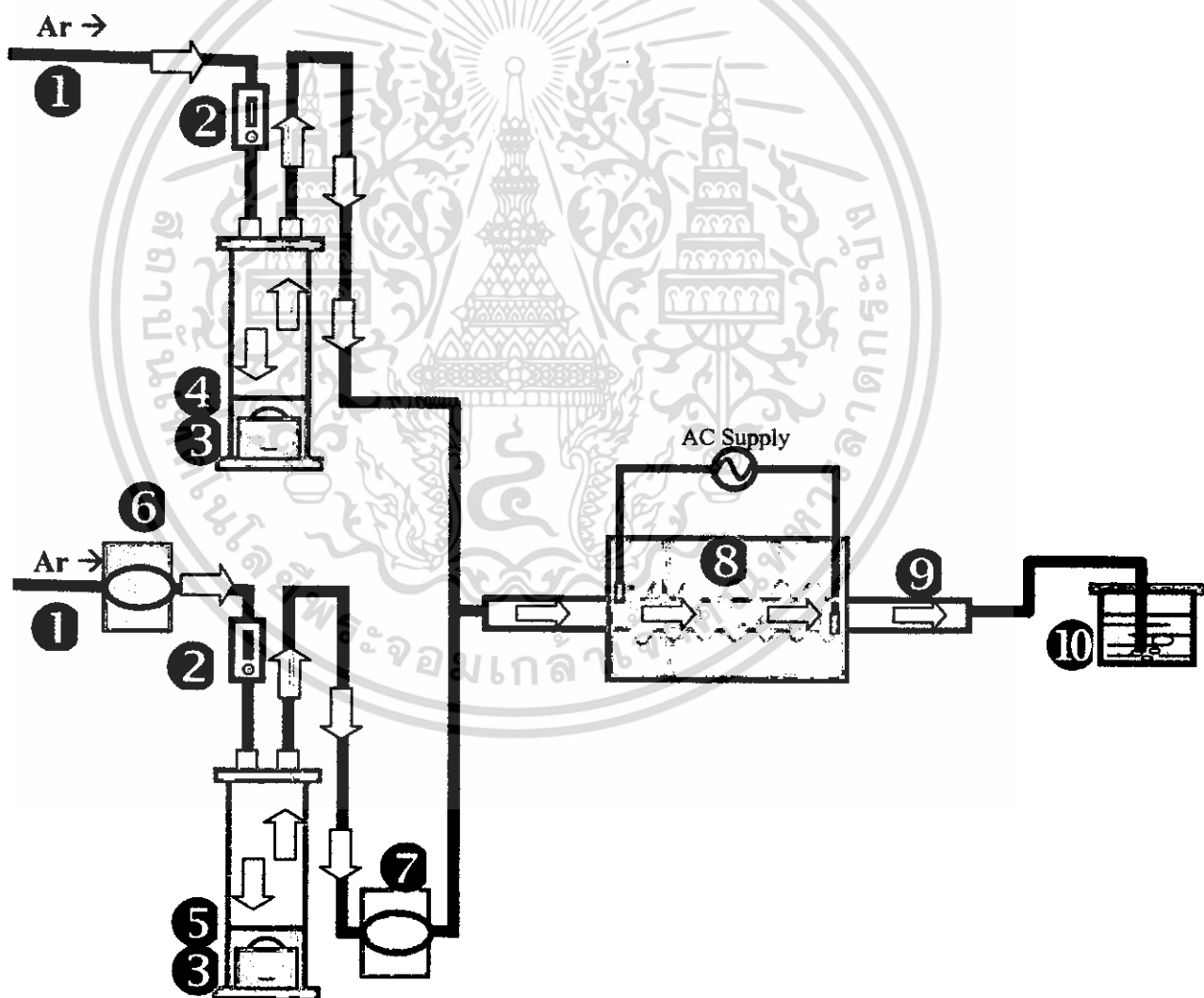


- | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| (1) ช่องทางเข้าของก๊าซนำพา | (2) เครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ |
| (3) เครื่อง Atomizer (1-2 MHz) | (4) ฟลูโรเซนผสมกับแอลกอฮอล์ |
| (5) น้ำ DI | (6) Valve ตัวที่ 1 |
| (7) Valve ตัวที่ 2 | (8) ฮีตเตอร์ |
| (9) ท่อแก้ว | (10) น้ำ |

รูปที่ 4.11 โครงสร้างของระบบแบบที่ 2 ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

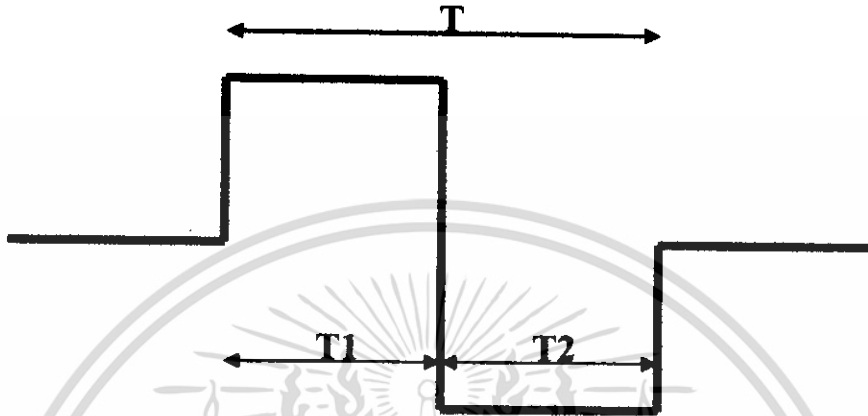
จากรูปที่ 4.11 เป็นภาพแสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ในเชิงปริมาณ การที่ใช้ระบบแบบที่ 2 ทำการทดลองอันเนื่องมาจากระบบแบบที่ 1 เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปทำการส่ง SEM การเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ทำการสังเคราะห์ได้นั้นเกิดน้อยมากสาเหตุเนื่องมาจากการที่ Ferrocene ที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ นั้นเข้าไปในท่อแก้วที่ใช้เป็นห้องในการทำปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่อง จึงได้ทำการทดลองโดยใช้ระบบแบบที่ 2 ซึ่งจะแตกต่างจากระบบแบบที่ 1 เพียงตำแหน่งของ Valve ที่ใช้ในการทดลองนั้นจากเดิมประกอบไปด้วย Valve ทางออกของแหล่งกำเนิดคาร์บอนทั้งสองแหล่ง แต่ระบบแบบที่ 2 นี้จะให้ Ferrocene ที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์เข้าไปในท่อแก้วที่ใช้เป็นห้องในการทำปฏิกิริยาตลอดเวลา และจะใช้โปรแกรม Control ให้ Valve ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ON/OFF ตามเงื่อนไขที่ทำการทดลอง โดย Valve ทั้ง 2 ตัวนั้น ON/OFF พร้อมกัน



