



การปลูกท่อนานคาร์บอนโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิล

ทิพวรรณ สายพิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2548

ISBN 974-523-062-6

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**GROWTH OF CARBON NANOTUBES BY CHEMICAL VAPOR
DEPOSITION WITH AN IRON-NICKEL CATALYST**

TIPPAWAN SAIPIN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

MAJOR PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

UBON RAJATANEE UNIVERSITY

ISBN 974-523-062-6

COPYRIGHT OF UBON RAJATANEE UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เรื่อง การปลูกท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีไฮโรเทเบิลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิล

ผู้วิจัย ทิพวรรณ สายพิณ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดยคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ภียโย ปิ่นยารชุน)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม ทิพรราช)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกร ภูเกิด)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธานินทร์ นุตโร)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์ นิยมพันธ์)

..... คณบดี

(ดร.จันทร์เพ็ญ อินทรประเสริฐ)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

.....

(ศาสตราจารย์ ดร.ประกอบ วิโรจนกูฏ)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา พ.ศ. 2548

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม ทิพรราช อาจารย์พี่เลี้ยง (mentor) ขณะทำวิจัย อาจารย์ที่ปรึกษา (advisor) และประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกร ภูเก็ด หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์ นิยมพันธ์ กรรมการที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาเป็นอย่างดี และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จน สมบูรณ์ ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ภิชโย ปิ่นيارชุน ประธานกรรมการ สอบและอาจารย์ผู้สอนวิชาฟิสิกส์บาง ที่ได้กรุณาถ่ายทอดความรู้ ตลอดจนทักษะการทำฟิสิกส์บางวิธี ต่างๆ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชานินทร์ นุตโร ที่ได้กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และ ให้คำแนะนำเป็นอย่างดี

ผู้เขียนรู้สึกเป็นหนี้บุญคุณอย่างยิ่งต่อ Dr. Lee Chow และ Dr. Guangyu Chai University of Central Florida Orlando, Florida, USA. ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่วิจัย เครื่องมือวิจัย ตลอดจน สนับสนุนอุปกรณ์ทดลอง รวมทั้งให้คำแนะนำอย่างดียิ่ง ขอขอบคุณ Dr. B. Roldan Cuenya คุณ Luis Katsuya Ono, คุณ Abhilash Vincent และ คุณ Enrique G. Ortiz ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือเพื่อการทดสอบตัวอย่างตลอดจนคำแนะนำที่ดียิ่ง และขอขอบคุณ คุณ Fatma Salman เพื่อนที่ให้กำลังใจขณะทำการวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่และน้องที่ให้ความหวังใจผู้วิจัยตลอดมา และขอขอบคุณ คุณคมกริช สายพิณ ที่ให้การสนับสนุนทุกอย่างด้วยพลังอันยิ่งใหญ่ และบุตรสาว ทั้งสามคน ที่เป็นแรงบันดาลใจที่ยิ่งใหญ่ที่สุด ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยมีความมานะพยายามอดทนจน ประสบผลสำเร็จ



ทิพวรรณ สายพิณ

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

หัวข้อวิทยานิพนธ์ : การปลูกท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไอระเหยเคมีด้วยตัวเร่ง
ปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิล

ผู้วิจัย : นางทิพวรรณ สายพิน

ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา : ฟิสิกส์ [ISBN 974-523-062-6]

ประธานคณะกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม ทิพราช

ศัพท์สำคัญ : ท่อนาโนคาร์บอน วิธีไอระเหยเคมี อนุภาคนาโน ตัวเร่งปฏิกิริยา

เราได้ประสบความสำเร็จในการปลูกท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไอระเหยเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) โดยใช้อนุภาคนาโน (nanoparticles) ของเหล็กและนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้มีเทน (methane) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ทำการตกเคลือบอนุภาคนาโนของตัวเร่งปฏิกิริยาบนแผ่นฐานรองซิลิกอนด้วยวิธีไอระเหยความร้อน (thermal evaporation) ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอนที่แปรค่าจาก 200 มิลลิทอร์ ถึง 400 มิลลิทอร์ ได้ตรวจสอบขนาดและศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์เอเอฟเอ็ม ควบคู่กับการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ท่อนาโนคาร์บอนถูกปลูกบนแผ่นฐานรองที่มีอนุภาคนาโนของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิแปรค่าระหว่าง 800 องศาเซลเซียส ถึง 1000 องศาเซลเซียส เราได้ศึกษาคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนด้วย กล้องจุลทรรศน์เอเอฟเอ็ม กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอน เช่น ความยาวและโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนมีแนวโน้มแปรตามอุณหภูมิที่ปลูก อุณหภูมิการปลูกที่สูงกว่าจะให้ท่อนาโนคาร์บอนที่ยาวกว่า ความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่ปลูกที่อุณหภูมิอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มากกว่า 25 ไมโครเมตร ท่อนาโนคาร์บอนส่วนใหญ่เป็นเส้นตรง และเป็นชนิดผนังหลายชั้น (multi-walled carbon nanotubes) ท่อนาโนคาร์บอนเหล่านี้เหมาะที่จะได้รับการพัฒนาสำหรับการทำอุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้า (field emitting devices)

ABSTRACT

THESIS TITLE : GROWTH OF CARBON NANOTUBES BY CHEMICAL VAPOR
DEPOSITION WITH AN IRON-NICKEL CATALYST.

AUTHOR : IPPAWAN SAIPIN

DEGREE : MASTER OF SCIENCE (PHYSICS)

MAJOR : PHYSICS [ISBN 974-523-062-6]

CHAIR : ASST. PROF. UDOM TIPPARACH, Ph. D CHAIRMAN

KEYWORDS : CARBON NANOTUBES / CHEMICAL VAPOR DEPOSITION /
NANOPARTICLES / CATALYST

We have successfully grown carbon nanotubes by chemical vapor deposition (CVD) using particles of Fe : Ni nanosize as a catalyst and methane molecules as a carbon feedstock gas. The Fe : Ni nanoparticle catalysts were deposited on the silicon substrates by thermal evaporation at different argon atmospheres of pressures ranging from 200 mtorr to 400 mtorr. The sizes of the catalyst were examined using Atomic Force Microscopy (AFM) in conjunction with high resolution Scanning Electron Microscopy (SEM). Carbon Nanotubes were grown on the catalyst-coated silicon substrates. The growth temperatures were varied from 800 °C to 1000 °C. The samples were characterized by high resolution SEM and high resolution TEM. The quality of the carbon nanotubes such as length and structure strongly depends on the growth temperature. The length of carbon nanotubes are likely to vary to the growth temperature: the higher temperature, the longer carbon nanotubes. The length of the carbon nanotubes grown at 900 °C exceeds 25 micrometers. The most of carbon nanotubes are a straight line. The TEM images reveal that our carbon nanotubes are multiwalled. These carbon nanotubes are well qualified to further development for making field emitting devices.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญและความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับการจากการวิจัย	4
1.5 วิธีดำเนินการ	4
1.6 โครงสร้างของรายงานการวิจัย	4
2. สมบัติของท่อนาโนคาร์บอนและการสังเคราะห์	
2.1 สมบัติของธาดูคาร์บอน	6
2.2 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน	8
2.3 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน	8
2.4 การจำแนกชนิดของท่อนาโนคาร์บอน	10
2.5 ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อใช้ประโยชน์	11
2.6 กลไกการเกิด	15
2.7 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน	16
3. วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไอระเหยความร้อน	26
3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน	27
3.3 การศึกษาสมบัติของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์ AF	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การศึกษาสมบัติของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด	30
3.5 การศึกษาสมบัติของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องผ่าน	32
4. ผลการทดลอง	
4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิลที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโน	34
4.2 ท่อนาโนคาร์บอน	39
4.3 การวิเคราะห์การกระจายพลังงาน	44
4.4 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	45
5. สรุป	
เอกสารอ้างอิง	50
ประวัติผู้วิจัย	55

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อสรุป 3 วิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน
	23

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของคาร์บอน	7
2.2 โครงสร้างของแผ่นแกรไฟท์ และการหมุนเป็นท่อนาโนคาร์บอน	10
2.3 แสดง Tip วางในสนามไฟฟ้า field-enhancement factor ขึ้นอยู่กับ aspect ratio (h/r)	12
2.4 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ที่สร้างจากท่อนาโนคาร์บอน	13
2.5 ปลายเข็มของ AFM ที่ทำจากท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	14
2.6 รูปแบบการก่อตัวของท่อนาโนคาร์บอน	16
2.7 ไดอะแกรมแสดงการสังเคราะห์แบบอาร์คคิซซาร์จ	17
2.8 ไดอะแกรมแสดงการสังเคราะห์ แบบการยิงด้วยเลเซอร์	19
2.9 ไดอะแกรมแสดงการสังเคราะห์ แบบ plasma enhanced CVD	20
2.10 ไดอะแกรมแสดงวิธี thermal chemical vapor deposition	21
2.11 ไดอะแกรมแสดง Alcohol catalytic chemical vapor deposition	22
3.1 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการวิจัย	25
3.2 ไดอะแกรมแสดง vacuum chamber สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนแผ่นฐานรอง	27
3.3 ไดอะแกรมแสดงเตาปฏิกิริยา (reactor)	28
3.4 ไดอะแกรมอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์เอเอฟเอ็ม	29
3.5 ไดอะแกรมอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
3.6 ไดอะแกรมอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	33
3.7 ภาพกริดทองแดงขนาด 3 mm ถ่ายภาพด้วยกล้องกำลังขยาย 100 เท่า	34
4.1 แสดงอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิล สังเคราะห์ที่ความดันแก๊สอาร์กอน 200 mtorr ก่อน anneal	35
4.2 แสดงขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิล สังเคราะห์ที่ความดันแก๊สอาร์กอน 200 mtorr หลัง anneal	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

4.3	(a) แสดงขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศแก๊สอาร์กอน 300 mtorr หลัง anneal	37
	(b) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ AFM แสดงความหนาแน่นของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็ก-นิกเกิลสังเคราะห์ที่ 300 mtorr หลัง anneal	37
4.4	(a) แสดงขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา สังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศแก๊สอาร์กอน 400 mtorr หลัง anneal	38
	(b) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ เอเอฟเอ็ม แสดงความหนาแน่นของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็ก-นิกเกิลสังเคราะห์ที่ 400 mtorr หลัง anneal	38
4.5	แสดงคาร์บอนไฟเบอร์ หรือ อะมอร์ฟัสคาร์บอน	40
4.6	แสดงท่อนาโนคาร์บอนปลูกที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส	41
4.7	แสดงลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนที่ปลูกบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ภายใต้ความดันบรรยากาศแก๊สอาร์กอน 300 mtorr ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	42
4.8	แสดงท่อนาโนคาร์บอน สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	43
	(a) แสดงลักษณะของท่อเส้นตรง	
	(b) แสดงลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นข้อต่อ	43
4.9	ข้อมูล EDS ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างที่เกิดท่อนาโนคาร์บอน	44
4.10	ท่อนาโนคาร์บอนที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	45
4.11	แสดงผนังของท่อนาโนคาร์บอนที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

วัสดุนาโน (nano-sized materials) คือวัสดุที่มีขนาดระดับนาโนเมตรจากหนึ่งถึงหลายร้อยนาโนเมตร เมื่อวัสดุหรือสารมีขนาดระดับนี้คุณสมบัติและพฤติกรรมต่าง ๆ ของวัสดุเช่น การนำไฟฟ้า คุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติทางแม่เหล็กจะแตกต่างจากวัสดุนิคมเดียวกันเมื่อมันมีขนาดใหญ่ (bulk) เป็นอย่างมาก¹ เช่น เมื่อทองคำมีอนุภาคนาโนเมตร สมบัติทางกายภาพจะเปลี่ยนไป เช่น สภาพการนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนจากตัวนำไฟฟ้าไปเป็นสารกึ่งตัวนำ สีจะเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นสีแดงส้ม และคุณสมบัติทางเคมีเปลี่ยนจากโลหะที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยา เป็นโลหะที่ไวต่อปฏิกิริยา เช่นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีเป็นต้น การศึกษาเพื่อเพิ่มพูนความเข้าใจพื้นฐานในศาสตร์เกี่ยวกับวัสดุนาโนสเกลได้เป็นที่รู้จักกันดีในสาขานาโนไซน์ (nanoscience) และสาขานาโนไซน์ได้กลายมาเป็นนาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารภ ที่จะสร้างอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ได้บนพื้นฐานของการประกอบที่ควบคุมได้ของวัสดุนาโนสเกลเพื่อการใช้งานทางด้านเทคโนโลยีเฉพาะด้าน ปัจจุบันความสำคัญทางด้านนาโนไซน์และด้านนาโนเทคโนโลยีได้รับความสนใจอย่างมากในประเทศต่างๆ ทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทย²

ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube, CNTs) เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจมากที่สุดในการบรรณานาโนวัสดุ เนื่องจากมันมีศักยภาพสูงในทางเทคโนโลยีและสมบัติที่เด่นในทางฟิสิกส์ เช่น สมบัติทางกล ทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และ ความมีเสถียรภาพทางเคมี (chemical stability) คุณสมบัติที่น่าสนใจอีกด้านหนึ่ง คือท่อนาโนคาร์บอน เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการนำไปสู่การสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ระดับโมเลกุล (molecular devices) เช่น อุปกรณ์ตรวจวัดระดับนาโน³ (nanosensors) ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยว⁴ (single electron transistors) electrochemical energy storage⁵ และ field emitting devices เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สำคัญ เช่น หลอดเอกซเรย์⁶ (x-ray tube) ประสิทธิภาพสูง จอแสดงผลแบบแบน (field emission flat panel displays) เข็มของ Atomic Force Microscope⁷ (AFM Tip) เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และเป็นหัวใจสำคัญใน vacuum microelectronics⁸ อื่นๆ นอกจากนี้ ท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำไปเป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพ ทั้งความแข็งแรง การทนอุณหภูมิ การมีน้ำหนักเบา ความสามารถนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี และความยืดหยุ่นสูงไม่แตกหักง่าย แม้จะถูกโค้งงอก็สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ด้วยคุณสมบัติที่หลากหลายของ

ท่อนาโนคาร์บอนนี้ จึงทำให้ได้รับศึกษาวิจัยและประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายไม่ว่าจะเป็นทางการแพทย์ วิศวกรรม หรือในทางวิทยาศาสตร์ อย่างไรก็ตาม อุปสรรคที่สำคัญในการนำท่อนาโนไปใช้ในอุปกรณ์จริงคือ การที่ไม่สามารถควบคุมขนาดและทิศทาง ตำแหน่งของการเกิด การควบคุมความสามารถในการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ยึดกันในโครงสร้างของ nanotube chirality อันเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมสมบัติการเป็นโลหะ หรือการเป็นสารกึ่งตัวนำของท่อนาโนคาร์บอน รวมทั้งการเคลื่อนย้าย การหยิบจับ (manipulating) ท่อนาโนคาร์บอนมาใช้ประโยชน์ถือเป็นปัญหาสำคัญตลอดจนเทคนิคและวิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนวิธีต่างๆ เป็นที่สนใจของนักวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำไปสู่การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่มีคุณภาพและสมบัติตามที่ต้องการ

ปัจจุบันมีวิธีหลัก 3 วิธีที่เป็นที่ดึงดูดใจของบรรดาเหล่านักวิจัย ซึ่งแต่ละเทคนิควิธีการสังเคราะห์ได้ให้คุณภาพท่อนาโนคาร์บอนแตกต่างกัน และแต่ละวิธีมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกัน อาทิ เช่น วิธีการอาร์คแท่งคาร์บอน⁹ (arc discharge) วิธีนี้ถ้าใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) จะได้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว (single-walled carbon nanotubes, SWCNTs) และ ที่ไม่ใช่โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs) ซึ่งจัดว่าเป็นวิธีที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายถูก แต่ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดของท่อไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมากวิธีการสังเคราะห์โดยการอาบด้วยเลเซอร์ของแท่งแกรไฟท์¹⁰ (pulsed-laser vaporization) จะได้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่มีค่าใช้จ่ายมากเนื่องจากต้องใช้เลเซอร์แยกอะตอมของคาร์บอน และวิธีไอระเหยทางเคมี¹¹ (chemical vapor deposition, CVD) เป็นวิธีสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นวิธีที่นิยมใช้สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์ได้ทั้งท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังเดี่ยว และ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนวิธีนี้อาศัยการก่อรูปของท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่นฐานรอง (substrate) ซึ่งชนิดของแผ่นฐานรอง ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดท่อนาโนคาร์บอน แผ่น ฐานรองที่นิยมคือ ซิลิกอน ควอตซ์ และแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น การปลูกท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่นฐานรอง จำเป็นต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา¹² ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ได้แก่โลหะทรานซิชัน (transition) ซึ่งโลหะแต่ละชนิดให้ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนต่างกันรายงานความสำเร็จในการควบคุมรูปแบบการเกิด และตำแหน่งของการปลูกท่อนาโนคาร์บอนที่ปลูกโดยไอระเหยทางเคมี เทคนิคการสังเคราะห์วิธีนี้ ใช้แก๊สไฮโดรคาร์บอนเป็นแหล่งกำเนิดอะตอมคาร์บอน และวิธีนี้ได้รับการพิสูจน์แล้วว่า เป็นเทคนิควิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถที่จะสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่มีความสะอาดสูง ปราศจากสิ่งเจือปน หัวใจสำคัญของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนคือตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

โดยวิธีไอระเหยเคมีโดยทั่วไป คือ โลหะทรานซิชัน เช่น เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) โมลิบดีนัม (Mo) หรือใช้โลหะเหล่านี้ผสมกับโลหะอื่น เช่น อลูมิเนียม (Al)¹³

การปลูกท่อนาโนคาร์บอนด้วยการใช้อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาขนาด 1-7 นาโนเมตร จะได้ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว และถ้าอุณหภูมิสูงปฏิกิริยาที่มีขนาดใหญ่กว่านั้นจะได้ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น¹⁴ นอกจากนี้รายงานการวิจัยของหลายกลุ่มได้ศึกษาวิจัยการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไอระเหยเคมีโดยใช้สารประกอบ $Fe(Co)_3$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดของอนุภาคแตกต่างกัน¹⁵ การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี ไอระเหยเคมีที่ใช้ Fe-Mo เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าขนาดของท่อนาโนคาร์บอนขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา¹⁶ จะเห็นได้ว่างานวิจัยเหล่านี้บ่งบอกให้ทราบว่าขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน

นอกจากนี้แล้ว อุณหภูมิยังเป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนเช่น ความยาวและโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน ความยาวของท่อนาโนคาร์บอนมีแนวโน้มแปรตามอุณหภูมิขณะสังเคราะห์ ถ้าสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยที่อุณหภูมิค่าประมาณ 400-800 องศาเซลเซียส จะได้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีวนโค้งหรือหยักงอ มีคาร์บอนไฟเบอร์เจือปนมาก ถ้าสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 900 องศาเซลเซียส ขึ้นไปจะได้ท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นเส้นตรง มีความยาวมาก¹⁷ มีคาร์บอนไฟเบอร์เจือปนน้อย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

