

การเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์มทินออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่ผสม  
โครงสร้างท่อนาโน

GROWTH AND CHARACTERIZATION OF NANOTUBE STRUCTURE  
DOPED TIN OXIDE AND ZINC OXIDE FILMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2000-SC-M-030-020

การเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์มทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผสม  
โครงสร้างท่อนาโน

GROWTH AND CHARACTERIZATION OF NANOTUBE STRUCTURE  
DOPED TIN OXIDE AND ZINC OXIDE FILMS



T105304



โชคชัย คหัทธนา  
CHOKCHAI KAHATTHA

อพ.  
๘๘13๗  
9552

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 105304  
วัน,เดือน,ปี..... 18 พ.ย. 2552

b. 12168828  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2552

KMITL-2009-SC-M-030-029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**GROWTH AND CHARACTERIZATION OF NANOTUBE STRUCTURE  
DOPED TIN OXIDE AND ZINC OXIDE FILMS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2009**

**KMITL-2009-SC-M-030-029**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF SCIENCE**





**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์มทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผสมโครงสร้างท่อนาโน  
Growth and Characterization of Nanotube Structure Doped Tin Oxide and Zinc Oxide  
Films

นักศึกษา นายโชคชัย คหัญฐา  
รหัสประจำตัว 48067305  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.วิชาญ	เดชศิระ	
รศ.ดร.วิษณุ	เพชรภา	
ดร.ปิติพร	ถนอมงาม	
ผศ.ดร.รัชภักย์	จิตต์อารี	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 21 พฤษภาคม 2552 เวลา 13.30 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 1 ห้อง APL 602

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 26 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์มทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผสมโครงสร้างท่อนาโน
นักศึกษา	นาย โชคชัย คหัญฐา
รหัสประจำตัว	48067305
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา

### บทคัดย่อ

ฟิล์มทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผสมโครงสร้างท่อนาโนเตรียมโดยวิธีโซล-เจลของทินออกไซด์เตรียมจากทินคลอไรด์ผสมกับเอทานอลบริสุทธิ์ 99.9% โซล-เจลของซิงค์ออกไซด์เตรียมจากซิงค์อะซิเตทไดไฮเดรท เอทานอลบริสุทธิ์ 99.9% และไดเอทานอลเอไมล์ ฟิล์มตัวอย่างเตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ ในการจุ่มเคลือบแต่ละครั้งทำซ้ำ 10 ครั้ง จากนั้นทำการผสมไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน และคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโนในโซล-เจลด้วยอัตราส่วน 0.01 0.03 และ 0.05 % โดยน้ำหนัก ฟิล์มก่อนและหลังผสมโครงสร้างนาโน ตรวจสอบคุณภาพของฟิล์มด้วยเทคนิคอุลตราไวโอเลต-วิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างและสมบัติทางแสงพบว่าฟิล์มทินออกไซด์มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอลและฟิล์มซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล ฟิล์มที่เตรียมได้ส่งผ่านแสงได้ดีในบริเวณความยาวคลื่นแสงอุลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิล มีแถบพลังงานต้องห้าม 3.9 eV สำหรับฟิล์มทินออกไซด์และ 3.1 ถึง 3.3 eV สำหรับฟิล์มซิงค์ออกไซด์ ผลการทดลองจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดพบว่าเงื่อนไขในการเจือวัสดุโครงสร้างท่อนาโน ที่เหมาะสมมีค่า 0.01% โดยสังเกตจากผลค่าความขรุขระของพื้นผิวที่มากที่สุด

<b>Thesis</b>	Growth and characterization of nanotube structure doped tin oxide and zinc oxide films
<b>Student</b>	Mr.Chokchai Kahattha
<b>Student ID</b>	48067305
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Wisanu Pecharapa

### ABSTRACT

Nanotube structure doped tin oxide thin and zinc oxide films were prepared by sol gel method. Sol-gel of tin oxide was prepared based on  $\text{SnCl}_4$  and absolute ethanol (99.9%) meanwhile sol-gel of zinc oxide was prepared based on  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ , absolute ethanol and diethanalamine. Film samples were prepared by dip coating technique. The coating process was repeated for 10 times.  $\text{TiO}_2$  nanotube(TNT) and carbon nanotube (CNT) were doped in the sol-gel with 0.01 0.03 and 0.05% by weight. The undoped and nanotube structure doped films are characterized by X-ray Diffraction technique(XRD), UV-Vis Spectrophotometer, Atomic Force Microscope(AFM) and Scanning Electron Microscope(SEM). The structural and optical properties results showed that the tin oxide films have the tetragonal structure and the zinc oxide films have the hexagonal structure. The deposited films have high transmittance in the ultraviolet-visible region with corresponding optical band gap of 3.9 eV for tin oxide films and optical band gap about 3.1- 3.3 eV for zinc oxide films. AFM and SEM results suggested that the optimized doping condition of 0.01% for both nanotube structures was obtained indicating by the highest surface roughness.

# กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ท่านได้ให้แนวทางการวิจัย การ  
ช่วยเหลือแก้ไขในส่วนที่ไม่เข้าใจและคอยผลักดันให้งานได้ดำเนินต่อไป

ขอขอบพระคุณ ดร. สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ ที่ช่วยเหลือเพื่อ ไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อ  
นาโนให้ข้าพเจ้าหยิบยืมมาใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เป็นกรรมการสอบหัวข้อ ที่คอยให้ความรู้และแนะนำ  
ข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อที่จะนำไปแก้ไขให้ดีขึ้น และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะ  
วิทยาศาสตร์ ที่ข้าพเจ้าได้หยิบยืมอุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ที่ใช้ดำเนินการวิจัยนี้

ขอขอบคุณผลงานวิจัยและเอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่ข้าพเจ้าได้หยิบยืมมา ที่ทำให้เกิดความ  
สนใจในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งข้าพเจ้าคาดหวังงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจในทางด้านการ  
ปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีโซล-เจล

ขอขอบคุณพี่น้อง ในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ที่ให้คำปรึกษา ตลอดจนการช่วยเหลือในด้าน  
ต่างๆ ทำให้ข้าพเจ้ามีความสะดวก รวดเร็วในการใช้เครื่องมือต่างๆ

สุดท้ายขออนุญาตแสดงความยินดีที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแก่บิดา นายสุพล  
คหัญญา และ มารดา นางพงศ์จิตร คหัญญา ที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่  
ได้ถ่ายทอดและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า และน้องชาย นายสกุลไทย คหัญญา ที่ทำ  
หน้าที่แทนข้าพเจ้าในยามที่ข้าพเจ้าติดภารกิจต่างๆ

โชคชัย คหัญญา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สมบัติพื้นฐานของดีบุกออกไซด์ (SnO <sub>2</sub> ).....	4
2.2 สมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์ (ZnO).....	5
2.3 สมบัติพื้นฐานของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> ).....	6
2.4 สมบัติพื้นฐานของท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube : CNT).....	8
2.5 หลักการเครื่องมือปลูกฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่ผสมโลหะออกไซด์โครงสร้างนาโน.....	11
2.5.1 เครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน (Magnetic stirrer with hot plate).....	11
2.5.2 เครื่องจุ่มเคลือบ (Dip coater).....	11
2.6 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิว.....	13
2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (SEM).....	13
2.6.2 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงอะตอม (AFM).....	16
2.7 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง.....	21
2.7.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	21
2.8 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางแสง.....	24

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.8.1 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer.....	24
2.8.2 การวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการทะลุผ่านของแสง.....	27
2.8.3 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง.....	30
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 การเตรียมฐานรองรับกระจกสไลด์ที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม.....	35
3.2 การเตรียมโซล-เจลจาก $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ .....	35
3.3 การเตรียมโซล-เจลจาก $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	36
3.4 การเตรียมโซล-เจลที่ผสมไททานเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาโนและคาร์บอนแบบท่อนานาโน.....	36
3.5 การเตรียมฟิล์มบางคิบูคอกไซด์ที่ผสมโลหะ-ออกไซด์แบบท่อนานาโนด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ.....	37
3.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis).....	38
3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยระบบวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์.....	39
3.8 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการวัดการทะลุผ่านของแสง (UV-Vis spectroscopy).....	39
3.9 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิว.....	40
3.9.1 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด..	40
3.9.2 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	42
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของทินออกไซด์.....	42
4.1.1 ผลการวัดสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มบางทินออกไซด์.....	42
4.1.2 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางทินออกไซด์.....	43
4.1.3 ผลการวัดค่าการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางทินออกไซด์.....	44
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของซิงค์ออกไซด์.....	46
4.2.1 ผลการวัดสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	46
4.2.2 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	47

## สารบัญ(ต่อ)


หน้า

4.2.3 ผลการวัดค่าการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	48
4.3 การวิเคราะห์สมบัติของทินออกไซด์ที่เจือด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างท่อนาโน.....	50
4.3.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วย ไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน.....	50
4.3.2 ผลการถ่ายภาพสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน..	51
4.4 การวิเคราะห์สมบัติของทินออกไซด์ที่เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน.....	53
4.4.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วย คาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน.....	53
4.4.2 ผลการถ่ายภาพสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน.....	54
4.5 การวิเคราะห์สมบัติของซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างท่อนาโน.....	56
4.5.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย ไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน.....	56
4.5.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางพื้นผิวด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบเลือนกราคของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างท่อนาโน.....	58
4.5.3 ผลการถ่ายภาพสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างท่อนาโน.....	59
4.6 การวิเคราะห์สมบัติของซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน.....	61
4.6.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย คาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน.....	61

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.6.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางพื้นผิวด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน.....	63
4.6.3 ผลการถ่ายภาพสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	67
เอกสารอ้างอิง.....	69
ประวัติผู้เขียน.....	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ).....	4
2.2 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ).....	5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างผลึกของ $\text{SnO}_2$ .....	4
2.2 โครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite ของ Zn.....	5
2.3 โครงสร้างผลึกของ $\text{TiO}_2$ (a) อะนาเทส (b) รูไทล์และ (c) บรูไคท์.....	6
2.4 ไททาเนียมโครงสร้างนาโนชนิดต่างๆ (a) โครงสร้างแผ่นนาโน (b) โครงสร้างแท่งนาโน และ (c) โครงสร้างท่อนาโน.....	7
2.5 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน.....	8
2.6 ไดอะแกรมแสดงSWNTที่ทำให้อยู่ในรูปสารกึ่งตัวนำ.....	10
2.7 เครื่อง Magnetic stirrer with hot plate.....	11
2.8 ขั้นตอนการจุ่มเคลือบลงในสารละลายที่มีลักษณะเป็นโซล-เจล.....	12
2.9 ภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	13
2.10 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	15
2.11 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการโค้งงอของคาน (Cantilever).....	16
2.12 กราฟแรงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับระยะห่าง.....	17
2.13 ลักษณะการสั่นของคาน.....	18
2.14 ลักษณะของสีที่ใช้แสดงความสูงต่ำของแต่ละตำแหน่ง.....	19
2.15 ลักษณะการขยายออกของภาพเมื่อปลายเข็มใหญ่กว่าพื้นผิวที่วัด.....	19
2.16 ผลลักษณะมุมตันของเข็มที่มีต่อการวัด.....	20
2.17 สมการของ Bragg .....	21
2.18 เครื่อง UV-VIS Spectrometer.....	24
2.19 สมการ Beer-Lambert law.....	25
2.20 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง.....	28
2.21 ขอบการดูดกลืนแสง.....	29
2.22 การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน.....	30
2.23 กราฟพลังงานโฟตอนและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง ที่ค่า $\gamma$ ต่างๆ.....	32
3.1 โครงสร้างท่อนาโน (a) $\text{TiO}_2$ nanotubes และ (b) carbon nanotubes.....	33
3.2 เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นให้ความร้อน.....	34
3.3 เครื่องปั่นสารให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenizer).....	35

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 เครื่องจุ่มเคลือบ .....	36
3.5 เตาแอนนีสล.....	36
3.6 เครื่อง TGA.....	37
3.7 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	38
3.8 เครื่อง UV-Vis spectrophotometer.....	38
3.9 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	39
3.10 ภาพกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	40
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ลดลงกับอุณหภูมิ ของทินออกไซด์โซล-เจล.....	42
4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มทินออกไซด์ (SnO <sub>2</sub> ) ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนีสลที่อุณหภูมิ 450°C 500°C และ 550°C.....	43
4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการ โซล-เจล โดยใช้อุณหภูมิในการแอนนีสล 350°C 450°C 550°C และ 650 °C.....	44
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทะลุผ่านของแสงกับความยาวคลื่นของทินออกไซด์ที่เตรียม ด้วยวิธีการ โซล-เจล โดยใช้อุณหภูมิในการแอนนีสล 450°C 500°C และ 550°C.....	44
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $hv$ ของทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการ โซล-เจล โดยใช้อุณหภูมิในการแอนนีสล 450°C 500°C และ 550°C.....	45
4.6 ค่าแถบพลังงานต้องห้าม (E <sub>g</sub> ) ของทินออกไซด์ที่ปลูกด้วยวิธี vacuum arc deposited .....	45
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ลดลงกับอุณหภูมิ ของซิงค์ออกไซด์โซล-เจล.....	46
4.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม เคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสลที่อุณหภูมิ 450°C 500°C และ 550°C.....	47
4.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการสปาร์กกิง โดยใช้อุณหภูมิในการแอนนีสล 400°C 600°C และ 800°C .....	48
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทะลุผ่านของแสงกับความยาวคลื่นแสงของซิงค์ออกไซด์ ที่เตรียมด้วยวิธีการ โซล-เจล โดยใช้อุณหภูมิในการแอนนีสล 450°C 500°C และ 550°C.....	48
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $hv$ ของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการ โซล-เจล โดยใช้อุณหภูมิในการแอนนีสล 450°C 500°C และ 550°C.....	49

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ ของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธี spray pyrolysis (a) ก่อนแอนนีส (b) แอนนีสที่อุณหภูมิ 600°C (c) แอนนีสที่อุณหภูมิ 700°C (d) แอนนีสที่อุณหภูมิ 800°C (e) แอนนีสที่อุณหภูมิ 900°C .....50	
4.13 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มทินออกไซด์ (SnO <sub>2</sub> ) เจือด้วยไททาเนียม ไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C.....50	
4.14 ภาพถ่ายสองมิติและสามมิติจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์ม ทินออกไซด์ (SnO <sub>2</sub> ) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วย วิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C (a),(b) TiO <sub>2</sub> -0.01% (c),(d) TiO <sub>2</sub> -0.03% และ (e),(f) TiO <sub>2</sub> -0.05%.....52	
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรของฟิล์ม ทินออกไซด์ (SnO <sub>2</sub> ) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนที่เตรียม ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C.....52	
4.16 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มทินออกไซด์ (SnO <sub>2</sub> ) เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C.....53	
4.17 ภาพถ่ายสองมิติและสามมิติจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์ม ทินออกไซด์ (SnO <sub>2</sub> ) เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม เคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C (a),(b) CNT-0.01% (c),(d) CNT-0.03% และ (e),(f) CNT-0.05%.....55	
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรของฟิล์ม ทินออกไซด์ (SnO <sub>2</sub> ) เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่ม เคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C.....55	
4.19 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยไททาเนียม ไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C.....56	

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล .....	57
4.21 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C (a) TiO <sub>2</sub> -0.01% (b) TiO <sub>2</sub> -0.03% และ (c)TiO <sub>2</sub> -0.05%.....	58
4.22 ภาพถ่ายสองมิติและสามมิติจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C (a),(b) TiO <sub>2</sub> -0.01% (c),(d) TiO <sub>2</sub> -0.03% และ (e),(f) TiO <sub>2</sub> -0.05%.....	60
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C.....	60
4.24 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจลแอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C.....	61
4.25 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วยวิธีการ Infusion chemical vapor deposition.....	62
4.26 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C (a) CNT- 0.01 % และ (b) CNT- 0.05%.....	63
4.27 ภาพถ่ายสองมิติและสามมิติจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C (a),(b) CNT- 0.01% (c),(d) CNT- 0.03% และ (e),(f) CNT- 0.05%.....	65
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C.....	65

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีการเตรียมฟิล์มบางมีหลายวิธี เช่น Chemical Vapor Deposition (CVD), Liquid Phase Epitaxy (LPE), Molecular Beam Epitaxy (MBE), RF Sputtering, Spin coat, Dip coat เพื่อนำไปใช้ในงานวิจัย และอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ อุตสาหกรรมตัวตรวจวัดก๊าซ อุตสาหกรรมเลนส์กรองแสง เป็นต้น

ฟิล์มบางที่เตรียมจากโลหะออกไซด์มีความสามารถในการตรวจวัดก๊าซได้หลายประเภทไม่ว่าจะเป็นก๊าซที่มีพิษ ก๊าซที่สามารถติดไฟได้ เช่น ฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ ฟิล์มบางเหล็กออกไซด์ และฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ เนื่องจากง่ายต่อการพัฒนาให้พกพาได้สะดวก ราคาไม่แพง ตอบสนองต่อก๊าซได้ดีและรวดเร็ว

M.A. Dal Santos และคณะได้ปลูกฟิล์มบางดีบุกออกไซด์โดยวิธีการโซล-เจล มีความหนา  $0.3 \mu\text{m}$  มีลักษณะเป็นอะมอร์ฟัส พบว่ามีการตอบสนองก๊าซหุงต้มได้ดีที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส [1]

Yi Hu และคณะได้ปลูกฟิล์มบางดีบุกออกไซด์และได้เจือแอนติโมนี(Sb) ขณะเตรียมโซล-เจล เมื่อนำฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือแอนติโมนีไปตรวจสอบสมบัติทางแสงโดยวิธีวัดค่าการทะลุผ่านของแสงพบว่าปริมาณการเจือแอนติโมนี 0-10% เปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านมีค่า 92% ในช่วงความยาวคลื่น 450-800 นาโนเมตร [2]

และได้มีการทดลองเจือไททานเนียมลงในดีบุกออกไซด์ในขณะที่เตรียมโซล-เจลแล้วทำให้เป็นฟูล์นนาโน พบว่าขนาดของเม็ดผลึก ความหนาแน่นและค่าความนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 500 – 1000 องศาเซลเซียส [3]

T. Ratana และคณะได้ปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบกระจกซึ่งใช้เป็นฐานรองลงในโซล-เจลที่เตรียมจาก ซิงค์อะซิเตทไดไฮเดรทและอะลูมิเนียม คลอไรด์เฮกซะไฮเดรท เป็นสารตั้งต้น พบว่ามีขนาดของเม็ดเกรนโดยเฉลี่ย 101 นาโนเมตรและมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามประมาณ 3.70-3.87 eV. [4]

T. kumpika และคณะได้ปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการสปาร์กเส้นของซิงค์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 มิลลิเมตร บริสุทธิ์ 99.97% ลงบนกระจกควอartz และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-800 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความขรุขระเฉลี่ยของแผ่นฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิแอนนัล เนื่องจากขนาดของเม็ดเกรนลดลง [5]

ในการพัฒนาฟิล์มบางโลหะออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับ การควบคุมกรรมวิธีในการเตรียมสาร เช่น การควบคุมอุณหภูมิขณะกวนสาร การควบคุมอุณหภูมิในการแอนนีส การควบคุมปริมาณสารที่ใช้เจือ โชล-เจลดจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ง่ายต่อการควบคุมตัวแปรต่างๆ สามารถใช้งานได้สะดวกและหลากหลาย อีกทั้งยังง่ายในการเตรียมเมื่อต้องการเจือสารอื่นลงไปผสมกับแผ่นฟิล์มบาง

ในงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์จาก โชล-เจลดด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ และสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางแสง สมบัติทางพื้นผิว ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเจือโครงสร้างท่อนาโน ในอัตราส่วนต่างๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์โดยวิธี โชล-เจลด
- 1.2.4 เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผสมโครงสร้างท่อนาโน โดยวิธีการจุ่มเคลือบ
- 1.2.3 เพื่อหาเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผสมโครงสร้างท่อนาโน โดยวิธีการจุ่มเคลือบ
- 1.2.4 เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางที่เตรียม
- 1.2.5 เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบางที่เตรียม
- 1.2.6 เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มที่เตรียม

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการเตรียมทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์โดยวิธี โชล-เจลด
- 1.3.2 เตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์โดยวิธีการจุ่มเคลือบ
- 1.3.3 วิเคราะห์หาเงื่อนไขที่ทำให้ฟิล์มบางมีคุณภาพดีที่สุด
- 1.3.4 เตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผสมโครงสร้างท่อนาโนจากเงื่อนไขที่ดีที่สุด
- 1.3.5 เปลี่ยนแปลงโครงสร้างท่อนาโนชนิดต่างๆ ลงในทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ โชล-เจลด
- 1.3.6 เปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโครงสร้างท่อนาโน ที่ผสมลงในทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ โชล-เจลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.7 วิเคราะห์สมบัติทางแสง ทางโครงสร้างและทางพื้นผิว ของฟิล์มบางทินออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ที่ผสมโครงสร้างท่อนาโน เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในแต่ละโครงสร้างท่อนาโน
- 1.3.8 เปรียบเทียบคุณภาพของฟิล์มบางก่อนและหลังผสมโครงสร้างท่อนาโน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 มีความสามารถในการเตรียมสารละลายทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล
- 1.4.2 มีความสามารถในการเตรียมแผ่นฟิล์มด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ
- 1.4.3 มีความสามารถในการวิเคราะห์สมบัติทางแสง ทางโครงสร้างและทางพื้นผิวของแผ่นฟิล์ม

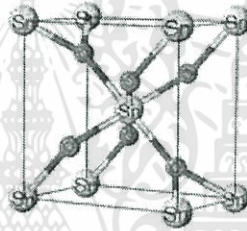


## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

### 2.1 สมบัติพื้นฐานของทินออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>)

ทิน (Sn) เป็นธาตุในหมู่ 4 ของตารางธาตุ สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นทินไอออนและรวมตัวกับสารอนินทรีย์ เช่น ออกซิเจน หรือ คลอไรด์เกิดเป็นสารประกอบขึ้น ทินออกไซด์(SnO<sub>2</sub>) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล ดังรูป 2.1 คือประกอบด้วย Sn 2 อะตอม และ O 4 อะตอม โดยมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมแบบโควาเลนต์หรือแบบเตตระซีครอน ซึ่งมีค่าคงที่แลตทิซประมาณ  $a = b = 4.43$  และ  $c = 3.72$  อังสตรอม เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n-Type ที่มีแถบพลังงานต้องห้ามประมาณ 3.8 eV



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของ SnO<sub>2</sub>

ตารางที่ 2.1 สมบัติของสารประกอบ SnO<sub>2</sub>

สมบัติของสาร	SnO <sub>2</sub>
มวลโมเลกุล(g/mol)	150.6888
โครงสร้าง	เตตระโกนอล
ความหนาแน่น ( $\times 10^{-3}$ kg/cm <sup>3</sup> )	6.55
สถานะ	ของแข็ง
สี	ขาว
จุดเดือด	2,000
จุดหลอมเหลว	1,625
พลังงานที่ใช้ในการเกิดเป็นสารประกอบ	520.000
พลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้	581.128
พลังงานในการสลายพันธะ	580.709
พลังงานของโครงผลึก	1,186.7018
สภาพต้านทานไฟฟ้า( $\Omega$ -cm)	$4 \times 10^6$ (20°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