รูปที่ 4.12 กระบวนการไล่อากาศออกจากระบบ

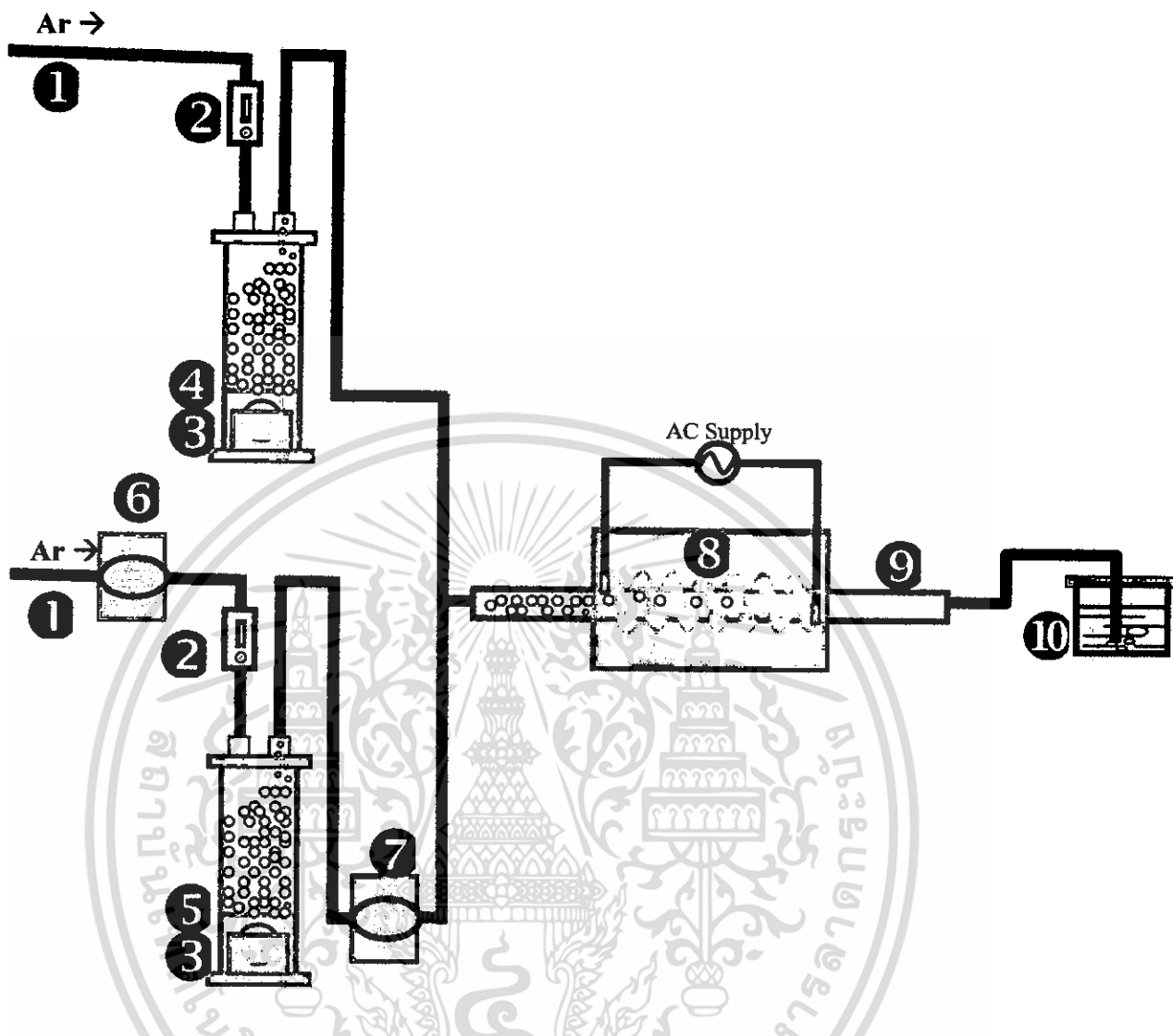
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 เราจะเริ่มทำการปล่อยก๊าซอาร์กอน(Ar)ให้ไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลเข้าไปในระบบอกแก้วซึ่งภายในบรรจุ Ferrocene ที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ ที่อัตราการไหล 1 L/min เพื่อไล่อากาศออกจากระบบ โดยในระหว่างนี้จะเปิดฮีตเตอร์ให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิตามเงื่อนไขที่กำหนด ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15 นาที



รูปที่ 4.13 คาบเวลาของระบบ ON/OFF Valve ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

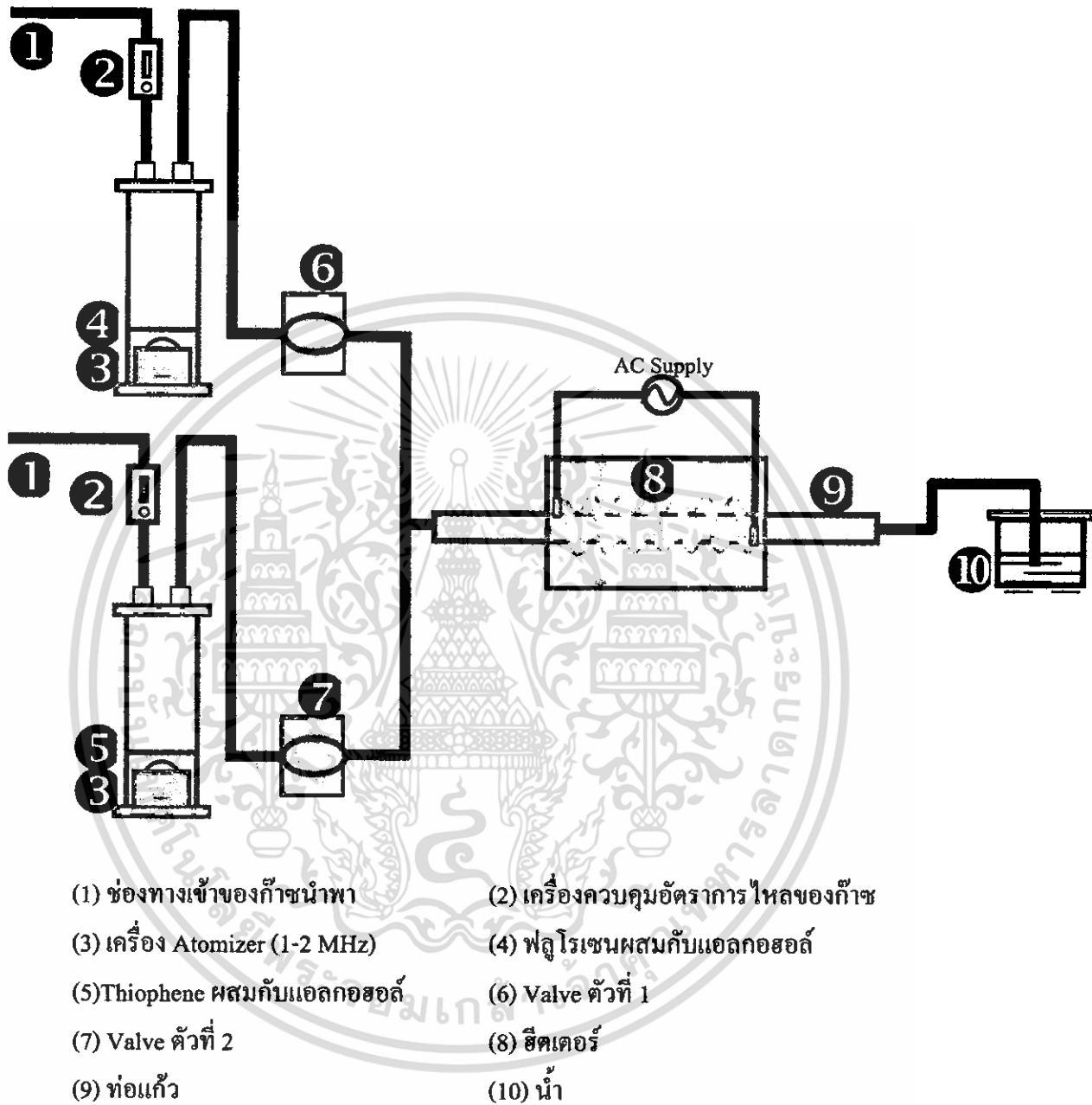
จากรูปที่ 4.13 จะแสดงคาบเวลาของระบบ ON/OFF Valve ที่ใช้ในกระบวนการที่ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์จะใช้เวลาในการสังเคราะห์ทั้งหมด 15 นาที ค่า T คือในเวลา 1 นาที จะประกอบด้วย T_1+T_2 ค่า T_1 คือเวลาที่ Valve 1 และ Valve 2 ON และ T_2 คือเวลาที่ Valve 1 และ Valve 2 OFF ค่าเวลา T_1 และ T_2 เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง หลังจากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

จากรูปที่ 4.14 ในการทดลองเริ่มจากการปรับเครื่องวัดอัตราการไหลให้ได้ตามเงื่อนไขที่เรา กำหนด จากนั้นเปิดเครื่อง Atomizer เพื่อทำให้ Ferrocene ที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ เป็นละออง หมอก ลอยขึ้นไปตามท่อแก้ว และลงไปในท่อแก้วที่ใช้เป็นห้องในการทำปฏิกิริยา เราจะให้ โปรแกรม Control ให้ Valve ตัวที่ 1 แล้ว Valve ตัวที่ 2 เปิด เป็นไปตามคาบเวลา T1 และจะ Control ให้ Valve ตัวที่ 1 แล้ว Valve ตัวที่ 2 ปิด เป็นไปตามคาบเวลา T2 โดยในการทดลองจะมีน้ำ DI ผสมเข้าไปในท่อแก้วที่ใช้เป็นห้องในการทำปฏิกิริยาเล็กน้อยตามคาบเวลา T1 ที่ใช้เป็นเงื่อนไข ในการทดลอง

4.2.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้ Thiophene เป็นส่วนประกอบ



รูปที่ 4.15 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้ Thiophene เป็นส่วนประกอบ

