

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมอนุภาคนาโนของเหล็ก

Preparation of Fe nanoparticles

โดย
นาย ชนุทอง คำยา

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72153
วัน,เดือน,ปี..... 1.1. ส.ย. 2550

b. 117 6A119
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมอนุภาคนาโนของเหล็ก

Preparation of Fe nanoparticles



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมอนุภาคนาโนของเหล็ก

Preparation of Fe nanoparticles

นายชนูทอง คำยา รหัสประจำตัว 46010293

โครงงานนี้ได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเตรียมอนุภาคนาโนของเหล็ก

ผู้จัดทำ..... โนนทง คำภา

(นาย ธนุทอง คำภา รหัส 46010293)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ. ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมอนุภาคนาโนของเหล็ก

นาย ธนุทอง คำยา รหัส 46010293

ผศ.ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการนำเสนอวิธีการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กด้วยวิธี CVD โดยใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นตัวพาละอองของเฟอร์โรเซนที่ได้จากเครื่องดีหมอกเข้าไปในท่อควอตซ์ โดยมีขดลวดความร้อนเป็นตัวให้พลังงานเพื่อให้เฟอร์โรเซนแตกตัวเป็นอนุภาคของเหล็กไปเกาะติดบนแผ่นฐานรองอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นและอนุภาคเหล็กมีความบริสุทธิ์ ทำการศึกษาเงื่อนไขต่างๆที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก เช่น ตำแหน่งการวาง อุณหภูมิในการแตกตัว เวลา อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน เฟอร์เซ็นต์ของเฟอร์โรเซนต่อตัวทำละลาย และชนิดของตัวทำละลาย เฟอร์โรเซน เป็นต้น พร้อมทั้งหาวิธีแก้ไขเพื่อให้อนุภาคเหล็กมีความบริสุทธิ์ขึ้นโดยการผสมน้ำระหว่างปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่าอนุภาคที่ได้เป็นเหล็กออกไซด์ที่ถูกห่อหุ้มด้วยแกรไฟต์ มีขนาดในช่วง 1.5-36 นาโนเมตร อนุภาคเหล็กที่เตรียมได้จะสามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation of Fe nanoparticles

Mr. Thanuthong Khamya ID. 46010293

Asst.Prof Dr. Sutichai Chaisitsak Advisor

Educational Year 2006

Abstract

This project presented the preparation of Fe nanoparticles using CVD method. Argon gas was used to carry the ferrocene mist, generated by atomizer, into a heated quartz tube in order to decompose ferrocene. To obtain a small-size particle with high purity over a substrate, the optimal conditions were investigated by studying the effect of the parameters for such as location, temperature, time, flow rate, solution rate and solvent type. The result showed that carbon encapsulated iron oxide nanoparticles are in the range from 1.5 to 36 nm. The prepared Fe particles could be used as a catalyst for carbon nanotube growth.

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของโครงการในครั้งนี้ เกิดขึ้นด้วยความกรุณาของ ผศ.ดร.สุริชัช ชัยสิทธิ์ศักดิ์ ในการให้คำแนะนำปรึกษา ให้แนวทางในการแก้ไขปัญหา และให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ขอขอบคุณบริษัท Western Digital และ TMEC สำหรับภาพถ่าย SEM และ MTEC สำหรับภาพถ่าย TEM และ EDX ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนข้าพเจ้า และขอขอบคุณรุ่นพี่ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่ดีในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณตา คุณยาย ที่เป็นกำลังใจและให้ทุนสนับสนุนการศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 คาร์บอนนาโนทิวป์.....	2
2.1 ประวัติความเป็นมาของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	2
2.1.1. แบบมีโครงสร้างเป็นชั้น.....	2
2.1.2. แบบมีโครงสร้างแข็งแรงทั้งสามมิติ.....	3
2.1.3. แบบมีโครงสร้างเป็นก้อนขนาดเล็ก.....	3
2.1.4. แบบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นม้วนตัวเป็นท่อ.....	4
2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	4
2.2.1. Single Walled Carbon nanotubes.....	4
2.2.2 Multi Walled Carbon nanotubes.....	6
2.3 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	6
2.3.1. Base Growth.....	6
2.3.2. Tip Growth.....	6
2.4 การเตรียมโลหะตั้งเร่งปฏิกิริยา.....	7
2.4.1. การเคลือบชนิดการระเหย.....	8
2.4.2. การเคลือบชนิด sputtering.....	10
2.4.3. การเคลือบผิวแบบสปิ้นเนอร์.....	11
2.4.4. การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า.....	12
2.4.5. การเคลือบด้วยวิธีไพโรไลซิส.....	13
2.5 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์.....	14
2.5.1. วิธีอาร์กคิซซาร์จ.....	14
2.5.2. วิธีไพโรไลซิส.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3. วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์.....	15
2.5.4. วิธีอิเล็กโตรไลซิส.....	15
2.5.5. วิธี Chemical vapor Deposition.....	16
2.6 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งาน.....	18
2.6.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ.....	18
2.6.2 ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน.....	18
2.6.3 ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	19
2.6.4 ใช้สร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์.....	19
2.6.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน.....	19
บทที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ห่ออนุภาคเล็กขนาดเล็ก.....	21
3.1 TEMs.....	21
3.1.1 ระบบการทำงานของ TEMs.....	22
3.2 SEMs.....	23
3.2.1 ระบบการทำงานของ SEMs.....	24
3.3 EDX.....	25
3.3.1 คุณสมบัติทั่วไป.....	25
3.3.2 คุณสมบัติพิเศษ.....	26
3.3.3 ประยุกต์การใช้งาน.....	26
3.4 XRD.....	27
3.4.1 คุณสมบัติทั่วไป.....	27
3.4.2 คุณสมบัติพิเศษ.....	27
3.4.3 ประยุกต์การใช้งาน.....	28
บทที่ 4 การทดลอง.....	29
การเตรียมอนุภาคเหล็กจากเฟอร์โรเซนด้วยวิธีไพโรไลซิส.....	29
4.1 วัตถุประสงค์.....	29
4.2 การออกแบบเตาฮีตเตอร์.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 อุปกรณ์และสารเคมี.....	30
4.3.1 อุปกรณ์ประกอบ.....	30
4.3.2 อุปกรณ์เคมีและสารเคมี.....	31
4.4 วิเคราะห์ผลที่น่าจะเกิดขึ้นก่อนการทดลอง.....	31
4.5 ขั้นตอนการทดลอง.....	32
4.5.1 ขั้นตอนการเตรียม.....	32
4.5.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	33
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	34
5.1 ผลกระทบของตำแหน่งที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	34
5.2 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	37
5.3 ผลกระทบของเวลาที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	40
5.4 ผลกระทบของเปอร์เซ็นต์เฟอร์ไรต์ต่อเอธานอลที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	44
5.5 ผลกระทบของอัตราไหลก๊าซตัวพาที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	47
5.6 ผลกระทบของตัวทำละลายเฟอร์ไรต์ที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	50
5.7 ผลกระทบของการผสมน้ำ DI ในสารละลายเฟอร์ไรต์ในเอธานอลที่มีต่อตำแหน่งการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	56
5.8 ผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การผสมน้ำ DI ลงในสารละลายที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	58
5.9 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการผสมน้ำ DI ลงในสารละลายเพื่อสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	64
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	70
ภาคผนวก.....	71
กิตติกรรมประกาศ.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแกรไฟต์.....	2
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเพชร.....	3
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของคาร์บอนหกสปี (C ₆₀).....	3
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน.....	4
รูปที่ 2.5 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบSWCNTs.....	5
รูปที่ 2.6 ลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิด.....	5
รูปที่ 2.7 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบMWCNTs.....	6
รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดแบบ Base Growth.....	6
รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดแบบ Tip Growth.....	7
รูปที่ 2.10 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง.....	8
รูปที่ 2.11 การเคลือบชนิดการระเหย.....	9
รูปที่ 2.12 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์.....	11
รูปที่ 2.13 การเคลือบแบบ Spin coating.....	12
รูปที่ 2.14 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า.....	13
รูปที่ 2.15 แสดงการเคลือบด้วยวิธีไพโรไลซิส Pyrolysis.....	13
รูปที่ 2.16 วิธีอาร์คดิสชาร์จ.....	14
รูปที่ 2.17 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์.....	15
รูปที่ 2.18 วิธีอิเล็กโทรไลซิส.....	16
รูปที่ 2.19 แสดงวิธี HF-CVD.....	17
รูปที่ 2.20 ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ในการสร้างทรานซิสเตอร์.....	19
รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEMs.....	21
รูปที่ 3.2 แผนภาพการทำงานของ TEMs.....	22
รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEMs.....	24
รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานของ SEMs.....	24
รูปที่ 3.5 Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.6 X-Ray Diffractometer.....	27
รูปที่ 3.7 แสดงวิธีการวิเคราะห์ XRD.....	28
รูปที่ 4.1 แสดงแคโทดเดอริฟต์ได้ออกแบบ.....	29
รูปที่ 4.2 แคโทดเดอริฟต์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว.....	30
รูปที่ 4.3 แสดงการทำงานของวิธี Pyrolysis.....	31
รูปที่ 4.4 แสดงการวางตำแหน่งของ Sample.....	33
รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลกระทบของตำแหน่งการวางตัวอย่างที่มีต่อการสังเคราะห์ อนุภาคเหล็ก.....	36
รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	39
รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลของเวลาที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	43
รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลกระทบของเปอร์เซ็นต์ต่อเอธานอลที่มีต่อ การสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	46
รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลกระทบของอัตราไหลก๊าซตัวพาที่ผลต่อ การสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	49
รูปที่ 5.6 ภาพถ่าย SEM แสดงผลกระทบของตัวทำละลายเฟอร์โรเซนที่มีต่อการสังเคราะห์ อนุภาคเหล็ก.....	52
รูปที่ 5.7 ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคเหล็ก.....	55
รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลกระทบของการผสมน้ำ DI ในสารละลายที่มีต่อ ตำแหน่งการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	58
รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การผสมน้ำ DI ลงในสารละลาย ที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	63
รูปที่ 5.10 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการผสมน้ำ DI ลงในสารละลายเพื่อสังเคราะห์ อนุภาคเหล็ก.....	65
รูปที่ 5.11 แสดงอนุภาคเหล็กหลังผสมน้ำ DI เข้าไปเพื่อแก้ไขความสกปรก.....	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของตำแหน่งที่มีต่อการสังเคราะห์ อนุภาคเหล็ก.....	34
ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์ อนุภาคเหล็ก.....	37
ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของเวลาที่มีต่อการสังเคราะห์ อนุภาคเหล็ก.....	40
ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของเปอร์เซ็นต์เฟอร์โรเซนต่อเอธานอล ที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	44
ตารางที่ 5.5 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของอัตราไหลก๊าซตัวพาที่มีต่อ การสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	47
ตารางที่ 5.6 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของตัวทำละลายเฟอร์โรเซนที่มีต่อ การสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	50
ตารางที่ 5.7 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของการผสมน้ำ DI ในสารละลายเฟอร์โรเซน ในเอธานอลที่มีต่อตำแหน่งการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	56
ตารางที่ 5.8 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การผสมน้ำ DI ลงใน สารละลายที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	59
ตารางที่ 5.9 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการผสมน้ำ DI ลงใน สารละลายเพื่อสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก.....	64

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเจริญรุดหน้าอย่างรวดเร็ว นับตั้งแต่สามารถผลิตทรานซิสเตอร์ตัวแรกได้[1, 2] จนมาเป็นวงจรรวมที่สามารถใส่ทรานซิสเตอร์เป็นล้านตัวลงในชิป (chip) ขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม วงจรรวมที่ว่านี้ยังมีข้อจำกัดอยู่ สามารถบรรจุทรานซิสเตอร์ได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น เพราะผลของควมเก็บประจุแฝง [3] นักวิทยาศาสตร์จึงได้มีการศึกษาเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อให้สามารถใส่ทรานซิสเตอร์เพิ่มเข้าไปได้อีกในชิปขนาดเท่ากันและวงจรรวมมีขนาดเล็กลง คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotubes) จึงเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เพราะมีคุณสมบัติที่ดีทั้งทางไฟฟ้าและทางกล แล้วยังมีขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตร จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์ทำวิจัยเกี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวบ์กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น[4] ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นจะต้องมีส่วนประกอบอย่างน้อย 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดคาร์บอน พลังงาน และโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา[11] โดยพบว่าโลหะตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถควบคุมขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ [6,7,8,9,10] ดังนั้นถ้าเราสามารถเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เหล็ก ให้มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ก็จะสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้มีขนาดเล็กลงได้อีก เฟอร์โรเซน (ferrocene) [5] เป็นสารหนึ่งที่มีเหล็ก (Fe) เป็นองค์ประกอบและมีราคาถูก จึงถูกนำมาใช้ในการเตรียมให้เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กขนาดนาโนเมตรด้วย โดยใช้วิธีไพโรไลซิส (Pyrolysis)[12] ซึ่งทำได้โดยการให้ความร้อนแก่ละอองเฟอร์โรเซน เพื่อให้เฟอร์โรเซนสลายตัว อะตอมเหล็กก็จะหล่นลงมาเกาะบนฐานรอง

โครงการนี้จะทำการศึกษาและทดลองการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กด้วยวิธีไพโรไลซิส โดยใช้เฟอร์โรเซน ($C_{10}H_{10}Fe$) ซึ่งมีเหล็กเป็นส่วนประกอบ คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเฟอร์โรเซนคือ มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 172-175 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดที่ 249 องศาเซลเซียส ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เฮกซานอล เมทานอล และอะซีโตน และจะสลายตัวเมื่อให้อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส การทดลองนี้จะทำการหาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการเตรียมอนุภาคเหล็ก เพื่อให้ได้อนุภาคของเหล็กที่เล็กและเกิดทั่วทั้งแผ่น โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้นี้จะสามารถนำไปปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้ขึ้นตามตำแหน่งที่ต้องการได้ต่อไป

บทที่ 2

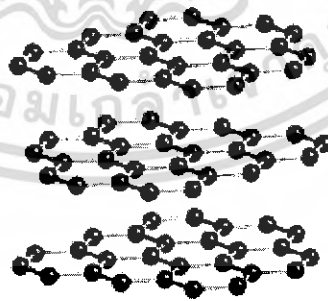
คาร์บอนนาโนทิวป์

2.1 ประวัติความเป็นมาของคาร์บอนนาโนทิวป์

คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotubes : CNTs)[13,14] ถูกค้นพบขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ Sumio Iijima จากการศึกษาพบว่ามีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องทั้งทางด้านกลศาสตร์และทางไฟฟ้า กล่าวคือ มันมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กถึง 50 เท่า เบากว่าเหล็ก 6 เท่า ทั้งยังนำความร้อนได้ดีกว่าเพชรอีกด้วย คุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าสามารถส่งกระแสไฟฟ้าผ่าน nanotube ได้แทบจะไม่มีมีความต้านทานทางไฟฟ้าเลยซึ่งนั่นแสดงว่าสามารถสร้างเป็นตัวนำยิ่งยวดได้ และยังเป็นสารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย อาจกล่าวได้ว่าสักวันคาร์บอนนาโนทิวป์จะถูกนำไปใช้แทนที่ซิลิคอนชิป (Silicon chip) หรือพวกไอซี (IC) ต่างๆ ในวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์คอมพิวเตอร์ทั้งหลายได้

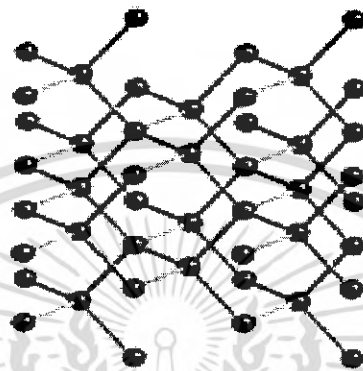
คาร์บอนเป็นธาตุที่มีโครงสร้างหลาย รูปแบบในปัจจุบันที่ถูกค้นพบสามารถแบ่งออกได้ เป็น 4 ชนิดดังนี้

2.1.1 แบบมีโครงสร้างเป็นชั้น หรือเป็นแผ่นสองมิติที่วางซ้อนทับกันระหว่างชั้นและยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบน้อยกว่าเพชร ยึดเกาะกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) โครงสร้างที่พบคือแกรไฟต์ เช่น ไม้ดินสอดต่างๆ (รูปที่ 2.1)



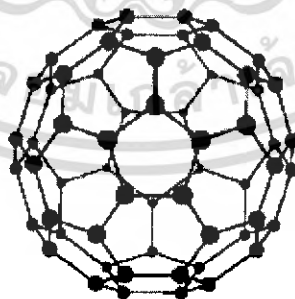
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแกรไฟต์

2.1.2 แบบมีโครงสร้างแข็งแรงทั้งสามมิติ โดยที่อะตอมของคาร์บอนทั้งหมดจะเกาะยึดด้วยพันธะโควาเลนต์ แบบโครงผลึกร่างตาข่าย มีราคาแพง มีความสวยงามและความแข็งที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหลาย เช่น เพชร (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเพชร

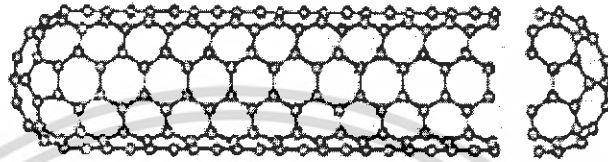
2.1.3 แบบมีโครงสร้างเป็นก้อนขนาดเล็ก จนอาจถือว่าเป็นจุดที่ไม่มีมิติหรือศูนย์มิติ เรียกว่า ฟูลเลอร์ีนส์ (fullerenes) ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบเป็นคาร์บอนหกสิบ (C_{60}) ที่แต่ละโมเลกุลจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้งหมด 60 อะตอม มาจับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ แล้วได้รูปทรงเป็นแบบก้อน ทรงกลมกลวงคล้ายๆ ลูกตะกร้อหรือลูกบอลขนาดจิ๋ว (รูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของคาร์บอนหกสิบ (C_{60})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 แบบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นม้วนตัวเป็นท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมาก ทำให้มันดูเหมือนเป็น เส้นยาวๆ ในแนวหนึ่งมิติ เรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ (รูปที่ 2.4) ซึ่งเป็นโครงสร้างของคาร์บอนแบบใหม่ที่เพิ่งถูกค้นพบ

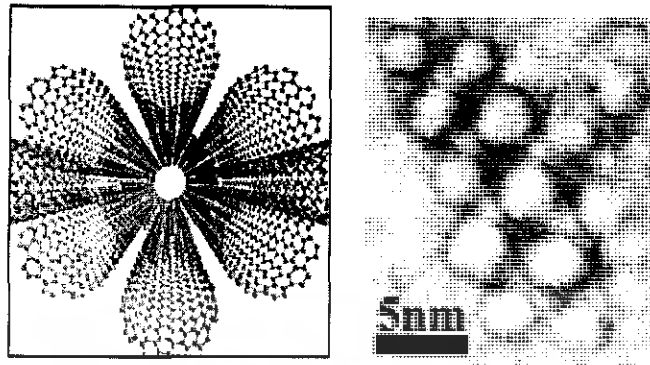


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์

2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์

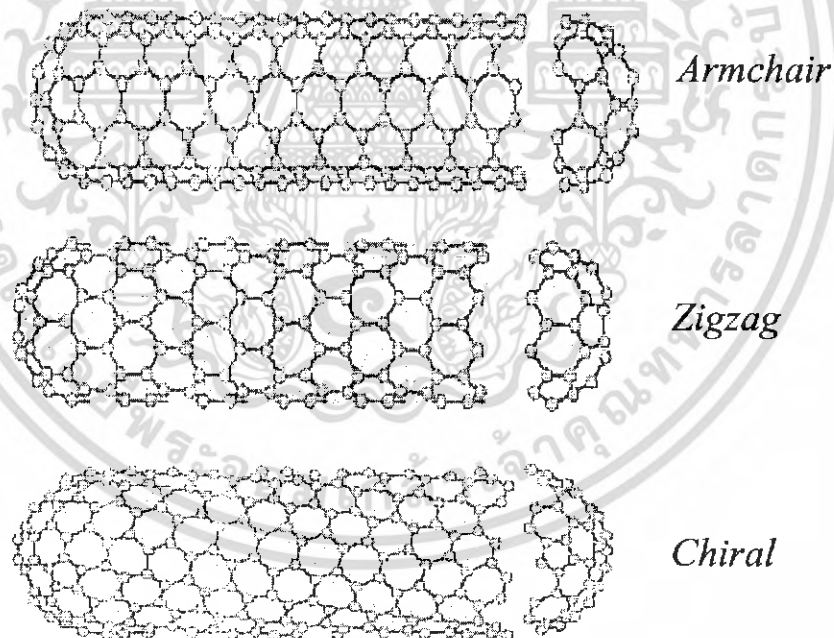
โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถตรวจสอบได้โดย เครื่อง Transmission Electron Microscopy (TEM) และ Scanning Tunneling Microscopy (STM) ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่านาโนทิวบ์มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกที่เกิดจากพลังงานแลตทิซ มีลักษณะคล้ายรังผึ้งซึ่งอยู่ในลักษณะของแผ่น Graphite และมีลักษณะเป็นชั้นของอะตอมเพียงชั้นเดียว คุณสมบัติทางกลหรือโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Young's modulus) วัดได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) การตรวจสอบสมบัติทางด้านอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำได้ โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งพบว่าค่าความนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Quantized conductance) คือ จะแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าได้ทั้งแบบคล้ายโลหะและสารกึ่งตัวนำ สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆคือ

2.2.1 Single Walled Carbon nanotubes (SWCNTs) มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อทรงกระบอกกลวงซึ่งเหมือนกับม้วนแผ่น Graphene Sheet ให้เป็นท่อทรงกระบอกภายในกลวงดังแสดงใน รูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบ SWCNTs (ซ้าย) ภาพวาดจำลอง (ขวา) ภาพถ่ายTEM

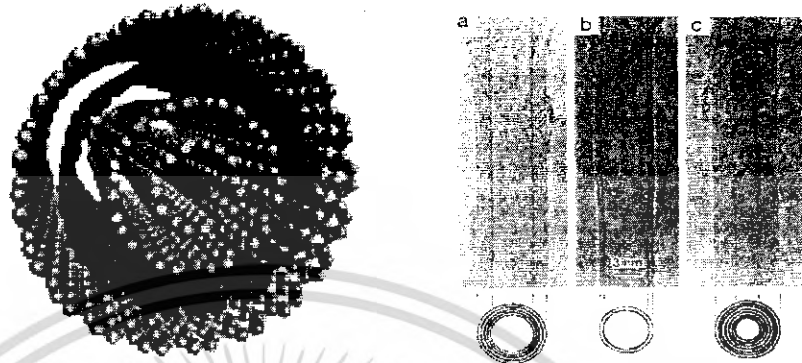
ซึ่งเกิดวอล คาร์บอนนาโนทิวป์ (Single Walled Carbon nanotubes (SWCNTs)) ยังสามารถแบ่งย่อยได้อีก 3 ชนิดตามลักษณะการม้วนคือ 1) Armchair nanotubes 2) Zigzag nanotubes และ 3) Chiral nanotubes ซึ่งได้แสดงลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิดใน รูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 Multi Walled Carbon nanotubes (MWCNTs) มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ SWCNTs ที่ซ้อนกันเป็นชั้นๆ ตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป โดยแต่ละชั้นมีระยะห่างกันประมาณ 0.34 nm ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบ MWCNTs (ซ้าย) ภาพวาดจำลอง (ขวา) ภาพถ่ายTEM

2.3 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

2.3.1 Base Growth เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โดยการเกิดแบบนี้เป็นเพราะที่ฐานรองมีอุณหภูมิสูงกว่าทางด้านบนจึงทำให้อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งจ่ายนั้นไปเกาะรวมกันบนตัวเร่งบนแผ่นฐานรอง (substrate) คาร์บอนที่ได้ออกมานั้นมีลักษณะเกาะสูงขึ้น โดยมีตัวเร่งอยู่ด้านล่าง

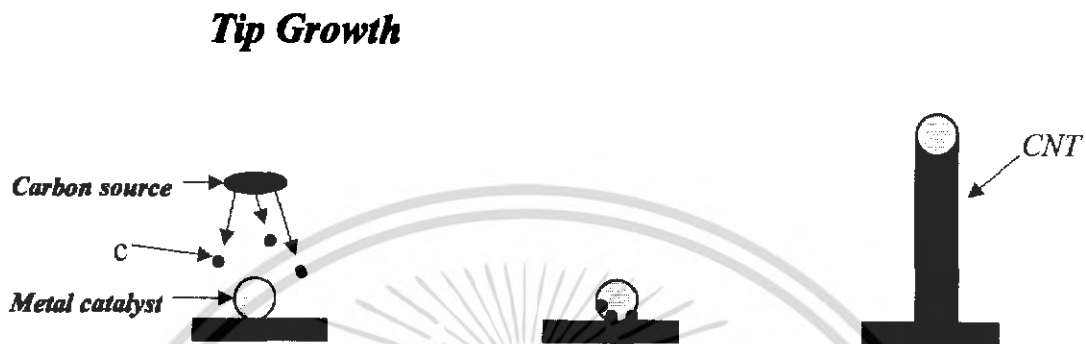


รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดแบบ Base Growth

2.3.2 Tip Growth เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งทำให้มีโลหะตัวเร่งอยู่ที่ปลายทิวป์ ในแบบนี้อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านบนของ Substrate นั้นสูงกว่าทางด้านล่างการรวมตัวของอะตอมคาร์บอนที่ได้มานั้นจึงเกาะได้ตัวเร่งแล้วดันให้สูงขึ้น