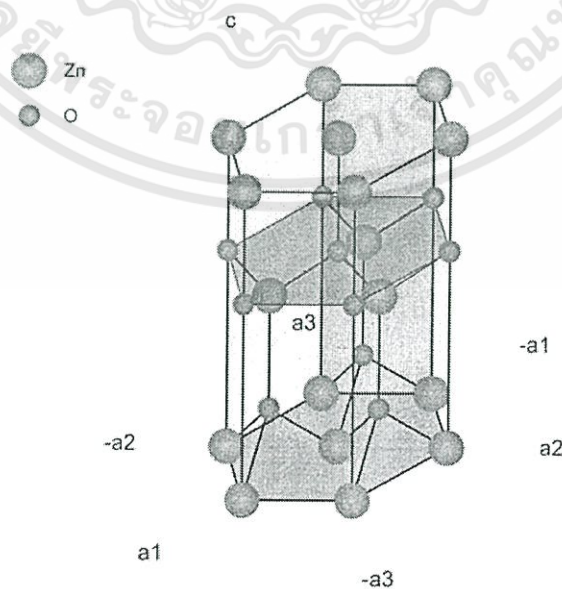
## 2.2 สมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

สังกะสี (Zn) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นซิงค์ออกไซด์ และรวมตัวกับสารอนินทรีย์ เช่น ออกซิเจน หรือคลอไรด์เกิดเป็นสารประกอบขึ้น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จะมีสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีดังที่แสดงในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของสารประกอบ ZnO

สมบัติของสาร	ZnO
มวลโมเลกุล(g/mol)	81.389
โครงสร้าง	Wurtzite
ความหนาแน่น ( $\times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ )	5.6
สถานะ	ของแข็ง
สี	ขาว
จุดเดือด	2248
จุดหลอมเหลว	1800
พลังงานในการสลายพันธะ(meV)	60
พลังงานของโครงผลึก(eV)	1.89

ZnO มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล ดังรูปที่ 2.2 คือประกอบด้วย Zn อะตอม และ O อะตอม โดยมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมแบบโควาเลนต์ หรือแบบเตตระฮีดรอน

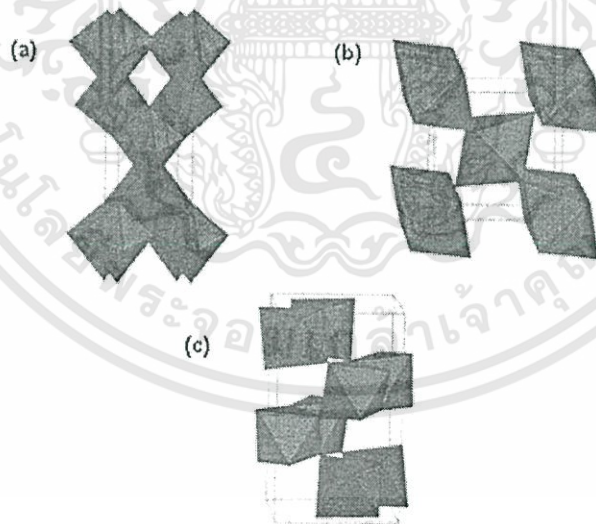


รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite ของ ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

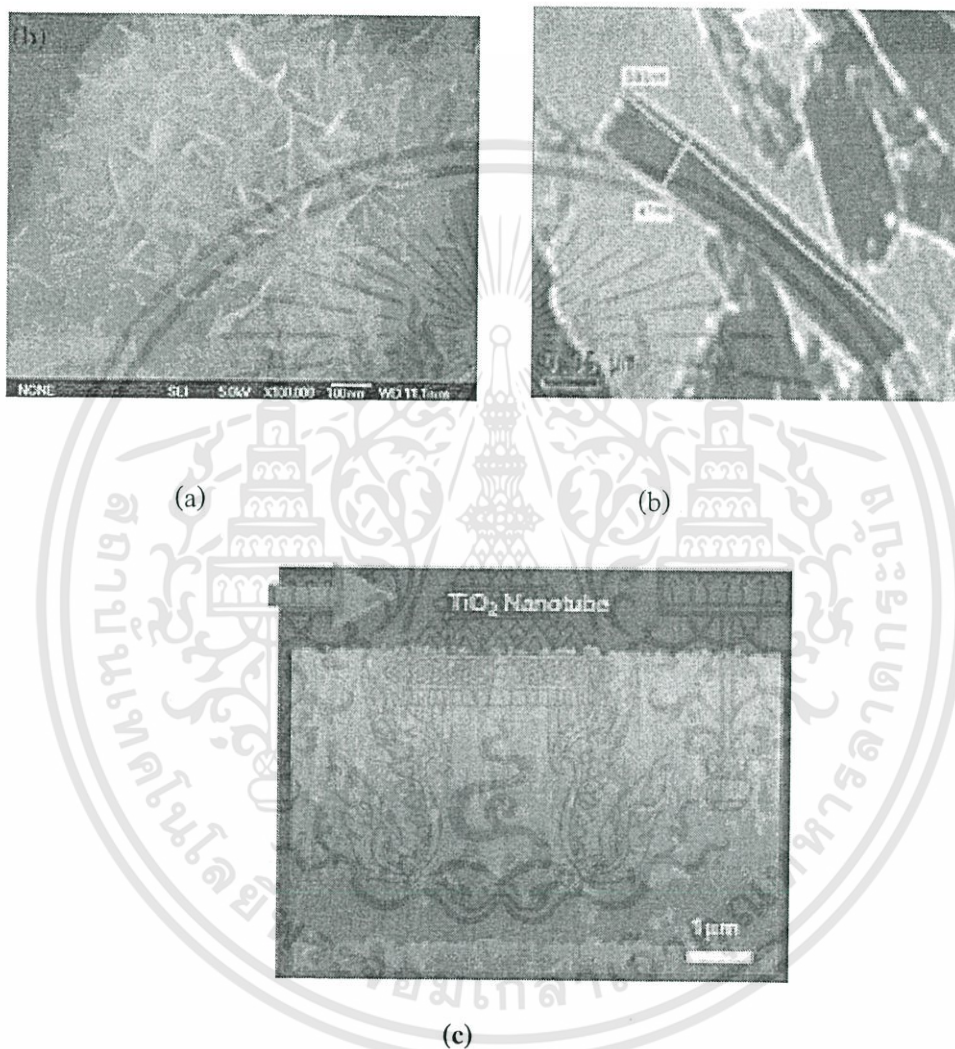
### 2.3 สมบัติพื้นฐานของไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ )

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n-Type มี 3 โครงสร้าง คือ รูไทล์ (Rutile), อะนาเทส (Anatase), และบรูไคท์ (Brookhite) งานทางด้านไฟฟ้าเคมีส่วนใหญ่จะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นแบบรูไทล์และอะนาเทส หรือทั้งสองชนิดรวมกัน ทั้งรูไทล์และอะนาเทสมีหน่วยเซลล์เป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) มีค่าคงที่แลตทิซประมาณ  $a = 3.74$  และ  $b = 9.39$  อังสตรอม มีแถบพลังงานต้องห้ามประมาณ 3.20 และ 3.02 eV สำหรับโครงสร้างแบบอะนาเทสและรูไทล์ตามลำดับ โครงสร้างผลึกอะนาเทส, รูไทล์, และบรูไคท์ สามารถแสดงได้ในรูปของ  $\text{TiO}_2$  ที่เป็นปริมาตรฐานสี่เหลี่ยมสองอันประกบกันหรือออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิดนี้มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกันและจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอล โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสเกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล และโครงสร้างผลึกบรูไคท์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอลถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกของไททาเนียมมีอยู่หลายชนิดตามที่ได้อธิบายมาแล้ว แต่อะนาเทสและรูไทล์เป็นโครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของ  $\text{TiO}_2$  (a) อะนาเทส (b) รูไทล์และ (c) บรูไคท์

นอกจากโครงสร้างผลึกของไททาเนียมทั้ง 3 ชนิดแล้ว ยังมีการพัฒนาลักษณะทางโครงสร้างของไททาเนียมให้อยู่ในรูปของโครงสร้างนาโน เช่น ไททาเนียมแผ่นนาโน ไททาเนียมแท่งนาโน ไททาเนียมท่อนาโน เป็นต้น โดยส่วนใหญ่พัฒนาขึ้นมาเพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ไททาเนียมโครงสร้างนาโนชนิดต่างๆ (a) โครงสร้างแผ่นนาโน (b) โครงสร้างแท่งนาโน และ (c) โครงสร้างท่อนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

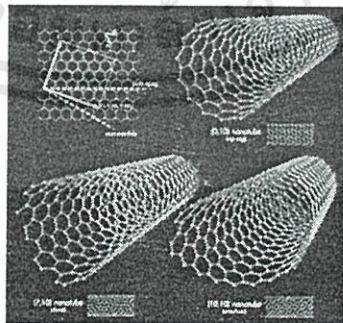
## 2.4 สมบัติพื้นฐานของท่อนาโนคาร์บอน (CNT)

ท่อนาโนคาร์บอน(Carbon Nanotubes) คือ โมเลกุลของคาร์บอนที่มีการเรียงตัวกันเป็นเส้นยาว และมีรูกลวง เหมือนท่อขนาดจิ๋ว โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ใน 100,000 เซนติเมตร (น้อยกว่า 100 นาโนเมตร)

ท่อนาโนคาร์บอน เป็นอีกโครงสร้างหนึ่งของคาร์บอน ซึ่งค้นพบในปี ค.ศ. 1991 กล่าวคือ มีลักษณะคล้ายกับ ฟูลเลอรีน ต่างกันที่ฟูลเลอรีนมีโครงสร้างเป็นทรงกลม(Spherical Shape)แต่ท่อนาโนคาร์บอนมีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก (Cylinder Shape) ชื่อของท่อนาโนคาร์บอนมาจากขนาดของมัน ซึ่งมีขนาดระดับนาโน ( $10^9$  เมตร) หรือมีความกว้างประมาณ 1 ใน 10000 ของความกว้างของเส้นผมมนุษย์ มีความยาวประมาณ 1 ล้านเท่าของความกว้างของมัน ท่อนาโนคาร์บอนมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีผนังซ้อนกัน 2-50 ชั้น เรียกว่า Multi-Walled Carbon Nanotube (MWNT) และชนิดที่มีผนังชั้นเดียวหรือเป็นท่อเดี่ยว เรียกว่า Single-Walled Carbon Nanotube (SWNT)

ท่อนาโนคาร์บอนของกราฟไฟท์นี้สามารถเป็นได้ทั้งแบบท่อปลายเปิดหรือปลายปิด (Cap) ถ้าเป็นแบบปลายปิดจะครอบด้วยครึ่งทรงกลมของ ฟูลเลอรีน  $C_{60}$  ขนาดของท่อสำหรับ SWNT มีตั้งแต่ 0.7 ถึง 2 nm ส่วน MWNT มีขนาดระหว่าง 10 ถึง 300 nm โดยมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อมีขนาดอยู่ในระหว่าง 0.34 ถึง 0.36 nm สามารถทำให้ยาวได้ถึง 20 เซนติเมตร และมีรายงานว่าสามารถทำให้ยาวได้ถึง 100 เมตร ล่าสุดสามารถทำท่อ ท่อนาโนคาร์บอน ขนาดเล็กสุดได้ถึง 3 องศา ( $^{\circ}$ )

คุณสมบัติที่เด่นมากของท่อนาโนคาร์บอน คือ ในพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ท่อนาโนคาร์บอนนี้ จะมีความทนต่อแรงดึง ได้สูงกว่าเหล็กกล้าถึงประมาณ 100 เท่า ในขณะที่มีน้ำหนักเบาว่าสามเท่า อีกทั้งทนต่อกรดด่างและความร้อนสูงได้ดีมาก



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

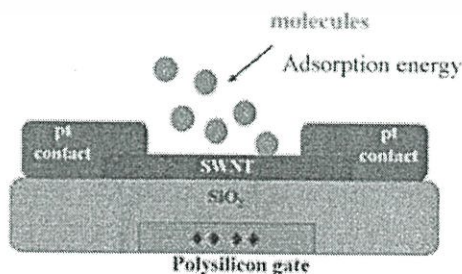
เป็นที่ทราบกันดีว่าเพชรมีความแข็งแกร่งมาก ด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของกราฟีนนั้นคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราฟีน มีความแข็งแกร่งมาก (มากกว่าเพชร) แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ด้วยลักษณะโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนดังกล่าวรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนแข็งแรงกว่าเพชรและกราฟีน

การที่จะก้าวเข้าสู่ยุคนาโนอิเล็กทรอนิกส์นั้น ต้องลดขนาดชิ้นส่วนอุปกรณ์ลง 10 ถึง 1,000 เท่าจากเดิมที่เป็นไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ขนาดของชิ้นส่วนเป็นไมโครเมตร) ดังนั้นต้องมีการลดขนาดของชิ้นส่วนอุปกรณ์ของอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นขนาดระดับนาโนเมตร ทั้งทรานซิสเตอร์ ไดโอด รีเลย์ และลอจิกเกตต้องเปลี่ยนใหม่ เช่น ทรานซิสเตอร์ที่เป็นซิลิคอนเซมิคอนดักเตอร์ จากเดิมมีขนาดระดับไมครอน ต้องหันมาใช้ โครงสร้างโมเลกุลอินทรีย์ (Organic Molecules) หรือ อนินทรีย์ (Inorganic) ในระดับนาโน มีการใช้ ท่อนาโนคาร์บอนเป็นช่อง (Channel) ให้อิเล็กตรอนผ่านระหว่าง Source-Drain อิเล็กทรอดสำหรับ Field-Effect Transistor (FET) โดยสามารถเปิดปิดสวิตช์ด้วย Voltage Gate ตามปกติ แต่สิ่งที่แตกต่างจากซิลิคอน FETs ทั่วไปคือขนาด และการนำไฟฟ้าผ่านท่อนาโนคาร์บอน สูงมากกว่าถึง 1 ล้านเท่าด้วยกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าและให้ Clock Speed ในระดับสูงกว่าถึง 1 THz รวมถึงการสร้างลอจิกเกตด้วย CNT-FETs โดยมีการได้ปด้วยสารเพื่อที่จะเติมหรือเอาอิเล็กตรอนออกทำให้ได้ *n*-type หรือ *p*-type เกิดขึ้นถึงแม้จะสามารถสร้างอุปกรณ์เหล่านั้นได้ในระดับนาโน แต่สิ่งที่ท้าทายกว่าคือการเชื่อมต่อ (Wire) อุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกันเพื่อจะปฏิบัติการเชิงคณิตศาสตร์หรือลอจิกได้ จึงเกิดแนวคิดที่ต้องทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นทั้งตัวเชื่อมและเป็นอุปกรณ์ในตัวเดียวกัน เหมือนยังป็นนัดเดียวได้นกสองตัว อย่างไรก็ตามสิ่งนี้ยังไม่รวมถึงในระดับโครงสร้างของระบบวงจรเชื่อมต่อกอมพิวเตอร์หรือระบบการทำงานอิสระอื่นๆ มีการกล่าวว่างานวิจัยในประเด็นเหล่านี้หากเทียบกับการปีนยอดเขาเอเวอเรสต์แล้วเพิ่งมาถึงแค่ฐานเชิงเขาเท่านั้นเอง NASA สามารถสังเคราะห์คอมโพสิตของ SWNT-polyimide ที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพทั้งความแข็งแกร่ง การทนอุณหภูมิ และการนำไฟฟ้า ซึ่งทั้งหมดนี้มีความสำคัญมากสำหรับวัสดุประกอบเครื่องบินและยานอวกาศ กล่าวคือ ท่อนาโนคาร์บอน สามารถช่วยเสริมความแข็งแกร่ง (Reinforce) ของวัสดุเดิมให้มากยิ่งขึ้น น้ำหนักเบา และสามารถสร้างได้หลายรูปแบบ ได้แก่ ฟิล์มบาง ไฟเบอร์ โฟม สารเคลือบ และ ผง เป็นต้น

ปัจจุบันมีการผลิตวัสดุคอมโพสิตของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ปริมาณมากระดับต้น อาทิเช่น พลาสติกเสริมท่อานาโนคาร์บอน เช่น เสริมใน Ethylene Tetrafluoroethylene หรือ Polyvinylidene Fluoride เพื่อนำมาใช้ในรถยนต์ ใช้เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติที่ทนต่อสารเคมี ทนต่อการหลุดลอก รวมถึงป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการสร้างจอกภาพอย่างแบน และเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) ซึ่งท่อานาโนคาร์บอนจะไปแทนที่คะตะลิสต์เดิมคือ แพลตตินัม พบว่าในสภาวะเดียวกันเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ SWNT เป็นส่วนผสมของขั้วอิเล็กโทรดให้กระแสสูงถึง 800 mA ขณะที่ขั้วแบบเดิม (platinum-impregnated carbon black) ให้กระแสไฟฟ้าได้เพียง 350 mA ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เนื่องจากท่อานาโนคาร์บอนมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นการจะจัดเรียงอนุภาคของท่อคาร์บอนให้ได้ตามต้องการนั้นเป็นสิ่งที่ยาก แต่ได้มีรายงานออกมาว่าสามารถใช้ลำแสงเลเซอร์ส่องเส้นทำงานคล้ายตะเกียบ คือ จะจับและเคลื่อนย้ายอนุภาคของท่อคาร์บอนได้ตามต้องการ ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า “Optical Trapping” จึงคาดว่าน่าจะสามารถนำท่อานาโนคาร์บอนมาใช้ในการสร้างไมโครชิพที่มีความไวสูงและใช้พลังงานต่ำได้ในอนาคต

ในทางการแพทย์แนวคิดสำคัญที่จะใช้ประโยชน์จากท่อานาโนคาร์บอน คือการที่ท่อานาโนนี้สามารถเข้าถึงโครงสร้างในระดับเซลล์ได้ นั่นคือสามารถใช้เป็น Probe ตรวจวัด หรือใช้เป็นปิเปตขนาดเล็กมากสำหรับปลดปล่อยสารหรือ โมเลกุล (Ultrasmall Pipette) เข้าสู่เซลล์เป้าหมายได้ อันหลังนี้คือศักยภาพของท่อานาโนคาร์บอน ในการขนถ่ายและปลดปล่อยยาเข้าสู่อวัยวะเป้าหมาย (Targeted Drug Delivery)

การที่ท่อานาโนคาร์บอนสามารถทำให้อยู่ในรูปของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) โดยที่สารกึ่งตัวนำนี้สามารถตอบสนองต่อสารพวกอัลคาไลน์ ฮาโลเจน และก๊าซต่างๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อเป็น Semiconducting Carbon Nanotube จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ดียิ่งขึ้นอย่างมาก ทำให้เซนเซอร์ที่ใช้ท่อานาโนคาร์บอน นี้มีความไวมากขึ้น ซึ่งก็มีการพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัด Cytochrome C, Methane, Krypton และ โมเลกุลของ Alkylamine แบบสารกึ่งตัวนำเป็นต้น ลักษณะภาพของไดอะแกรมแสดงดังนี้

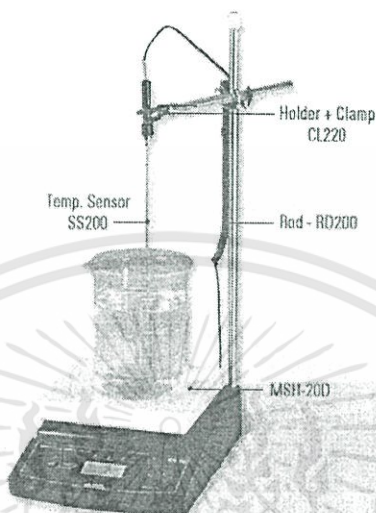


รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมแสดงSWNTที่ทำให้อยู่ในรูปสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 หลักการเครื่องมือปลูกฟิล์มทินออกไซด์ที่ผสมโครงสร้างท่อนาโน

### 2.5.1 เครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน (Magnetic stirrer with hot plate)



รูปที่ 2.7 เครื่อง Magnetic stirrer with hot plate

#### หลักการการทำงานของเครื่อง Magnetic stirrer with hot plate

เป็นเครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อนมีระบบแม่เหล็กที่ช่วยในการกวนสารละลาย ซึ่งจะใช้ร่วมกับ Magnetic bar โดยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างแม่เหล็กทำให้ Magnetic bar หมุนได้ มีปุ่มหมุนปรับระดับความร้อนและความเร็วรอบในการหมุน มีหัววัดอุณหภูมิในรูปขององศาเซลเซียส

### 2.5.2 เครื่องจุ่มเคลือบ (Dip coater)

เครื่องจุ่มเคลือบใช้อุปกรณ์ดีปเปอร์ในการจุ่มกระจกสไลด์ลงในสารละลายที่มีลักษณะเป็นโซล-เจลด้วยความเร็วในการจุ่มภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศ ความหนืดของสารละลายเมื่อดึงกระจกสไลด์ขึ้นทำให้สารละลายเกาะบนแผ่นกระจกสไลด์ โดยความหนาของชั้นฟิล์มสามารถคำนวณได้จากสมการของ Landau-Levich

$$h = 0.94 \frac{(\eta U)^{2/3}}{\gamma_{LV}^{1/6} (\rho g)^{1/2}} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$h$  = ความหนาของฟิล์ม

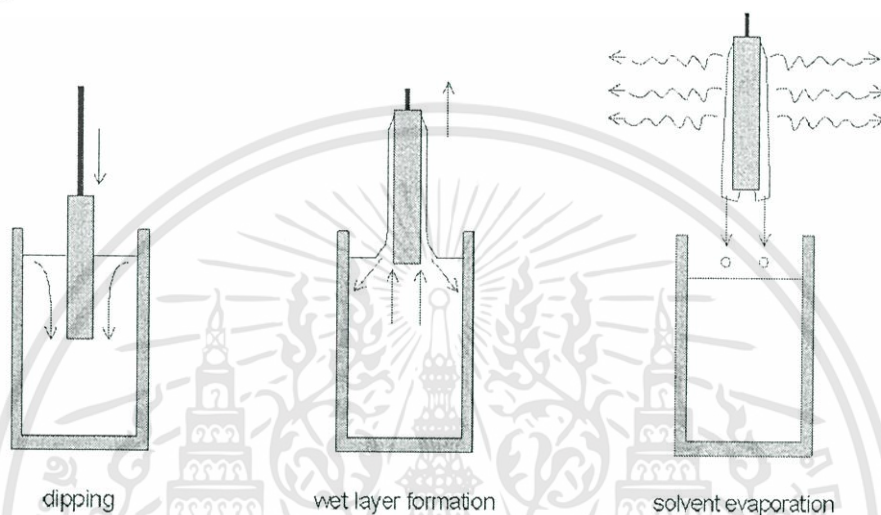
$\eta$  = ความหนืดของของเหลว

$U$  = ความเร็วของชิ้นงาน

$\gamma_{LV}$  = liquid-vapour surface tension

$\rho$  = ความหนาแน่น

$g$  = แรงโน้มถ่วง



รูปที่ 2.8 แสดงขั้นตอนการจุ่มเคลือบลงในสารละลายที่มีลักษณะเป็น โซล-เจล

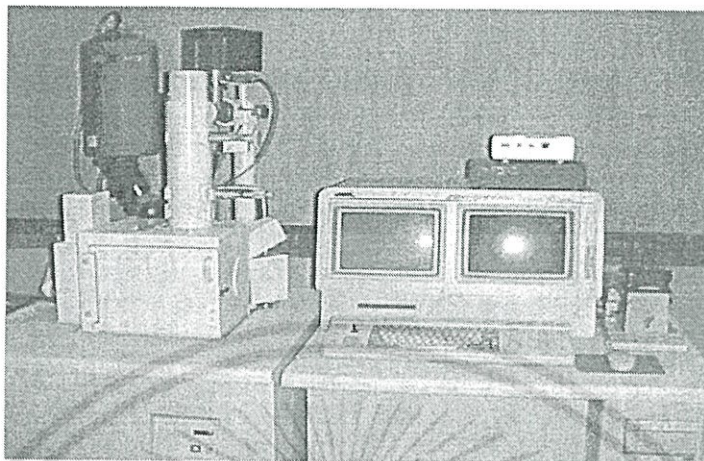
ขั้นตอนในการจุ่มเคลือบแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นตอนการจุ่ม
2. ขั้นตอนการดึง ในขั้นตอนนี้ชั้นของโซล-เจลเริ่มเกาะตัวที่พื้นผิวของฐานรอง
3. ขั้นตอนการระเหย ในขั้นตอนนี้ชั้นของโซลเจลเริ่มแข็งตัวทั้งแผ่นเนื่องจากการระเหยของสารละลาย