จากรูปที่ 4.15 เป็นภาพแสดง โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในเชิงปริมาณ โดยมีการค้นพบว่าถ้าในระหว่างที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ถ้าผสม Thiophene เข้าไปในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้น ซึ่งจะทำการทดลองเหมือนการทดลองในระบบแบบที่ 1 เพียงแต่จะแตกต่างกันที่แหล่งกำเนิดที่ 2 จากเดิมเป็นน้ำ DI เปลี่ยนเป็น Thiophene ผสมกับแอลกอฮอล์โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองคือ 1% และ 5% และได้ทำการทดลองโดยปรับค่าเวลา T1 และ T2 ตามเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

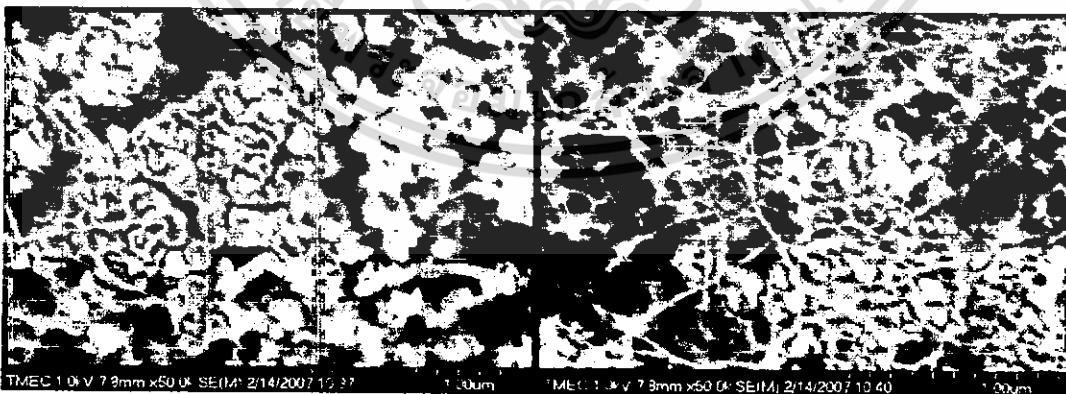
บทที่ 5

การทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบต่อเนื่องจากอะลูมิเนียมออกไซด์ และฟลูออรีน ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ โดยจะประกอบไปด้วยผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ที่ได้จากการทดลอง

5.1 ผลของการ Flow น้ำ DI เข้าไประหว่างที่ทำการ Flow ฟลูออรีนผสมกับอะลูมิเนียมออกไซด์ และใช้ระบบแบบที่ 2 ในการทดลอง

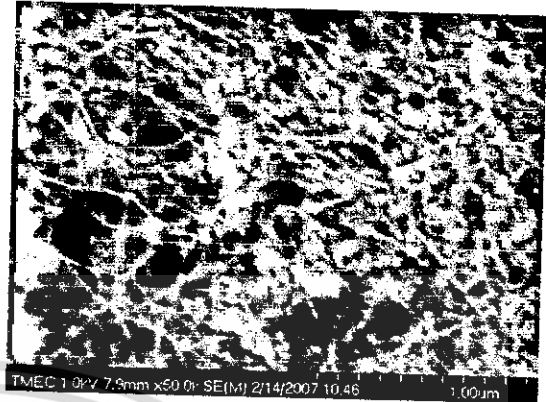
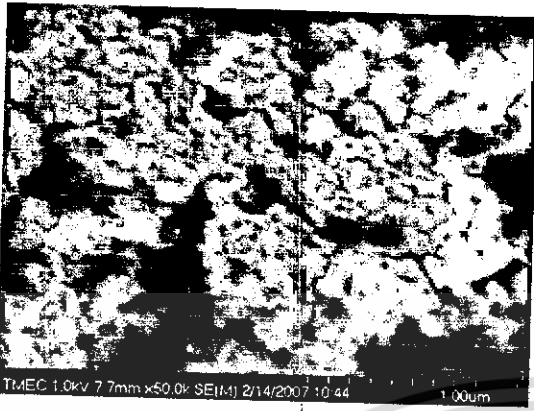
ในการทดลองที่มีการ Flow น้ำ DI ระหว่างทำการทดลองนั้น มีผลทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น สิ่งสกปรกดังกล่าวอาจเกิดจากการที่ไอของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ไหลเข้ามาเมื่อเจอความร้อนของฮีตเตอร์ที่ตำแหน่งต้นทางของฮีตเตอร์ ซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดที่จะสามารถทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ จึงทำให้เกิดสิ่งสกปรกที่มาจากคาร์บอนที่สกปรกเหล่านี้ อาจเป็นสารประกอบ ที่อยู่ในรูปของ amorphous carbon ซึ่งมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ หรือเป็นสารประกอบของเหล็กที่ไม่สามารถเป็นตัวเร่งได้ และสิ่งสกปรกเหล่านี้ก็จะถูกกักนำพาพัดมาเกาะตามท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ก่อตัวขึ้นบนแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตรงกลางของฮีตเตอร์ และตรงปลายของฮีตเตอร์ แต่เมื่อทำการ Flow น้ำ DI เข้าไประหว่างที่ทำการ Flow ฟลูออรีนผสมกับอะลูมิเนียมออกไซด์นั้น อาจจะทำให้สิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นจากต้นทางของฮีตเตอร์นั้นลดน้อยลง



(ก-1) กลางฮีตเตอร์ที่ Flow น้ำ DI 5 วินาที

(ก-2) ปลายฮีตเตอร์ที่ Flow น้ำ DI 5 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข-1) กลางขีตเตอร์ที่ Flow น้ำ DI 10 วินาที

(ข-2) ปลายขีตเตอร์ที่ Flow น้ำ DI 10 วินาที



(ค-1) กลางขีตเตอร์ที่ Flow น้ำ DI 15 วินาที

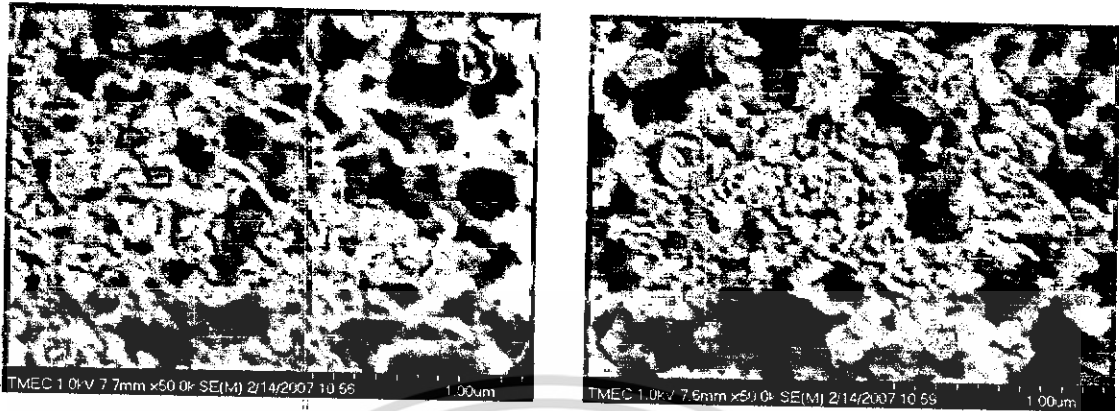
(ค-2) ปลายขีตเตอร์ที่ Flow น้ำ DI 15 วินาที



(ง-1) กลางขีตเตอร์ที่ Flow น้ำ DI 30 วินาที

(ง-2) ปลายขีตเตอร์ที่ Flow น้ำ DI 30 วินาที

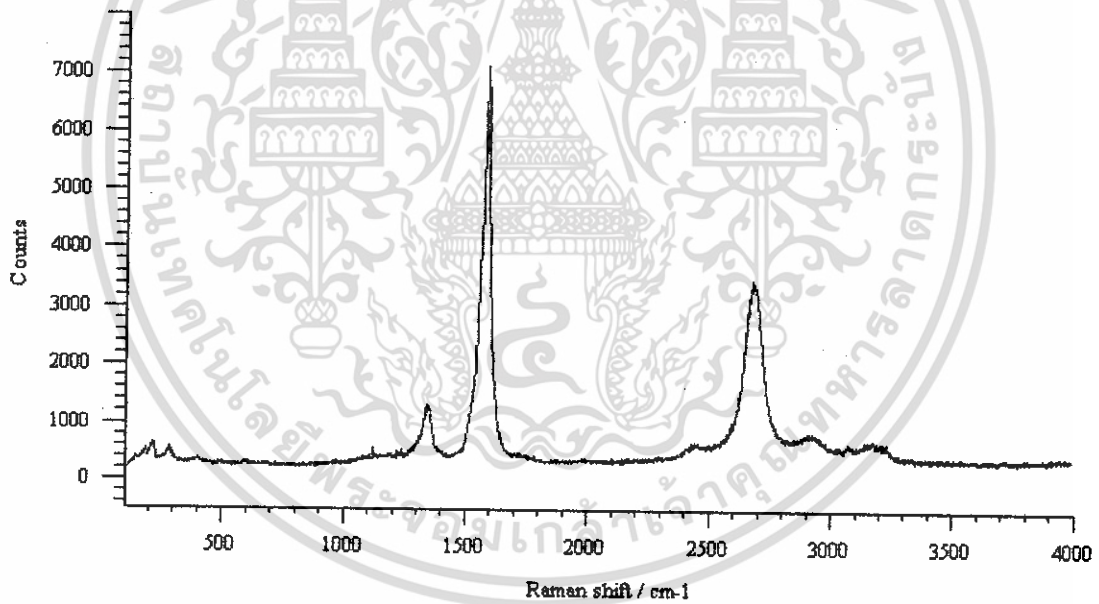
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ-1) กลางฮีตเตอร์ที่ Flow น้ำ DI 40 วินาที

