

การสร้างและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์  
ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล

กুমาริกา วานิชชัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา  
พฤศจิกายน 2558  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ กุมาริกา วานิชชัง ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

..... ฐนัสดา ไรทอง ..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ดร.ธนัสดา ไรทอง)

..... อรรถพล เขษุภักดิ์ ..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร.อรรถพล เขษุภักดิ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... วิษณุ ธีรพรหม ..... ประธาน  
(ดร.วิษณุ ธีรพรหม)

..... ฐนัสดา ไรทอง ..... กรรมการ  
(ดร.ธนัสดา ไรทอง)

..... อรรถพล เขษุภักดิ์ ..... กรรมการ  
(ดร.อรรถพล เขษุภักดิ์)

..... กษณะ เทศศรี ..... กรรมการ  
(ดร.กษณะ เทศศรี)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... ศ.ดร.เอกธัญ ศรีสุข ..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกธัญ ศรีสุข)

วันที่ 11 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้เกี่ยวข้องหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณ ดร.ชนัสตา รัตนะ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ดร.อรรถพล เขยสุกเกตุ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้องเพิ่มเติม ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ขณะดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ตลอดเวลาการศึกษา ณ มหาวิทยาลัยบูรพา ขอขอบคุณ ดร. วิเชียร ศิริพรหม ประธานกรรมการสอบ ดร.การะเกด เทศศรี ตัวแทนฝ่ายวิชาการและบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และนอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรสิงห์ ไชยคุณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบ รวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไข ตลอดจนเพื่อนทุก ๆ คน ที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีทั้งกำลังใจและขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นกำลังใจ ทั้งด้านร่างกายและจิตใจ รวมทั้งท่านอื่น ๆ ที่มีได้เอยนามในที่นี้ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

กุมาริกา วานิชชัง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
กระบวนการ โซล-เจล.....	4
ความหมายของคำว่า โซล-เจล.....	4
การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี โซล-เจล.....	7
ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO).....	10
นิกเกิลออกไซด์ (Nickel oxide; NiO).....	11
การศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง.....	13
การศึกษาโครงสร้างด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD).....	13
การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM).....	17
การศึกษาการส่องผ่านของแสง UV-Vis Spectrophotometer.....	20
การศึกษาผลทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็น.....	24
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	29
วิธีการทดลอง.....	30
การศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง.....	36
4. ผลการวิจัย.....	37
ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์.....	37
ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์.....	40
ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ภายใต้อุณหภูมิ.....	
ในการอบที่แตกต่างกัน.....	43
ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่ความหนา.....	52
5. อภิปรายและสรุปผล.....	59
บรรณานุกรม.....	63
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก.....	67
ภาคผนวก ข.....	72
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	78

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	คุณสมบัติทางกายภาพบางประการของซิงก์ออกไซด์.....	11
2-2	คุณสมบัติทางกายภาพบางประการของนิกเกิลออกไซด์.....	12
4-1	ขนาดผลึกนิกเกิลออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บน นิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่ต่างกัน.....	44
4-2	แสดงค่ากระแสอิ่มตัว ( $I_s$ ) ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิ ในการอบ 450°C และ 530°C.....	51
4-3	แสดงค่าความชันของเส้นกราฟ $\ln I$ กับความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่า $n$ ของฟิล์มบางที่ อบที่อุณหภูมิ 450°C และ 530°C.....	52
4-4	ขนาดผลึกนิกเกิลออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บน นิกเกิลออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ต่างกัน.....	53
4-5	แสดงค่ากระแสอิ่มตัว ( $I_s$ ) ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ภายใต้ จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้นและ 6 ชั้น.....	57
4-6	แสดงค่าความชันของเส้นกราฟ $\ln I$ กับความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่า $n$ ของฟิล์ม ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ ภายใต้จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ต่างกัน.	58

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	ลักษณะของสารที่เตรียมได้ในรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้จากระบวนการโซล-เจล.....	6
2-2	การเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง.....	7
2-3	ขั้นตอนการจุ่มเคลือบแบบจุ่มเคลือบ.....	9
2-4	รูปแบบโครงสร้าง Wurtzite Hexagonal ของซิงก์ออกไซด์.....	10
2-5	โครงสร้างแบบ Face Center Cubic ของนิกเกิลออกไซด์.....	12
2-6	แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม.....	14
2-7	ความเข้มของฟลักที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี	16
2-8	องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Electron Microscope .....	17
2-9	การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง.....	19
2-10	การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่าง ๆ.....	19
2-11	แสดงความเข้มของแสงก่อนและหลังการทะลุผ่านสาร.....	22
2-12	องค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer.....	23
3-1	เครื่องจุ่มเคลือบ (Dip coating).....	29
3-2	ขั้นตอนการล้างวัสดุรองรับ.....	31
3-3	ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ .....	32
3-4	ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ .....	33
3-5	ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน.....	34
3-6	ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน.....	35
4-1	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์.....	37
4-2	ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FE-SEM โดยมีความเข้มขึ้น 0.35 M. และเผาที่อุณหภูมิ 530°C.....	38
4-3	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตาสามารถมองเห็นได้ของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์.....	39

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-4	ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์.....	39
4-5	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ .....	40
4-6	ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีโซล-เจล .....	41
4-7	การส่องผ่านแสงช่วงที่ตาสามารถมองเห็นได้ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์.....	42
4-8	ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์.....	42
4-9	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน.....	44
4-10	a. ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนชั้นฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน	
	b. ลักษณะพื้นผิวของภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน.....	45
4-11	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงช่วงที่ตาสามารถมองเห็นได้ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน.....	46
4-12	ลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์.....	47
4-13	ลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบ 350°C.....	48
4-14	ลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบ 450°C.....	49
4-15	ลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบ 530°C.....	50
4-16	กราฟ $\ln I -$ ความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบ 450°C และ 530°C.....	51
4-17	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน.....	53



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-18	a. ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนชั้นฟิล์มบาง นิกเกิลออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน b. ลักษณะพื้นผิวของภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนชั้น ฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ แตกต่างกัน.....	54
4-19	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงช่วงที่ตาสามารถมองเห็นได้ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ ที่เคลือบทับบนชั้นฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบาง ซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน.....	55
4-20	ลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บน นิกเกิลออกไซด์ที่ความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 6 ชั้น.....	56
4-21	กราฟ $\ln I$ และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน.....	57

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductors) ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะสารกึ่งตัวนำที่สร้างจากธาตุซิลิกอน ซึ่งถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าสมัยใหม่ เช่น อุปกรณ์ตรวจจับรังสี เซลล์แสงอาทิตย์ ไดโอดทรานซิสเตอร์ ไดโอดเปล่งแสงและวงจรรวม (Integrated Circuit) เป็นต้น โดยสารกึ่งตัวนำที่ใช้งานในปัจจุบันสามารถแบ่งแยกได้เป็น 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductors) ซึ่งในกรณีของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนจะมีการเติมสารเจือธาตุหมู่ 5 ที่มีเลขวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น Arsenic (As) Antimony (Sb) และ Phosphorus (P) ทำให้โครงสร้างอะตอมของซิลิกอนมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น ส่วนสารกึ่งตัวนำอีกชนิดคือ สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type Semiconductors) ซึ่งในกรณีของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนจะมีการเติมสารเจือธาตุหมู่ 3 ที่มีเลขวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เช่น Boron (B) และ Gallium (Ga) ทำให้โครงสร้างอะตอมของซิลิกอนมีการสูญเสียอิเล็กตรอนหรือการเกิดโฮล (Hole) เกิดขึ้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพีมาเชื่อมต่อกันก็จะเกิดเป็นรอยต่อพีเอ็น (P-N Junction) ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดและทรานซิสเตอร์ เป็นต้น

ในช่วงระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาสารกึ่งตัวนำเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะโปร่งใสหรือ Transparent Electronics ที่สามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronics) เช่น หน้าจอแสดงผลของโทรศัพท์มือถือหรือกระจกอัจฉริยะ (Smart Windows) เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะมีคุณสมบัติที่นำไฟฟ้าได้ดีและมีการส่องผ่านแสงที่สูงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น ทำให้มีข้อจำกัดของการนำสารกึ่งตัวนำซิลิกอนไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากคุณสมบัติการส่องผ่านแสงที่ต่ำของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้มีการนำสารกึ่งตัวนำออกไซด์ (Oxide Semiconductors) ที่เป็นสารประกอบออกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำมาใช้ในการสร้างเป็นอุปกรณ์ Transparent Electronics เนื่องจากสารกึ่งตัวนำออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีการส่องผ่านแสงสูงในช่วงที่ตามองเห็น โดยสารกึ่งตัวนำออกไซด์ที่เป็นชนิดเอ็น ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)

ทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) และอินเดียมทินออกไซด์ ( $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ ) (Hoffman, Norris, & Wager, 2003) ในขณะที่นิกเกิลออกไซด์ (NiO) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเมื่อนำสารกึ่งตัวนำออกไซด์ชนิดพีและเอ็นมาเชื่อมต่อกัน จะทำให้เกิดเป็นรอยต่อพีเอ็นที่มีลักษณะโปร่งใสที่สามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะโปร่งใส เช่น Transparent Diode และ Transparent Transistor ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในปัจจุบัน

โดยซิงก์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยทั่วไปซิงก์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Wurtzite Hexagonal มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Band Gap) ประมาณ 3.3 eV (Singh, Meh, Buth, Wak, & Yos, 2001) และมีการส่องผ่านของแสงสูงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นทำให้เป็นที่นิยมสำหรับนำไปเป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดเปล่งแสง เลเซอร์ไดโอดและอุปกรณ์ตรวจจับแสง อัลตราไวโอเลต เป็นต้น

ส่วนนิกเกิลออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Face Center Cubic (Sherly & Vijaya, 2015) มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.6-4.0 eV (Sawaby, Selim, & Marzouk, 2010) มีคุณสมบัติเป็นสารอิเล็กโทโครมิก (Electrochromic) (Hakim, Dae, & Bong, 2012) และเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) (Masahiko et al., 2002) ทำให้นิกเกิลออกไซด์ถูกนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ อย่างหลากหลาย เช่น ใช้เป็นก๊าซเซนเซอร์ ใช้เป็นตัวคະตะลิสต์ ใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

จากคุณสมบัติของซิงก์ออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีนักวิจัยทำการทดลองเคลือบฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่มีลักษณะซ้อนทับกันหรือฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ (NiO/ZnO Thin Film) เพื่อสร้างเป็นรอยต่อพีเอ็น โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์มีหลายวิธี เช่น วิธีสปัตเตอริง (Sputtering) (Ozeki et al., 2007) วิธีฟิลเตอร์อาร์คดิพโพสิชัน (Filtered Arc Deposition) (Bendavida, Martina, & Takikawab, 2000) วิธีการเคลือบแบบพัลส์เลเซอร์ดิพโพสิชัน (Pulsed Laser Deposition) (Hiromichi Ohta, Kamiya, Kamiya, Hirano, & Hosono, 2003) รวมไปถึงวิธีโซล-เจล (Sol-Gel) โดยวิธีโซล-เจล เป็นกระบวนการสังเคราะห์สารจากสถานะของเหลว (Sol) เพื่อมาอยู่ในรูปของแข็ง (Gel) ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางที่ไม่ซับซ้อน อุปกรณ์ในการเตรียมทำได้ง่าย สามารถเคลือบสารได้หลายชนิด มีต้นทุนในการเตรียมฟิล์มบางไม่สูงมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่น รวมไปถึงสามารถเตรียมฟิล์มบางให้มีลักษณะที่สม่ำเสมอและสามารถเตรียมฟิล์มในระดับสเกลขนาดใหญ่ได้

ดังนั้นจากรายละเอียดทั้งหมดนี้ ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล แบบจุ่มเคลือบ (Dip Coating) เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบฟิล์มบางและผลของจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่มีผลต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ ได้แก่ โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิจัยต่อไป

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล แบบจุ่มเคลือบ
2. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบฟิล์มบางที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์
3. เพื่อศึกษาผลของจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทำให้ทราบขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล แบบจุ่มเคลือบ
2. ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD, FE-SEM, UV-Vis Spectrophotometer และ I-V Source Meter

### ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล แบบจุ่มเคลือบ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบและจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่มีผลต่อลักษณะ โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย รายละเอียดของกระบวนการ โซล-เจล วิธีการเคลือบฟิล์ม บางด้วยวิธีโซล-เจล แบบจุ่มเคลือบ คุณสมบัติของสารนิกเกิลออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ รวมไปถึง รายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

#### กระบวนการ โซล-เจล

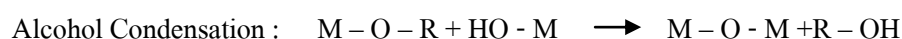
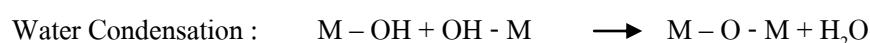
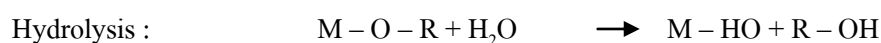
กระบวนการ โซล-เจล คือ กระบวนการเตรียมวัสดุ โดยการนำสารละลายมาทำปฏิกิริยา ซึ่งมีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเรียกว่า “โซล” (Sol) ซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคเล็ก ๆ จำนวน มากที่แขวนลอยอย่างเสถียร ส่วนมากอยู่ในรูปสารแขวนลอยที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กไปเป็นของแข็งที่ เรียกว่า “เจล” (Gel) หรือของเหลวหนืดที่มีการจับตัวกันเป็น โครงร่างตาข่ายอย่างต่อเนื่องในเฟส ของเหลวด้วยพันธะโคเวเลนต์ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van De Waal Force) หรือพันธะไฮโดรเจน จากนั้นสารที่เตรียมได้ จะถูกทำให้แห้งหรือเผาที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะได้เป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบต่าง ๆ เช่น ฟิล์มบาง (Thin Films) เส้นใย (Fiber) แอโรเจล (Aerogel) ซีโรเจล (Xerogel) และผง (Powder) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย เช่น การเคลือบเป็นฟิล์มบางบนผิววัตถุ เพื่อป้องกันการขีดข่วนหรือเคลือบเพื่อป้องกันการสะท้อนแสง (Antireflective Coating) เป็นต้น

#### ความหมายของคำว่าโซล-เจล

โซล (sol) คือ การแขวนลอยของอนุภาคของแข็งในของเหลว โดยที่โซลจะมีความ หนาแน่นของอนุภาคของแข็งมากกว่าของเหลวที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคของแข็งที่อยู่ภายในของเหลวจะ มีขนาดเล็กมากประมาณ 1-1000 นาโนเมตร จนมีแรงต้านทานแรงโน้มถ่วงจึงไม่มีการตกตะกอน และมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไป

เจล (Gel) เป็นคอลลอยด์ที่มีโครงสร้างของของแข็งเกิดเป็น โครงข่ายโยงเป็น 3 มิติและมีความพรุนที่กระจายปกคลุมอยู่ทั่วเฟสของเหลว แต่มีขนาด ไม่นั่นอนขึ้นอยู่กับภาชนะที่บรรจุ ถ้าโครงข่ายของของแข็งเกิดจากโซลที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นเรียกว่า คอลลอยด์เจล (Colloidal Gel) ถ้าโครงข่ายของของแข็งเกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าคอลลอยด์เจลที่เกิดขึ้น เรียกว่า โพลีเมอร์เจล (Polymeric Gel) เมื่อผ่านการกำจัดตัวทำละลาย (Solvents) และการทำให้แห้งที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผงของโลหะออกไซด์เกิดขึ้น

ปฏิกิริยาในกระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การควบแน่นของน้ำ (Water Condensation) และการควบแน่นเป็นแอลกอฮอล์ (Alcohol Condensation) และมีปัจจัยสำคัญต่อผลอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ pH, ตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราส่วน โมลของน้ำกับโลหะและออกซิเจน ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสถานะที่แตกต่างกัน ทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติและโครงสร้างแตกต่างกัน ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาการควบแน่นของน้ำและปฏิกิริยาการควบแน่นเป็นแอลกอฮอล์สามารถแสดงรูปแบบของปฏิกิริยาได้ดังนี้

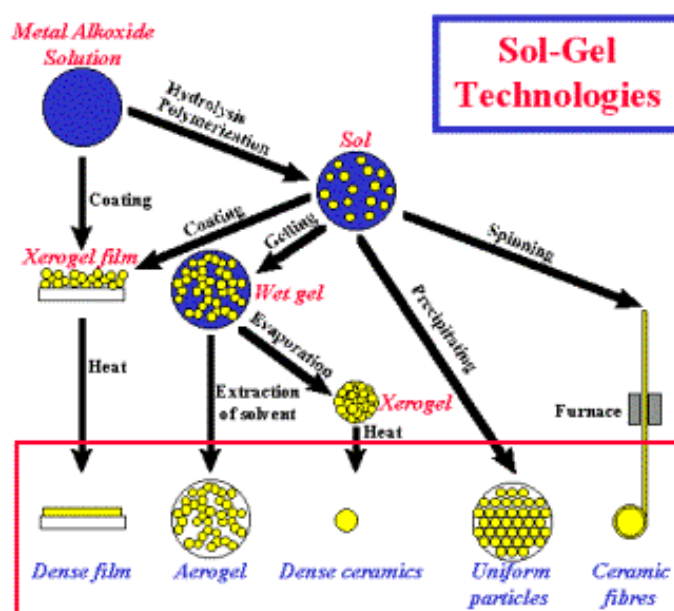


โดยที่ M แทนธาตุโลหะ เช่น Si Zr Ti และ Al เป็นต้น ส่วน OR แทน Alkoxy Group

สารประกอบตั้งต้น (Precursor) ที่ใช้ในการเตรียมสารด้วยวิธีการ โซล-เจล มีหลายชนิด แต่ที่นิยมมากที่สุด คือ โลหะอัลคอกไซด์ (Metal Alkoxides) เพราะเป็นสารประกอบสารอินทรีย์ที่มีพันธะกับอะตอมของโลหะ ยกตัวอย่างเช่น ซิลิกอนเตตระออกไซด์ (Silicon Tetrathoxide) หรือที่เรียกว่าเตตระอิทอกซีแลน (Tetraethoxsilane: TEOS,  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ) ซึ่งเป็นโลหะอัลคอกไซด์ที่นิยมใช้เป็นสารตั้งต้นของการเตรียมสารซิลิกอนไดออกไซด์ เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำได้อย่างรวดเร็ว

โดยทั่วไปแล้วลักษณะของเจลจะขึ้นกับการรวมตัวกันระหว่างโครงสร้างของแข็งกับตัวกลางของเหลว ถ้าของเหลวประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่จะเรียกเจลนั้นว่าเอควาเจล (Aqua Gel) หรือไฮโดรเจล (Hydro Gel) แต่ถ้าของเหลวประกอบด้วยแอลกอฮอล์เป็นส่วนใหญ่จะเรียกเจลนั้นว่า อัลโคเจล (Alcogel) นอกจากนี้การเกิดเจล (Gelatin) ยังอาจเกิดได้จากการระเหยอย่างรวดเร็วของตัวทำละลายซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการเตรียมฟิล์มหรือไฟเบอร์ที่ทำให้โครงร่างแหของเจลเคลื่อนย้ายไปตำแหน่งต่าง ๆ จนเกิดการควบแน่นต่อไปเรื่อยๆ ทั้งโซลและโครงร่างแหของเจลจนเป็นโพลิเมอร์เล็ก ๆ ที่มีอนุภาคเชื่อมต่อและกระทำให้เกิดเป็นโครงข่ายเชื่อมโยง หลังการเกิดเจลแล้วก็สามารถทำการบ่มสาร (Aging) เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างและคุณสมบัติหลังการเกิดเจล ซึ่งการบ่มสารอาจรวมถึงการเกิดการควบแน่น การละลายตัวและการตกตะกอนใหม่ซึ่งทำให้เกิดการหดตัวของเจล (Shrinkage) ระหว่างการสังเคราะห์หรือการระเหยของของเหลวในระหว่างการอบแห้งรวมถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงร่างแหและการไล่น้ำออกจากรูพรุนจาก

การอบแห้ง (Drying) ทำได้โดยการระเหยภายใต้สภาวะปกติ จะทำให้เกิดการหดตัวของโครงสร้างของเจลที่มีปริมาตรลดลง 5 ถึง 10 เท่าจากเดิม ซึ่งเจลที่เกิดจากการอบแห้งในสภาวะปกติเรียกว่า ซีโรเจล (Xerogel) แต่ถ้านำไปอบแห้งในเครื่องอบและให้ความร้อนสูง (Autoclave) ภายใต้สภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical Condition) ซึ่งไม่มีชั้นผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและไอ น้ำ ดังนั้นจึงไม่มีแรงดันคาปิลลารี (Capillary Pressure) ทำให้เกิดการหดตัวเพียงเล็กน้อยของเจล ซึ่งเจลที่เกิดจากการอบแบบนี้เรียกว่า แอโรเจล (Aerogel) การอบแบบแอโรเจลจะทำให้ของแข็งมีขนาดเล็กถึงประมาณ 1% โดยดูจากภาพที่ 2-1 จะแสดงลักษณะของสารที่เตรียมได้ในรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการบวนการโซล-เจล