ในกระบวนการเคลือบด้วยโซล-เจลนั้น การระเหยขึ้นอยู่กับความเร็วของการแข็งตัวของฟิล์มที่เคลือบ ปัจจัยที่สำคัญที่สุดของอัตราการระเหยนั้น คืออัตราการแพร่ของไอที่แพร่ออกจากผิวหน้าของฟิล์ม ซึ่งขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของแก๊สที่ชั้นขอบเขตต่างๆ ที่ติดอยู่กับผิวหน้าของฟิล์ม เนื่องจากการพวมวลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแก๊ส เพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้การแพร่เพิ่มขึ้นได้อย่างมาก

## 2.6 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิว

### 2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)



รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ได้จากการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอ cathode ray tube (CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ cathode ray tube (CRT)

#### -หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1 – 40 keV พร้อมทั้งบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกวาดไปบนผิวตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning coils) บนระนาบ x – y สิ่งสำคัญของการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด คือ การเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับ

องค์ประกอบของธาตุในเนื้อตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณแบบต่างๆ

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) มีความสำคัญมากในการศึกษา ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจาก บริเวณผิวของตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron : PE) ถ่ายไอออนพลังงานให้แก่อะตอมของตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสาร ตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจาก อะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่อ อิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะ ถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยา ระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ ต้องการ ในกรณีของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวอย่างหลังจาก สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบแอสไว้ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะ เคลื่อนเข้าสู่บริเวณ scintillator ซึ่งทำมาจาก  $\text{CaF}_2$  และฉาบผิวด้วยอะลูมิเนียมบางทำหน้าที่เป็น collector ไบแอสศักย์ไฟฟ้าที่ 12 kV ซึ่งสนามไบแอสนี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเคลื่อน เข้าชน scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และจะถูกส่งไปตาม light guide เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณ แสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการขยายสัญญาณ เพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการ กราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้ สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกน ของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุม ปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของลำอิเล็กตรอนในกล้อง จุฬทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT โตกว่าพื้นที่การกราดบนผิวของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุฬทรรศน์ ดังนั้นจึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

$$M = \frac{A_{CRT}}{A_S} \quad (2.2)$$

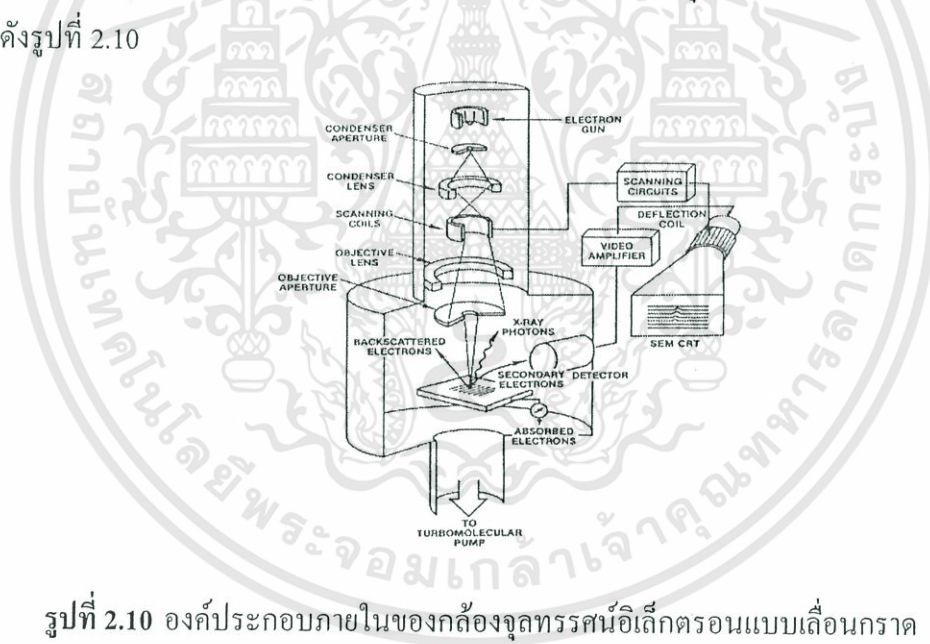
โดยที่

$M$  = กำลังขยาย

$A_{CRT}$  = พื้นที่บนจอ CRT

$A_S$  = พื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน

ชุดของ scanning coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอนและนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกราด แสดงองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ดังรูปที่ 2.10

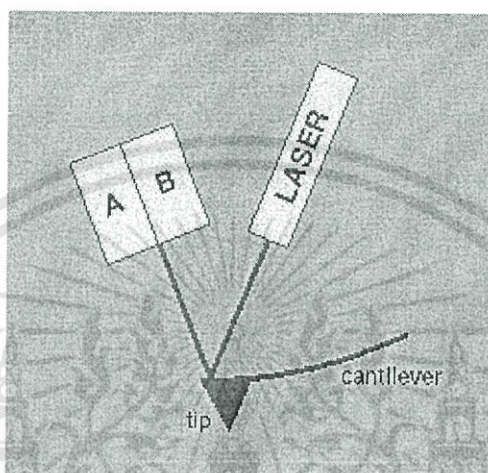


รูปที่ 2.10 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงอะตอม (Atomic force microscope: AFM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope: AFM) ได้สร้างขึ้นในปี 1986 โดย Binnig, Quate และ Gerber ซึ่งใช้หัวโฉบปลายแหลมเคลื่อนที่กวาดไปทั่วทั้งผิวนำของชิ้นงาน โดยที่โฉบก็คือเข็มปลายแหลมเล็กๆที่ติดอยู่บริเวณปลายของคาน (Cantilever) ที่สามารถโค้งงอได้ตามแรงที่เกิดขึ้นระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงาน



รูปที่ 2.11 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการโค้งงอของคาน (Cantilever)

ในช่วงเริ่มแรก AFM ใช้การทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนที่ปลายคานเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคาน แต่ในปัจจุบัน AFM ใช้เทคนิคทางแสงเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคานแทน ดังรูปที่ 2.11 ได้แสดงให้เห็นการทำงานของ AFM ซึ่งคานสามารถโค้งงอได้ โดยแสงเลเซอร์เดินทางตกกระทบลงบนคานแล้วสะท้อนออกมาตกกระทบลงบนตัวตรวจจับทางแสงสองตัวที่อยู่ติดกัน จากนั้นทำการวัดผลต่างของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับทางแสง A และ B จึงทำให้สามารถวัดการโค้งงอของคานได้

การโค้งงอของคานนั้นเป็นไปตามกฎของฮุกโดยระยะของการโค้งขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำ ดังนั้นแรงที่กระทำระหว่างปลายเข็มกับตัวชิ้นงานจึงสามารถวัดได้ การเคลื่อนที่ของเข็มหรือชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงนั้นใช้อุปกรณ์ที่สร้างจากสารเซรามิกเปียโซอิเล็กทริก ซึ่งส่วนมากมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ตัวควบคุมการเคลื่อนที่นี้สามารถควบคุมได้แม่นยำในระดับอังสตรอมในแนวแกน x, y และ z โดยที่แกน z คือแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน

### การทำงานด้วยการควบคุมแบบย้อนกลับ

AFM สามารถทำงานได้ในสองโหมดหลักคือ

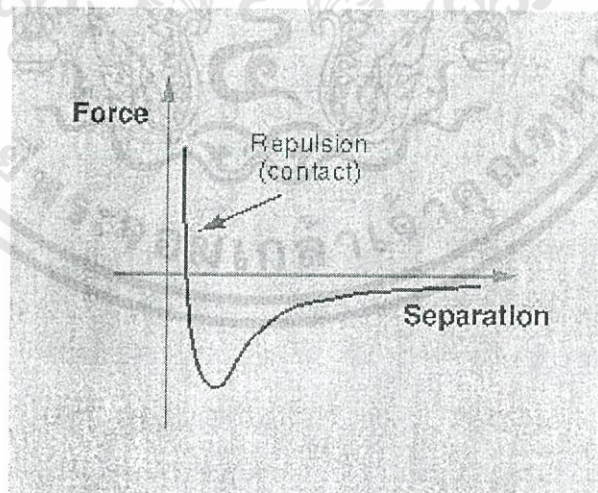
- 1.) การทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับ
- 2.) การทำงานแบบไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ

การทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับนั้นเปียโซที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน (หรือ เข็ม) สามารถเคลื่อนที่ขึ้นและลงได้โดยขึ้นอยู่กับแรงที่วัดได้ และสามารถรักษาระยะห่างระหว่างเข็มกับชิ้นงานมีค่าคงที่ส่งผลให้แรงระหว่างเข็มกับชิ้นงานมีค่าคงที่ด้วย ซึ่งโหมดนี้เรียกว่า โหมดแรงคงที่ (Constant force) ทำให้สามารถแสดงให้เห็นภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่น่าเชื่อถือได้

ส่วนการทำงานแบบไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ เป็นโหมดที่ควบคุมให้มีตำแหน่งในแนวแกน z คงที่ และวัดการโค้งงอของคาน ซึ่งโหมดนี้มีประโยชน์สำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบมากที่ความละเอียดสูง จะเป็นการดีกว่าถ้าให้มีสัญญาณควบคุมย้อนกลับเล็กน้อยเพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดจากการมีบางส่วนของพื้นผิวไม่เรียบทำให้เข็มหรือคานเกิดความเสียหายได้

### อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเข็มกับชิ้นงาน

การวัดเพื่อให้ได้ภาพ AFM นั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยการใช้อันตรกิริยาที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นระหว่างเข็มกับชิ้นงาน ซึ่งอันตรกิริยาที่ใช้วัดหลักๆมีอยู่ด้วยกันสามวิธี คือ โหมดสัมผัส (contact mode), โหมดสัมผัสแบบสั้น (tapping mode) และ โหมดไม่สัมผัส (non-contact mode)



รูปที่ 2.12 กราฟแรงอันตรกิริยาระหว่างโมเดลที่ขึ้นอยู่กับระยะห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## การแสดงผลของ AFM



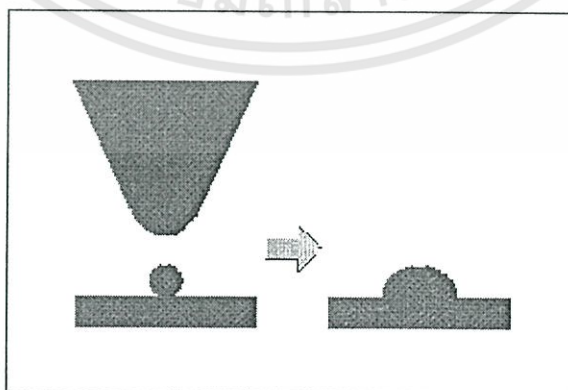
รูปที่ 2.14 ลักษณะของสีที่ใช้แสดงความสูงต่ำของแต่ละตำแหน่ง

ข้อมูลที่ได้จากการวัด AFM นั้นเป็นข้อมูลที่ครบทั้งสามมิติ โดยปกติวิธีการที่ใช้แสดงผลของข้อมูลนั้นใช้แผนภาพที่แสดงความสูงหรือต่ำของข้อมูลด้วยสี เช่น สีดำแสดงถึงพื้นที่ลักษณะต่ำและสีขาวแสดงถึงพื้นที่ลักษณะสูง รูปแบบของสีที่นิยมใช้กันมากแสดงได้ดังรูปที่ 2.14

### ผลของหัวเข็ม

ตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่มีผลต่อความละเอียดของการวัดเพื่อให้ได้ภาพ AFM ก็คือความแหลมของปลายหัวเข็มที่ใช้ในการวัด AFM เริ่มแรกหัวเข็มที่ใช้กับ AFM สร้างมาจากเพชรปลายแหลมที่นำไปติดบนแผ่นอะลูมิเนียม โดยทั่วไปในปัจจุบันหัวเข็มที่ใช้เป็นหัวเข็มที่ผลิตออกขายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งหัวเข็มที่ดีที่สุดในตอนนี้ปลายเข็มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 นาโนเมตร ความแหลมของปลายเข็มจำเป็นต้องอธิบายในรูปแบบของตัวแปรผลกระทบเนื่องจากปลายเข็ม ตัวแปรเหล่านี้เป็นผลเนื่องจากปลายเข็มที่มีต่อภาพ AFM ที่ได้ มีตัวแปรที่สำคัญดังนี้

- 1.) การขยายออกของภาพ (Broadening)
- 2.) ผลของแรงกดของปลายเข็ม (Compression)
- 3.) แรงกระทำระหว่างเข็มกับชิ้นงาน (Interaction forces)
- 4.) มุมตันของปลายเข็ม (Cone angle)



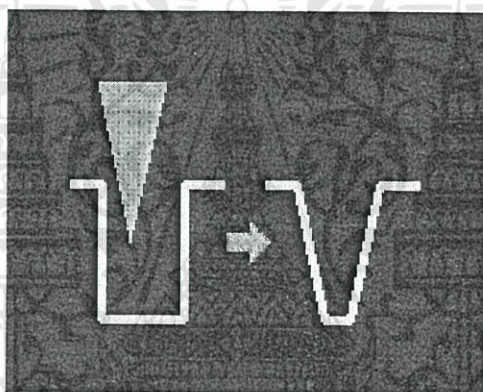
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการขยายออกของภาพเมื่อปลายเข็มใหญ่กว่าพื้นที่ผิวที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขยายออกของภาพเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของปลายหัวเข็มใหญ่กว่าขนาดของพื้นผิวที่วัด รูปที่ 2.15 แสดงถึงปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ เมื่อปลายเข็มลากผ่านพื้นผิวของชิ้นงาน ด้านข้างของปลายเข็มสัมผัสก่อนที่จะถึงปลายซึ่งระบบจะตอบสนองต่อแรงที่เกิดขึ้นทำให้ภาพที่ได้เกิดการขยายออก

ผลของแรงกดของปลายเข็มเกิดขึ้นเมื่อปลายเข็มลากผ่านพื้นผิว ปรากฏการณ์นี้ยากที่จะพิจารณาว่าเกิดขึ้นเมื่อใด แต่จากการศึกษาชีววิทยา เช่น DNA ที่วัดความกว้างของDNA จากภาพ AFM พบว่าขึ้นอยู่กับแรงกดของเข็ม เนื่องจากว่าแม้ว่าแรงกดระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงานจะมีค่าเพียงนาโนนิวตัน แต่ความกดดันอาจมีค่าถึงเมกะปาสคาล

แรงกระทำระหว่างเข็มกับชิ้นงานที่แตกต่างกันทำให้ได้ภาพ AFM ที่แตกต่างกัน ถึงอย่างไรก็ตามทำให้สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวบางอย่างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแรงกระทำระหว่างเข็มกับชิ้นงานก็ได้ แรงทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงานก็มีความสำคัญกับการวัด AFM ที่ได้ ดังนั้นการเลือกสารที่ใช้ทำหัวเข็มก็มีความสำคัญเหมือนกัน



รูปที่ 2.16 แสดงผลลักษณะมุมตันของเข็มที่มีต่อการวัด

มุมตันของปลายเข็มมีความสำคัญต่อการวัดพื้นผิวที่ลักษณะสูงชัน หัวเข็มจากการสร้างด้วยวิธีปลูกด้วยลำอิเล็กตรอนใช้วัดค่าแพ่งที่มีความสูงได้น่าเชื่อถือกว่าใช้หัวเข็มแบบปิรามิด ซึ่งผลกระทบนี้ยืนยันด้วยการทดลองวัดการเสื่อมสลวยของเอนไซม์ด้วยวิธี AFM

## 2.7 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง

### 2.7.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ( X-ray

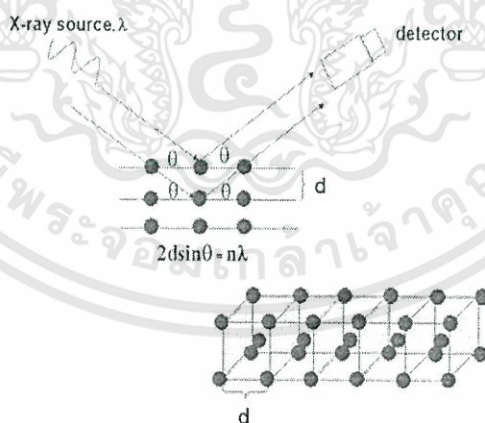
#### Diffraction : XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ( X-ray Diffraction: XRD ) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง(Non-destructive method) จากเครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเพื่อหาปริมาณของธาตุที่เป็นส่วนประกอบ เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบอนินทรีย์ ดีเอ็นเอ โปรตีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติรวมถึงที่สังเคราะห์ขึ้นด้วย

XRD เป็นเทคนิคที่คล้ายเทคนิค spectroscopic อื่นๆ เช่น เทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ ( X-ray Fluorescence; XRF ) โดยที่ XRF จะสามารถบอกได้ว่าวัสดุเหล่านั้นประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง ในขณะที่ XRD นั้นจะช่วยให้สามารถรู้ได้ว่าธาตุเหล่านั้นมีองค์ประกอบเป็นอย่างไร

#### หลักการพื้นฐาน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นจะใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Bragg



รูปที่ 2.17 สมการของ Bragg

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\lambda =$  ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์,

$d =$  ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

$\theta =$  มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

ในขั้นตอนแรกนั้นต้องทำการปลูกผลึกที่สนใจแล้วนำผลึกที่ได้ไปวางในเครื่อง diffractometer แล้วฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ รังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนจะถูกบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มหรือคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จะถูกรวบรวมแล้วนำมาสร้างเป็นแผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นจะต่อมจะถูกปรับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่ง เทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเข้มที่มุมต่างๆ จะถูกนำมาพล็อตจนได้กราฟที่เรียกว่า diffractogram ซึ่งแต่ละพีคที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำให้เราได้ทราบถึงข้อมูลของวัสดุที่ต้องการศึกษาทั้งทางด้านกายภาพเคมี และคุณสมบัติเชิงกลอย่างมากมาย

เทคนิคที่ใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิค ได้แก่

### 1. Single-Crystal Methods

โดยหลักแล้วเทคนิคนี้ใช้ในการตรวจวัด โครงสร้างอะตอม (ความสมมาตร ตำแหน่ง ช่องว่าง) ซึ่งวิธีการดั้งเดิมนั้น (Laue method) จะใช้ผลึกติดอยู่กับที่และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เมื่อฉายลำรังสีให้ตกลงบนผลึกเดี่ยว จะทำการบันทึกผลการเลี้ยวเบนลงบนแผ่น Photographic plate ซึ่งใช้ในการบันทึกค่าความเข้มและตำแหน่งของรังสีที่เกิดการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันนั้นจะทำให้ผลึกเกิดการหมุนและอาศัยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีของกล้องก้าวข้ามขีดจำกัดของการตรวจวัดปริมาณของรังสีที่เลี้ยวเบนจากวิธีการดั้งเดิม วิธีการนี้จะใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวแต่อาศัยการเปลี่ยนมุม  $\theta$  โดยการเคลื่อนที่ของผลึกซึ่งอยู่บนแท่นหมุน แล้วใช้ diffractometer และคอมพิวเตอร์ในการเก็บรวบรวมและจัดการข้อมูล ซึ่งจะให้ผลที่มีความแม่นยำมากกว่า

### 2. Powder Methods

เบื้องต้นแล้ววิธีการนี้จะใช้ในการระบุแร่ธาตุ โดยจะใช้บอกร่องค์ประกอบและตรวจวัดความสัมพันธ์ของธาตุที่มีอยู่ในสารผสม เช่นเดียวกับ Single-Crystal Methods คือ แต่เดิมนั้นจะใช้เทคนิคของการถ่ายภาพในการบันทึกข้อมูลการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า X-ray Powder Diffractometer และยังสามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเตรียมตัวอย่างผลึกแล้วไม่สามารถใช้วิธีการแรกในการตรวจวัดได้

### -ค่าคงที่แลตทิซ (Lattice Constant)

จากกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์ ให้  $F$  แทนแอมพลิจูดของการเลี้ยวเบนของคลื่น  $k$  เป็นเวกเตอร์คลื่นของระนาบคลื่นตกกระทบ และ  $k'$  เป็นเวกเตอร์คลื่นสะท้อน ดังนั้นจะได้

$$F = \int n_G e^{i(\vec{G} + \vec{k} + \vec{k}') \cdot \vec{r}} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $n_G$  คือ แอมพลิจูดของการเลี้ยวเบน

$G$  คือ แลตทิซส่วนกลับ (Reciprocal lattice)

ซึ่งหาได้จาก 
$$\vec{G} = \vec{k}' - \vec{k} \quad (2.5)$$

เมื่อ 
$$|\vec{k}'| - |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.6)$$

จะได้ 
$$|\vec{G}|^2 = \vec{G} \cdot \vec{G} = (\vec{k}' - \vec{k}) \cdot (\vec{k}' - \vec{k}) \quad (2.7)$$

$$|\vec{G}|^2 = 2|\vec{k}|^2 - 2\vec{k}' \cdot \vec{k} \quad (2.8)$$

$$|\vec{G}|^2 = 4\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (1 - \cos 2\theta) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $2\theta$  คือมุมระหว่าง  $\vec{k}$  และ  $\vec{k}'$  จะได้

$$\lambda = \frac{4\pi}{G} \sin \theta \quad (2.10)$$

และจากสมการ 
$$|\vec{G}|^2 = \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 (h^2 + k^2 + l^2) \quad (2.11)$$

ดังนั้นจะได้สมการของค่าคงที่แลตทิซ เป็น

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $a$  คือ ค่าคงที่แลตทิส

$\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

$\theta$  คือ มุมของการเลี้ยวเบน

#### -ขนาดของเม็ดผลึก (Grain size)

จากสมการของซีเรอร์ (Sherrer's equation) สามารถหาค่าขนาดเม็ดผลึกได้ดังนี้

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos\theta} \quad (2.13)$$

เมื่อ

$D$  คือ ขนาดของเม็ดผลึก

$K$  คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก ( $0.89 \leq K \leq 0.94$ )

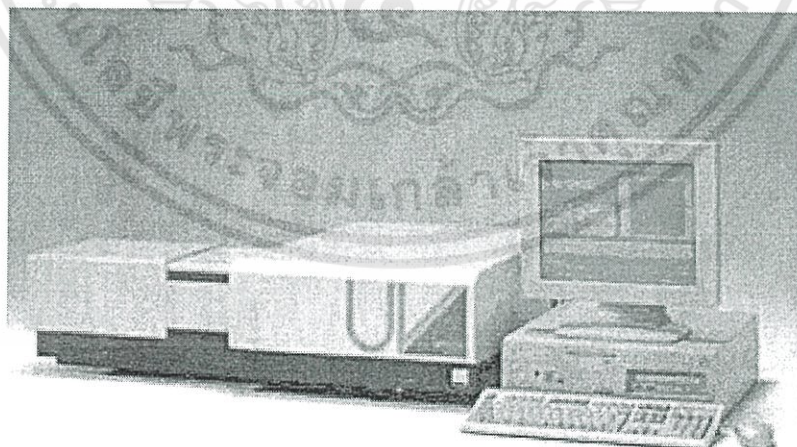
$\theta$  คือ มุมของการเลี้ยวเบน

$\beta_{2\theta}$  คือ ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน (Full Width at Half of Maximum of diffraction peak : FWHM)