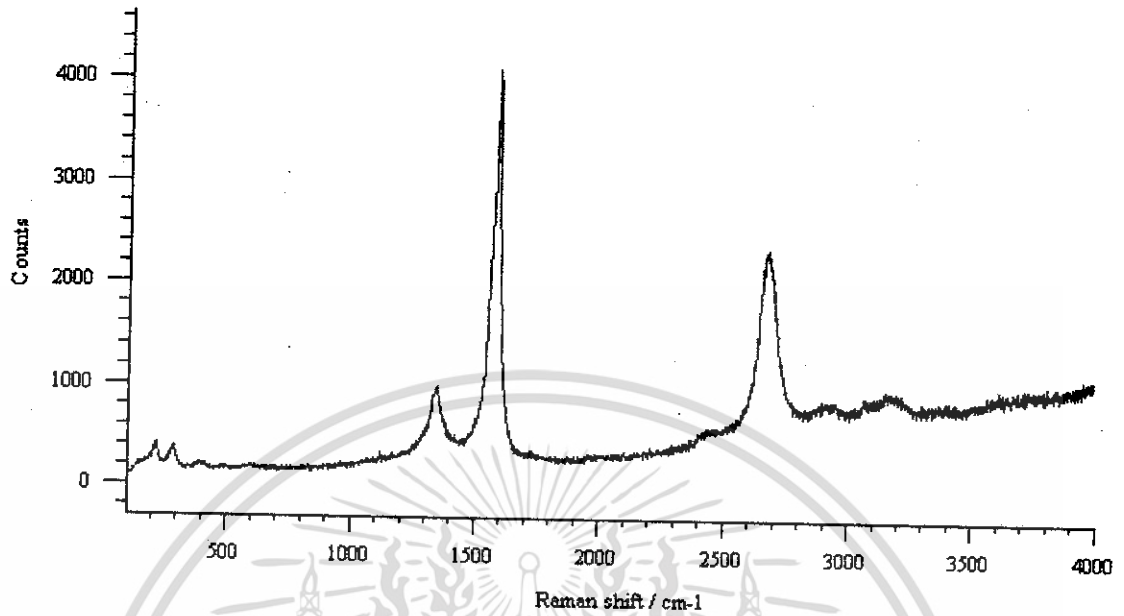
(จ-2) ปลายฮีตเตอร์ที่ Flow น้ำ DI 40 วินาที

รูปที่ 5.1 ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายได้จากแผ่นตัวอย่างที่ใช้การ Flow น้ำ DI ในการสังเคราะห์ต่างกัน

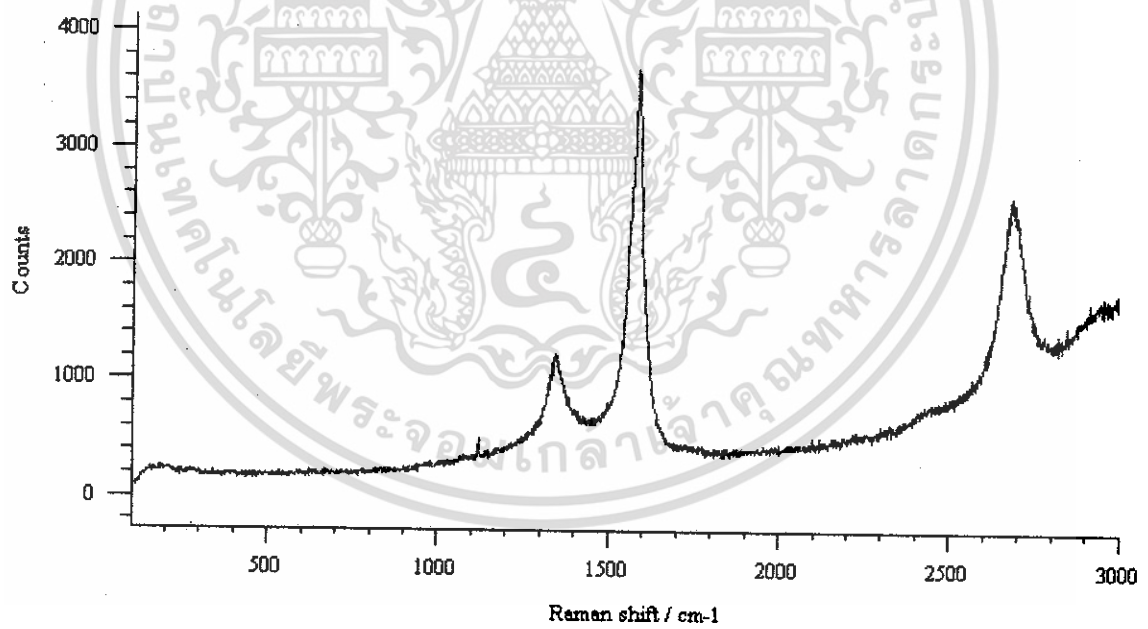


(ก) CNTs ปลายฮีตเตอร์ ที่ Flow น้ำ DI 5 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