จุดประสงค์ของการวิจัยเพื่อ ศึกษาผลของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาระดับนาโนเหล็ก-นิกเกิล บนฐานรองของแผ่นซิลิกอนต่อการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธีไอระเหยทางเคมี โดยเน้น การศึกษาขนาดอนุภาคนาโนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดท่อนาโนคาร์บอน และผลของ อุณหภูมิระหว่าง 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียสต่อการเกิดท่อนาโนคาร์บอน

1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไอระเหยเคมี บนแผ่นฐานรอง Si ที่มีอนุภาคนาโนของเหล็กและนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเตรียมขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนแผ่นฐานรองซิลิกอนด้วยวิธีไอระเหยความร้อน (thermal evaporation) ที่บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน 200, 300 และ 400 มิลลิทอร์ (mtorr) จากนั้นนำแผ่นฐานรองที่ได้ไปปลูกท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิแปรค่าระหว่าง 800-1000 องศาเซลเซียส ศึกษาขนาดของอนุภาค

ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ Atomic Force Microscope (AFM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) จากนั้นทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีไอระเหยเคมี แล้วทำการศึกษาลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในหัวข้อสุดท้ายเราจะศึกษาคุณลักษณะของท่อนาโนคาร์บอน เพื่อบ่งบอกว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้เป็นแบบผนังชั้นเดียวหรือผนังหลายชั้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Scanning Transmission Electron Microscope, TEM)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

ผลจากการศึกษาวิจัยนี้จะทำให้ผู้วิจัยเกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับขนาดกระจุก (cluster) ของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นอนุภาคระดับนาโนของ Fe : Ni ที่มีผลต่อขนาดของ ท่อนาโนคาร์บอน รวมทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกต่อการเกิดท่อนาโนคาร์บอน เพิ่มพูนทักษะกระบวนการและการควบคุมการปลูกท่อนาโนคาร์บอนให้เกิดความชำนาญ สามารถปลูกท่อนาโนคาร์บอนให้มีขนาดและคุณสมบัติตามที่ต้องการ และเป็นแนวทางในการทำการวิจัยเกี่ยวกับท่อนาโนคาร์บอนเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาและการวิจัยในระดับสูงต่อไป

1.5 วิธีดำเนินการ

การศึกษาวิจัยมีขั้นตอนเริ่มต้น คือการเตรียมอนุภาคระดับนาโนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Fe : Ni บนแผ่นฐานรองซิลิกอน เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการปลูกท่อนาโนคาร์บอน จากนั้นศึกษาระดับขนาดของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ AFM และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เมื่อได้แผ่นฐานรองที่เคลือบด้วยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว นำแผ่นฐานรองไปใช้เพื่อปลูกท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีไอระเหยทางเคมีที่อุณหภูมิที่แปรค่าระหว่าง 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส สุดท้ายศึกษาลักษณะการเกิดของท่อนาโนคาร์บอน โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ ศึกษาชนิดของท่อนาโนคาร์บอนโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

1.6 โครงสร้างของรายงานการวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการสรุปและรวบรวมผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารและผลงานที่ได้รับการนำเสนอผลงานของผู้วิจัยในการประชุมทางวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31 ณ เทคโนโลยีธานี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

Chiang Mai University Journal และ Thai Physics Society ในการประชุม Siam Physics Congress 2006 เนื้อหาประกอบด้วย 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำซึ่งจะกล่าวถึงที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย รายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงความสำคัญและสมบัติของธาตุคาร์บอน สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน กลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอน วิธีการสังเคราะห์ ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ประโยชน์ของท่อนาโนคาร์บอน

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการดำเนินการศึกษาวิจัยซึ่งประกอบด้วย วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา บนแผ่นฐานรอง วิธีการศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไฮโรเทย์ลเคมี และการศึกษาลักษณะของท่อนาโนคาร์บอน

บทที่ 4 เป็นการรายงานผลการศึกษาวิจัย ซึ่งจะกล่าวถึงผลของความดันบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนที่มีต่อขนาดของอนุภาคระดับนาโนของตัวเร่งปฏิกิริยา ขนาดกระจุกของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นอนุภาคระดับนาโนของ Fe : Ni ต่อขนาดของท่อนาโนคาร์บอน อุณหภูมิในการปลูกต่อการเกิดท่อนาโนคาร์บอน ลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์

บทที่ 5 บทสรุปผลการศึกษาวิจัย แนวทางการศึกษาวิจัยในอนาคต

บทที่ 2

สมบัติของท่อนาโนคาร์บอนและการสังเคราะห์

เนื้อหาประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับท่อนาโนคาร์บอนและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ประกอบด้วย สมบัติของธาตุคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอนโครงสร้าง ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน และการประยุกต์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อใช้ประโยชน์ ส่วนที่สองเป็นเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ประกอบด้วย กลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอน วิธีการสังเคราะห์แบบอาร์คดิสชาร์จ (arc discharge) วิธีการสังเคราะห์แบบการยิงด้วยเลเซอร์ (laser ablation) และ วิธีการสังเคราะห์แบบไอระเหยเคมี (chemical vapor disposition)

2.1 สมบัติของธาตุคาร์บอน

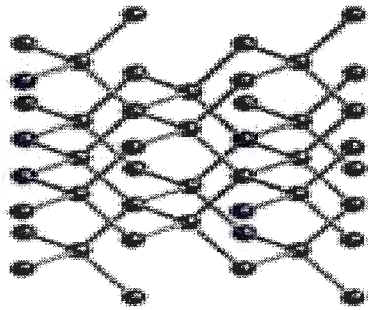
คาร์บอนคือธาตุที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานสำคัญของสิ่งมีชีวิต อาจถือได้ว่าร่างกายของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โมเลกุลของสารอินทรีย์ เสื้อผ้าที่เราสวมใส่ อาหารที่เรารับประทาน น้ำมันเชื้อเพลิงและอื่นๆ อีกมาก ซึ่งล้วนมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ นอกจากนี้ธาตุคาร์บอนยังมีการกระจายตัวในธรรมชาติเช่น อยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมคาบอเนต ถ่านหิน พีโตรเลียม และ แก๊สธรรมชาติ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊ส อื่นๆ อีกเป็นจำนวนมาก คาร์บอนเป็นธาตุที่มีลักษณะพิเศษคือมีโครงสร้าง 4 แบบ ดังนี้

1. แบบมีโครงสร้างแข็งแรงทั้งสามมิติ โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะเกาะยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับคาร์บอนอะตอมอื่น 4 อะตอม ซึ่งอยู่ที่มุมของรูปทรงสี่หน้า และแต่ละอะตอมของคาร์บอนที่มุมของทรงสี่หน้าจะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุอื่นอีก 3 อะตอมต่อ ๆ ไป เช่น เพชรมีโครงสร้างเป็นตาข่ายสามมิติ ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนเป็นจำนวนมากต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ดังภาพที่ 2.1 (a)

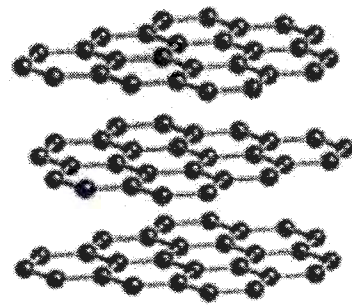
2. แบบมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ หรือเป็นแผ่นสองมิติ โดยที่อะตอมของคาร์บอนจะจัดตัวเป็นรูปหกเหลี่ยมเรียงต่อกันในระนาบเดียวกัน ซึ่งอะตอมของคาร์บอนแต่ละตัวจะล้อมรอบด้วยคาร์บอน 3 อะตอม ทำมุม 120 องศาซึ่งกันและกัน อะตอมของคาร์บอนจะสร้างพันธะซิกมาซึ่งกันและกัน จากการซ้อนเหลื่อมของ sp^2 ไฮบริดออร์บิทัล แต่ละอะตอมของคาร์บอนซึ่งยังคงมี P-ออร์บิทัล ที่ไม่เกิดไฮบริดเซชัน และอยู่ในทิศทางที่จะทำให้เกิดการซ้อนเหลื่อมของ $P\pi - P\pi$ ได้ ตัวอย่างเช่น แกรไฟท์ ดังภาพที่ 2.1 (b)

3. แบบมีโครงสร้างเป็นก้อนขนาดเล็ก จนอาจถือว่าเป็นจุดที่ไม่มีมิติ หรือศูนย์มิติ เรียกว่า ฟูลเลอร์ีนส์ (fullerenes) ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบเป็นพวกคาร์บอนหกสิบ (C_{60}) โดยแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้งหมด 60 อะตอมมาจับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์แล้วได้รูปทรงเป็นแบบก้อนทรงกลมกลวงคล้ายๆ ลูกตะกร้อหรือลูกบอลขนาดจิ๋ว ดังภาพที่ 2.1 (c)

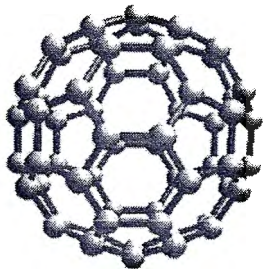
4. แบบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นม้วนตัวเป็นท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมาก ทำให้มันดูเหมือนเป็นเส้นยาวๆ ในแนวหนึ่งมิติ เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอน ดังภาพที่ 2.1 (d)



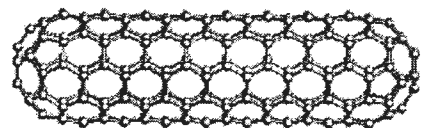
(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของคาร์บอน (a) เพชร (b) แกร์ไฟท์ (c) ฟูลเลอร์ีน (d) ท่อนาโนคาร์บอน

2.2 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

นับตั้งแต่ S. Iijima³ ได้ค้นพบท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นโดยบังเอิญในปี 1991 ในขณะที่เขาใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง ตรวจสอบเขม่าสีดำที่เกิดจากการเตรียมฟูลเลอรีน (fullerenes) ที่ได้จากการ arc discharge ด้วยขั้วคาร์บอน แล้วพบว่าวัสดุที่มีลักษณะเป็นท่อยาวบาง จับกันเป็นกลุ่มอย่างเป็นระเบียบ ขนาดของท่อสม่ำเสมอ เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลางของโครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อประมาณ 1-15 นาโนเมตร และมีความยาวถึงประมาณ 10 ไมโครเมตรซึ่งมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่าและท่อนี้ถูกเรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนในเวลาต่อมา มีรายงานค่าความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าสูงถึง 1.2 เทอราปาสคาล¹⁸ (TPa) มีค่าความแข็งแรงวัดค่าได้ 30 จิกกะปาสคาล (GPa)¹⁹ ท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm²) ขณะที่ทองแดงนำไฟฟ้าได้สูงสุดเพียง 10^6 A/cm² ซึ่งถือว่าท่อนาโนคาร์บอนนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง คุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนที่ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอนมีพื้นที่ผิวได้ถึง 1500 ตารางเมตรต่อกรัม (m²/g) โดยมีความหนาแน่น 1.33-1.40 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm³) เมื่อเทียบกับอลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นสูงถึง 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm³) ถือว่า ท่อนาโนคาร์บอนมีความหนาแน่นน้อยมาก คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจคือ สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของท่อนาโนคาร์บอนในสภาวะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ค่าศักย์ต่ำ เช่นจะกระตุ้น phosphors ที่วางไว้ห่าง 1 mm ใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ในขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50 - 100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว molybdenum นอกจากนี้ยังมีความสามารถนำความร้อนได้ดีมากตามแนวยาวของท่อ ทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2800 องศาเซลเซียส ภายใต้สุญญากาศ และ 750 องศาเซลเซียส²⁰ ในสภาวะปกติ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงกายภาพ และมีการค้นพบสมบัติเพิ่มขึ้นอีกหลายประการ ในปัจจุบันการวิจัยเกี่ยวกับการทำนายทฤษฎีการเกิด โครงสร้างและคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนได้เกิดขึ้นเป็นอย่างมาก

2.3 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

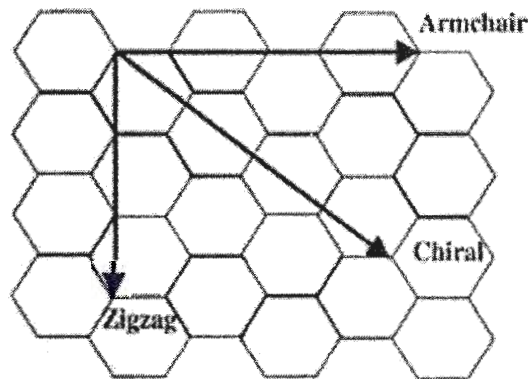
โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนเป็นสิ่งที่กำหนดคุณสมบัติทั้งทางกลและทางอิเล็กทรอนิกส์ของท่อนาโนคาร์บอน โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบบต่างๆจะสามารถถูกควบคุมได้ด้วยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและทิศทางการเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยม ที่ทำมุมเทียบกับแกนของท่อ (chiral angle) ซึ่งเกิดจากการม้วนตัวของแผ่นแกร์ไฟท์จะทำให้เกิดลวดลายตามผนัง

ของท่อนาโนคาร์บอน การม้วนตัวของแผ่นแกรไฟท์ ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.2 ทิศทางการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟท์ มีรูปแบบของโครงสร้างที่เป็นไปได้ 3 แบบ²¹ คือ

1. โครงสร้างแบบ armchair เป็นโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟท์ตามแนวแกนสมมาตรแกนตั้ง ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จะมีคุณสมบัติเป็นโลหะ แสดงด้วยภาพที่ 2.2 (b)

2. โครงสร้างแบบ zigzag เป็นโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟท์ตามแนวแกนสมมาตรแกนนอนท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จะมีคุณสมบัติเป็น สารกึ่งตัวนำ (semi conductor) ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.2 (c)

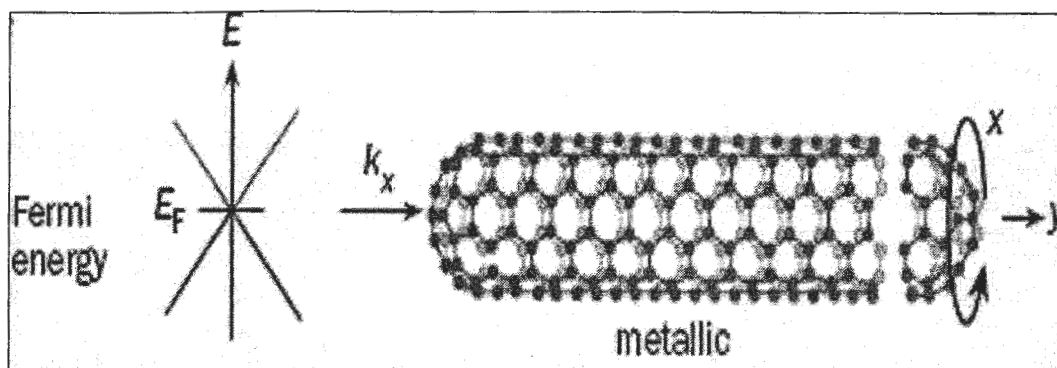
3. โครงสร้างแบบ chiral เป็นโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟท์ด้วยมุมบิดอื่นๆ ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จะมีคุณสมบัติเป็น สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.2 (c)



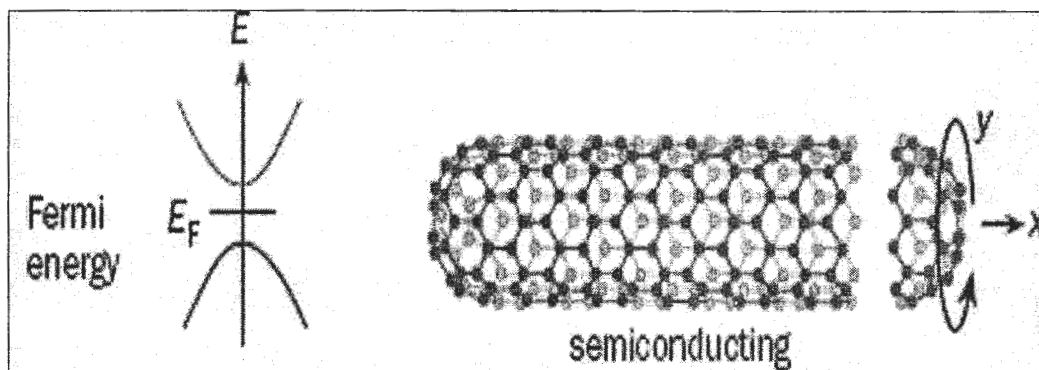
(a)

ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของแผ่นแกรไฟท์ และการหมุนเป็นท่อนาโนคาร์บอน²¹

- (a) แสดงโครงสร้างของแผ่นแกรไฟท์ในทิศทาง 2 มิติ กับการหมุนในทิศทางทำมุมต่างๆ
- (b) แผ่นแกรไฟท์หมุนรอบแกน y ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติเป็น metallic
- (c) แผ่นแกรไฟท์หมุนรอบแกน x ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติเป็น semiconducting



(b)



(c)

ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของแผ่นแกรไฟท์ และการหมุนเป็นท่อนาโนคาร์บอน (ต่อ)

2.4 การจำแนกชนิดของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว เกิดจากการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟท์เพียงแผ่นเดียว ด้วยมุมบิดที่แตกต่างกันเป็นรูปทรงกระบอก โครงสร้างของท่อเป็นไปได้ ทั้งแบบ armchair แบบ zigzag และแบบ chiral²² โดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อประมาณ 1-3 nm²³

2. ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น เกิดจากแผ่นแกรไฟท์หลายแผ่นม้วนเป็นท่อ ซึ่งผนังท่อที่มีลักษณะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกัน Park และคณะ²⁴ ได้ทำการทดลองสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธี thermal chemical vapor deposition โดยมี Fe เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ขนาดท่อนาโนคาร์บอนมีเส้นผ่าน

ศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 30-40 nm ทั้งนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขึ้นอยู่กับจำนวนของแผ่นเกร์ไฟฟ้าที่วางซ้อนกัน

2.5 ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อใช้ประโยชน์

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเป็นอย่างมาก การพัฒนาด้านเทคโนโลยีจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและกำลังได้รับความสนใจของบรรดาเหล่านักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั้งหลาย จุดเริ่มต้นของการก้าวเข้าสู่การพัฒนาด้านเทคโนโลยีคือการลดขนาดชิ้นส่วนให้มีขนาดเล็กลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ในระดับนาโน ตลอดจนการประกอบอุปกรณ์ต่างๆ ขึ้นจากการจัดเรียงของอะตอมหรือโมเลกุลเข้าด้วยกันด้วยความแม่นยำและความถูกต้องในระดับขนาดนาโนเพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง ด้วยสมบัติอันโดดเด่นหลายประการของท่อนาโนคาร์บอน เช่นคุณสมบัติที่เป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นได้ดีเป็นต้น ท่อนาโนคาร์บอนจึงได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัย ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการศึกษาวิจัยและประยุกต์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ อย่างต่อเนื่องทั้งทางด้านการแพทย์ วิทยาศาสตร์ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.5.1 อุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอน (Field emitting devices)

เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีสัดส่วนความยาวต่อรัศมีความโค้ง (aspect ratio, h/r) มีค่ามากซึ่งอยู่ในระดับขนาด 1000 ซึ่งหากทำให้ท่อนาโนคาร์บอนไปใช้ทำเป็นแหล่งปลดปล่อยอิเล็กตรอนจะสามารถเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าได้เป็น 1000 เท่า เป็นไปตามกฎของ Fowler และ Nordheim (1928)²⁵ ซึ่งกล่าวว่า ความหนาแน่นกระแส (j) ขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าของผิวที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอน (E) และเวิร์กฟังก์ชันของตัวปลดปล่อย (emitter work function, ϕ) ดังนี้

$$j = \frac{e^3}{4(2\pi)^2 \hbar \phi} E^2 \exp \left(-\frac{4\sqrt{2m_e}}{3\hbar e E} \cdot \phi^{1.5} \right) \quad (2.1)$$

- เมื่อ j = ความหนาแน่นกระแส
 E = ความเข้มของสนามไฟฟ้า
 ϕ = เวิร์กฟังก์ชันของตัวปลดปล่อย
 $\hbar$ = ค่าคงที่ของพลังค์ (plank constant)

สำหรับโลหะผิวราบโดยทั่วไป ($\phi = 5 \text{ eV}$) การที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวถือเป็นงานที่ท้าทายมาก ต้องใช้สนามไฟฟ้าประมาณ $3 \times 10^9 \text{ V/m}$ แต่กระแสนี้อิเล็กตรอนปลดปล่อยสามารถทำให้เกิดโดยคุณสมบัติการเพิ่มค่าสนาม (field-enhancing properties) ของโครงสร้างสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับรูปร่างของผิว และสามารถทำให้เพิ่มค่าโดยทำให้โลหะตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอนมีปลายเล็กแหลมที่สุด รัศมีโค้งที่ปลายน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังภาพที่ 2.3 โดยทั่วไปสนามไฟฟ้าที่ปลายของตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอน (E) เป็นไปตามสมการที่ 2.2

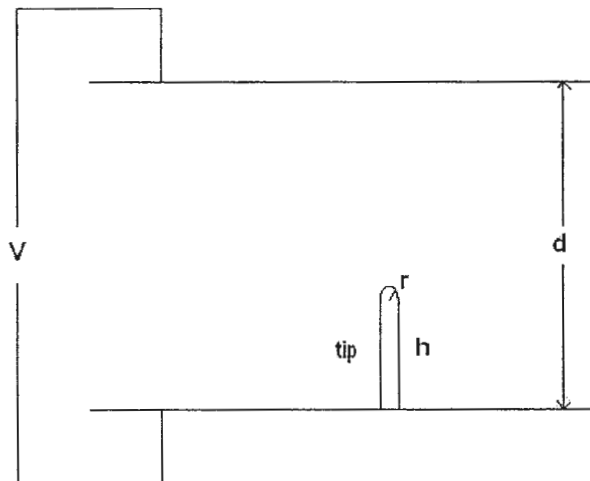
$$E_{tip} = \frac{h}{r} \cdot \frac{v}{d} = \beta \frac{v}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อ $\beta = \text{field-enhancement factor} = \frac{h}{r}$

h = ความสูงของตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอน

r = รัศมีความโค้งที่ปลายของตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอน

v = ศักย์แรงดัน (applied voltage)



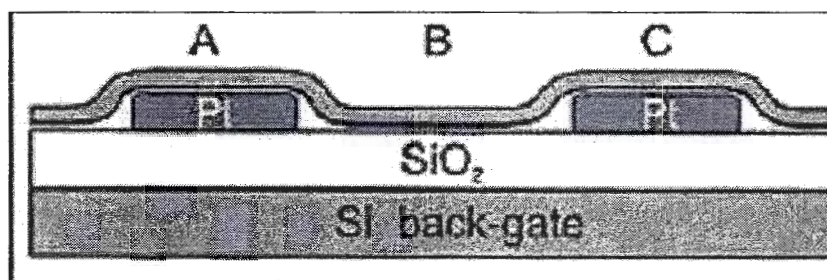
ภาพที่ 2.3 แสดง Tip วางในสนามไฟฟ้า field-enhancement factor ขึ้นอยู่กับ aspect ratio (h/r)

ซึ่งตามแบบดั้งเดิมในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แหล่งปลดปล่อยอิเล็กตรอนทำด้วยปลายโลหะทั้งสแตนที่มีคมมาก ในระดับไมครอน (10^{-6}) ดังนั้นการที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิว

ของโลหะไปสู่สุญญากาศจะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงจึงจะได้สนามไฟฟ้าสูง เนื่องจากความเข้มของสนามไฟฟ้าอยู่ใน factor ของ h/r เมื่อ h เป็นความสูงของ Tip และ r เป็นรัศมีความโค้งงอของตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอน หรือ Tip ดังนั้นถ้าแทนโลหะด้วยตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอน ด้วยท่อนาโนคาร์บอนที่มีรัศมีความโค้งงอในระดับนาโน (10^{-9}) จะทำให้ได้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงมากในขณะที่ไม่จำเป็นต้องใส่ศักย์แรงดันไฟฟ้ามากนักและนอกจากนี้ ท่อนาโนคาร์บอนยังเป็นวัสดุที่มีเสถียรภาพทางเคมี ไม่ถูกกัดกร่อนได้ง่าย ทำให้อายุการใช้งานยาวนาน

2.5.2 ทรานซิสเตอร์ (Transistors)

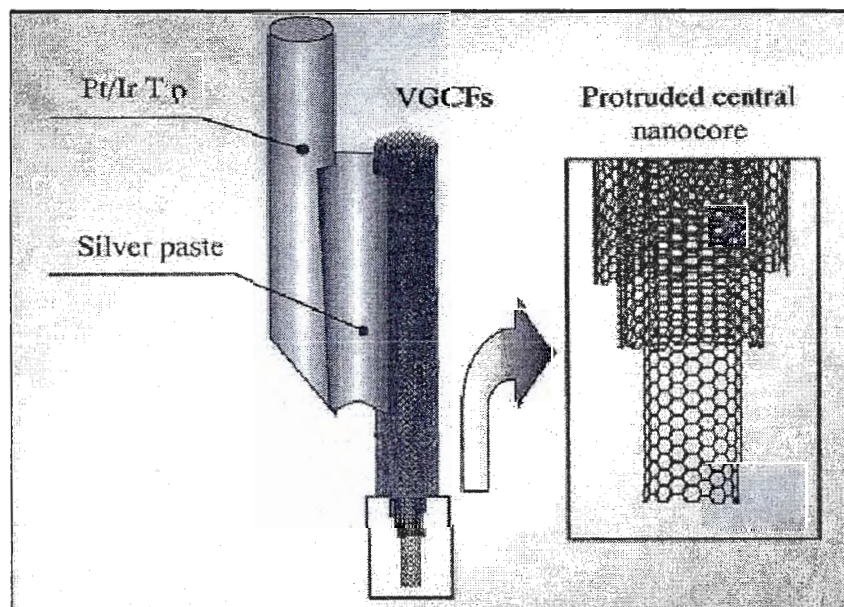
เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำ²⁶ ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว จึงถูกนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดสำหรับอุปกรณ์ field effect transistor (FET) โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ที่สร้างจากท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.4 โดยนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้เป็นช่อง (channel) อิเล็กตรอนผ่านระหว่าง source-drain อิเล็กโทรดสำหรับ FET โดยสามารถเปิด / ปิดสวิทช์ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าผ่านตัวควบคุมด้วย voltage gate แต่สิ่งที่ต่างจากซิลิกอน FETs ทั่วไปคือ ขนาดที่เล็กในระดับนาโนและการนำไฟฟ้าผ่านท่อนาโนคาร์บอนที่สูงถึง 1 ล้านเท่า ด้วยกำลังไฟฟ้าที่น้อยกว่าและให้ clock speed ในระดับสูงกว่าถึง 1 THz นอกจากนี้ยังรวมถึงการสร้างลอจิกเกตด้วย CNTs-FETs โดยการได้ไปด้วยสารเพื่อที่จะเติมสารหรือเอาอิเล็กตรอนออกทำให้ได้ n -type หรือ p -type ขึ้น²⁷



ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ที่สร้างจากท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งประกอบด้วย Si back-gate โดยมี SiO_2 semi-conducting ปลูกลายไว้และมีแพททินัมปลูกลายบน SiO_2 เพื่อใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดแล้ววางทับด้วยท่อนาโนคาร์บอนโดยให้สัมผัสกับขั้วทั้งสอง

2.5.3 หัววัดนาโนและเซนเซอร์ (Nanoprobes and sensors)

เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีความยืดหยุ่นสูงจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นหัววัด (probe) ของเครื่องมือวิเคราะห์ (functional devices) เช่น STM และ AFM ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.5 ข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับหัววัดที่เป็นโลหะหรือซิลิกอน คือมีอายุการใช้งานยาวนาน สามารถวัดได้ละเอียดเนื่องจากหัววัดมีขนาดเล็ก มีความยืดหยุ่นสูง ผิวของตัวอย่างจึงไม่ถูกทำลาย นอกจากนี้ หัววัดที่ทำจากท่อนาโนคาร์บอนยังสามารถวิเคราะห์โครงสร้างสารในระดับอะตอม และยังสามารถดัดแปลงโดยการนำ functional groups เช่น $-COOH$ มายึดติดที่ปลายซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในทางเคมีและชีววิทยา นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้อื่นๆ อีก เช่น นำมาประดิษฐ์เป็นคีมนาโน (nano tweezers) เพื่อเคลื่อนย้ายสิ่งของที่มีขนาดเล็ก ในทางการแพทย์ แนวคิดสำคัญที่จะใช้ประโยชน์จากท่อนาโนคาร์บอน คือการที่ท่อนาโนสามารถเข้าถึงโครงสร้างในระดับเซลล์ได้ นั่นคือสามารถใช้เป็น Probe ตรวจวัด หรือใช้เป็นปิเปตขนาดเล็กมากสำหรับปลดปล่อยสารหรือโมเลกุล (ultrasmall pipette) เข้าสู่เซลล์เป้าหมายได้



ภาพที่ 2.5 แสดงปลายเข็มของ AFM ที่ทำจากท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น²⁸

2.5.4 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่น (Composite materials)²⁸

เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงสูง มีน้ำหนักเบา และยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ท่อนาโนคาร์บอนจึงถูกเลือกไปเป็นส่วนผสมกับวัสดุอื่น เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพทั้งความแข็งแรง การทนอุณหภูมิ และการนำไฟฟ้า เมื่อไม่นานมานี้ นักวิทยาศาสตร์ของ NASA สามารถสังเคราะห์คอมโพสิตของ SWCNTs-polyimide ที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพทั้งความแข็งแรง การทนอุณหภูมิ และการนำไฟฟ้า ซึ่งทั้งหมดนี้มีความสำคัญมากสำหรับวัสดุประกอบเครื่องบินและยานอวกาศ กล่าวคือ ท่อนาโนคาร์บอนสามารถช่วยเสริมความแข็งแรง (reinforce) ของวัสดุเดิมให้มากยิ่งขึ้น น้ำหนักเบา และสามารถสร้างได้หลายรูปแบบได้แก่ ฟิล์มบาง ไฟเบอร์ โฟม สารเคลือบ และ ผง เป็นต้น

2.5.5 การเก็บกักพลังงาน (Energy storage)²⁹

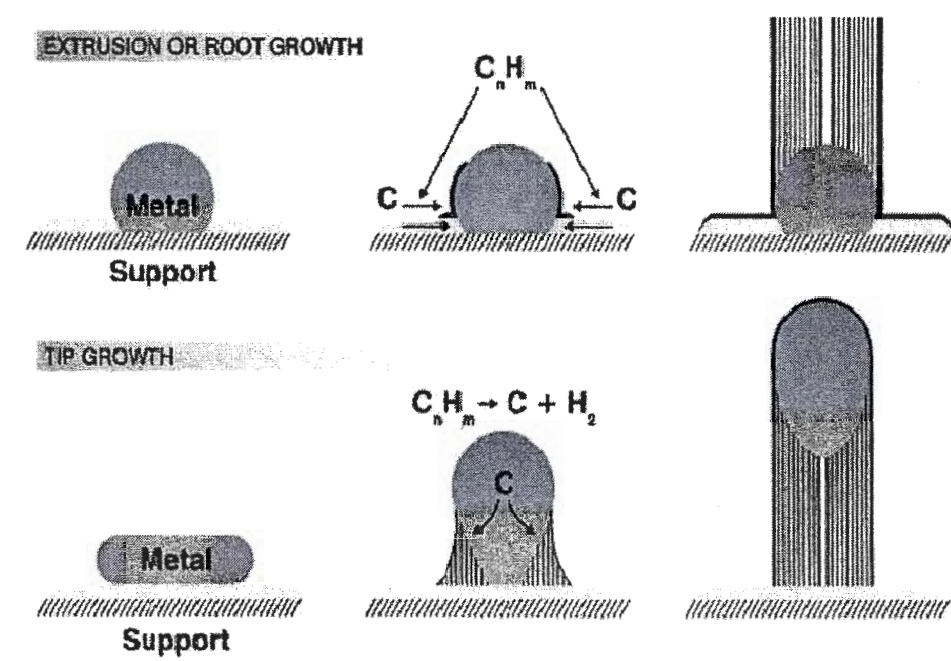
เนื่องจากลักษณะ โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนเป็นท่อกลวง เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็กในระดับนาโนและมีพื้นผิวเรียบ ลักษณะพิเศษนี้เป็นสิ่งที่สร้างความสนใจให้กับนักวิจัยทั่วโลกที่จะศึกษาวิจัยเพื่อหาวิธีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาเก็บกักไฮโดรเจนเนื่องจากไฮโดรเจนเป็นพลังงานสะอาด มีประสิทธิภาพสูง ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมีอยู่ทั่วไปในบรรยากาศ นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังสามารถนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง fuel cell ชนิด มีเทน เอทานอล หรือใช้เป็นขั้วในแบตเตอรี่ โดยการแทนที่แพลตินัมด้วยท่อนาโนคาร์บอน พบว่าในสถานะเดียวกัน เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอน เป็นส่วนผสมของขั้วอิเล็กโทรดจะให้กระแสสูงถึง 10 เท่าแบบเดิม (platinum-impregnated carbon black)

2.6 กลไกการเกิด (Growth mechanism)

กลไกการเกิดของท่อนาโนคาร์บอน เป็นสิ่งที่ยังไม่ถูกรู้อย่างแน่ชัดว่าท่อนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นได้อย่างไร และยังเป็นหัวข้อการโต้เถียงของบรรดานักวิจัยทั้งหลาย ทฤษฎีการเกิดท่อนาโนคาร์บอนมีหลายทฤษฎี Yasuda และคณะ²³ กล่าวว่า กลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอนมีสองขบวนการ ขบวนการแรกของกลไกการเกิดคือการก่อตัวของท่อนาโน บนผิวของอนุภาคโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ลำดับที่สองคือการก่อผนังจากแผ่นแกรไฟท์ เป็นท่อนาโนคาร์บอน ดัง ภาพที่ 2.6 แสดงสมมติฐานความเป็นไปได้ของกลไกการก่อตัวของท่อนาโนคาร์บอน

โดยทั่วไปท่อนาโนคาร์บอนก่อตัวอยู่บนฐานรองที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เป็นทรงกลมหรือรูปเหมือนผลแพร์ (pear-shaped) จากนั้นอะตอมที่ร้อนของคาร์บอนจะแพร่กระจายและถูกดึงดูดมาติดที่บริเวณผิวด้านข้างของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยไม่ถูกปิดที่ผิวด้านบนของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีอะตอม

ของคาร์บอนตัวต่อไปมาสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนและ ดันขึ้นเป็นท่อนาโนคาร์บอนกลไก การเกิดท่อนาโนคาร์บอนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น พื้นฐานรองการเกิด ชนิดและขนาดของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สภาพความดันบรรยากาศของแก๊สเชื้อเพลิงในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา แหล่งกำเนิดของคาร์บอน และอุณหภูมิการเกิดเป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่ากลไกการเกิดขึ้นขึ้นอยู่กับเทคนิควิธีการสังเคราะห์ จากการศึกษารายงานการวิจัยพบว่าเทคนิคการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีกลไกการเกิดแตกต่างกัน และให้คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนต่างกันดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



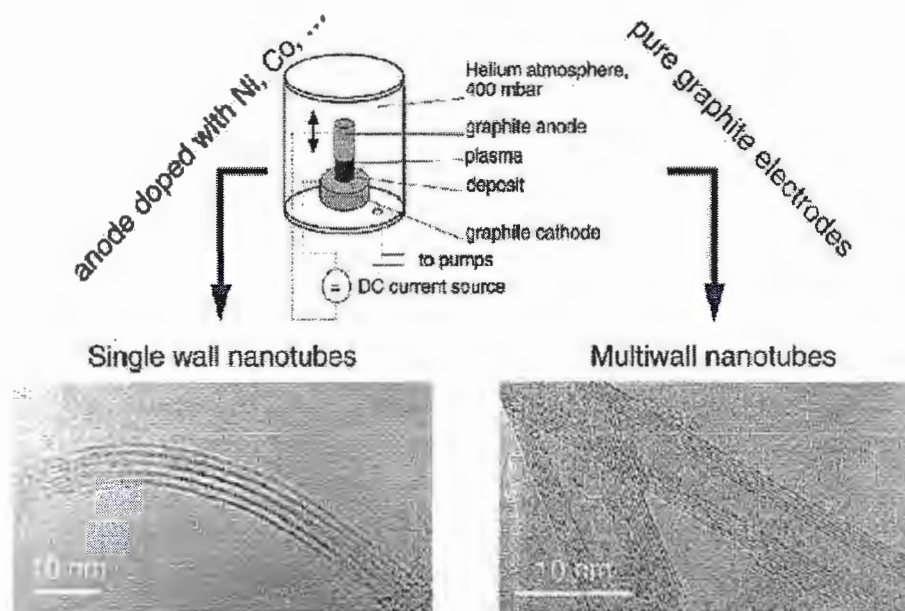
ภาพที่ 2.6 รูปแบบการก่อตัวของท่อนาโนคาร์บอน²³

2.7 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

โดยทั่วไปท่อนาโนคาร์บอนถูกสังเคราะห์จาก 3 วิธีหลัก คือ วิธีอาร์คดิสชาร์จ วิธีเทคนิคการยิงด้วยเลเซอร์ และวิธีไอระเหยทางเคมี การสังเคราะห์แต่ละวิธีให้ผลผลิตมากน้อยแตกต่างกันไป บางวิธีมีค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์สูง ซึ่งวิธีการสังเคราะห์แต่ละวิธีมีขั้นตอน และเทคนิควิธีแตกต่างกัน ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.7.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc discharge)

เทคนิคนี้เป็นวิธีเริ่มแรกที่ใช้สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งแต่เดิมนั้นใช้ในการสังเคราะห์ C_{60} ฟูลเลอร์รีน โดยใช้การป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 50 ถึง 100 แอมแปร์ และศักย์ไฟฟ้าประมาณ 20 โวลต์ ที่ระหว่างขั้วคาร์บอนที่วางห่างกันประมาณ 1-3 มิลลิเมตรภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย³⁰ เช่น ก๊าซฮีเลียม หรืออาร์กอน ที่สภาวะความดันบรรยากาศต่ำ และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ 2000-3000 องศาเซลเซียส ทำให้คาร์บอนเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมาร้อน จากนั้นคาร์บอนที่แตกตัวจะเกิดการควบแน่นและก่อตัวใหม่เป็นท่อนาโนที่ขั้วแคโทด วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายถูก แต่ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมากเช่น อนุภาคของคาร์บอน และขี้เถ้า ไคอะแกรม แสดงการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบอาร์คดิสชาร์จ ดังภาพที่ 2.7