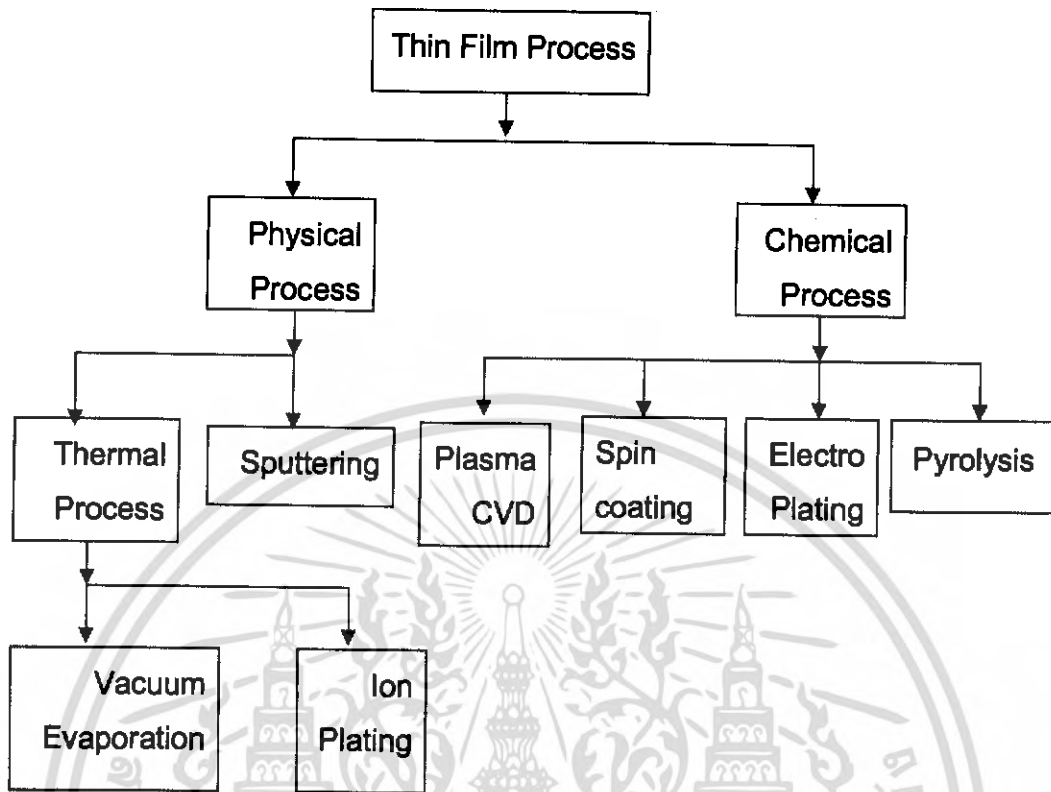


รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดแบบ Tip Growth

2.4 การเตรียมโลหะตั้งเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

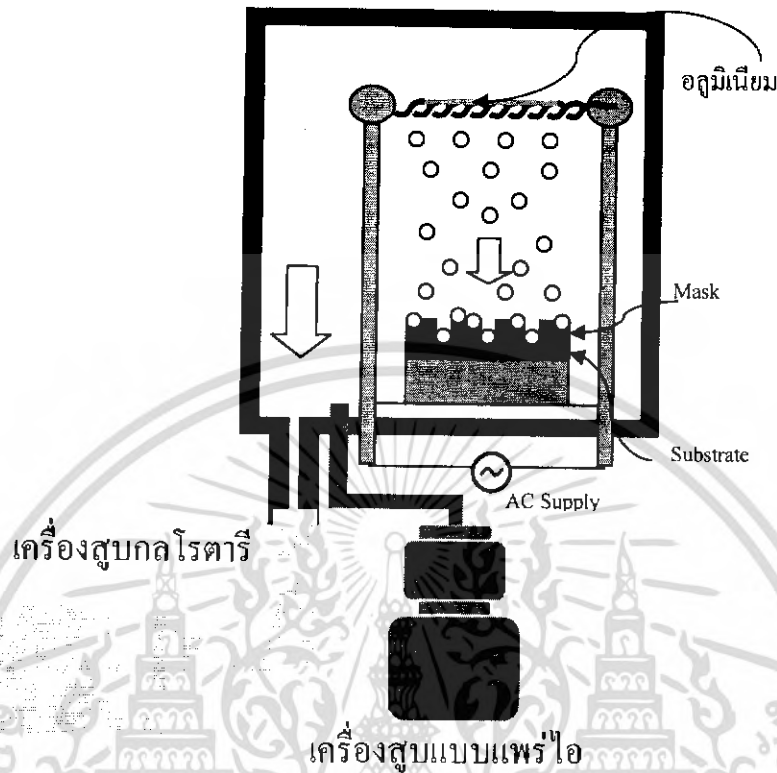
การเคลือบผิวเพื่อทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีวิธีการทำได้หลายวิธีซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ (1) การเคลือบด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Process) หรือ Chemical Vapor Deposition (CVD) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (New Species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี plasma CVD วิธี laser CVD และวิธี Pyrolysis เป็นต้น และ (2) การเคลือบด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical Process) หรือ Physical Vapor Deposition (PVD) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร (evaporation) และวิธีสปัตเตอริง (sputtering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

2.4.1 การเคลือบชนิดการระเหย (Evaporation Deposition) เกิดขึ้นจากวัสดุที่วางอยู่ในแหล่งที่ถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยวิธีต่างๆ แหล่งการระเหยเป็นที่ที่วัสดุระเหย ส่วนวัสดุพื้น (substrate) วางอยู่ในระยะที่เหมาะสม หน้าที่เข้าหาแหล่งการระเหย การเหนี่ยวนำไฟฟ้า การอาร์คส้อมอิเล็กตรอน หรือเลเซอร์ คือแหล่งความร้อนที่ทำให้วัสดุระเหย วัสดุพื้นจะร้อนขึ้นและทำให้เกิดความดันที่กำหนดและเหมาะสม โดยใช้แหล่งไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรง การระเหยจะกระทำในสุญญากาศที่มีความดัน 1.3 mPa ถึง 13 nPa อะตอมที่ระเหยจากวัสดุเคลือบจะเคลื่อนย้ายเป็นแนวเส้นตรงโดยไม่ชนกันก่อนจะกลั่นตัวบนวัสดุพื้น ทำให้ความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยจะมีตัวจับชั้นงานซึ่งมีแกนเอียงหมุนรอบเองจับชั้นงานหมุนเพื่อให้วัสดุพื้นเรียบขึ้นขณะทำการเคลือบแบบไอระเหย ในบางกรณีอาจปล่อยก๊าซอาร์กอน (Ar) ที่ความดัน 0.7 – 30 Pa อัดเข้าไปในห้องเคลือบสุญญากาศ เพื่อให้ไอของอะตอมเกิดการชนกันระหว่างการเคลื่อนย้ายไอจากแหล่งสู่วัสดุพื้น เพื่อสร้างชั้นเคลือบที่มีความหนาสม่ำเสมอบนวัสดุพื้น เทคนิคนี้เรียกว่า “การระเหยก๊าซกระเจิง” หรือ “การเคลือบแบบความดัน”



รูปที่ 2.11 การเคลื่อนชนิดการระเหย

ด้วยอัตราการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม (100 – 1,000 nm/min) ระยะห่างจากแหล่งถึงวัสดุพื้น 200 mm. ความดันควรอยู่ที่ประมาณ 1.3 Pa โดยควรปรับแต่งความร้อนจากแหล่งความร้อนที่ให้ความดันไอน้ำ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้โลหะระเหย แสดงแหล่งความร้อนจากเครื่องจ่ายไฟรูปเรือ (Boat Supply) ที่ได้จากไฟกระแสสลับ (ไฟตามบ้าน) วิธีการระเหยที่นิยมที่สุด คือ ลำโพงเล็กทรอนิกส์ โฟกัสและสแกนบนผิวโลหะ โดยจะมี crucible รองรับโลหะหลอมเหลว (melt) และจะหล่อเย็นด้วยน้ำ จึงมีอายุใช้งานยาวนาน

เทคนิคการระเหยอีกวิธีหนึ่งที่นิยมกันคือ การอาร์ค(Arc) เพื่อให้ความร้อนแก่โลหะที่เป็นวัสดุเคลื่อน โดยการอาร์คจะทำให้อุณหภูมิสูงมากและความร้อนที่ได้จะสม่ำเสมอ โลหะจึงระเหยโดยตรงเกือบจะไม่เป็นของเหลว ดังนั้นไม่จำเป็นต้องใช้เบ้า (crucible) รองรับโลหะหลอมเหลว แหล่งที่ทำให้เกิดไอจึงสามารถวางได้ตามสะดวก เช่น เียงหรือคว่ำ แทนที่จะหันขึ้นบน

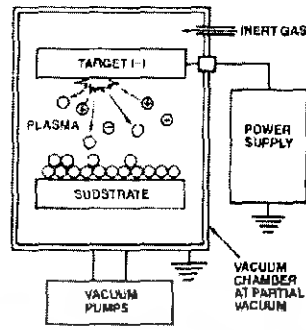
ระบบการเคลือบแบบอาร์คหลายจุด ซึ่งแสดงเครื่องมือที่จ่ายไฟฟ้า(Discharge) ระหว่างชิ้นงาน กับห้องเคลือบสุญญากาศ เกิด plasma ของ inert gas เป็นอออนบวก (cation) และอิเล็กตรอน เนื่องจาก วัสดุพื้น (substrate) เป็นขั้วลบ (Cathode) อออนบวกของวัสดุเคลือบจึงวิ่งชนวัสดุพื้น เคลือบติดที่ ชิ้นงาน และขณะทำการเคลือบจะต้องหมุนชิ้นงานอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ชิ้นงานมีความสม่ำเสมอของผิวเคลือบ ข้อดีของการเคลือบด้วยวิธีนี้คือผิวเคลือบจะมีการเกาะติดแน่น โดยคุณสมบัติจะดีขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น

2.4.2 การเคลือบชนิด sputtering เป็นปรากฏการณ์การถ่ายเทโมเมนตัมจากวัสดุที่จับเคลื่อน (projectile) ที่มีพลังงานอยู่ไปยังเป้า (target) ของแข็งหรือของเหลว ก่อให้เกิดการจับอะตอมหรือโมเลกุลที่ผิว ในกระบวนการเคลือบแบบสปัตเตอร์เป้า (แหล่งวัสดุเคลือบ) และวัสดุพื้นถูกวางอยู่ในสถานะสุญญากาศที่มีความดันในช่วง $13 - 0.013 \text{ MPa}$ ($0.1 - 10^{-4} \text{ mtorr}$) โดย target ต่ออยู่กับขั้วลบ (cathode) ที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าขั้วลบ โดยทั่วไปวัสดุพื้นจะหันหน้าเข้าหา target เมื่อปล่อยก๊าซเฉื่อย (ปกติโดยทั่วไปคือ Ar) เข้าไปในห้องสุญญากาศ ความดันของ Ar อยู่ในช่วง $3 - 20 \text{ Pa}$ จะเกิดการเปล่งแสง (glow discharge) ขึ้น อัตราการหลุดออกของ target (R) หน่วยเป็น อังสตรอมต่อนาที ($\text{\AA}/\text{min}$) คำนวณได้ตามสูตร

โดย

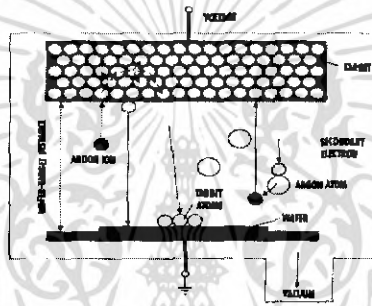
$$R = \frac{J \cdot S \cdot M}{p}$$

R = อัตราการหลุดออกของ target
 J = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของอออน (mA/cm^2)
 S = ผลลัพธ์ของสปัตเตอร์ริง (atom/ion)
 M = น้ำหนักอะตอม (g)
 p = ความหนาแน่นของ target (g/cm^3)

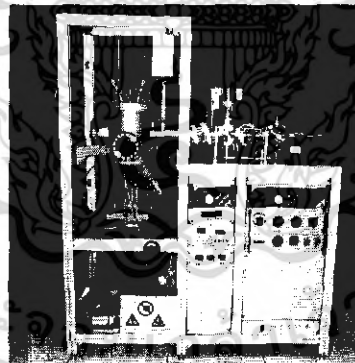


Sputtering Vacuum Deposition Process

(ก)



(ข)



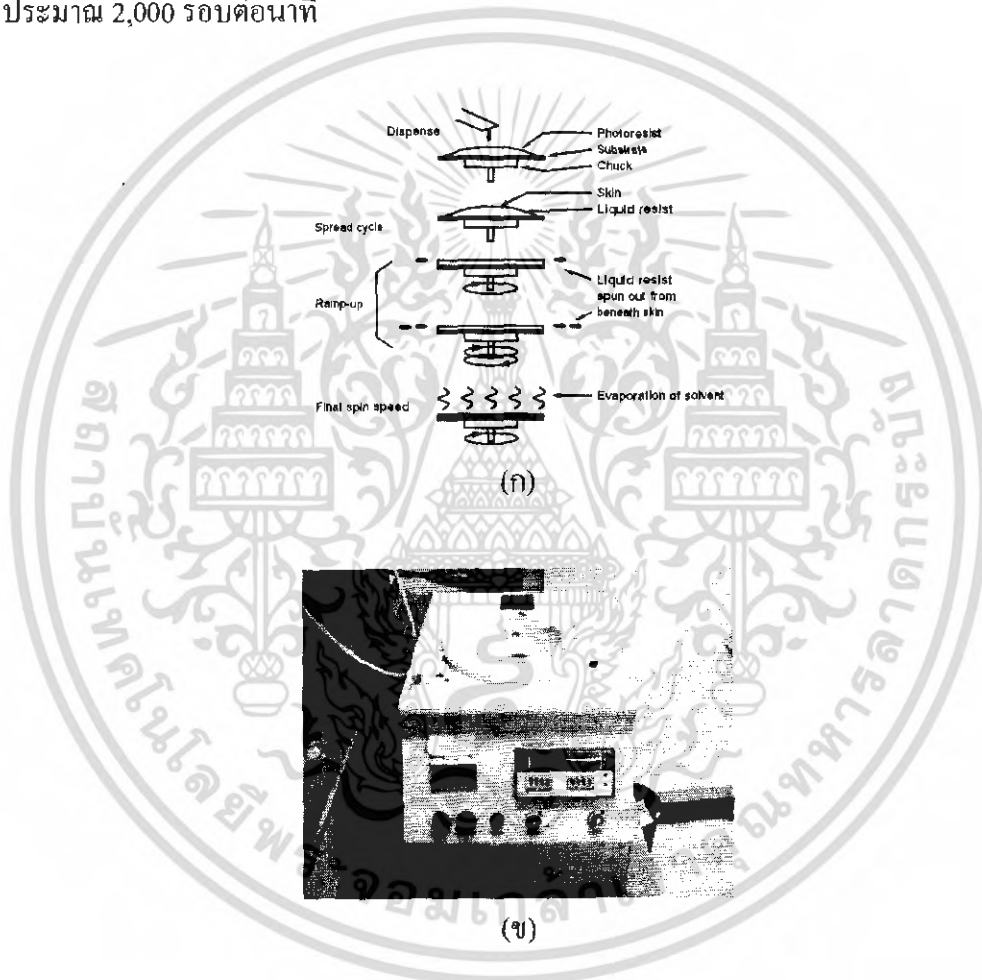
(ค)

รูปที่ 2.12 ก-ค องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

2.4.3 การเคลือบผิวแบบสปินเนอร์ (Spin coating) ในการเคลือบทางด้านการผลิตวงจรรวมจะนิยมวิธีนี้กันมากสำหรับใช้ในการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นซิลิคอน จะใช้อุปกรณ์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า หัวหมุนหรือ สปินเนอร์ (Spinner) โดยเป็นแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์รอบสูง โดยแผ่นที่ต้องการเคลือบนั้นจะถูกวางลงบนแท่น และจะถูกยึดติดด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นก็จะหยคน้ำยาที่ต้องการเคลือบลงบริเวณตรงกลางของแผ่นด้วยปริมาณที่พอเหมาะ ด้วยความเร็วที่ใช้ น้ำยานั้นจะถูกแรงเหวี่ยงทำให้กระจายออกไปโดยรอบ เป็นฟิล์มบาง เคลือบบนแผ่น ความหนาของชั้นเคลือบนั้นขึ้นกับความเร็วรอบที่ใช้ในการหมุน และโดยบริเวณที่ทำการเคลือบควรทำความสะอาดให้ดีที่สุดเพื่อป้องกันการเคลือบของผิวในแต่ละจุดนั้นมีความหนาไม่เท่ากัน ความเร็วที่ใช้จะประมาณ 2,000 รอบต่อนาที

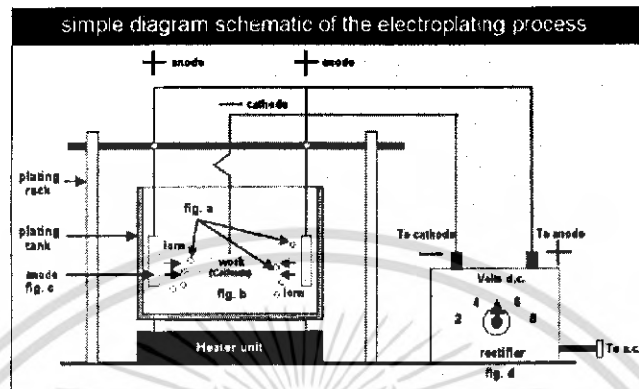


รูปที่ 2.13 ก-ข การเคลือบแบบ Spin coating

2.4.4 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) วิธีนี้จะเป็นการเคลือบโดยใช้ไฟฟ้าโดยจะเป็นการให้การแตกตัวของไอออนบวกและลบในสารละลายที่ใช้เพื่อให้โมเลกุลของโลหะที่ได้ออกมาไป

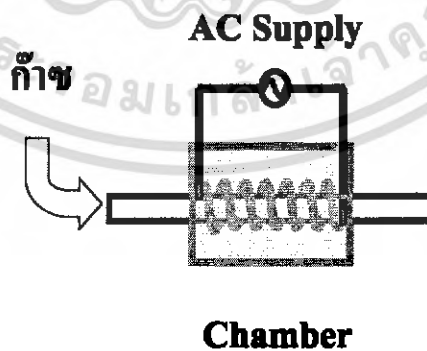
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกาะบนแผ่นฐานรอง (Substrate) หลักการของวิธีนี้จะใช้สารละลายที่มีโลหะผสมอยู่แล้วใช้กระแสไฟฟ้าจ่ายให้เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

2.4.5 การเคลือบด้วยวิธีไพโรไลซิส (Pyrolysis) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการเผาไหม้แบบที่ไม่ใช้ออกซิเจนช่วยในการเผาไหม้ โดยจำเป็นต้องให้ความร้อนเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) ไม่เหมือนกับเตาเผา ซึ่งใช้อากาศในการเผาไหม้และเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนออกมา (Exothermic reaction) วิธีไพโรไลซิสนี้เป็นการทำให้สารที่ต้องการเคลือบอาจอยู่ในรูปของสารละลายหรือก๊าซแตกตัวด้วยความร้อน ซึ่งความร้อน (อุณหภูมิ) ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นว่ามีจุดแตกตัวมากน้อยเพียงใด วิธีการนำสารตั้งต้นเข้าไปทำปฏิกิริยานั้นมีหลายวิธี เช่น อัดสารละลายเข้าไปหรือระเหยเข้าไปหรืออาจใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอนนำพาละอองเข้าไป



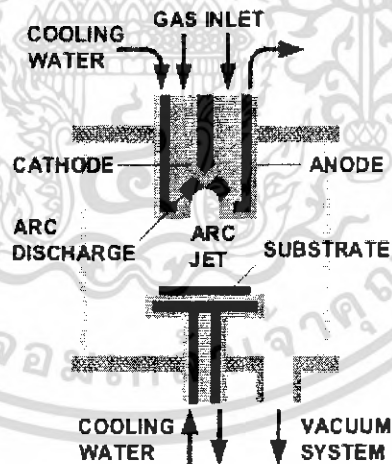
รูปที่ 2.15 แสดงการเคลือบด้วยวิธีไพโรไลซิส Pyrolysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

ปัญหาที่พบยังเป็นสิ่งท้าทายต่อนักวิจัยในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ในขณะนี้ ก็คือการควบคุมการผลิตเพื่อให้ได้ทั้งคุณสมบัติ ขนาด และรูปทรงทางเรขาคณิตที่แน่นอน กับขั้นตอนการทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์มีความบริสุทธิ์ ไม่มีเขม่า ไม่มีสิ่งเจือปนอื่น ๆ ซึ่งในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์พบว่ามียุทธศาสตร์ที่สามารถสร้างและควบคุมการผลิตคาร์บอนนาโนทิวป์ให้ได้ตามต้องการอยู่ 4 วิธีหลักๆ ดังนี้

2.5.1 วิธีอาร์คดิซชาร์จ (Arc discharge) เป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงประมาณ 100 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ 18 โวลต์ ตกร่อมระหว่างแท่งแกรไฟต์สองแท่ง จะทำให้เกิดประกายไฟหรือเกิดสถานะพลาสมาขึ้นระหว่างแท่งแกรไฟต์นี้ โดยเลือกใช้ขนาดของแท่งแกรไฟต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน คือให้มีขนาด 6 มิลลิเมตรและ 9 มิลลิเมตรตามลำดับ เมื่อวางไว้ใกล้ๆ กันในระยะห่างประมาณ 1 มิลลิเมตรภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลียม (He) ที่ความดัน 500 มิลลิเมตรปรอท จะให้ผลลัพธ์คือ ได้คาร์บอนนาโนทิวป์ตรงบริเวณกลางๆ ขั้วของแท่งแกรไฟต์อันใหญ่ที่ต่อให้เป็นขั้วลบ ส่วนการควบคุมขนาดและความยาวของท่อนั้น อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของพลาสมา



รูปที่ 2.16 วิธีอาร์คดิซชาร์จ

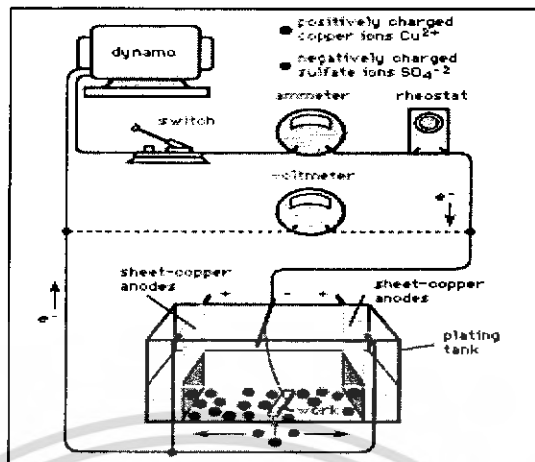
2.5.2 วิธีไพโรไลซิส (Pyrolysis) วิธีนี้เป็นการทำให้สารที่ต้องการเคลือบอยู่ในรูปของสารละลายหรือก๊าซแตกตัวด้วยความร้อน ซึ่งความร้อน (อุณหภูมิ) ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นว่ามีจุดแตกตัวมากน้อยเพียงใด วิธีการนำสารตั้งต้นเข้าไปทำปฏิกิริยานั้นมีหลายวิธี เช่น อัดสารละลายเข้าไป หรือระเหยเข้าไปหรืออาจใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอนนำพาละอองเข้าไป

2.5.3 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser vaporization) วิธีนี้จะคล้ายๆ กับวิธีไพโรไลซิส เพียงแต่จะใช้ลำแสงเลเซอร์เป็นตัวให้ความร้อนสูงกับแกรไฟต์ที่ผสมด้วยผงเม็ดละเอียดของโลหะ โคบอลต์และนิกเกิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย



รูปที่ 2.17 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์

2.5.4 วิธีอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) เหมือนกับวิธีอาร์คดิซาร์จแต่เป็นสถานะในของเหลว วิธีนี้จะใช้การผ่านกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วแกรไฟต์ขณะจุ่มอยู่ในของเหลวที่เรียกว่า อิเล็กโทรไลต์ เช่น ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และ LiBr ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยการเจือสารอิเล็กโทรไลต์ด้วยธาตุหรือสารประกอบอื่นๆ เช่น ผสมด้วยเกลือที่มี บิสมัทและปรอทจะสามารถควบคุมขนาดและ รูปร่างของท่อนาโนได้



รูปที่ 2.18 วิธีอิเล็กโทรไลซิส

2.5.5 วิธี Chemical vapor Deposition (CVD) เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยให้ก๊าซที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนไหลผ่าน ใช้แหล่งกำเนิดความร้อน เช่น ขดลวดความร้อนหรือพลาสมา (plasma) เพื่อถ่ายพลังงานไปทำให้โมเลกุลของก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ เช่น แอลกอฮอล์ มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แตกตัวเกิดเป็นอะตอมคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงแล้วจับตัวกันเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยมีโลหะตัวเร่งช่วยเร่งปฏิกิริยา โดยปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิควิธีการต่างๆ ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถแยกได้เป็น 5 วิธีใหญ่ คือ Thermal CVD, Plasma Enhance CVD (PE-CVD), Hot Filament Enhance CVD (HF-CVD), Vapor Phase Growth และ High pressure CO Disproportionate Process

2.5.5.1 Thermal Chemical vapor Deposition เป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมชั้นออกไซด์ของซิลิคอน (Si) และเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ทั้งชนิด Single Wall และ Multi Wall ใช้โลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก (Fe) โคบอล (Co) นิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) หรือ Alloy ของโลหะเหล่านี้ คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีความยาวอยู่ในช่วง 0.6-4 นาโนเมตร

2.5.5.2 Plasma Enhanced Chemical vapor Deposition (PE-CVD) เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส โลหะตัวเร่งที่ใช้คือ เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) และโคบอล (Co) นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่สามารถกำหนดทิศทางการเกิดของทิวบ์ให้ทิวบ์ตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือโดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้ แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิด

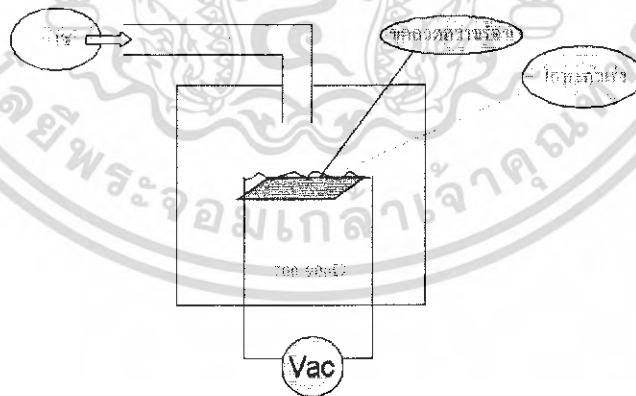
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

Multi Wall ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิด Single Wall ได้ แต่ปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด Single Wall ได้แล้ว

2.5.5.3 Vapor Phase Growth เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นก๊าซของโลหะ เช่น เฟอร์โรเซน ซึ่งเป็นสาร ประกอบของเหล็ก วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ครั้งละเป็นจำนวนมากๆและทิวป์ที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาวมากๆ (มากกว่า 20 ไมโครเมตร) และ มีความบริสุทธิ์มากกว่า 80 % แต่เนื่องจากวิธีนี้มักจะใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายจึงต้องมีความระมัดระวังอย่างมาก นอกจากนี้ยังควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดทิวป์ได้ยากอีกด้วย

2.5.5.4 High Pressure CO Disproportionate Process วิธีนี้จะคล้ายกับวิธี Vapor Phase Growth คือ ใช้ก๊าซของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon source) จึงต้องระมัดระวังอันตรายจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในระหว่างการสังเคราะห์ การควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ทำได้ยากแต่คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะมีปริมาณที่มาก มีความบริสุทธิ์สูงมากประมาณ 80 % และมีสิ่งเจือปนน้อย

2.5.5.5 Hot Filament Enhance CVD (HF-CVD) สำหรับวิธีนี้ จะมีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (Filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแก่ก๊าซ วิธี HF-CVD นี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้อง ปฏิบัติการและในเชิงพาณิชย์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร



รูปที่ 2.19 แสดงวิธี HF-CVD

72153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการคือ ใช้ไฟฟ้ากระแสสูงจ่ายให้ขดลวดความร้อน เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวด มีฐานรองรับสำหรับวางโลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก (Fe) และ โคบอล (Co) ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา (Chamber) จะมีท่อนำก๊าซซึ่งเป็นก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ เช่น ไอของแอลกอฮอล์ หรือ มีเทน (CH_4) เป็นต้น เข้ามาภายในระบบ ความร้อนจากขดลวดความร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ 1600–2000°C จะทำให้โมเลกุลของก๊าซมีอุณหภูมิสูงและถูกเร่งปฏิกิริยาโดยโลหะตัวเร่ง อะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆจะแตกตัวออกจากโมเลกุลของก๊าซและไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์

2.6 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ คือ เป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำมีความแข็งแรงสูงและเบา ทั้งยังมีความยืดหยุ่นที่ดี มีเสถียรภาพดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ และสามารถจับยึดกับโมเลกุลของก๊าซและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เช่น ชนิดของทิวบ์ (Single Wall และ Multi Wall) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนตัวของทิวบ์ ดังนั้น จึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.6.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

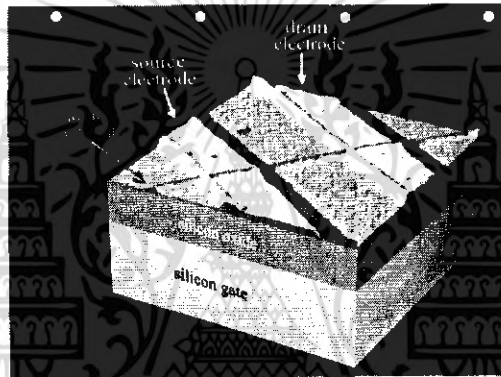
เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าขมอดูลัสสูง สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี จึงสามารถนำมาผสมในวัสดุอื่นๆเพื่อให้ได้วัสดุที่เบาและมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ดี มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี โดยเมื่อไม่นานมานี้ นักวิทยาศาสตร์ขององค์การนาซา(NASA) ประสบความสำเร็จในการผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงในโพลีเมอร์ ซึ่งอาจเป็นจุดเริ่มต้นของการก้าวไปสู่การสังเคราะห์พลาสติกที่สามารถนำไฟฟ้าได้ และมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กก็เป็นได้

2.6.2 ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวน้อยมาก (ค่า Aspect-ratio สูง) นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์มีเสถียรภาพที่ดีและสามารถจ่ายอิเล็กทรอนิกส์ได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าต่ำจึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ ในอุปกรณ์ เช่น จอแสดงผล หลอดไฟฟ้าประหยัดพลังงาน แหล่งกำเนิด X-ray ขนาดเล็กและแหล่งกำเนิด Microwave ขนาดเล็ก เป็นต้น

2.6.3 ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์เทียบเท่ากับ 1 มิติจึงทำให้มีการนำไฟฟ้าแบบ Ballistic คือไม่มีการกระจัดกระจายของอิเล็กตรอนตลอดความยาวของทิวบ์ ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ตีเหมาะที่จะใช้ ในวงจรรนาโนอิเล็กทรอนิกส์ และนอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย โดยเมื่อไม่นานมานี้บริษัทไอบีเอ็ม และกลุ่มของ Prof. Dekker ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างทรานซิสเตอร์ และลอจิกเกตจาก Single Wall คาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นครั้งแรกของโลก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในคอมพิวเตอร์ในอนาคตได้ ทำให้ลดขนาดของอุปกรณ์ และปริมาณในการกินกระแสไฟฟ้าลงได้



รูปที่ 2.20 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการสร้างทรานซิสเตอร์

2.6.4 ใช้สร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร มีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นโพรบของเครื่องมือวิเคราะห์ เช่น Scanning Probe Microscope (SPM), Atomic Force Microscopy (AFM) และประดิษฐ์เป็นนาโนคีม (Nano-Tweezers) สามารถคัดแปลงโดยนำ Functional group ต่างๆ เช่น $-COOH$ มายึดติดที่ปลายทิวบ์เพื่อนำไปใช้ในด้านการชีววิทยาและการแพทย์ได้ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถนำมาสร้างเป็นเซนเซอร์ทางเคมีได้ อีกด้วย เช่น ทำเป็นเซนเซอร์ก๊าซ เป็นต้น

2.6.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตรและมีพื้นผิวที่มาก ทำให้เป็นที่สนใจที่จะนำมาใช้ในการเก็บก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ซึ่ง

เป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม โดยมีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dillon แสดงผลการคำนวณว่า SWCNTs จะสามารถกักเก็บไฮโดรเจนได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของทิว์บ์มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ห่ออนุภาคขนาดนาโนของเหล็ก

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงเครื่องมือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ห่ออนุภาคขนาดนาโนของเหล็ก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 TEMs (Transmission Electron Microscopes)

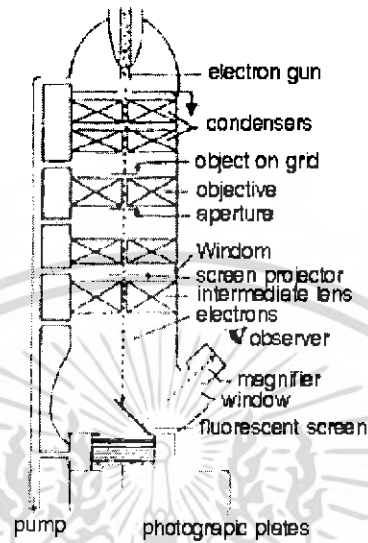
เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบางซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษ เพื่อให้ลำอิเล็กตรอนผ่านได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเหมาะสำหรับศึกษา รายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก



รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEMs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ระบบการทำงานของ TEMs



รูปที่ 3.2 แผนภาพการทำงานของ (TEMs)

การทำงานของ TEMs จะประกอบด้วยระบบที่สำคัญ 4 ระบบคือ

ระบบสุญญากาศ (Vacuum system) ประกอบด้วยเครื่องดูดอากาศ 2 แบบ ได้แก่ เครื่องดูดอากาศแบบ mechanical pump และเครื่องดูดอากาศที่ใช้ น้ำมันแบบ diffusion pump หรืออาจเป็นแบบ ion getter pump ซึ่งจะทำงานร่วมกัน โดยเริ่มจากการทำให้ภายในคอลัมน์เป็นสุญญากาศที่มีความดันประมาณ 10^{-3} - 10^{-6} torr และต้องกำจัดโมเลกุลของก๊าซต่างๆ ออกให้หมด เนื่องจากโมเลกุลเหล่านี้จะเกิดการดูดกลืนอิเล็กตรอนและทำให้ลำอิเล็กตรอนเกิดการกระเจิง ประจุอิเล็กตรอนกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ภาพที่ได้ไม่คมชัด นอกจากนี้ โมเลกุลของก๊าซอาจเกิดปฏิกิริยาการแผ่รังสี (ionization) ซึ่งจะทำให้ลำอิเล็กตรอนไม่คงที่หรือเคลื่อนออกไปจากทิศทางเดิม โมเลกุลของก๊าซอาจจะไปรวมตัวกับไส้หลอดที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจนเกิดการเผาไหม้และขาดในที่สุด หรืออาจไปจับกับตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างเกิดการปนเปื้อนจนไม่สามารถนำไปศึกษาหรือวิเคราะห์ต่อไปได้

ระบบแสงสว่าง (Illuminating) ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์ โดยปืนอิเล็กตรอนจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และคอนเดนเซอร์เลนส์จะทำหน้าที่รวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยใช้สนามแม่เหล็กเพื่อส่งไปยังตัวอย่าง ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า ถ้าให้กระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าแรงสูงมากขึ้น ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนจะสั้นลง ทำให้การแจกแจงรายละเอียดดีขึ้น ดังนั้นการปรับเปลี่ยนความยาวโฟกัสจึงทำได้โดยการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้านั้นเอง คอนเดนเซอร์อาจมีได้มากกว่าหนึ่งชุด เพื่อควบคุมให้อิเล็กตรอนมีความเข้มและขนาดเล็กลง ทำให้ภาพที่ได้มีความสว่างมากขึ้น และยังเป็นกำบังป้องกันตัวอย่างไม่ให้ถูกทำลายด้วยความร้อนที่เกิดจากอิเล็กตรอนด้วย

ระบบคอนเดนเซอร์เลนส์นี้จะมีแผ่นโมลิบดีนัมอยู่ในช่องว่างซึ่งจะมีรูกลมๆ ขนาดเล็กที่เรียกว่า Aperture เพื่อควบคุมลำอิเล็กตรอนให้เป็นจุดกลมที่สมบูรณ์ รวมทั้งป้องกันการกระจายตัวของอิเล็กตรอนซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความคมชัดของภาพ สำหรับขนาดของช่อง aperture นี้ ยังมีขนาดเล็ก จะยิ่งทำให้การแจกแจงรายละเอียดของภาพดีขึ้น แต่ความคมชัดจะลดลง

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

ระบบบันทึกภาพ (Photographic system) ประกอบด้วยชัตเตอร์และเครื่องวัดแสง โดยระบบนี้จะอยู่ใต้ Projectors lens ชัตเตอร์จะทำหน้าที่ปิดหรือเปิดให้ลำแสงอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนแผ่นรับภาพเรืองแสง

3.2 SEMs (Scanning Electron Microscopes)

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



รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEMs)

3.2.1 ระบบการทำงานของ SEMs



รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานของ SEMs

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีระบบการทำงานเหมือนกับแบบส่องผ่าน แต่มีสิ่งที่แตกต่างกันคือระบบภาพและแสดงผล โดยภาพที่ได้จะถูกส่งสัญญาณเพื่อไปขยาย แล้วจึงแปลภาพบนจอ CRT (Cathode Ray Tube) คอลัมน์ของ SEMs จะประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนเดนเซอร์เลนส์เช่นเดียวกับ TEM ลำอิเล็กตรอนที่ผ่าน objective lens ไปตกลงบนตัวอย่างนั้น สามารถที่จะบังคับทิศทางเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างได้ด้วย และมี scanning generator อยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวสุดท้ายกับ objective lens ลำอิเล็กตรอนนี้เป็น Primary electron โดยจะถูกโฟกัสลงบนตัวอย่างทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวอย่างส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เรียกว่า Secondary electron และถูกรวบรวมโดย electron collector ซึ่งจะถูกนำไปขยายและแปลสัญญาณให้เกิดเป็นภาพบนจอ CRT ซึ่งสามารถดูได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกไว้บนฟิล์ม ความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับพื้นผิวของตัวอย่าง ถ้าพื้นผิวของตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่ขรุขระ นอกจากนี้ที่ Objective lens จะมีช่อง Aperture เช่นกันเพื่อช่วยเพิ่มความลึกของภาพ SEMs นี้ อาจติดตั้งและต่อเติมอุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เช่น Backscattered electron detector อิเล็กตรอนที่เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้จะช่วยในการบอกรายละเอียดของรูปร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนที่ลึกเกินกว่าที่ Secondary electron ทำการตรวจสอบได้ หรือทำการติดตั้งระบบ EDS เพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุ หรือติดตั้ง Transmitted electron detector เพื่อศึกษาลักษณะภายในของตัวอย่างที่ทำให้บาง เป็นต้น

3.3 EDX (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer)



รูปที่ 3.5 Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer

3.3.1 คุณสมบัติทั่วไป

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ขนาดชิ้นงานสามารถวิเคราะห์ชิ้นงานเล็กสุดได้ถึง 50 ไมครอน โดยใช้วิธีการวัดในหลักการ Energy Dispersive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X-ray Fluorescence ตัวอย่างการวิเคราะห์ได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และผงได้ วิเคราะห์ในบรรยากาศปกติ โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นชุดประมวลผลและควบคุมระบบการทำงาน

3.3.2 คุณสมบัติพิเศษ

- (1) ระบบการโฟกัสลำแสงของรังสีเอ็กซ์เป็นแบบ Polycapillary
- (2) สามารถวิเคราะห์ธาตุตั้งแต่ธาตุ Na ถึง U
- (3) สามารถติดตั้งอุปกรณ์กำหนดตำแหน่งตัวอย่างด้วยกล้อง CCD ได้
- (4) สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่นวางชิ้นงานจากหน้าต่างซอฟต์แวร์
- (5) วัดความหนาและส่วนผสมทางเคมีของแผ่นฟิล์มบางๆหรือเคลือบผิวได้
- (6) สามารถติดตั้งอุปกรณ์ Transmission Image ได้
- (7) สามารถวิเคราะห์แบบ Mapping ชนิด Step Mapping และ Line Mapping ได้

3.3.3 ประยุกต์การใช้งาน

เหมาะสำหรับต้องการวิเคราะห์งานที่ต้องการความรวดเร็ว สามารถทดสอบชิ้นงานโดยตรงได้ ไม่ต้องเตรียมชิ้นงานแบบการใช้เครื่อง Spark Emission หรือ ย่อยสลายตัวอย่างก่อนแบบการใช้งานเครื่อง AAS หรือ ICPS

- (1) โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์สามารถใช้วิเคราะห์หาธาตุหนัก เช่น Pb, Cd, Hg และ Cr ตามระเบียบว่าด้วย การจำกัดการใช้สารอันตรายบางชนิดในเครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ (RoHS)
- (2) ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น โรงงานหล่อทองแดง หล่ออลูมิเนียม
- (3) ใช้ในสถาบันวิจัยและพัฒนาฯ สถาบันศึกษา โรงพยาบาล นิติวิทยาศาสตร์ หรือสถานที่รับวิเคราะห์งาน เป็นต้น

3.4 XRD (X-Ray Diffractometer)



รูปที่ 3.6 X-Ray Diffractometer

3.4.1 คุณสมบัติทั่วไป

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ และวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพ โดยอาศัยหลักการ X-ray Diffractometer ซึ่งเป็นการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเกิดจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าขั้วแคโทดทำให้อิเล็กตรอนจับกันหนาแน่น เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนเป้าที่ขั้วแอโนด แล้วมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมาชนกับ ชิ้นงานตัวอย่างแล้วเกิดอันตรกิริยาต่างๆบนชิ้นงาน ส่วนรังสีที่สะท้อนกลับมาจะถูกตรวจวัดด้วยชุด Detector เพื่อแปลงสัญญาณออกมาในรูปแบบ Diffractogram โดยควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์

3.4.2 คุณสมบัติพิเศษ

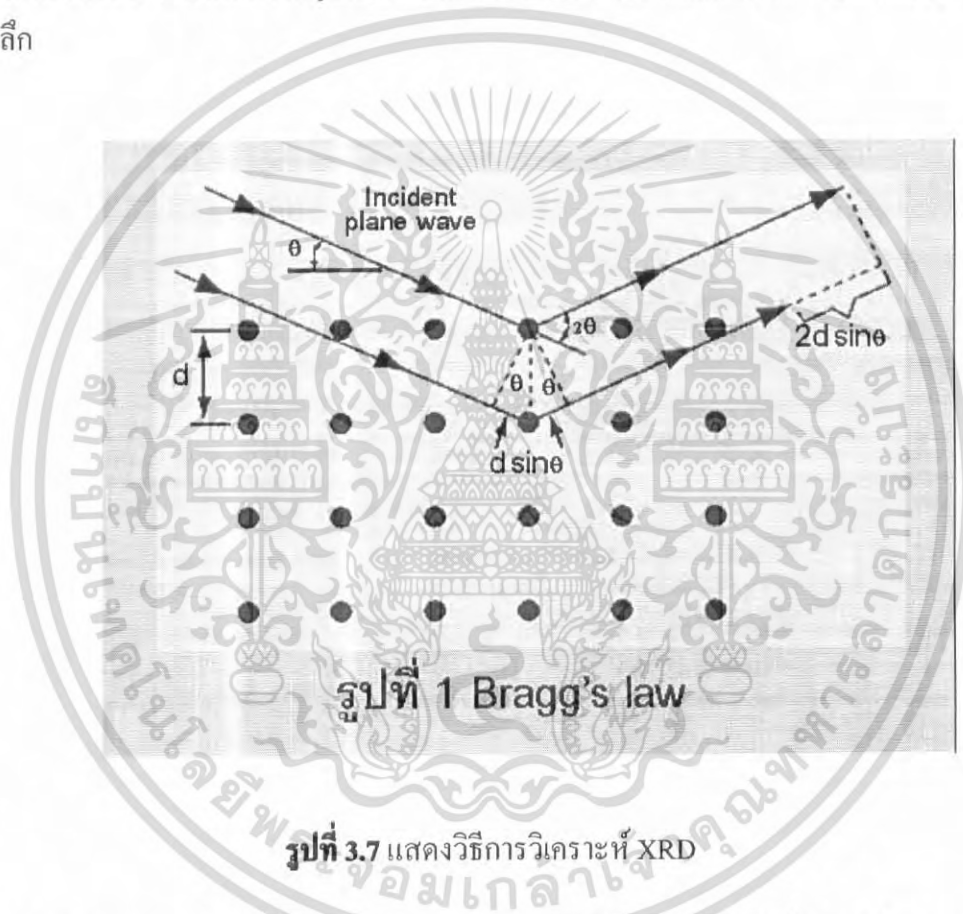
- (1) ชุด Goniometer เป็นแบบ Vertical 0-0
- (2) มีระบบ โฟกัสลำแสงแบบ Polycapillary
- (3) สามารถวิเคราะห์แบบ Qualitative ได้
- (4) สามารถวิเคราะห์แบบ Quantitative ได้
- (5) สามารถวิเคราะห์แบบ Crystalline Structural analysis ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (6) สามารถวิเคราะห์แบบ State Analysis ได้
 (7) รัศมี Goniometer ได้ถึง 275 มิลลิเมตร

3.4.3 ประยุกต์การใช้งาน

วัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายใน โครงสร้างอย่างเป็นระเบียบซึ่ง การจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะ อยู่ห่างกันเป็นระยะ d ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับธรรมชาติ ของผลึก



ในปี ค.ศ. 1912 W.H.Bragg และ W.L.Bragg ได้เสนอแนวคิดว่าเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบ ระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบบ Theta รังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน Theta เท่ากับมุมตกกระทบบดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรถูกเสนอในรูปสมการ

$$2d \sin \theta = n \lambda$$

ซึ่งสมการดังกล่าว เรียกว่า " Bragg 's Law "

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง

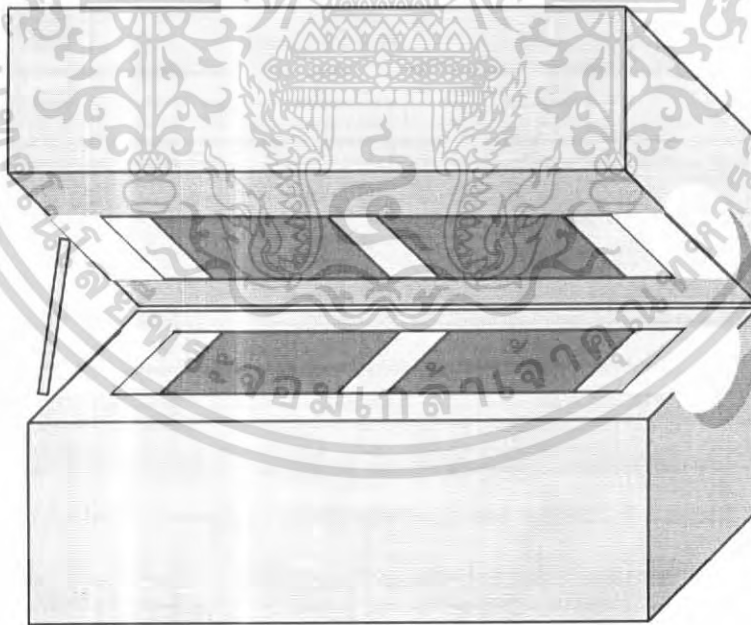
การเตรียมอนุภาคขนาดนาโนของเหล็กจากเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีไพโรไลซิส

4.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียม โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กด้วยวิธีไพโรไลซิส โดยใช้เฟอร์ไรต์ ซึ่งมีเหล็ก เป็นส่วนประกอบใน โครงสร้าง
2. หาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เหล็กขนาดเล็กและเกิดสม่ำเสมอ

4.2 การออกแบบเตาฮีตเตอร์

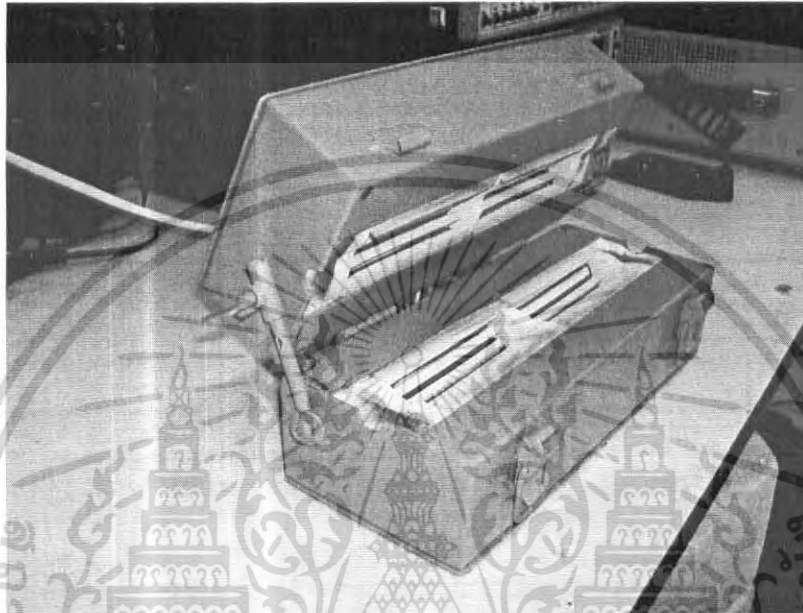
1. ซ้อฮีตเตอร์ให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ ซึ่งประกอบไปด้วยฮีตเตอร์และเซรามิกกันความร้อน
2. ออกแบบ โครงสร้างภายนอกของเตาแล้วส่งให้ช่างทำดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงเตาฮีตเตอร์ที่ได้ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อได้โครงสร้างของเตาฮีตเตอร์แล้วก็ซื้อสายลึงไฟและอุปกรณ์ไฟฟ้ามาต่อจนได้เตาฮีตเตอร์ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เตาฮีตเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