ภาพที่ 2-1 ลักษณะของสารที่เตรียมได้ในรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการบวนการโซล-เจล

(ที่มา : [http://www.immt.pwr.wroc.pl/~marjas/index\\_en.php?sub=activity](http://www.immt.pwr.wroc.pl/~marjas/index_en.php?sub=activity))

## การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีโซล-เจล

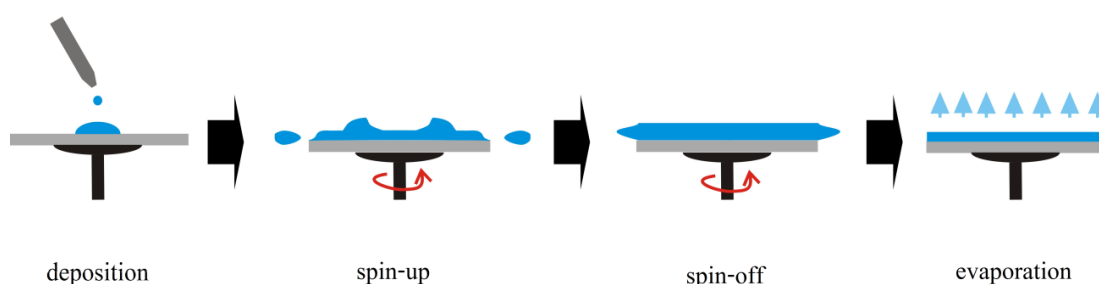
วิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีโซล-เจล เป็นกระบวนการที่นิยมใช้เตรียมฟิล์มบางออกไซด์บริสุทธิ์หรือออกไซด์ที่เจือสารอื่น ๆ เนื่องจากการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น

1. สารตั้งต้นที่ใช้สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย
2. สารตั้งต้นที่ใช้มีการผสมกันในระดับโมเลกุล ทำให้ฟิล์มบางมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง
3. สามารถปรับปรุงสมบัติทางโครงสร้างและสมบัติอื่น ๆ ด้วยการเติมสารเจือในสารละลายที่ใช้เคลือบฟิล์มบาง
4. สามารถปรับความหนืด แรงตึงผิวและความเข้มข้นของสารละลายได้ง่าย
5. สามารถเคลือบผิวตัวรองรับขนาดใหญ่ได้
6. สามารถใช้เคลือบฟิล์มบางออกไซด์ที่มีองค์ประกอบซับซ้อนได้และสามารถควบคุมองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของฟิล์มบางได้ง่าย

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีโซล-เจล สามารถ แบ่ง ได้เป็น 2 วิธี คือ การเคลือบฟิล์มบางแบบหมุนเหวี่ยง (Spin Coating) และการเคลือบฟิล์มบางแบบจุ่มเคลือบ (Dip Coating)

### 1.1 การเคลือบฟิล์มบางแบบหมุนเหวี่ยง (Spin Coating)

กระบวนการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง เริ่มต้นจากการหยดสารละลายของสารเคลือบบนผิวตัวรองรับ และหมุนตัวรองรับด้วยความเร็วที่เหมาะสม การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีหมุนเหวี่ยงประกอบด้วยขั้นตอน 4 ขั้นตอน คือ การหยดสารละลายหรือการเคลือบ (Deposition) การเหวี่ยง (Spin-Up) การหยุดหมุนเหวี่ยง (Spin-Off) และการระเหย (Evaporation) ดังแสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 การเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง

(ที่มา : [http://www.immt.pwr.wroc.pl/~marjas/index\\_en.php?sub=activity](http://www.immt.pwr.wroc.pl/~marjas/index_en.php?sub=activity))



ระหว่างการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะทำให้สารละลายเคลือบผิวตัวรองรับและสารละลายที่เหลือหลุดจากตัวรองรับเมื่อหยุดหมุน ความหนาของฟิล์มสามารถคำนวณได้จากสมการ (2-1)

$$h(t) = \frac{h_0}{1 + \left[ \frac{4\rho\omega^2 h_0^2 t}{3\eta} \right]^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

โดยที่  $h_0$  คือ ความหนาเริ่มต้น  $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการหมุนเหวี่ยง  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม โดย  $\rho$  และ  $\eta$  มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง

เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการระเหย ตัวทำละลายจะระเหยออกจากฟิล์มทำให้ฟิล์มมีความหนาลดลงและหนืดขึ้น ความหนาของฟิล์มหลังจากการระเหยสามารถคำนวณได้จากสมการ (2-2)

$$h_{final} = \left[ 1 - \left( \frac{\rho_A}{\rho_A} \right) \right] \left[ \frac{3\eta e}{2\rho_A \omega^2} \right] \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

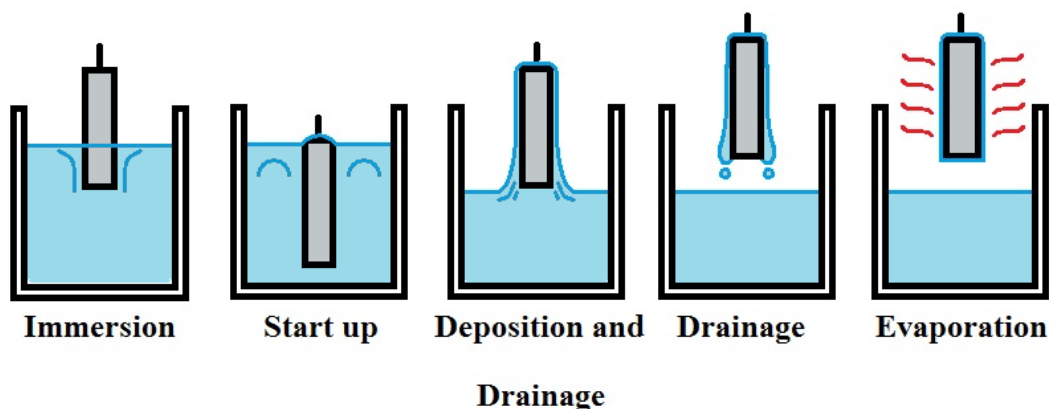
เมื่อ  $\rho_A$  คือ มวลของตัวทำละลายที่ระเหยต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร  $\rho_A$  คือ ปริมาตรเริ่มต้น  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม  $\eta$  คือ ความหนืดของสารละลาย และ  $e$  คือ อัตราการระเหยซึ่งสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ดังนั้นความหนาของฟิล์มขึ้นกับสมบัติของสารละลายและเงื่อนไขของการเคลือบฟิล์ม

## 1.2 การเคลือบฟิล์มบางแบบจุ่มเคลือบ (Dip Coating)

การเคลือบฟิล์มแบบจุ่มเคลือบส่วนใหญ่ใช้เคลือบฟิล์ม โปร่งใส ซึ่งกระบวนการเคลือบฟิล์มแบบจุ่มประกอบไปด้วยขั้นตอนขณะเคลือบได้ 5 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ดังนี้

- 1 ขั้นตอนการจุ่มชิ้นงาน (Immersion)
- 2 ขั้นตอนการเริ่มต้นดึงชิ้นงานขึ้น (Start Up)
- 3 ขั้นตอนที่สารละลายเกาะที่ผิวชิ้นงานและเริ่มไหลย้อนกลับ (Deposition Drainage)
- 4 ขั้นตอนที่สารละลายไหลแยกออกจากชิ้นงาน (Drainage)
- 5 ขั้นตอนที่สารละลายระเหย (Evaporation)

สำหรับตัวทำละลายที่ระเหยง่าย เช่น แอลกอฮอล์ จะมีขั้นตอนการระเหยที่ง่ายกว่าน้ำในขั้นตอนที่ 2, 3 และ 4



ภาพที่ 2-3 ขั้นตอนการจุ่มเคลือบแบบจุ่มเคลือบ

(ที่มา : [http://www.dip-coater.com/english/about\\_dip\\_coating.html](http://www.dip-coater.com/english/about_dip_coating.html))

ความหนาของฟิล์มที่เคลือบขึ้นกับอัตราเร็วในการจุ่มเคลือบขึ้นกับแรงตึงผิว และความเร็วของการดึงตัวรองรับ เมื่อความหนืดของสารละลาย ( $\eta$ ) และความเร็วในการดึงตัวรองรับ ( $U$ ) มีค่าสูงมากพอที่สามารถครีมีมีความโค้งได้ ดังนั้นความหนาของฟิล์ม ( $h$ ) เกิดจากสมดุลระหว่างแรงหนืด (Viscous Drag) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\alpha\eta U / h$  และแรงโน้มถ่วง (Gravity Force) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\rho gh$  ดังนั้นความหนาของฟิล์มจึงมีค่าเท่ากับสมการ (2-3)

$$h = C_1 \left[ \frac{\eta U}{\rho g} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

แต่ถ้าสารละลายมีความหนืดต่ำ และความเร็วของการดึงตัวรองรับช้า ความหนาของฟิล์มสามารถหาได้จากสมการ (2-4)

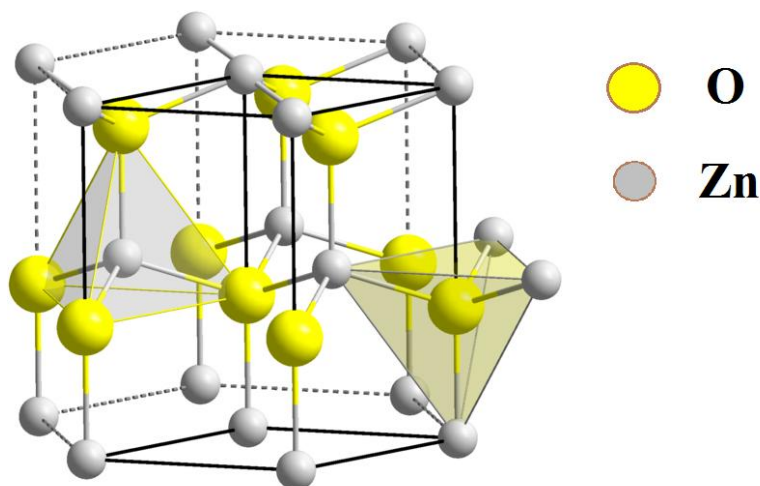
$$h = 0.94 \left[ \frac{(\eta U)^{1/2}}{\gamma_{lv}^{1/6} (\rho g)^{1/2}} \right] \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

เมื่อ  $\gamma_{lv}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างเฟสของเหลวกับแก๊ส

## ซิงก์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO)

ซิงก์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำออกไซด์ชนิดอื่น มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.3 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ที่อุณหภูมิห้อง โดยที่ซิงก์ออกไซด์ถูกนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาทางเคมีในอุตสาหกรรมยาง เช่น ยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber) ที่ใช้ในการผลิตน้ำหอม, เครื่องสำอางและยา เป็นต้น นอกจากนี้ซิงก์ออกไซด์ยังถูกนำมาใช้ในการผลิตเม็ดสีและตัวเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอลในอุตสาหกรรมเคมีต่าง ๆ ด้วย

โดยทั่วไปซิงก์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite Hexagonal แสดงดังภาพที่ 2-4 นอกจากนี้ค่าคงที่แลตทิซ (Lattice Constants) ของซิงก์ออกไซด์มีที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน มีค่าแลตทิซ  $a$  และ  $b$  เท่ากับ 0.32495 นาโนเมตร และค่าคงที่แลตทิซ  $c$  เท่ากับ 0.52065 นาโนเมตร และสัดส่วนของค่าคงที่แลตทิซ  $c/a$  เท่ากับ 1.602 (มีค่าเป็น 1.633 สำหรับโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลที่สมบูรณ์แบบ) และมีมุม  $\alpha$  และ  $\beta$  เท่ากับ  $90^\circ$  และมุม  $\gamma$  เท่ากับ  $120^\circ$  โดยโครงสร้าง Wurtzite จะมีปริมาตรสัมพันธ์ (Stoichiometry) เป็น MX โดย M แทนไอออนบวก คือ  $Zn^{2+}$  และ X แทนไอออนลบ คือ  $O^{2-}$  การจัดเรียงตัวของไอออนลบหรือ  $O^{2-}$  เป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal Close Packing ; HCP) โดยที่ไอออนของ  $Zn^{2+}$  อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตำแหน่งเตตระฮีดรัล (Tetrahedral Sites) ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยไอออนของ  $O^{2-}$  จำนวน 4 ไอออน ในขณะที่ไอออนของ  $O^{2-}$  ก็ถูกล้อมรอบด้วยไอออนของ  $Zn^{2+}$  จำนวน 4 ไอออนเช่นกัน โดยคุณสมบัติทางกายภาพของซิงก์ออกไซด์แสดงในตารางที่ 2-1



ภาพที่ 2-4 รูปแบบโครงสร้าง Wurtzite Hexagonal ของซิงก์ออกไซด์

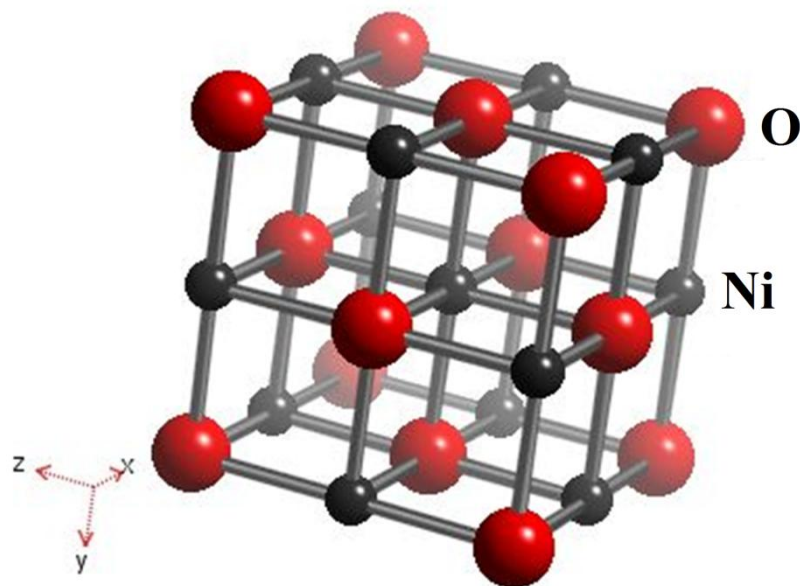
(ที่มา : [http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc\\_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide))

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติทางกายภาพบางประการของซิงก์ออกไซด์

คุณสมบัติ	รายละเอียด
โครงสร้างผลึก	Wurtzite Hexagonal Structure
มวลโมเลกุล	81.8084 g/ mol
สัดส่วนน้ำหนักอะตอมของซิงก์	65.7 %
สัดส่วนน้ำหนักอะตอมของออกซิเจน	34.4 %
ความหนาแน่น (293K)	5.67526 g/ cm <sup>3</sup>
ช่องว่างแถบพลังงาน (300K)	3.37 eV
จุดหลอมเหลว	1975°C
จุดเดือด	2360°C
ค่าดัชนีหักเห	2.008

### นิเกิลออกไซด์ (Nickel Oxide; NiO)

นิเกิลออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ถูกนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างหลากหลาย เช่น เซนเซอร์ เทอร์มิสเตอร์ แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดข้อมไวแสง เซลล์นิเกิลออกไซด์ที่เจือด้วยทองสามารถนำมาทำเป็นอิเล็กทรอนิกส์โปร่งใสได้และใช้เป็นสารให้สีในเซรามิก เป็นต้น มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.6-4.0 eV ที่อุณหภูมิห้อง (300K) มีโครงสร้างผลึกแบบ Face Center Cubic แสดงดังภาพที่ 2-5 โดยค่าคงที่ของแลคทิส a b และ c มีค่าประมาณ 0.417 นาโนเมตรและมีมุม  $\alpha$   $\beta$  และ  $\gamma$  เท่ากับ  $90^\circ$  โดยสมบัติทางกายภาพของนิเกิลออกไซด์แสดงในตารางที่ 2-2



ภาพที่ 2-5 โครงสร้างแบบ Face Center Cubic ของนิกเกิลออกไซด์  
(ที่มา : [http://www.webelements.com/compounds/nickel/nickel\\_oxide.html](http://www.webelements.com/compounds/nickel/nickel_oxide.html))

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทางกายภาพบางประการของนิกเกิลออกไซด์

คุณสมบัติ	รายละเอียด
โครงสร้างผลึก	Face Center Cubic Structure
มวลโมเลกุล	74.6928 g/ mol
สัดส่วนน้ำหนักอะตอมของนิกเกิล	78.58 %
สัดส่วนน้ำหนักอะตอมของออกซิเจน	21.42 %
ความหนาแน่น (293K)	6.67 g/ cm <sup>3</sup>
ช่องว่างแถบพลังงาน (300K)	3.55 eV
จุดหลอมเหลว	1955°C
จุดเดือด	2913°C
ค่าดัชนีหักเห	2.1818

## การศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

### 1. การศึกษาโครงสร้างด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

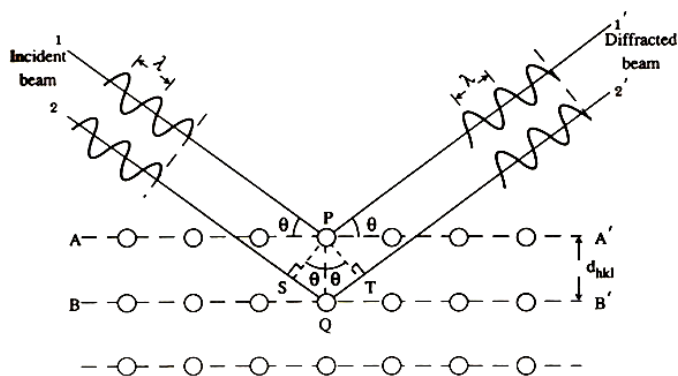
ในการศึกษาลักษณะเฉพาะสำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์มบาง คือ การศึกษาโครงสร้างผลึกหรือเฟส ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Diffraction Analysis) (หนึ่งฤทัย แก้วไข่ม, 2555) อธิบายหลักการของเทคนิคนี้ไว้ดังนี้ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้การแยกแยะโครงสร้างของสารที่ใช้ในการเคลือบ โดยการวิเคราะห์อาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนกับฐานข้อมูล JCPDS (Joint Committee On Powder Diffraction Standard) ของสารนั้น ดังนั้นเทคนิค XRD เป็นเทคนิคสำหรับวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากผลึก ที่ใช้หลักการของการเลี้ยวเบนคลื่นโดยพบว่ารังสีเอกซ์เลี้ยวเบนได้เมื่อเกิดการตกกระทบผลึก ซึ่ง Bragg ได้เสนอแนวคิดที่สามารถมองผลึกที่ประกอบด้วยชั้น (Layer) หรือระนาบ (Plane) ของอะตอม ซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมที่ตกกระทบจะเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้คลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูง ลำรังสีเอกซ์ 1 และ 2 ตกกระทบทำมุม  $\theta$  กับระนาบของผลึก A และ B สนามไฟฟ้าของรังสีเอกซ์จะก่อให้เกิดแรงคูลอมป์กระทำบนอิเล็กตรอนที่ P กับ Q ที่สั้นด้วยความถี่เดียวกับรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบและอิเล็กตรอนนั้นแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นรังสีเอกซ์ออกไปทุกทิศทางในทิศทาง 1' และ 2' ซึ่งเสมือนรังสีเอกซ์สะท้อนออกจากระนาบของผลึกจะไปแทรกสอดแบบเสริมกัน (In Phase) แม้ว่าแบบจำลองที่กล่าวมาจะไม่ถูกต้องในทางกายภาพ เนื่องจากแท้จริงแล้วระนาบของอะตอมไม่ได้สะท้อนคลื่นแต่วิธีนี้ก็ใช้ได้ทางเรขาคณิต โดยพบว่า

$$\delta = n\lambda \quad \text{..... (2-5)}$$

เมื่อ  $\delta$  คือ ความแตกต่างของระยะที่คลื่นเดินทาง

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

$n$  คือ จำนวนเต็มใด ๆ



ภาพที่ 2-6 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม  
(กมล เอี่ยมพนากิจ, 2547)

$$\delta = SQ + QT = 2SQ \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

จากรูปตรีโกณมิติพื้นฐาน

$$\delta = 2PQ \sin \theta \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

โดย PQ คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ \$d\_{hkl}\$

$$\delta = 2d \sin \theta \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

จากสมการ (2-4) เท่ากับ (2-7) จะได้

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

เรียกสมการที่ 2-9 นี้ว่า สมการการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากผลึก (Bragg's Law) โดยที่ \$\lambda\$ เป็นความยาวคลื่น \$n\$ เป็นลำดับของการสะท้อน \$d\_{hkl}\$ เป็นระยะห่างระหว่างระนาบ (hkl) และ \$\theta\$ เป็นมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา

ภาพที่ 2-6 เป็นแบบจำลองเสริมการอธิบายการพิสูจน์กฎของแบรกก์ว่าอะตอมที่เรียงตัวเป็นระเบียบโดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ( $\sim 10^{-10}$  m) จะทำหน้าที่เสมือน เกรตติงเลี้ยวเบนแต่จะเป็นเกรตติงเลี้ยวเบนแบบ 3 มิติ