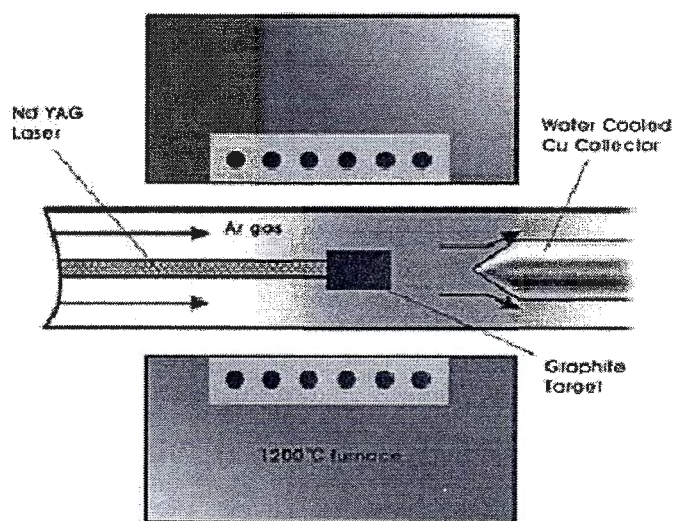
ภาพที่ 2.7 ไคอะแกรมแสดงการสังเคราะห์แบบอาร์คดิสชาร์จ³¹

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีนี้ ผลผลิตที่สังเคราะห์ได้มีทั้งท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นและผนังชั้นเดียว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคนิคการสังเคราะห์ การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อให้ได้ท่อแบบผนังชั้นเดียวนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเกิด โดยได้ปโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชื่อว่าโนด โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ เช่น เหล็ก โคบอล นิกเกิล อิทเทรียม หรือ โมลิบดีนัม³² คุณภาพและความหนาแน่นของท่อนาโนคาร์บอนขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น ความเข้มข้นของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันของแก๊สเฉื่อย ชนิดของแก๊ส และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหล โดยปกติเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่สังเคราะห์ได้อยู่ระหว่าง 1.2-1.4 นาโนเมตร ถ้าใช้อิเล็กโทรดทั้งคู่ เป็นแกรไฟท์ที่ปราศจากโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ผลผลิตหลักที่สังเคราะห์ได้จะเป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น วิธีการสังเคราะห์แบบอาร์คดิสชาร์จเป็นวิธีที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก แต่ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก เช่น อนุสัณฐานของคาร์บอน ชีลล์ และแผ่นแกรไฟท์ ซึ่งผลผลิตที่สังเคราะห์ได้จะไม่บริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามนักวิทยาศาสตร์ พยายามพัฒนาวิธีการสังเคราะห์เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีความบริสุทธิ์ โดยทั่วไปท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้ มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 1.3 nm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 10 nm

2.7.2 เทคนิคการยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation)

เทคนิคนี้คิดค้นขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของ สมอลลี (Smalley)³³ โดยใช้เลเซอร์แบบพัลส์^{34,35} แบบต่อเนื่อง^{36,37} ที่มีพลังงานสูงยิงกระทบแท่งคาร์บอนผสมโลหะในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 1200 องศาเซลเซียส ภายในเตาเติมแก๊สฮีเลียม หรือไฮโดรเจนและรักษาสภาพความดันให้อยู่ที่ 500 torr ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนและอะตอมคาร์บอนที่ร้อนขึ้น ไอร้อนจะถูกปั๊มออกโมเลกุลของคาร์บอนจะควบแน่นเกาะกันเป็นกลุ่มเล็กๆ อย่างรวดเร็วและทำให้เย็นลงที่ตัวกักเก็บที่ทำจากทองแดงด้านนอกเตาเผา โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นตัวดึงดูดอะตอมของคาร์บอนให้มารวมกันและป้องกันไม่ให้ท่อปิดครอบ ชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นจะเป็นแบบผนังหลายชั้น หรือผนังชั้นเดียวขึ้นอยู่กับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา กล่าวคือ ถ้าใช้อิเล็กโทรดที่เป็นแกรไฟท์บริสุทธิ์ผลผลิตที่ได้จากการสังเคราะห์เป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น แต่ถ้าใช้อิเล็กโทรดเป็นแกรไฟท์ผสมโลหะ Co, Ni, Fe หรือ Y ผลผลิตที่ได้แบบผนังชั้นเดียว อัตราส่วนผสมของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Y ในอัตราส่วน 4.2 / 1 จะให้ผลผลิตดี Yudasaka และคณะ³⁴ ทำการทดลองใช้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Co ร่วมกับ pulsed laser ที่อุณหภูมิ 1470 องศาเซลเซียส ผลผลิตที่เป็น แบบผนังชั้นเดียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3-1.4 nm ในการทดลองใช้เลเซอร์แบบต่อเนื่อง ที่ อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส โดยมี Ni / Y เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ในอัตราส่วน

Ni / Y เป็น 2 : 0.5% ผลผลิตที่ได้จะเป็น แบบผนังชั้นเดียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.4 nm^{37} ผลผลิตที่ได้คิดเป็นประมาณ 20-30 % การสังเคราะห์ วิธีนี้ให้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีคุณภาพดีมีความบริสุทธิ์สูงกว่าวิธีอาร์คดิซาร์จ แต่มีค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ค่อนข้างสูง ไดอะแกรมแสดงการสังเคราะห์ แบบการยิงด้วยเลเซอร์ ดังภาพที่ 2.8



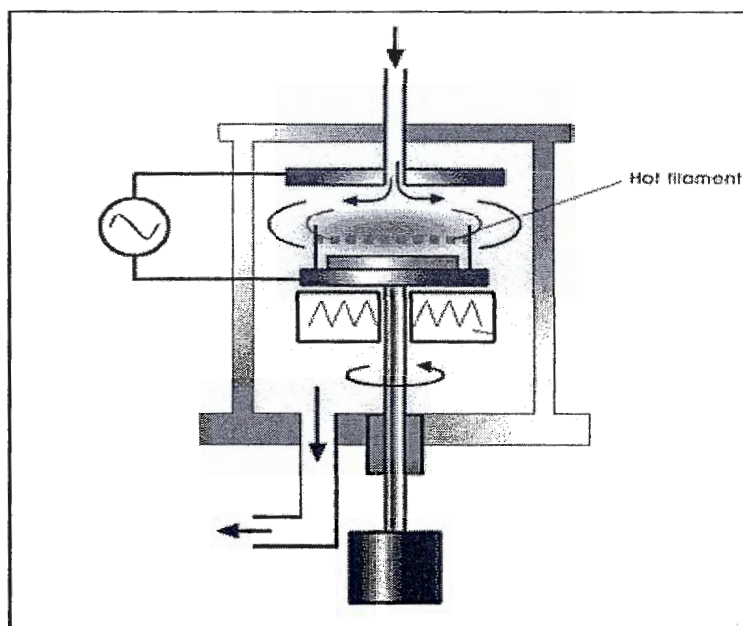
ภาพที่ 2.8 ไดอะแกรมแสดงการสังเคราะห์ แบบการยิงด้วยเลเซอร์³⁷

2.7.3 วิธีไอระเหยทางเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD)

วิธีไอระเหยทางเคมีเป็นการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยการแยกอะตอมของคาร์บอนออกจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น แก๊ส มีเทน อะเซทิลีนแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรคาร์บอน โดยใช้ความร้อนหรือพลาสมา จากนั้นอะตอมของคาร์บอนระเหยไปตกกระทบบนแผ่นฐานรอง (substrate) ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาปกคลุม โดยปกติโลหะที่เหมาะสมสำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Ni, Fe หรือ Co³⁸ และเป็นวิธีที่สามารถควบคุมความยาวและตำแหน่งของการเกิดได้ ถ้าโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเหมาะสมมักจะเกิดท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวมากกว่าแบบผนังหลายชั้น³⁹ วิธีไอระเหยทางเคมี มีขั้นตอนการสังเคราะห์ที่สำคัญ 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา และขั้นตอนที่สองเป็นการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไปถูกส่งผ่านไปตามท่อเคลือบที่ผิวของแผ่นฐานรองเกิดเป็นฟิล์มบางด้วยวิธีต่างๆ เช่น วิธีการระเหยสาร วิธีการสปัตเตอริง แล้วใช้ สารเคมี หรือความร้อน ทำให้ฟิล์มบางหลอมตัวรวมเป็นกลุ่ม

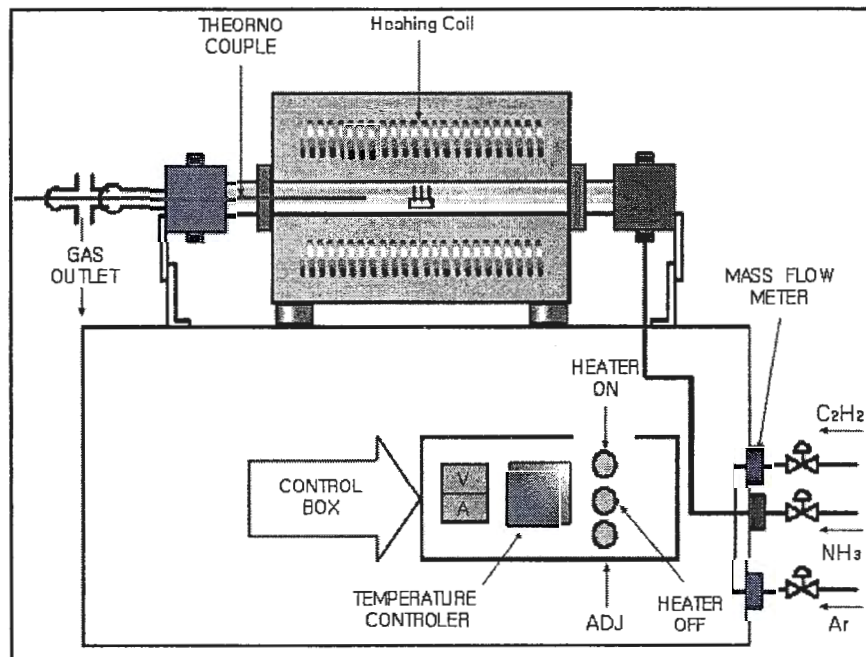
ก้อน (island) หรือเป็นกระจุก (cluster) บนฐานรอง จากนั้นนำฟิล์มบางที่มีอนุภาคในระดับนาโนไปสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ที่อุณหภูมิระหว่าง 650-900 องศาเซลเซียส^{40,41,42} ให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ประมาณ 30% เทคนิคการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี CVD ได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นวิธีแยกย่อยหลายวิธี เช่น plasma enhanced CVD, thermal CVD, alcohol catalytic CVD หลักการสังเคราะห์แต่ละวิธีมีดังนี้

Plasma enhanced CVD เป็นวิธีการสังเคราะห์โดยการทำให้เกิดการโกลว์ดิสชาร์จ (glow discharge) ในสถานะสุญญากาศ หรือในเตาปฏิกรณ์โดยการให้คลื่นความถี่สูงกับขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.9 แผ่นฐานรองจะทำหน้าที่เป็นกรวด มีอิทธิพลต่อขนาดของท่อ อัตราการเกิดความหนาของท่อ และโครงสร้างของท่อ โดยทั่วไปโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เช่น เหล็ก นิกเกิล และ โคบอล นิกเกิลที่มีบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเหมาะต่อการเกิดท่อนาโนคาร์บอนที่จัดเรียงเป็นแถว⁴³ ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำไปตกเคลือบบนแผ่นฐานรองด้วยวิธี thermal CVD หรือวิธีสปีดเตอร์ริง หลังจากโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นอนุภาคนาโนแล้วท่อนาโนคาร์บอนจะก่อตัวบนแผ่นฐานรองนั้น แก๊สที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนของปฏิกิริยาเช่น C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4 , CO จะจ่ายเข้าไปในสถานะในขณะที่เกิดการดิสชาร์จ ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 nm ผลผลิตที่ได้คิดเป็นประมาณ 50 % การสังเคราะห์ วิธีนี้ท่อนาโนคาร์บอนสามารถก่อตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 330 องศาเซลเซียส



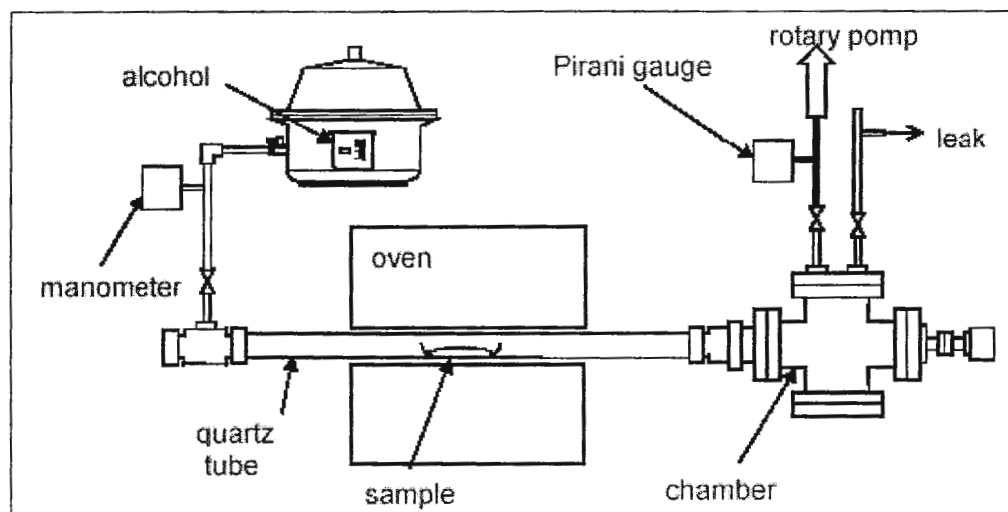
ภาพที่ 2.9 ไดอะแกรมแสดงการสังเคราะห์ แบบ plasma enhanced CVD

Thermal chemical vapor deposition (CVD) การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีนี้ใช้โลหะเช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอล หรือโลหะผสมของสามตัวนี้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาคงเคลือบที่ผิวของแผ่นฐานรอง นำแผ่นฐานรองที่มีโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาวางบน quartz boat ในท่อแก้ว ที่อยู่ในเตาไฟฟ้า อุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในกระบวนการนี้ และเติมแก๊สที่เป็นแหล่งของคาร์บอนเข้าไปในท่อแก้วในขณะที่อุณหภูมิประมาณ 750-1050 องศาเซลเซียส ท่อนาโนคาร์บอนจะก่อตัวขึ้นที่อุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยา ไดอะแกรมแสดงการสังเคราะห์วิธี Thermal chemical vapor deposition ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ไดอะแกรมแสดงวิธี thermal chemical vapor deposition²⁴

Alcohol catalytic chemical vapor deposition (ACCVD) การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ดึงดูดความสนใจที่จะนำไปสู่การศึกษาเพื่อพัฒนาในด้านความเป็นไปได้ที่จะสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวที่มีคุณภาพสูงและมีค่าใช้จ่ายต่ำ และเป็นวิธีที่ง่าย การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้อาศัยหลักการระเหยของสารประกอบพวกแอลกอฮอล์ เป็นแหล่งกำเนิดของคาร์บอนโดยมีเหล็กและโคบอลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ท่อนาโนคาร์บอนสามารถก่อตัวได้ที่อุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส ไดอะแกรมแสดงการสังเคราะห์วิธีนี้ดังแสดงด้วยภาพที่ 2.11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่สังเคราะห์ได้ประมาณ 1 nm



ภาพที่ 2.11 ไดอะแกรมแสดง Alcohol catalytic chemical vapor deposition⁴⁵ (Maluyama)

ตารางที่ 2.1 ข้อสรุป 3 วิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

Method	วิธี อาร์คดิซชาร์จ	วิธีการยิงด้วยเลเซอร์	วิธีไอระเหยทางเคมี
ผู้ศึกษา	Ebbesen and Ajayan, NEC, Japan 1992 ⁴⁶	Smalley, Rice, 1995 ⁴⁷	Endo, Shinshu University, Nagano, Japan ⁴⁸
วิธีทำ	เชื่อมต่อระหว่างแท่งแกรไฟท์ทั้ง 2 เข้ากับแหล่งจ่าย ปลายขั้วทั้งสองห่างกันเล็กน้อย ป้อนกระแสประมาณ 100 A จะเกิดไอของคาร์บอนและเป็นพลาสมาร้อน	ยิงเลเซอร์ไปกระทบที่คาร์บอน คาร์บอนเกิดการแตกตัว จากนั้นทำให้คาร์บอนเกิดการควบแน่น	วางแผ่นฐานรองในเตาให้ความร้อนสูง 600-1000 องศาเซลเซียส ให้แก๊สที่แหล่งกำเนิดคาร์บอน
ให้ผลผลิต	30-90%	70%ขึ้นไป	20-100%
SWNTs	ท่อสั้น เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6-1.4 nm	ท่อจะเป็นกลุ่มยาว เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 1-2 nm	ท่อยาวเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6-4 nm
MWNTs	ท่อสั้น เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 1-3 nm และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกประมาณ 10 nm	เป็นวิธีที่ไม่น่าสนใจ เนื่องจากมีราคาแพงแต่สามารถสังเคราะห์ได้	ท่อยาว เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-20 nm

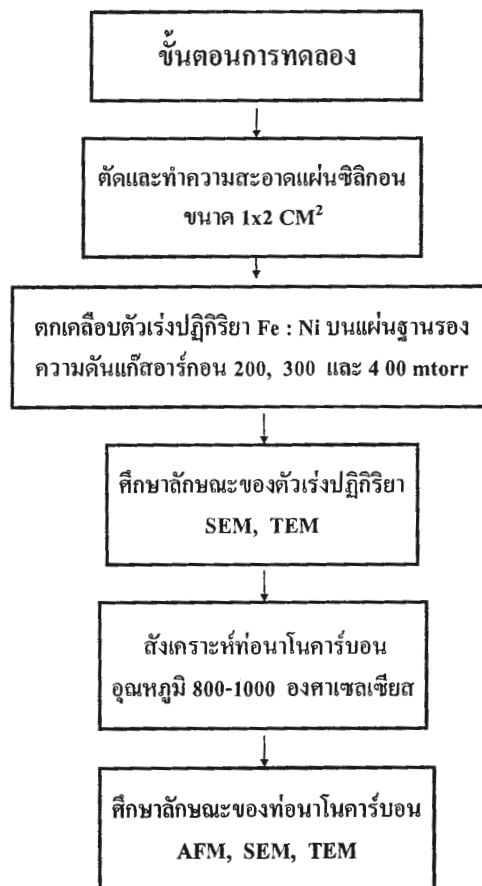
ตารางที่ 2.1 ข้อสรุป 3 วิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน (ต่อ)