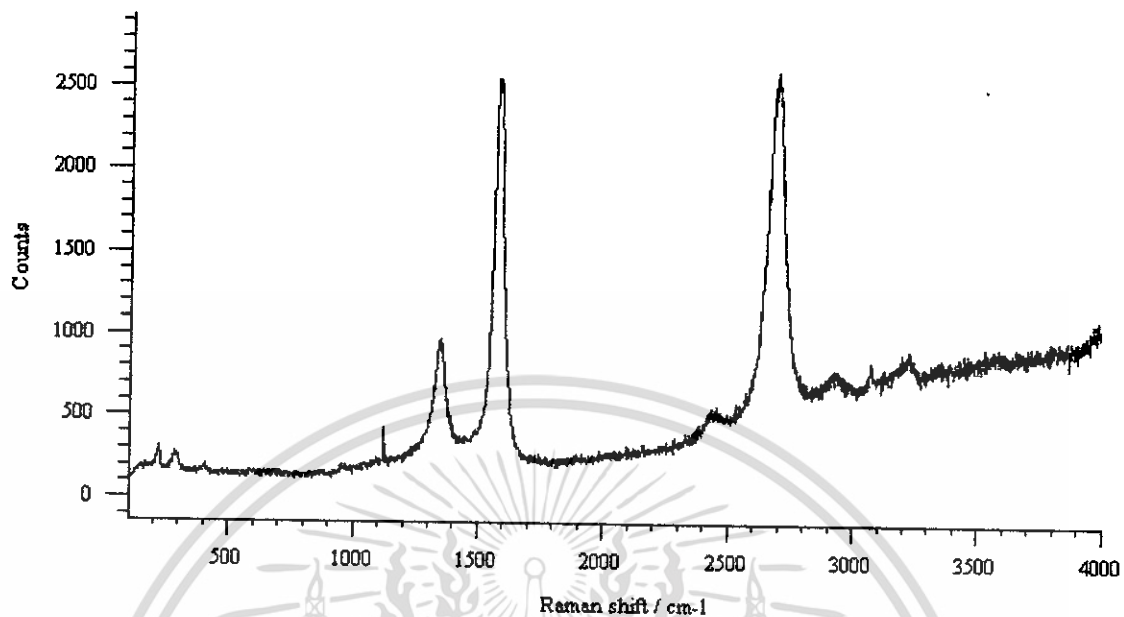


(ข) CNTs ปลายชิดเตอร์ ที่ Flow น้ำ DI 10 วินาที

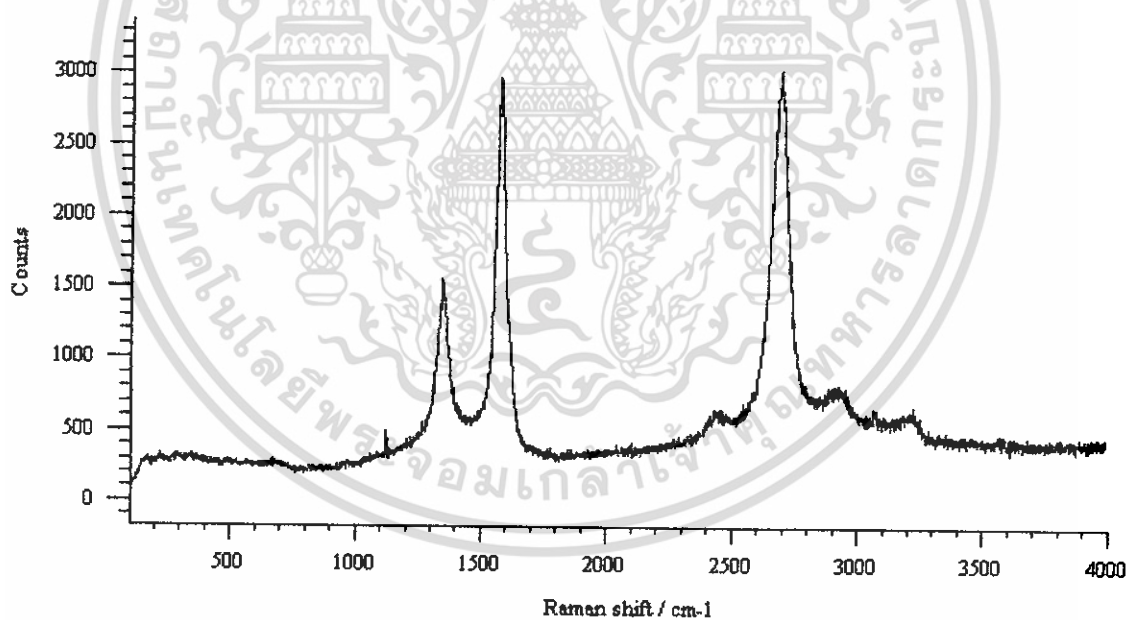


(ค) CNTs ปลายชิดเตอร์ ที่ Flow น้ำ DI 15 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



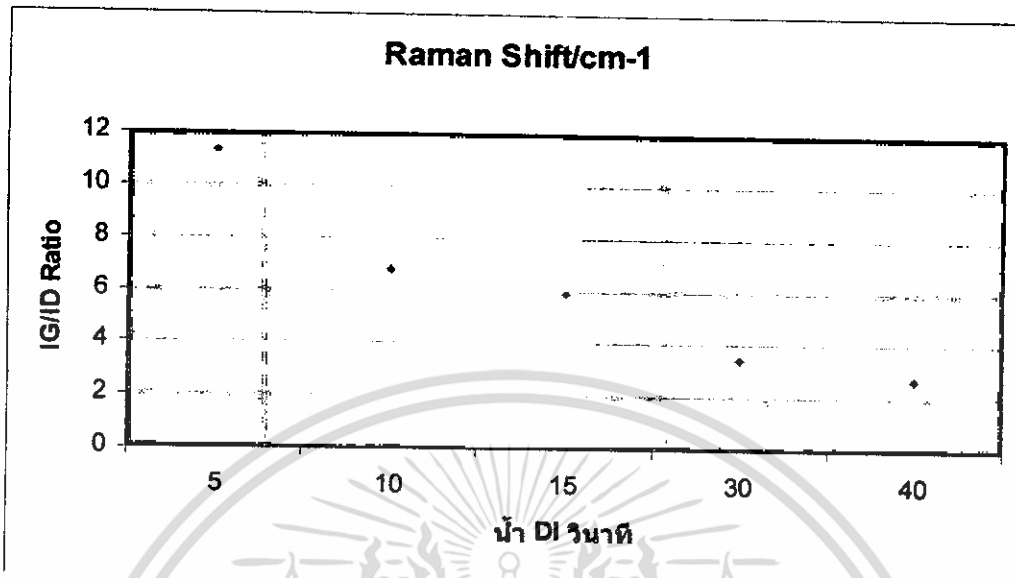
(ง) CNTs ปลายชิดเตอร์ ที่ Flow น้ำ DI 30 วินาที



(จ) CNTs ปลายชิดเตอร์ ที่ Flow น้ำ DI 40 วินาที

รูปที่ 5.2 กราฟ Raman Spectroscopy ที่วัดได้จากแผ่นตัวอย่าง ที่ใช้การ Flow น้ำ DI ในการสังเคราะห์ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 กราฟอัตราส่วน I_G/I_D ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างที่ใช้การ Flow น้ำ DI ในการสังเคราะห์ต่างกัน

ในการทดลองเราได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้การ Flow น้ำ DI ในการสังเคราะห์ต่างกัน เมื่อนำภาพถ่าย SEM ที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่า ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างที่มีการสังเคราะห์ที่ใช้การ Flow น้ำ DI ในการสังเคราะห์ต่างกัน (รูปที่ 5.1(ก), รูปที่ 5.1(ข), รูปที่ 5.1(ค), รูปที่ 5.1(ง) และรูปที่ 5.1(จ)) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะมีขนาดที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ความหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดจากการ Flow น้ำ DI ที่ต่างกัน นั้นมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน อาจเกิดจากการที่น้ำ DI มีผลต่อความตึงผิวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ และลักษณะการวางตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์

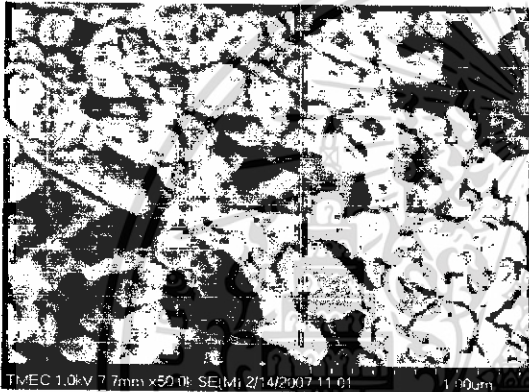
และเมื่อดูจากภาพถ่าย SEM โดยรวมแล้วจะเห็นว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบจากแผ่นตัวอย่างที่ใช้การ Flow น้ำ DI 15-40 วินาที (รูปที่ 5.1(ค), รูปที่ 5.1(ง) และรูปที่ 5.1(จ)) จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างที่ใช้การ Flow น้ำ DI 5-10 วินาที (รูปที่ 5.1(ก) และ รูปที่ 5.1(ข)) แต่เมื่อสังเกตให้ดีแล้วจะพบว่า แผ่นตัวอย่างที่ใช้การ Flow น้ำ DI 15-40 วินาที จะมีคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็ก เหมือนกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบในแผ่นตัวอย่างที่ใช้การ Flow น้ำ DI 5-10 วินาที แต่มีสิ่งสกปรกมาเกาะตามบริเวณท่อของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จึงทำให้เมื่อดูโดยรวมแล้วคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้การ Flow น้ำ DI 15-

40 วินาที มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าแผ่นตัวอย่างที่ใช้การ Flow น้ำ DI 5-10 วินาที ทั้งนี้ อาจจะเป็นผลมาจากการที่มีการ Flow น้ำ DI มากเกินไปทำให้ น้ำ DI ที่ผสมเข้าไป จะเข้าไปเพิ่มแรงตึงผิวของสารละลายระหว่างฟลูโรเซนกับแอลกอฮอล์ ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จับตัวกัน