สัญญาณที่ตรวจจับได้จะแสดงออกมาในรูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสี (Diffraction Pattern) ความเข้มของสัญญาณขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกันเช่น โครงสร้างของวัสดุ ปริมาตรของวัสดุที่แผ่รังสี (Volume Of Irradiated Material) รูปทรงของการหักเห (Diffraction Geometry) และการวางชิ้นงาน (Sample Alignments) เป็นต้น

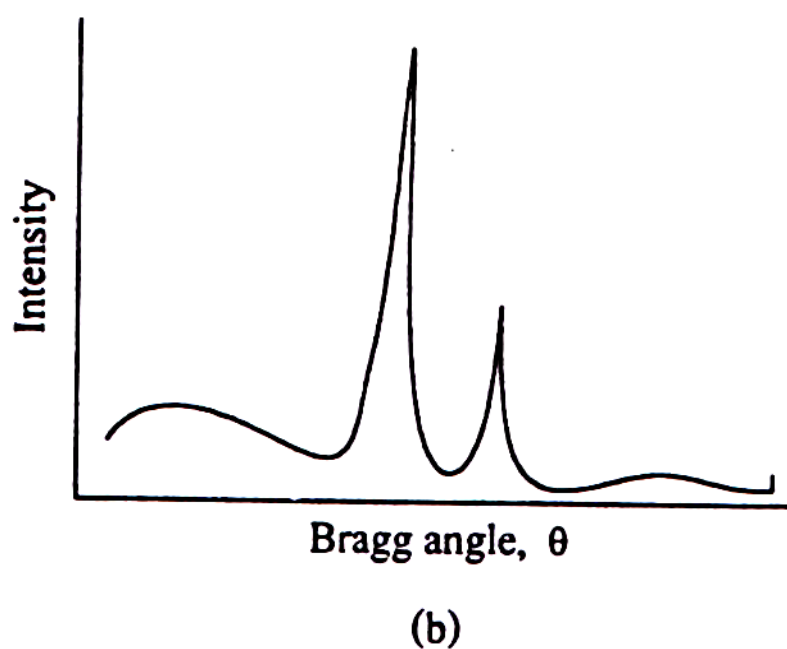
ตำแหน่งของพีคของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีค่าความเข้มมากที่สุดสามารถบอกถึงขนาดและรูปร่างของหน่วยเซลล์ได้ ในขณะที่รูปร่างของและลักษณะของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถบอกถึงค่าขนาดของผลึก การจัดเรียงตัว (Orientation) ของผลึกและความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นของวัสดุที่วัดด้วยเทคนิค XRD ได้ โดยการหาค่าขนาดผลึกจะใช้สมการ Scherrer Equation ในการคำนวณค่าขนาดผลึก ซึ่งแสดงในสมการที่ 2-10

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad \text{..... (2-10)}$$

- เมื่อ
- L คือ ขนาดของผลึก
  - k คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.94
  - $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ( $\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$ )
  - $\beta$  คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด
  - $\theta$  คือ ครึ่งหนึ่งของมุมตรงจุดศูนย์กลางพีค



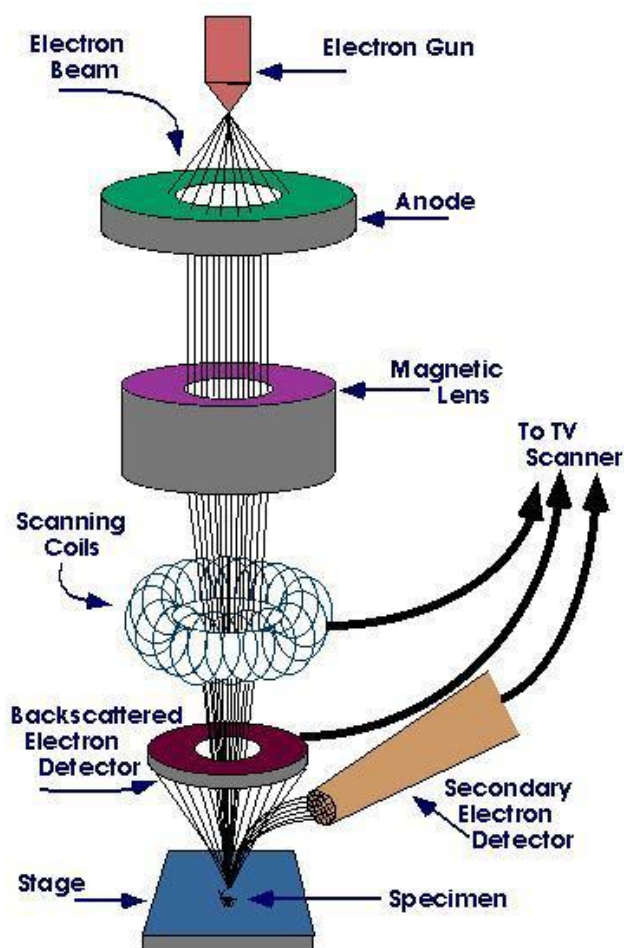
บางครั้งตำแหน่งของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่วัดได้อาจจะเลื่อนไปด้วยค่ามุมที่สูงขึ้น เนื่องจากผลของความเค้นคั่งค้าง (Residual Stress) ในผิวสารเคลือบนั่นเอง ส่วนความเข้มของสัญญาณที่ได้อาจไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐาน JCPDS เพราะเกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ชอบ (Preferred Orientation) ของอะตอมในฟิล์มนอกจากนี้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังสามารถให้ข้อมูลที่บอกถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟส (Phase Composition) และค่าพารามิเตอร์ของแลตทิซ (Lattice Parameter)



ภาพที่ 2-7 ความเข้มของพีคที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี (มติ ห่อประทุม, 2548)

## 2. การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)

เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง คือ Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่ง (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543) ได้อธิบายหลักการทำงานของเครื่องไว้ดังนี้ เทคนิค Scanning Electron Microscope จะสร้างสัญญาณภาพของผิวชิ้นงานที่ได้จากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Detector; SE Detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นหรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron Detector; BSE Detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้นจากการชนผิวชิ้นงานของอิเล็กตรอนที่ผลิตจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เช่น Electron gun ดังแสดงในภาพที่ 2-8

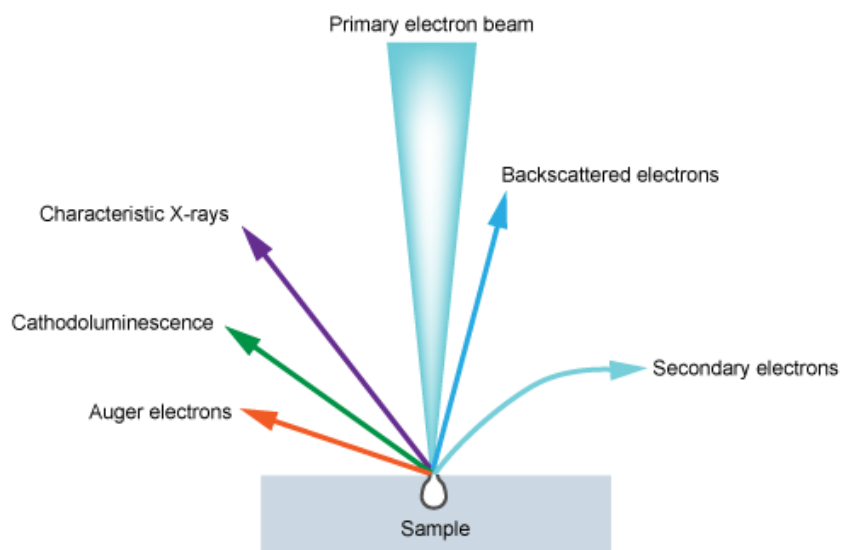


ภาพที่ 2-8 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Electron Microscope

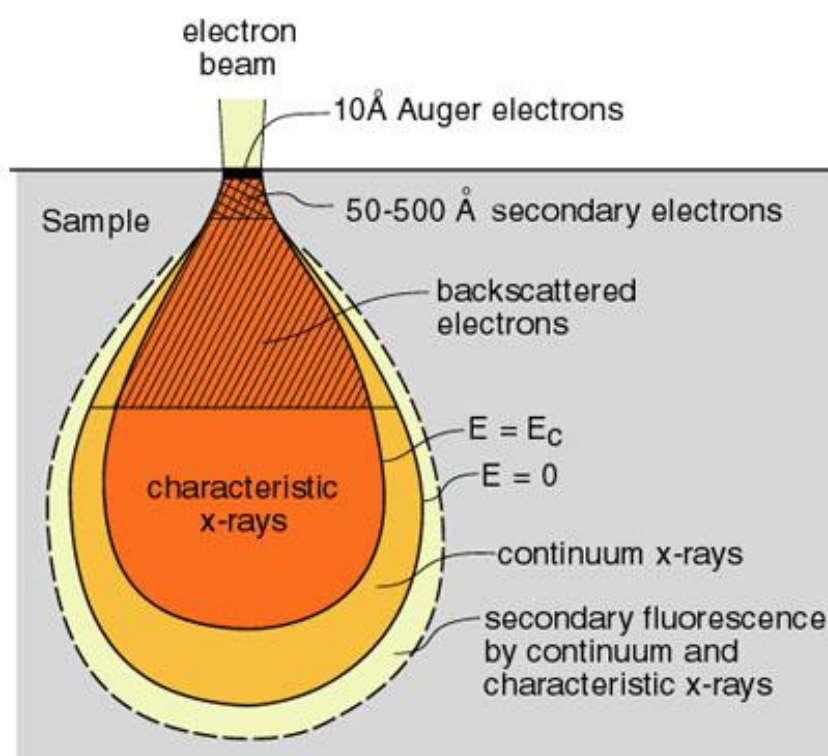
(อมรรัตน์ คำบุญ, 2551)

โดยอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงที่สามารถปรับค่า จากนั้นจึงถูกดึงตกลงสู่เบื่องล่างโดยผ่านอาโนดภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-7}$  torr และมีขูดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับลำของอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบื่องล่างผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนทุติยภูมิให้ลำอิเล็กตรอน โฟกัสลงบนผิวชิ้นงานพอดีและลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัสดุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยมีชุดควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวชิ้นงาน ขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิกับอะตอมของธาตุในวัตถุหรือชิ้นงานและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ออกมา (ภาพที่ 2-9 และภาพที่ 2-10) สัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ที่เกิด คือ

1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image; SEI) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ 3 ถึง 5 eV เกิดที่พื้นผิวระดับไม่ลึก โดยเกิดกับธาตุที่มีพลังยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ
2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image; BEI) หรือเป็นส่วนของอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานเป็นบางส่วนและกระเจิงกลับออกมา
3. สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-Ray Electron Image; XEI) ชนิดที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้น โคจรต่าง ๆ (K, L, M,...) ถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดจากวงโคจรออกมา ทำให้อะตอมต้องรักษาความสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอม โดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานถัดไปมาแทนที่และต้องลดระดับพลังงานภายใน เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีระดับพลังงานสูงกว่า จึงเกิดการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมา ในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทำให้มีพลังงานเท่ากับวงโคจรแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละธาตุสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ



ภาพที่ 2-9 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง  
(วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543)



ภาพที่ 2-10 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่าง ๆ  
(วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543)

### 3. การศึกษาการส่องผ่านของแสง UV-Vis Spectrophotometer

เป็นวิธีที่ใช้ในการวัดสมบัติแสงของฟิล์มบางหรือสารละลายผ่านการทะลุผ่านของแสง หรือการสะท้อนของแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ค่า Transmittance หรือค่า Reflectance สามารถบ่งบอกความหนาของฟิล์มบางได้ อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์หาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Band Gap) ได้ด้วย ซึ่งความยาวคลื่นที่ใช้อยู่ในช่วง รังสีอัลตราไวโอเล็ตถึงช่วงแสงที่ตามองเห็น (200-800 นาโนเมตร) โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectroscopy เมื่อให้แสงความเข้ม  $I_0$  ผ่านแผ่นฟิล์มบางหรือสารละลายวัดค่าความเข้มแสงจะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลโดยความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากแผ่นฟิล์มบางหรือสารละลายมีค่าเป็น  $I$  ดังสมการ

$$I = I_0 e^{-\alpha t} \quad \text{..... (2-11)}$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง Absorption Coefficient

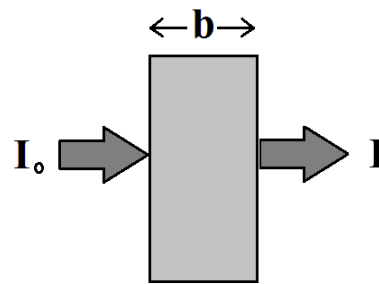
$t$  คือ ความหนาของชิ้นงาน

ค่าการส่องผ่านของแสงหรือค่า Transmission ( $T$ ) หาได้จาก อัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงที่ทะลุออกมากับความเข้มแสงเริ่มต้นดังสมการ (2-12)

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha t} \quad \text{..... (2-12)}$$

ดังนั้นค่า  $\alpha$  จึงมีค่าเท่ากับ  $\frac{-\ln(T)}{t}$

โดยทิศทางของความเข้มแสงก่อนและหลังการดูดกลืน แสดงในรูปที่ 2.11 และเขียนเป็นค่า Transmission ( $T$ ) ให้อยู่ในรูปแบบของค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงหรือ % $T$  ตามสมการ (2-13)



ภาพที่ 2-11 แสดงความเข้มของแสงก่อนและหลังการทะลุผ่านสาร

$$\%T = \frac{I}{I_0} \times 100 \quad \text{..... (2-13)}$$

สำหรับการดูดกลืนแสง (Absorbance) นั้นนิยามมาจากสมการ (2-14)

$$A = -\log T = -\log \left( \frac{I}{I_0} \right) = \epsilon b C \quad \text{..... (2-14)}$$

- เมื่อ
- $A$  คือ ค่าการดูดกลืน
  - $T$  คือ ค่าการส่องผ่านแสงของสาร
  - $I$  คือ ความเข้มของแสงที่ผ่านตัวกลางแล้ว
  - $I_0$  คือ ความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลาง
  - $B$  คือ ความหนาของสารละลาย หน่วยเป็น เซลติเมตร
  - $C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย หน่วยเป็น mol/dm<sup>3</sup> หรือ mol/L
  - $\epsilon$  คือ Molar Absorptivity

จากการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของตัวกลางขึ้นกับความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ความถี่แสงเดียวกันในตัวกลางต่างชนิดกันการดูดกลืนแสงก็จะต่างกัน การดูดกลืนแสงเป็นคุณสมบัติเฉพาะของตัวกลางแต่ละชนิด

การคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถหาได้จากสมการที่ 2-15

(มติ ห่อประชุม, 2548)

$$B (hv-E_g)^m = ahv \quad \dots\dots (2-15)$$

เมื่อ  $B$  คือ ค่าคงที่

$hv$  คือ พลังงานแสง

$E_g$  คือ ช่องว่างแถบพลังงาน

$m$  คือ ค่าคงที่โดยมีค่าขึ้นกับ Transition Mode ของสารกึ่งตัวนำ โดยที่

$m = 1/2$ : การย้ายพลังงานแบบตรงแบบยอมรับได้

$m = 3/2$ : การย้ายพลังงานแบบตรงแบบต้องห้าม

$m = 2$  : การย้ายพลังงานแบบชนิดไม่ตรงแบบยอมรับได้

$m = 1$  : การย้ายพลังงานแบบชนิดไม่ตรงแบบต้องห้าม

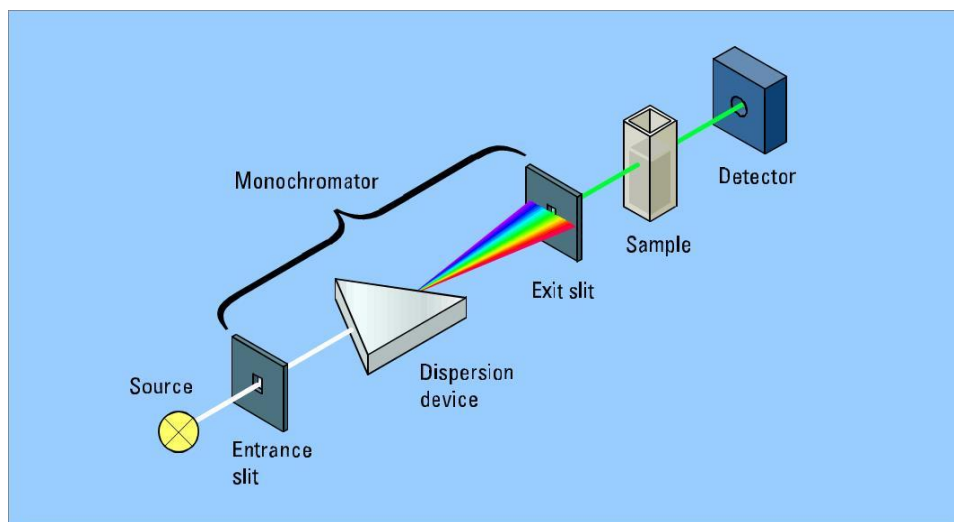
อุปกรณ์ที่ส่วนประกอบที่สำคัญของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มีดังนี้

1. Light Source เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่องและคงที่ รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดรังสีมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา เช่น แสงในช่วงอัลตราไวโอเลตจะใช้  $H_2$  และ  $D_2$  Lamp เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 160-380 นาโนเมตร ส่วนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นจะใช้ Tungsten หรือ Halogen Lamp เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 240-2500 นาโนเมตร

2. Monochromator เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิเมติก ให้แสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบ ๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ปริซึมหรือเกรตติง

3. อุปกรณ์ใส่สารตัวอย่างที่ใช้วัด โดยในกรณีสารเป็นของเหลวจะใช้ Cell Sample ที่เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง บางครั้งอาจเรียกว่า Cuvettes ส่วนในกรณีตัวอย่างที่ใช้วัดเป็นของแข็งหรือฟิล์มบางจะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ยึดตัวอย่างกับตัวเครื่อง

4. Detector ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มข้นของรังสีที่ถูกดูดกลืน โดยการแปลงพลังงานคลื่นเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบันคือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier Tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิคอนไดโอด (Silicon Diode Detector)



ภาพที่ 2-12 องค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

(ที่มา : [http://faculty.sdmiramar.edu/fgarces/LabMatters/Instruments/UV\\_Vis/Cary50.htm](http://faculty.sdmiramar.edu/fgarces/LabMatters/Instruments/UV_Vis/Cary50.htm))



### 3. การศึกษาผลทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็น

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็นที่สัมพันธ์กับความต่างศักย์ตกคร่อมรอยต่อพีเอ็น  
เป็นไปตามสมการ

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \quad \text{..... (2-16)}$$

โดยที่  $I$  คือค่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็น  
 $V$  คือค่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้รอยต่อพีเอ็น  
 $q$  คือค่า ประจุอิเล็กตรอน ( $1.19 \times 10^{-19}$  C)  
 $K$  คือค่า Boltzmann Constant ( $1.38 \times 10^{-23}$  J·K<sup>-1</sup>)  
 $T$  คือค่า อุณหภูมิ (K)  
 $n$  คือค่า Ideality Factor  
 $I_s$  คือค่า กระแสไฟฟ้าอิ่มตัว (Saturation Current)

โดยสมการที่ (2-17) แสดงความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไม่  
คิดผลของความต้านทานไฟฟ้าระหว่างรอยต่อพีเอ็น ( $R_s$ ) โดยค่า  $I_s$  จะสัมพันธ์กับตัวแปรในสมการ  
ดังต่อไปนี้

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \quad \text{..... (2-17)}$$

โดยที่  $A$  คือค่า Diode Area  
 $A^*$  คือค่า Richardson Constant (สำหรับรอยต่อพีเอ็นของฟิล์มบางซึ่งก็ออกไซด์บน  
 นิกเกิลออกไซด์

จะมีค่าเท่ากับ  $0.062 \left(\frac{A}{k^2 cm^2}\right)$

$\phi_{Bn}$  คือค่า Barrier Height

ค่ากระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าจากสมการที่ (2-17) จัดให้อยู่ในรูปแบบของ  
ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I$  กับความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ตามสมการ

$$\ln I = \ln(I_s) + \frac{qV}{nkT} \quad \text{..... (2-18)}$$

โดยสมการที่ (2-18) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I$  กับความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมี  
ค่าความชันเป็น  $\frac{q}{nkT}$  และค่า  $I_s$  หาได้จากค่า  $\ln I_s$  ที่ได้จากวิธีการประมาณค่านอกช่วง  
(Extrapolation) ของกราฟระหว่าง  $\ln I$  กับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตำแหน่งที่ความต่างศักย์ไฟฟ้ามี  
ค่าเป็น 0 ส่วนค่า  $n$  หาได้จากสมการ

$$n = \frac{q}{kT \left( \frac{dV}{d(\ln I)} \right)} \quad \text{..... (2-19)}$$