$\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

## 2.8 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางแสง

### 2.8.1 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer



รูปที่ 2.18 แสดงเครื่อง UV-VIS Spectrometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารโดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร (nm) ของสารนั้น ได้แก่ สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) โดยนำสารตัวอย่างใส่ในเซลล์ควอร์ตซ์ (quartz) แล้ววางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสง สารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสี หรือแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ดูดกลืนจะผ่านออกมายังเครื่องวัดแสง (photomultiplier tube) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมา โดยการหักล้างกับปริมาณของแสงก่อนดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็น curve หรือสเปกตรัมซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่น

### หลักการทํางานและส่วนประกอบในเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

#### Spectrophotometer และ Beer's Law

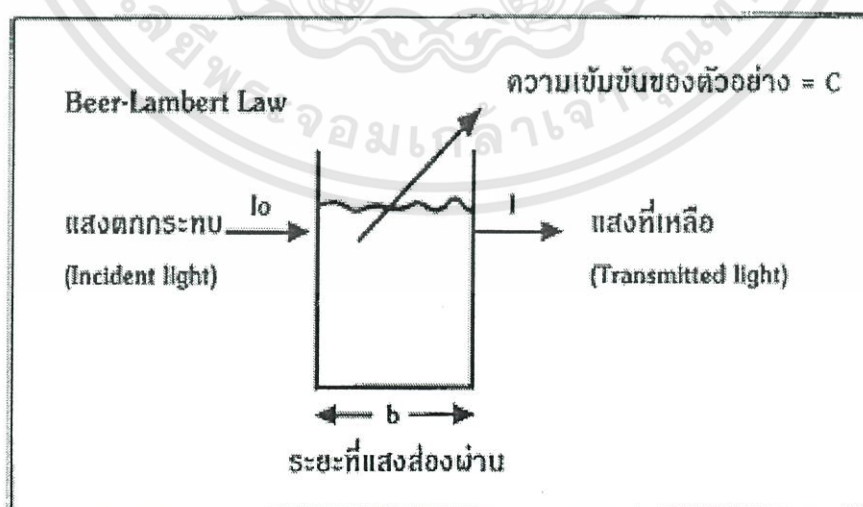
แสง UV-Visible จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร โดยที่แสงเมื่อส่องผ่านสารที่สามารถดูดกลืนแสงได้ แสงจะถูกดูดกลืน เรียกว่า Absorbance (A) โดยสัมพันธ์กับค่า Transmittance (T) ดังนี้

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.14)$$

โดยที่

$I_0$  = ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ

$I$  = ความเข้มของแสงที่เหลือ (Transmittance)



รูปที่ 2.19 สมการ Beer-Lambert law

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ตาม Beer's law อื่น ๆ ที่ควรทราบคือ

$$A = abc \quad (2.15)$$

โดยที่

$a$  = absorbtivity

$b$  = ระยะทางที่แสงส่องผ่าน หรือความกว้างของ cell

$c$  = ความเข้มข้นของตัวอย่าง

### องค์ประกอบของเครื่อง

เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ทุกชนิดประกอบด้วยองค์ประกอบหลักดังนี้คือ

- \* แหล่งกำเนิดแสง ให้แสงช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม เช่น ระหว่าง 190-1000 นาโนเมตร
- \* monochromator เป็นส่วนที่ใช้จัดการเกี่ยวกับแสงทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกช่วงแสงที่จะนำ มาวัดได้
- \* ช่องใส่ตัวอย่าง ใช้ใส่ตัวอย่างที่ต้องการวัด
- \* detector / amplifier ใช้วัดแสงที่เหลือจากการดูดกลืนของตัวอย่าง

แหล่งกำเนิดแสง แหล่งกำเนิดแสงที่ดีควรให้แสงที่มีความเข้มสม่ำเสมอและแสงนิ่งตลอดช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งานนอกจากนี้ควรมีขนาดพอเหมาะ ทนทาน และราคาไม่แพง หากต้องการทุกอย่างที่กล่าวมาจะใช้หลอดเพียงชนิดเดียวไม่ได้ ต้องมีหลอดอย่างน้อย 2 ชนิดที่จะครอบคลุมความต้องการดังกล่าวหลอดที่วานั้นคือ หลอดคิวทีเรียม และหลอดทังสเตน

หลอดทังสเตน นำมาใช้ในช่วง visible โดยหลอดชนิดนี้ให้พลังงาน ตั้งแต่ 300 – 2000 นาโนเมตร ปกติแล้วหลอดนี้มี Filament ที่ทำ จากทังสเตนครอบด้วย Quartz ก๊าซภายในเป็นพวกกลุ่ม Halogen เช่น ไอโอดีน เป็นต้น หลอดชนิดนี้มีข้อดีในด้านให้พลังงานสูงโดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่น 300 – 400 นาโนเมตร

หลอดคิวทีเรียม เป็นหลอดที่ทำงานได้ดีที่สุดในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 300 นาโนเมตร โดยปกติแล้วหลอดนี้จะให้แสงที่ต่อเนื่องและสม่ำเสมอในช่วง 180 – 400 นาโนเมตร ส่วนที่ครอบของหลอดนี้จะทำ จาก Quartz เช่นกัน

**monochromator** ทำหน้าที่แยกแสงออกเป็นแต่ละความยาวคลื่นและแยกส่วนความยาวคลื่นที่ต้องการไปใช้วัดตัวอย่าง monochromator โดยทั่วไปแล้วประกอบไปด้วย entrance slit ที่ใช้จำกัดให้แสงผ่านเข้าไปในกรอบการใช้งานที่ต้องการ จากนั้น Collimating mirror จะนำ แสงเข้าระบบไปสู่ส่วน Diffraction grating ซึ่งจะแตกแสงออกเป็นความยาวคลื่นต่าง ๆ โดยที่ Focusing mirror จะเล็งแสงที่แตกแล้วนี้ผ่านออกไปยัง Exit slit ไปยังตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องใส่ตัวอย่าง ปกติจะออกแบบให้มีฝาครอบ หรือเลื่อนปิดอย่างมิดชิด เพื่อไม่ให้แสงจากภายนอก ตกไปยัง detector ส่วนที่ใช้ใส่ตัวอย่างนี้จะปิดกั้นอย่างดีเพื่อป้องกัน monochromator และ detector cell ที่ใช้มักจะเป็น cuvette รูปทรงต่าง ๆ วัสดุมีให้เลือกหลัก ๆ คือ Quartz optical glass และพลาสติก การเลือกวัสดุนั้นจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ใช้วัด และลักษณะของตัวอย่างถ้าจะใช้ความยาวคลื่นต่ำกว่า 350 nm ต้องใช้ cell ที่ทำ จาก Quartz ที่จริงแล้ว cuvette ที่ทำ จาก Quartz นั้น จะใช้ได้ ตลอดช่วง UV-Visible เช่น ตั้งแต่ 190 – 1000 นาโนเมตร เป็นต้น ส่วน optical glass ใช้ได้ ในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 300 นาโนเมตร และสำหรับพลาสติกจะใช้ได้ในช่วง Visible เท่านั้น คือตั้งแต่ 350 นาโนเมตร เป็นต้น ไปขนาดของ cell ทั่ว ๆ ไปคือ 10 มิลลิเมตร รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความสูงที่จุสารละลายได้ประมาณ 2-3 มิลลิเมตรแต่ถ้าหากมีตัวอย่างจำกัด ผู้ใช้สามารถเลือกซื้อ cell ซึ่งจะลดขนาดโดยลดความกว้างของ cell แต่ path length (ระยะที่แสงส่องผ่าน) ยังคงเดิม

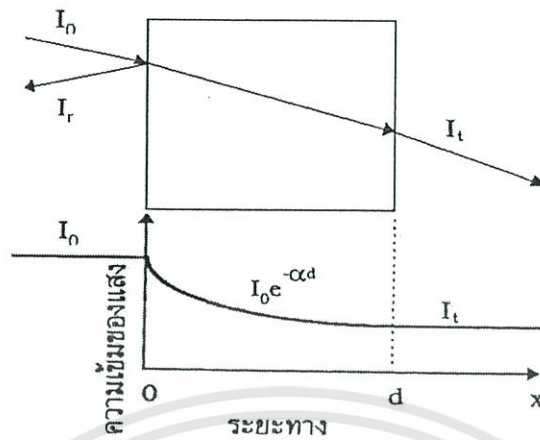
**Detector** ทำหน้าที่ แปลงพลังงานแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ที่มีใช้กันใน UV-VIS Spectrophotometer มี 2 ชนิดคือ

*Silicon Photodiode* ใช้หลักการที่ว่าเมื่อแสงตกกระทบผิว Detector ที่มีคุณสมบัติเป็น semi-conductive จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น

*Photomultiplier tube detector* ชนิดนี้ประกอบไปด้วย photo tube และ high gain amplifier ข้อดีของ detector แบบนี้ คือสามารถปรับความไวในการตรวจวัดโดยการปรับกระแสไฟฟ้าที่ให้ และใช้วัดได้ดีในช่วง 200 – 600 นาโนเมตร แต่ถ้าความยาวคลื่นเกิน 900 นาโนเมตร ความไวในการตรวจวัดจะลดลงมาก

## 2.8.2 การวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการทะลุผ่านของแสง

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการทะลุผ่านของแสง จะกล่าวถึง สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง และองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบแผ่นฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของแผ่นฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

เมื่อ

$I_0$  = ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

$I_r$  = ความเข้มแสงสะท้อน

$I_t$  = ความเข้มแสงทะลุผ่าน

$I_i$  = ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง

$R$  = สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสง (Reflectivity)

$T$  = สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง (Transmittance)

$\alpha$  = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (Absorption coefficient)

$d$  = ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่า

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.16)$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r \quad (2.17)$$

$$I_i = I_0 - RI_0 \quad (2.18)$$

$$I_i = (1 - R)I_0 \quad (2.19)$$

เมื่อแสงเดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงทะลุผ่านมีค่าดังสมการ

$$I_t = I_i \times e^{-\alpha d} \quad (2.20)$$

$$I_t = (1 - R)I_o \times e^{-\alpha d} \quad (2.21)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_o} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.22)$$

ในกรณีที่มีการสะท้อนแสงทั้งที่ผิวด้านหน้าฟิล์มบางและที่ผิวด้านหลังแผ่นฟิล์มบางจำนวนครั้งเป็นอนันต์ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงมีค่า

$$T = \frac{(1 - R)^2 + e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (2.23)$$

### 2.8.3 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบพลังงานต้องห้าม แล้วเปลี่ยนสถานะจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่า ขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) แสดงดังรูป 2.21 พลังงานโฟตอน (Photon energy) ที่ขอบการดูดกลืนแสง มีค่าเท่ากับค่าความต่างของจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอนจะให้ค่าแถบพลังงานต้องห้าม ( $E_g$ ) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมากที่สุด ซึ่งการเขียนกราฟเช่นนี้เรียกว่า การเขียนกราฟแบบเทาซ์ (Tauc's plot)

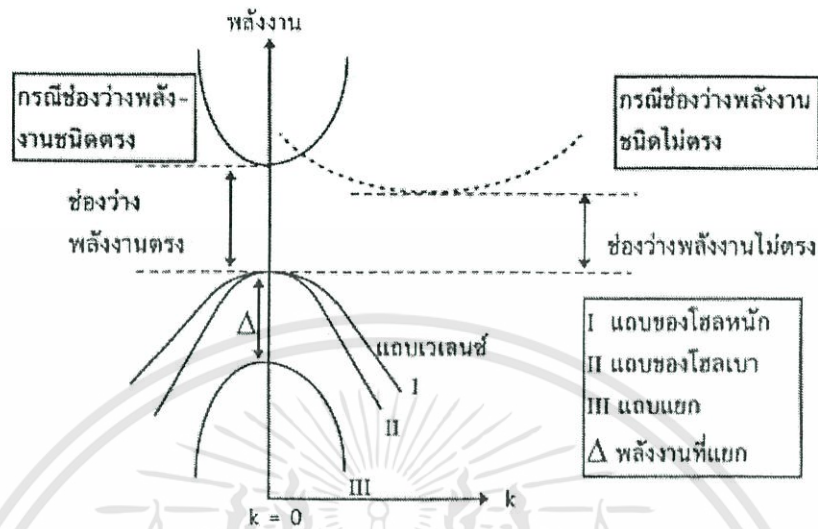


รูปที่ 2.21 แสดงขอบการดูดกลืนแสง

การดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในผลึกสารกึ่งตัวนำเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม โดยให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันของเลขคลื่นของอิเล็กตรอน (Wave number) แสดงด้วยเวกเตอร์  $k$  ในแผนภาพแสดงลักษณะของแถบพลังงาน แนวแกนนอนคือเลขคลื่น  $k$  และแนวแกนตั้งคือพลังงานของอิเล็กตรอน เนื่องจากโมเมนตัมของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $p = \hbar k$  ดังนั้นแนวแกนนอนก็คือค่าโมเมนตัมของอิเล็กตรอน เมื่อเขียนแผนภาพของแถบพลังงานในรูปฟังก์ชันของ  $k$  จะได้แผนภาพดังรูปที่ 2.22

ถ้าการดูดกลืนแสงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันที่มีค่า  $k$  เท่ากัน เรียกการดูดกลืนแสงชนิดนี้ว่า การดูดกลืนชนิดตรง (Direct absorption) แต่ถ้าจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันมีค่า  $k$  ไม่ตรงกัน ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนเพื่อดูดกลืนแสงจะต้องอาศัยโฟ

นอนช่วย โดยอิเล็กตรอนต้องมีการดูดความร้อนจาก โคร่งผลึกหรือคายความร้อนให้แก่โคร่งผลึก เรียกรูดกลืนแสงชนิดนี้ว่า การดูดกลืนชนิดไม่ตรง (Indirect absorption)



รูปที่ 2.22 แสดงการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน

การหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง ( $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง ( $T$ ) จากรูปที่ 2.20 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในที่ฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง โดยทั่วไปการสะท้อน ( $R$ ) มีค่าน้อยมากดังนั้น จะกลายเป็น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $\alpha$  = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (Absorption coefficient)

$T$  = สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง (Transmittance)

$I_0$  = ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง

$I_t$  = ความเข้มแสงทะลุผ่าน

$d$  = ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงจากสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

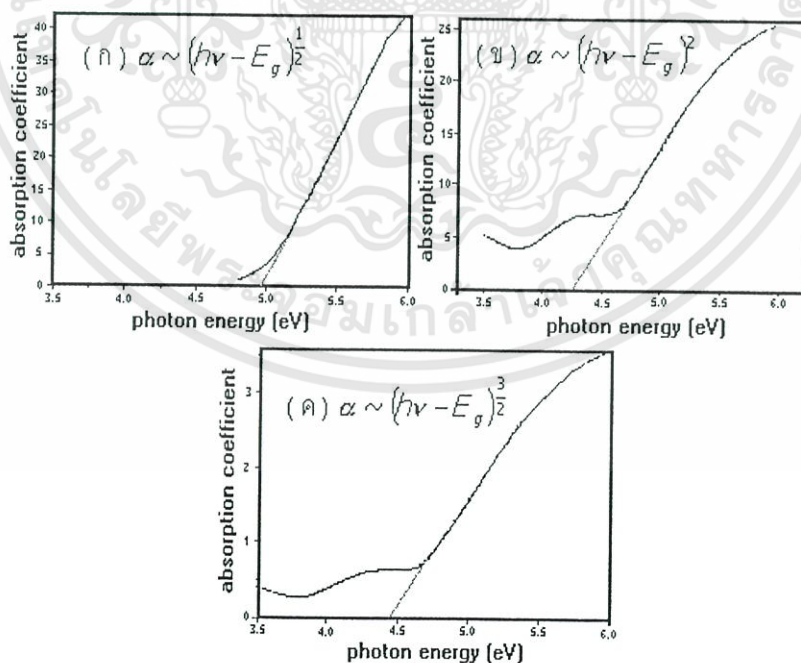
ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงกับค่าพลังงานแถบต้องห้ามซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา แถบพลังงานต้องห้าม ของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ของแสงซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของ แถบพลังงานต้องห้าม

ที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่า

$$\alpha h\nu \sim (h\nu - E_g)^\gamma \quad (2.25)$$

- เมื่อ  $\gamma = \frac{1}{2}$  สำหรับแถบนิยอมนที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบตรง (Direct allowed transition)  
 $= \frac{3}{2}$  สำหรับแถบต้องห้ามที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบตรง (Direct forbidden transition)  
 $= 2$  สำหรับแถบนิยอมนที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบอ้อม (Indirect allowed transition)  
 $= 3$  สำหรับแถบต้องห้ามที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบอ้อม (Indirect forbidden transition)

ตัวอย่างกราฟพลังงาน โฟตอนและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง ที่ค่า  $\gamma$  ต่างๆ แสดงดังรูป



รูปที่ 2.23 แสดงกราฟพลังงาน โฟตอนและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง ที่ค่า  $\gamma$  ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือสามารถคำนวณหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามซึ่งมีแถบต้องห้ามที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบตรง ( $\gamma = \frac{3}{2}$ ) ได้จากการเขียนกราฟแบบแท่ง และคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง และพลังงานโฟตอน โดยการแทนค่า  $\gamma$  ได้ดังนี้

$$(\alpha h \nu)^{\frac{2}{3}} = \left[ \left( -\frac{1}{d} \ln T \right) h \nu \right]^{\frac{2}{3}} = h \nu - E_g \quad (2.26)$$



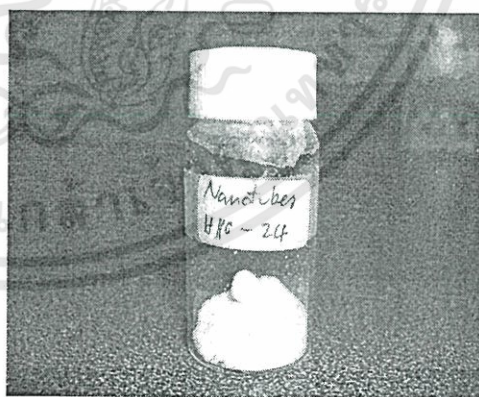
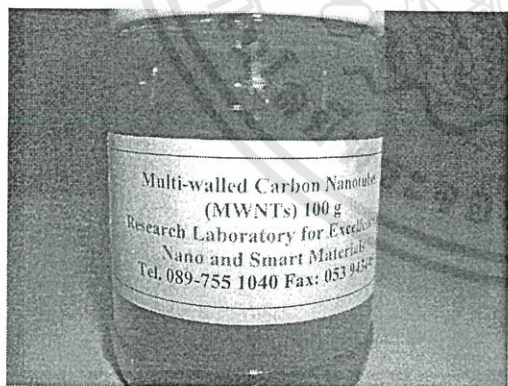
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในการปลูกฟิล์มทินออกไซด์( $\text{SnO}_2$ ) และซิงค์ออกไซด์( $\text{ZnO}$ ) นั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น Chemical Vapor Deposition (CVD), Liquid Phase Epitaxy (LPE), Molecular Beam Epitaxy (MBE) และ RF Sputtering เป็นต้น ในงานวิจัยหลายๆ งานได้มีการเจือสารชนิดต่างลงในฟิล์มทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ เช่น แอนติโมนี ทองแดง เหล็ก ไททาเนียม เพื่อให้ได้สมบัติบางประการของแผ่นฟิล์มดีซัน เช่น สมบัติการตรวจวัดก๊าซบางชนิดโดยเจือทองแดง สมบัติไฮโดรโฟบิกโดยเจือไททาเนียม

ในงานวิจัยนี้ใช้  $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  เป็นสารตั้งต้นในการทำ โซล-เจลที่ปลูกบนกระจกโบโรซิลิเกตซึ่งเป็นฐานรองรับโดยเจือไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนซึ่งสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล [6] และ คาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนซึ่งสังเคราะห์ด้วยวิธีอินฟิวชันเคมีควาเปอร์ดิโพซิชัน[7] ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ มีเงื่อนไขดังนี้ เปลี่ยนแปลงชนิดของโครงสร้างท่อนาโน, เปลี่ยนแปลงปริมาณของโครงสร้างท่อนาโน, เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการแอลนิต แล้วนำฟิล์มไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยระบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) วิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเทคนิคอูลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลสเปกโตรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) วิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (SEM) และ กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM)



รูปที่ 3.1 รูปโครงสร้างท่อนาโน (a)  $\text{TiO}_2$  nanotubes และ (b) carbon nanotubes

### 3.1 การเตรียมฐานรองรับกระจกสไลด์ที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม

งานวิจัยนี้ใช้กระจกโบโลซิลิกเกตเป็นฐานรองรับในการปลูกฟิล์มทินออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ผสมโครงสร้างท่อนาโน ก่อนทำการปลูกฟิล์มต้องทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยกระบวนการ ปีรานยา (Piranha process) ซึ่งมีกระบวนการดังนี้

1. นำกระจกสไลด์ล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
2. นำกระจกสไลด์ที่ล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมันไปต้มในสารละลายระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) กับกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารละลายทั้งสองเป็น 1:2 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
3. นำกระจกสไลด์ที่ได้ไปล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมันอีกครั้ง
4. ล้างกระจกสไลด์ ด้วยน้ำไร้ประจุ (De-Ionization Water) แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

### 3.2 การเตรียมโซล-เจลจาก $SnCl_4 \cdot 5H_2O$

1. เตรียมสาร  $SnCl_4 \cdot 5H_2O$  จำนวน 17.53 กรัม
2. นำสาร  $SnCl_4 \cdot 5H_2O$  ที่เตรียมไว้ละลายในเอทานอลบริสุทธิ์ 99.9% ( $C_2H_5OH$ ) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
3. กวนสารละลายที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชม.
4. ปล่อยให้สารละลายให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชม.

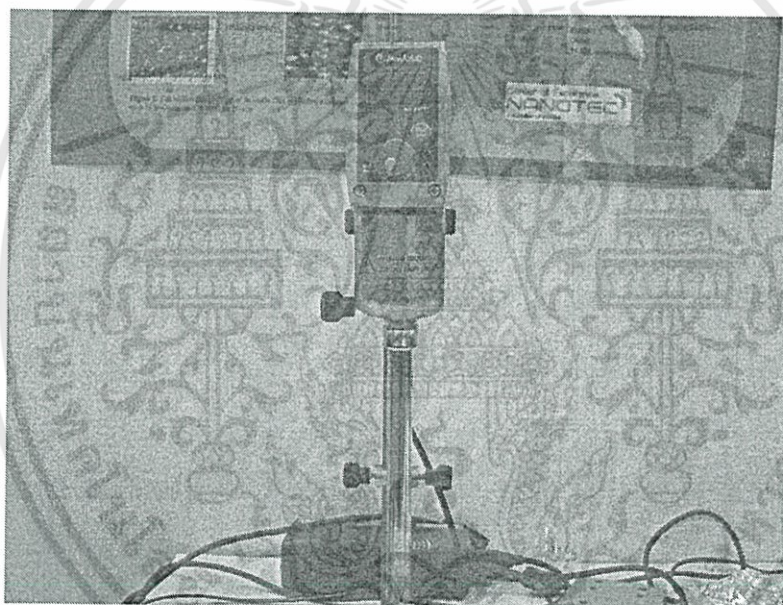


รูปที่ 3.2 เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การเตรียมโซล-เจลจาก $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$

1. เตรียมสาร  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  จำนวน 10.97 กรัม
2. นำสาร  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  ที่เตรียมไว้ละลายในเอทานอลบริสุทธิ์ 99.9% ( $C_2H_5OH$ ) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
3. เติมสาร ไดเอทานอลเอไมล์ ( $HN(CH_2CH_2OH)_2$  : DEA) 2.5 มิลลิลิตรลงในสารละลายที่เตรียมไว้
4. กวนสารละลายที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชม.
5. ปล่อยสารละลายให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชม.