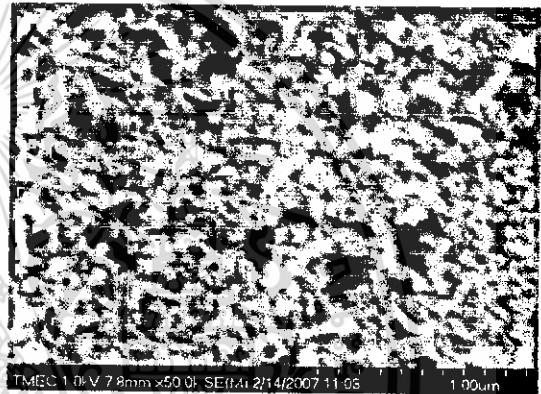
จากการวิเคราะห์ภาพ SEMs แล้วทำให้วิเคราะห์ได้ลำบาก แต่ถ้าพิจารณาจากกราฟ Raman Spectroscopy จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อใช้เวลาในการ Flow น้ำ DI มากขึ้นสเปกตรัมจะมีแนวโน้มขยับไปทางรามานชิฟท์ที่ต่ำลง ซึ่งนั่นก็หมายความว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (กราฟรูปที่ 5.2) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก เวลาในการ Flow น้ำ DI มากขึ้นไปทำให้อนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (ฟลูโรเซน) รวมตัวกันกับอนุภาคของ น้ำ DI กลายเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น และเมื่ออะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอนุภาคใหญ่ ส่งผลให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ก่อตัวขึ้นมา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ตามไปด้วย และหากพิจารณาถึงของความบริสุทธิ์ จากกราฟอัตราส่วน I_G/I_D แล้ว (กราฟรูปที่ 5.3) จะเห็นว่า การสังเคราะห์ที่ใช้เวลาในการ Flow น้ำ DI เพียงเล็กน้อย จะมีค่าความบริสุทธิ์ที่ดีกว่าการสังเคราะห์ที่ใช้เวลาในการ Flow น้ำ DI มากๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก การสังเคราะห์ที่ใช้เวลาในการ Flow น้ำ DI เพียงเล็กน้อย จะทำให้อนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแตกตัวได้ดีกว่าการสังเคราะห์ที่ใช้เวลาในการ Flow น้ำ DI มากๆ ซึ่งการสังเคราะห์ที่ใช้เวลาในการ Flow น้ำ DI มากๆ อาจทำให้อนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแตกตัวออกมาได้ไม่หมด เนื่องจากมีอนุภาคของน้ำ DI ผสมอยู่ด้วยมากเกินไป ส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ลดลง และการ Flow น้ำ DI เข้าไประหว่างที่ทำการ Flow ฟลูโรเซนผสมกับแอลกอฮอล์นั้น อาจจะทำให้สิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นจากต้นทางของซีดีเตอร์นั้นลดน้อยลง

5.2 ผลของการ Flow Thiophene เข้าไประหว่างที่ทำการ Flow ฟลูโรเซนผสมกับแอลกอฮอล์ และใช้ระบบแบบที่ 1 ในการทดลอง

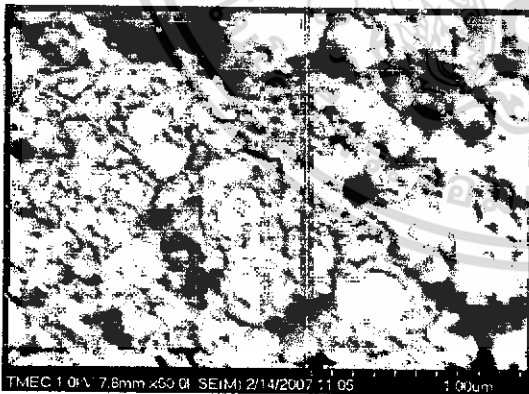
จากการศึกษาผลของการ Flow น้ำ DI ในระหว่างที่ทำการสังเคราะห์ในปริมาณที่เหมาะสม ละอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ดีจะทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ทำการสังเคราะห์ได้นั้นมีความบริสุทธิ์มากกว่าการสังเคราะห์โดยไม่มี Flow น้ำ DI ระหว่างที่ทำการสังเคราะห์ และได้มีงานวิจัยออกมาว่าในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ถ้ามีการผสม Thiophene ในเงื่อนไขที่ดี จะมีผลให้เส้นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น



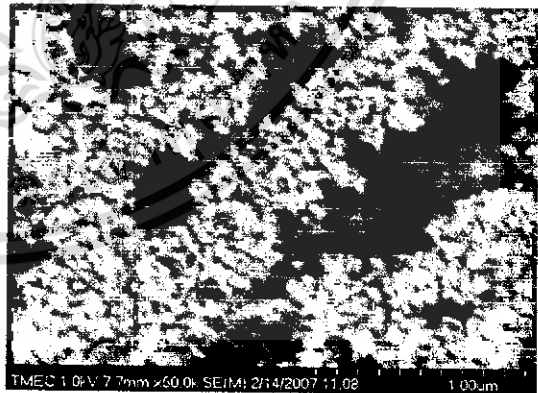
(ก-1) กลางฮีดเตอร์ที่ใช้ Thiophene 1%



(ก-2) ปลายฮีดเตอร์ที่ใช้ Thiophene 1%



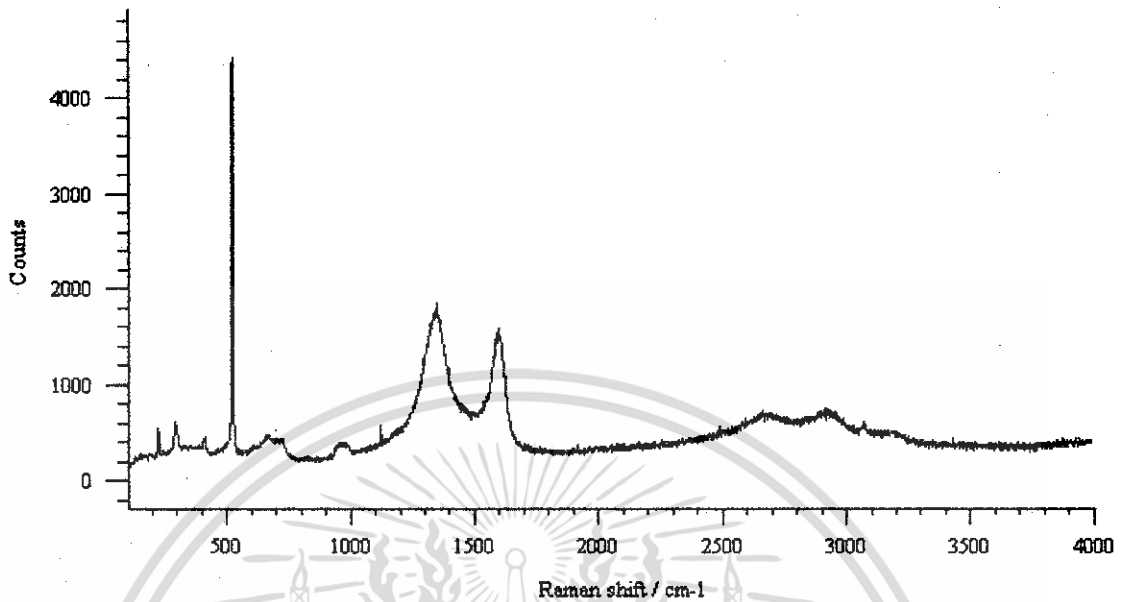
(ข-1) กลางฮีดเตอร์ที่ใช้ Thiophene 5%



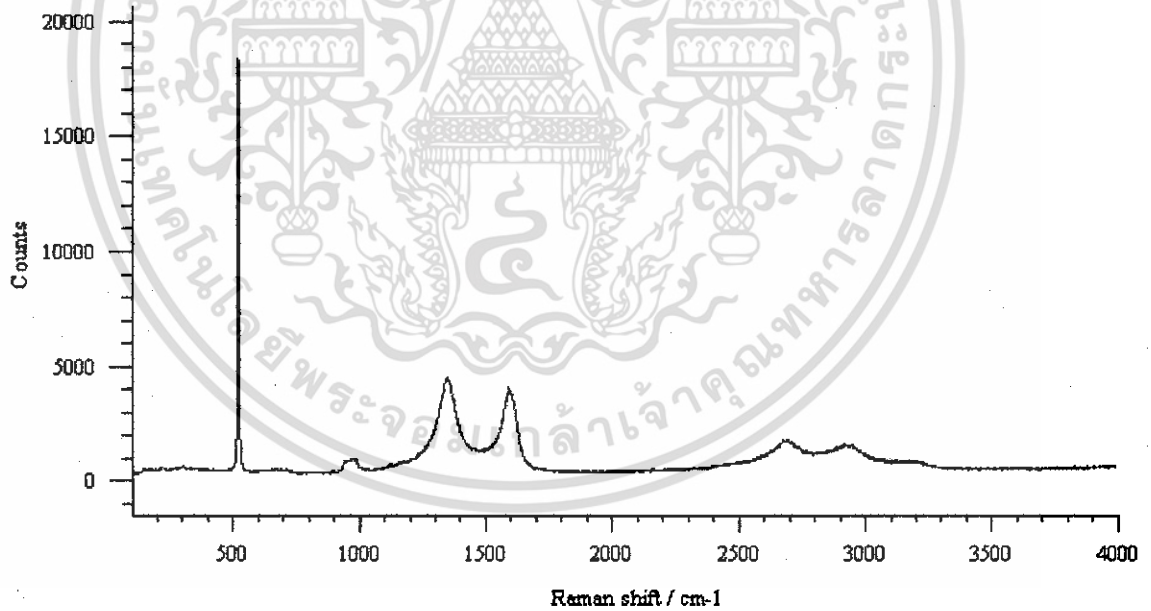
(ข-2) ปลายฮีดเตอร์ที่ใช้ Thiophene 5%

รูปที่ 5.4 ภาพถ่าย SEM ที่ถ่ายได้จากแผ่นตัวอย่างที่ผสม Thiophene ในการสังเคราะห์ต่างกัน และใช้การ Flow Thiophene 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