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gupta, Ghosh, and Kahol (2009) ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง NiO/ZnO ด้วยวิธี Pulsed Laser Deposited เพื่อสร้างเป็นรอยต่อพีเอ็น จากผลการวิเคราะห์ฟิล์มด้วยเทคนิค XRD, AFM, UV-Visible Spectrophotometer และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า พบว่าโครงสร้างผลึกของซิงก์ออกไซด์มีการวางตัวแบบ Preferred Orientations ในระนาบ (200) ส่วนฟิล์มนิกเกิลออกไซด์มีการวางตัวแบบ Preferred Orientations ในระนาบ (111) โดยฟิล์มที่เตรียมได้มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ โดยมีค่าความหยาบของพื้นผิว (Roughness) ประมาณ 1.20 nm ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงของฟิล์มซิงก์ออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์มีค่า 86% และ 64% ตามลำดับ ส่วนค่าตัวแปรทางไฟฟ้า Barrier Height และ Series Resistance มีค่าประมาณ 0.36 eV. และ 0.77 k $\Omega$  ตามลำดับ

Al-Ghamdi, Mahmoud, Yaghmour, and Al-Marzouki (2009) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบาง NiO/ZnO บนวัสดุรองรับที่เป็นกระจกด้วยวิธี โซล-เจล แบบหมุนเหวี่ยง โดยใช้ Nickel Acetate Tetrahydrate เป็นสารตั้งต้น 2-Methoxethanol เป็นตัวทำละลายและ monoethanolamine เป็นตัว Stabilizer ฟิล์มที่เตรียมได้จะถูกอบที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 30 นาที ผลการวิเคราะห์ฟิล์มด้วยเทคนิค XRD พบว่าฟิล์มมีลักษณะเป็น โครงสร้างผลึกระดับนาโน ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ขนาดผลึกของฟิล์มจะมีขนาดเล็ก โดยมีขนาดผลึกเฉลี่ยประมาณ 22 nm ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มมีค่าประมาณ 3.44 eV. และค่าดัชนีหักเหของแสงมีค่าเท่ากับ 2.01

Davood Raoufi and Taha Raoufi (2009) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนกระจกสไลด์ ด้วยวิธีโซล-เจล แบบหมุนเหวี่ยง โดยใช้ Zinc Acetate Dehydrate เป็นสารตั้งต้น ฟิล์มที่เตรียมได้ถูกอบที่อุณหภูมิในช่วง 300 - 500°C เป็นเวลา 1 ชม. ในบรรยากาศของอากาศ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าฟิล์มซิงก์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Wurtzite และมีการวางตัวของเกรนอยู่ตามแนวแกน c ของผลึก โดยฟิล์มจะมีการวางตัวในแนวแกน c ของผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบให้สูงขึ้น ฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเผาจะมีค่าการส่องผ่านแสงเฉลี่ยมากกว่า 80% ในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น มีค่าค่าแถบช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 3.26 - 3.28 eV

Sawaby, Selim, Marzouk, Mostafa, and Hosny (2010) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์บนแผ่นกระจกและกระจก ITO ด้วยวิธีโซล-เจล แบบจุ่มเคลือบ โดยใช้สาร Nickel Acetate Tetrahydrate เป็นสารตั้งต้น ฟิล์มนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมได้ถูกอบที่อุณหภูมิ 673K ถึง 733K เป็นเวลา 15 นาที ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าความเป็นผลึกของฟิล์มบางมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบสูงขึ้น โดยผลึกจะมีขนาด 69 ถึง 95Å ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM พบว่าขนาดเกรนผลึกนิกเกิลออกไซด์มีค่าอยู่ระหว่าง 8-158 nm ฟิล์มบาง

นิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะมีค่าการส่องผ่านแสงเฉลี่ยมากกว่า 75% ในช่วงความยาวคลื่น 250-2500 nm และคุณสมบัติทาง Electrochromic ของฟิล์มนิกเกิลออกไซด์ จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบจนมีค่าเป็น 693K และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้นเป็น 713K และ 733K

Shu-Yi Tsai (2011) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบาง NiO/ZnO ที่เคลือบบนแผ่นกระจกใสได้ ด้วยวิธี R.F. Magnetron Sputtering เพื่อสร้างเป็นรอยต่อพีเอ็น ที่มีลักษณะโปร่งใส โดยใช้เป้าสารเคลือบเป็นนิกเกิลออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% โดยใช้อัตราการไหลของแก๊ส Ar:O<sub>2</sub> ในระหว่างการเคลือบมีค่าสัดส่วนเป็น 100:6 ความดันรวมขณะเคลือบมีค่าเป็น 1.33 Pa กำลังไฟฟ้าที่ใช้เคลือบ 200 W และใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 10 นาที อุณหภูมิที่วัสดุรองรับมีค่าอยู่ในช่วง 30-45°C และอุณหภูมิในการอบ 350°C โดยฟิล์มจะมีความหนาอยู่ที่ 300 nm ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์มีความเป็นผลึกสูงและมีการวางตัวเป็น Preferred Orientation ตามแนวระนาบ (0002) ส่วนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์พบว่าเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (111) และ (220) ส่วนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์บนชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จะมีค่าการส่องผ่านแสงมากกว่า 80% ในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น นอกจากนี้ผลการศึกษาลักษณะของค่ากระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์บนชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ พบว่ามีลักษณะการนำกระแสแบบไดโอด โดยมีค่า Leakage Current ที่ต่ำสุดประมาณ  $6.64 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> เมื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้า Reverse Bias 1 V ให้กับฟิล์มบาง

Jlassi, Sta, Hajji, BenHaoua, and Ezzaouia (2014) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบาง NiO/ZnO ด้วยวิธี โชล-เจล แบบหมุนเหวี่ยง เพื่อสร้างเป็นรอยต่อพีเอ็น โดยอบฟิล์มบางภายใต้บรรยากาศของอากาศและแก๊สไนโตรเจน โดยผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบพหุผลึกที่มีเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สูงสุดที่ระนาบ (0 0 2) และเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์สูงสุดที่ระนาบ (2 0 0) ลักษณะพื้นผิวที่วิเคราะห์จากเทคนิค AFM พบขนาดเกรนของผลึกที่อบภายใต้บรรยากาศของอากาศมีค่าประมาณ 50 nm และขนาดเกรนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออบภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ส่วนผลทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง NiO/ZnO มีรูปแบบการนำไฟฟ้าแบบไดโอดที่อุณหภูมิในการอบ 600°C ในบรรยากาศของอากาศ

Cavas, Gupta, Al-Ghamdi, Omar, and Al-Hartomy (2012) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบาง NiO/ZnO ด้วยกระบวนการ โชล-เจล แบบหมุนเหวี่ยง ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM พบว่าฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์มีลักษณะเป็น Fibrous ในขณะที่ฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์มีพื้นผิวที่เรียบ ส่วนผลการส่องผ่านแสงของฟิล์มบาง NiO/ZnO มีค่าต่ำกว่า 75% ในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์มีค่าประมาณ 3.25 eV และ

3.89 eV. ส่วนผลทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง NiO/ZnO มีรูปแบบการนำไฟฟ้าแบบไดโอด โดยมีค่า Ideality Factor มีค่าเป็น 2.91 และ Barrier Height มีค่าเป็น 0.48 eV

Ohta, Kamiya, Kamiya, Hirano, and Hosono (2003) ได้ทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับแสงอัลตราไวโอเล็ตจากฟิล์มบาง ZnO/ NiO/ ITO บนวัสดุรองรับ Ytria-Stabilized Zirconia (YSZ 111) ด้วยวิธี Pulsed Laser Deposition พบว่าฟิล์มบาง NiO/ZnO มีรูปแบบการนำไฟฟ้าแบบไดโอด โดยมีค่า Ideality Factor มีค่าประมาณ 2 และค่า Forward Threshold Voltage ประมาณ 1 V ส่วนค่า photoresponsivity ของอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่เตรียมได้มีค่าสูงประมาณ 0.3 A/W เมื่อฉายแสงที่มีความยาวคลื่น 360 nm ภายใต้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบ Reverse Bias ที่มีค่าเป็น -6 V

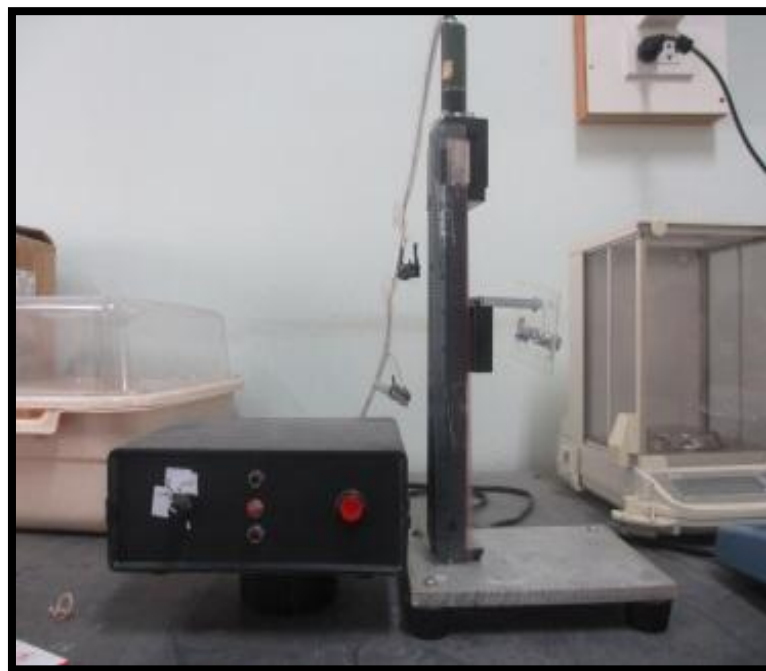
### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย รวมไปถึง ขั้นตอนและกระบวนการ การเตรียมฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ ด้วยวิธี โชล-เจด แบบจุ่มเคลือบ

#### อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องจุ่มเคลือบ (Dip Coating) ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางที่เตรียมด้วยวิธี โชล-เจด โดยทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 เครื่องจุ่มเคลือบ (Dip coating)

### วัสดุและอุปกรณ์

1. ปีกเกอร์
2. วัสดุรองรับ (Substrate) คือ กระจกเคลือบฟิล์ม Indium Tin Oxide (ITO)
3. เต้าเผา
4. เครื่อง Magnetic Stirrer
5. เครื่องชั่งมวลสาร
6. หลอดหยด
7. แท่งแก้วคนสาร
8. กระดาษลิทมัส

### สารเคมี

1. Nickel (II) Acetate Tetra Hydrate ( $\text{Ni}(\text{OCOCH}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )
2. Zinc Acetate Dehydrate ( $\text{Zn}(\text{O}_2\text{CCH}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2$ )
3. Isopropanol ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ )
4. Ethanolamine (MEA)
5. Nitric Acid ( $\text{HNO}_3$ )
6. 2-Methoxyethanol
7. Acetone
8. Distilled Water

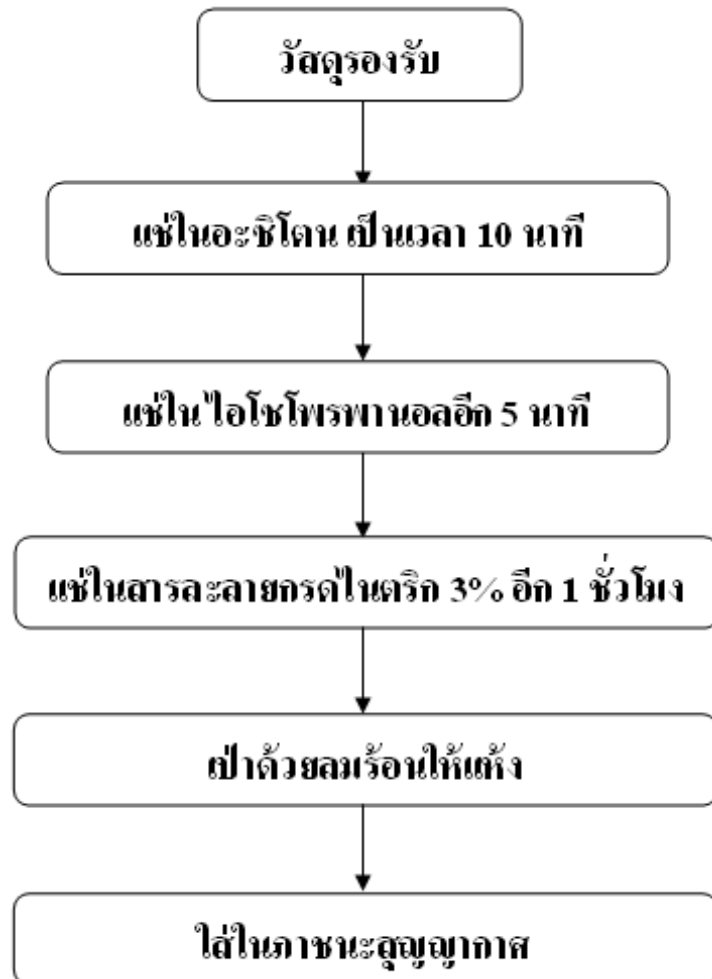
### วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ (1) การเตรียมวัสดุรองรับสำหรับเคลือบฟิล์มบาง (2) ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง (3) การศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### (1) การเตรียมวัสดุรองรับกระจก ITO สำหรับเคลือบฟิล์มบาง

สำหรับการทำความสะอาดวัสดุรองรับที่เป็นกระจก ITO เพื่อขจัดสิ่งสกปรก ได้แก่ คราบฝุ่น ไขมัน สารอินทรีย์ต่าง ๆ ออก ซึ่งจะทำให้ฟิล์มที่เคลือบยึดติดแน่นลงบนผิววัสดุรองรับ สำหรับการทำความสะอาดวัสดุรองรับจะเริ่มจากการนำวัสดุรองรับไปแช่ด้วยอะซิโตน เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปแช่ด้วยไอโซโพรพานอลอีก 5 นาที ขั้นตอนสุดท้ายก็นำไปแช่ในสารละลาย

กรดไนตริก 3% อีก 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำวัสดุรองรับขึ้นด้วยคีมคีบเป่าด้วยลมร้อนให้แห้งและนำไปเก็บในภาชนะสุญญากาศเพื่อรอการเคลือบดังแสดงในภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 ขั้นตอนการล้างวัสดุรองรับ

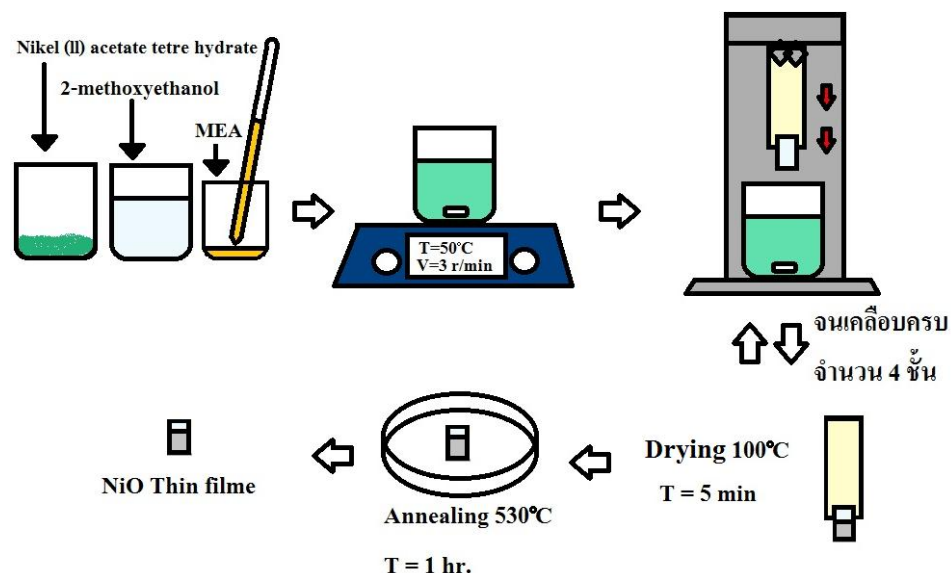
(2) ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง

ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 2.1) การเคลือบฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ 2.2) การเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 2.3) การเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



## 2.1) การเตรียมฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์

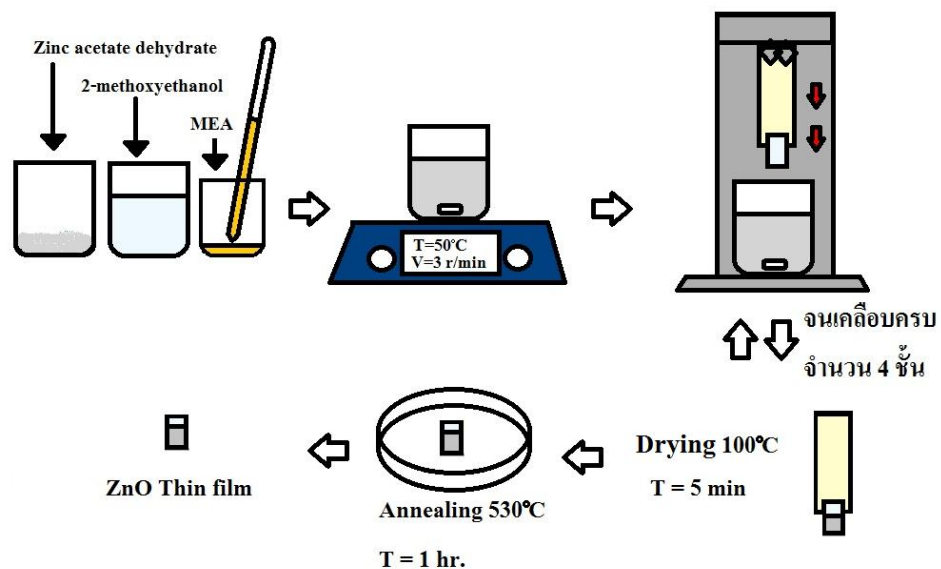
- 2.1.1 เตรียมสารตั้งต้น Nickel (II) Acetate Tetra Hydrate ปริมาณ 2.61 กรัม
- 2.1.2 เตรียมสารละลาย 2-Methoxyethanol ปริมาณ 30 มิลลิลิตร
- 2.1.3 เตรียมสาร MEA ปริมาณ 0.64 มิลลิลิตร
- 2.1.4 ผสมสาร Nickel (II) Acetate Tetra Hydrate, 2-Methoxyethanol และ MEA เข้าด้วยกันในบีเกอร์และคนสารละลายที่ผสมด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C จนสารละลายที่ได้มีลักษณะใสสีเขียวและเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2.1.5 ปิดเครื่อง Magnetic Stirrer พักให้สารละลายเย็นตัวลง
- 2.1.6 นำชิ้นงานที่เป็นกระจก ITO ที่เตรียมไว้ในหัวข้อ (1) มาทำการเคลือบในสารละลาย โดยใช้เครื่อง Dip Coating ด้วยความเร็วในการยกชิ้นงานขึ้นที่ 3 เมตร/นาที
- 2.1.7 นำชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบางไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ฟิล์มแห้ง หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มตามวิธี 2.1.6 ซ้ำจนครบ 4 ครั้ง แล้วนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 530°C จะได้ฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ โดยขั้นตอนการเตรียมฟิล์มจะแสดงในภาพที่ (3-3)



ภาพที่ 3-3 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์

## 2.2) การเตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์

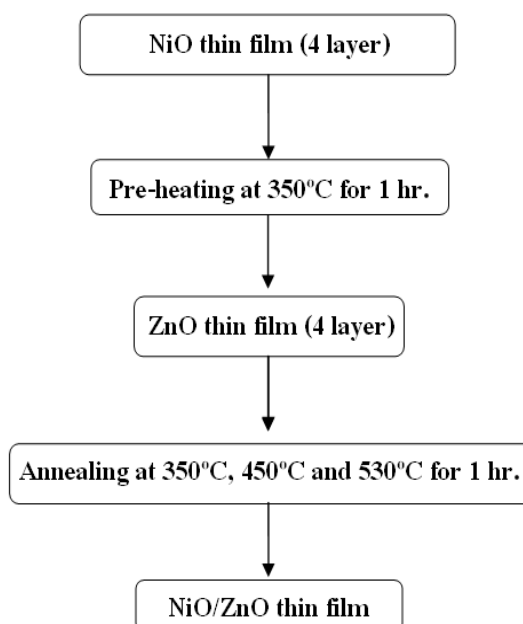
- 2.2.1 เตรียมสารตั้งต้น Zinc Acetate Dehydrate ปริมาณ 3.29 กรัม
- 2.2.2 เตรียมสารละลาย 2-Methoxyethanol ปริมาณ 30 มิลลิลิตร
- 2.2.3 เตรียมสาร MEA ปริมาณ 0.92 มิลลิลิตร
- 2.2.4 ผสมสาร Zinc Acetate Dehydrate, 2-Methoxyethanol และ MEA เข้าด้วยกัน ในบีเกอร์และคนสารละลายที่ผสมด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C จนสารละลายที่ได้มีลักษณะใสและเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2.2.5 ปิดเครื่อง Magnetic Stirrer พักให้สารละลายเย็นตัวลง
- 2.2.6 นำชิ้นงานที่เป็นกระจก ITO ที่เตรียมไว้ในหัวข้อ (1) มาทำการเคลือบในสารละลาย โดยใช้เครื่อง Dip Coating ด้วยความเร็วในการยกชิ้นงานขึ้นที่ 3 เมตร/นาที
- 2.2.7 นำชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบางไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ฟิล์มแห้ง หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มตามวิธี 2.2.6 ซ้ำจนครบ 4 ครั้ง แล้วนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 530°C จะได้ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์มา โดยขั้นตอนการเตรียมฟิล์มจะแสดงในภาพที่ (3-4)