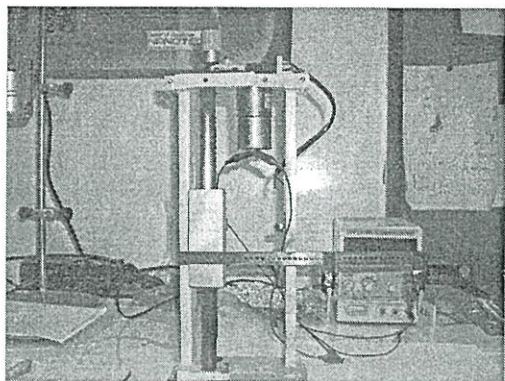
รูปที่ 3.3 เครื่องปั่นสารให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenizer)

### 3.4 การเตรียมโซล-เจลที่ผสม ไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน และ คาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน

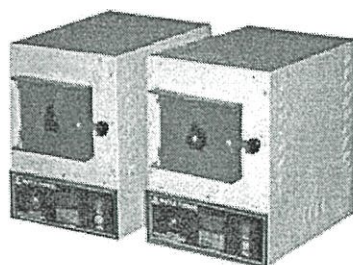
1. เติมไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนปริมาณ 0.01 0.03 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรลงใน  $\text{SnCl}_4$  โซล-เจล ปั่นให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง Homogenizer เป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็ว 6500 รอบต่อนาที
2. เติมคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนปริมาณ 0.01 0.03 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรลงใน  $\text{SnCl}_4$  โซล-เจล ปั่นให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง Homogenizer เป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็ว 6500 รอบต่อนาที
3. เติมไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนปริมาณ 0.01 0.03 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรลงใน  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  โซล-เจล ปั่นให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง Homogenizer เป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็ว 6500 รอบต่อนาที
4. เติมคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนปริมาณ 0.01 0.03 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรลงใน  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  โซล-เจล ปั่นให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง Homogenizer เป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็ว 6500 รอบต่อนาที

### 3.5 การเตรียมฟิล์มทินออกไซด์ที่ผสมโครงสร้างท่อนาโนด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ

1. นำกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ด้วยวิธีปรีนยามาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
2. นำกระจกสไลด์ที่อบเสร็จแล้ว จุ่มลงในสารละลายที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องจุ่มเคลือบโดยใช้ความเร็วในการจุ่ม 10 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วดึงขึ้นด้วยความเร็วเท่าเดิม
3. นำกระจกสไลด์ที่จุ่มเสร็จแล้ว ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที
4. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-3 เป็นจำนวน 10 ครั้ง
5. นำกระจกที่ทำการจุ่มเคลือบ 10 ครั้งไปแอลนิลที่อุณหภูมิ 450 500 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชม.



รูปที่ 3.4

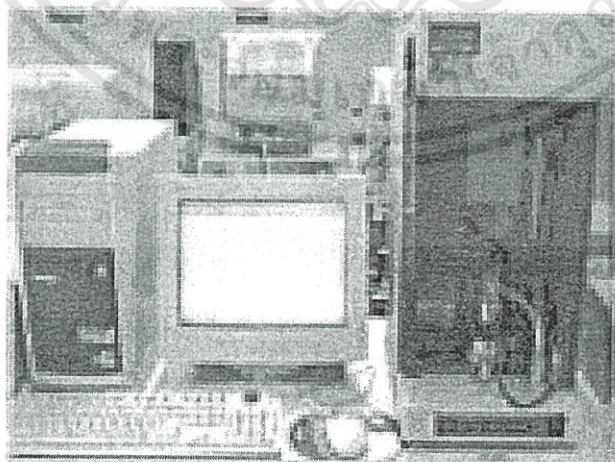


รูปที่ 3.5

รูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 เครื่องจุ่มเคลือบ และ เตาแอนนีส ตามลำดับ

### 3.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis)

เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุ ตัวอย่างเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความร้อน วิธีนี้เหมาะสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพ ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซ หรือระเหยของน้ำ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟส หรือ การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) วิธีนี้สามารถวิเคราะห์ได้ ทั้งในสุญญากาศ และบรรยากาศต่างเช่น ออกซิเจน หรือไนโตรเจนเป็นต้น การทำงานของเครื่องมือนี้ คือ เครื่องมือนี้จะมีตาชั่งที่มีความละเอียดมากๆ และมีความไว ต่อการเปลี่ยนแปลงสูง (สามารถต่ำถึง 1 ไมโครกรัม) เมื่อใส่สารลงไปจะมีการบันทึกค่า และเมื่อให้ความร้อน เครื่องจะบันทึก ค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง และผู้ใช้ก็สามารถ อ่านค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้น จากกราฟที่ได้



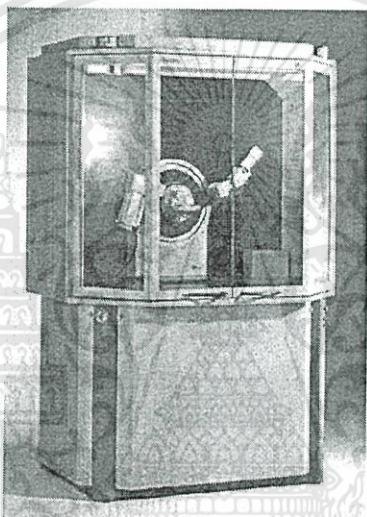
รูปที่ 3.1 ภาพเครื่อง TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยระบบวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD)

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยระบบวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) คือ ระบบที่ใช้หลักการเลี้ยวเบนตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบฟิล์มบางเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ต่อมุมเลี้ยวเบนภายในผลึก ซึ่งธาตุหรือสารประกอบแต่ละชนิดมีมุมและลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงสามารถบอกลักษณะโครงสร้างและชนิดของฟิล์มได้

ในงานวิจัยนี้เราตรวจสอบโครงสร้างของฟิล์มบางโดยระบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง XRD รุ่น D8 ของบริษัท Bruker ซึ่งใช้  $\text{Cu K}\alpha$  เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นรังสีเอกซ์และมีความยาวคลื่น 1.5046 อังสตรอม

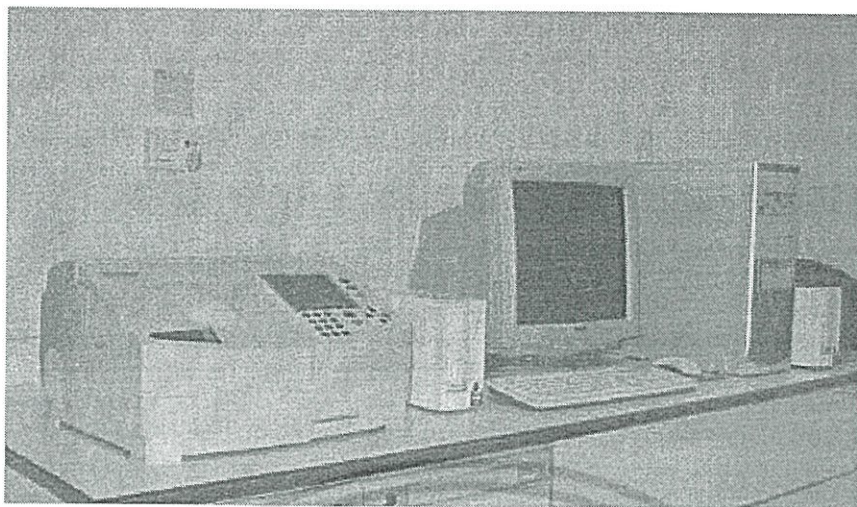


รูปที่ 3.2 ภาพเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

### 3.8 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการวัดการทะลุผ่านของแสง (UV-Vis Spectroscopy)

UV-VIS Spectroscopy เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารโดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิล ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร (nm) ของสาร โดยนำสารตัวอย่างวางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสง สารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสี หรือแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ดูดกลืนจะผ่านออกมายังเครื่องวัดแสง (photodetector) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมา โดยการหักล้างกับปริมาณของแสงก่อนดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทะลุผ่าน (Transmittance) กับค่าความยาวคลื่น (wavelength) ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ของบริษัท Thermo electron corporation รุ่น helios  $\alpha$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



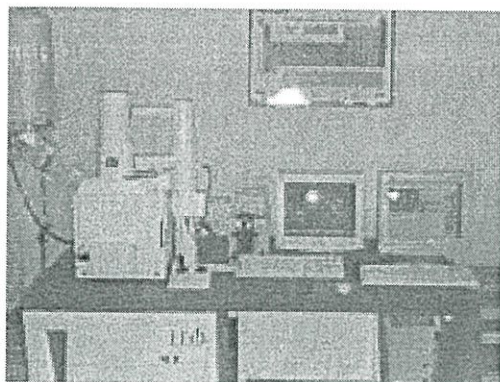
รูปที่ 3.3 ภาพเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

### 3.9 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิว

#### 3.9.1 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ได้จากการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอ cathode ray tube (CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ cathode ray tube (CRT)

ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของแผ่นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของบริษัท LEO รุ่น LEO 1455 VP

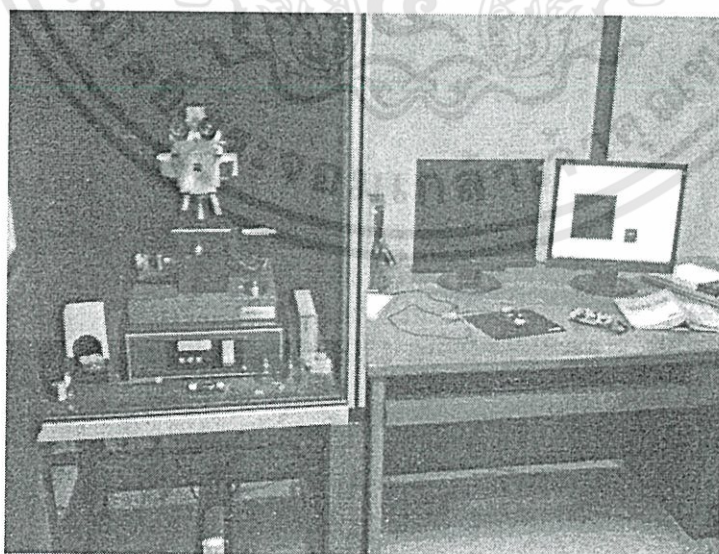


รูปที่ 3.4 ภาพกล้องจุลทรรศน์อเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

### 3.9.2 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง โดยอาศัยแรงดึงดูดและแรงผลักที่เกิดขึ้นบริเวณปลายหัวเข็มที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งติดอยู่บนคาน เมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่เข็มดังกล่าวจะกวาดไปบนพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งทำให้คานบิดตัวขึ้นลงตามความสูง ต่ำ ของชิ้นงาน แสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากคานกระเดื่องจะเปลี่ยนทิศการสะท้อนตามการบิดตัวของคาน นำข้อมูลที่ได้ไปแปรผลด้วยคอมพิวเตอร์ ก็สามารถสร้างภาพพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างได้และภาพที่ได้จะมีความละเอียดสูงมากถึงระดับ 10 พิโกเมตร

ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของแผ่นฟิล์มโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของบริษัท SOUND HOUSING รุ่น SPA400



รูปที่ 3.5 ภาพกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

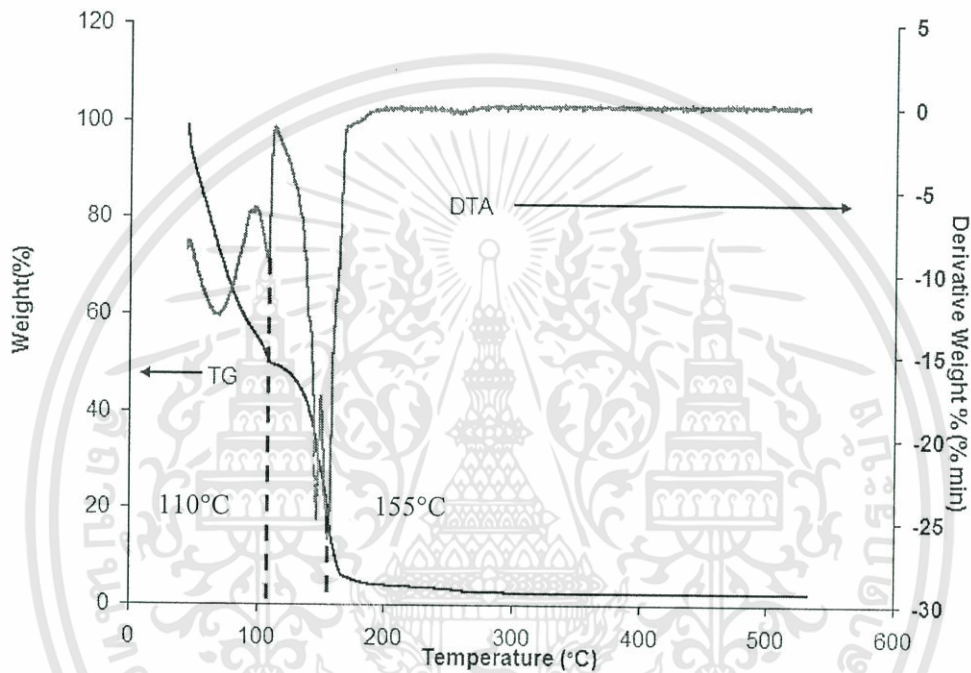
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มทินออกไซด์

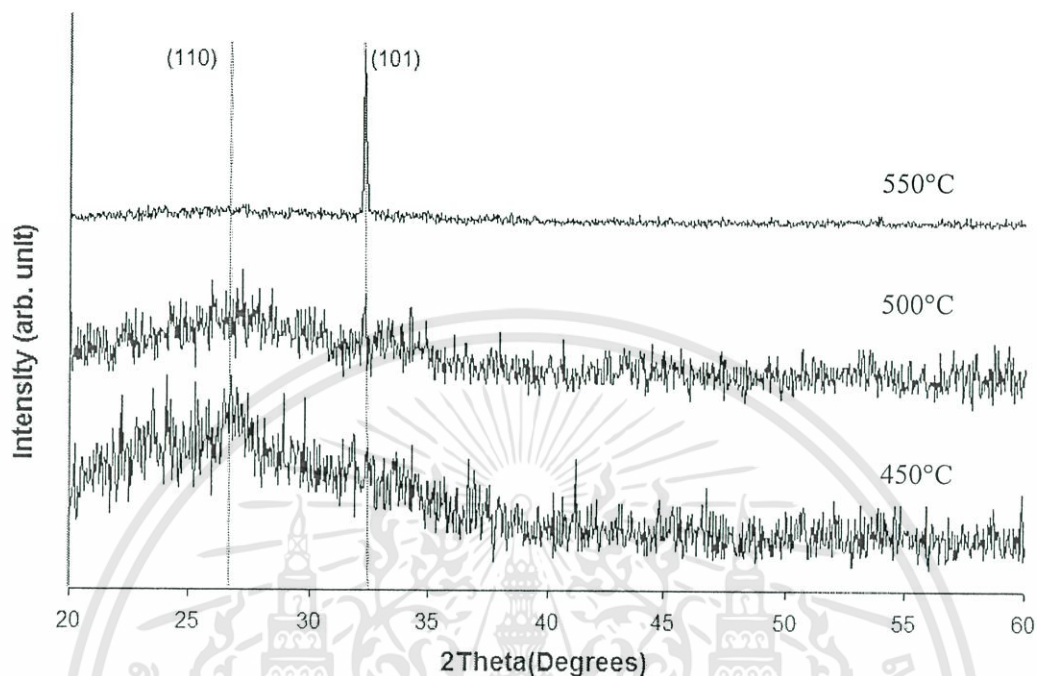
##### 4.1.1 ผลการวัด Thermogravimetric Analysis (TGA) ของทินออกไซด์โซล-เจล



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ลดลงกับอุณหภูมิ ของทินออกไซด์โซล-เจล

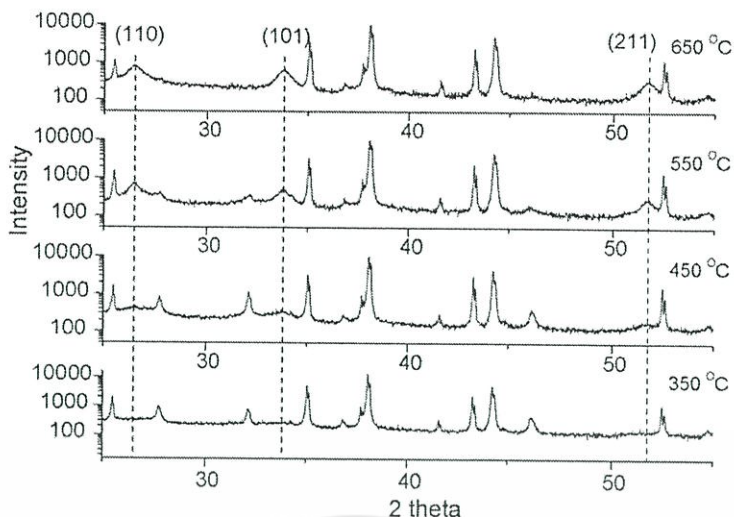
จากกราฟ TGA ของทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจลจาก  $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  พบว่ามี 2 กระบวนการเกิดขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ กระบวนการแรก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง  $110^\circ\text{C}$  เกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic) ทำให้โมเลกุลของน้ำ ( $n\text{H}_2\text{O}$ ) เริ่มหลุดออกจากโมเลกุลของ  $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง  $110^\circ\text{C}$  โดยสังเกตจาก TGA กราฟพบว่าที่อุณหภูมิ  $110^\circ\text{C}$  มีค่าน้ำหนักลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการที่สอง ที่อุณหภูมิ  $155^\circ\text{C}$  เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic) ทำให้โมเลกุลของ  $\text{SnCl}_4$  เริ่มรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) กลายเป็นโมเลกุลของ  $\text{SnO}_2$  โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักลดลง 45 เปอร์เซ็นต์

#### 4.1.2 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฟิล์มทินออกไซด์



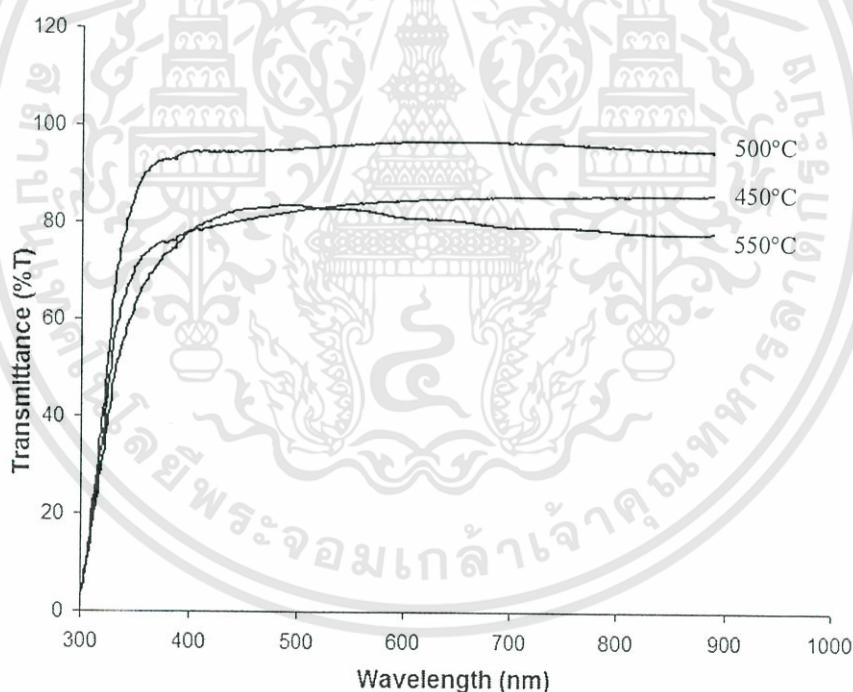
รูปที่ 4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มทินออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 450°C 500°C และ 550°C

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์กับมุมเลี้ยวเบนของแผ่นฟิล์มทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจลของ SnCl<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O และนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 450°C 500°C และ 550°C ที่อุณหภูมิแอนนีส 450°C ถึง 550°C ฟิล์มที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นอะมอร์ฟัสเฟสและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแอนนีสเป็น 550°C พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (101) ที่มุมเลี้ยวเบน  $2\theta = 32.5^\circ$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของทินออกไซด์ มีลักษณะสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Gong Shuping และคณะ[8] ซึ่งเตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์บนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยวิธีการโซล-เจลและแอนนีสที่อุณหภูมิ 350°C ถึง 650°C พบว่าเริ่มปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (101) ที่มุมเลี้ยวเบน  $2\theta = 32^\circ$  เมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C และปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนเด่นชัดขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแอนนีสเป็น 650°C



รูปที่ 4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางทिनออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจลโดยใช้ อุณหภูมิในการแอนนัล 350°C 450°C 550°C และ 650 °C [8]

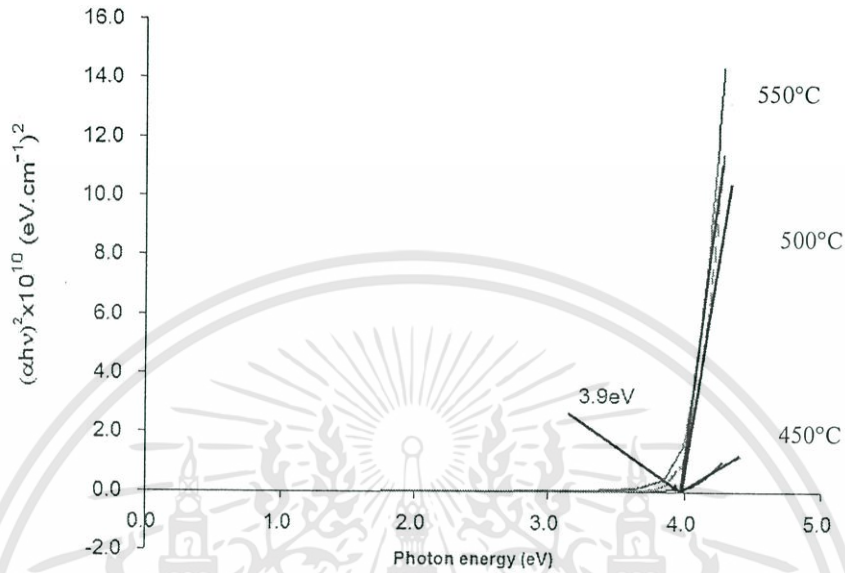
#### 4.1.3 ผลการวัดค่าการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มทिनออกไซด์



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทะลุผ่านของแสงกับความยาวคลื่น ของฟิล์มทिनออกไซด์ที่ เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจล โดยใช้อุณหภูมิในการแอนนัล 450°C, 500°C และ 550°C

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทะลุผ่านกับความยาวคลื่นของฟิล์มทिनออกไซด์ที่ปลูก ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจลของ  $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  และนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 450°C 500°C และ 550°C พบว่ามีค่าการทะลุผ่านอยู่ในช่วง 80-90 เปอร์เซ็นต์ ในย่านความยาวคลื่นแสงอุตราไว