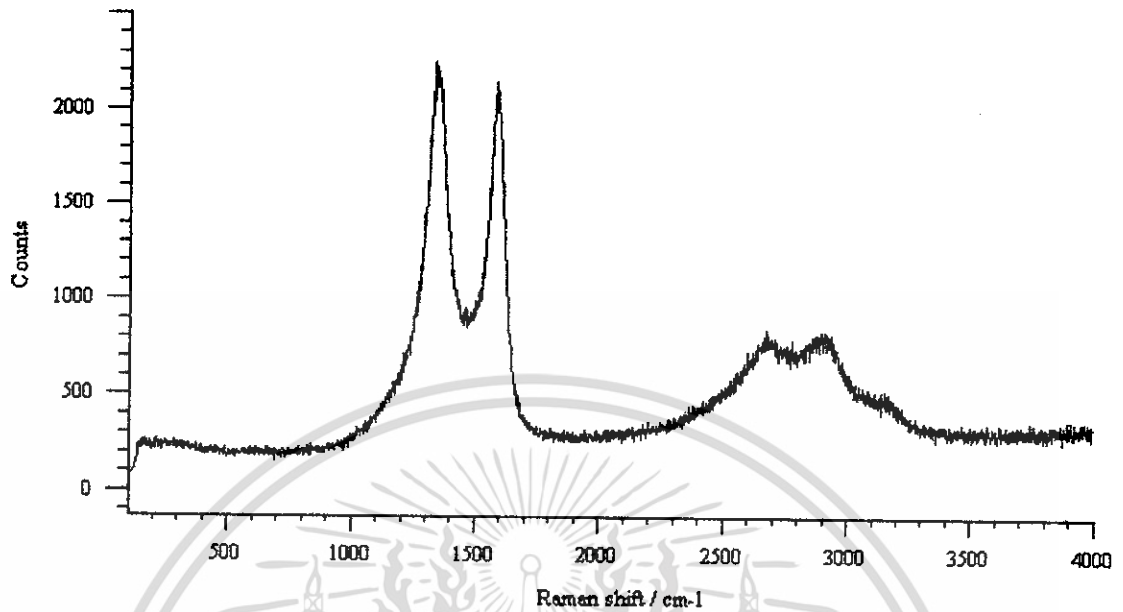
(ก) CNTs ปลายฮีตเตอร์ ที่ ใช้ Thiophene 1% Flow Thiophene 30 วินาที



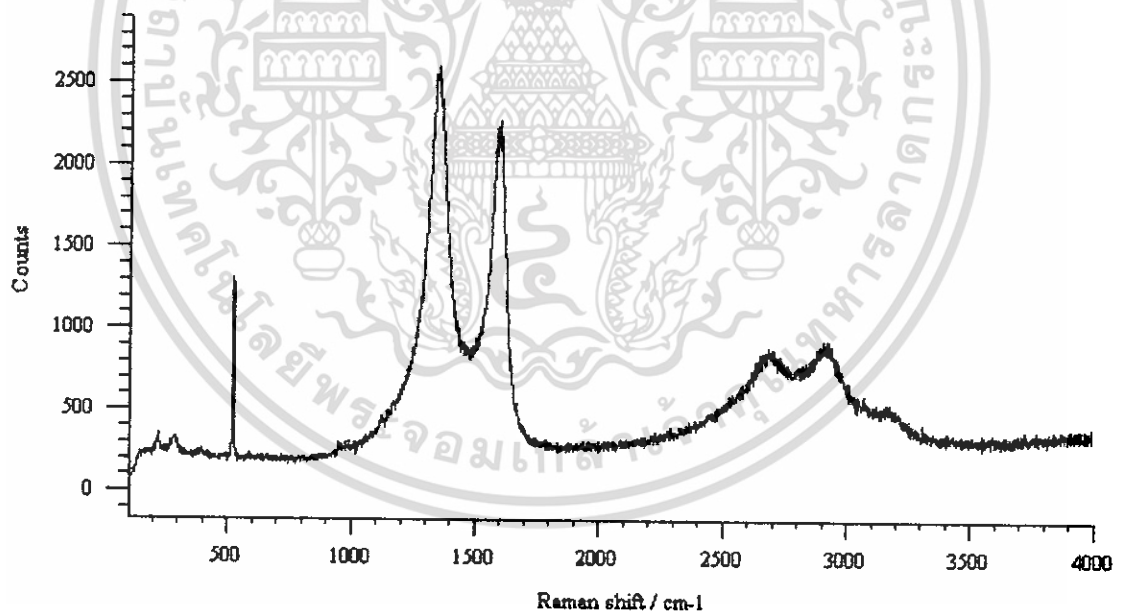
(ข) CNTs ปลายฮีตเตอร์ ที่ ใช้ Thiophene 5% Flow Thiophene 30 วินาที

รูปที่ 5.5 กราฟ Raman Spectroscopy ที่วัดได้จากแผ่นตัวอย่าง ที่ใช้ Thiophene ในการสังเคราะห์
ต่างกัน และทำการ Flow Thiophene 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



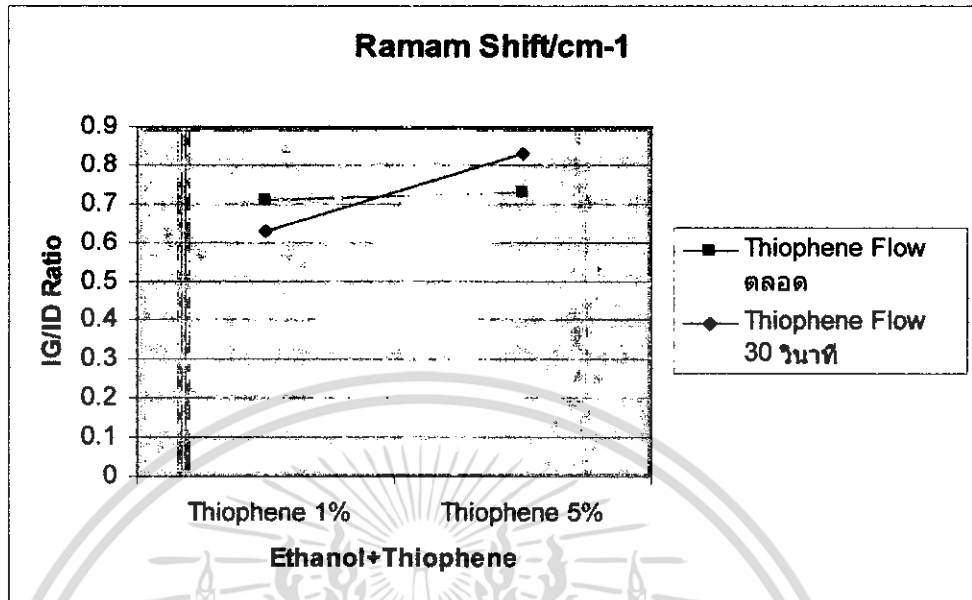
(ก) CNTs ปลายชี้เดี่ยว ที่ ใช้ Thiophene 1% Flow Thiophene ตลอด



(ข) CNTs ปลายชี้เดี่ยว ที่ ใช้ Thiophene 5% Flow Thiophene ตลอด

รูปที่ 5.6 กราฟ Raman Spectroscopy ที่วัดได้จากแผ่นตัวอย่าง ที่ใช้ Thiophene ในการสังเคราะห์
ต่างกัน และทำการ Flow Thiophene ตลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 กราฟอัตราส่วน I_G/I_D ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบบนแผ่นตัวอย่างที่ใช้ Thiophene ในการสังเคราะห์ต่างกัน และใช้เวลาในการ Flow Thiophene ในการสังเคราะห์ต่างกัน

ในการทดลองเราได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ทำการผสม Thiophene 1% และ 5% เมื่อเรานำภาพถ่าย SEM ที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกัน (รูปที่ 5.4(ก) และรูปที่ 5.4(ข)) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะมีขนาดที่แตกต่างกัน และความหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดจากการผสม Thiophene ที่ต่างกัน นั้นมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน อาจเกิดจากการที่ Thiophene มีผลต่อลักษณะการวางตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์