4.3 อุปกรณ์และสารเคมี

4.3.1 อุปกรณ์ประกอบ

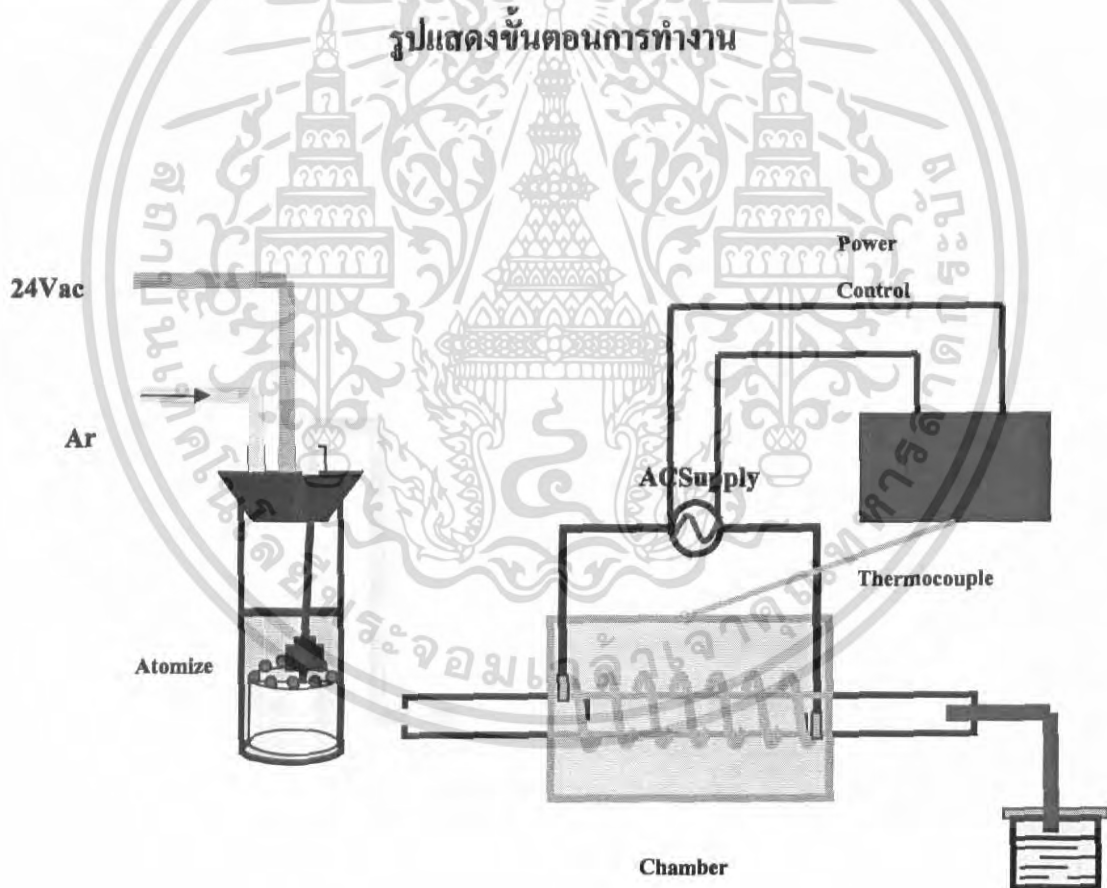
- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1. ท่อสายยาง | 2. เครื่องตีหมอก (Atomizer) |
| 3. ฉนวนกันความร้อน | 4. ท่อควอตซ์ (Quartz tube) |
| 5. ชุด Power Control | 6. เครื่องชั่งดิจิตอล |
| 7. เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) | 8. ขดลวดความร้อน (Heater) |
| 9. ไม้บรรทัด | 10. ถูมือกันสาร |
| 11. ปากคีบ (Forceps) | 12. ไขควง |
| 13. ไม้บรรทัด | 14. คัตเตอร์ (Cutter) |
| 15. นาฬิกา | 15. เข็มฉีดยา (Siring) |
| 16. เทปพันเกี่ยว | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 อุปกรณ์เคมีและสารเคมี

1. น้ำกลั่นบริสุทธิ์ (DI water)
2. ก๊าซอาร์กอน(Ar)
3. ซ็อนต์กสารเคมี
4. เอทานอล(Ethanol)
5. สารเฟอร์โรเซน (Ferrocene)
6. เมทานอล (Methanol)
7. กระจกบอดวง
8. ปากกาเพชร
9. ก๊าซไนโตรเจน (N_2)
10. แผ่นซิลิคอน (Si Substrate)
11. อะซีโตน (Acetone)

4.4 วิเคราะห์ผลที่น่าจะเกิดขึ้นก่อนการทดลอง



รูปที่ 4.3 แสดงการทดลองของวิธี Pyrolysis

การทำงานเริ่มจากนำเฟอร์โรเซนผสมกับตัวทำละลายในอัตราส่วนที่เหมาะสม จากนั้นเครื่องตีหมอก (Atomizer) จะส่งคลื่นความถี่สูงออกมายังสารละลายทำให้สารละลายบางส่วนเกิดเอกซารินเป็นเอกซารทสี่วงไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นหมอก จากนั้นก๊าซอาร์กอนก็จะพาหมอกเหล่านี้เข้าไปยังฮีตเตอร์ ที่มีอุณหภูมิคงที่ที่เหมาะสม เมื่อละอองของเฟอร์โรเซนโค่นความร้อน เฟอร์โรเซนก็จะเกิดการแตกตัวได้อนุภาคเหล็กออกมา หล่นไปเกาะบนแผ่นซิลิกอน โดยอนุภาคเหล็กที่ได้นี้จะสามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์ได้

4.5 ขั้นตอนการทดลอง

4.5.1 ขั้นตอนการเตรียม

1) เริ่มแรกให้ล้างอุปกรณ์ต่างๆ ให้สะอาด เช่น กระจกบอควง หลอดควอตซ์ในเตาฮีตเตอร์ เมื่อล้างเสร็จแล้วใช้ก๊าซไนโตรเจนเป่าให้แห้ง

2) ชั่งกระจกบอควงแล้วชั่งน้ำหนักของกระจกบอควง เทเอธานอลลงในกระจกบอควง แล้วนำไปชั่ง ชั่งน้ำหนักของสารแล้วนำไปคำนวณน้ำหนักของเฟอร์โรเซนโดยคิดในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก จากนั้นชั่งเฟอร์โรเซนตามน้ำหนักที่คำนวณได้ แล้วผสมกับสารตัวทำละลาย เอาลูมิเนียมฟอสเฟตปิดปากกระจกบอควงแล้วนำไปอัลตราโซนิก (Ultrasonic) ประมาณ 30 นาที เพื่อให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันยิ่งขึ้น

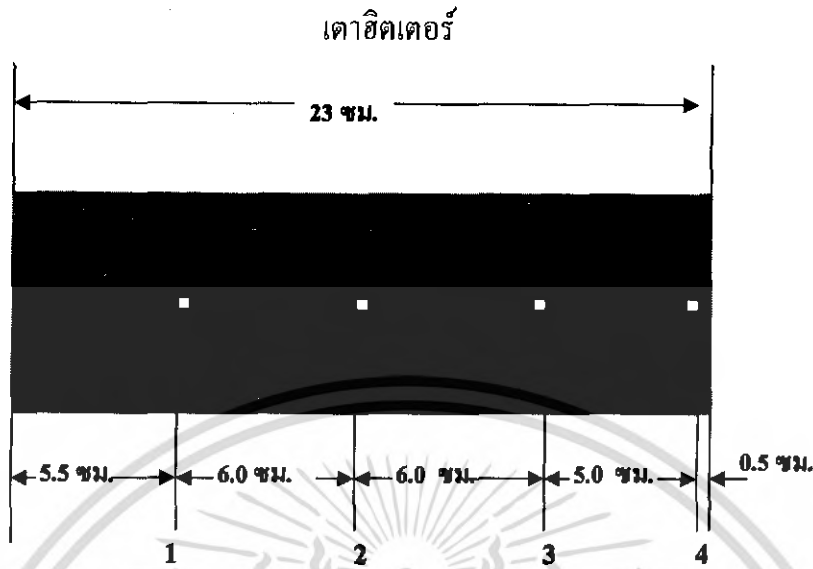
3) ตัดแผ่น Si ให้มีขนาดประมาณ 0.7×0.7 ตารางเซนติเมตร แล้ววางในบิกเกอร์ที่มีเอธานอลอยู่ จากนั้นนำไปอัลตราโซนิกประมาณ 30 นาที เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่น

4) ประกอบเตาฮีตเตอร์ (Chamber) โดยวางฉนวนกันความร้อนไว้เป็นฐาน วางหลอดความร้อน (Heater) ไว้บนร่องของฉนวนกันความร้อน จากนั้นสอดท่อควอตซ์เข้าไปในหลอดความร้อน แล้วนำแผ่นซิลิกอนที่สะอาดแล้วไปเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนแล้วสอดเข้าไปในท่อควอตซ์ยังตำแหน่งที่ต้องการทดสอบ จากนั้นนำฉนวนกันความร้อนปิดทับตัวล่างอีกทีเพื่อทำให้อุณหภูมิคงที่

5) นำเครื่องตีหมอก (Atomizer) เข้าไปในกระจกบอควง ต่อก๊าซอาร์กอนเข้า Flow meter แล้วต่อสายจาก Flow meter เข้ายังกระจกบอควงที่มี เครื่องตีหมอกอยู่ แล้วต่อสายจากกระจกบอควงไปเข้าท่อควอตซ์ ที่ปลายอีกข้างหนึ่งของท่อควอตซ์ต่อสายลงน้ำเพื่อให้เป็นระบบปิด ใช้เทปพันเกรียวปิดรูทู่ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซออกซิเจนจากภายนอกเข้าสู่ระบบ

6) ที่ขดหลอดความร้อนจะต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 24 Vac/40A ที่หม้อแปลงจะต่ออยู่กับชุดควบคุมกำลังงาน (Control Power) ซึ่งมีแอมมิเตอร์วัดกระแส และตัวตั้งค่าอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ (Automatic) และมีเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ในเตาฮีตเตอร์ป้อนกลับมายังชุดควบคุมกำลังงาน เพื่อควบคุมการจ่ายพลังงานให้ขดหลอดความร้อน เพื่อทำให้เตาฮีตเตอร์มีอุณหภูมิคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงการวางตำแหน่งของ Sample

4.5.2 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เปิดก๊าซอาร์กอนแล้วปรับ Flow Rate ตามต้องการ ปล่อยให้ประมาณ 15 นาที เพื่อให้ได้อากาศอื่นออก ให้เป็นระบบปิดในสภาวะก๊าซอาร์กอน
- 2) เปิดชุดควบคุมกำลังงานเพื่อจ่ายกระแสให้ขดลวดความร้อน จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการให้คงที่แล้วรอนจนกว่าจะได้อุณหภูมิของเตาฮีตเตอร์คงที่
- 3) เมื่ออุณหภูมิคงที่แล้วเริ่มเปิดเครื่องตีหมอกเพื่อสร้างหมอกแล้วจับเวลาตามเงื่อนไขต่างๆ เมื่อได้เวลาตามต้องการแล้วก็ปิดเครื่องตีหมอกและชุดควบคุมกำลังงาน รอนจนกว่าเตาฮีตเตอร์เย็นตัวลงแล้วค่อยนำตัวอย่างออกจากท่อควอตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

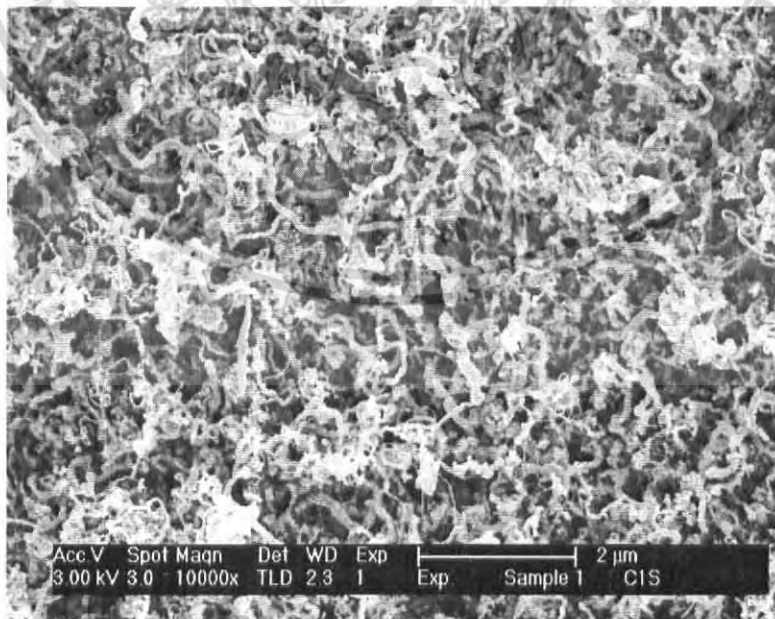
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 ผลกระทบของตำแหน่งที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของตำแหน่งที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กว่าถ้าวางตัวอย่างในตำแหน่งที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กอย่างไร โดยได้วางตัวอย่าง 4 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3 และ 4 โดยมีตัวแปรอื่นๆดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของตำแหน่งที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

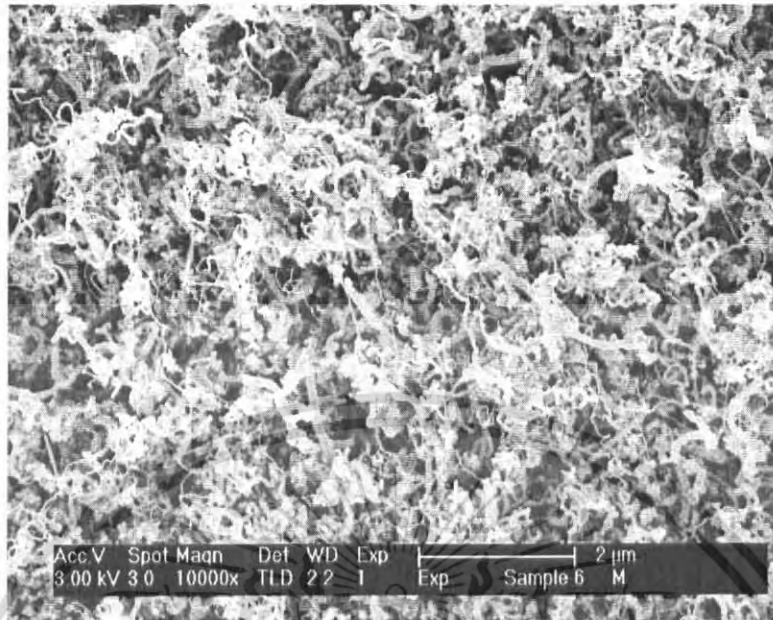
สาร	เอธานอลผสมเฟอร์โรเซน
อัตราส่วนของเฟอร์โรเซน	1.5% โดยน้ำหนัก
อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน	0.5 ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	450 องศาเซลเซียส
เวลาในการทดลอง	15 นาที
ตำแหน่งการวาง	1, 2, 3 และ 4



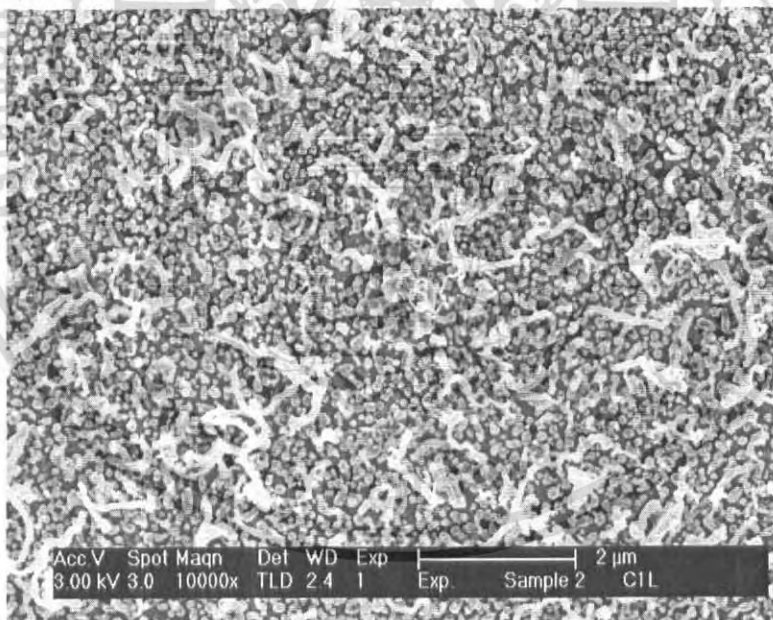
(ก) ตำแหน่งที่ 1

รูปที่ 5.1 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



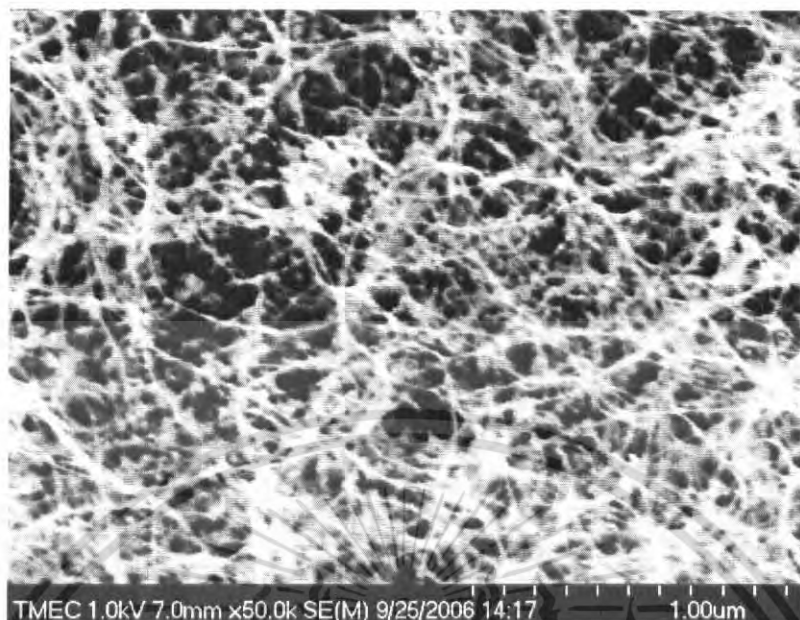
(ข) ตำแหน่งที่ 2



(ค) ตำแหน่งที่ 3

รูปที่ 5.1 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) ตำแหน่งที่ 4

รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลกระทบบของตำแหน่งการวางตัวอย่างที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก (ก) ตำแหน่งที่ 1, (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 และ (ง) ตำแหน่งที่ 4

ในรูปที่ 5.1 (ก) สังเคราะห์ที่ตำแหน่งที่ 1 และ (ข) สังเคราะห์ที่ตำแหน่งที่ 2 จะเห็นว่าเกิดพวกอมอร์ฟัสคาร์บอนและคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้นปกคลุมอย่างหนาแน่นบนแผ่นตัวอย่าง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากคาร์บอนเกิดการแตกตัวได้เร็วกว่าเฟอร์โรเซน เมื่อละอองของสารผสมระหว่างเอทานอลกับเฟอร์โรเซนไหลเข้ามาถึงต้นและกลางเตาฮีตเตอร์ เอทานอลก็เกิดการแตกตัวโดยไม่มีอนุภาคเหล็กที่แตกตัวจากเฟอร์โรเซนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือมีก็เป็นส่วนน้อย ทำให้คาร์บอนแตกตัวเป็นอมอร์ฟัสคาร์บอนและคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวอย่างกระจัดกระจายปกคลุมบนแผ่นตัวอย่างอย่างหนาแน่น ส่วนรูปที่ 5.1 (ค) สังเคราะห์ที่ตำแหน่งที่ 3 จะเห็นว่าอนุภาคเหล็กเกิดขึ้นบนแผ่นตัวอย่างค่อนข้างหนาแน่นและมีพวกอมอร์ฟัสคาร์บอนเกิดปะปนอย่างกระจัดกระจาย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเฟอร์โรเซนได้รับอุณหภูมิในเวลาที่เหมาะสมแล้วหลังจากการเคลื่อนที่ผ่านกลางเตาฮีตเตอร์ทำให้เฟอร์โรเซนแตกตัวเป็นอนุภาคเหล็กที่ปลายเตาฮีตเตอร์ แต่ที่ยังมีพวกอมอร์ฟัสคาร์บอนปะปนอยู่นั้นน่าจะมาจากคาร์บอนบางส่วนที่ไม่ได้แตกตัวที่ต้นเตาฮีตเตอร์เคลื่อนตัวมาแตกตัวที่ปลายเตาฮีตเตอร์ และบางส่วนเกิดจากการพัดพาของก๊าซอาร์กอนจากต้นเตาฮีตเตอร์สู่ปลายเตาฮีตเตอร์ ส่วนในรูปที่ 5.1 (ง) สังเคราะห์ที่ตำแหน่งที่ 4 พบว่าที่ตำแหน่งนี้มีเส้นเดี่ยวเกิดขึ้นอย่างหนาแน่น ซึ่งสันนิษฐานว่าน่าจะเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียว

หรือไม่ก็เป็นพวกนาโนไวร์ (Nanowire) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่ตำแหน่งนี้มีอนุภาคเหล็กแตกตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม หากมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นจำนวนมากแล้วจึงทำให้ที่ตำแหน่งนี้มีโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนที่ไหลเข้ามาจึงเกิดการแตกตัวได้อย่างสมบูรณ์ในตำแหน่งนี้ จากผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมาจึงสามารถสรุปในหัวข้อนี้ได้ว่า **ที่ตำแหน่งที่ 1 และ 2 เหมาะแก่การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น ที่ตำแหน่งที่ 4 เหมาะแก่การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังชั้นเดียว และที่ตำแหน่งที่ 3 เหมาะแก่การสังเคราะห์อนุภาคเหล็กขนาดนาโน**

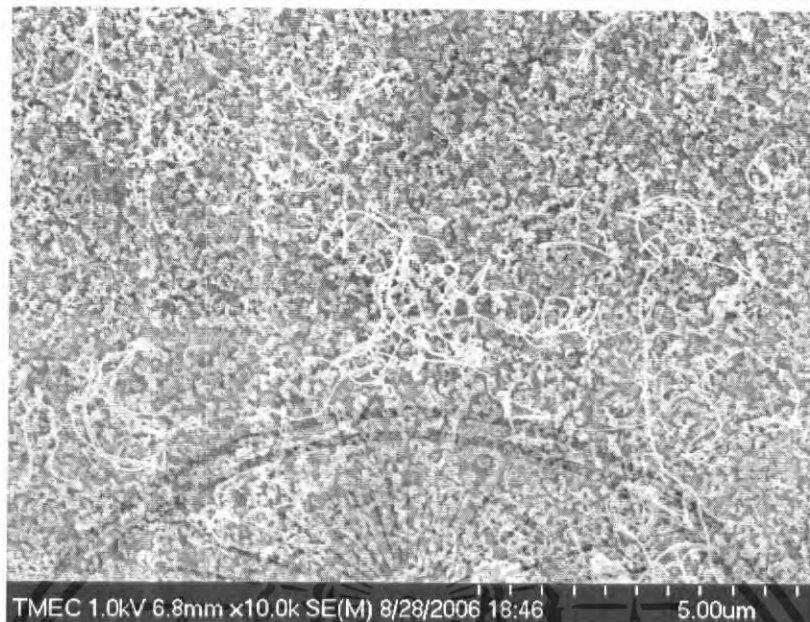
5.2 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กว่า ถ้าใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกันออกไปจะมีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กอย่างไร โดยได้สุ่มใช้อุณหภูมิจำนวน 4 ค่า เพื่อเปรียบเทียบกันคือ 400, 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส และมีตัวแปรอื่นๆ ดังตารางที่ 5.2

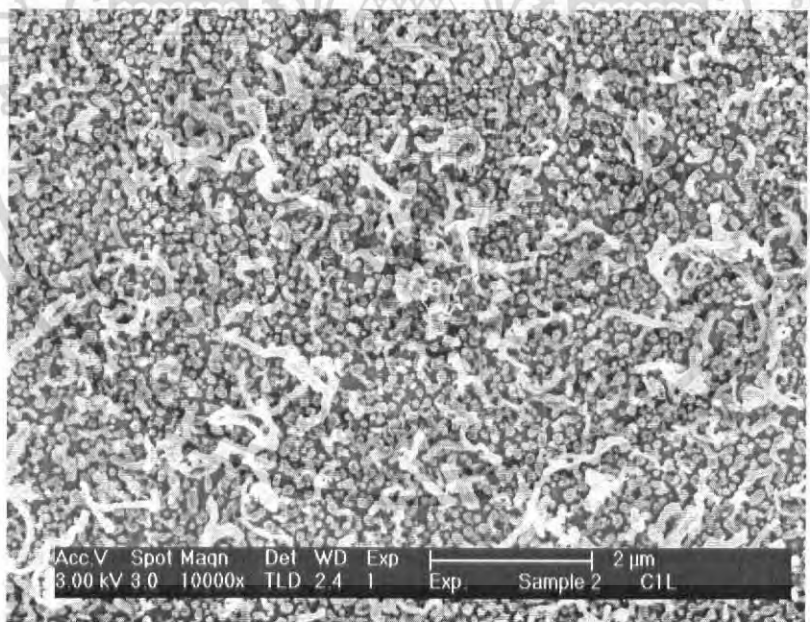
ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

สาร	เอธานอลผสมเฟอร์โรเซน
อัตราส่วนของเฟอร์โรเซน	1.5% โดยน้ำหนัก
อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน	0.5 ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	400,450,500 และ 550 องศาเซลเซียส
เวลาในการทดลอง	15 นาที
ตำแหน่งการวาง	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



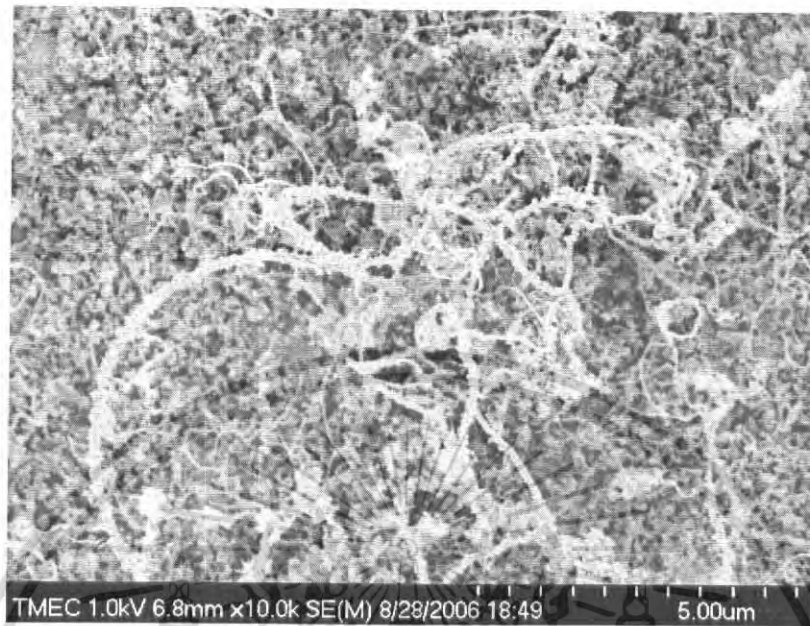
(ก) อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