โอเลตถึงย่านความยาวคลื่นที่มองเห็น และสามารถหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม( $E_g$ ) จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  พบว่าแถบพลังงานต้องห้าม ( $E_g$ ) ของฟิล์มทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจลมีค่าประมาณ 3.9 eV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มทินออกไซด์ที่ปลูกด้วยวิธี vacuum arc deposited โดย E. Cetinörgü และคณะ[9]



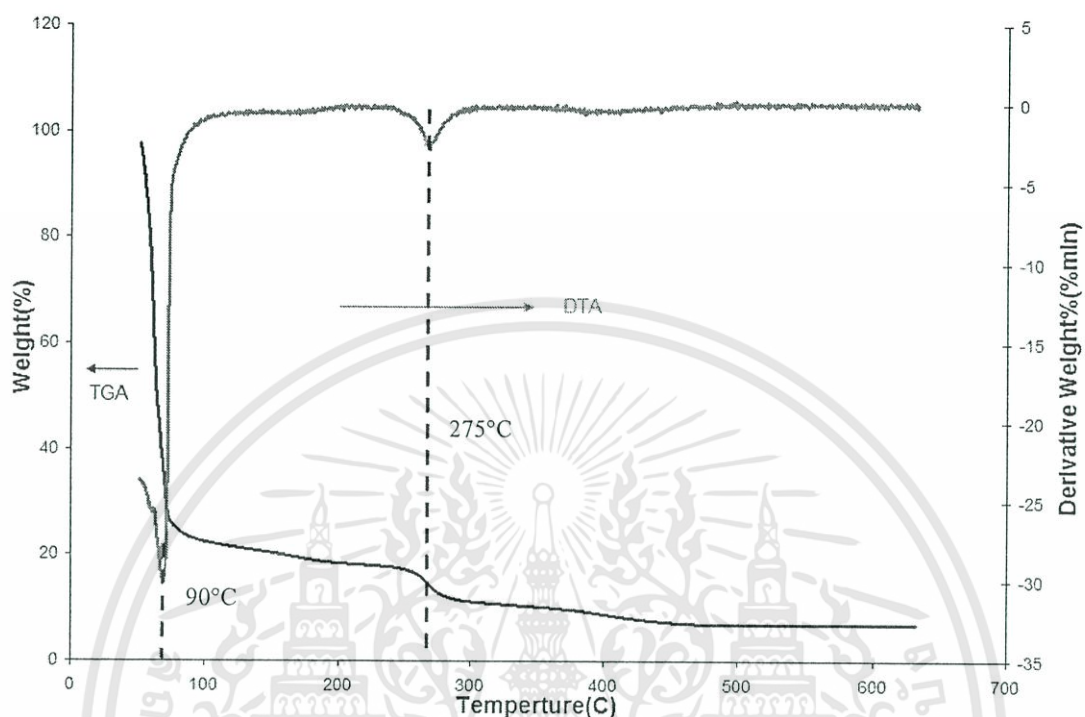
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ของฟิล์มทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจลโดยใช้อุณหภูมิในการแอนนัล 450°C 500°C และ 550°C

$T_s = RT$	ZnO			SnO <sub>2</sub>		
Pressure (Pa)	$n$	$k$	$E_g$ (eV)	$n$	$k$	$E_g$ (eV)
0.53	1.87	0.020	3.25	1.87	0.010	3.60
0.67	1.96	0.040	3.26	1.99	0.020	3.76
0.80	2.03	0.030	3.30	1.93	0.010	3.90

รูปที่ 4.6 ค่าแถบพลังงานต้องห้าม ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่ปลูกด้วยวิธี vacuum arc deposited [9]

## 4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มซิงค์ออกไซด์

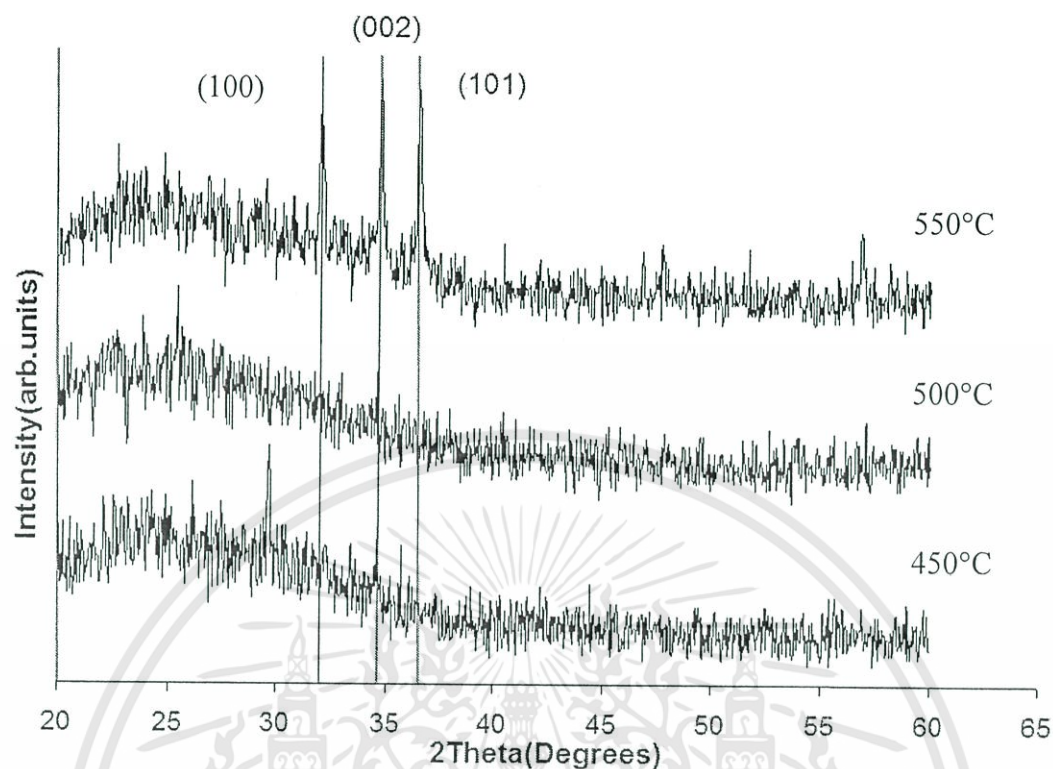
### 4.2.1 ผลการวัด Thermogravimetric Analysis (TGA) ของซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ลดลงกับอุณหภูมิ ของซิงค์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์

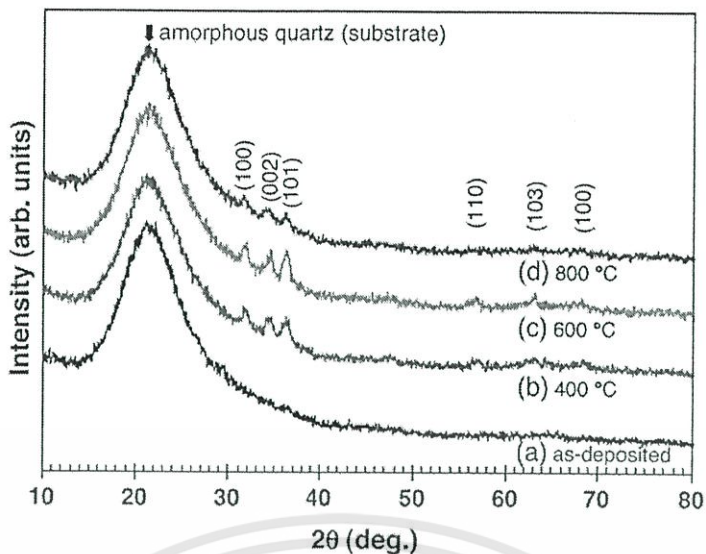
จากกราฟ TGA ของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจลของ  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  พบว่ามี 2 กระบวนการเกิดขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจนถึง  $90^\circ\text{C}$  เกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic) ทำให้โมเลกุลของน้ำ ( $n\text{H}_2\text{O}$ ) เริ่มหลุดออกจากโมเลกุลของ  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  โดยสังเกตจาก TGA กราฟพบว่าที่อุณหภูมิ  $90^\circ\text{C}$  มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักลดลง 75 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการที่สอง จากอุณหภูมิเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic) ทำให้โมเลกุลของ  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  เริ่มรวมตัวกับ โมเลกุลของออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) กลายเป็นโมเลกุลของ  $\text{ZnO}$  ที่อุณหภูมิ  $275^\circ\text{C}$  โดยมีค่าน้ำหนักลดลง 10 เปอร์เซ็นต์

#### 4.2.2 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์



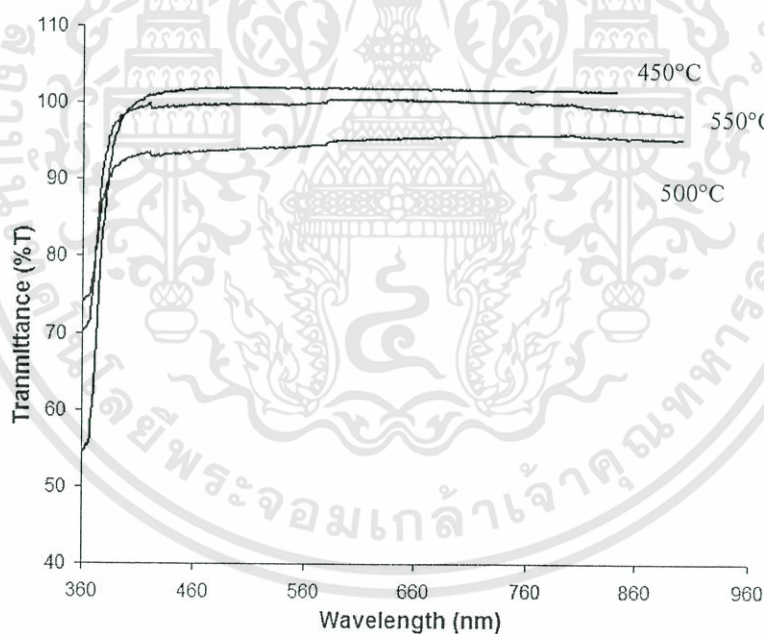
รูปที่ 4.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 450°C 500°C และ 550°C

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์กับมุมเลี้ยวเบนของแผ่นฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจลของ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  และนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 450°C 500°C และ 550°C พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล วิกซ์ โดยมึระนาบ (100), (002) และ (101) ปรากฏขึ้นที่มุมเลี้ยวเบน 31.8°, 34.4° และ 36.3° เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแอนนีสขึ้นถึง 550°C ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของซิงค์ออกไซด์ ตามรายงานการวิจัยของ T. Kumpika และคณะ[5] ที่เตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยใช้กระจกควอร์ตเป็นฐานรองรับด้วยวิธีสปาร์กคิง แอนนีสที่อุณหภูมิ 400°C 600°C และ 800°C พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีความเป็นผลึกสูงที่อุณหภูมิ 600°C เนื่องจากในรายงานวิจัยฉบับนี้ใช้กระจกโบโรซิลิเกตเป็นฐานรองรับการปลูกฟิล์ม ทำให้มีข้อจำกัดการใช้อุณหภูมิในการแอนนีส



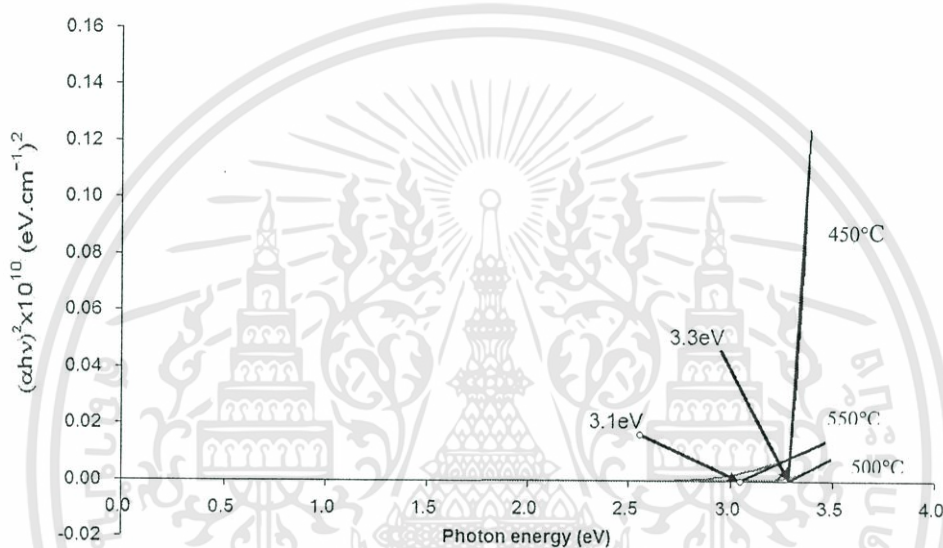
รูปที่ 4.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการสปาร์กคิงโดยใช้ อุณหภูมิในการแอนนัล 400°C 600°C และ 800°C [5]

#### 4.2.3 ผลการวัดค่าการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มซิงค์ออกไซด์



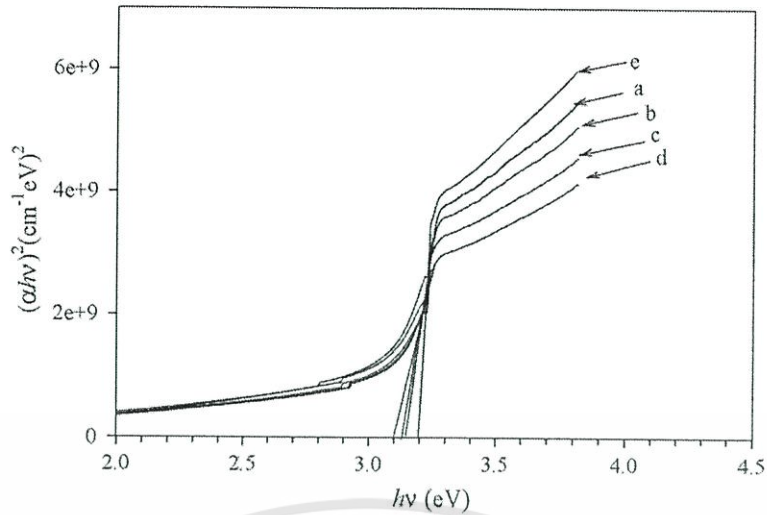
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทะลุผ่านของแสงกับความยาวคลื่นแสง ของซิงค์ออกไซด์ที่ เตรียมด้วยวิธีการ โซล-เจล โดยใช้อุณหภูมิในการแอนนัล 450°C 500°C และ 550°C

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทะลุผ่านกับความยาวคลื่นของฟิล์มทินออกไซด์ที่ปลูกด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจลของ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  และนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 450°C 500°C และ 550°C พบว่ามีขอบค่าการทะลุผ่านที่เพิ่มขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ 360 นาโนเมตรและเมื่อความยาวคลื่นมากกว่า 360 นาโนเมตร ถึง 900 นาโนเมตร มีค่าการทะลุผ่านมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์และสามารถหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม ( $E_g$ ) จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  พบว่าแถบพลังงานต้องห้าม ( $E_g$ ) ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจลแอนนัลที่อุณหภูมิ 450°C และ 500°C มีค่าประมาณ 3.3 eV เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแอนนัลเป็น 550°C แถบพลังงานต้องห้าม ( $E_g$ ) มีค่าลดลงเหลือ 3.1 eV



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจลโดยใช้อุณหภูมิในการแอนนัล 450°C 500°C และ 550°C

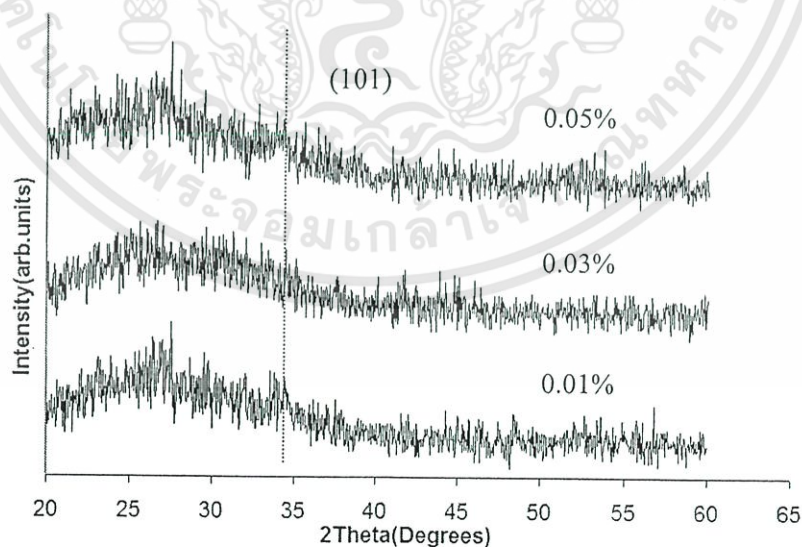
จากการศึกษาผลงานการวิจัยของ E. Bacaksiz และคณะ[10] ที่เตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธี spray pyrolysis แอนนัลที่อุณหภูมิ 600°C ถึง 900°C พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 600°C 700°C 800°C และ 900°C ค่าแถบพลังงานต้องห้ามมีค่าลดลงจาก 3.15, 3.15, 3.14, 3.10 และ 3.20 eV ตามลำดับ สาเหตุมาจากมีการเพิ่มขึ้นของรอยบกพร่องเนื่องจากการเหนียวนำด้วยความร้อน ทำให้คุณภาพของแผ่นฟิล์มซิงค์ออกไซด์ลดลงเนื่องจากรอยบกพร่องที่เกิดจากตำแหน่งว่างของออกซิเจน (Oxygen Vacancies)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ของฟิล์มบางซิงโครไคลด์ที่เตรียมด้วยวิธี spray pyrolysis (a) ก่อนแอนนัล (b) แอนนัลที่อุณหภูมิ  $600^{\circ}\text{C}$  (c) แอนนัลที่อุณหภูมิ  $700^{\circ}\text{C}$  (d) แอนนัลที่อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  (e) แอนนัลที่อุณหภูมิ  $900^{\circ}\text{C}$  [10]

#### 4.3 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มทินออกไซด์ที่เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน

##### 4.3.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มทินออกไซด์ที่เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน

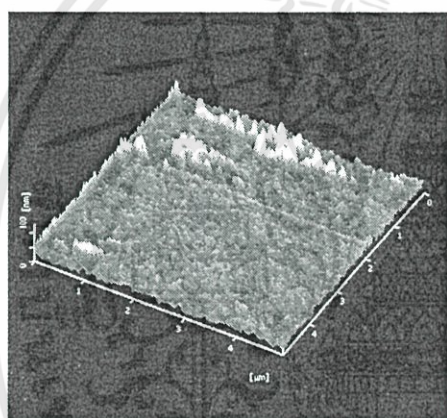


รูปที่ 4.13 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนัลที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

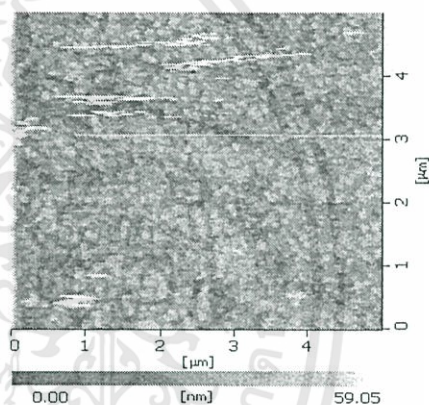
จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์กับมุมการเลี้ยวเบนของฟิล์มทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนในปริมาณ 0.01%, 0.03% และ 0.05% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แอนนูลที่อุณหภูมิ  $550^\circ\text{C}$  พบระนาบการเลี้ยวเบน (101) ซึ่งเป็นระนาบการเลี้ยวเบนของทินออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล แต่ไม่ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน อย่างไรก็ตามระนาบการเลี้ยวเบนที่พบไม่เด่นชัดนัก ซึ่งแตกต่างจากผลที่ได้จากฟิล์มทินออกไซด์เท่านั้น แสดงให้เห็นว่า ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือลงไปมีผลขัดขวางการก่อตัวเป็นของผลึกทินออกไซด์

#### 4.3.2 ผลการถ่ายภาพสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มทินออกไซด์ที่เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน



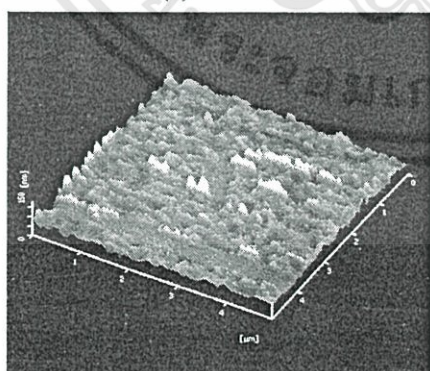
File : 09504005.xqt  
Com.1 :  
Com.2 :  
Com.3 :

(a)



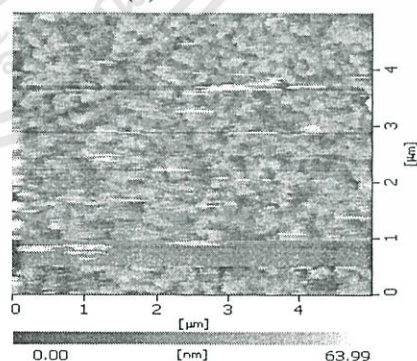
File : 09504005.xqt  
Com.1 :  
Com.2 :  
Com.3 :

(b)



File : 09504006.xqt  
Com.1 :  
Com.2 :  
Com.3 :

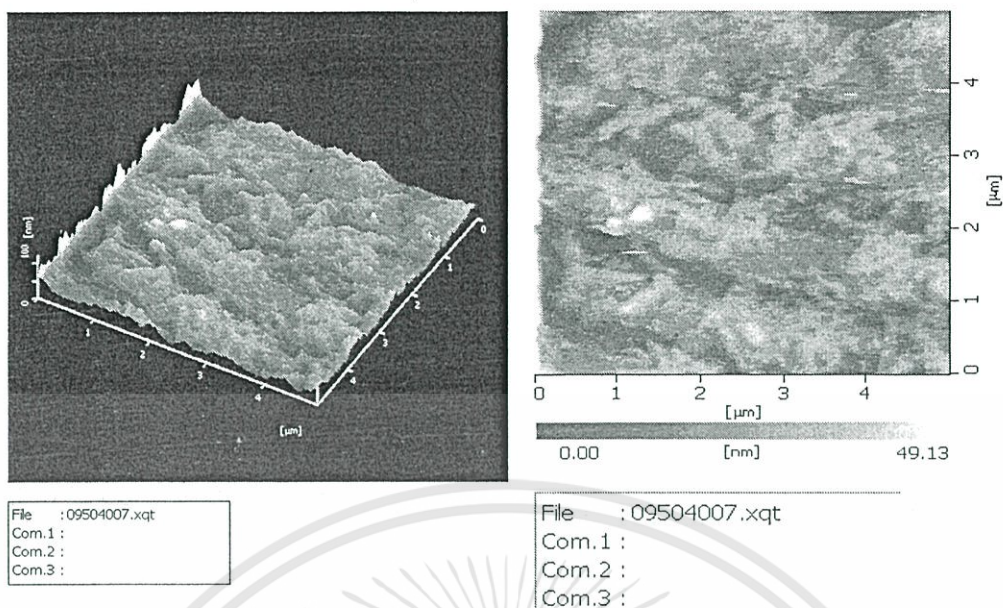
(c)