Method	วิธี อาร์คดิซาร์จ	วิธีการยิงด้วยเลเซอร์	วิธีไอระเหยทางเคมี
pro	สามารถสังเคราะห์ได้ทั้ง SWNTs และ MWNTs แต่ SWNTs มีสิ่งเจือปน MWNTs สังเคราะห์ได้โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ราคาไม่แพง สังเคราะห์ในบรรยากาศได้	ผลผลิตเป็น SWNTs สามารถควบคุมขนาดได้มีสิ่งเจือปนเล็กน้อย	เป็นวิธีที่ง่ายนำไปสู่การผลิตเพื่ออุตสาหกรรม ผลผลิตเป็นเส้นตรงยาว สามารถควบคุมการเกิดได้ และมีความบริสุทธิ์
Con	ท่อที่ได้มีขนาดสั้น หักงอ มีสิ่งเจือปนสูง จำเป็นต้องทำให้บริสุทธิ์ก่อนนำไปใช้งาน	เป็นวิธีที่มีราคาสูงเพราะต้องใช้เลเซอร์และใช้พลังงานสูง	ท่อที่ได้ส่วนมากเป็น MWCNTs และมักจะพบปัญหาสิ่งเจือปน

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

ในบทนี้เราจะอธิบายขั้นตอนการทดลองทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กและนิกเกิลที่มีอนุภาคระดับนาโน บนแผ่นฐานรองซิลิกอน ศึกษาขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ AFM กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตามด้วยการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีไอระเหยเคมี จากนั้นศึกษาคุณลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในหัวข้อสุดท้ายเราจะศึกษาคุณลักษณะว่าท่อนาโนคาร์บอนเป็นแบบผนังชั้นเดียวหรือผนังหลายชั้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้



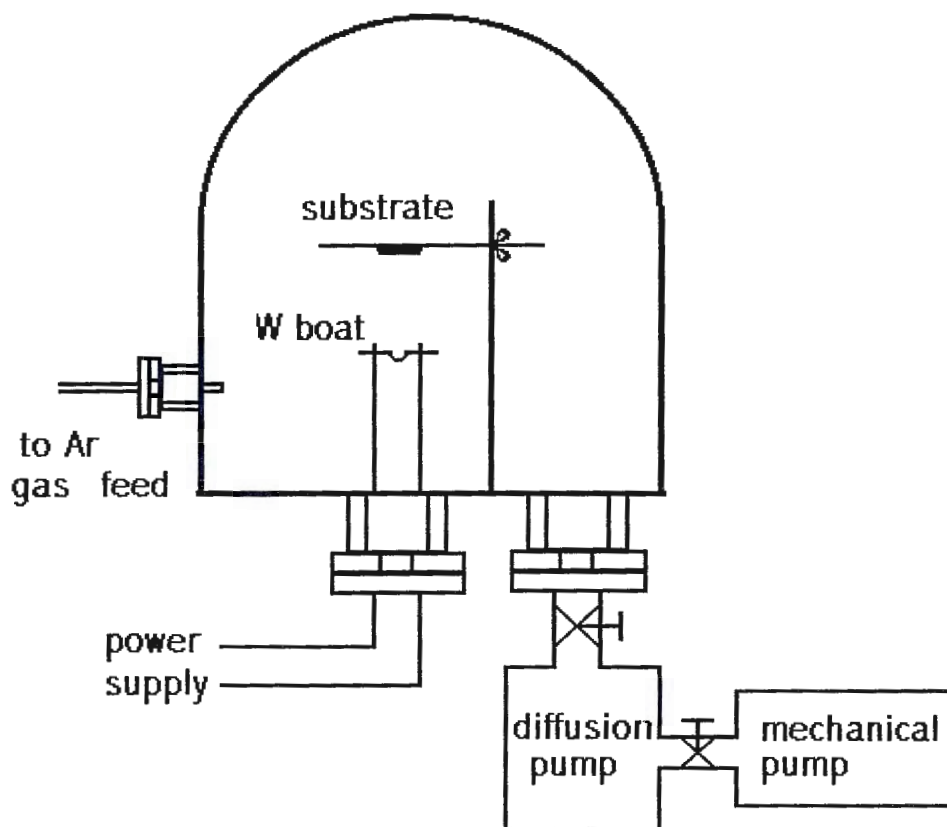
ภาพที่ 3.1 ไคอะแกรมแสดงขั้นตอนการวิจัย

3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไอระเหยความร้อน

ซิลิกอนที่ใช้ในการทดลองนี้คือซิลิกอนที่ใช้ทางการค้า (commercial grade) สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไป ผลการทดสอบพบว่าเป็นแผ่นซิลิกอน Si(001) ชนิดพี (p-type) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ อันดับแรกแผ่นซิลิกอนถูกตัดเป็นแผ่นขนาด $1 \times 2 \text{ cm}^2$ จากนั้นแผ่นซิลิกอนถูกทำความสะอาดด้วยน้ำสบู่ อะซิโตนและแอลกอฮอล์ และน้ำสะอาดปราศจากไอออน (deionized water) ตามลำดับ แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99 % จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนที่ทำความสะอาดแล้วไปวางบนที่ยึดฐานรอง (substrate holder)

ผงเหล็กและนิกเกิล (Fe:Ni powder) ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99 % ด้วยสัดส่วนเหล็กต่อ นิกเกิลเท่ากับ 50 : 50 โดยน้ำหนักได้รับจาก Johnson Mat Thew Electronics ถูกชั่งด้วยเครื่องชั่ง รายละเอียดสูงทศนิยมสี่ตำแหน่ง เพื่อให้ได้ปริมาณ 0.01 กรัม แล้วใส่ลงในเบ้าหลอมทังสเตน (tungsten boat) จัดให้เบ้าหลอมทังสเตนกับที่ยึดแผ่นฐานรองเป็นระยะห่างประมาณ 12 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.2 ภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber) ที่ใช้คือ Cooke vacuum product CV-300 vacuum chamber หลังจากนั้นเริ่มต้นเปิดระบบสุญญากาศเพื่อเริ่มการทำงาน เมื่อภาชนะสุญญากาศ มีความดันประมาณ 10^{-6} torr เติมแก๊สอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99% เข้าไปในระบบสุญญากาศ ปรับวาล์วจนสามารถรักษาความดันอาร์กอน (Ar) ประมาณ 200 mtorr จากนั้นปรับกระแสอย่างช้าๆ จนถึงประมาณ 60 แอมแปร์ เพื่อให้เบ้าหลอมทังสเตนได้รับความร้อน เป็นผลให้ผงเหล็กและนิกเกิลหลอมละลายและกลายเป็นไอ โดยใช้เวลาของการระเหยกลายเป็นไอประมาณ 10 วินาที ไอระเหยของโลหะผสมเหล็กและนิกเกิลจะตกเคลือบบนแผ่นซิลิกอน จากนั้นการนำแก๊สอาร์กอนเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ เพื่อให้ไออะตอมของเหล็กและนิกเกิลกระจายสม่ำเสมอภายในภาชนะสุญญากาศและเพื่อให้อะตอมของเหล็กและนิกเกิลชนกัน รวมกันเป็นอนุภาคที่มีระดับขนาดอนุภาคนาโน และตกเคลือบเป็นฟิล์มบางบนแผ่นฐานรองซิลิกอน ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาตามขั้นตอนเดียวกันนี้ โดยเปลี่ยนแผ่นฐานรองซิลิกอน ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ ที่ความดันอาร์กอน 300 mtorr และ 400 mtorr

หลังจากได้อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กและนิกเกิลระดับขนาดนาโนบนแผ่นซิลิกอน เรา นำแผ่นซิลิกอนไปศึกษาขนาดของอนุภาคโดยใช้ AFM กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อนำแผ่นฐานรองซิลิกอนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคระดับนาโน ไปใช้ในการปลูกท่อนาโนคาร์บอน ในลำดับต่อไป

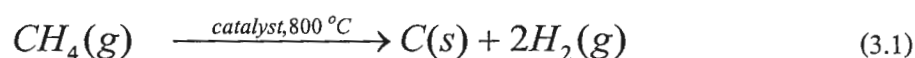


ภาพที่ 3.2 ไดอะแกรมแสดง vacuum chamber สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนแผ่นฐานรอง⁷

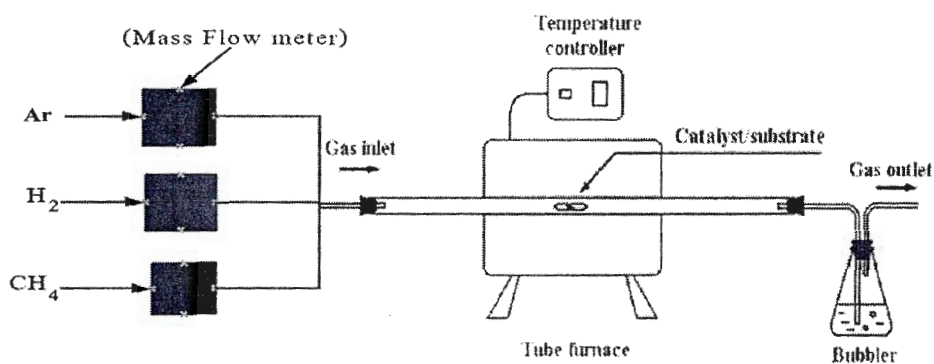
3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

แผ่นซิลิกอนที่เคลือบด้วยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการเตรียม โดยวิธีไอระเหยความร้อน ถูกใช้เป็นแผ่นฐานรองในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยนำแผ่นซิลิกอนที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความดันบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน 200, 300 และ 400 mtorr วางในเบ้าหลอมอลูมินา (alumina boat) จากนั้นนำเบ้าหลอมอลูมินาไปวางในเตาปฏิกิริยา (reactor) Lindberg Model 58125 ที่เป็นท่อควอทซ์ (quartz tube) วางในแนวระดับ โดยให้ด้านหน้าแผ่นฐานรองที่เคลือบด้วยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาหงายขึ้น ดังภาพที่ 3.3 กำหนดค่าอุณหภูมิการปลูกประมาณ 800 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่กำหนดถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ Model 818 ปลดปล่อยแก๊สอาร์กอนให้ไหลตลอดเวลาเพื่อไล่อากาศอื่นๆ ออกจากท่อควอทซ์ จากนั้นเปิดสวิตช์เตาปฏิกิริยาและให้แก๊สไฮโดรเจนไหลด้วยอัตราการไหลระหว่าง 50-100 sccm (standard cubic centimeter per minute) อัตราการไหลของแก๊สวัดด้วย mass flow controller (MASS-FLO® Controller MKS instruments, inc)

และ MKS 4-channel Readout Model 247C ในขณะเดียวกันก็ให้แก๊สอาร์กอนไหลในอัตรา 70 sccm ตลอดเวลา แก๊สไฮโดรเจนถูกใช้เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา แก๊สอาร์กอนถูกใช้เพื่อทำให้แก๊สไฮโดรเจนเจือจาง เมื่ออุณหภูมิเข้าถึงค่าที่กำหนดไว้ให้ปิดแก๊สไฮโดรเจน จากนั้นปล่อยแก๊สมีเทน (CH_4) ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99 % ด้วยอัตราการไหล 10 sccm เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการเกิดท่อนาโนคาร์บอน โดยมีแก๊สอาร์กอนไหลตลอดเวลา เป็นเวลา 30 นาที จะเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolytic reaction) ดังนี้



จากนั้นปิดวาล์วแก๊สมีเทน และปิดสวิตช์เตาปฏิกิริยาในขณะที่ปล่อยให้แก๊สอาร์กอนไหลต่อไปอีก จนอุณหภูมิลดลงเข้าใกล้อุณหภูมิห้องแล้วจึงปิดวาล์วแก๊สอาร์กอน เมื่ออุณหภูมิเตาเย็นถึงอุณหภูมิห้องจึงนำตัวอย่าง ท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่นฐานรองซิลิกอนออกมาเพื่อศึกษาสมบัติ จากนั้นทำการปลูกท่อนาโนคาร์บอนใหม่ โดยเพิ่มอุณหภูมิเป็น 900 องศาเซลเซียส และ 1000 องศาเซลเซียส

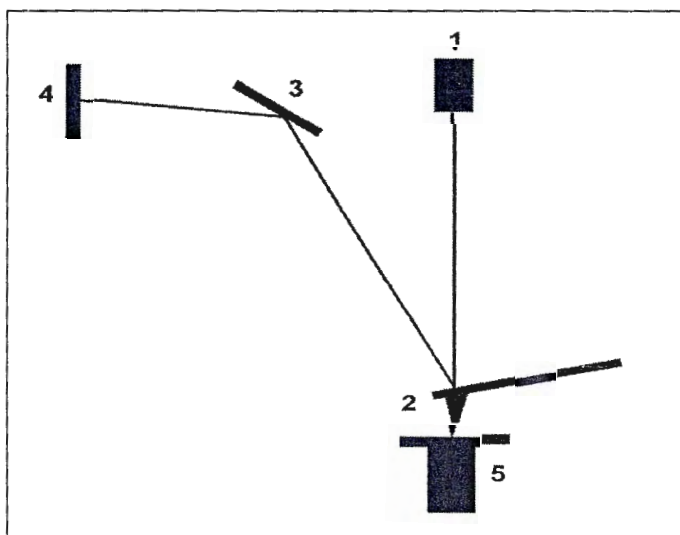


ภาพที่ 3.3 ไดอะแกรมแสดงเตาปฏิกิริยา (CVD reactor)

3.3 การศึกษาสมบัติของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์เอเอฟเอ็ม

กล้องจุลทรรศน์ AFM เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาวิเคราะห์พื้นผิวของวัตถุในระดับอะตอม เช่น ผิววัสดุตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน รวมทั้งการศึกษาเกี่ยวกับตัวอย่างเซลล์ของสิ่งมีชีวิต กล้องจุลทรรศน์ AFM ทำงานโดยอาศัยหลักการของแรงผลักระหว่างอะตอมของผิวตัวอย่างกับอะตอมที่ปลายแหลมของเข็ม เพื่อรักษานาฬิกาของแรงให้คงที่เข็มที่ติดอยู่กับแคนติเลเวอร์ (cantilever) จะเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวระดับตามความสูงต่ำของผิว แสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนแคนติเลเวอร์ จะสะท้อนขึ้นไปตกกระทบบนหัววัด (detector) ดังแสดงในภาพที่ 3.4 ตำแหน่งที่ตกกระทบบนหัววัดจะแปรค่าตามความสูงต่ำของพื้นผิว สัญญาณที่ได้ถูกนำไปประมวลผล (process) และสร้างภาพทั้งสองและสามมิติ

ในการศึกษาการกระจายและขนาดลักษณะของอนุภาคระดับนาโน เราใช้กล้องจุลทรรศน์ AFM ของ Veeco Instrument (Model Aurora-3 NSOM) และควบคุมการทำงานและประมวลสัญญาณโดย Nanoscope® IIIa ของ บริษัท Digital Instrument



ภาพที่ 3.4 ไดอะแกรมอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์เอเอฟเอ็ม (AFM)⁷ เมื่อ

หมายเลข 1 = laser beam generator

2 = AFM scanning tip

3 = reflecting mirror

4 = sensitive photo detector

5 = piezo tube scanner with sample amounted on the top.

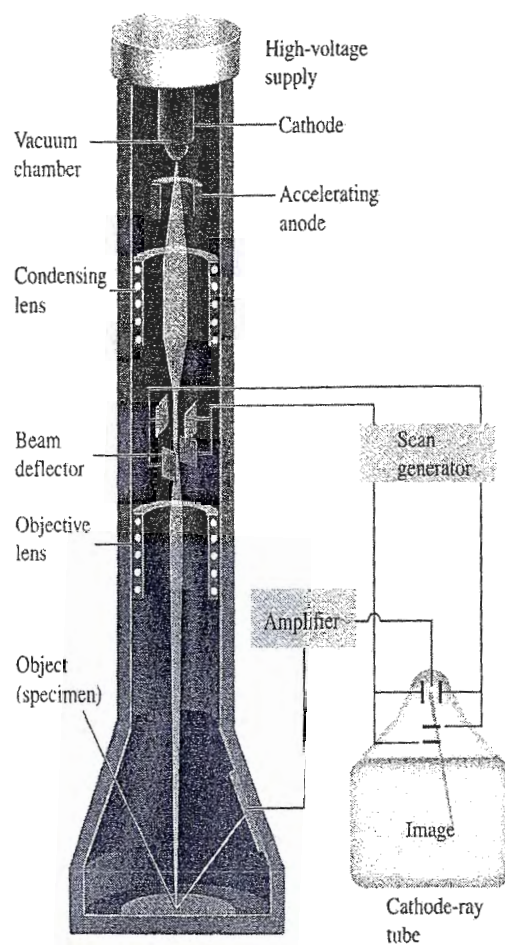
3.4 การศึกษาสมบัติของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาวิจัยทางวิทยาศาสตร์ ทางการแพทย์ ทางโลหะวิทยา และอื่นๆ โดยใช้ศึกษาลักษณะโครงสร้าง การกระจายตัวของธาตุบนพื้นผิวตัวอย่าง และวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่าง โดยคุณลักษณะภายนอกหรือรายละเอียดของพื้นผิวตัวอย่าง ศึกษาหน้าตัดของโลหะ ศึกษาลักษณะผิวของเซลล์และเนื้อเยื่อ หลักการทำงานของ SEM คือแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด (filament) และอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (high voltage) จากนั้นอิเล็กตรอนถูกโฟกัสให้เป็นลำอิเล็กตรอนที่มีความเข้มสูงโดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic condensing lens) จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวตัวอย่าง โดยการบังคับของขดลวดสำหรับการส่องกราดโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดแสกน (scanning coils) เมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบที่ผิวตัวอย่าง ผิวตัวอย่างสะท้อนอิเล็กตรอน (secondary electron) และ กระบับหัววัด (electron detector) โคอะแกรมอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงในภาพที่ 3.5 สัญญาณที่ได้ถูกนำไปประมวล (process) และสร้างภาพ

ในการทดลองนี้เราศึกษารูปแบบและโครงสร้าง ลักษณะการกระจายของอนุภาคโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาบนฐานรองซิลิกอนและท่อนาโนคาร์บอน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JEOL JSM-6400F ของบริษัท JEOL กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้ผลิตอิเล็กตรอนจาก cold cathode field emission source มีรายละเอียดของภาพ (resolution) ได้ถึง 1.5 นาโนเมตร ขยายภาพได้สูงสุด 500,000 เท่า และอิเล็กตรอนสามารถถูกเร่งได้สูงสุด ถึง 30 KeV นอกจากนี้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังมีเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive spectrometer, EDS) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่าง ได้ในระดับ 1 % โดยน้ำหนัก

พื้นผิวของตัวอย่างที่ศึกษาจะต้องเป็นตัวนำ และจะต้องสามารถถ่ายเทประจุจากตัวอย่างสู่กราวด์ (ground) ถ้าวัสดุนั้นไม่นำไฟฟ้าต้องเคลือบผิวหน้าชิ้นงาน ด้วยฟิล์มบางเพื่อให้อิเล็กตรอนมีการไหลออกจากผิวหน้าของชิ้นงานได้มากที่สุด หากมีอิเล็กตรอนสะสมอยู่มาก อิเล็กตรอนที่สะสมจะรบกวนทั้งอิเล็กตรอนที่จะตกลงมา (primary electron) และอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดภาพ (secondary electron) ทำให้ไม่สามารถโฟกัสภาพ วัสดุที่นิยมนำมาใช้เคลือบผิวได้แก่ ทอง ทองผสมแพลทินัม และคาร์บอน การเคลือบด้วยทองหรือทองผสมแพลทินัมจะให้ภาพที่คมชัดกว่าการเคลือบด้วยคาร์บอน ในการทดลองนี้ ผิวหน้าของตัวอย่างถูกเคลือบฟิล์มบางด้วยทองผสมแพลทินัม โดยวิธีดีซีสปีตเตอร์ริง (DC sputtering) ด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มบางรุ่น EMITECH K550 เพื่อให้เกิดฟิล์มบางที่