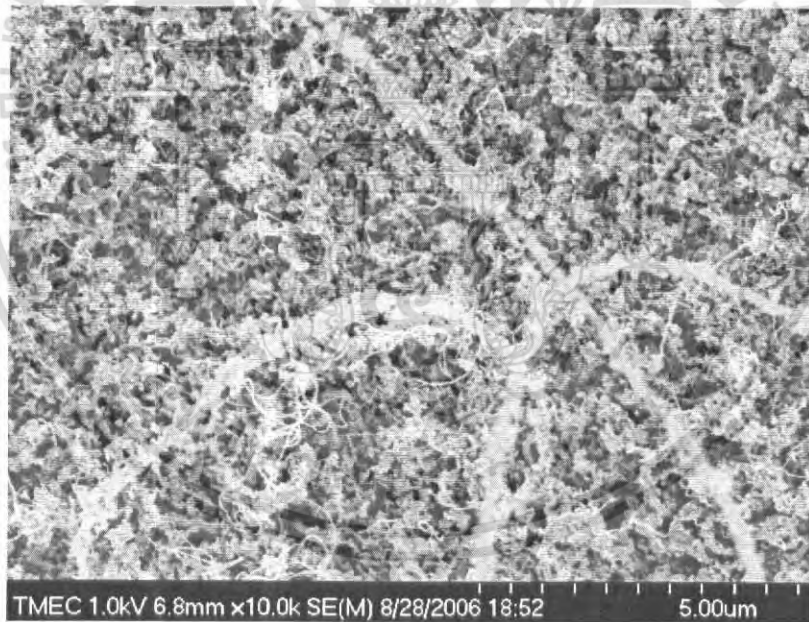
(ข) อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

รูปที่ 5.2 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



(ง) อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเล็ก

(ก) 400 องศาเซลเซียส, (ข) 450 องศาเซลเซียส, (ค) 500 องศาเซลเซียส และ (ง) 550 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 (ก) ใช้อุณหภูมิในการทดลอง 400 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าบนแผ่นตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นพวกอมอร์ฟัสคาร์บอนเกิดขึ้นอย่างหนาแน่นและมีคาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดขึ้นเล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำเกินไป แม้จะวางตัวอย่างอยู่ที่ปลายเตาก็ตาม แต่อุณหภูมิที่ต่ำเกินไปทำให้การแตกตัวของเฟอร์โรเซนเป็นอนุภาคเหล็กเกิดได้ไม่ค่อยดีหรือแทบไม่เกิดเลย จึงทำให้คาร์บอนเกิดการแตกตัวเป็นพวกอมอร์ฟัสคาร์บอน และที่พื้นผิวของตัวอย่างส่วนใหญ่จะเต็มไปด้วยอมอร์ฟัสคาร์บอนซึ่งน่าจะมีผลมาจากการใช้อุณหภูมิต่ำเกินไปทำให้คาร์บอนใช้เวลาในการแตกตัวนานขึ้น เป็นผลให้อะตอมของคาร์บอนเคลื่อนตัวมาถึงปลายเตาศีตเตอร์และคาร์บอนส่วนใหญ่แตกตัวเป็นอมอร์ฟัสคาร์บอน ในรูปที่ 5.2 (ข) ใช้อุณหภูมิในการทดลอง 450 องศาเซลเซียส จะเห็นว่ามีอนุภาคของเหล็กเกิดขึ้นบนแผ่นตัวอย่างค่อนข้างหนาแน่นแต่ก็ยังมีพวกอมอร์ฟัสคาร์บอนเกิดปะปนอยู่ ทั้งนี้เนื่องมาจากเฟอร์โรเซนได้รับอุณหภูมิในเวลาที่เหมาะสมแล้วหลังจากการเคลื่อนที่ผ่านกลางเตาศีตเตอร์ทำให้เฟอร์โรเซนแตกตัวเป็นอนุภาคเหล็กที่ปลายเตาศีตเตอร์ แต่ที่ยังมีพวกอมอร์ฟัสคาร์บอนปะปนอยู่นั้นน่าจะมาจากคาร์บอนบางส่วนที่ไม่ได้แตกตัวที่ต้นเตาเกิดการแตกตัวที่ปลายเตาศีตเตอร์ ส่วนรูปที่ 5.2 (ค) และ (ง) ใช้อุณหภูมิต่ำ 500 และ 550 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งพบว่าโดยส่วนใหญ่เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์และเหมือนมีสิ่งสกปรกเกาะอยู่อย่างหนาแน่นจนมองไม่เห็นพื้นผิวของท่อนาโนทิวบ์ จะเห็นก็แค่เพียงโครงร่างของท่อเท่านั้น ซึ่งไม่ทราบแน่ชัดว่าสิ่งนั้นเป็นสิ่งสกปรกที่เกาะผิวท่อหรือเพราะการแตกตัวที่ไม่สมบูรณ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ **ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การสังเคราะห์อนุภาคเหล็กคือ ประมาณ 450 องศาเซลเซียส**

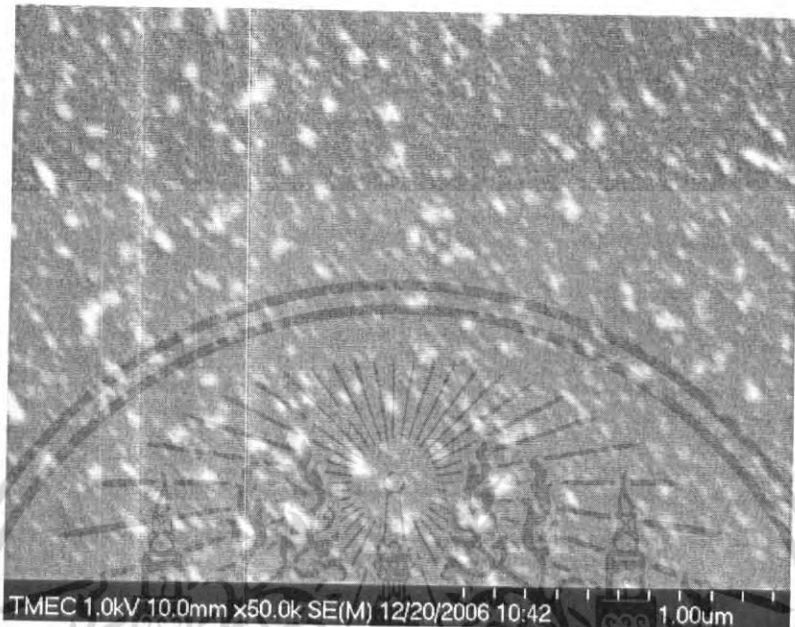
5.3 ผลกระทบของเวลาที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมแก่การสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก โดยในการทดลองได้สุ่มใช้เวลา 6 ค่าคือ 1, 2, 5, 10, 15 และ 30 นาทีและมีตัวแปรอื่นๆคงแสดงในตารางที่ 5.3

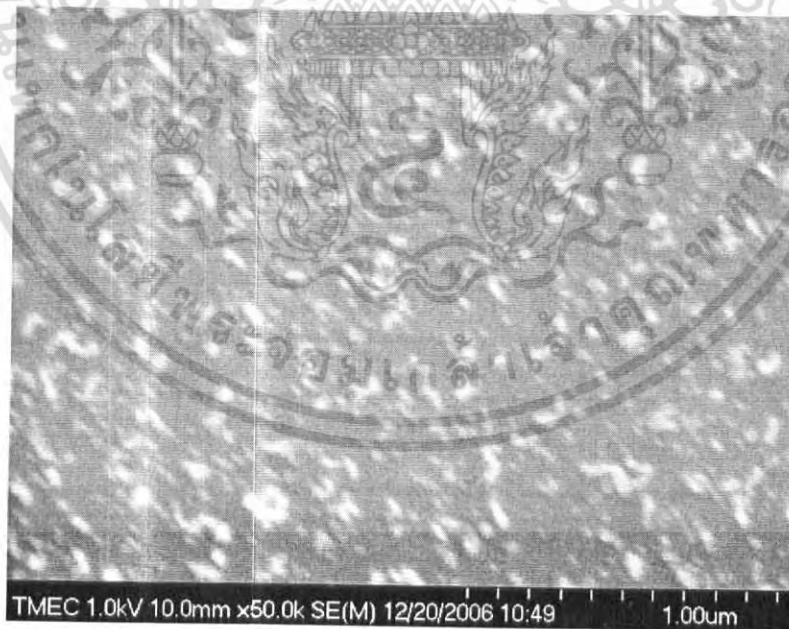
ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของเวลาที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

สาร	เอธานอลผสมเฟอร์โรเซน
อัตราส่วนของเฟอร์โรเซน	1.5% โดยน้ำหนัก
อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน	0.5 ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	450 องศาเซลเซียส
เวลาในการทดลอง	1, 2, 5,10,15 และ 30 นาที
ตำแหน่งการวาง	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 1 นาที



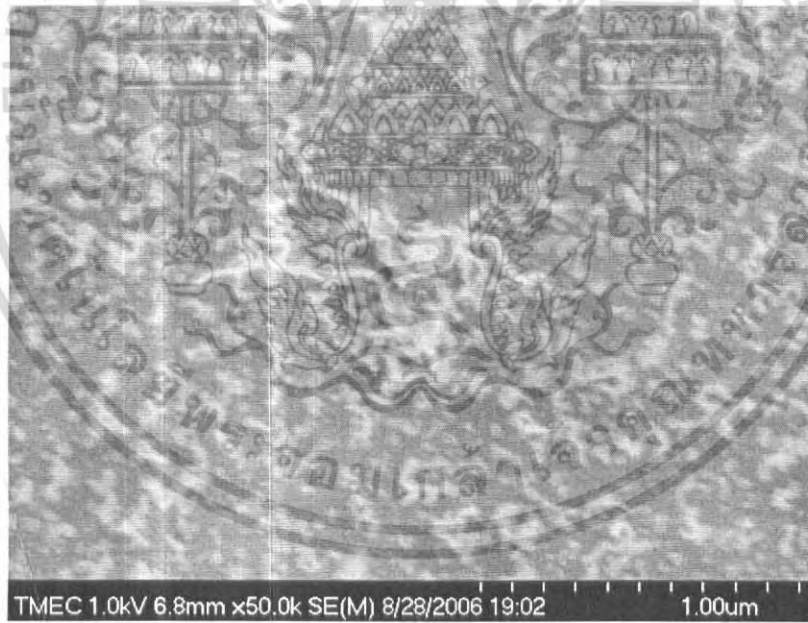
(ข) 2 นาที

รูปที่ 5.3 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



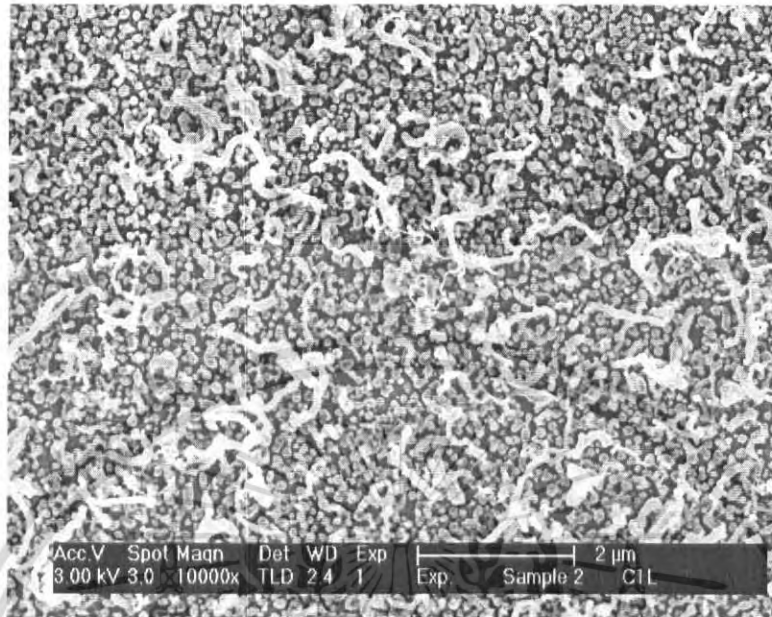
(ค) เวลา 5 นาที



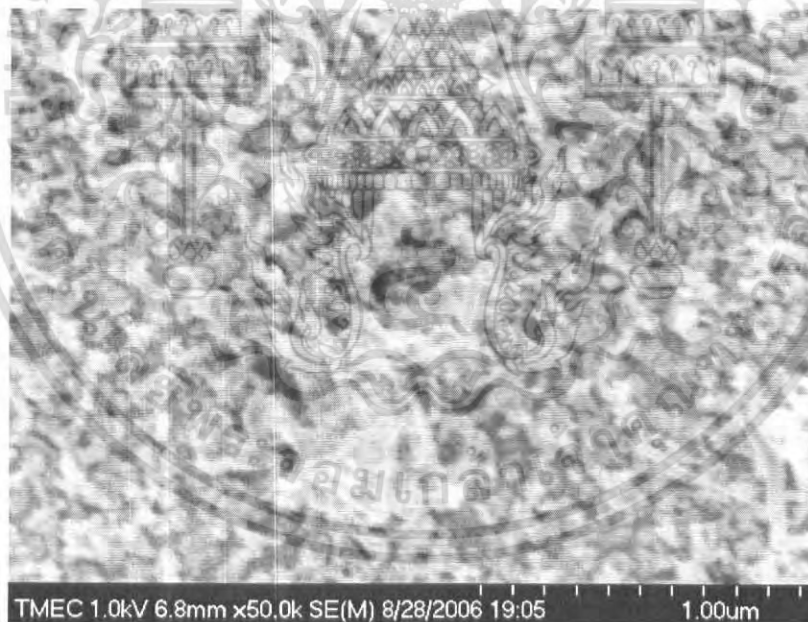
(ง) เวลา 10 นาที

รูปที่ 5.3 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) เวลา 15 นาที



(ฉ) เวลา 30 นาที

รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลของเวลาที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก (ก) 1 นาที, (ข) 2 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 10 นาที, (จ) 15 นาที และ (ฉ) 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.3 แสดงผลกระทบของเวลาในการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กตั้งแต่ 1-30 นาที ซึ่งจากการทดลองพบว่าอนุภาคเหล็กเริ่มก่อตัวตั้งแต่วเวลา 1 นาที (รูปที่ 5.3 (ก)) แต่อนุภาคเหล็กที่ได้นี้เกิดขึ้นอย่างเบาบางไม่หนาแน่นเท่าที่ควร แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการทดลองเป็น 2 นาที (รูปที่ 5.3 (ข)) อนุภาคเหล็กที่ได้มีความหนาแน่นมากขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการทดลองเป็น 5 นาที (รูปที่ 5.3(ค)) พบว่าอนุภาคเหล็กที่หนาแน่นกว่าเดิมอีกและพบว่าเริ่มเกิดเต็มทั่วแผ่นตัวอย่าง แต่เมื่อเพิ่มเวลาดังตั้ง 10 นาทีขึ้นไปพบว่าความสกปรกที่เกิดขึ้นเริ่มก่อตัวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งคาดว่าสิ่งสกปรกเหล่านั้นน่าจะเป็นอนุภาคคาร์บอนที่เริ่มจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเมื่อเวลามากขึ้นใน อุณหภูมิค่า นั้นแสดงว่าเวลาสามารถควบคุมความหนาของอนุภาคเหล็กและสิ่งสกปรกที่ปะปนกับอนุภาคเหล็กด้วย **ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เวลาที่เหมาะสมแก่การสังเคราะห์อนุภาคเหล็กคือ 5 นาที**

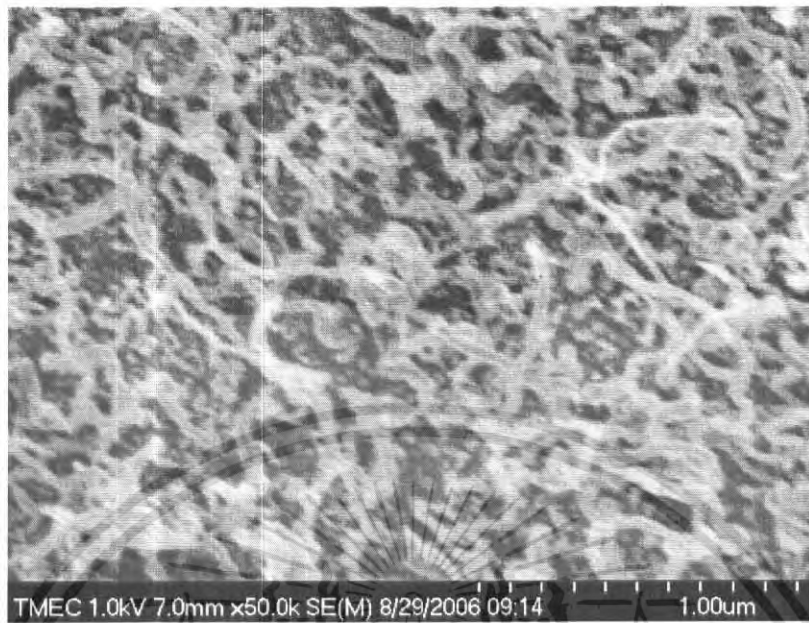
5.4 ผลกระทบของเปอร์เซ็นต์เฟอร์โรโรเซนต่อเอธานอลที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์เฟอร์โรโรเซนต่อเอธานอลที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กว่าถ้าใช้เฟอร์โรโรเซนในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กอย่างไร โดยได้สุ่มอัตราส่วนของเฟอร์โรโรเซนต่อเอธานอล 4 ค่าคือ 0.1%, 0.5%, 1.0% และ 1.5% และมีตัวแปรอื่นๆดังตารางที่ 5.4

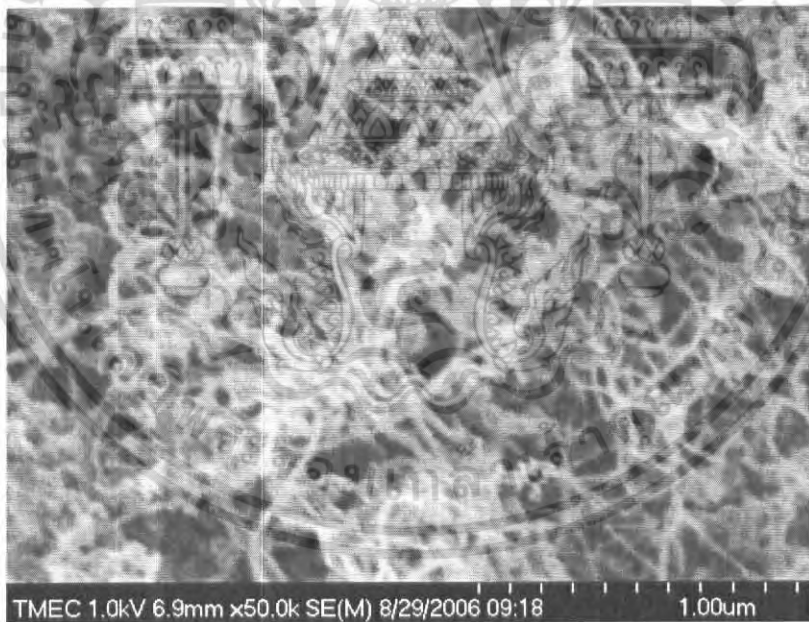
ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของเปอร์เซ็นต์เฟอร์โรโรเซนต่อเอธานอลที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

สาร	เอธานอลผสมเฟอร์โรโรเซน
อัตราส่วนของเฟอร์โรโรเซน	0.1%, 0.5%, 1.0% และ 1.5% โดยน้ำหนัก
อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน	0.5 ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	450 องศาเซลเซียส
เวลาในการทดลอง	15 นาที
ตำแหน่งการวาง	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



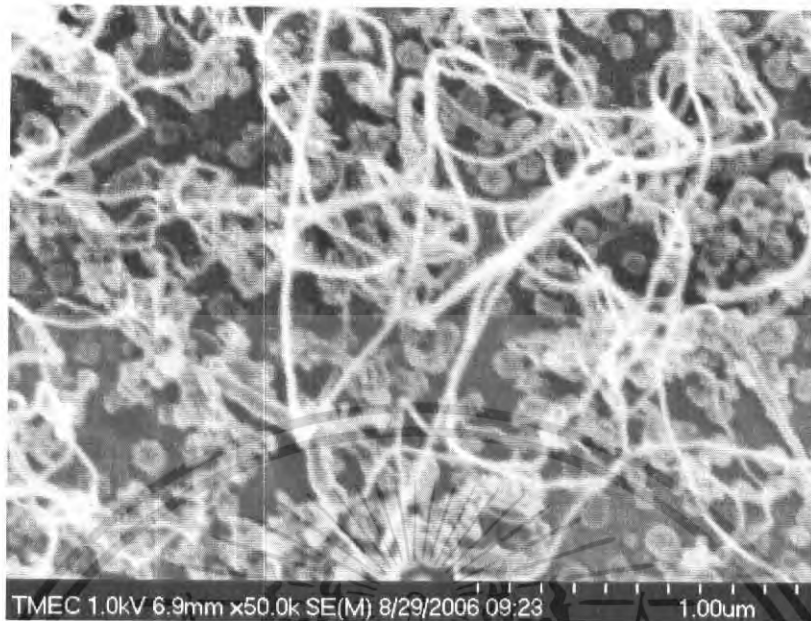
(ก) เฟอร์โรเซน 0.1 %



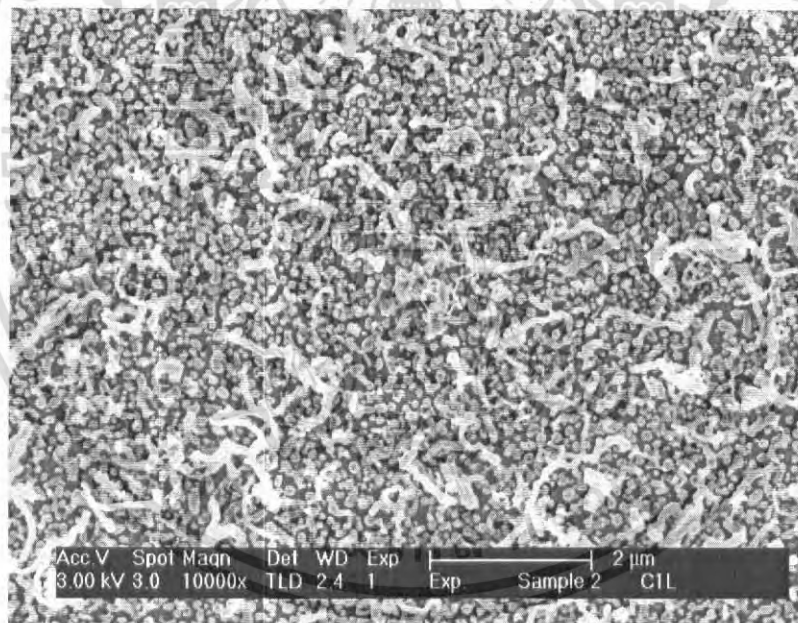
(ข) เฟอร์โรเซน 0.5 %

รูปที่ 5.4 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) เฟอโรโรเซน 1.0 %



(ง) เฟอโรโรเซน 1.5 %

รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลกระทบของเปอร์เซ็นต์ต่อเอธานอลที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเล็ก (ก) 0.1%, (ข) 0.5%, (ค) 1.0% และ (ง) 1.5 %

จากรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าที่เฟอโรโรเซน 0.1 % จะมีพวกคาร์บอนนาโนทิวบ์ปะปนอยู่ ยิ่งเพิ่มเฟอโรโรเซนมากขึ้นเป็น 0.5 % ยิ่งทำให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์มากขึ้นและมีขนาดเล็กลงตามลำดับเช่นเดียวกับเพิ่มเป็น 1.0 % ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เมื่อเพิ่มเฟอโรโรเซนไปอีกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 1.5 %พบว่าเริ่มได้เงื่อนไขที่ต้องการเพราะมีพวกคาร์บอนนาโนทิวบ์ปะปนน้อยลง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อใช้ปริมาณอัตราส่วนเฟอร์โรเซนมากขึ้นจะใช้ปริมาณอัตราเอทานอลน้อยลง ที่เฟอร์โรเซนน้อยการแตกตัวของเฟอร์โรเซนเป็นหลักจะน้อยตามทำให้สภาวะเหมาะแก่การแตกตัวของคาร์บอนเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ แต่เมื่อใช้เฟอร์โรเซนมากขึ้นการแตกตัวส่วนใหญ่จะเป็นเฟอร์โรเซนซึ่งจะได้อนุภาคเหล็กออกมามากและมีคาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดขึ้นน้อยจึงเป็นเงื่อนไขที่ต้องการ **ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ของเฟอร์โรเซนที่เหมาะสมแก่การสังเคราะห์อนุภาคเหล็กคือ 1.5 %**

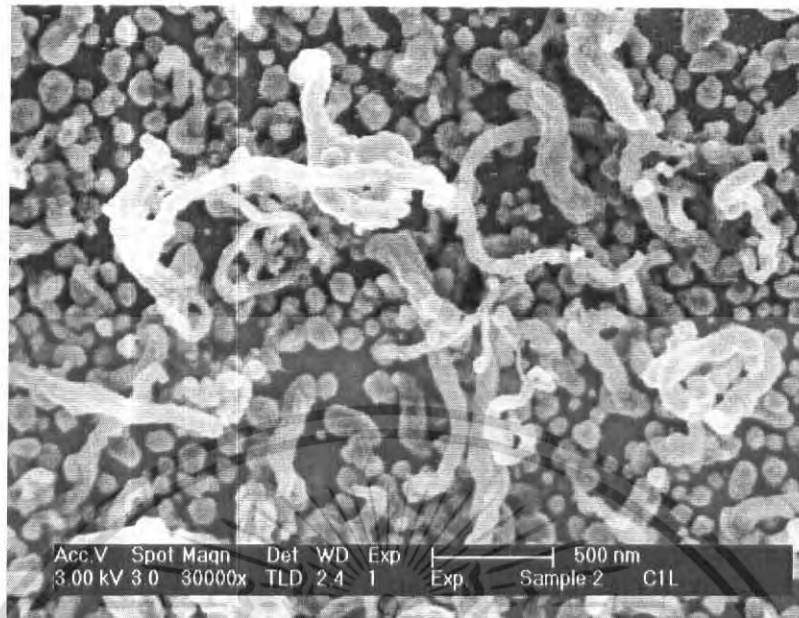
5.5 ผลกระทบของอัตราไหลก๊าซอาร์กอนที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของอัตราไหลก๊าซอาร์กอนที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กว่า ถ้าใช้อัตราไหลของก๊าซอาร์กอนในปริมาณที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กอย่างไร โดยได้ทำการสุ่มใช้อัตราไหลก๊าซตัวพา 4 ค่าคือ 0.5L/min, 1.0L/min, 1.5L/min และ 2.0L/min และมีตัวแปรอื่นๆดังตารางที่ 5.5