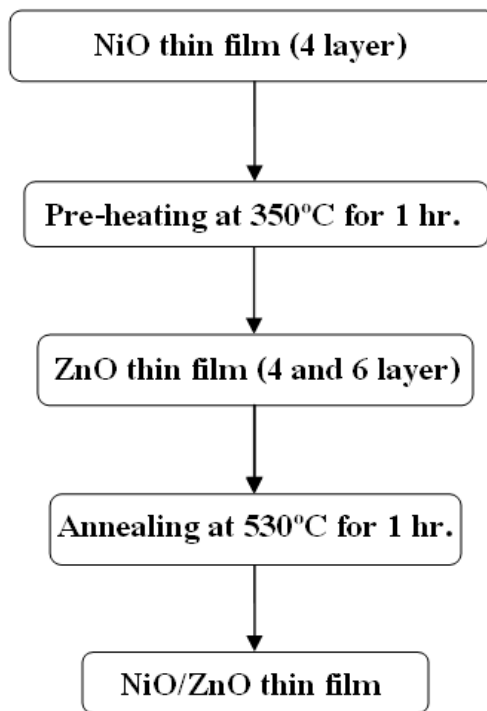
ภาพที่ 3-4 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์

### 2.3) การเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์

- 2.3.1 เตรียมสารละลายนิกเกิลออกไซด์และเคลือบฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์บนกระจก ITO ตามหัวข้อ 2.1) โดยทำการเคลือบฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์จำนวน 4 ชั้น และนำฟิล์มบางที่เคลือบได้ไปอบที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 1 ชม.
- 2.3.2 เตรียมสารละลายซิงก์ออกไซด์ตามหัวข้อ 2.2) ทำการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนกระจก ITO ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่ได้จากการเตรียมในหัวข้อ 2.3.1 โดยทำการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จำนวน 4 ชั้น
- 2.3.3 หลังจากทีนั้น นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน โดยใช้ อุณหภูมิในการอบที่ 350°C, 450°C และ 530°C เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบที่มีผลต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ โดยขั้นตอนการเตรียมฟิล์มจะแสดงในภาพที่ (3-5)
- 2.3.4 เตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ โดยกำหนดให้จำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็น 4 ชั้นและ 6 ชั้น และนำไปอบที่อุณหภูมิ 530°C เท่ากัน เพื่อศึกษาผลของจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่มีผลต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์โดยขั้นตอนการเตรียมฟิล์มจะแสดงในภาพที่ (3-6)



ภาพที่ 3-5 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 3-6 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน

### (3) การศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

เครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางทั้งหมดที่เตรียมได้ในวิทยานิพนธ์นี้มีดังนี้

1. X-Ray Diffractometer สำหรับศึกษาโครงสร้างผลึก ของงานวิจัย โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer Bruker รุ่น D8 และใช้  $\text{Cu-K}\alpha$  ( $\lambda = 1.54056\text{\AA}$ ) ซึ่งมีการทดลองที่คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) สำหรับศึกษาความหนาและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง ซึ่งมีการทดลองที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) สำนักงานบางน้ำเปรี้ยว อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา
3. UV-Vis Spectrophotometer สำหรับศึกษาคุณสมบัติทางแสงที่ความยาวคลื่นระหว่าง 190-1000 nm ซึ่งทำการทดลองที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
4. I-V Source Meter สำหรับศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ของงานวิจัยนี้โดยใช้เครื่อง Source Meter รุ่น KEITHLEY 2401 ซึ่งทดลองที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

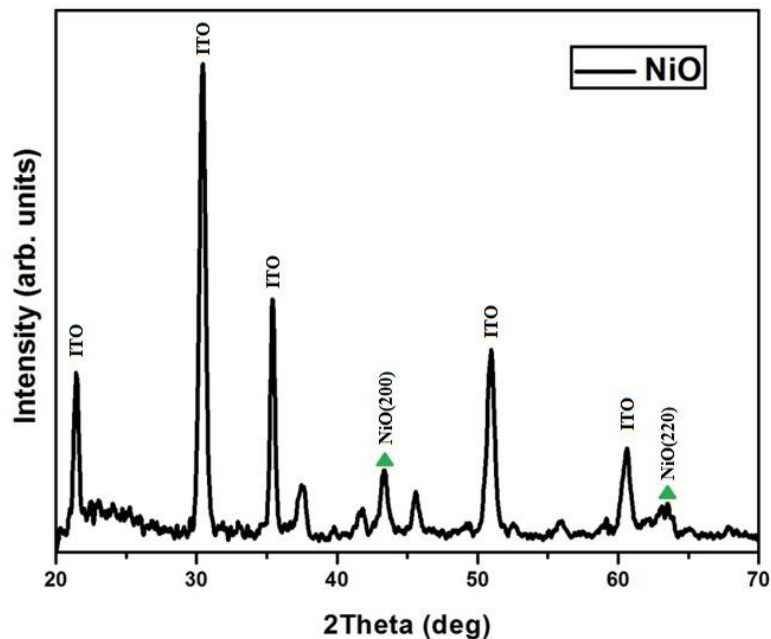
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้เป็นผลการศึกษาคือการเคลือบฟิล์มบางที่ผู้วิจัยได้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ผลการศึกษาฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ ผลการศึกษาฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และผลการศึกษาฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิในการอบและจำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

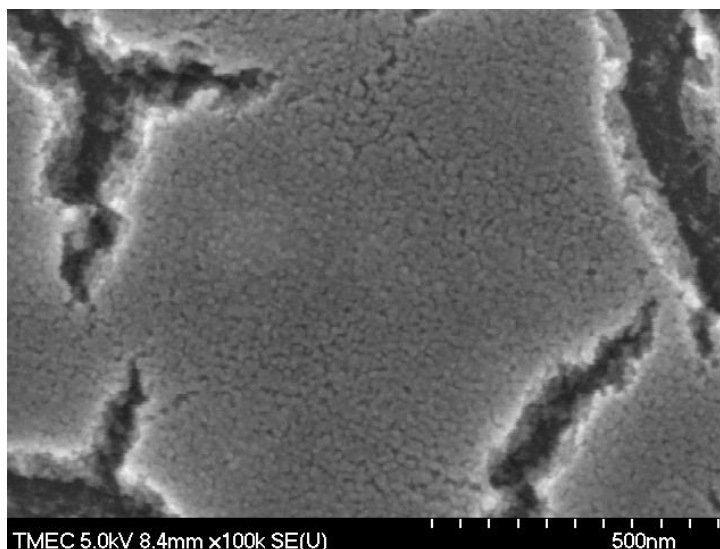
#### ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์

ภาพที่ 4-1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่เคลือบทับบนวัสดุรองรับกระจก ITO และอบฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 530°C พบพิกที่มีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $43.1^\circ$  และ  $63.22^\circ$  ซึ่งเป็นมุมของระนาบ (2 0 0) และ (2 2 0) ของนิกเกิลออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งอ้างอิงจากฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 47-1049 โดยฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นพหุผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบ face Center Cubic



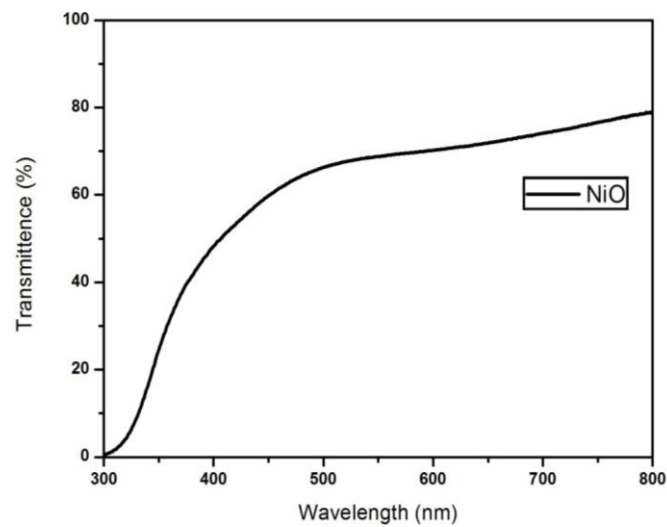
ภาพที่ 4-1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์

ภาพที่ 4-2 แสดงลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FE-SEM พบว่าพื้นผิวฟิล์มมีลักษณะเรียบ ขนาดเกรนของผลึกมีค่าเฉลี่ยประมาณ 20 นาโนเมตร กระจายตัวอยู่ทั่วพื้นผิวฟิล์ม



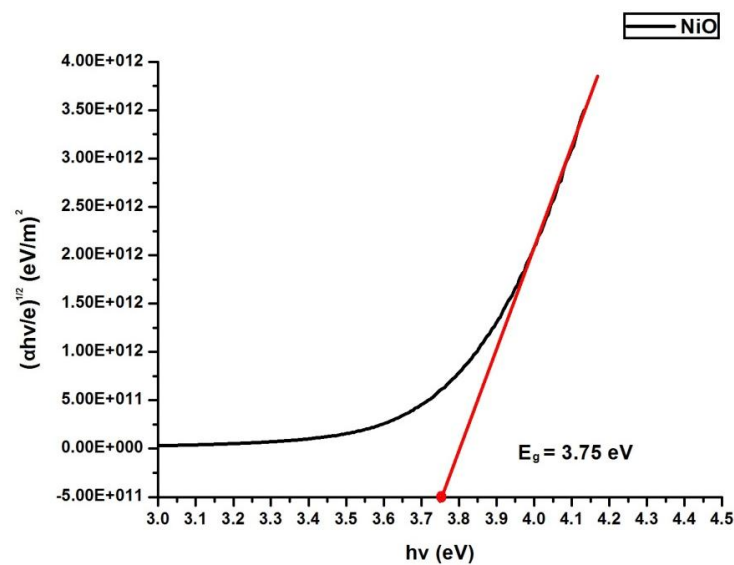
ภาพที่ 4-2 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FE-SEM โดยมีความเข้มข้น 0.35 M.และเผาที่อุณหภูมิ 530°C

ภาพที่ 4-3 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ในช่วงความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตร จะพบว่าในช่วงความยาวคลื่น 300-400 นาโนเมตร จะมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและในช่วงความยาวคลื่น 450 -800 นาโนเมตร พบว่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์จะสูงกว่า 65% โดยมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่สูงสุด มีค่าประมาณ 80% ที่ความยาวคลื่น 800 นาโนเมตร



ภาพที่ 4-3 เปอร์เซ็นการส่องผ่านแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตาสามารถมองเห็นของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์

ภาพที่ 4-4 กราฟแสดงค่าแถบพลังงานของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ ที่คำนวณจากค่าการส่องผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 – 800 นาโนเมตร พบว่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางมีค่า 3.75 eV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีอื่น (Ohta, Kamiya, Kamiya, Hirano, & Hosono, 2003)

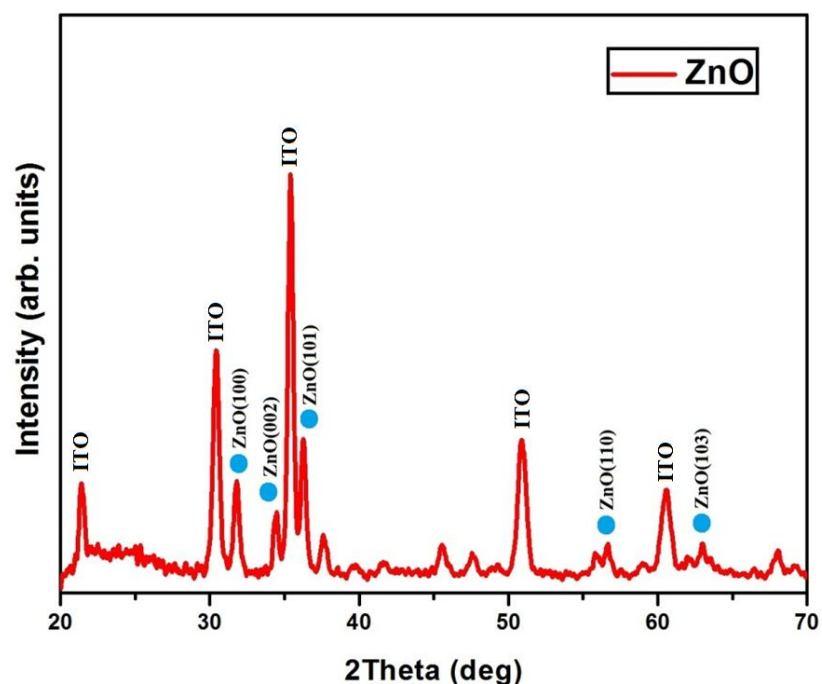


ภาพที่ 4-4 ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์



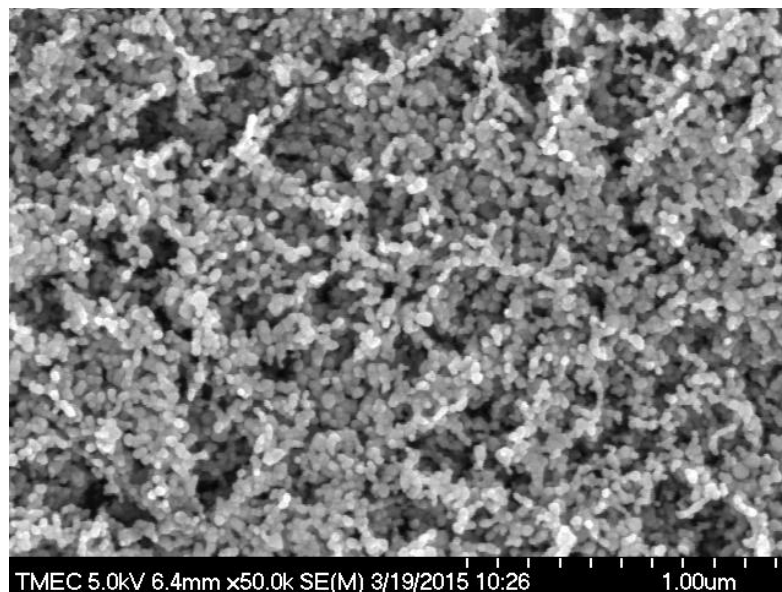
### ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์

ภาพที่ 4-5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนวัสดุรองรับกระจก ITO และอบฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 530°C พบพีกที่มีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $31.78^\circ$ ,  $34.42^\circ$ ,  $36.24^\circ$ ,  $56.54^\circ$  และ  $62.92^\circ$  ซึ่งเป็นมุมของระนาบผลึก (1 0 0), (0 0 2), (1 0 1), (1 1 0) และ (1 0 3) ของซิงก์ออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งอ้างอิงจากฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 36-1451 โดยฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นพหุผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite Hexagonal



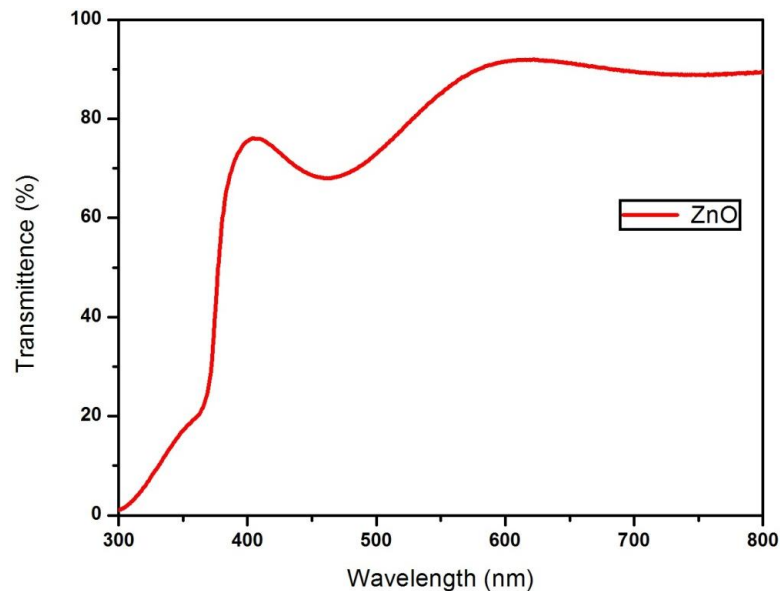
ภาพที่ 4-5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์

ภาพที่ 4-6 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FE-SEM พบว่าลักษณะผลึกของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์มีลักษณะเป็นก้อนซ้อนทับกันและมีขนาดเกรนของผลึกมีค่าเฉลี่ยประมาณ 30 นาโนเมตร กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวฟิล์ม



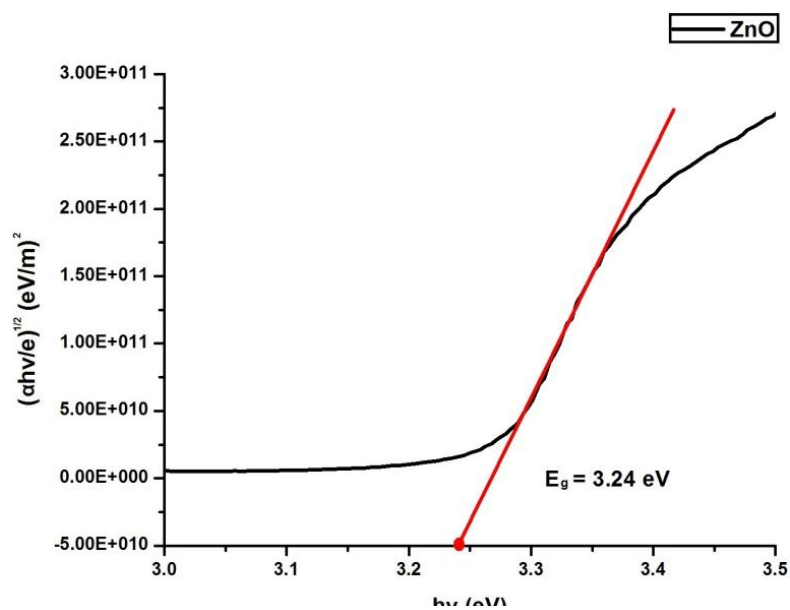
ภาพที่ 4-6 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีโซล-เจล

ภาพที่ 4-7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ในช่วงความยาวคลื่นในช่วง 300-800 นาโนเมตร จะพบว่าในช่วงความยาวคลื่น 300 – 400 นาโนเมตร มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อให้ความยาวคลื่นมากขึ้นและในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 600 นาโนเมตร เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์มีค่ามากกว่า 80% ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วง 400 – 800 นาโนเมตร มีลักษณะคล้ายการกระเพื่อมของคลื่น โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไปตลอดช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็นเป็นผลจากการแทรกสอดของแสงที่ผ่านชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจก ITO



ภาพที่ 4-7 การส่องผ่านแสงช่วงที่ตาสามารถมองเห็นได้ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์

ภาพที่ 4-8 แสดงค่าแถบพลังงานของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่คำนวณจากผลของค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ในช่วงความยาวคลื่น 300 – 800 นาโนเมตร พบว่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์มีค่า 3.24 eV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีอื่น (Ohta, Kamiya, Kamiya, Hirano, & Hosono, 2003)



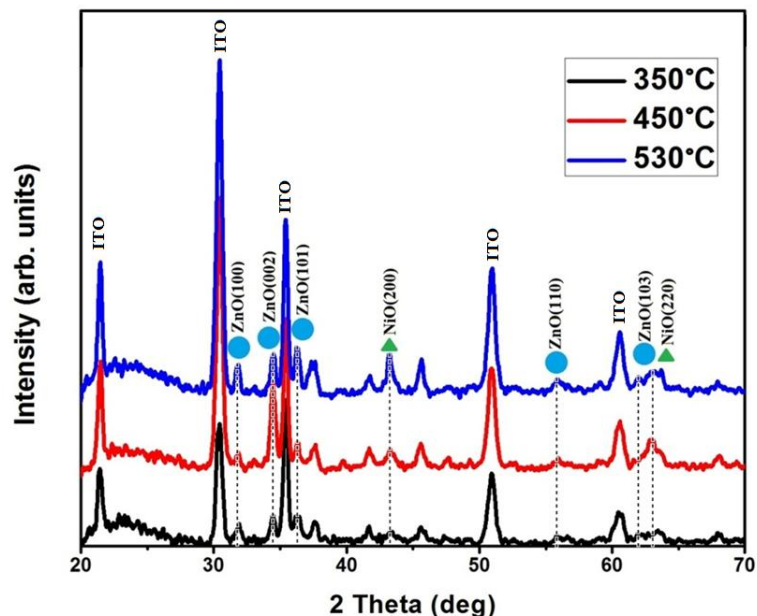
ภาพที่ 4-8 ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์

## ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ภายใต้อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน

ในรูปที่ 4-9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่เคลือบทับบนวัสดุรองรับกระจก ITO และอบฟิล์มบางที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน ผลการวัดพบพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นในช่วงมุม  $2\theta$  ตั้งแต่  $30-65^\circ$  โดยระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซิงก์ออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมได้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ แสดงถึงฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบพหุผลึก

โดยฟิล์มบางที่ทำการอบในอุณหภูมิ  $350^\circ\text{C}$  พบพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ แต่ไม่พบพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิ  $350^\circ\text{C}$  มีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐาน (Amorphous) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบฟิล์มบางสูงขึ้นเป็น  $450^\circ\text{C}$  และ  $530^\circ\text{C}$  พีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และซิงก์ออกไซด์มีลักษณะพีคที่เด่นชัดมากขึ้นแสดงถึงความเป็นผลึกของฟิล์มบางที่เพิ่มสูงขึ้น

สำหรับค่าขนาดผลึกของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน สามารถคำนวณได้จากสมการของ Scherrer ที่ใช้ผลของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซิงก์ออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ แสดงในตารางที่ 4-1 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการอบเพิ่มสูงขึ้นขนาดของผลึกของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิในการอบ  $530^\circ\text{C}$  ขนาดผลึกของซิงก์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ 24 นาโนเมตร ส่วนขนาดผลึกของนิกเกิลออกไซด์มีค่าเท่ากับ 12 นาโนเมตร



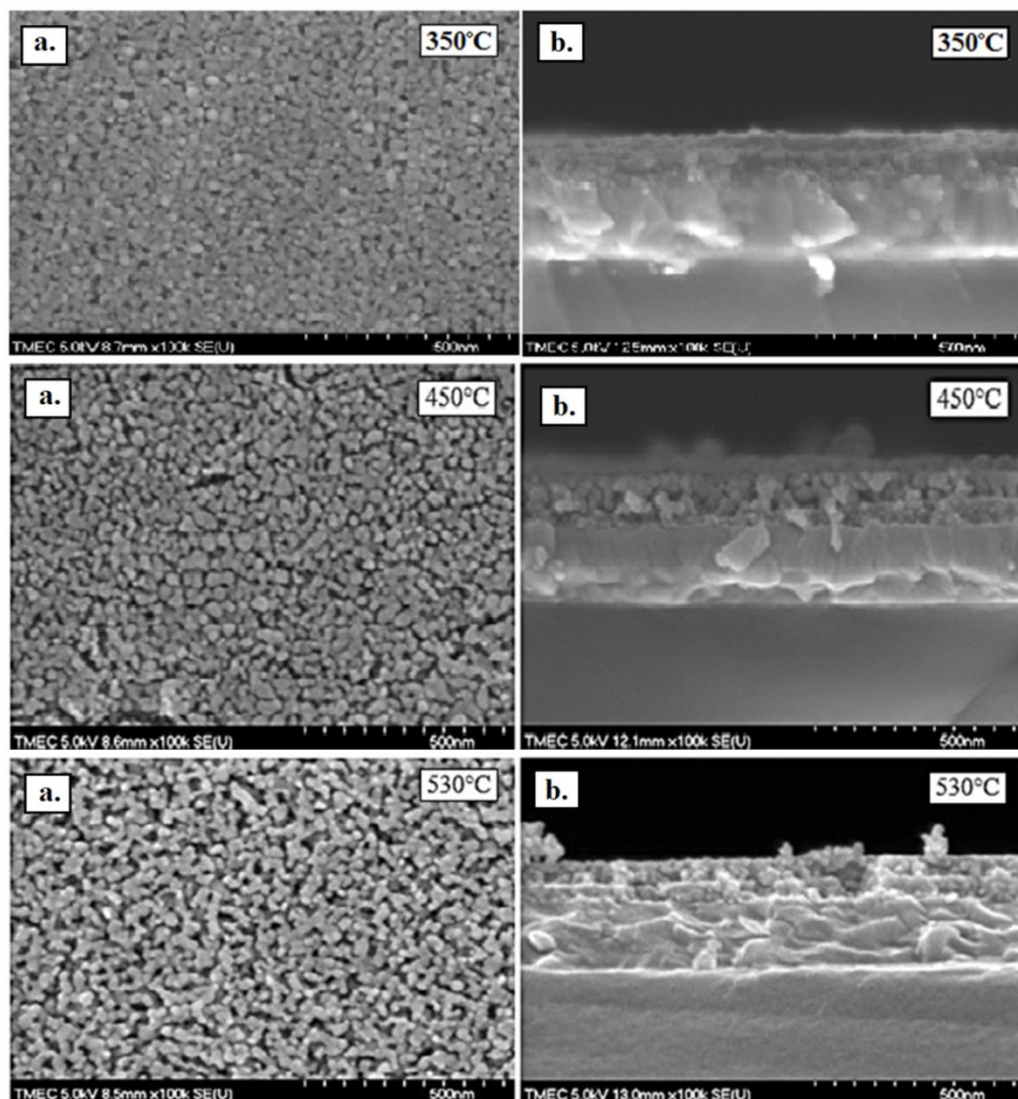
ภาพที่ 4-9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4-1 ขนาดผลึกนิกเกิลออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิในการอบ	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	
	นิกเกิลออกไซด์	ซิงก์ออกไซด์
350°C	-	16
450°C	11	19
530°C	12	24

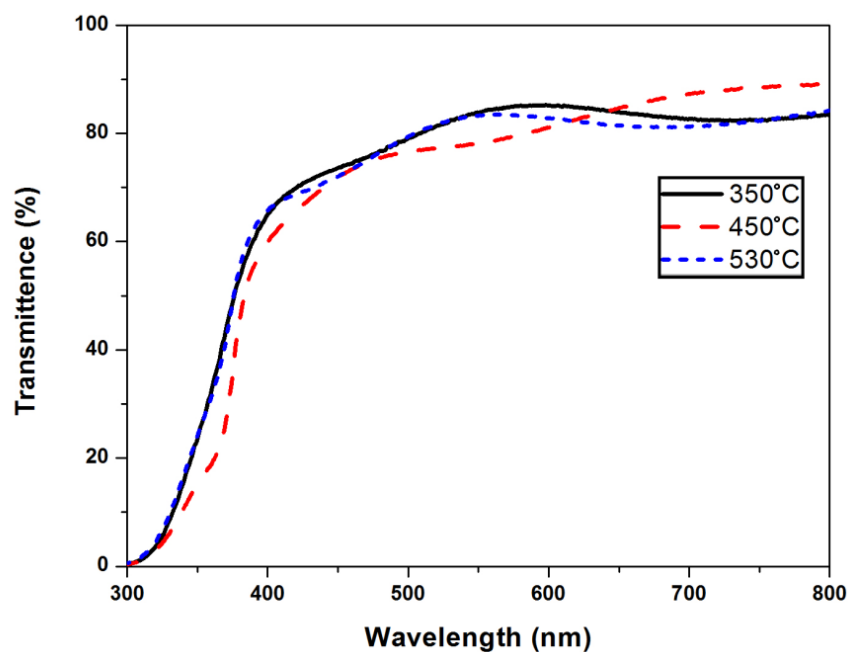
ภาพที่ 4-10a แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน พบว่าขนาดเกรนของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่อบที่อุณหภูมิ 350°C มีลักษณะเกรนขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกัน โดยมีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 30 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบฟิล์มบางสูงขึ้นขนาดเกรนของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นและพบการรวมตัวของเกรนมากขึ้น

ภาพที่ 4-10b แสดงลักษณะพื้นผิวภาพตัดขวาง (Cross Section) ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน พบว่ามีลักษณะการแบ่งชั้นที่ชัดเจนระหว่างวัสดุรองรับกระจก ITO ฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ โดยค่าความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน มีค่าความหนาที่ไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าประมาณ 100 นาโนเมตร



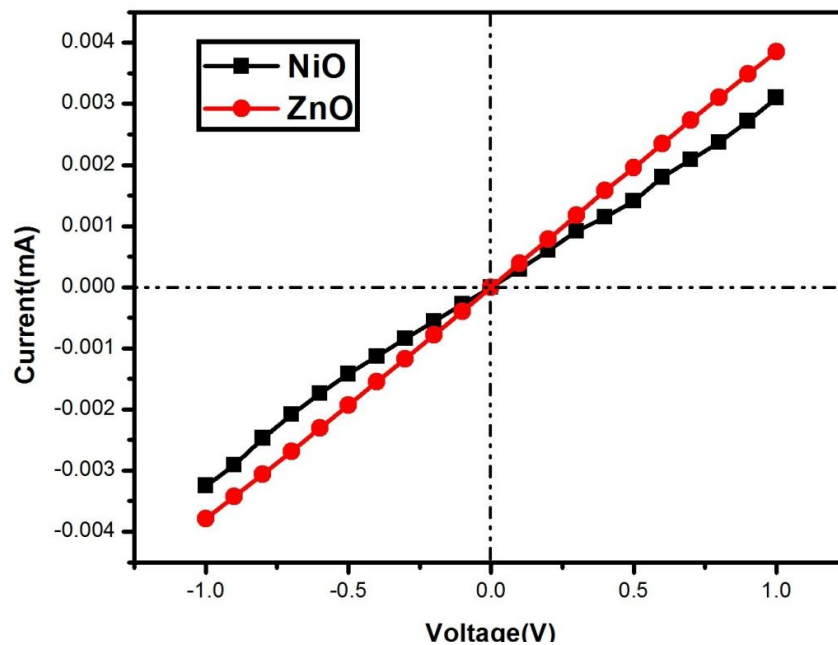
ภาพที่ 4-10 a. ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนชั้นฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน  
b. ลักษณะพื้นผิวของภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน

ผลค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่ภายใต้ อุณหภูมิในการอบ 350-530°C แสดงในภาพที่ 4-11 ผลการวัดพบว่าในช่วงความยาวคลื่น 300 – 800 นาโนเมตร ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อบใน อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน มีลักษณะที่คล้ายกัน โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูงกว่า 70% ในช่วงความยาวคลื่น 400 – 800 นาโนเมตร และมีลักษณะคล้ายการกระเพื่อมของคลื่น โดยที่ ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไปตลอดช่วงความยาวคลื่นแสงที่ ตามองเห็นเป็นผลจากการแทรกสอดของแสงที่ผ่านชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ที่ เคลือบบนวัสดุรองรับกระจก ITO



ภาพที่ 4-11 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงช่วงที่ตาสามารถมองเห็นได้ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน

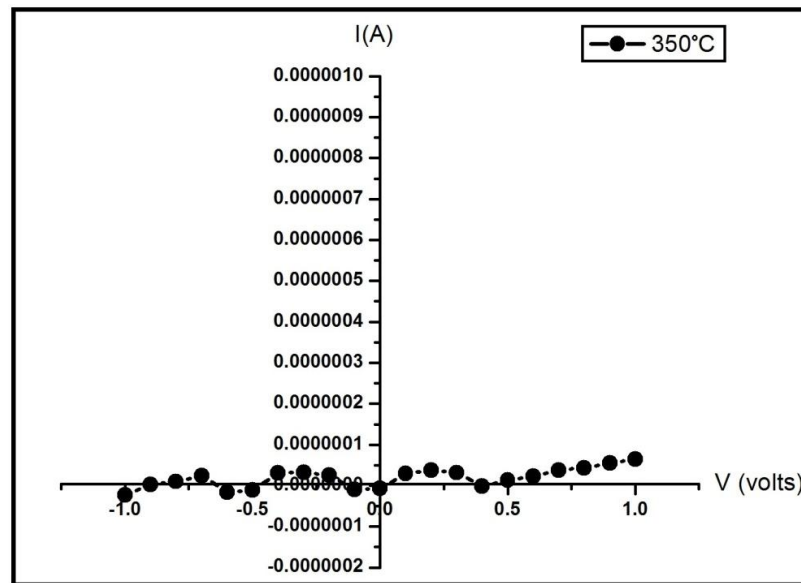
ภาพที่ 4-12 แสดงค่าความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบบนวัสดุรองรับ ITO ผลพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยไม่พบลักษณะความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบไดโอด แสดงถึงฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบบนชั้นฟิล์มบาง ITO ไม่แสดงคุณสมบัติของรอยต่อพีเอ็น



ภาพที่ 4-12 ลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์

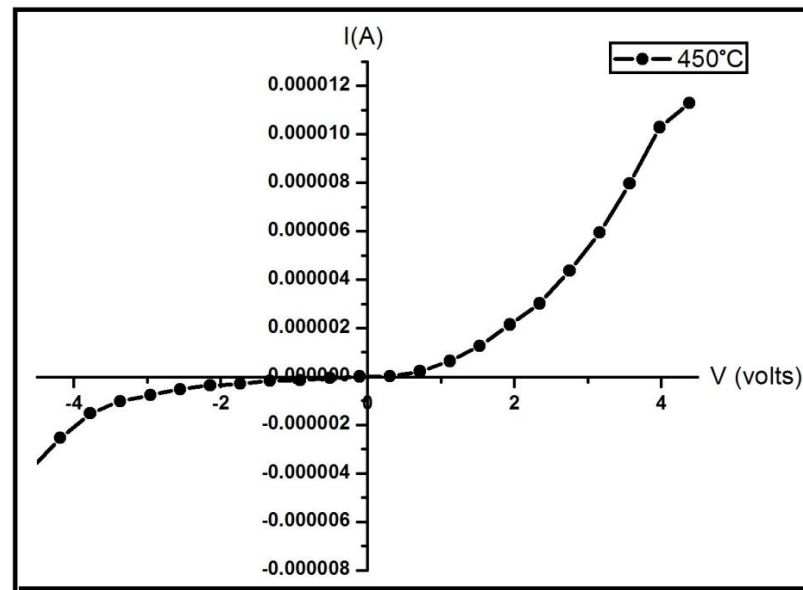
ภาพที่ 4-13 แสดงลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อบในอุณหภูมิ 350°C โดยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าไบแอส (bias voltages) จาก +1.0 โวลต์ ไปถึง -1.0 โวลต์ พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่มีค่าน้อยกว่า  $1 \times 10^{-7}$  แอมแปร์ ตลอดช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไบแอส โดยผลของค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบ 350°C ไม่มีลักษณะกราฟกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแบบไดโอดแสดงให้เห็นว่ารอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ไม่เกิดเป็นรอยต่อพีเอ็น ซึ่งน่าจะเกิดจากฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่อบที่อุณหภูมิ 350°C มีโครงสร้างผลึกแบบออสถุฐานทำให้มีลักษณะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่ไม่ดี





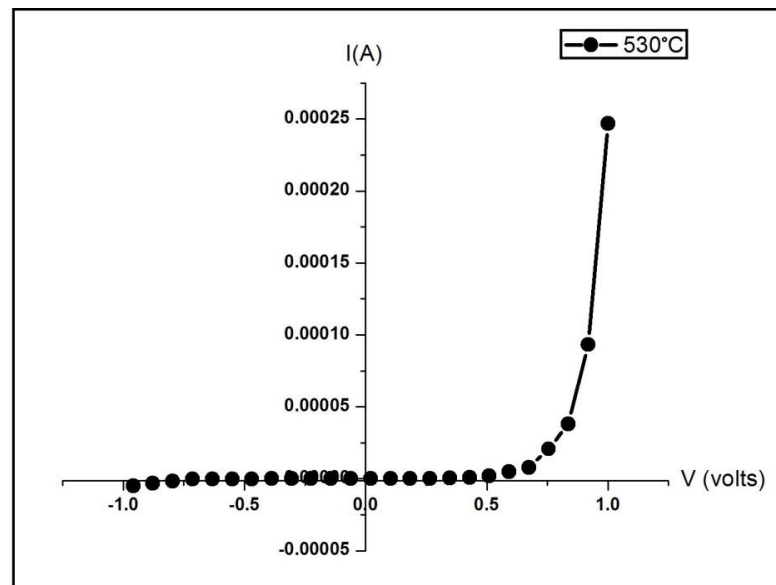
ภาพที่ 4-13 ลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บน นิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบ  $350^{\circ}\text{C}$

ภาพที่ 4-14 แสดงลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}\text{C}$  โดยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าไบแอสจาก  $+4.0$  โวลต์ ไปถึง  $-4.0$  โวลต์ พบว่าความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่ความต่างศักย์  $-4.0$  โวลต์ ถึง  $+0.5$  โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าน้อยมาก ซึ่งมีค่าไม่เกิน  $2 \times 10^{-6}$  แอมแปร์ และค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความต่างศักย์มากกว่า  $1$  โวลต์ โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดประมาณ  $1.1 \times 10^{-5}$  แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์  $5.0$  โวลต์ โดยค่าแรงดันทรานซิชัน (Threshold Voltage) ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์จะมีค่าประมาณ  $0.6$  โวลต์ ซึ่งลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่วัดได้มีลักษณะการนำไฟฟ้าแบบไดโอดแสดงให้เห็นว่ารอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เกิดเป็นรอยต่อพีเอ็นเกิดขึ้น



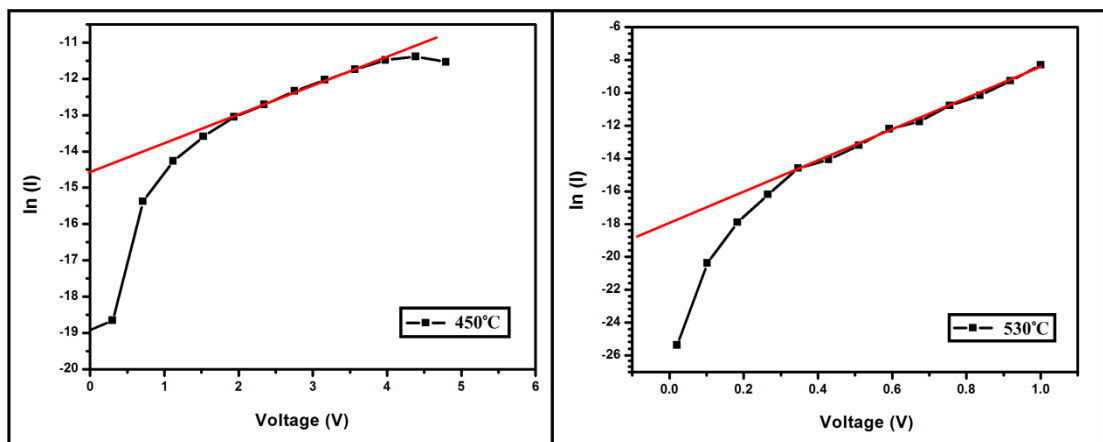
ภาพที่ 4-14 ลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บน นิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบ 450°C

ภาพที่ 4-15 แสดงลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิ 530°C โดยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าไบแอสจาก +1.0 โวลต์ ไปถึง -1.0 โวลต์ พบว่าความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่ความต่างศักย์ -1.0 โวลต์ ถึง +0.5 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าน้อยมาก ซึ่งมีค่าไม่เกิน  $5 \times 10^{-5}$  แอมแปร์ และค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความต่างศักย์มากกว่า 0.5 โวลต์ โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดประมาณ  $2.5 \times 10^{-4}$  แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ โดยค่าแรงดันเทรชโฮลด์ (Threshold Voltage) ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์จะมีค่าประมาณ 0.6 โวลต์ ซึ่งลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่วัดได้จะมีลักษณะการนำไฟฟ้าแบบไดโอดแสดงให้เห็นว่ารอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เกิดเป็นรอยต่อพีเอ็นเกิดขึ้น



ภาพที่ 4-15 ลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บน  
นิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบ 530°C

จากข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บน  
นิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน สามารถนำไปหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัว ( $I_s$ ) ที่  
ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็น โดยใช้ความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อยู่ใน  
รูปของค่า  $\ln I$  และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามสมการที่ (2.21) ซึ่งค่ากระแส  $I_s$  สามารถคำนวณได้จาก  
ค่า  $\ln I_s$  ที่ได้จากการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I$   
กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในตำแหน่งที่ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็น 0 โวลต์ ภาพที่ 4-16 แสดงกราฟ  
ความสัมพันธ์ของค่า  $\ln I$  และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่  
อบที่อุณหภูมิ 450°C และ 530°C โดยการหาค่า  $\ln I_s$  ได้จากการลากกราฟเส้นตรงผ่านเส้นกราฟ  
ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I$  กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงที่มีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น ไป  
ตัดแกน  $\ln I$  ที่ค่าความต่างศักย์มีค่าเป็น 0 โวลต์ ซึ่งค่า  $\ln I_s$  ของฟิล์มบางที่อบที่อุณหภูมิ 450°C และ  
530°C มีค่าเป็น -14.5 และ -18 ตามลำดับ จากนั้นนำค่า  $\ln I_s$  ที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่า  $I_s$  ต่อไป โดย  
ผลการคำนวณค่า  $\ln I_s$  และค่า  $I_s$  ของฟิล์มบางที่อบที่อุณหภูมิ 450°C และ 530°C แสดงในตารางที่  
4-2 ซึ่งพบว่าค่า  $I_s$  ของฟิล์มบางที่อบที่อุณหภูมิ 450°C มีค่าประมาณ 504 นาโนแอมแปร์ ส่วนค่า  $I_s$   
ของฟิล์มบางที่อบที่อุณหภูมิ 530°C มีค่าประมาณ 4 นาโนแอมแปร์