นำไฟฟ้ามีความหนาประมาณ 15 นาโนเมตร แล้วนำตัวอย่างที่เคลือบฟิล์มบางไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 3.5 ไดอะแกรมอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)⁴⁹

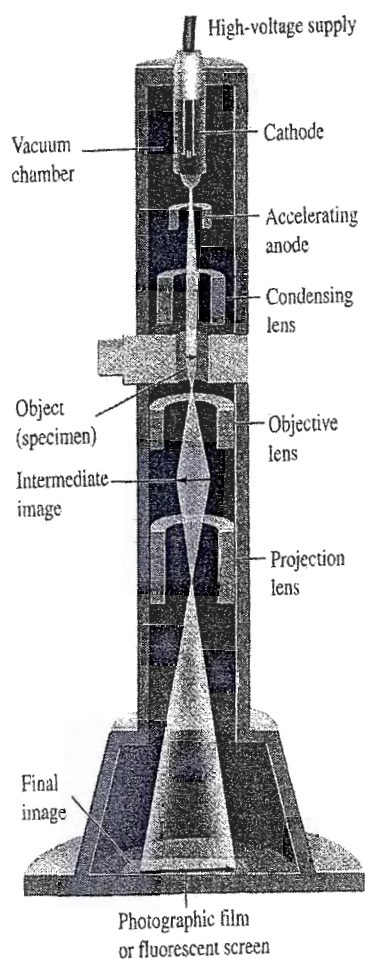
3.5 การศึกษาสมบัติของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เป็นเครื่องมือใช้ในการศึกษารายละเอียดของตัวอย่างที่ต้องการจะตรวจสอบได้ถึงระดับโมเลกุล มีความสำคัญต่อการศึกษาโครงสร้างต่างๆ ของเซลล์ลักษณะของเนื้อเยื่อหุ้มเซลล์ ลักษณะของเนื้อเยื่อต่าง ๆ ตลอดจนการศึกษาเชื้อไวรัส ถือว่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน มีประโยชน์อย่างมากที่จะใช้ในการศึกษา วิจัยและช่วยวินิจฉัยโรคในกรณีที่ไม่สามารถตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา กล้องชนิดนี้มีค่าสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพเป็นแบบจุดได้ในระดับนาโนเมตร โดยทั่วไปกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะทำงานคล้ายกับจุลทรรศน์แบบธรรมดา (optical microscope) แต่ต่างกันที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านใช้ลำอิเล็กตรอน (electron beam) แทนแสง ดังนั้นจึงให้รายละเอียดสูงเนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น

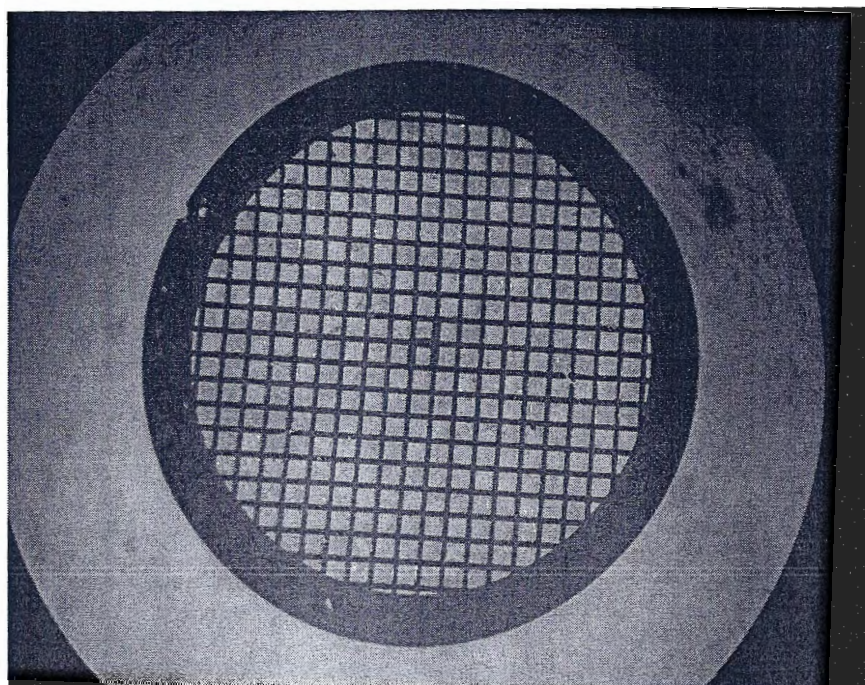
โคอะแกรมอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านดังแสดงด้วยภาพที่ 3.6 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เริ่มต้นเมื่ออิเล็กตรอนถูกผลิตจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนด้วยไส้หลอด (filament) หรือ cold cathode field emission จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงจาก 10 KeV ถึง 200 KeV จากนั้นอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่าน electromagnetic condensing lenses จะถูกโฟกัสให้เป็นลำอิเล็กตรอนที่มีความเข้มสูงไปกระทบตัวอย่างหรือวัตถุที่ต้องการศึกษาโดยทั่วไปตัวอย่างจะต้องมีความบางมาก ในระดับ 10-100 นาโนเมตร เมื่ออิเล็กตรอนผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ (electromagnetic objective lens) จะเกิดภาพระดับกลาง (intermediate image) สุดท้ายจะมี electromagnetic projector lens ขยายภาพระดับกลางไปสู่ภาพสุดท้าย และภาพสุดท้ายมีกำลังขยายสูงสุดถึง 1,000,000 เท่า

ในการทดลองนี้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านชนิดรายละเอียดสูง (high resolution transmission electron microscope, HRTEM) รุ่น JEOL 2000FX ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาลักษณะว่าเป็นท่อนาโนคาร์บอนเป็นแบบผนังชั้นเดี่ยวหรือผนังหลายชั้น แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน คือ electron field emission source สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนความเข้มสูงในระดับขนาด 10^{-6} A/cm^2 สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพเป็นแบบจุดได้สูงสุด 0.2 นาโนเมตร ด้วยกำลังขยาย 1,000,000 เท่าและสามารถขยายได้สูงถึง 10,000,000 เท่าในโหมด scanning TEM แสดงผลโดยทาง มอนิเตอร์ (monitor) ที่มีอุปกรณ์กล้องซีซีดี (charge couple device digital camera)

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวัด TEM ทำได้โดยใช้กริดทองแดง (copper grid) ดังแสดงในดั่งภาพที่ 3.7 ชุดพื้นฐานรองที่มีท่อนาโนคาร์บอน หรือใช้ใบมีดชุดท่อนาโนคาร์บอนให้ตกลงบนกริดทองแดง ตัวอย่างท่อนาโนคาร์บอนที่ตกลงบนกริด ควรมีขนาดสั้นและอยู่ในช่องสี่เหลี่ยมได้พอดี หากท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดยาวจะทำให้วางพาดเกย



ภาพที่ 3.6 โคอะแกรมอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)⁴⁹



ภาพที่ 3.7 ภาพกริดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm ถ่ายโดยกล้อง stereoscopic zoom Olympus optical microscope กำลังขยาย 100 เท่า กริดทองแดงนี้ใช้สำหรับเป็นฐานรองของท่อนาโนคาร์บอนเพื่อการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

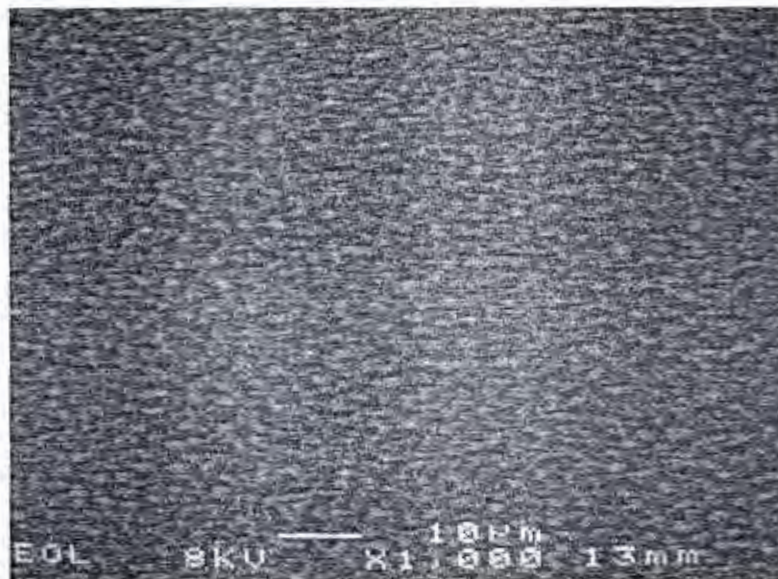
กริดทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลางขอบด้านนอก 3 mm จำนวน 298 ช่อง ถ่ายภาพด้วยกล้อง stereoscopic zoom Olympus optical microscope รุ่น SZX9 กำลังขยาย 100 เท่า

บทที่ 4

ผลการทดลอง

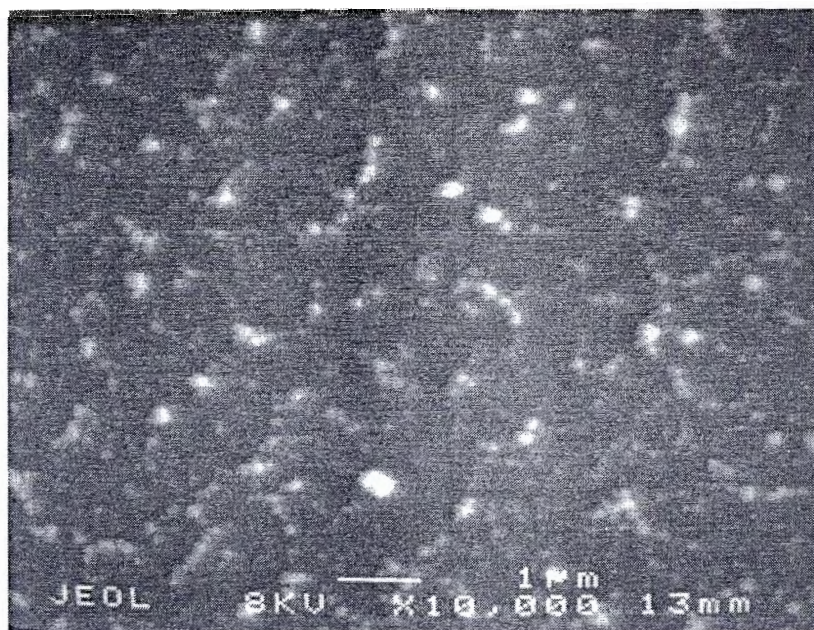
4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิลที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโน

ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิล ที่ตกเคลือบบนแผ่นฐานรองซิลิกอน ถูกศึกษาวิเคราะห์พื้นผิวในระดับอะตอมด้วยกล้องจุลทรรศน์ AFM และ ศึกษารูปแบบและโครงสร้าง ลักษณะการกระจายของอนุภาคโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาบนฐานรองซิลิกอน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลจากการทดลองพบว่าขนาดและรูปร่างของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิล ขึ้นอยู่กับความดันของแก๊สอาร์กอน ภายในภาชนะสุญญากาศขณะสังเคราะห์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ที่ความดันแก๊สอาร์กอน 200,300 และ 400 mtorr อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อน anneal ถูกตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (film) หรืออะมอร์ฟัส (amorphous) อนุภาคมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 4.1



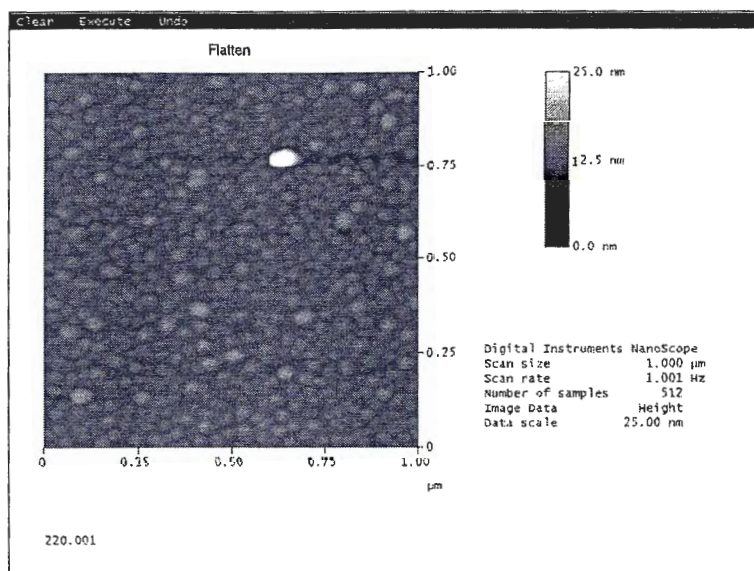
ภาพที่ 4.1 แสดงอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิล สังเคราะห์ที่ความดันแก๊สอาร์กอน 200 mtorr ก่อน anneal โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

อนุภาควัสดุเชิงปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิลที่สังเคราะห์ภายใต้ความดันบรรยากาศแก๊สอาร์กอน 200 mtorr เมื่อผ่านการ anneal ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและไฮโดรเจน ฟิล์มบางหรืออะมอร์ฟัส ของตัววัสดุเชิงปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิล หลอมรวมกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 10-100 nm กระจายอยู่ทั่วผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน พื้นผิวขรุขระชัดเจนมากขึ้นกว่าเดิม ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.2

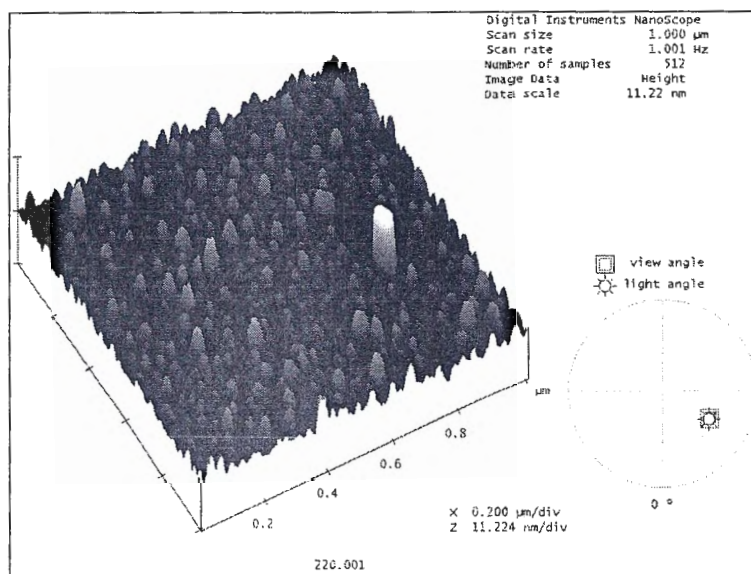


ภาพที่ 4.2 แสดงขนาดของอนุภาควัสดุเชิงปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิล สังเคราะห์ที่ความดันแก๊สอาร์กอน 200 mtorr หลังการ anneal โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

อนุภาควัสดุเชิงปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิลที่สังเคราะห์ภายใต้ความดันบรรยากาศแก๊สอาร์กอน 300 mtorr เมื่อผ่านการ anneal ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและไฮโดรเจน ถูกศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์เอเอฟเอ็ม เราพบว่าอนุภาคเหล่านั้นจะเกิดการรวมตัวเป็นกระจุก (cluster) ขนาดและความสูงของกระจุกไม่เท่ากัน กระจุกมีการกระจายตัวอยู่บนผิวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ไม่เบียดชิดกัน และอยู่ทั่วไปบนผิวหน้าฐานรอง กระจุกมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 20-30 nm ความสูงอยู่ระหว่าง 20-24 nm ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.3



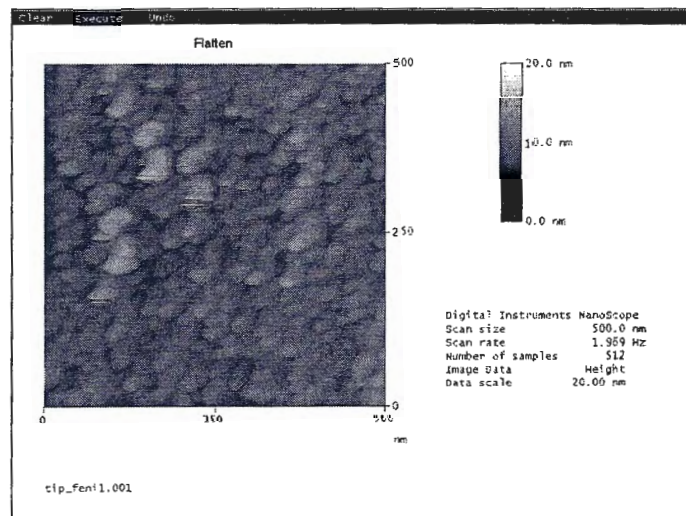
(a)



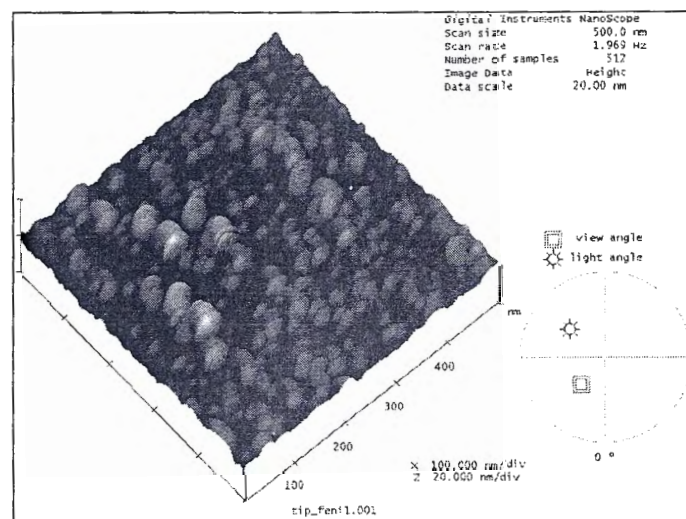
(b)

ภาพที่ 4.3 (a) แสดงขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศแก๊สอาร์กอน 300 mtorr หลังการ anneal โดยกล้องจุลทรรศน์เอเอฟเอ็ม

(b) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ AFM แสดงความหนาแน่นของ อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิลสังเคราะห์ที่ 300 mtorr หลังการ anneal โดยกล้องจุลทรรศน์เอเอฟเอ็ม



(a)



(b)

ภาพที่ 4.4 (a) แสดงขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา สังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศแก๊สอาร์กอน 400 mtorr หลังการ anneal โดยกล้องจุลทรรศน์เอเอฟเอ็ม