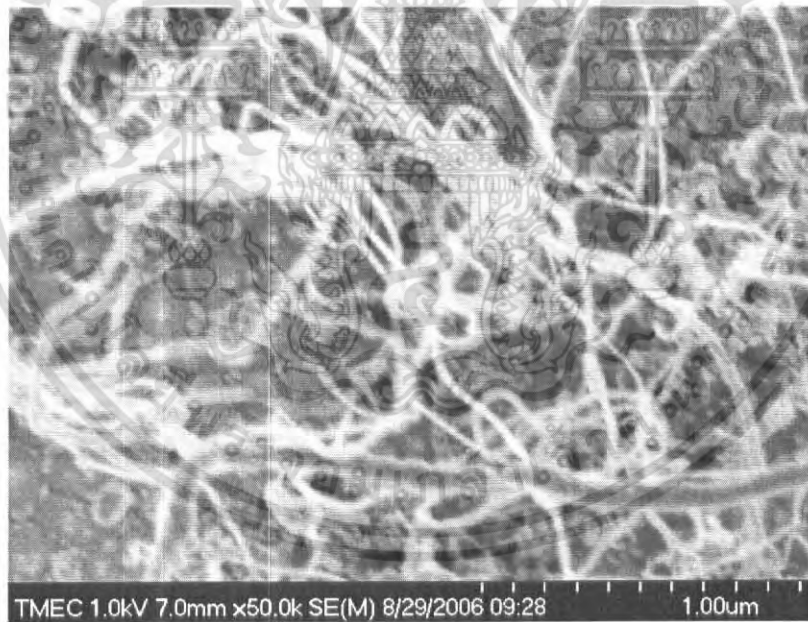
ตารางที่ 5.5 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของอัตราไหลก๊าซตัวพาที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

สาร	เอทานอลผสมเฟอร์โรเซน
อัตราส่วนของเฟอร์โรเซน	1.5% โดยน้ำหนัก
อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน	0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	450 องศาเซลเซียส
เวลาในการทดลอง	15 นาที
ตำแหน่งการวาง	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



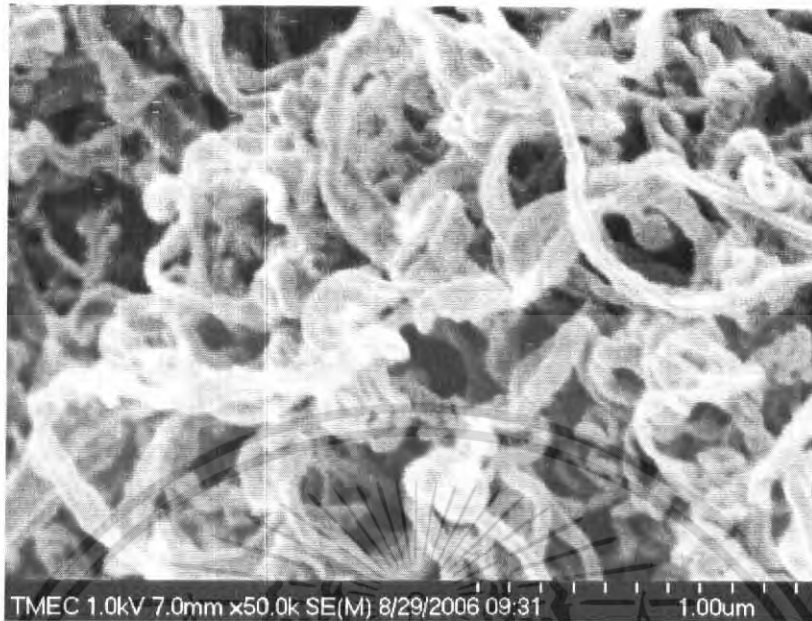
(ก) อัดราไฟล็ก้าซาร์กอน 0.5 ลิตรต่อนาที



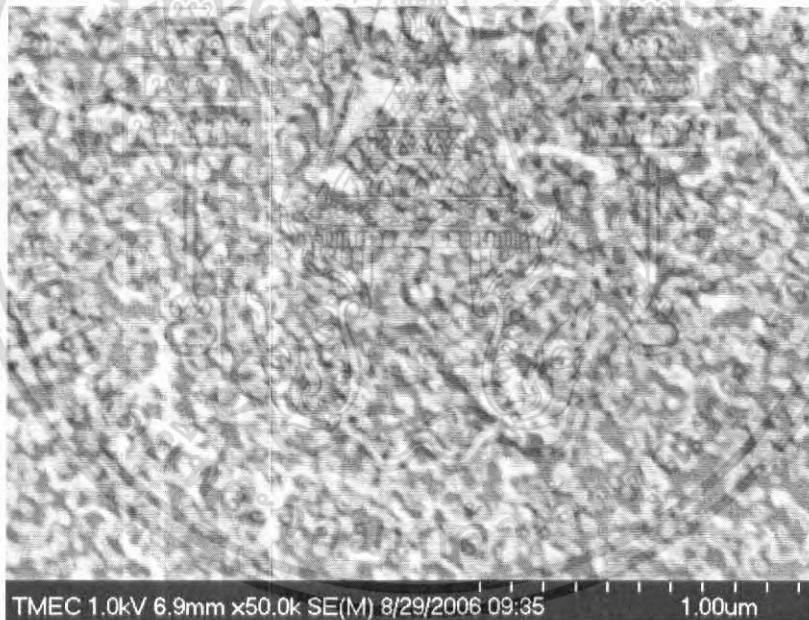
(ข) อัดราไฟล็ก้าซาร์กอน 1.0 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 5.5 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) อัตราไหล่ก๊าซอาร์กอน 1.5 ลิตรต่อนาที



(ง) อัตราไหล่ก๊าซอาร์กอน 2.0 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลกระทบบของอัตราไหล่ก๊าซอาร์กอนที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก (ก) 0.5L/min, (ข) 1.0L/min, (ค) 1.5L/min และ (ง) 2.0L/min

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นว่ายิ่งใช้อัตราการไหล่ของก๊าซตัวพามากขึ้นการปนเปื้อนพวกคาร์บอนนาโนทิวบ์และอมอร์ฟิซคาร์บอนก็จะมากขึ้นตาม ที่เป็นเช่นนี้น่าจะเกิดจากการใช้อัตราไหล่ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซตัวพามากขึ้นจะทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์และอมอร์ฟิสคาร์บอนจากดินเตาฮีตเตอร์ไหลมาสะสมที่ปลายเตาฮีตเตอร์มากขึ้น โดยเมื่อตะอองของสารผสมระหว่างเฟอร์โรเซนกับเอธานอลไหลผ่านดินเตาฮีตเตอร์สารผสมเหล่านั้นเริ่มมีการแตกตัวแล้วแต่ด้วยความแรงของอัตราไหลทำให้สารที่แตกตัวเหล่านั้นไหลมาตกที่ปลายเตาฮีตเตอร์ ดังนั้นเมื่อใช้อัตราไหลมากขึ้นจึงเห็นคาร์บอนนาโนทิวบ์และอมอร์ฟิสคาร์บอนปะปนมากขึ้น **จึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราไหลของก๊าซตัวพที่เหมาะสมแก่การสังเคราะห์อนุภาคเหล็กคือ 0.5 ลิตรต่อนาที**

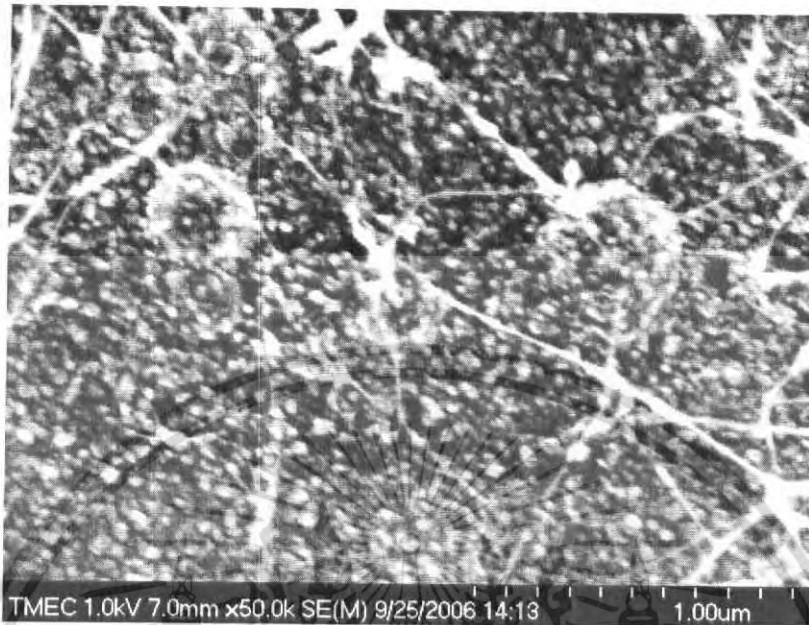
5.6 ผลกระทบของตัวทำละลายเฟอร์โรเซนที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาผลของตัวทำละลายเฟอร์โรเซนที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กว่า ถ้าใช้ตัวทำละลายเฟอร์โรเซนที่แตกต่างกันอนุภาคเหล็กที่ได้จะเป็นอย่างไร โดยได้สุ่มใช้สารเคมีที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการคือ เอธานอล เมธานอล และ อะซีโตน และมีเงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 5.6 ดังนี้

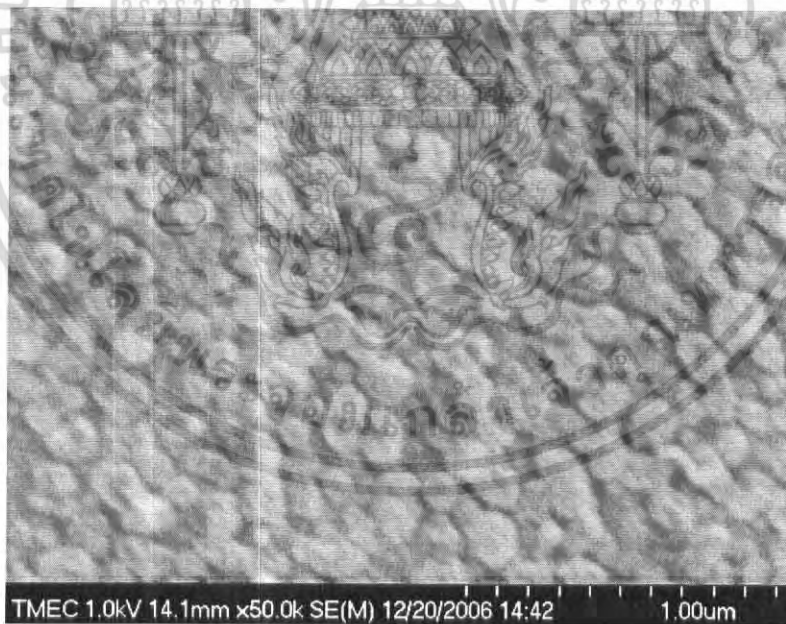
ตารางที่ 5.6 เงื่อนไขในการทดลองเพื่อหาผลกระทบของตัวทำละลายเฟอร์โรเซนที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

ตัวทำละลายเฟอร์โรเซน	เอธานอล, เมธานอล และ อะซีโตน
อัตราส่วนของเฟอร์โรเซน	1.5% โดยน้ำหนัก
อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน	0.5 ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	450 องศาเซลเซียส
เวลาในการทดลอง	5 นาที
ตำแหน่งการวาง	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



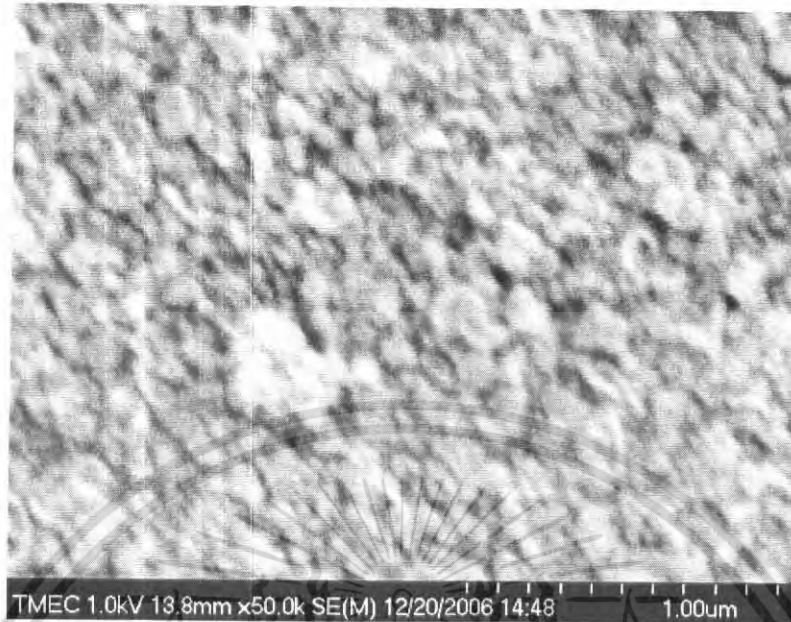
(ก) เอทานอล



(ข) เมทานอล

รูปที่ 5.6 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

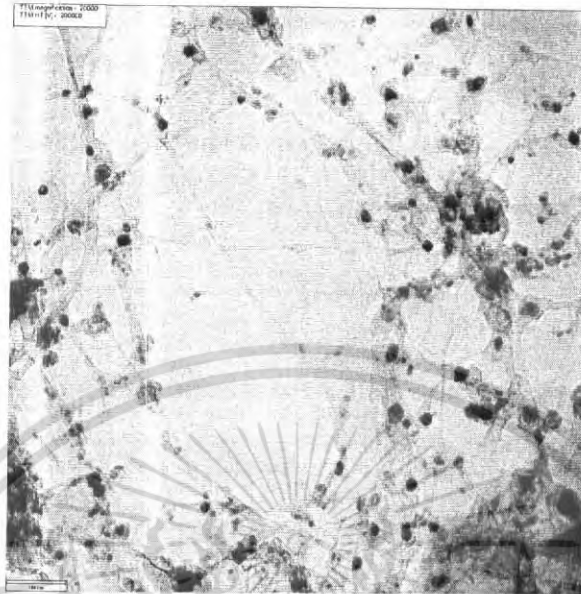


(ค) อะซีไคตอน

รูปที่ 5.6 ภาพถ่าย SEM แสดงผลกระทบบของตัวทำละลายเฟอร์โรเซนที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก (ก) เอธานอล, (ข) เมทานอล และ (ค) อะซีไคตอน

จากการทดลองใช้อะซีไคตอนเป็นตัวทำละลายเฟอร์โรเซน(รูปที่ 5.6 (ค)) พบว่า อนุภาคเหล็กที่ได้เต็มไปด้วยความสกปรก และบดบังจนแทบมองไม่เห็นอนุภาคเหล็กเลย ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวทำละลายเฟอร์โรเซน เมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นเมทานอล(รูปที่ 5.6 (ข)) พบว่าได้อนุภาคเหล็กค่อนข้างสะอาดแต่อนุภาคเหล็กนั้นใหญ่เกินไป ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ แต่เมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายเฟอร์โรเซนมาเป็นเอธานอล (รูปที่ 5.6 (ก)) พบว่าอนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กมากแต่ก็ยังมีพวกเสี้ยนๆปะปนมาด้วยบางส่วน ซึ่งสันนิษฐานว่าน่าจะเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น เพื่อความแน่ใจจึงได้นำผลนี้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เพื่อดูโครงสร้างต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



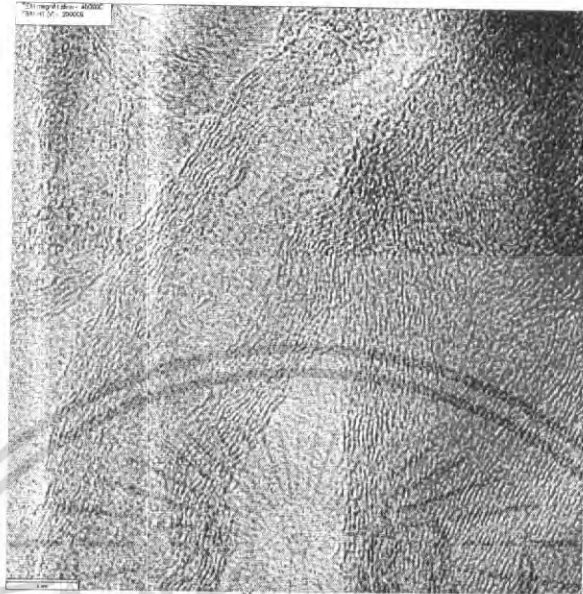
(ก) แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเหล็ก



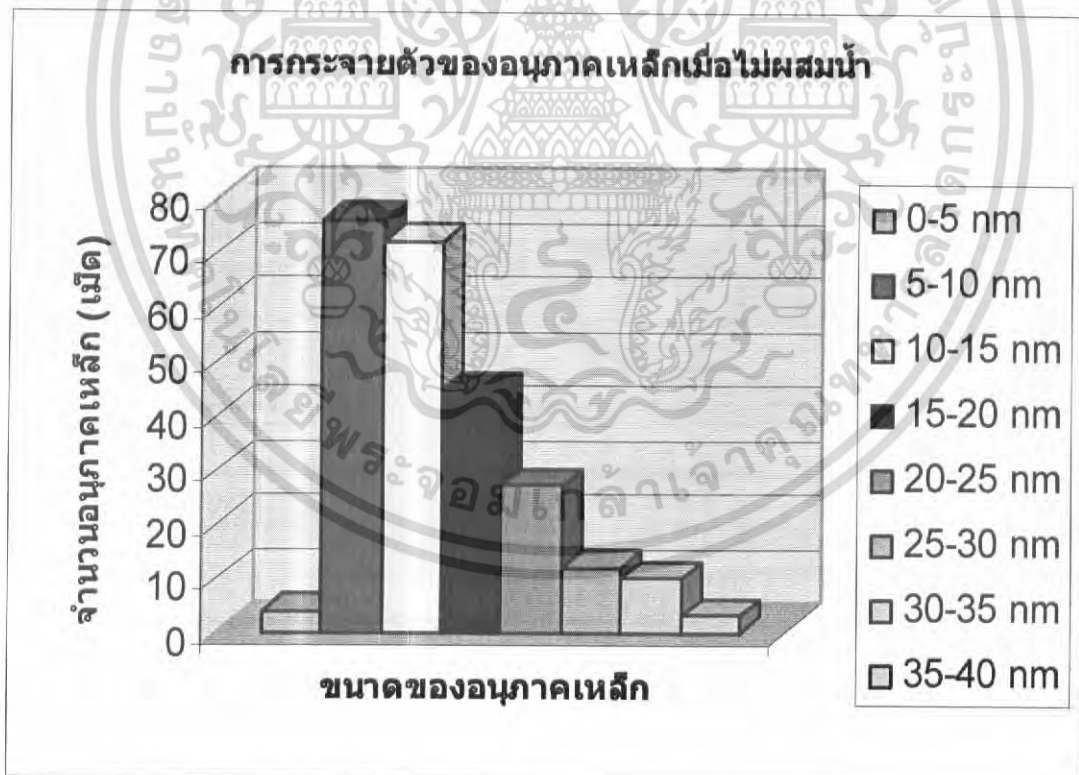
(ข) สเปกตรัม EDX ของอนุภาคเหล็ก

รูปที่ 5.7 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



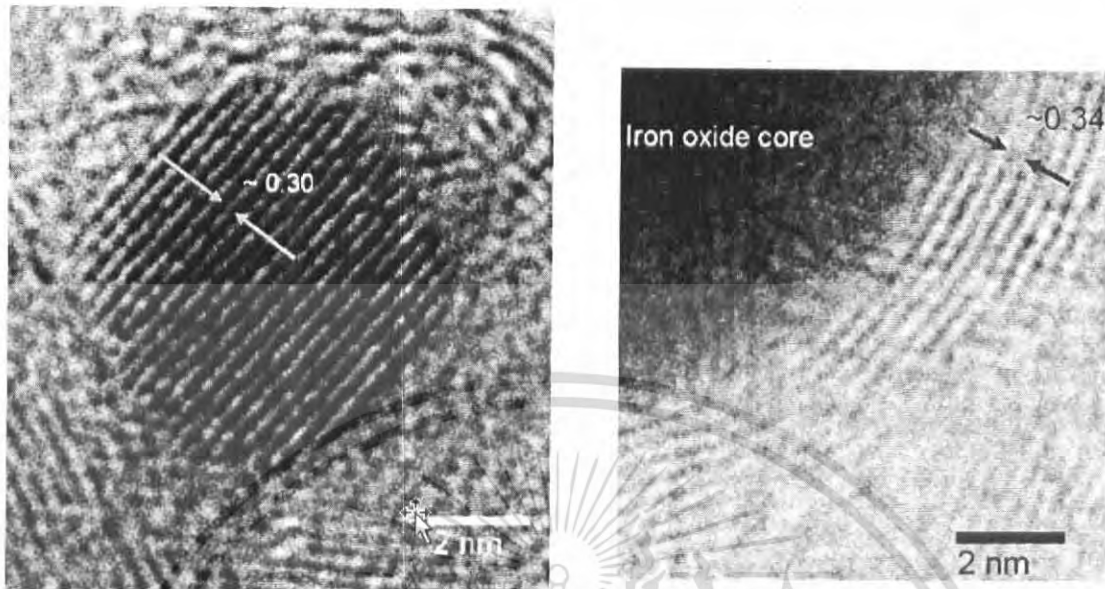
(ค) คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้นที่ปะปนมากับการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก



(ง) แสดงการกระจายตัวของอนุภาคเหล็กเมื่อไม่ผสมน้ำ

รูปที่ 5.7 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) ช่องว่างระหว่างแลตติซซึ่งมีค่า ~ 0.3 nm (ข) ภาพขยายแสดงชั้นแกรไฟต์ที่หุ้มอนุภาคเหล็กไว้

รูปที่ 5.7 ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคเหล็ก (ตัวอย่างของรูปที่ 5.6 (ก)) (ก) แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเหล็ก, (ข) สเปกตรัม EDX ของอนุภาคเหล็ก แสดงให้เห็นว่ามีเหล็ก ออกซิเจน และ คาร์บอน เป็นส่วนผสมหลัก, (ค) คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้นที่ปะปนมากับการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก, (ง) แสดงการกระจายตัวของอนุภาคเหล็กเมื่อไม่ผสมน้ำ, (จ) ภาพขยายแสดงช่องว่างระหว่างแลตติซซึ่งมีค่า ~ 0.3 nm และ (ฉ) ภาพขยายแสดงชั้นแกรไฟต์ที่หุ้มอนุภาคเหล็กไว้ (หมายเหตุ: ซิลิกอน และ ทองแดงที่ตรวจพบเป็นส่วนผสมของฐานรองและกริดทองแดงที่ใช้ในการวิเคราะห์ TEM)

จากที่ได้ทำการหาเงื่อนไขต่างๆที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก ก็พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กคือรูปที่ 5.6 (ก) จึงได้นำแผ่นตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วย TEM ซึ่งพบว่า อนุภาคเหล็กที่สังเคราะห์ได้นั้นมีการกระจายตัวของขนาดไม่สม่ำเสมอ (รูปที่ 5.7 (ก)) โดยจะมีขนาดของอนุภาคอยู่ระหว่าง 1.5-36 นาโนเมตร และอนุภาคโดยส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในช่วง 5-10 นาโนเมตร และ 10-15 นาโนเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 5.7 (ง)) เมื่อนำรูปที่ 5.7 (ก) ไปวิเคราะห์ด้วยสเปกตรัม EDX (รูปที่ 5.7 (ข)) เพื่อวิเคราะห์ธาตุที่ประกอบอยู่นั้นก็พบว่า ค่าพีคที่ขึ้นมาประกอบไปด้วย เหล็ก ออกซิเจน คาร์บอน ซิลิกอน และทองแดง ซึ่งซิลิกอน และ ทองแดงที่ตรวจพบเป็นส่วนผสมของฐานรองและกริดทองแดงที่ใช้ในการวิเคราะห์ TEM ดังนั้นแสดงว่าอนุภาคที่เห็นนั้นประกอบไปด้วย เหล็ก ออกซิเจน และคาร์บอนเท่านั้น เมื่อวิเคราะห์ดูเส้นที่เจือปนมากับอนุภาคก็พบว่า เป็นพวกคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้นดังรูปที่ 5.7 (ค) จากการวิเคราะห์เอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวันเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เสนอญาติเห็นไปไซเบอร์เนชันการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างระหว่างแลตทิซของผลึกพบว่ามีค่าประมาณ ~ 0.3 nm (รูปที่ 5.7 (จ)) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าของ rhombohedral Fe_2O_3 (104) [15] และ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (220) [16] นอกจากนี้ยังพบอีกว่าอนุภาคมักถูกห่อหุ้มด้วยชั้นของแกรไฟต์ซึ่งมีช่องว่างแลตทิซประมาณ ~ 0.34 nm (รูปที่ 6 (ฉ))