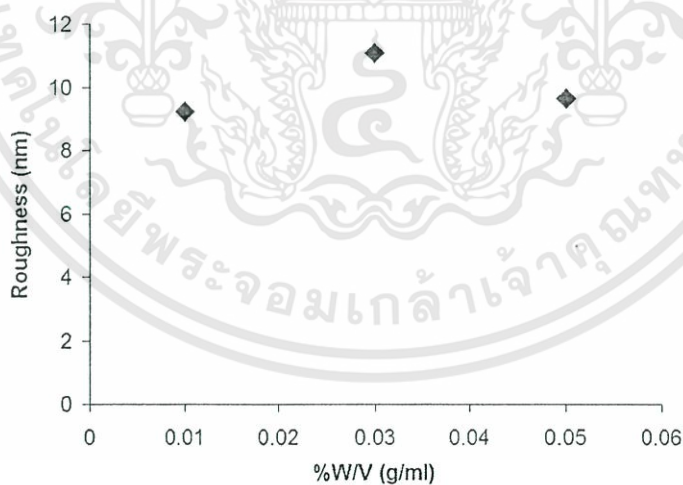
File : 09504006.xqt  
Com.1 :  
Com.2 :  
Com.3 :

(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายสองมิติและสามมิติจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนีกที่อุณหภูมิ  $550^\circ\text{C}$  (a),(b)  $\text{TiO}_2$ -0.01% (c),(d)  $\text{TiO}_2$ -0.03% และ (e),(f)  $\text{TiO}_2$ -0.05%

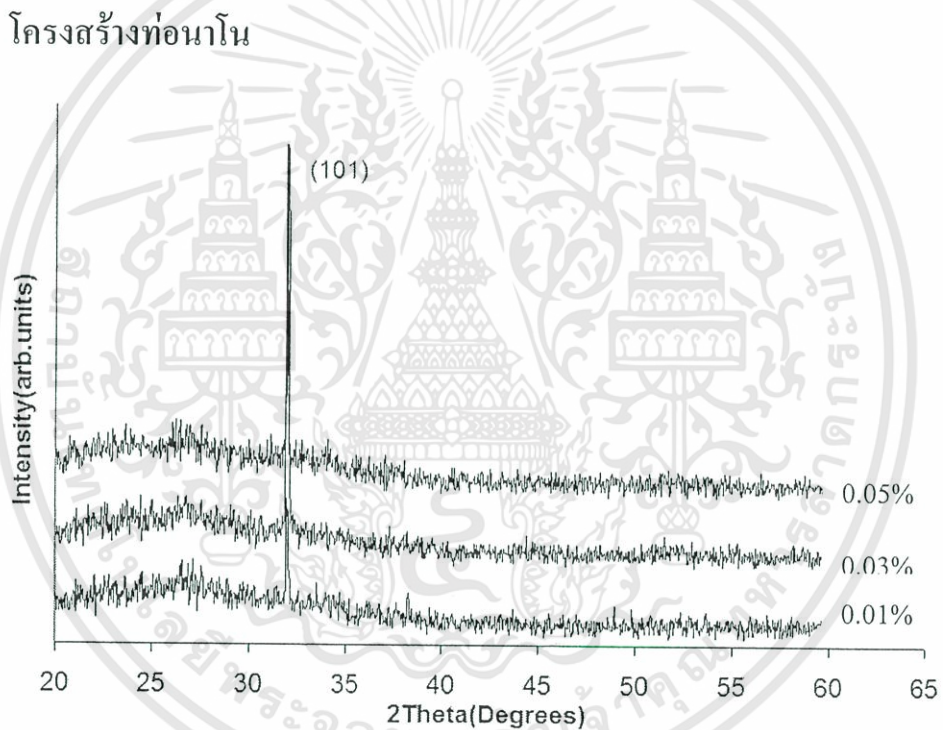


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรของฟิล์ม ทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนีกที่อุณหภูมิ  $550^\circ\text{C}$

จากภาพถ่ายสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมพบว่าฟิล์มทินออกไซด์ที่เจือไททานเนียมไดออกไซด์ 0.01 เปอร์เซ็นต์มีลักษณะเป็นเม็ดเกรนเล็กๆ กระจายทั่วพื้นผิวของแผ่นฟิล์ม ส่วนแผ่นฟิล์มที่เจือด้วยไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน 0.03 และ 0.05 เปอร์เซ็นต์ ปรากฏเม็ดเกรนน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของทินออกไซด์เมื่อเจือไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน 0.01 เปอร์เซ็นต์ขณะเดียวกันการเพิ่มปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ไม่ได้เพิ่มค่าความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม

#### 4.4 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มทินออกไซด์ที่เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน

##### 4.4.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มทินออกไซด์ที่เจือด้วยคาร์บอน

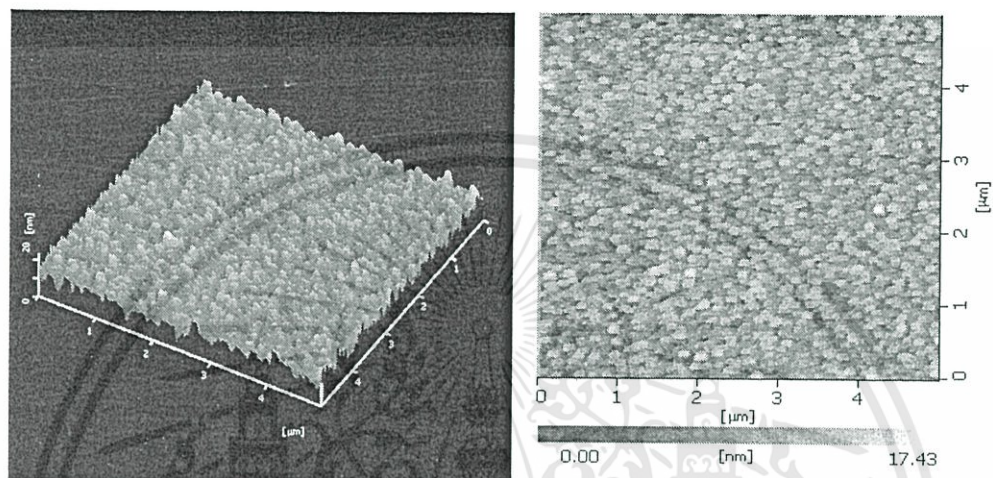


รูปที่ 4.16 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยใช้โซล-เจล แอนนิตที่อุณหภูมิ 550°C

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์กับมุมการเลี้ยวเบนของฟิล์มทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนในปริมาณ 0.01%, 0.03% และ 0.05% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แอนนิตที่อุณหภูมิ 550°C พบว่า ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

(101) ซึ่งเป็นระนาบการเลี้ยวเบนของทินออกไซด์โครงสร้างเตตระโกนอล แต่ไม่ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน

#### 4.4.2 ผลการถ่ายภาพสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มทินออกไซด์ที่เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน

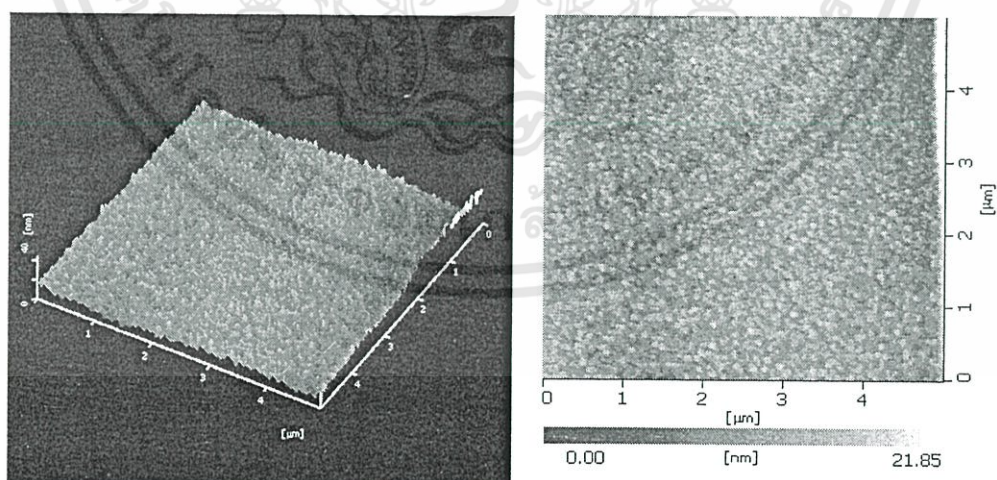


File : 09504004.xqt  
Com.1 :  
Com.2 :  
Com.3 :

(a)

File : 09504004.xqt  
Com.1 :  
Com.2 :  
Com.3 :

(b)



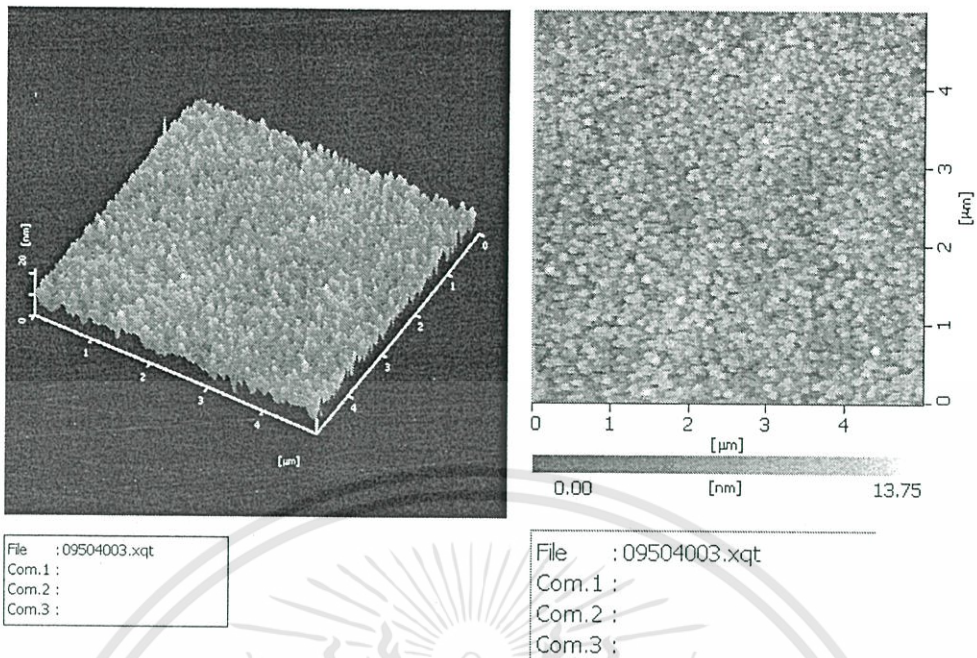
File : 09504002.xqt  
Com.1 :  
Com.2 :  
Com.3 :

(c)

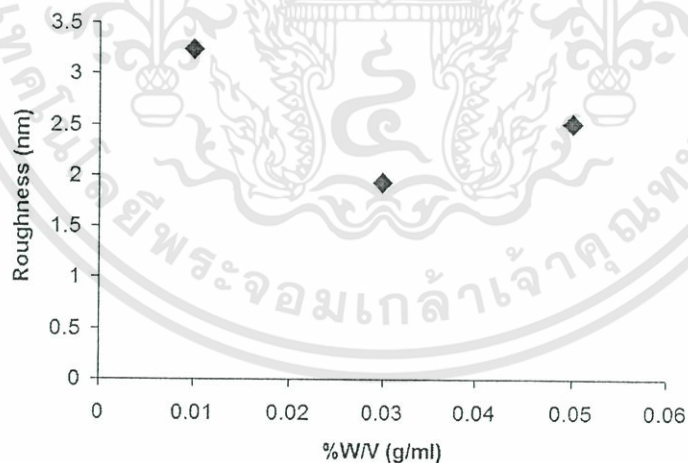
File : 09504002.xqt  
Com.1 :  
Com.2 :  
Com.3 :

(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายสองมิติและสามมิติจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ  $550^\circ\text{C}$  (a),(b) CNT-0.01% (c),(d) CNT-0.03% และ (e),(f) CNT-0.05%

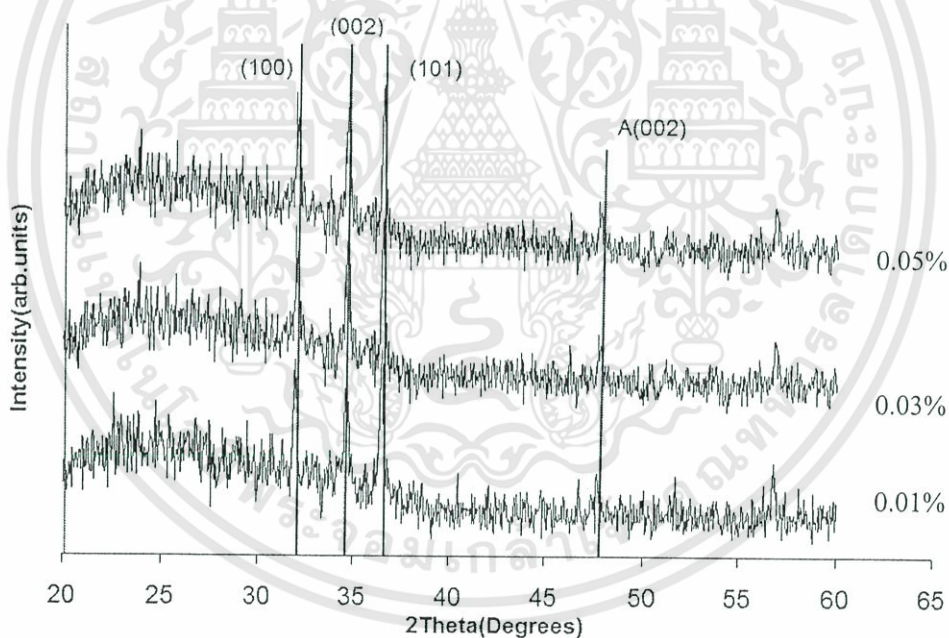


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร ของฟิล์มทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ  $550^\circ\text{C}$

จากภาพถ่ายสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เมื่อเจือคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนปริมาณ 0.01, 0.03 และ 0.05 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าความขรุขระของแผ่นฟิล์มมีค่าประมาณ 1.75 ถึง 3.25 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งให้เห็นว่าทินออกไซด์เกิดการรวมตัวกันเป็นเม็ดเกรนเล็กๆ ทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม ขณะเดียวกันเมื่อปริมาณคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ ความขรุขระที่ผิวหน้าของแผ่นฟิล์มลดลง แสดงว่าปริมาณคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์

#### 4.5 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน

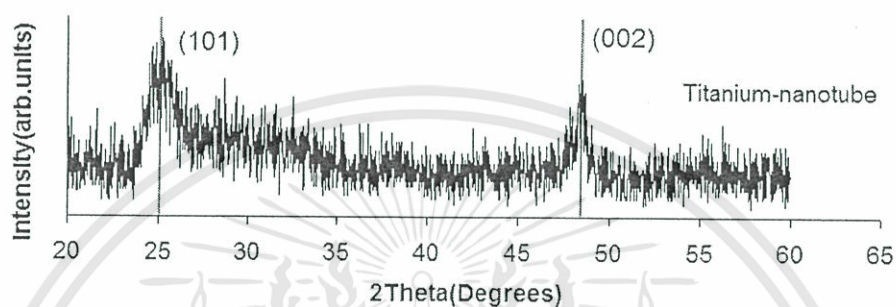
##### 4.5.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน



รูปที่ 4.19 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) เจือด้วยไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ  $550^\circ\text{C}$

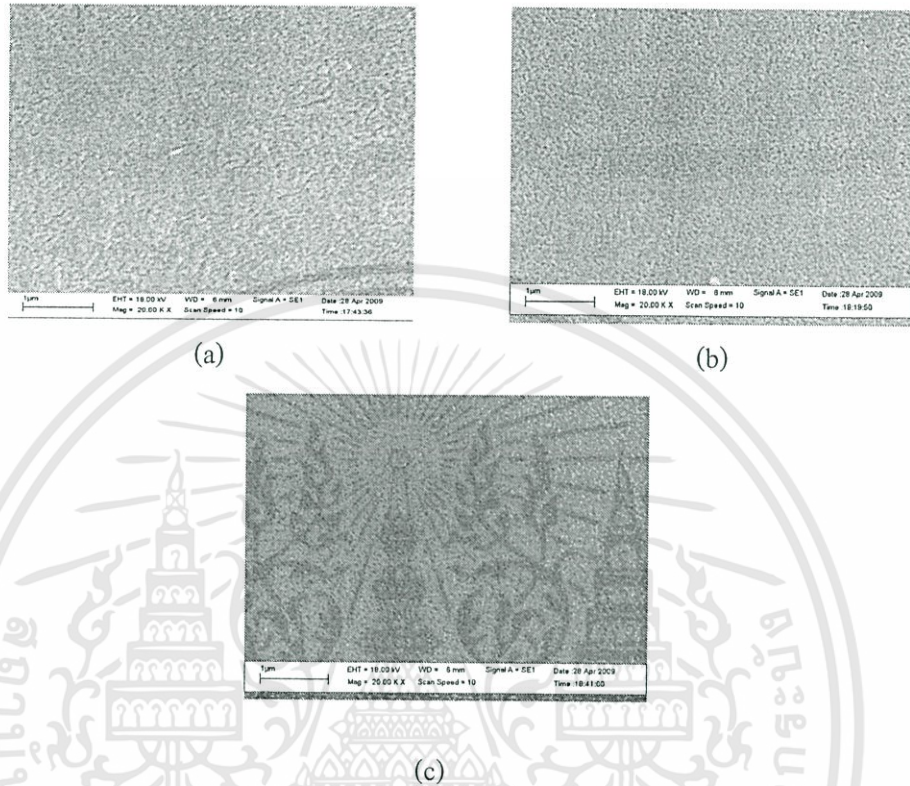
จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์กับมุมการเลี้ยวเบนของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) เจือด้วยไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนในปริมาณ 0.01%, 0.03% และ 0.05% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แอนนีสที่อุณหภูมิ  $550^\circ\text{C}$  ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (100), (002)

และ (101) ของซิงค์ออกไซด์โครงสร้างเฮกซะโกนอล เวทไซด์ และระนาบการเลี้ยวเบน (002) ของไททาเนียมไดออกไซด์ท่อนาโนโครงสร้างอะนาเทส เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีมวลโมเลกุลมากในระหว่างทำการปลูกฟิล์มด้วยวิธีการโซล-เจล ทำให้มีปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์เกาะที่ผิวหน้าฟิล์มมีปริมาณน้อยทำให้สังเกตเห็นระนาบการเลี้ยวเบนจากรังสีเอ็กซ์ได้ไม่ชัดเจนเท่าไรนักเมื่อเทียบกับระนาบการเลี้ยวเบนของไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล [6]

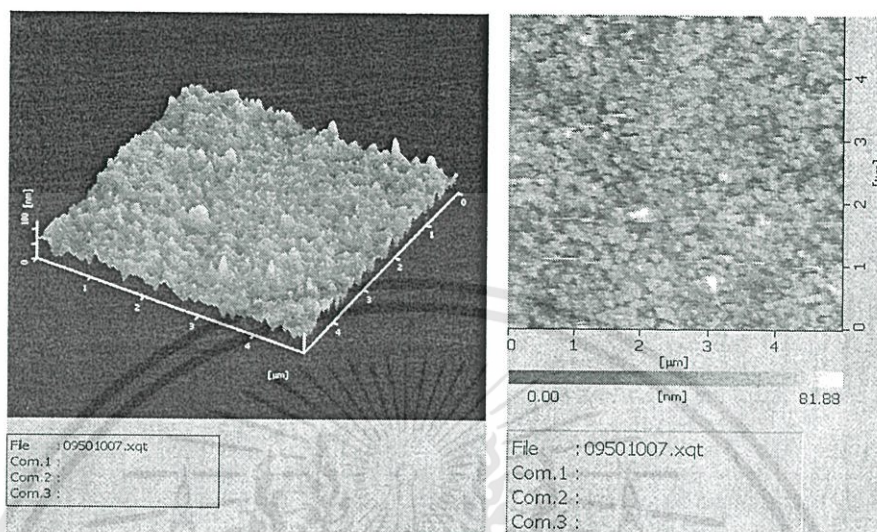
#### 4.5.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางพื้นผิวด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของฟิล์มซิงค์ออกไซด์เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน



รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีลที่อุณหภูมิ 550°C (a) TiO<sub>2</sub>-0.01% (b) TiO<sub>2</sub>-0.03% และ (c) TiO<sub>2</sub>-0.05%

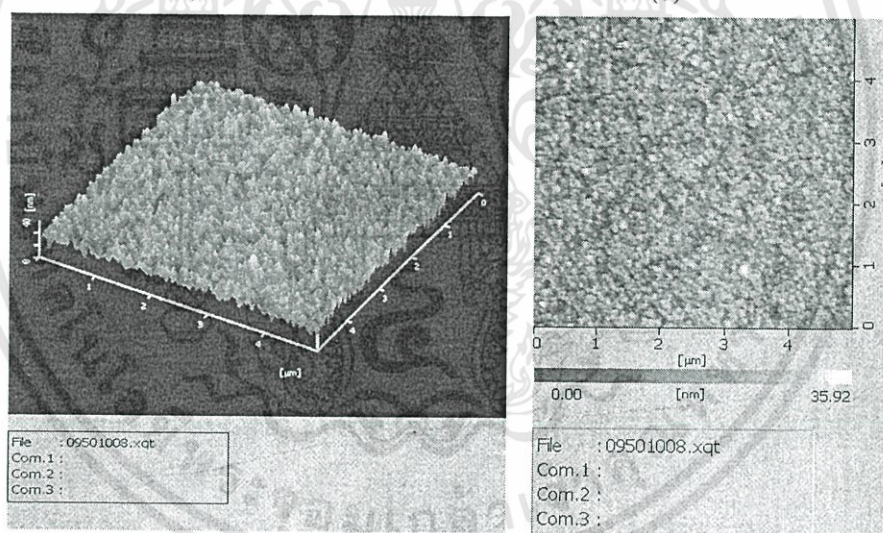
จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน พบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดเกรนเล็กๆทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม และมีรูพรุนปรากฏให้เห็น เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน พบว่าปริมาณรูพรุนลดน้อยลงเนื่องจากมีไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโนแทรกตัวลงไปในพื้นที่เป็นรูพรุนทำให้แผ่นฟิล์มที่เจือไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยปริมาณ 0.05 และ 0.03 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรมีปริมาณรูพรุนน้อยกว่าแผ่นฟิล์มที่เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

### 4.5.3 ผลการถ่ายภาพสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์ม ซิงค์ออกไซด์ที่เจือไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน



(a)

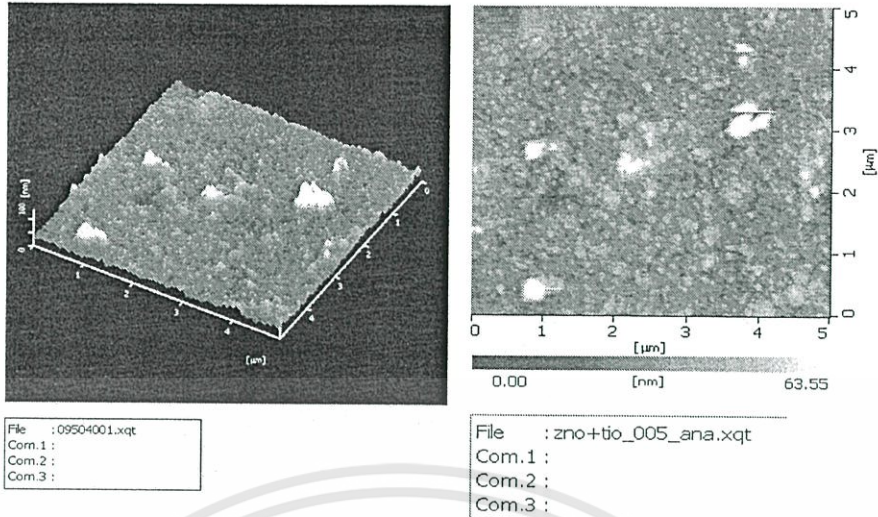
(b)