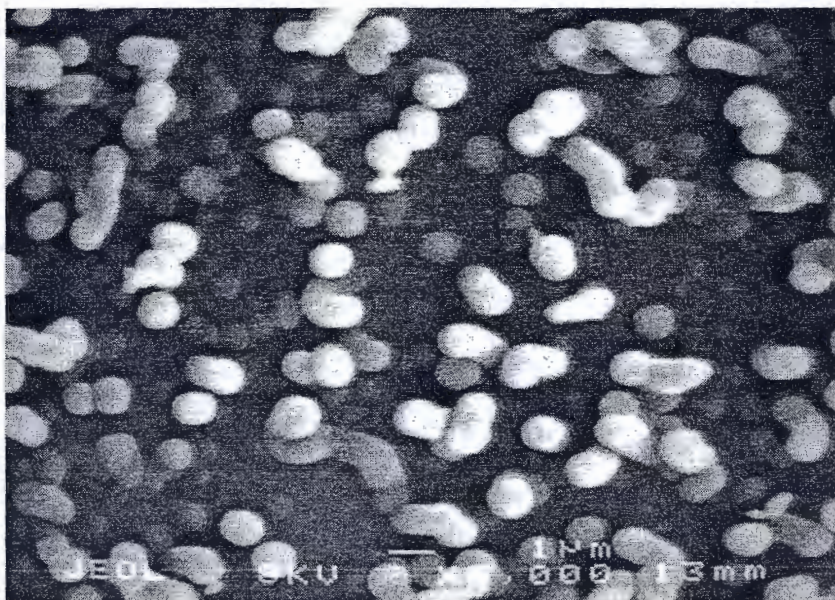
(b) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ เอเอฟเอ็ม แสดงความหนาแน่นของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็ก-นิกเกิลสังเคราะห์ที่ 400 mtorr หลังการ anneal โดยกล้องจุลทรรศน์เอเอฟเอ็ม

อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิลที่สังเคราะห์ภายใต้ความดันบรรยากาศแก๊สอาร์กอน 400 mtorr เมื่อผ่านการ anneal พบว่าอนุภาคเกิดการรวมตัวเป็นกระจุก และกระจายอยู่อย่างหนาแน่นเบียดชิดกันมาก ขนาดของกระจุกแต่ละอันไม่เท่ากัน โดยทั่วไปกระจุกมีขนาดประมาณ 40-50 nm มีความสูงอยู่ระหว่าง 15-18 nm เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่สังเคราะห์ที่ความดันแก๊สอาร์กอน 300 mtorr พบว่ามีขนาดใหญ่กว่าแต่มีความสูงน้อยกว่า ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.4

จากการศึกษา เราพบว่าความหนาแน่นของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิล สังเคราะห์ภายใต้ความดันบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน 400 mtorr มีขนาดใหญ่และความหนาแน่นสูงกว่าอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ภายใต้ความดันบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน 300 mtorr ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ความดันของก๊าซอาร์กอนสูง (400 mtorr) ระยะปลอดการชน (mean free path) จะมีค่าน้อย ทำให้ไอระเหยของอะตอมเหล็ก-นิกเกิลมีโอกาสชนกันเองและชนกับแก๊สอาร์กอนทำให้โมเลกุลของเหล็ก-นิกเกิล ที่ระเหยขึ้นไปรวมตัวกันเป็นกระจุกที่ใหญ่ขึ้นและเกิดการควบแน่นกลายเป็นอนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นก่อนแล้วจึงตกเคลือบบนฐานรองซิลิกอน ดังนั้นการแปรค่าความดันของแก๊สอาร์กอนภายในสถานะสุญญากาศขณะทำการตกเคลือบอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เราได้ขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิลต่างกัน

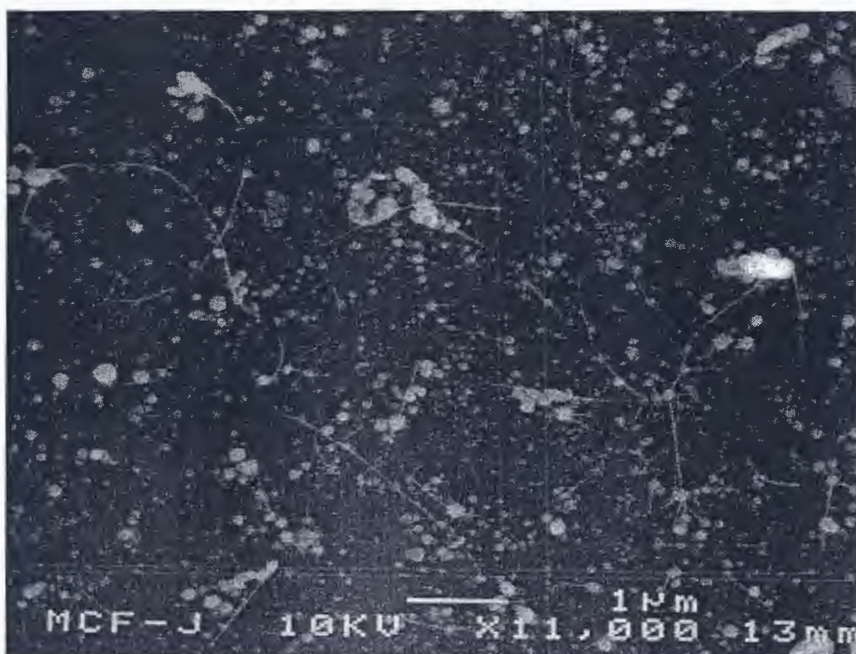
4.2 ท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์โดยใช้วิธีการไหลของแก๊ส CH_4 เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนเท่ากันและปัจจัยอื่นๆ เหมือนกันดังกล่าวในบทที่ 3 ช่วงอุณหภูมิการปลูกแปรค่าจาก 800-1000 องศาเซลเซียส พบว่าการปลูกท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ภายใต้ความดันแก๊สอาร์กอน 200 mtorr ที่อุณหภูมิซึ่งแปรค่าจาก 800-1000 องศาเซลเซียส ไม่ประสบความสำเร็จในการเกิดท่อนาโนคาร์บอน อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส พบว่าการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนภายใต้ความดันก๊าซอาร์กอน 200 mtorr ผลที่ได้คือเกิดคาร์บอนไฟเบอร์ (carbon fiber) หรืออะมอร์ฟัสคาร์บอน (carbon amorphous) ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.5



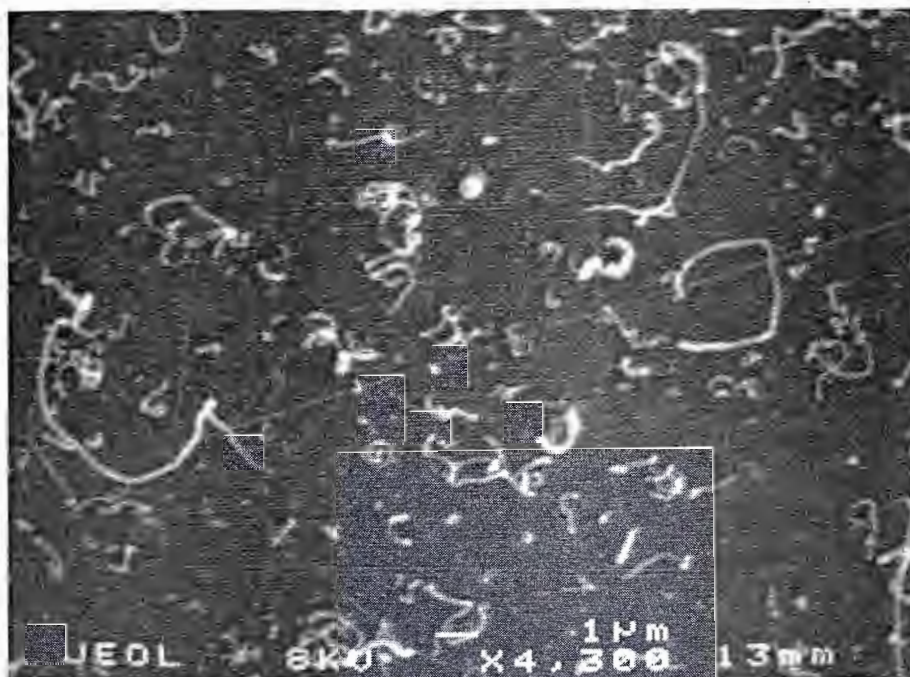
ภาพที่ 4.5 แสดงคาร์บอนไฟเบอร์ หรือ อะมอร์ฟัสคาร์บอน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ
ส่องกราด ถ่ายภาพด้วยกำลังขยาย 5,000 เท่า คาร์บอนไฟเบอร์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนสีขาว

เมื่อเราสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่นฐานรองที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ที่ความดัน
บรรยากาศแก๊สอาร์กอน 300 mtorr พบว่าการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศา
เซลเซียส ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ ส่วนใหญ่มีขนาดสั้น หยิกโค้งงอ มีคาร์บอนไฟเบอร์เจือปน
อยู่ทั่วไป เราพบว่า¹⁷ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการสังเคราะห์เป็น 860 องศาเซลเซียส ความยาวของท่อนาโน
คาร์บอนที่สังเคราะห์ได้โค้งงอ มีคาร์บอนไฟเบอร์เจือปนอยู่ทั่วไปความยาวของท่อที่สังเคราะห์ได้ยาว
ประมาณ 1-6 μm ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.6 และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Campbell และคณะ⁵⁰ ได้ทำ
การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี CVD โดยการเพิ่มอุณหภูมิการสังเคราะห์เป็น 875 องศา
เซลเซียส เขาพบว่าท่อนาโนคาร์บอนมีความยาวเพิ่มขึ้นประมาณ 2 ถึง 9 μm มีรัศมีความโค้งเพิ่มขึ้น
และปนเปื้อนด้วยคาร์บอนไฟเบอร์



ภาพที่ 4.6 แสดงท่อนาโนคาร์บอนปลูกที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ถ่ายภาพด้วยกำลังขยาย 11,000 เท่า ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหยักงอ คาร์บอนไฟเบอร์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนสีขาว ส่วนจุดสีขาวที่มีขนาดเล็กคืออนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกจากนี้เราพบว่าเมื่อทำการทดลองสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีความยาวมากขึ้น โดยมีความยาวประมาณ 6 - 30 μm และมีคาร์บอนนาโนไฟเบอร์ปนเปื้อนเล็กน้อย โดยทั่วไปคาร์บอนนาโนไฟเบอร์จะมีขนาดใหญ่กว่าท่อนาโนคาร์บอนมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 nm ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.7

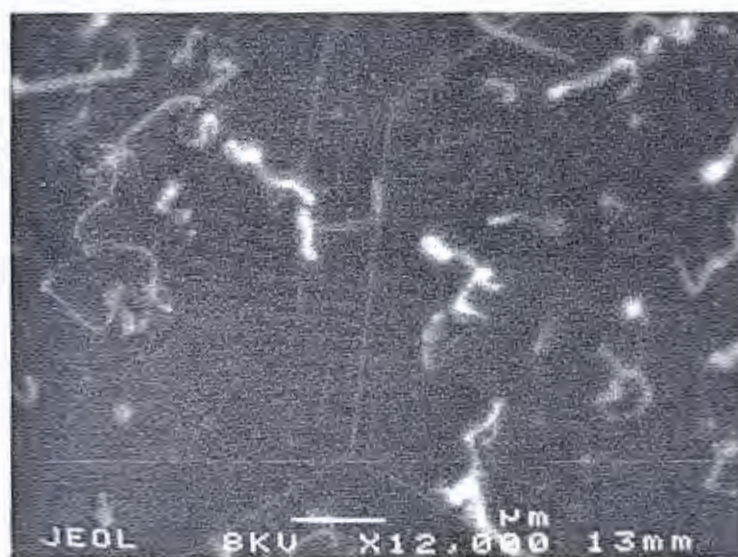


ภาพที่ 4.7 แสดงลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนที่ปลูกบนตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สังเคราะห์ภายใต้ความดันบรรยากาศแก๊สอาร์กอน 300 mtorr อุณหภูมิการปลูก 900 องศาเซลเซียส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ถ่ายภาพด้วยกำลังขยาย 4,300 เท่า ท่อนาโนคาร์บอนคือเส้นตรงสีขาว ส่วนคาร์บอนไฟเบอร์มีลักษณะเป็นเส้นสีขาวโค้งงอขนาดใหญ่

เมื่อทำการทดลองปลูกท่อนาโนคาร์บอน บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ภายใต้ความดันบรรยากาศ แก๊สอาร์กอน 300 mtorr โดยเพิ่มอุณหภูมิการสังเคราะห์เป็นประมาณ 1000 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าไม่ประสบความสำเร็จในการเกิดท่อนาโนคาร์บอน ผลที่เกิดขึ้นคือมีคาร์บอนไฟเบอร์หรือ อะมอร์ฟัสคาร์บอน



(a)



(b)

ภาพที่ 4.8 แสดงท่อนาโนคาร์บอน สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสโดยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ท่อนาโนคาร์บอนคือเส้นตรงสีขาว

(a) แสดงลักษณะของท่อเส้นตรง (nanojunction) ถ่ายภาพด้วยกำลังขยาย 6,500 เท่า

(b) แสดงลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นข้อต่อ (nanojunction) ถ่ายภาพด้วยกำลังขยาย

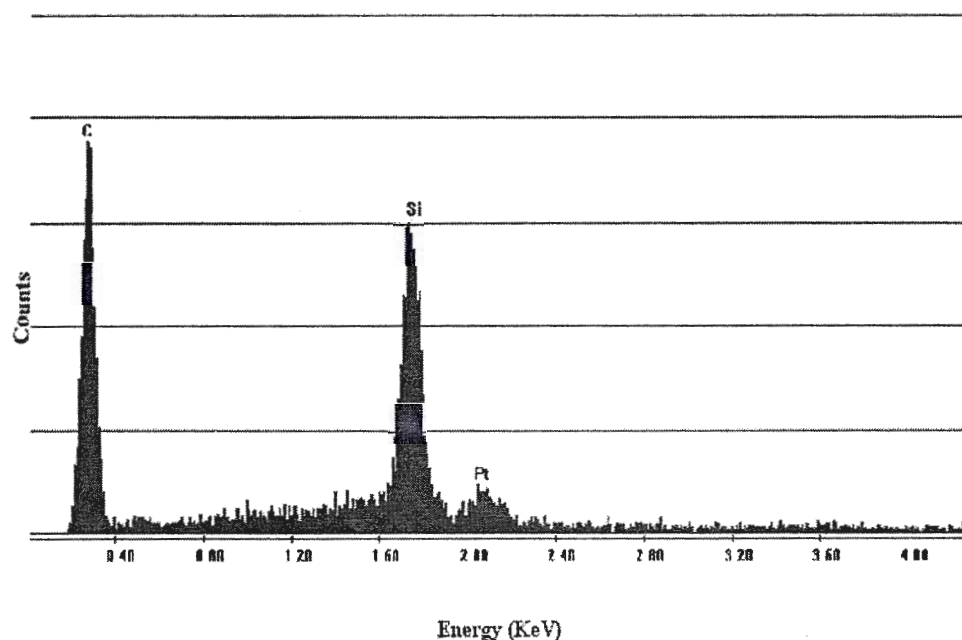
12,000 เท่า

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองซิลิกอน ที่มีอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ภายใต้ความดันบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน 400 mtorr ที่อุณหภูมิประมาณ 800-1000 องศาเซลเซียส พบว่าไม่เกิดท่อนาโนคาร์บอน แต่ผลที่เกิดขึ้นคือมีคาร์บอนไฟเบอร์ หรือ อะมอร์ฟัสคาร์บอน

จากผลการทดลองเราพบว่าขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาหลักและนิกเกิลที่เตรียมภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน ที่ 300 mtorr โดยมีแก๊สมีเทน (CH_4) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนซึ่งอัตราการไหลเป็น 10 sccm เท่านั้นที่สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนได้ด้วยวิธีไอระเหยทางเคมี และเรายังพบว่าคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่ปลูกบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศแก๊สอาร์กอน 300 mtorr ช่วงอุณหภูมิการปลูก 900 องศาเซลเซียส จะเป็นเส้นตรง และข้อต่อ (nanojunction) ที่ท่อนาโนคาร์บอน และมีความยาวมาก แต่ยังมีคาร์บอนไฟเบอร์เจือปนน้อยดังแสดงด้วยภาพที่ 4.8 ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Moshkalyov และคณะ⁵¹ ได้ทำการทดลองปลูกท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไอระเหยเคมี โดยใช้ฟิล์มบางของนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและ ใช้มีเทน (CH_4) เป็นแหล่งกำเนิดของคาร์บอน ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิการปลูก 900 องศาเซลเซียส ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จะเป็นเส้นตรงที่มีความยาวมากกว่าปลูกในช่วงอุณหภูมิการปลูกที่ต่ำกว่านี้หรือสูงกว่านี้

4.3 การวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (EDS)

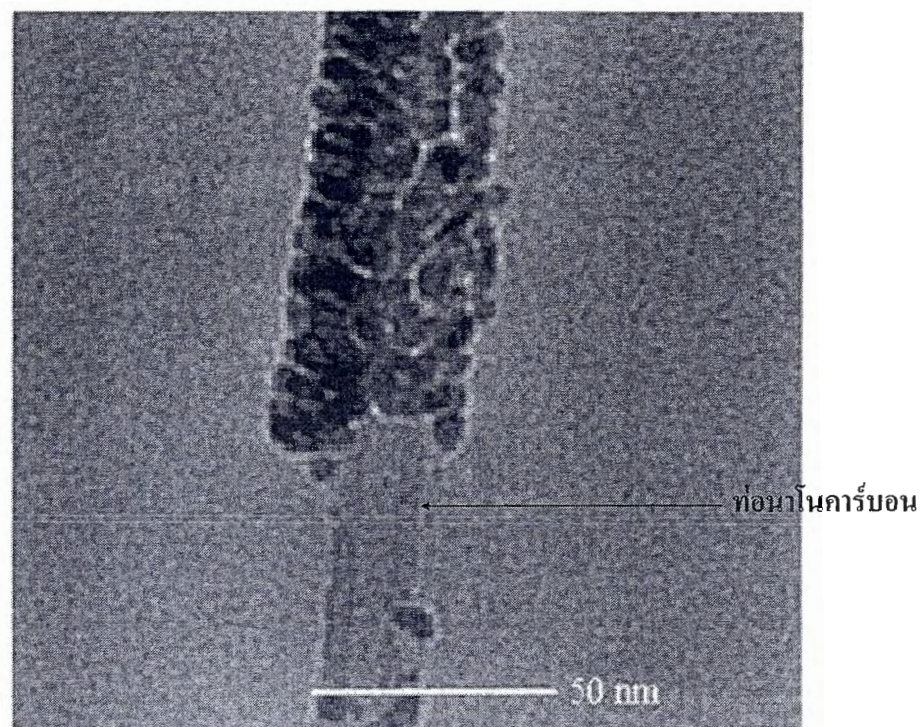
ผลการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (EDS) ของตัวอย่างที่เกิดท่อนาโนคาร์บอนพบว่าตัวอย่างมีส่วนประกอบของธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของท่อนาโนคาร์บอนและคาร์บอนไฟเบอร์ ซิลิกอน (Si) คือส่วนที่เป็นฐานรองที่ใช้ปลูกท่อนาโนคาร์บอน และ แพลทินัม (Pt) คือโลหะที่ใช้เคลือบ (coater) เพื่อศึกษาสมบัติของตัวอย่างที่ใช้ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกน ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.9