ภาพที่ 4-16 กราฟ  $\ln I$  กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบ 450°C และ 530°C

ตารางที่ 4-2 แสดงค่ากระแสอิ่มตัว ( $I_s$ ) ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบ 450°C และ 530°C

ซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน	$\ln I_s$	$I_s$ (นาโนแอมแปร์)
450°C	-14.5	504
530°C	-19.3	4

ส่วนค่า Ideality Factor ( $n$ ) สามารถหาค่าได้จากค่าความชัน (Slop) ของกราฟเส้นตรงที่ใช้หาค่า  $\ln I_s$  ที่แสดงในภาพที่ 4-16 ซึ่งความชันของเส้นกราฟที่ได้จะมีค่าเท่ากับ  $\frac{q}{nkT}$  โดยตารางที่ 4-3 แสดงค่าความชันของเส้นกราฟกับค่า  $n$  ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิ 450°C และ 530°C

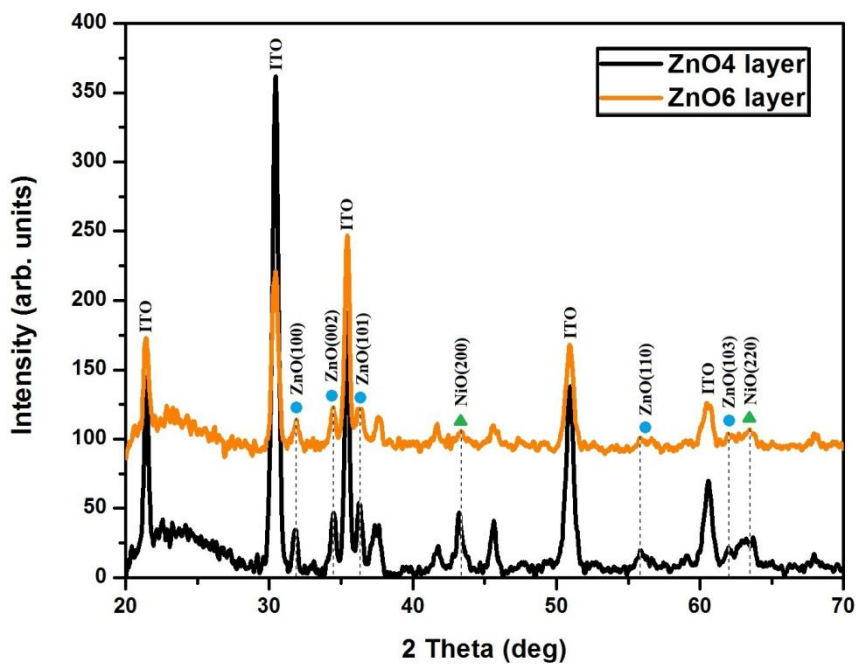
ตารางที่ 4-3 แสดงค่าความชันของเส้นกราฟ  $\ln I$  กับความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่า  $n$  ของฟิล์มบางที่อบที่อุณหภูมิ 450°C และ 530°C

ซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกัน	ค่าความชัน (C/J)	$n$
450°C	1.25	22.68
530°C	11.20	2.54

### ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อุณหภูมิในการอบ 530°C ภายใต้จำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน

ในรูปที่ 4-17 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่เคลือบทับบนวัสดุรองรับกระจก ITO ที่อุณหภูมิในการอบ 530°C และมีจำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็น 4 ชั้นและ 6 ชั้น ผลการวัดพบผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นในช่วงมุม  $2\theta$  ตั้งแต่ 30-65° โดยระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซิงก์ออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมในหัวข้อก่อนหน้านี้ แสดงถึงฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกแบบพหุผลึก โดยโครงสร้างผลึกของนิกเกิลออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบ Face Center Cubic และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite Hexagonal

โดยค่าขนาดผลึกของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่เคลือบภายใต้เงื่อนไขจำนวนชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็น 4 ชั้นและ 6 ชั้น ที่คำนวณได้จากสมการของ Seberry โดยใช้ผลของผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซิงก์ออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ แสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าขนาดผลึกของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์มีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยจำนวนชั้นที่เคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 6 ชั้นมีค่าขนาดผลึกของซิงก์ออกไซด์เท่ากับ 22 นาโนเมตร ส่วนขนาดผลึกของนิกเกิลออกไซด์มีค่าเท่ากับ 18 นาโนเมตร



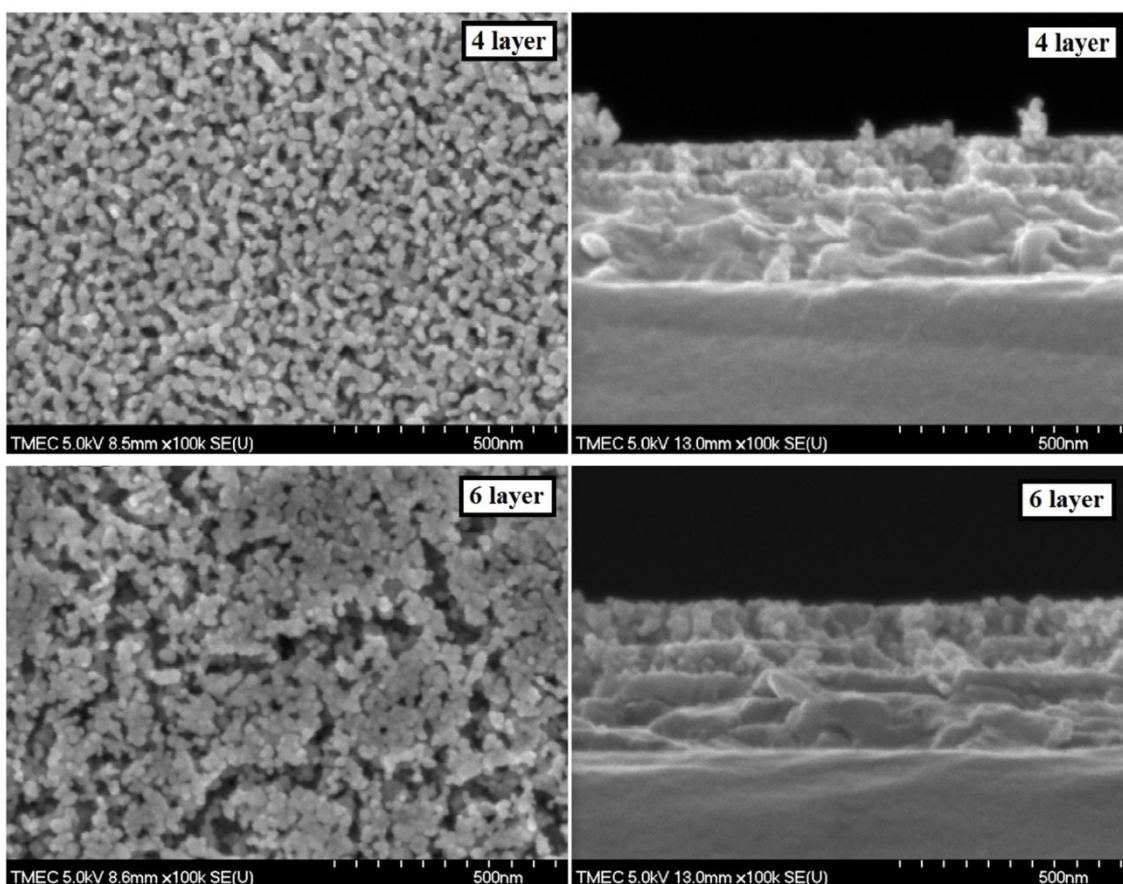
ภาพที่ 4-17 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4-4 ขนาดผลึกนิกเกิลออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน

จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	
	นิกเกิลออกไซด์	ซิงก์ออกไซด์
4 ชั้น	12	24
6 ชั้น	18	28

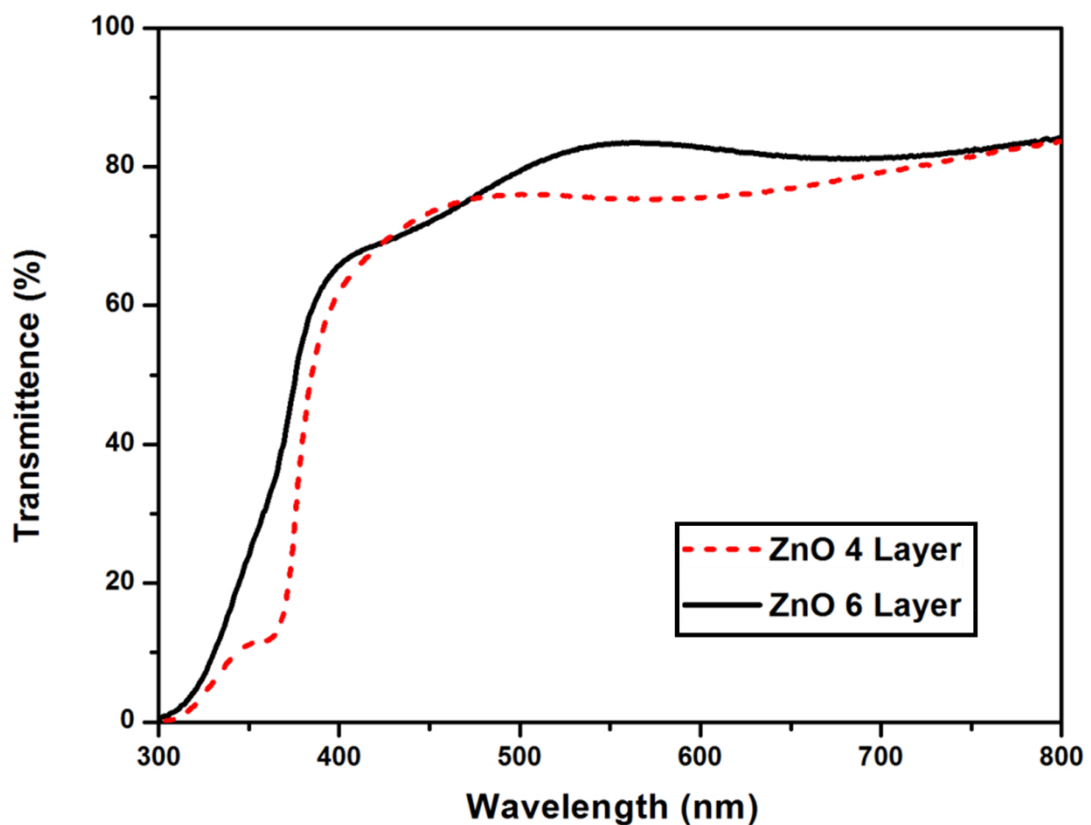
ภาพที่ 4-18a แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 6 ชั้นและ 4 ชั้น พบว่าเมื่อขนาดเกรนของซิงก์จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ขนาดเกรนของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นและพบการรวมตัวกันของเกรนมากขึ้นรวมทั้งลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีค่าความหยาบที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย

ภาพที่ 4-18b แสดงลักษณะพื้นผิวภาพตัดขวาง (Cross Section) ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 6 ชั้นและ 4 ชั้น พบว่ามีลักษณะการแบ่งชั้นที่ชัดเจนระหว่างวัสดุรองรับกระจก ITO ฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ โดยฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 6 ชั้นมีค่าความหนามากกว่าฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้น โดยมีค่าประมาณ 120 นาโนเมตร



ภาพที่ 4-18 a. ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนชั้นฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน  
b. ลักษณะพื้นผิวของภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนชั้นฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน

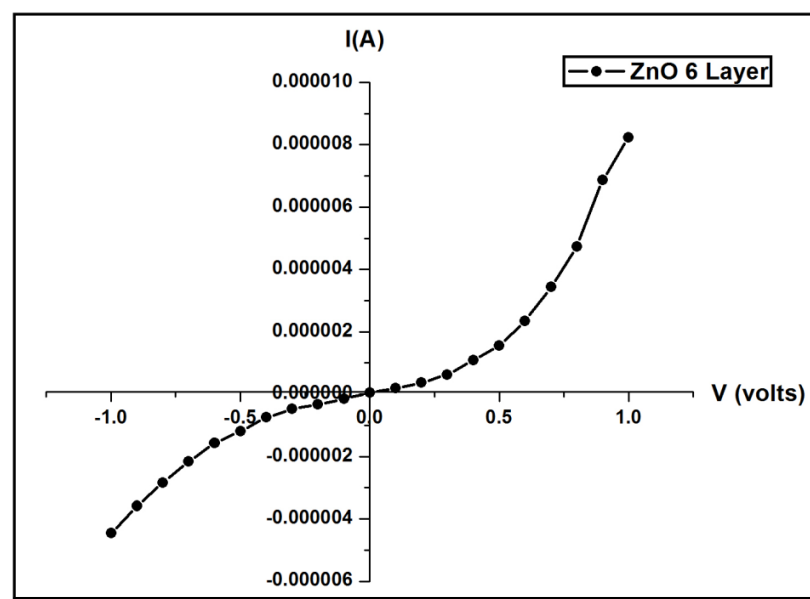
ผลค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ภายใต้จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้นและ 6 ชั้นแสดงในภาพที่ 4-19 ผลการวัดพบว่าในช่วงความยาวคลื่น 300 – 800 นาโนเมตร ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ภายใต้จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้นและ 6 ชั้นมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูงกว่า 70% ในช่วงความยาวคลื่น 400 – 800 นาโนเมตร และมีลักษณะคล้ายการกระเพื่อมของคลื่น โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไปตลอดช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็นเป็นผลจากการแทรกสอดของแสงที่ผ่านชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ที่เคลือบบนวัสดุรองรับกระจก ITO



ภาพที่ 4-19 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงช่วงที่ตาสามารถมองเห็นได้ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนชั้นฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน

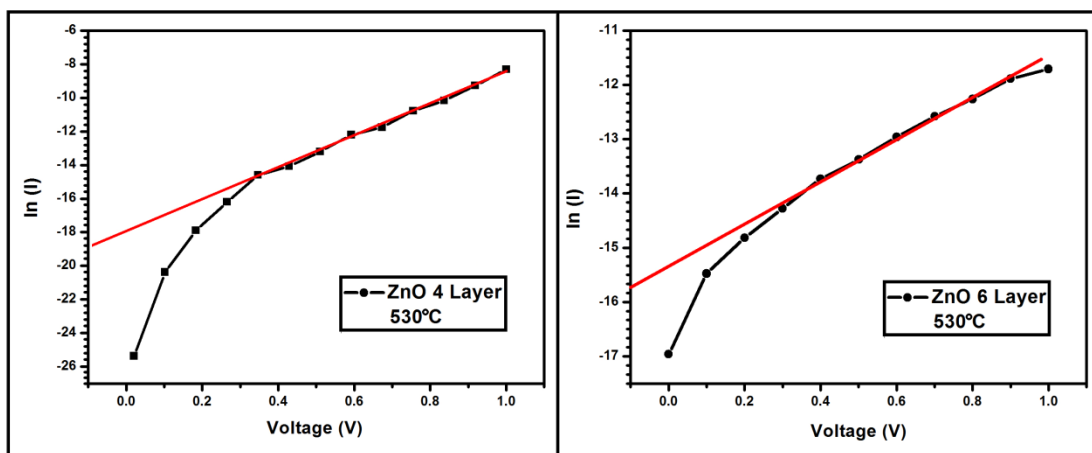


ภาพที่ 4-20 แสดงลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ภายใต้จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้นและ 6 ชั้น โดยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าไบแอส (Bias Voltages) จาก -1.0 โวลต์ ไปถึง +1.0 โวลต์ พบว่า ความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่ความต่างศักย์ -0.5 โวลต์ ถึง +0.5 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าน้อยมาก ซึ่งมีค่าไม่เกิน  $2 \times 10^{-6}$  แอมแปร์ และค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความต่างศักย์มากกว่า 0.5 โวลต์ โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดประมาณ  $8 \times 10^{-6}$  แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ 1 โวลต์ โดยค่าแรงดันเทอร์ชโฮลด์ (Threshold Voltage) ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์จะมีค่าประมาณ 0.25 โวลต์ ซึ่งลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่วัดได้จะมีลักษณะการนำไฟฟ้าแบบไดโอดแสดงให้เห็นว่ารอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เกิดเป็นรอยต่อพีเอ็นเกิดขึ้น



ภาพที่ 4-20 ลักษณะค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่ความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 6 ชั้น

จากข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บน  
 นิกเกิลออกไซด์ภายใต้จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้นและ 6 ชั้น จะใช้ในการหาค่า  
 กระแสไฟฟ้าอิ่มตัว ( $I_s$ ) โดยภาพที่ 4-21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่า  $\ln I$  และความ  
 ต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ภายใต้จำนวนชั้นของฟิล์มบาง  
 ซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้นและ 6 ชั้น ซึ่งค่า  $\ln I_s$  ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้นและ 6 ชั้น มีค่าเป็น -19.3  
 และ -15.7 ตามลำดับ จากนั้นนำค่า  $\ln I_s$  ที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่า  $I_s$  ต่อไป โดยผลการคำนวณค่า  
 $\ln I_s$  และค่า  $I_s$  ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้นและ 6 ชั้น แสดงในตารางที่ 4-5 ซึ่งพบว่าค่า  $I_s$  ของ  
 ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้น มีค่าประมาณ 4 นาโนแอมแปร์ ส่วนค่า  $I_s$  ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 6  
 ชั้นมีค่าประมาณ 151 นาโนแอมแปร์



ภาพที่ 4-21 กราฟ  $\ln I$  และความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่มี  
 จำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4-5 แสดงค่ากระแสอิ่มตัว ( $I_s$ ) ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ภายใต้  
 จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้นและ 6 ชั้น

ซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ภายใต้ จำนวนชั้นเคลือบที่แตกต่างกัน	$\ln I_s$	$I_s$ (นาโนแอมแปร์)
4 ชั้น	-19.3	4
6 ชั้น	-15.7	151

ส่วนค่า Ideality Factor ( $n$ ) สามารถหาค่าได้จากค่าความชัน (Slop) ของกราฟเส้นตรงที่ใช้หาค่า  $\ln I_s$  ที่แสดงในภาพที่ 4-22 ซึ่งความชันของเส้นกราฟที่ได้จะมีค่าเท่ากับ  $\frac{q}{nkT}$  โดยตารางที่ 4-6 แสดงค่าความชันของเส้นกราฟกับค่า  $n$  ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้นและ 6 ชั้น

ตารางที่ 4-6 แสดงค่าความชันของเส้นกราฟ  $\ln I$  กับความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่า  $n$  ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ภายใต้จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้นและ 6 ชั้น

ซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ภายใต้จำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน	ค่าความชัน (C/J)	$n$
4 ชั้น	11.20	2.54
6 ชั้น	4.76	5.96

## บทที่ 5

### อภิปรายและสรุปผล

บทนี้เป็นการอภิปรายและสรุปผลการศึกษางานวิจัยประกอบด้วยผลของอุณหภูมิในการอบฟิล์มบางและผลของจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่มีผลต่อโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิเกิลออกไซด์

#### อภิปราย

##### 1. ผลของอุณหภูมิในการอบที่มีต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เคลือบบนนิเกิลออกไซด์ในชุดนี้ทำการเคลือบด้วยวิธีโซล-เจลแบบจุ่มเคลือบ ที่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ 4 ชั้นที่เคลือบทับบนฟิล์มบางนิเกิลออกไซด์ 4 ชั้น โดยทำการอบฟิล์มบางภายใต้อุณหภูมิในการอบที่แตกต่างกันคือ 350°C 450°C และ 530°C โดยในส่วนนี้เป็นการอภิปรายผลของอุณหภูมิในการอบ ที่มีต่อโครงสร้างผลึก ขนาดผลึก ลักษณะพื้นผิว คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิเกิลออกไซด์โดยมีรายละเอียดดังนี้

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้น โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และนิเกิลออกไซด์มีความเป็นผลึกมากขึ้น โดยมีโครงสร้างผลึกแบบพหุผลึก รวมทั้งมีค่าขนาดผลึกที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลของลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนฟิล์มบางนิเกิลออกไซด์จะมีขนาดเกรนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบสูงขึ้น รวมทั้งมีการรวมตัวกันของเกรนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจาก Coalescence Mechanism ของกระบวนการเกิดฟิล์มบาง เช่น Ostwald Ripening และ Cluster Migration เป็นต้น (Ohring, 1992)

ผลค่าการส่องผ่านของแสงของฟิล์มบางในงานวิจัยนี้ พบว่าค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางนิเกิลออกไซด์จะมีการส่องผ่านแสงที่ต่ำสุด ในขณะที่ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จะมีการส่องผ่านแสงที่สูงที่สุด โดยมีค่าการส่องผ่านแสงที่สูงกว่า 70% ส่วนฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิเกิลออกไซด์จะมีการส่องผ่านแสงอยู่ระหว่างฟิล์มบางนิเกิลออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ โดยมีค่าการส่องผ่านแสงสูงมากกว่า 60% ในทุกเงื่อนไขของอุณหภูมิในการอบฟิล์มบาง ซึ่งการที่ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิเกิลออกไซด์มีค่าการส่องผ่านที่สูงกว่าฟิล์มบางนิเกิลออกไซด์เป็นผลจากการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิเกิลออกไซด์ ที่เป็นการเคลือบฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าบนฟิล์มนิเกิลออกไซด์ที่มีดัชนีหักเหสูงกว่าซิงก์ออกไซด์ ซึ่งเป็นลักษณะของ