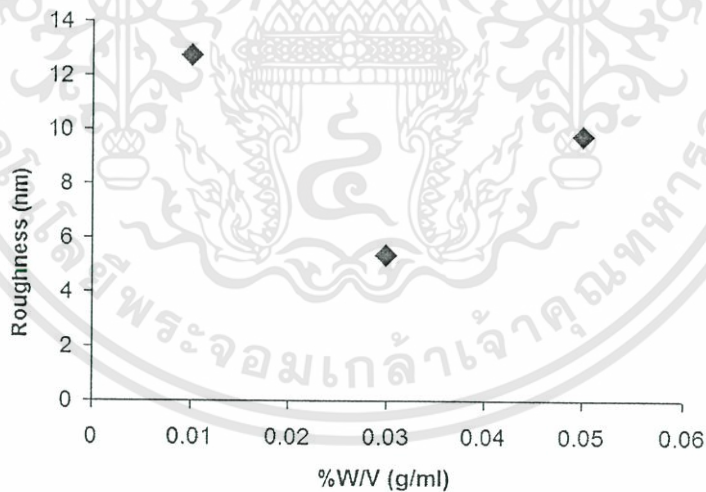
(d)

(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายสองมิติและสามมิติจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนิตที่อุณหภูมิ 550°C (a),(b) TiO<sub>2</sub>-0.01% (c),(d)TiO<sub>2</sub>-0.03% และ (e),(f) TiO<sub>2</sub>-0.05%

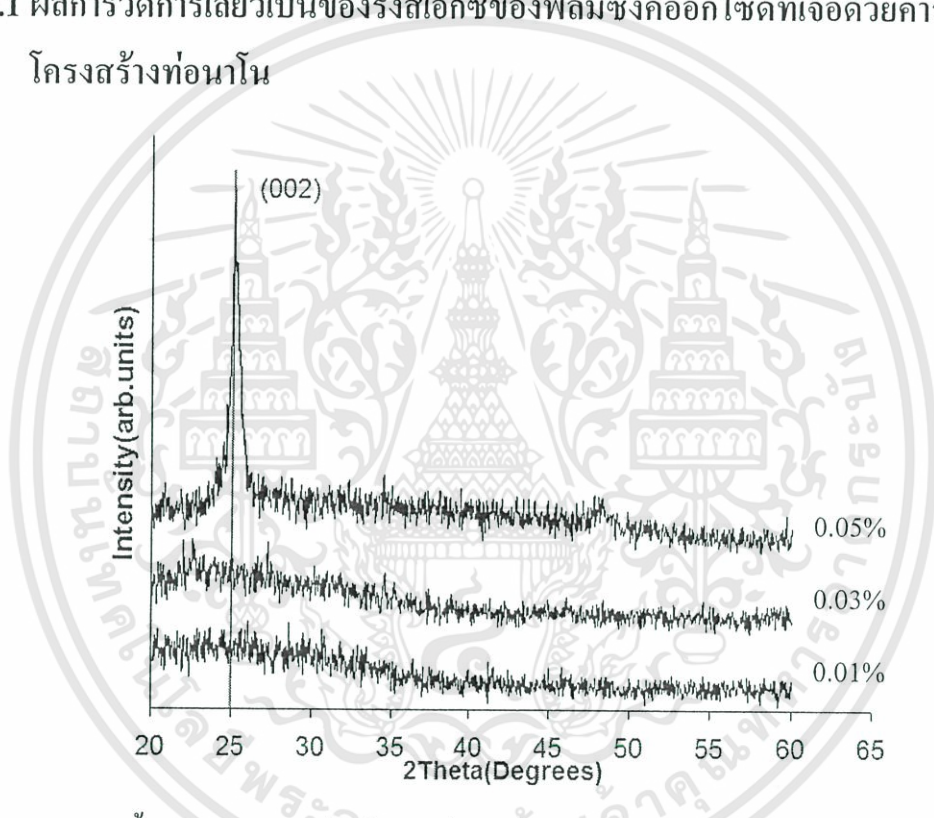


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนิตที่อุณหภูมิ 550°C

จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าความขรุขระมากที่สุด เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือด้วยไททาเนียม โครงสร้างท่อนาโนทำให้ไททาเนียมโครงสร้างท่อนาโนไปแทรกตัวลงในรูพรุนทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีค่าความขรุขระน้อยลงซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ขณะเดียวกันเมื่อปริมาณ  $\text{TiO}_2$  เพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ค่าความขรุขระที่ผิวหน้าของฟิล์มลดลง แสดงว่าปริมาณ  $\text{TiO}_2$  ที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 0.01%

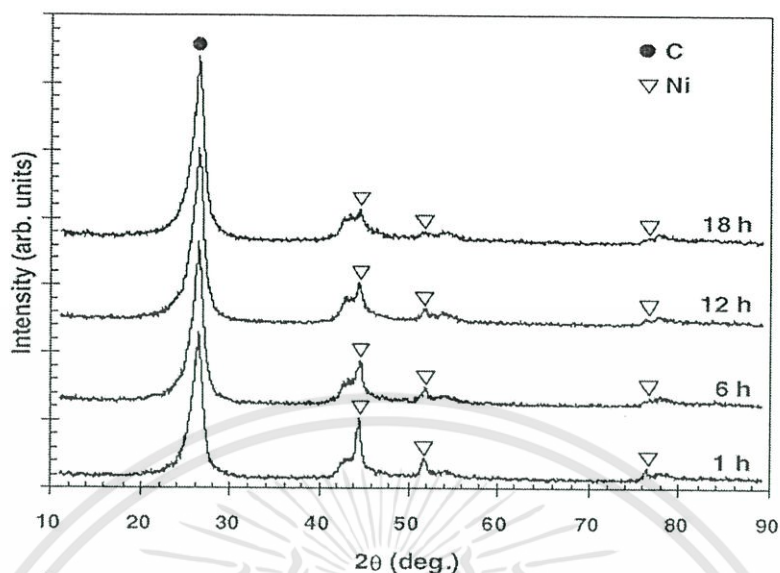
#### 4.6 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน

##### 4.6.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน



รูปที่ 4.24 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนิตที่อุณหภูมิ 550°C

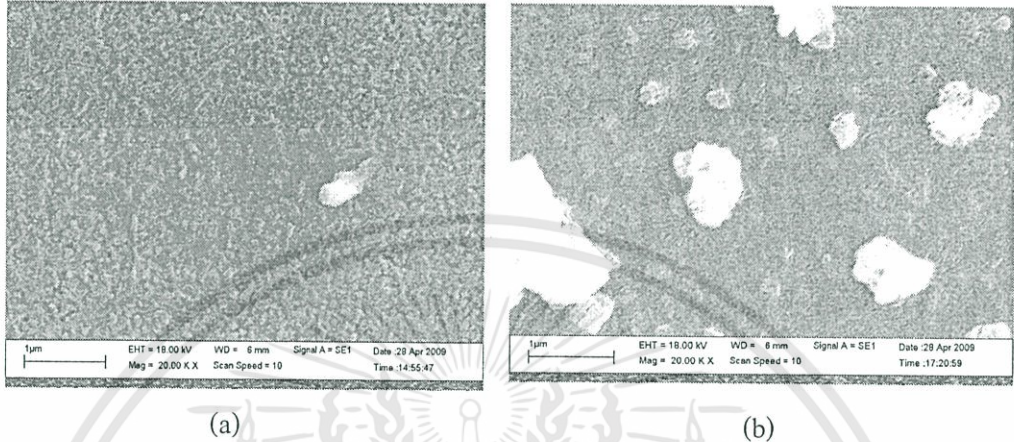
จากรูปที่ 4.24 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนิตที่อุณหภูมิ 550°C พบว่า ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เจือคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (002) ให้เห็นอย่างชัดเจน ซึ่งตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อวัดจากคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วยวิธีอินฟิวชันเคมีคัลวาเปอร์ดิโพสิชัน (รูปที่ 4.25)



รูปที่ 4.25 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนที่เตรียมด้วยวิธีการ Infusion chemical vapor deposition [7]

เนื่องจากคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโนมีมวล โมเลกุลน้อยน้ำหนักจึงเบาว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน ทำให้มีปริมาณคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนที่อยู่ในแผ่นฟิล์มมากขณะทำการปลูกฟิล์มด้วยวิธีการโซล-เจลดังนั้นจึงปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนอย่างชัดเจนเมื่อเจือคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนในปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์ให้เห็นเนื่องจากคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโนอาจจะขัดขวางการเกิดผลึกซิงค์ออกไซด์เป็นไปได้อย่างยากทำให้ไม่ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์

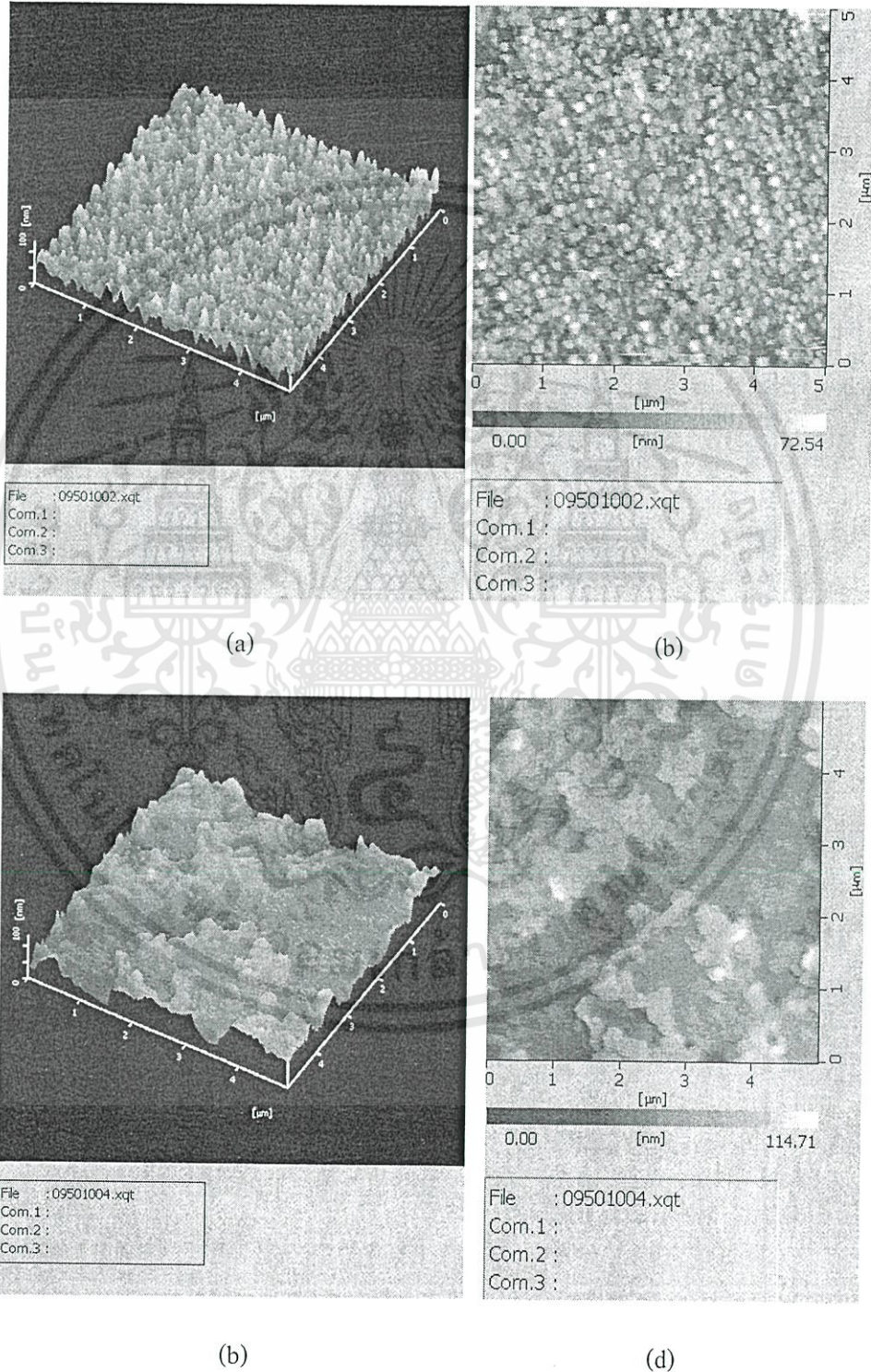
#### 4.6.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางพื้นผิวด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดของฟิล์มซิงค์ออกไซด์เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนานาโน



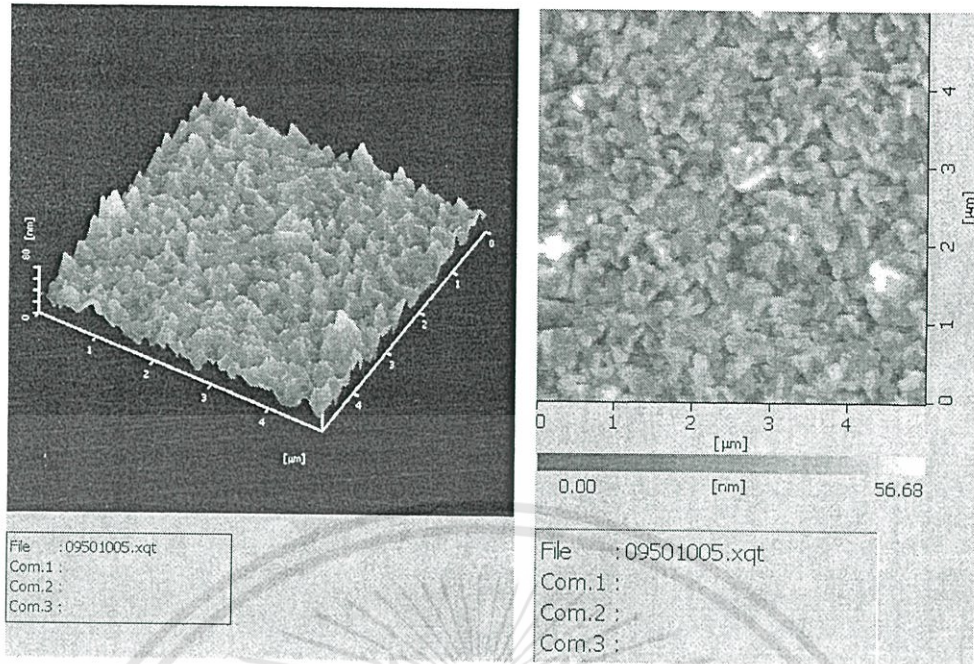
รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนานาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีลที่อุณหภูมิ 550°C (a) CNT-0.01% และ (b) CNT-0.05%

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนานาโน พบว่าแผ่นฟิล์มที่เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนานาโนปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ปรากฏรูพรุนน้อยกว่าแผ่นฟิล์มที่เจือคาร์บอนโครงสร้างท่อนานาโน 0.01 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนโครงสร้างท่อนานาโนกระจายทั่วแผ่นฟิล์มมากกว่าทำให้แผ่นฟิล์มมีลักษณะค่อนข้างเรียบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

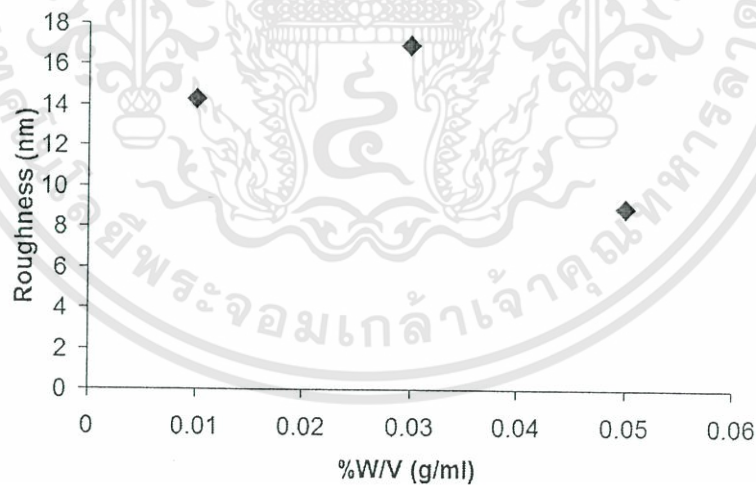
#### 4.6.3 ผลการถ่ายภาพสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายสองมิติและสามมิติจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C (a),(b) CNT- 0.01% (c),(d) CNT- 0.03% และ (e),(f) CNT- 0.05%



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนีสที่อุณหภูมิ 550°C

จากภาพถ่ายสองมิติและสามมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโน พบว่าเมื่อเจือคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโนปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์มีค่าความขรุขระของแผ่นฟิล์มน้อยที่สุด เนื่องจากคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโนมีการแทรกตัวกระจายทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยการปลูกฟิล์มทินออกไซด์ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบลงในโซล-เจล แอนนิตที่อุณหภูมิ 450° 500°C และ 550° พบว่าทินออกไซด์เริ่มก่อตัวเป็นผลึกที่อุณหภูมิแอนนิต 550°C โครงผลึกของฟิล์มที่ได้เป็นแบบเตตระโกนอล โดยมีระนาบการเลี้ยวเบน (101) ที่มุมเลี้ยวเบน  $2\theta = 32.5^\circ$  และมีค่า  $E_g$  ประมาณ 3.9 eV ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของทินออกไซด์

จากการศึกษาแผ่นฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนิตที่อุณหภูมิ 450°C 500°C และ 550°C พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอล เวทไชท์ โดยมีระนาบ (100), (002) และ (101) ปรากฏขึ้นที่มุมเลี้ยวเบน 31.8°, 34.4° และ 36.3° เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแอนนิตขึ้นถึง 550°C เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิแอนนิตพบว่าค่า  $E_g$  มีค่าน้อยลงเนื่องจากรอยบกพร่องที่เกิดจากตำแหน่งว่างของออกซิเจน

ฟิล์มทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เจือด้วยไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน แอนนิตที่อุณหภูมิ 550°C พบระนาบการเลี้ยวเบน (101) ซึ่งเป็นระนาบการเลี้ยวเบนของทินออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล แต่ไม่ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของไททานเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน อย่างไรก็ตามระนาบการเลี้ยวเบนที่พบไม่เด่นชัดนัก ซึ่งแตกต่างจากผลที่ได้จากฟิล์มทินออกไซด์เท่านั้น แสดงให้เห็นว่า ไททานเนียมไดออกไซด์ที่เจือลงไปมีผลขัดขวางการก่อตัวของผลึกทินออกไซด์ ขณะเดียวกันการเพิ่มปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ไม่ได้เพิ่มความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์ม

ฟิล์มทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน แอนนิตที่อุณหภูมิ 550°C พบว่า ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (101) ซึ่งเป็นระนาบการเลี้ยวเบนของทินออกไซด์ โครงสร้างเตตระโกนอล แต่ไม่ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน ขณะเดียวกันเมื่อปริมาณคาร์บอน โครงสร้างท่อนาโนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ ความขรุขระที่ผิวหน้าของแผ่นฟิล์มลดลง แสดงว่าปริมาณคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 0.01%

ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน แอนนิตที่อุณหภูมิ 550°C ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (100), (002) และ (101) ของซิงค์ออกไซด์โครงสร้างเฮกซะโกนอล เวทไซด์ และระนาบการเลี้ยวเบน (002) ของไททาเนียมไดออกไซด์ท่อนาโน โครงสร้างอะนาเทส เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีมวลโมเลกุลมากในระหว่างทำการปลูกฟิล์มด้วยวิธีการโซล-เจล ทำให้มีปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์เกาะที่ผิวหน้าฟิล์มมีปริมาณน้อยทำให้สังเกตเห็นระนาบการเลี้ยวเบนจากรังสีเอ็กซ์ได้ไม่ชัดเจนเท่าไรนัก ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีความขรุขระมากที่สุด เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือด้วยไททาเนียมโครงสร้างท่อนาโนทำให้ไททาเนียมโครงสร้างท่อนาโนไปแทรกตัวลงในรูพรุนทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีค่าความขรุขระน้อยลง

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโดยใช้โซล-เจล แอนนิตที่อุณหภูมิ 550°C พบว่า ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เจือคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (002) ให้เห็นอย่างชัดเจน เนื่องจากคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนมีมวลโมเลกุลน้อยน้ำหนักจึงเบาว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างท่อนาโน ทำให้มีปริมาณคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนเจืออยู่ในแผ่นฟิล์มมากขณะทำการปลูกฟิล์มด้วยวิธีการโซล-เจล ดังนั้นจึงปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนอย่างชัดเจนเมื่อเจือคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนในปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์ให้เห็นเนื่องคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนอาจจะขัดขวางการเกิดผลึกซิงค์ออกไซด์เป็นไปได้อย่างทำให้ไม่ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของซิงค์ออกไซด์ ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโน พบว่าเมื่อเจือคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์มีค่าความขรุขระของแผ่นฟิล์มน้อยที่สุด เนื่องจากคาร์บอนโครงสร้างท่อนาโนมีการแทรกตัวกระจายทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M.A. Dal Santos, A.C. Antunes, C. Ribeiro, C.P.F. Borges, S.R.M. Antunes, A.J. Zara and S.A. Painaro, **Electric and Morphologic properties of SnO<sub>2</sub> films prepared by modified sol-gel process.** Materials Letters 57 (2003) 4378-4381
- [2] Yi Hu, and S.-H Hou, **Preparation and characterizations of Sb-doped SnO<sub>2</sub> thin films from colloidal precursors.** Materials Chemistry and Physics 86 (2004) 21-25
- [3] X.M. Lui, S.L. Wu, Paul K. Chu, and J. Zheng, **Characteristics of nano Ti-doped SnO<sub>2</sub> powders prepared by sol-gel method.** Materials Science and Engineering A 426 (2006) 274-277
- [4] T. Ratana, P.Amorntitoksuk, T.Ratana, S.Suwanboon, **The wide band gap of highly oriented nanocrystalline Al doped ZnO thin films from sol-gel dip coating.** Journal of Alloys and Compounds 470 (2009) 408-412
- [5] T. Kumpika, W. thongsuwan, P.Singjai, **Optical and electrical properties of ZnO nanoparticle thin films deposited on quartz by sparking process.** Nanomaterials Research Unit, Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand
- [6] J. Jitputti, S. Pavasupree, Y. Suzuki and S. Yoshikawa, Y. 2008. **Synthesis of TiO<sub>2</sub> nanotubes and its photocatalytic activity for H<sub>2</sub> evolution.** Japanese Journal of Applied Physics. 47,751-756
- [7] P. Singjai, S. Changsarn, S. Thongtem, **Electrical resistivity of bulk multi-walled carbon nanotubes synthesized by an infusion chemical vapor deposition method.** Materials Science and Engineering A 443 (2007) 42-46
- [8] Gong Shuping, Xia Jing, Liu Jianqiao, Zhou Dongxiang, **Highly sensitive SnO<sub>2</sub> thin film with low operating temperature prepared by sol-gel technique.** Sensor and Actuator B: Chemical (2008)
- [9] E. Cetinorgu, S. Goldsmith, R.L. Boxman, **The effect of substrate temperature on filtered vacuum arc deposited zinc oxide and tin oxide thin films.** Journal of Crystal Growth 299 (2007) 259-267

- [10] E. Bacaksiz, S. Yilmaz, M. Parlak, A. Varilci, M. Altunbas, **Effects of annealing temperature on the structural and optical properties of ZnO hexagonal pyramids.** Journal of Alloys and compounds 478 (2009) 367-370



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายโชคชัย คหัญญา เกิดเมื่อวันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2525 ที่อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร ในปีการศึกษา 2543 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และอุตสาหกรรม ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้