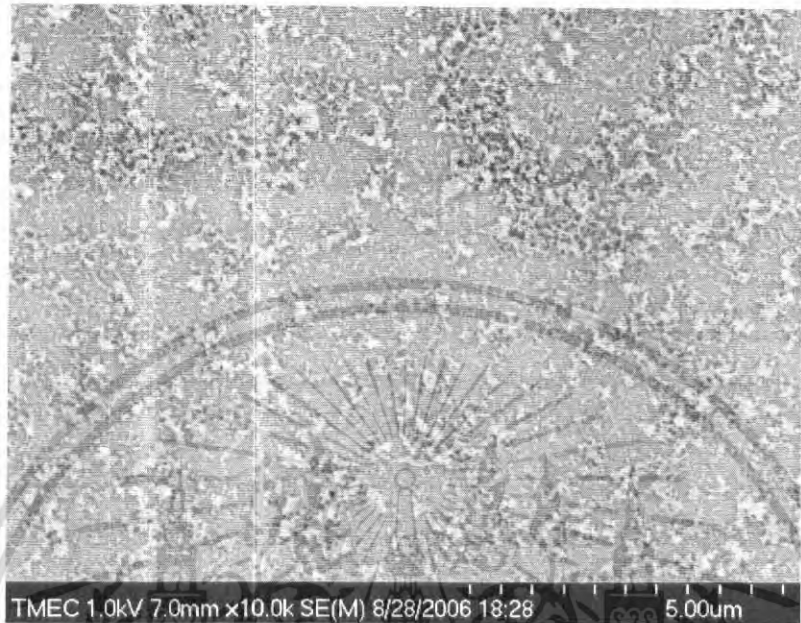
5.7 ผลกระทบของการผสมน้ำ DI ในสารละลายเฟอร์โรเซนในเอธานอลที่มีต่อตำแหน่งการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของการผสมน้ำ DI ลงในสารละลายเฟอร์โรเซนในเอธานอลที่มีต่อตำแหน่งการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กว่า ถ้าผสมน้ำ DI เข้าไปในสารละลายเฟอร์โรเซนในเอธานอลจะมีผลต่อตำแหน่งการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กอย่างไร โดยได้สุ่มวางตัวอย่าง 3 ตำแหน่งคือ ตำแหน่ง 1, 2 และ 3 โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 5.7

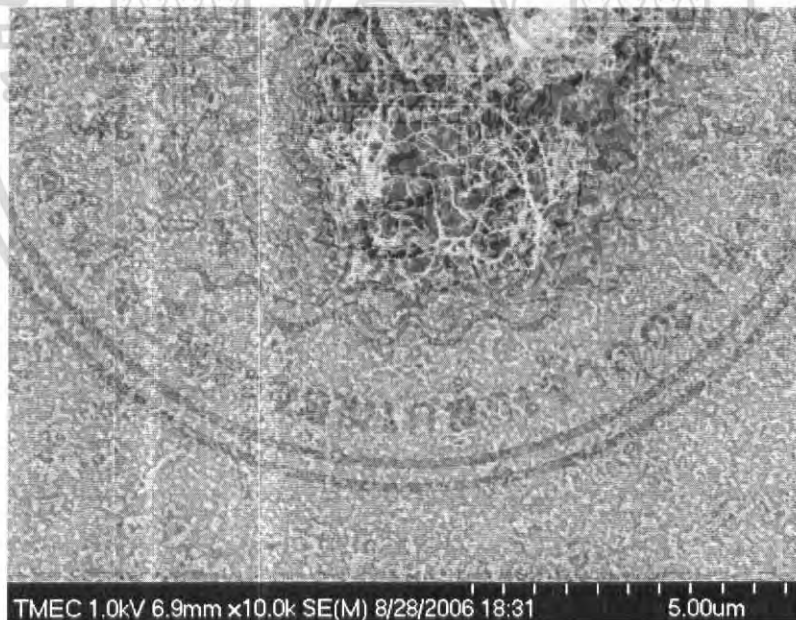
ตารางที่ 5.7 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของการผสมน้ำ DI ในสารละลายเฟอร์โรเซนในเอธานอลที่มีต่อตำแหน่งการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

สาร	เอธานอลผสมเฟอร์โรเซนผสมน้ำ DI 0.04%
อัตราส่วนของเฟอร์โรเซน	1.5% โดยน้ำหนัก
อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน	0.5 ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	450 องศาเซลเซียส
เวลาในการทดลอง	5 นาที
ตำแหน่งการวาง	1, 2 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ตำแหน่งที่ 1



(ข) ตำแหน่งที่ 2

รูปที่ 5.8 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ตำแหน่งที่ 3

รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลกระทบของการผสมน้ำ DI ในสารละลายที่มีต่อตำแหน่งการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก (ก) ตำแหน่งที่ 1, (ข) ตำแหน่งที่ 2 และ (ค) ตำแหน่งที่ 3

การทำความสะอาดให้อนุภาคของเหล็กปราศจากพวกแกรไฟรี คาร์บอนนาโนทิวส์และอนุภาคคาร์บอนต่างๆอาจทำได้โดยการใช้น้ำ DI ผสมในสารละลายเพื่อให้น้ำเกิดการรวมตัวกับคาร์บอนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไหลออกจากระบบซึ่งน่าจะเป็นการทำให้อนุภาคของเหล็กสะอาดขึ้นในระดับหนึ่ง ซึ่งจากรูปที่ 5.8 ได้แสดงผลของการผสมน้ำ DI ในสารละลายเฟอร์โรเซนในเอทานอลที่มีต่อตำแหน่งตัวอย่างซึ่งพบว่า การวางตัวอย่างไว้ที่ตำแหน่งที่ 3 ทำให้ได้อนุภาคเหล็กสะอาดมากกว่าตำแหน่งอื่นๆ ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าปกติอนุภาคเหล็กที่ได้จากปลายเตามีความสะอาดระดับหนึ่งแล้วเมื่อผสมน้ำ DI เข้าในสารละลายอีกยิ่งทำให้พวกอนุภาคคาร์บอนลดลง ทำให้อนุภาคเหล็กที่เตรียมได้มีความสะอาดยิ่งขึ้นอีก **ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าที่ตำแหน่งที่ 3 มีความเหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก**

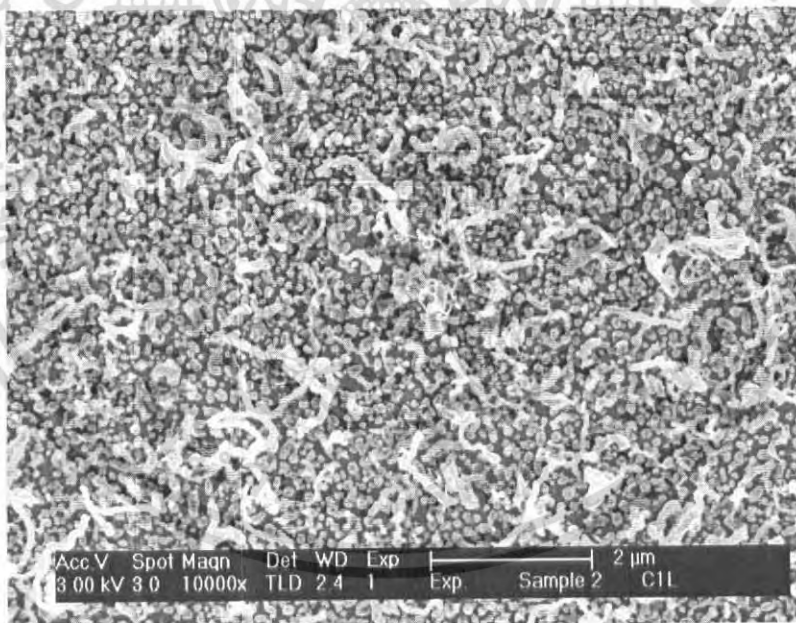
5.8 ผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การผสมน้ำ DI ลงในสารละลายที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์การผสมน้ำ DI ลงในสารที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก เพื่อทำให้อนุภาคของเหล็กมีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น โดยได้สุ่มใช้เปอร์เซ็นต์ของน้ำ DI ใส่ลงในสาร 7 ค่าคือ 0.01%, 0.04 %, 0.1%, 0.42%, 0.50%, 1.0% และ 2.70% โดยน้ำหนัก และมีเงื่อนไขในการทดลองอื่นๆดังตารางที่ 5.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การผสมน้ำ DI ลงในสารละลายที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

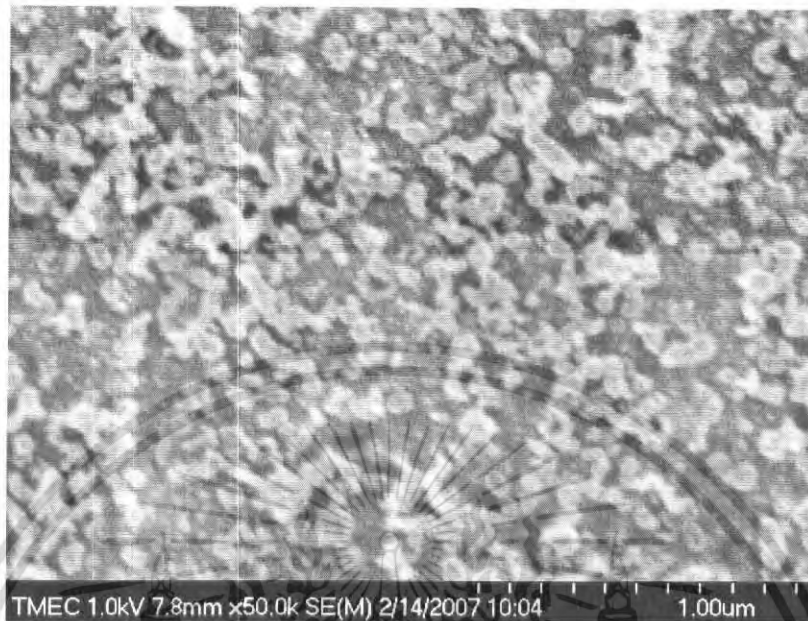
สาร	เอทานอลผสมเฟอร์โรเซน
อัตราส่วนของเฟอร์โรเซน	1.5% โดยน้ำหนัก
อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน	0.5 ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	450 องศาเซลเซียส
เวลาในการทดลอง	5 นาที
ตำแหน่งการวาง	3
ผสมน้ำ DI ในสาร	0.01%, 0.04%, 0.1%, 0.42%, 0.50%, 1.0 และ 2.70%wt



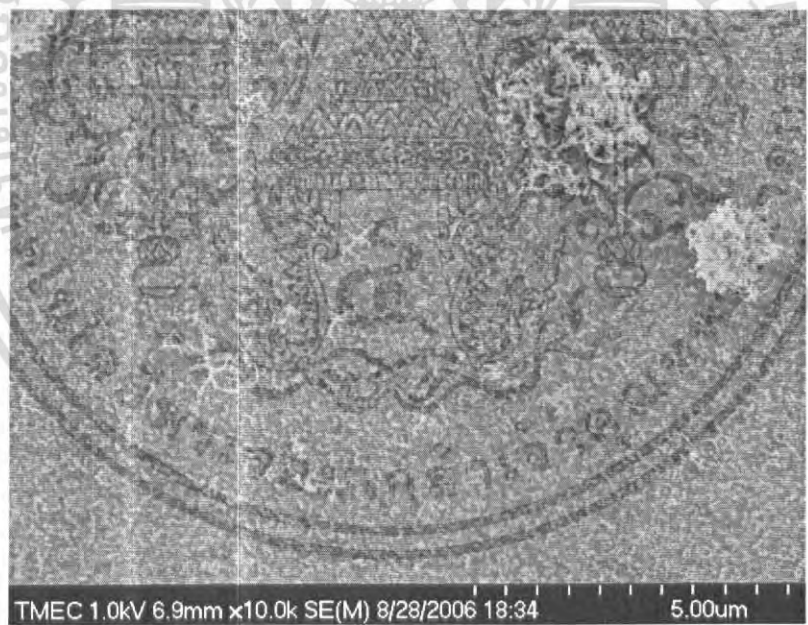
(ก) ไม่ใส่น้ำ DI

รูปที่ 5.9 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



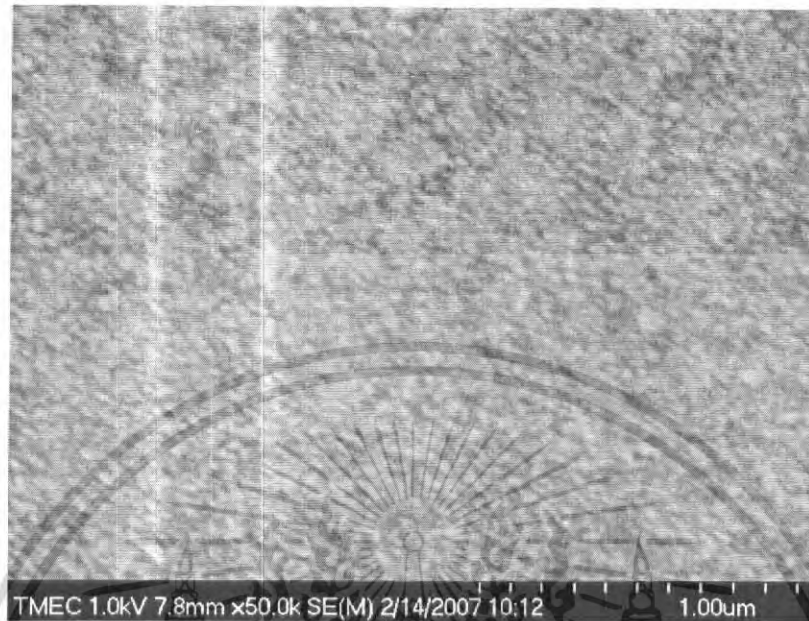
(ข) ผสมน้ำ DI 0.01%wt



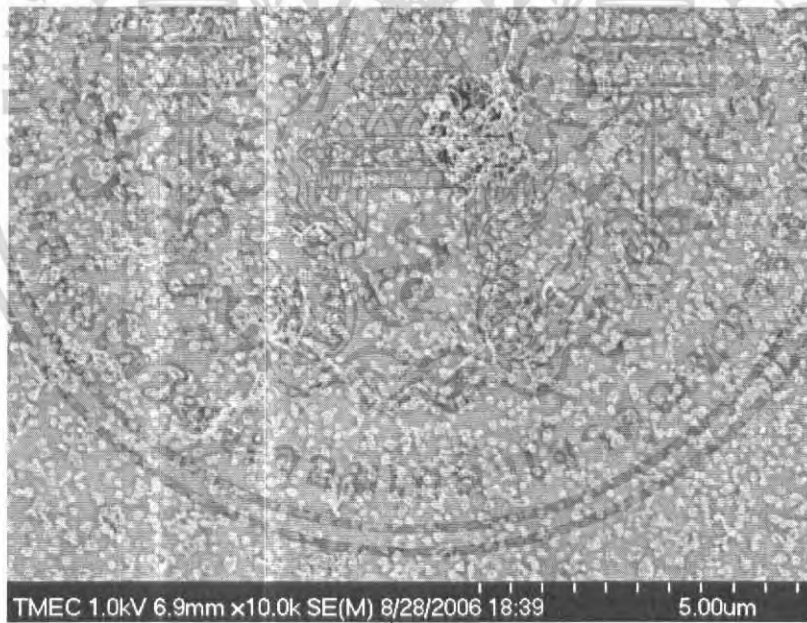
(ค) ผสมน้ำ DI 0.04%wt

รูปที่ 5.9 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) ผสมน้ำ DI 0.10%wt



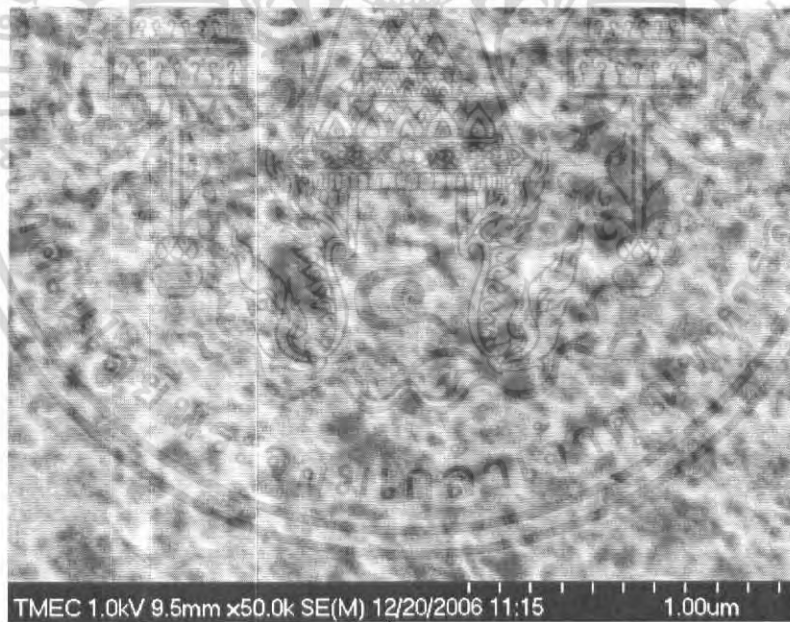
(จ) ผสมน้ำ DI 0.42%wt

รูปที่ 5.9 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



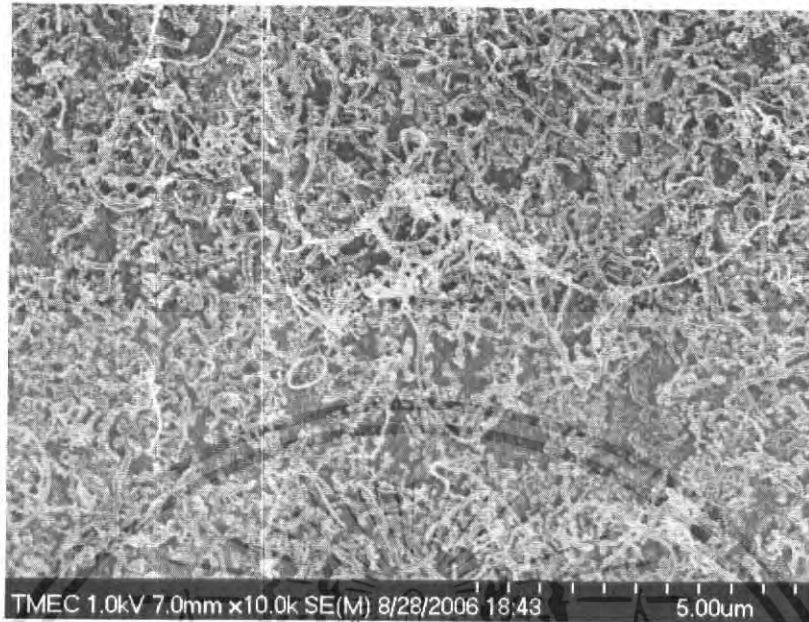
(จ) ผสมน้ำ DI 0.50 %wt



(ข) ผสมน้ำ DI 1.0%wt

รูปที่ 5.9 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ซ) ผสมน้ำ DI 2.70%wt

รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงผลกระทบของเปอร์เซ็นต์การผสมน้ำ DI ลงในสารที่มีต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก (ก) ไม่ใส่น้ำ DI, (ข) ผสมน้ำ DI 0.01%wt, (ค) ผสมน้ำ DI 0.04%wt, (ง) ผสมน้ำ DI 0.10%wt, (จ) ผสมน้ำ DI 0.42wt%, (ฉ) ผสมน้ำ DI 0.50 %wt, (ช) ผสมน้ำ DI 1.0%wt และ (ซ) 2.70%wt

จากรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าการใส่น้ำ DI สามารถทำให้อนุภาคเหล็กมีความสะอาดจริงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใส่น้ำ DI 0.04% ทำให้อนุภาคเหล็กสะอาดกว่าไม่ใส่น้ำ และเมื่อใส่น้ำ DI 0.10 % ทำให้อนุภาคเหล็กสะอาดกว่าการใส่น้ำ DI 0.01% และ 0.04 % ตามลำดับ แต่การใส่น้ำ DI สามารถใส่เข้าไปได้ในระดับหนึ่งเท่านั้นเพราะถ้าใส่เข้าไปมากเกินไปดังเช่นรูปที่ 5.9 (ฉ) จะทำให้อนุภาคเหล็กที่ได้ใหญ่ขึ้น เช่นเดียวกับรูปที่ 5.9 (ซ) ซึ่งผลที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นเพราะเฟอร์โรเซนละลายได้ไม่เต็มที่เมื่อผสมน้ำ และถ้าใส่มากเกินไปไปอีกดังเช่นรูปที่ 5.9(ซ) ก็ไม่ได้ช่วยให้อนุภาคเหล็กที่เตรียมได้มีความสะอาดเลย มิหนำซ้ำยังจะเป็นการทำให้อนุภาคเหล็กสกปรกมากกว่าเดิมอีกที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะโดยปกติแล้วไม่สามารถทำละลายเฟอร์โรเซนได้ แต่ที่สารละลายนี้สามารถละลายกันได้เป็นเพราะทั้งน้ำและเฟอร์โรเซนมีตัวทำละลายตัวเดียวกันคือเอทานอลซึ่งมีจุดอิ่มตัวในการทำละลายค่าหนึ่งเมื่อใส่น้ำหรือเฟอร์โรเซนเข้าไปอีก เอทานอลจะไม่สามารถทำละลายได้อีกทำให้สารเหล่านั้นเริ่มแยกชั้น โดยเอทานอลมีความหนาแน่นน้อยสุดจึงลอยอยู่ข้างบนและไหลเข้าไปในระบบมากทำให้แตกตัวเกิดเป็นความสกปรกขึ้นดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.9 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการผสมน้ำ DI ลงในสารละลายเพื่อสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการผสมน้ำ DI ลงในสารละลายเพื่อทำการสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก เพื่อให้อนุภาคของเหล็กมีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น โดยได้สุ่มใช้ 2 ค่า คือ 450 และ 600 องศาเซลเซียส โดยมีเงื่อนไขในการทดลองอื่นๆดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 เงื่อนไขในการทดลองหาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการผสมน้ำ DI ลงในสารละลายเพื่อสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก

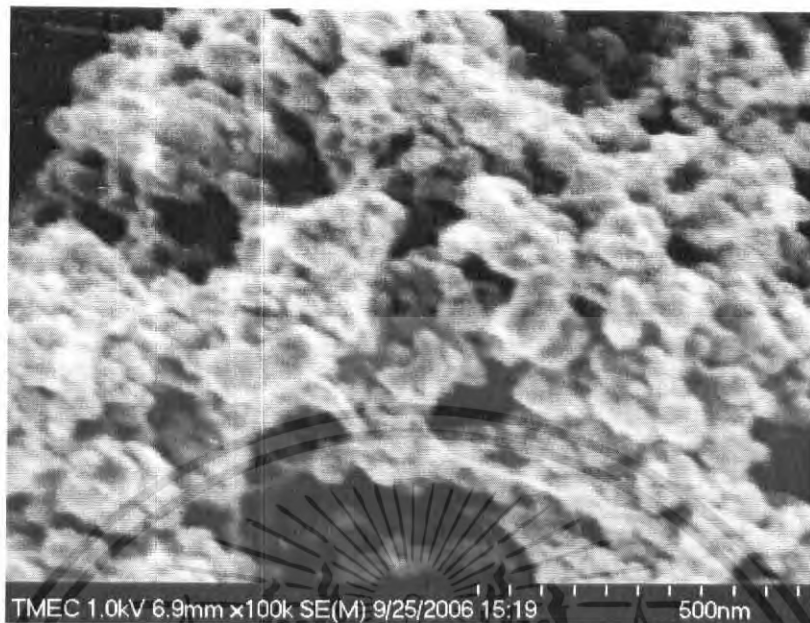
สาร	เอทานอลผสมเฟอร์โรเซน
อัตราส่วนของเฟอร์โรเซน	1.5% โดยน้ำหนัก
อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน	0.5 ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	450 และ 600 องศาเซลเซียส
เวลาในการทดลอง	30 นาที
ตำแหน่งการวาง	3
ผสมน้ำ DI ลงในสาร	0.5 % โดยน้ำหนัก



(ก) 450 องศาเซลเซียส

รูปที่ 5.10 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



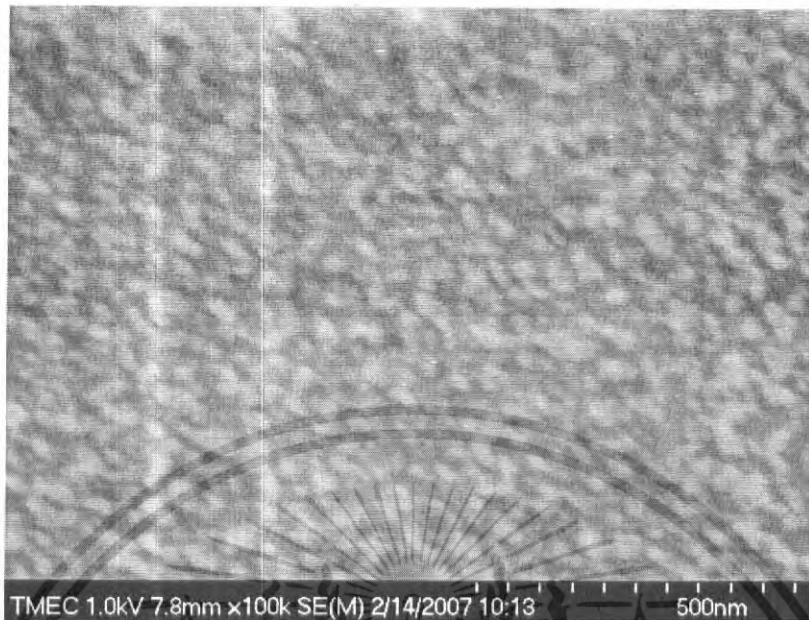
(ข) 600 องศาเซลเซียส

รูปที่ 5.10 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการผสมน้ำ DI ลงในสารละลายเพื่อสังเคราะห์อนุภาคเหล็ก (ก) 450 องศาเซลเซียส และ (ข) 600 องศาเซลเซียส