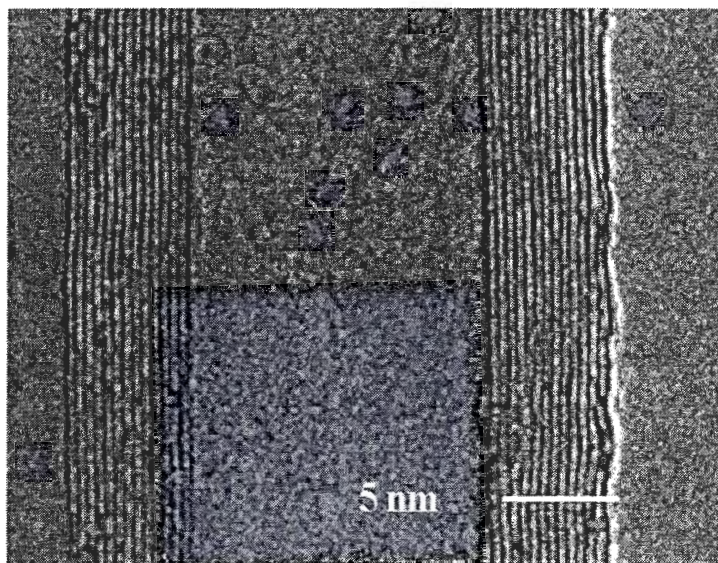
ภาพที่ 4.9 แสดงข้อมูล EDS ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างที่เกิดท่อนาโนคาร์บอน

4.4 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เราพบว่า ท่อนาโนคาร์บอน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20-25 nm ท่อนาโนคาร์บอนบางส่วนปิดคลุมด้วยโลหะแพลทินัมที่ใช้เคลือบผิวของตัวอย่างก่อนที่จะนำตัวอย่างไปศึกษาสมบัติด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.10 เมื่อนำตัวอย่างไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าเป็นท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ดังแสดงด้วยภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.10 แสดงท่อนาโนคาร์บอนที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 25 nm บางส่วนของท่อนาโนคาร์บอนมีโลหะแพลทินัมเกาะติด ซึ่งเกิดจากการเคลือบตัวอย่างเพื่อศึกษาตัวอย่าง โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



ภาพที่ 4.11 แสดงท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เส้นตรงสีดำคือผนังของท่อนาโนคาร์บอนแต่ละชั้น

จากสมการที่ 2.2 ถ้าเราสามารถสังเคราะห์ ให้ได้ท่อนาโนคาร์บอนไปผลิตเป็นตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอน ที่มีความยาวประมาณ $h = 25 \mu\text{m}$ และรัศมีโค้งที่ปลายของท่อนาโนคาร์บอน $r = 25 \text{ nm}$ จะได้ค่า local field-enhancement factor $\beta = \frac{h}{r} = 1000$ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่ปลายของตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอน (E) จะเพิ่มขึ้นตาม สมการ $E = \beta \frac{V}{d}$ เป็น 1000 เท่า เมื่อใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้ได้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงมากในขณะที่แหล่งปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบดั้งเดิม (conventional field emitter) ที่ทำด้วยโลหะทั้งสแตนที่มีรัศมีความโค้งในระดับไมครอน (10^{-6}) ไม่สามารถให้ค่า field-enhancing factor สูงในระดับนี้ได้ เนื่องจากโลหะทั้งสแตนที่มีรัศมีความโค้งในระดับไมครอน⁵² (10^{-6})

บทที่ 5

สรุป

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไอระเหยเคมี บนแผ่นฐานรอง Si ที่มีอนุภาคระดับนาโน ของเหล็กและนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเตรียมขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนแผ่นฐานรองซิลิกอนด้วยวิธีไอระเหยความร้อน (thermal evaporation) ที่บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน 200, 300 และ 400 mtorr จากนั้นนำแผ่นฐานรองที่ได้ไปปลูกท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิแปรค่าระหว่าง 800-1000 องศาเซลเซียส ศึกษาขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ Atomic Force Microscope กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไอระเหยเคมี แล้วทำการศึกษาลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาชนิดของท่อนาโนคาร์บอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

เราประสบความสำเร็จในการท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไอระเหยเคมี บนแผ่นฐานรองซิลิกอน Si (001) ที่มีอนุภาคระดับนาโนของเหล็ก-นิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการนี้มีค่าประมาณ 20-30 nm ซึ่งคล้อยจองกับการตกเคลือบสะสม thermal evaporation ที่ความดันแก๊สอาร์กอนประมาณ 300 mtorr อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยการ anneal ที่เหมาะสมโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส และ แก๊สไฮโดรเจนที่เจือจาง ด้วยอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สอาร์กอน ประมาณ 10 sccm และ 70 sccm ตามลำดับ ท่อนาโนคาร์บอนถูกปลูกบนฐานรองซิลิกอนที่ได้เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-นิกเกิลด้วยวิธีไอระเหยเคมี อุณหภูมิระหว่าง 800-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 30 นาที โดยมีแก๊สมีเทนเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน รูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะปลูก ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 องศาเซลเซียส ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ ส่วนใหญ่มีขนาดสั้น โค้งงอ มีคาร์บอนไฟเบอร์เจือปนอยู่ทั่วไป ที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีความยาวมากขึ้น โดยมีความยาวของท่อนาโนคาร์บอนส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 6-30 μm และมีคาร์บอนไฟเบอร์ปนเปื้อนน้อยลง อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิการปลูกสูงขึ้นจะมีคาร์บอนไฟเบอร์ปนมากขึ้น

ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้เป็นท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20-25 nm ด้วยเหตุนี้ จึงสามารถทำให้สัดส่วนความยาวต่อรัศมีมีความโค้ง (aspect ratio, h/r) มีค่ามากซึ่งอยู่ในระดับขนาด 1000 ซึ่งหากนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้ทำเป็นแหล่ง

ปลดปล่อยอิเล็กตรอนจะสามารถเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าได้เป็น 1000 เท่า เทคนิคการสังเคราะห์นี้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อผลิตท่อนาโนคาร์บอนสำหรับอุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพได้

แนวทางการศึกษาวิจัยในอนาคต ควรศึกษาการปลูกท่อนาโนคาร์บอนในสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมให้ได้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นเส้นตรงและจัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวปลดปล่อยอิเล็กตรอนสำหรับแหล่งกำเนิดเอ็กซ์เรย์ และศึกษาวิธีการปลูกคาร์บอนไฟเบอร์ครอบท่อนาโนคาร์บอนเพื่อให้มีขนาดใหญ่สามารถหยิบจับได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ (traditional optical microscope) เพื่อเป็นเข็ม (probe) สำหรับ AFM หรือเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนสำหรับการประยุกต์ใช้ที่จำเป็นต้องใช้ลำอิเล็กตรอน (electron beam) ความเข้มสูง เช่น electron gun ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

เอกสารอ้างอิง

1. L. M. Liz-Marán and P. V. kamat, Kluwer, Nanoscale Materials. Academic Publishers. (2003).
2. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ร่างแผนกลยุทธ์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (พ.ศ. 2547-2556) เสนอคณะรัฐมนตรี 2548.
3. S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon. Nature 354. **56**, (1991).
4. R. Martel, T. Schmidt, H. R. Shea, T. Hertel and Ph. Avouris, Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors. Appl. Phys. Lett. **73**, 2447 (1998).
5. P. J. Britto, K. S. V. Santhanam, A. Rubio, J. A. Alonso and P. M. Ajayan, Improved charge transfer at carbon nanotube electrodes. Adv. Meter. **11**, 154 (1999).
6. Y. B. Zhang, S. P. Lau, L. Huang and M. Tanemura, Carbon nanotubes synthesized by biased thermal chemical vapor deposition as an electron source in an x-ray tube. Appl. Phys. Lett. **86**, 123115 (2005).
7. G. Chai, Individual probes and field emitters : fabrication and their properties. Ph.D. Thesis. University of Central Florida, Orlando, Florida, USA. (2004).
8. B. P. Groning, P. Ruffieux, L. Schlapbach and O. Groning, Carbon nanotubes for clean energy applications. Adv. Engineering materials. **5**, 8 (2003).
9. G. E. Gamaly and T. W. Ebbesen, Mechanism of carbon nanotube formation in the arc discharge. Phys. Rev. B **52**, 2083 (1995).
10. T. Guo, P. Nikolaev, A. Thess, D. T. Colbert and R. E. Smalley, Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization. Chem. Phys. Lett. **243**, 49 (1995).
11. S. Kleckley, G. Y. Chai, D. Zhou, R. Vanfleet and L. Chow, Synthesis of carbon nanotubes by electrochemical deposition at room temperature. Carbon **41**, 833 (2003).
12. N. M. Rodriguez, M. S. kim and R. T. K. Baker, Carbon Nanofibers: A unique catalyst support medium. J. Phys. Chem. **98**, 13108 (1994).
13. R. G. Lacerda, K. B. K. Teo, A. S. Teh, M. H. Yang, S. H. Dalal, D. A. Jefferson, J. H. Durrell, N. L. Rupasinghe, D. Roy, G. A. J. Amaratunga, W. I. Milne, F. Wyczisk, P. Legagneux and M. Chowalla, Thin-film metal catalyst for the production of multi-wall and single-wall carbon nanotubes. J. Appl. Phys. **96**, 4456 (2004).

14. Y. C. Choi, Shin Y. M, Y. H.Lee, B. S. Lee, G-S Park and W.B. Choi, et al. Controlling the diameter, growth rate, and density of vertically aligned carbon nanotubes synthesized by microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Appl. Phys. Lett.* **76**, 2367 (2000).
15. C. L. Cheung, A. Kurtz, H. Park and C. M. Lieber, Diameter-Controlled Synthesis of Carbon Nanotubes. *J. Phys. Chem. B* **106**, 2429 (2002).
16. Y. Li, J. Liu, Y. Wang and Z. L. Wang, Preparation of Monodispersed Fe-Mo Nanoparticles as the Catalyst for CVD Synthesis of Carbon Nanotubes. *Chem. Mater.* **13**, 1008 (2001).
17. T. Saipin, U. Tipparach and S. Pukird, The Effect of Temperature on the Growth of Carbon Nanotubes by Catalytic Chemical Vapor Deposition. 31st Congress on Science and technology of Thailand, **D0057** (2005).
18. B. I. Yakobson and R. E. Smalley, Fullerene nanotubes : $C_{1,000,000}$ and beyond. *Am. Sci.* **85**, 324 (1997).
19. M. F. Yu, B. S. Files, S. Arepalli and R. S. Rouff, Tensile Loading of Ropes of Single Wall Carbon Nanotubes and their Mechanical Properties. *Phys. Rev. Lett.* **84**, 5552 (2002).
20. P. G. Collins and P. Avouris, Nanotubes for Electronics. *Scientific American.* (2000).
21. P. L. McEuen, Single-wall Carbon nanotubes. *Phys. World.* June (2000).
22. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus and R. Saoto, *Carbon* **33**, 883 (1995).
23. A. Yasuda, N. Kawase and W. Mizutani, Carbon-Nanotube Formation Mechanism Based on in Situ TEM Observations. *J. Phys. Chem. B* **106**, (51) 13294 (2002).
24. J. B. Park, G. Choi, S. Cho, Y. S. Hong, D. Kim, S. Y. Choi, J. H. Lee and K. I. Cho, Characterization of Fe-catalyzed carbon nanotubes grown by thermal chemical vapor deposition. *J. Cryst. Growth.* **244**, 211 (2002).
25. L. W. Nordheim, *Pro. Roy. Soc. London, Ser. A* **121**, 626 (1928).
26. D. Rotman, The Nanotube Computer. *MIT's Tech. Rev.* March. 37 (2002).

27. V. Derycke, R. Martel, J. Appenzeller and Ph. Avouris, Controlling doping and carrier injection in carbon nanotube transistors. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 2773 (2002).
28. P. M. Ajayan and O. Z. Zhou, *Carbon Nanotubes*, **80**, 391 (2001).
29. S. M. Lee, K. S. Park, Y. C. Choi, Y. S. Park, J. M. Bok, D. J. Bae, K. S. Nahm, Y. G. Choi, S. C. Yu, N. G. Kim, T. Frauenheim and Y. H. Lee, Hydrogen adsorption and storage in carbon nanotubes. *Synth. Met.* **113**, 209 (2000).
30. S. Farhat, M. L. La Chapelle, A. Loiseau, C. D. Scott, S. Lefrant, C. Journet and P. Bernier, Diameter control of single-walled carbon nanotubes using argon-helium mixture gases. *J. Chem. Phys.* **115**, (14) 6752 (2001).
31. T. W. Ebbesen and P. M. Ajayan, Large-scale synthesis of carbon nanotubes. *Nature*, **358**, 220 (1992).
32. C. Journet and P. Bernier, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. *Appl. Phys. A* **67**, 1 (1998).
33. T. Guo, P. Nikolaev, A. Thess, D. T. Colbert and R. E. Smalley, Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization. *Chem. Phys. Lett.* **243**, 49 (1995).
34. M. Yudasaka, R. Yamada, N. Sensui, T. Wilkins, T. Ichihashi and S. Iijima, Ni and Co Catalysts on the Yield of Single-Wall Carbon Nanotubes Formed by Pulsed Nd:YAG Laser Ablation. *J. Phys. Chem. B* **103**, 30 (1999).
35. P. C. Eklund, B. K. Pradhan, U. J. Kim, Q. Xiong, J. E. Fischer, A. D. Friedman, B. C. Holloway, K. Jordan and M. W. Smith, Large-Scale Production of Single-Walled Carbon Nanotubes Using Ultrafast Pulses from a Free Electron Laser. *Nano Lett.* **2**, 561 (2002).
36. A. P. Bolshakov, S. A. Uglov, A. V. Saveliev, V. I. Konov, A. A. Gorbunov, W. Pompe and A. Graff, *Diamond and Related Materials*. **11**, 3 (2002).
37. W. K. Maser, E. Munoz, A. M. Benito, M. T. Martinez, G. F. de la Fuente, Y. Maniette, E. Anglaret and J. L. Sauvajol, Formation of single-walled carbon nanotube bundles using CO₂ laser vaporization of graphite. *Chem. Phys. Lett.* **292**, 587 (1998).
38. Z. F. Ren, Z. P. Huang, J. W. Xu and J. H. Wang, Synthesis of large arrays of well-aligned carbon nanotubes on glass. *Science (Washington, D.C.)* **282**, 5391 (1998).

39. S. B. Sinnot, R. Andrews, D. Qian, A. M. Rao, Z. Mao, E. C. Dickey and F. Derbyshire, Model of carbon nanotube growth through chemical vapor deposition Chem. Phys. Lett. **315**, 25 (1999).
40. Z. F. Ren, Z. P. Huang, D. Z. Wang, J. G. Wen, J. W. Xu, J. H. Wang, L. E. Calvet, J. Chen, J. F. Klemic and M. A. Reed, Growth of a single freestanding multiwall carbon nanotube on each nanonickel dot. Appl. Phys. Lett. **75**, 1086 (1999).
41. M. Yudasaka, R. Kikuchi, T. Matsui, Y. Ohki, S. Yoshimura and E. Ota, Specific conditions for Ni catalyzed carbon nanotube growth by chemical vapor deposition. Appl. Phys. Lett. **67**, (17) 2477 (1995).
42. M. Yudasaka, R. Kikuchi, Y. Ohki, E. Ota and S. Yoshimura, Behavior of Ni in carbon nanotube nucleation. Appl. Phys. Lett. **70**, (14) 1817 (1997).
43. Z. P. Huang, D. Z. Wang, J. G. Wen, M. Sennett, H. Gibson and Z. F. Ren, Effect of nickel, iron, and cobalt on growth of aligned carbon nanotubes. Appl. Phys. A **74**, 387 (2002).
44. J. I. Sohn, C. J. Choi, S. Lee and T.-Y. Seong, Growth behavior of Carbonnanotubes on Fe-deposited (001) Si substrates. Appl. Phys. Lett. **78**, (20) 3130 (2000)
45. S. Maruyama, S. Chiashi and Y. Miyauch, Carbon Nanotube Synthesis. Thermal Engineering Joint Conference. **6**, (2003).
46. T. W. Ebbesen and P. M. Ajayan, Large-scale synthesis of carbon nanotubes. Nature. **358**, 220 (1992).
47. S. H. Jung, M. R. Kim, S. H. Jeong, S. U. Kim, O. J. Lee, K. H. Lee, J. H. Suh and C. K. Park, High-yield synthesis of multi-walled carbon nanotubes by arc discharge in liquid nitrogen. Appl. Phys. A **76**, 285 (2003).
48. M. Endo, K. Takeuchi, S. Igarashi, K. Kobori, M. Shiraishi and H. W. Kroto, Large scale synthesis, selective fabrication and applications of carbon nanotubes. J. Phys. Chem. Solids. **54**, 12 (1993).
49. H. D. Young, R. A. Freedman, T.R. Sandin and A. L. Frod, Physics university 9th-wesley publishing company, INC (1995).
50. P. M. Campbell, E. S. Snow and J. P. Novak, Simple catalyst for the growth of small-diameter carbon nanotubes. Appl. Phys. Lett. **81**, 4586 (2002).

51. S. A. Mosshkalyov, A. L. D. Moreau, H. R. Gutierrez, M. A. Cotta and J. W. Swart, carbon nanotubes growth by chemical vapor deposition using thin film nickel catalyst. *Mat. Sci. Eng. B* **112**, 147 (2004).
52. P. F. Kane, *Field ion microscope, characterization of solid surfaces* edited by Philip F. Kane and Graydon B. Larrabee, Plenum Press, 133 (1974).

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ

นางทิพวรรณ สายพิน

ประวัติการศึกษา

มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนวิจิตรพิทย อ.วารินชำราบ

จ.อุบลราชธานี พ.ศ. 2532

ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต (ค.บ.) วิชาเอกวิทยาศาสตร์ทั่วไป

สถาบันราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง จ.ราชบุรี พ.ศ. 2536

ปริญญาครุศาสตรมหาบัณฑิต (ค.ม.) สาขาวิชา การพัฒนา

หลักสูตรและการเรียนการสอน

สถาบันราชภัฏอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี พ.ศ. 2546

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พ.ศ. 2548

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2537 ตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 3 โรงเรียนบ้านคำพอง

อ.โพธิ์ชัย จ.ร้อยเอ็ด

พ.ศ. 2538 ตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 3 โรงเรียนบ้านนาสามัคคี

อ.น้ำยืน จ.อุบลราชธานี

พ.ศ. 2539 ตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 3 วิทยาลัยเทคนิค

อำนาจเจริญ อ.เมือง จ.อำนาจเจริญ 37000

สถานที่ทำงานในปัจจุบัน

ตำแหน่ง ครู คศ. 2

วิทยาลัยเทคนิคอำนาจเจริญ อ.เมือง จ.อำนาจเจริญ

รหัสไปรษณีย์ 37000 โทรศัพท์ 045-511987

E-mail : Tipss_2@hotmail.com

ประวัติการศึกษาวิจัย

ระหว่างภาคฤดูร้อนปีการศึกษา 2547 ศึกษาวิจัยด้าน Nano science

And Nanotechnology ที่ Department of Physics, University of

Central Florida, Orlando, Florida, สหรัฐอเมริกา