เมื่อดูจากภาพถ่าย SEM โดยรวมแล้วจะเห็นว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่พบจากแผ่นตัวอย่างที่ทำการผสม Thiophene 1% (รูปที่ 5.4(ก)) จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างที่ทำการผสม Thiophene 5% (รูปที่ 5.4(ข)) และเมื่อสังเกตแผ่นตัวอย่างที่ทำการผสม Thiophene 5% จะพบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จับตัวกัน ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากการที่ทำการผสม Thiophene เข้าไปทำให้อนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (แพลูโรเซน) นั้นแตกตัวได้น้อยจึงทำให้เกิดการจับตัวกันของคาร์บอนนาโนทิวบ์

และหากพิจารณาถึงของความบริสุทธิ์ จากกราฟอัตราส่วน I_G/I_D แล้ว (กราฟรูปที่ 5.5) จะเห็นว่า การสังเคราะห์ที่ทำการผสม Thiophene 5% จะมีค่าความบริสุทธิ์ที่ดีกว่าการสังเคราะห์ที่ใช้ทำการผสม Thiophene 1% เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก การที่มีอัตราส่วนของ Thiophene ที่ผสมนั้นมากกว่าทำให้การแตกตัวของอนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (แพลูโรเซน) ที่ใช้ในการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นมีความบริสุทธิ์มากกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการสังเคราะห์ที่ใช้การ Flow Thiophene 30 วินาที (กราฟรูปที่ 5.5) และการสังเคราะห์ที่ใช้การ Flow Thiophene ตลอด (กราฟรูปที่ 5.6) จะเห็นได้ว่า การสังเคราะห์ที่ใช้การ Flow Thiophene 30 วินาที นั้น มีแนวโน้มที่จะทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้มีความบริสุทธิ์มากกว่า การสังเคราะห์ที่ใช้การ Flow Thiophene ตลอด โดยจะสังเกตได้ชัดเจนจาก (กราฟรูปที่ 5.7) และผลที่ได้จากการทดลองเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างการ Flow น้ำ DI 30 วินาที และการ Flow Thiophene 30 วินาที จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดลองนั้นแตกต่างกันมาก คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ใช้การ Flow Thiophene มีความบริสุทธิ์น้อย อาจจะมาจากการเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองไม่เหมาะสมเท่าที่ควร ซึ่งจะต้องทำการศึกษาค่าต่อไป



บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองที่ได้ทำการทดลอง และกล่าวถึงปัญหาหรืออุปสรรคที่เกิดขึ้นในการทดลอง แนวทางแก้ไข รวมถึงประโยชน์ที่จะสามารถไปใช้งาน ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่อเนื่องจากละอองไอแอลกอฮอล์และฟลูออรีน ที่ความดัน 1 บรรยากาศ และทำการ Flow น้ำ DI เข้าไประหว่างที่ทำการ Flow ฟลูออรีนผสมกับแอลกอฮอล์ และใช้ระบบแบบที่ 2 ในการทดลอง

ในการทดลองนี้เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่อเนื่องจากละอองไอแอลกอฮอล์และ ฟลูออรีน โดยทำการสังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศ โดยได้ศึกษาถึงผลของเวลาที่ใช้ในการ Flow น้ำ DI เข้าไปในระบบที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ และวิธีการพัฒนาให้สิ่งปรกที่เข้ามาเจือปนลดน้อยลง จากการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการ Flow น้ำ DI จะมีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ และค่าความบริสุทธิ์จะแปรผันกับเวลาที่ใช้ในการ Flow น้ำ DI กล่าวคือ เมื่อเราทำการสังเคราะห์ที่ใช้เวลาในการ Flow น้ำ DI เพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ มีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ค่าความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าลดลง ในทางกลับกันเมื่อเราทำการสังเคราะห์ที่ใช้เวลาในการ Flow น้ำ DI ลดลงจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ มีขนาดเล็กลง และยังมีผลให้ค่าความบริสุทธิ์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น, เวลาในการ Flow น้ำ DI ยังมีผลต่อสิ่งสกปรกที่เข้ามาเจือปนกับคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ ในกรณีที่เราทำการสังเคราะห์ที่ใช้เวลาในการ Flow น้ำ DI มากเกินไปจะมีผลให้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ มีสิ่งสกปรกที่เข้ามาเจือปนกับคาร์บอนนาโนทิวป์มากขึ้น, ตำแหน่งการวางของแผ่นตัวอย่างจะมีผลต่อสิ่งสกปรกที่เข้ามาเจือปนกับคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ ซึ่งแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตำแหน่งกลางฮีดเตอร์ จะมีสิ่งสกปรกมาเกาะตามท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ ต่างจากแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตำแหน่งปลายฮีดเตอร์จะมีสิ่งสกปรกเข้ามาเจือปนน้อยกว่าแผ่นตัวอย่างที่วางอยู่ตำแหน่งกลางฮีดเตอร์, เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของการสังเคราะห์ที่ไม่ได้มีการ Flow น้ำ DI ระหว่างที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ และมีการ Flow น้ำ DI ระหว่างที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิวปี จะพบว่าค่าความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวปีที่สังเคราะห์ได้มีค่ามากกว่า การสังเคราะห์ที่ไม่ได้มีการ Flow น้ำ DI ระหว่างที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวปี

วิธีการสังเคราะห์นี้ เป็นวิธีที่ง่าย ไม่ต้องใช้สุญญากาศ ไม่ต้องใช้ก๊าซอันตราย และที่สำคัญสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวได้อย่างต่อเนื่องในปริมาณมากๆ โดยผลการทดลองนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวปีให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็ก และมีค่าความบริสุทธิ์ที่สูงได้ และใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาขบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวปีในเชิงพาณิชย์ได้อีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 สรุปผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่อเนื่องจากอะลกอฮอล์และฟลูออรีน ที่ความดัน 1 บรรยากาศ และทำการ Flow Thiophene ผสมแอลกอฮอล์ เข้าไประหว่างที่ทำการ Flow ฟลูออรีนผสมกับแอลกอฮอล์ และใช้ระบบแบบที่ 1 ในการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่อเนื่องจากอะลกอฮอล์และฟลูออรีน โดยทำการสังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศ โดยได้ศึกษาถึงผลของเวลาที่ใช้ในการ Flow Thiophene เข้าไปในระบบที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ และวิธีการพัฒนาให้สิ่งปรกที่เข้ามาเจือปนลดน้อยลง จากการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการ Flow Thiophene จะมีผลต่อการเรียงตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์ จะพบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จับตัวกัน, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ และค่าความบริสุทธิ์จะแปรผันกับอัตราส่วนในการผสม Thiophene กับแอลกอฮอล์ กล่าวคือ เมื่อเราทำการสังเคราะห์ที่ทำการผสม Thiophene เพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ มีขนาดลดลงเล็กน้อย แต่ค่าความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย, เวลาที่ใช้ในการ Flow Thiophene เข้าไปในระบบที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ มีผลต่อความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ กล่าวคือ การสังเคราะห์ที่ใช้เวลาในการ Flow Thiophene มากเกินไปจะทำให้ค่าความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าลดลงในทางกลับกัน การสังเคราะห์ที่ใช้เวลาในการ Flow Thiophene ลดลง มีแนวโน้มที่จะทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้มีความบริสุทธิ์มากกว่า, เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ระหว่างการสังเคราะห์ที่ใช้การ Flow น้ำ DI และการสังเคราะห์ที่ใช้การ Flow Thiophene ในเงื่อนไขเดียวกันพบว่าความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ มีความแตกต่างกันมาก คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ใช้การ Flow น้ำ DI มีความบริสุทธิ์มากกว่า คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ใช้การ Flow Thiophene อาจจะมาจากเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองไม่เหมาะสมเท่าที่ควร ซึ่งทั้งนี้ยังต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

แต่อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้ เราสามารถที่จะนำมาเป็นต้นแบบในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ในเชิงพาณิชย์ได้ โดยใช้ค่าใช้จ่ายไม่สูง และยังสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ ไปใช้งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในห้องปฏิบัติการต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Iijima, Nature (London) 354 (1991) 56-58
- [2] “ท่อนาโนคาร์บอน”, <http://www.technologymedia.com/article/detail.asp?arid=2484&pid=257>
- [3] “Wondrous World of Carbon Nanotubes”, <http://students.chem.tue.nl/ifp03/synthesis.html>
- [4] T. Kato et al, Chem. Phys. Lett 381 (2003) 422-426
- [5] “Cover Story”, <http://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue4/covers/cover1.html>
- [6] 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
- [7] 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