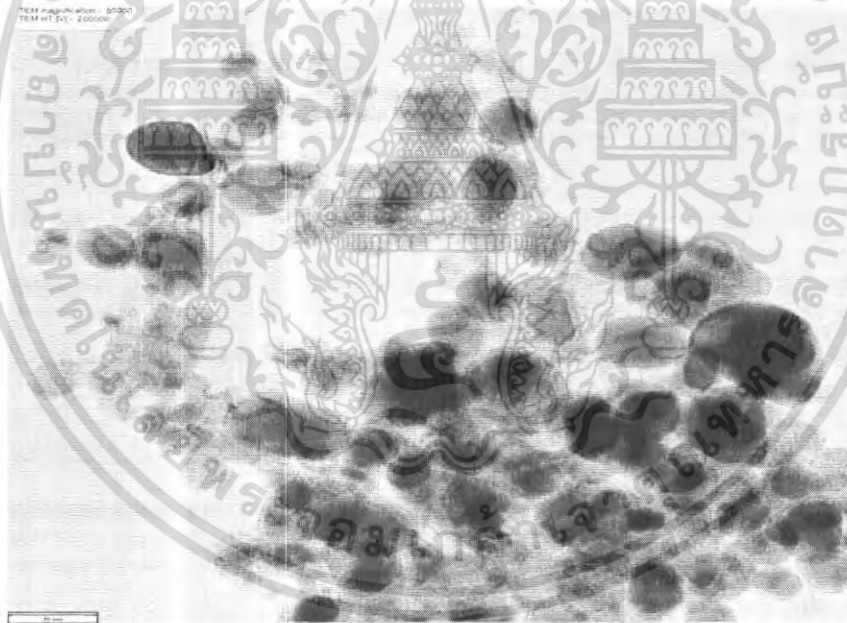
จากรูปที่ 10 เป็นการทดลองที่เวลา 30 นาที เพื่อศึกษาว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะมีผลต่ออนุภาคเหล็กอย่างไร ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจาก 450 องศาเซลเซียส (รูปที่ 5.10 (ก)) เป็น 600 องศาเซลเซียส (รูปที่ 5.10 (ข)) จะทำให้อนุภาคเหล็กที่ได้เกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อน และไม่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อปลูกรับบอนนาโนทิวบ์

จากการทดลองทั้งหมดที่ผ่านมาพบว่าเราสามารถเตรียมอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเมตรจากวิธี CVD ที่อุณหภูมิต่ำได้ ซึ่งตัวอย่างที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



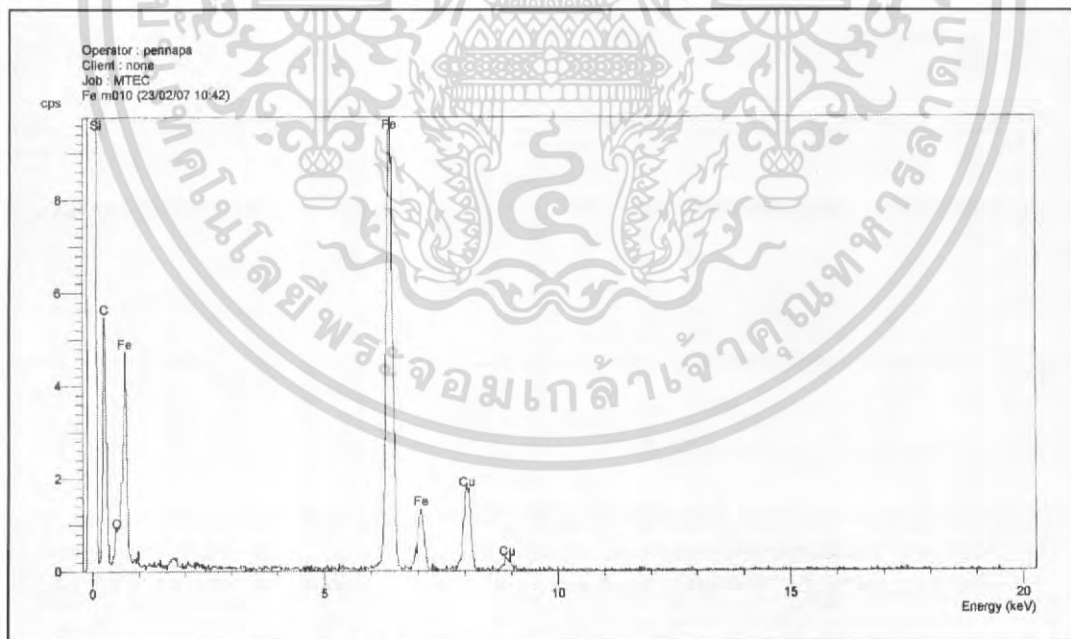
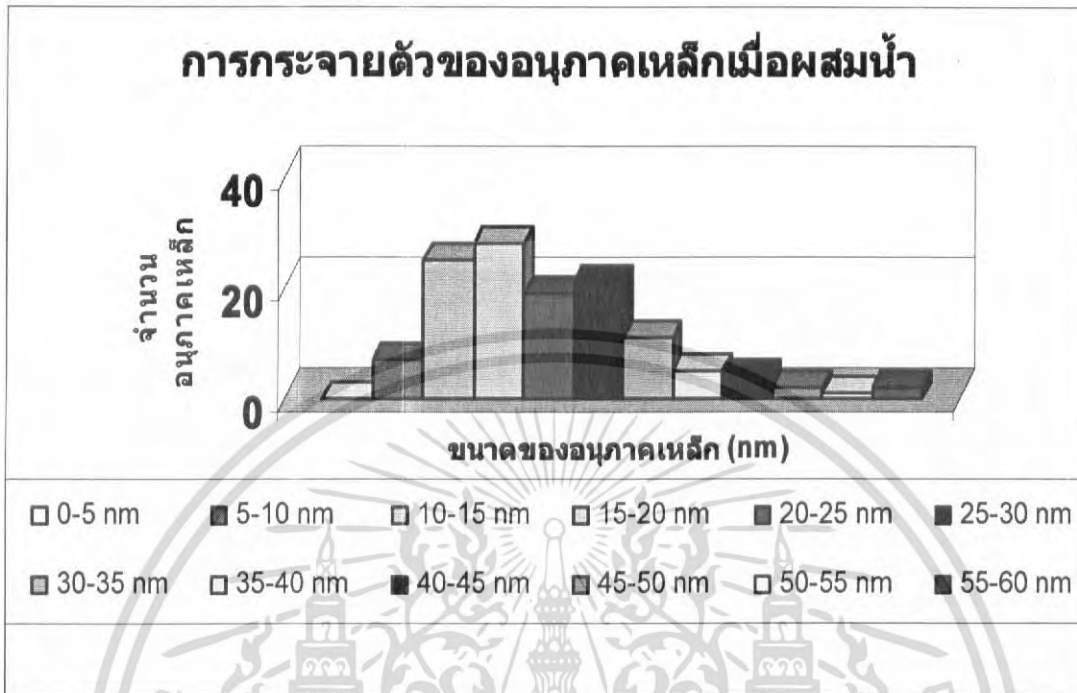
(ก) ภาพถ่าย SEM แสดงพื้นผิวของอนุภาคเหล็ก



(ข) ภาพถ่าย TEM แสดงการกระจายตัวของอนุภาคเหล็ก

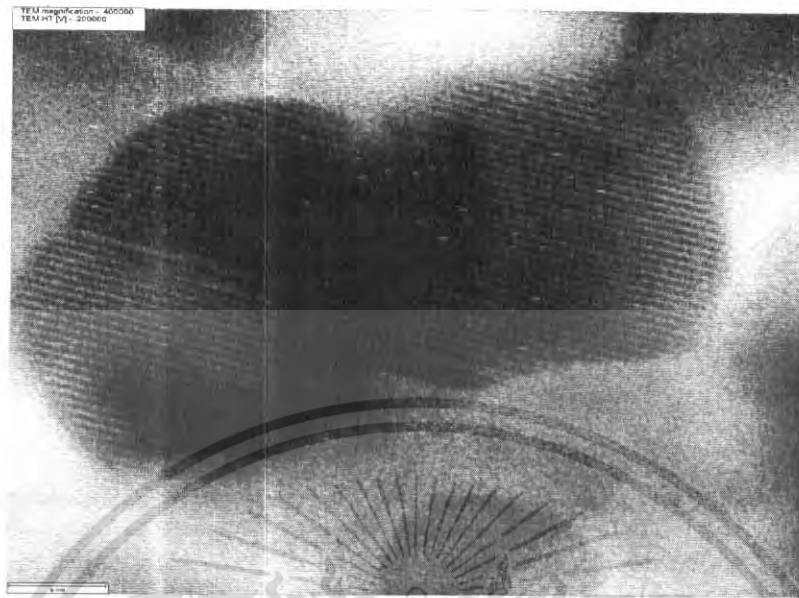
รูปที่ 5.11 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

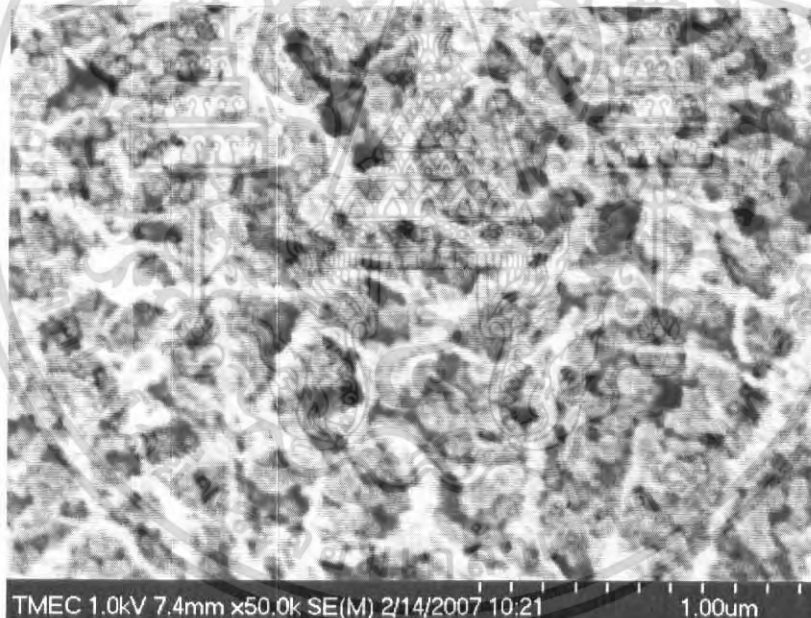


รูปที่ 5.11 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) ภาพถ่าย TEM แสดงอนุภาคเหล็กที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นแกรไฟต์



(ฉ) ภาพคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการใช้อุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

รูปที่ 5.11 แสดงอนุภาคเหล็กหลังผสมน้ำ DI เข้าไปเพื่อแก้ไขความสกปรก (ก) ภาพถ่าย SEM แสดงพื้นผิวของอนุภาคเหล็ก, (ข) ภาพถ่าย TEM แสดงการกระจายตัวของอนุภาคเหล็ก, (ค) กราฟรูปแท่งแสดงการกระจายตัวของอนุภาคเหล็ก, (ง) ภาพถ่าย EDX แสดงองค์ประกอบที่มีในตัวอย่าง, (จ) ภาพถ่าย TEM แสดงอนุภาคเหล็กที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นแกรไฟต์, (ฉ) ภาพคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการใช้อุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 11 เป็นการแสดงอนุภาคเหล็กที่ดีที่สุดที่หาได้จากการทดลอง ซึ่งรูปที่ 11 (ก) เป็นภาพถ่าย SEM แสดงพื้นผิวของอนุภาคเหล็กพบว่าอนุภาคมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเป็นอย่างดี ไม่มีพวกเส้นปะปนมาด้วย เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM (รูปที่ 11 (ข)) ก็จะเห็นการกระจายตัวของอนุภาคที่ขนาดแตกต่างกัน เมื่อทำการวัดพบว่าอนุภาคเหล็กกระจายตัวอยู่ในช่วง 8-57 นาโนเมตร และอนุภาคส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในช่วง 15-20 นาโนเมตร และ 10-15 นาโนเมตร (รูปที่ 11 (ค)) ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกตรัม EDX ก็พบว่าค่าพีคที่ขึ้นมาประกอบไปด้วย เหล็ก ออกซิเจน คาร์บอน ซิลิกอน และทองแดง ซึ่งซิลิกอน และ ทองแดงที่ตรวจพบเป็นส่วนผสมของฐานรองและกริดทองแดงที่ใช้ในการวิเคราะห์ TEM แต่สิ่งที่น่าสังเกตก็คือ ค่าพีคของออกซิเจนมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับเงื่อนไขที่ไม่ผสมน้ำ DI จนแทบจะละลายได้ อาจเป็นไปได้ว่าอนุภาคเหล็กที่ได้ นั้นเป็นเหล็กบริสุทธิ์ ไม่ใช่เหล็กออกไซด์เหมือนดังกรณีที่ไม่ผสมน้ำ และที่น่าสังเกตอีกก็คือแผ่นแกรไฟต์ที่ห่อหุ้มอนุภาคเหล็กนั้น (รูปที่ 11 (จ)) มีความหนาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใส่น้ำ อาจเป็นไปได้ว่าน้ำได้ทำปฏิกิริยากับอนุภาคคาร์บอนบางส่วนและออกจากระบบไปทำให้แกรไฟต์ที่ห่อหุ้มมีปริมาณน้อยลง เมื่อนำอนุภาคเหล็กที่ได้ไปทำการปลุกคาร์บอนนาโนทิวบ์ก็พบว่าสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อปลุกคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ แต่ที่เห็นเหมือนมีสิ่งสกปรกมาจับที่ผิวของเส้นนั้นน่าจะมาจากเงื่อนไขในการปลุกไม่เหมาะสม

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

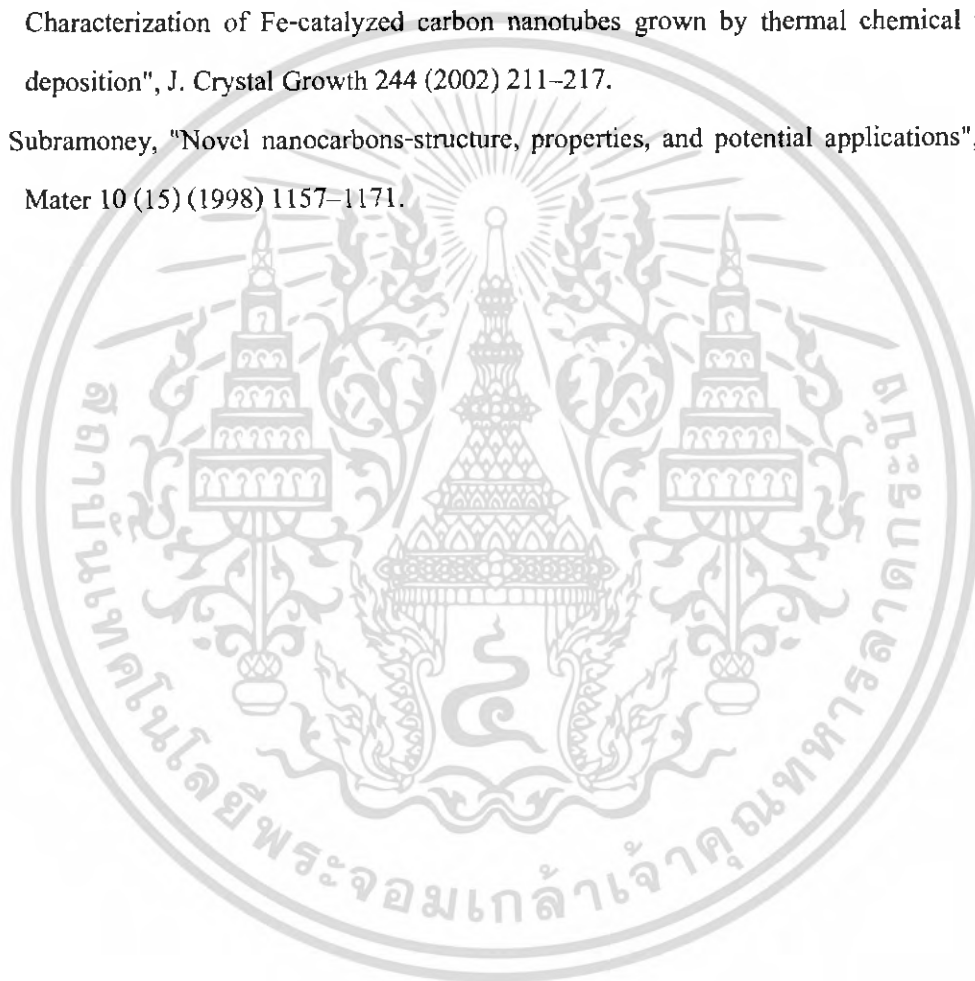
รายงานนี้ได้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ด้วยละอองของเฟอร์โรเซนในเอธานอล โดยได้ทำการหาเงื่อนไขต่างๆที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเหล็ก ซึ่งได้ภาวะที่เหมาะสมดังนี้คือ ใช้เอธานอลเป็นตัวทำละลายเฟอร์โรเซน อัตราส่วนของเฟอร์โรเซน 1.5% โดยน้ำหนัก อัตราไหลของก๊าซอาร์กอน 0.5 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที และสังเคราะห์ที่ตำแหน่งที่ 3 (ปลายเตาฮีตเตอร์) อนุภาคเหล็กที่สังเคราะห์ได้น่าจะเป็นเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่ห่อหุ้มด้วยแกรไฟต์ มีขนาด 1.5-36 นาโนเมตร มักมีสิ่งเจือปนพวกอนุภาคคาร์บอนและคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น อย่างไรก็ตามการผสมน้ำเข้าไปในระบบ CVD ระหว่างการสังเคราะห์จะช่วยทำให้สิ่งเจือปนเหล่านี้ลดน้อยลง ทำให้อนุภาคเหล็กที่ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ซึ่งภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กเมื่อผสมน้ำเข้าไปคือ สังเคราะห์ที่ตำแหน่งที่ 3 (ปลายฮีตเตอร์) โดยผสมน้ำเข้าไป 0.10% โดยน้ำหนัก อนุภาคเหล็กที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 8-57 นาโนเมตร ข้อดีของวิธีสังเคราะห์นี้คือ สามารถสังเคราะห์อนุภาคเหล็กระดับนาโนได้ด้วยอุปกรณ์ที่เตรียมได้ง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ ใช้ความร้อนและความดันที่ไม่สูง ทำให้ปลอดภัย อนุภาคเหล็กที่ห่อหุ้มด้วยแกรไฟต์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านเทคโนโลยีการสื่อสารและการแพทย์ [17] ต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

1. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
2. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
3. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “เทคโนโลยีวงจรรวม”.
4. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ และ จิติ หนูแก้ว, “งานวิจัยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยวิธี CVD ที่กำลังเริ่มในไทย”, วารสารLAB.TODAY, ฉบับที่ 13, 2547, หน้า 14-20.
5. “เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์”; <http://www.msds.pcd.go.th>
6. Wang Xiaomin, Xu Bingshe, Jia Husheng, Liu Xuguang, Ichinose Hideki, “HRTEM and Raman study of onion-like fullerenes encapsulated Fe”, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 67, 2006, pp.871-874.
7. Nitin Chopro, Bruce Hinds, “Catalytic size control of multiwalled carbon nanotube diameter In xylene chemical vapor deposition process”, *Inorganica Chimica Acta* 357, 2004, pp.3920-3926.
8. Xiaofeng, Hui Mao, Danming Chao, Danming Chao, Wanjin Znan, Yen Wei, “Ultrasonic synthesis of polyaniline nanotubes containing Fe₃O₄ nanoparticles”, *Journal of Solid State Chemistry* 179, 2006, pp. 2604-2610.
9. F.Dumitrache, I.Morjan, R.Alexandrescu, R.E.Mojan, I.Voicu, I.Sandu, I.Soare, M.Plocaru, C.Fleaca, V.Ciupina, G.Prodan, B.Ranc, R.Brydson, A.Woodward, “Nearly monodispersed carbon coated iron nanoparticle for the catalytic growth of nanotubes/nanofibers”, *Diamond and Related Materials* 13, 2004, pp. 362-370.
10. Don Keun Lee, Young Hwan Kim, Xiao-Li Zhang, Young Soo Kang, “Preparation of Monodisperse Co and Fe nanoparticle using Precursor of M²⁺ - oleate₂ (M=Co, Fe)”, *Current Applied Physics* 6, 2006, pp.786-790.
11. M.Daenen (N), R.D.de Fouw (ST), B.Hamers(ST, Treasurer), P.G.A.Janssen(ST), K.Schouteden(N), M.A.J.Veld(ST, Project Manager), “The Wondrous World of Carbon Nanotubes”, 93 p., 2003.
12. <http://pcdv1.pcd.go.th/SolidWaste/infectiouswaste/technology.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. S. Iijima, Nature (London) 354 (1991) 56-58.
14. “ท่อนาโนคาร์บอน”, <http://www.technologymedia.com/article/detail.asp?arid=2484&pid=257>
15. Z. Zhang, B. Q. Wei and P. M. Ajayan, "Self-assembled patterns of iron oxide nanoparticles by hydrothermal chemical-vapor deposition" Appl. Phys. Lett. 79 (2001) 4207-4209.
16. J. Parka, G. Choia, Y. Choa, S. Honga, D. Kima, S. Choib, J. Leeb, K. Chob, Characterization of Fe-catalyzed carbon nanotubes grown by thermal chemical vapor deposition", J. Crystal Growth 244 (2002) 211–217.
17. S. Subramoney, "Novel nanocarbons-structure, properties, and potential applications", Adv Mater 10 (15) (1998) 1157–1171.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

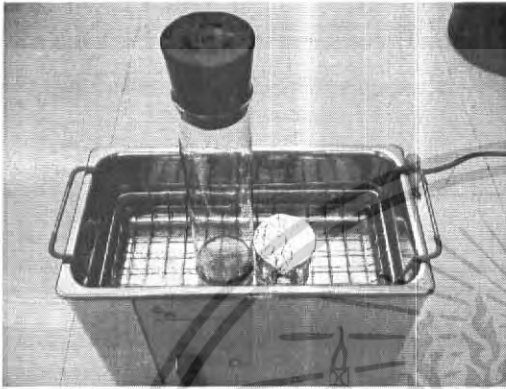
ชื่อ-สกุล	นายธนุทอง คำยา
วัน เดือน ปี เกิด	19 กุมภาพันธ์ 2527
ที่อยู่	28 หมู่ที่ 11 บ้านโนนสะอาด ต.บ่อใหญ่ อ.บรบือ จ.มหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44130 โทร. 087-6982322
ประวัติการศึกษา	2546 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบรบือวิทยาคาร 2550 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

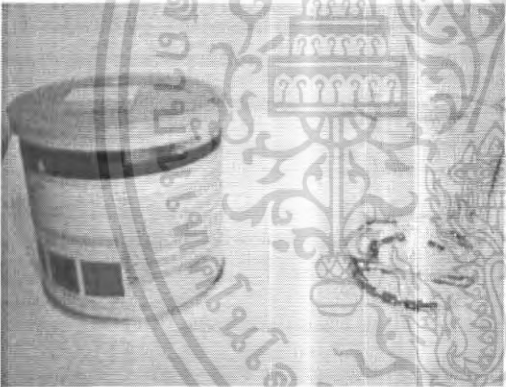
รูปประกอบการทดลอง



(ก) เครื่องอัลตราโซนิค



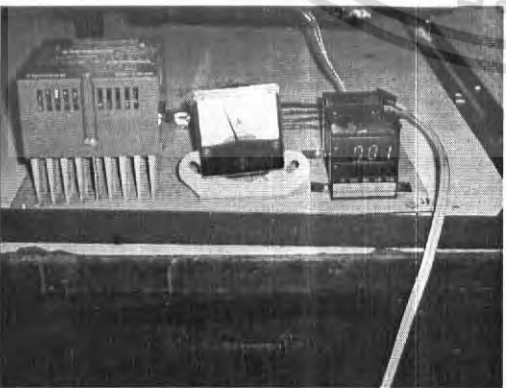
(ข) เอทานอลกับอะซีโตน



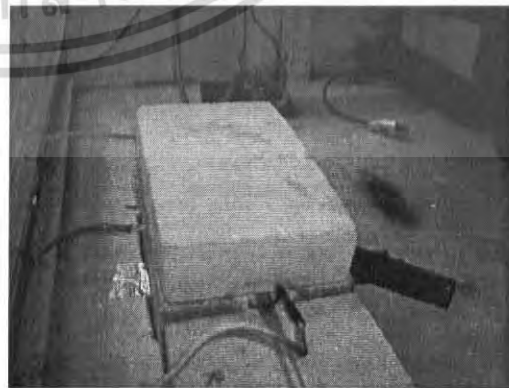
(ค) Ferrocene และ Si-Substrate



(ง) Atomizer กำลังทำงาน

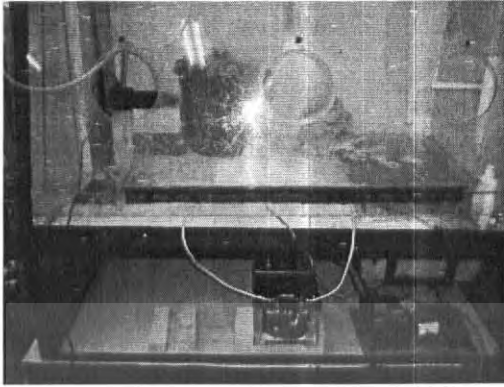


(จ) ชุด Power Control

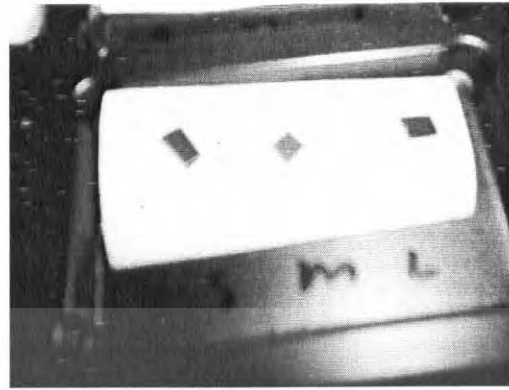


(ฉ) รูป Chamber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ตู้ดูดอากาศ



(ค) Sample ที่ได้จากการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้