การเคลือบฟิล์มบางเพื่อลดการสะท้อนแสงหรือ Anti-Reflection Coating (Dezeng, Wan, & Zhu, 2014) จึงทำให้ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์มีค่าการสะท้อนแสงที่ลดลงหรือการส่องผ่านแสงเพิ่มขึ้น

ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบฟิล์มบางเป็น 450°C และ 530°C ฟิล์มบางมีลักษณะการนำไฟฟ้าแบบไดโอด โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลด์ลดลงจาก 504 นาโนแอมแปร์เป็น 4 นาโนแอมแปร์ ส่วนค่า Ideality Factor ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงลักษณะการนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับการนำไฟฟ้าแบบไดโอดในอุดมคติ (n มีค่าเท่ากับ 1) โดยผลการทดลองพบว่าค่า Ideality Factor ของฟิล์มบางที่อบที่อุณหภูมิ 450°C และ 530°C มีค่าเป็น 22.68 และ 2.54 ตามลำดับ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลด์และ Ideality Factor ที่คำนวณได้ แสดงถึงการนำไฟฟ้าแบบไดโอดของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ มีค่าที่ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบสูงขึ้น เป็นผลเนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบสูงขึ้นฟิล์มบางที่เคลือบด้วยวิธีโซล-เจลมีความเป็นผลึกที่สูงขึ้นและมีขนาดเกรนที่เพิ่มขึ้นทำให้ Defect บริเวณ Grain Boundary ลดลง ส่งผลให้การนำไฟฟ้าบริเวณ Grain Boundary มีค่าดีขึ้น (Vikas & Shailesh, 2011)

## 2. ผลของจำนวนชั้นเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่มีต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เคลือบบนนิกเกิลออกไซด์ในชุดนี้ทำการเคลือบด้วยวิธีโซล-เจลแบบจุ่มเคลือบ ภายใต้อุณหภูมิในการอบฟิล์มบางเท่ากับ 530°C แต่มีจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบบนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์แตกต่างกัน คือ 4 ชั้นและ 6 ชั้น โดยในบางส่วนนี้เป็นการอภิปรายผลของจำนวนชั้นเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่มีต่อ โครงสร้างผลึก ขนาดผลึก ลักษณะพื้นผิว คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์โดยมีรายละเอียดดังนี้

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เพิ่มขึ้น โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบพหุผลึก รวมทั้งมีค่าขนาดผลึกที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลของลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เคลือบทับบนฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์จะมีขนาดเกรนที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นเคลือบให้มีค่ามากขึ้น รวมทั้งพื้นผิวฟิล์มมีความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jongnavakit et al. (2012) ที่พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางเปลี่ยนตามความหนาที่เพิ่มขึ้น

ผลค่าการส่องผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่ความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน พบว่าค่าการส่องผ่านแสงมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าการส่องผ่านแสงสูงกว่าฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์และมีค่าต่ำกว่าฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็นผลจากการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ ที่มีลักษณะการเคลือบคล้ายกับการเคลือบฟิล์มบางเพื่อลดการสะท้อนแสง ตามรายละเอียดที่แสดงในส่วนของผลของอุณหภูมิการอบในหัวข้อก่อนหน้า

ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์มากขึ้นจาก 4 ชั้นเป็น 6 ชั้น ค่ากระแสไฟฟ้ามีลักษณะการนำไฟฟ้าแบบไดโอด โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวเพิ่มขึ้นจาก 4 นาโนแอมแปร์เป็น 151 นาโนแอมแปร์ ส่วนค่า Ideality Factor มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.54 เป็น 5.96 ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวและ Ideality Factor ที่คำนวณได้ แสดงถึงการนำไฟฟ้าแบบไดโอดของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็นผลเนื่องจากค่าความต้านทานภายในบริเวณผิวสัมผัสของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากความหยาบผิวของฟิล์มบางเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้รอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น (Kim, Han, & Cho, 2007)

## สรุปผลการทดลอง

1. การเพิ่มอุณหภูมิในการอบสูงขึ้นทำให้ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่ดีขึ้นและมีขนาดผลึกที่เพิ่มขึ้น
2. การเพิ่มอุณหภูมิในการอบสูงขึ้นทำให้พื้นผิวของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์มีขนาดเกรนเพิ่มขึ้นและเกรนมีการรวมตัวกันมากขึ้น
3. การส่องผ่านของแสงในช่วงตามองเห็นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่อบที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าไม่แตกต่างกันมา โดยมีค่าการส่องผ่านแสงมากกว่า 70% ขึ้นไปทุกเงื่อนไขการอบ
4. การเพิ่มอุณหภูมิในการอบทำให้ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์มีค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่อบที่อุณหภูมิ 450°C และ 530°C มีลักษณะการนำไฟฟ้าแบบไดโอด
5. การเพิ่มจำนวนชั้นเคลือบของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ ทำให้พื้นผิวฟิล์มบางมีค่าความหยาบผิวที่เพิ่มขึ้น
6. การส่องผ่านของแสงในช่วงตามองเห็นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนนิกเกิลออกไซด์ที่จำนวนชั้นเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าการส่องผ่านแสงมากกว่า 75% ขึ้นไปทุกเงื่อนไขของจำนวนชั้นฟิล์มบาง
7. การเพิ่มจำนวนชั้นเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ทำให้ฟิล์มบางมีลักษณะการนำไฟฟ้าแบบไดโอดที่ลดลง โดยมีค่า Ideality Factor เพิ่มขึ้น

## บรรณานุกรม

- กมล เอี่ยมพนากิจ. (2547). *การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นที่ให้ค่าการปลดปล่อยรังสีต่ำ*.  
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธันสถา รัตนะ. (2547). *การวิจัยและพัฒนาการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธี  
สปีดเทอริงตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2. รายงานการวิจัยประจำปี  
2547. ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยร่วมกับสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม  
กรุงเทพฯ: ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.*
- มดี ห่อประทุม. (2548). *การศึกษาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเตรียมด้วยวิธี ดีซี รีแอค  
ทีฟ แมกนีตรอน สปีดเทอริง*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์,  
คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วีรศักดิ์ อุดมกิจเดชา. (2543). *เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ ทฤษฎี และหลักการดำเนินงานเบื้องต้น*.  
กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภาสินี ลิ้มปานภาพ. (2554). *บทที่ 8 เซรามิก บทที่ 11 การกัดกร่อนและการเสื่อมสลายของ  
วัสดุ*. ปทุมธานี: สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- หนึ่งฤทัย แก้วไข. (2555). *โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไนไตรด์  
ที่เคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเทอริง*.  
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์,  
มหาวิทยาลัยบูรพา.
- อดิศร นุรณวงศ์. (2551). *สภาพขอบน้ำของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วย  
วิธีแอคทีฟ ดีซี สปีดเทอริง*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์,  
คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- อมรรัตน์ คำบุญ. (2551). *ผลของความต่างศักย์ไบแอสต่อโครงสร้างของฟิล์มบาง  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเทอริง ที่มีผลต่อการเกิดอปาไทท์*.  
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์,  
มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Al-Ghamdi, A.A., Waleed, Mahmoud, E., Yaghmour, S.J., & Al-Marzouki, F.M. (2009).  
Structure And optical properties of nanocrystalline NiO thin film synthesized by sol-gel  
spin-coating method. *Journal of Alloys and Compounds*, 486, 9-13.



- Asumi Giken, & Limited. (2010). *Processes of dip coating*. Retrieved from [http://www.dip-coater.com/english/about\\_dip\\_coating.html](http://www.dip-coater.com/english/about_dip_coating.html)
- Bendavida, A., Martina, P.J., & Takikawab,H. (2000). Deposition and modification of titanium dioxide thin films by filtered arc deposition. *Thin Solid Films*, 360, 241–249.
- Cavas, M., Gupta, R.K., Al-Ghamdi, A.A., Al-Hartomy Omar, A., Farid El-Tantawy, & Yakuphanoglu, F. (2012). Fabrication and electrical characterization of transparent NiO/ZnO p–n junction by the sol–gel spin coating method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 64, 219-223.
- Daraee, M., Hajian, M., Rastgoo, M., & Lavasanpour, L. (2008). Study of Electrical Characteristic of Surface Barrier Detector with High Series Resistance. *Adv. Studies Theor*, 2 (20), 957-964.
- Davood Raoufi , & Taha Raoufi. (2009). The effect of heat treatment on the physical properties of sol–gel derived ZnO thin films .*Applied Surface Science*, 255, 5812–5817.
- Dayong Jiang, Jiyong Zhang, Youming Lu, Kewei Liu, Dongxu Zhao, Zhenzhong Zhang, Dezhen Shen, & Xiwu Fan. (2008). Ultraviolet Schottky detector based on epitaxial ZnO thin film. *Solid-State Electronics*, 52, 679–682.
- Gupta, R.K., Ghosh, K., & Kahol, P.K. ( 2009). Fabrication and characterization of NiO/ZnO p–n junctions by pulsed laser deposition. *Physica E*, 41, 617–620.
- Hakim, M., Dae, H.P., Bong, K.M., Hansang, K., Seong-Ju, H., Jin-Ho, C., Thierry, T., Guy, C., & Aline, R. (2012). Improved . electrochromic performances of NiO based thin films by lithium addition: From single layers to devices. *Electrochimica Acta*, 74, 46–52.
- Han, Yongkui Shan, & Fuqiang Huang. (2014). Broadband antireflection TiO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub> stack coatings with refractive-index-grade structure and their applications to Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130, 505–512.
- Hiromichi Ohta, Masao Kamiya, Toshio Kamiya, Masahiro Hirano, & Hideo Hosono. (2003). UV-detector based on pn-heterojunction diode composed of transparent oxide semiconductors, p-NiO/n-ZnO. *Thin Solid Films*. 445, 317–321.
- Hoffman, R. L., Norris, B. J., & Wager, J. F. (2003). ZnO-based transparent thin film transistor. *Appl. Phys Lett*, 82, 733.

- Jlassi, M., Staa, I., Hajji, M., BenHaou, B., & Ezzaouia, H. (2014). Effect of annealing at atmosphere on the electrical properties of nickel oxide/zinc oxide p–n junction grown by sol–gel technique. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 26, 395–403.
- Karatas, S., & Turut, A. (2006). Electrical properties of Sn/p-Si (MS) Schottky barrier diodes to be exposed to  $^{60}\text{Co}$  g-ray source. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 566, 584–589.
- Kim, D. C., Han, W. S., Cho, H. K., Kong, B. H., & Kim, H. S. (2007). Multidimensional ZnO light-emitting diode structures grown by metal organic chemical vapor deposition on p-Si. *Appl Phys Lett*, 23, 91.
- Maissel, L. I., & Glang, R. (1970). *Handbook of Thin Film Technology*. New York: Mc Graw- Hill Book.
- Marek Jasiorski. (2005). *Sol-Gel Materials and Nanotechnology Center of Excellence*. Retrieved from [http://www.immt.pwr.wroc.pl/~marjas/index\\_en.php?sub=activity](http://www.immt.pwr.wroc.pl/~marjas/index_en.php?sub=activity)
- Masahiko, M., Fabin, Q., Woosuck, S., Noriya, I., Norimitsu, M., & Shuzo, K. (2002). Thin-film Li-doped NiO for thermoelectric hydrogen gas sensor. *Thin Solid Films*, 419, 213–217.
- Nel, J.M., Auret, F.D., Wu, L., Legodi, M.J., Meyer, W.E., & Hayes, M. (2004). *Fabrication and characterisation of NiO/ZnO structures*. *Sensors and Actuators B*, 100, 270–276.
- Ohring, M. (1992). *The Materials Science of Thin Films*. San Diego: Academic Press.
- Ozeki, K., Januridin, J.M., Aoki, H., & Fukui, Y. (2007). Photocatalytic TiO film prepared by  $\text{O}_2$  clusterion beam assisted deposition method. *Nuclear instruments and methods in physics research B*, 232, 200-205.
- Patcharee Jongnavakit, Pongsaton Amornpitoksuk, Sumetha Suwanboon, & Tanakorn Ratana. (2012). Surface and photocatalytic properties of ZnO thin film prepared by sol–gel method. *Thin Solid Films*. 520, 5561–5567.
- Sawaby, A., Selim, M.S., Marzouk, S.Y., Mostafa, M.A., & Hosny, A. (2010). Structure, optical and electrochromic properties of NiO thin films. *Physica B*, 405 (16), 3412-3420.
- Sherly, E.D., Vijaya, J., Judith, Kennedy, & John, L. (2015). Effect of  $\text{CeO}_2$  coupling on the structural, optical and photocatalytic properties of ZnO nanoparticle. *Journal of Molecular Structure*, 1099, 114-125.

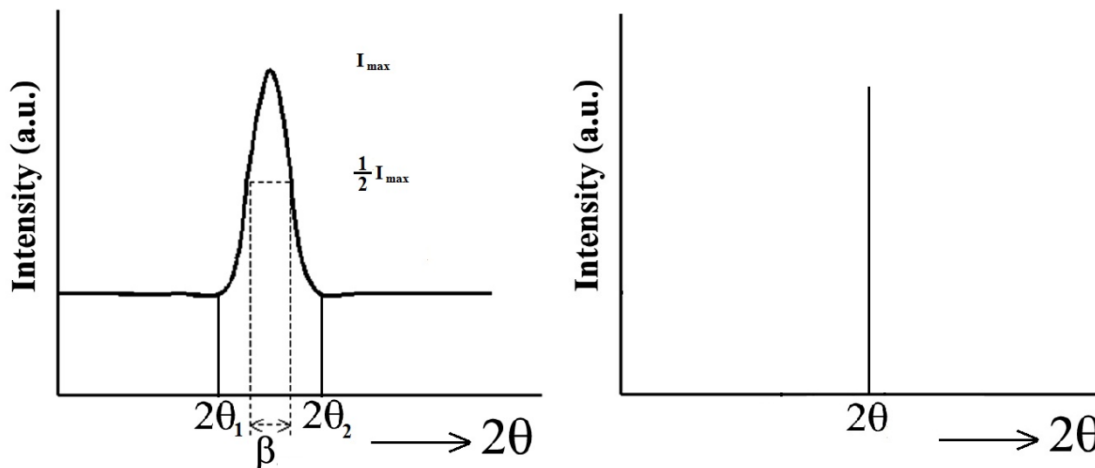
- Shu-Yi Tsai, Min-Hsiung Hon, & Yang-Ming Lu. (2011). Fabrication of transparent p-NiO/n-ZnO heterojunction devices for ultraviolet photodetectors. *Solid-State Electronics*, 63, 37–41.
- Singh, A.V., Mehra, R.W., Buthrath, N., Wakahara, A., & Yoshida, A. (2001). Highly conductive and transparent aluminum-doped zinc oxide thin films prepared by pulsed laser deposition in oxygen ambient. *J. Appl. Phys*, 90, 5661.
- Sundararajan, M., John Kennedy, L., Udaya, Aruldoss, Khadeer, Pasha, Sk., Judith, Vijaya J., & Steve Dunn. (2015). Materials Science in Semiconductor Processing. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 12, 40.
- Vikas, P., Shailesh, P., Manik, C., Prasad, G., & Pradeep, J. (2011). Effect of Annealing on Structural, Morphological, Electrical and Optical Studies of Nickel Oxide Thin Films. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 1, 35-41.
- Wu, H.B., & Wang, L. S. (1997). A study of nickel monoxide (NiO), nickel dioxide (ONiO), and Ni(O-2) complex by anion photoelectron spectroscopy. *J Chem Phys.*, 107, 16–21.
- Zhao, S.Q., Zhao, K., Zhou, Q.L., Zhou, Y.L., Wang, S. F., & Ning, T. Y. (2007). Transient infrared laserinduced photovoltaic effect of ZnO/MgB2 heterostructures. *J Phys D Appl Phys*, 40, 4489–4492.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

การคำนวณหาขนาดผลึก (Crystallite Size) และค่าแถบพลังงาน (energy band gap)

### การคำนวณหาขนาดผลึก (Crystallite size)



ภาพที่ ก.1 Effect of crystallite size on diffraction curves (schematic)(Cullity,1978)

$$\text{Scherrer Equation} \quad L = \frac{k\lambda}{\beta \cos(\theta_\beta)} \quad (\text{ก-1})$$

- เมื่อ
- L คือ ขนาดของผลึกฟิล์มบางที่เคลือบ (nm)
  - K คือ ค่าคงที่ (0.9)
  - $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ( $\text{CuK}\alpha = 1.5406 \times 10^{-10} \text{ m}$ )
  - $2\theta_\beta$  คือ มุมของพีคที่มีความเข้มพีคสูงสุด
  - $\beta$  คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของความเข้มพีคสูงสุด

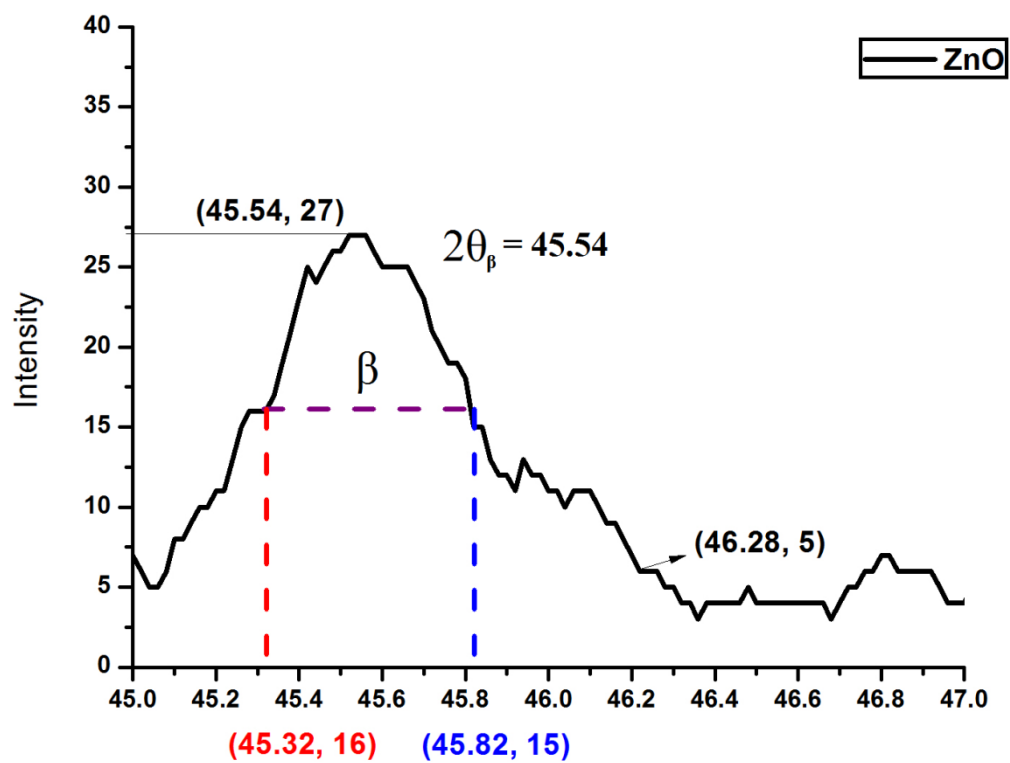
(Full Width at Half Maximum; FWHM)

ซึ่ง FWHM สามารถคำนวณได้จากสมการ ก-2

$$\beta = \frac{2\theta_{\beta 2} - 2\theta_{\beta 1}}{2}$$

ก-2

ตัวอย่างการคำนวณขนาดผลึก



ภาพที่ ก.3 การหาความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด

$$\text{มุม } I_{\max} = 27$$

$$\text{มุม } I_{\max} = 5$$

วิธีการคำนวณ หาค่า  $\beta$  จากสมการ ก-2

$$\beta = \frac{2\theta_{\beta 2} - 2\theta_{\beta 1}}{2}$$

$$\beta = \frac{45.82 - 45.32}{2} = 0.25$$

นำค่า  $\beta$  แทนในสมการ ก-1 จะได้

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos\left(\frac{\theta}{\beta}\right)}$$

$$L = \left\{ \frac{0.9(1.5064 \times 10^{-10})}{\left(0.25 \times \frac{\pi}{180}\right) \left(\cos\left(\frac{45.54}{2}\right)\right)} \right\} = 3.392 \times 10^{-8} \text{ m}$$

$$L = 33.92 \text{ nm}$$

ดังนั้นผลึกมีขนาดเท่ากับ 33.92 nm



## ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่

# SNRU-IC 2015

Sakon Nakhon Rajabhat University  
International Conference

Organized by

## Abstracts Book

Support by

IUCN SPAAA EXTRAD KSP Nakhon Ratchasima Regional Observatory for the Public Bara Scientific METTLER TOLEDO



## Fabrication and characterization of NiO/ZnO heterojunction thin film by sol-gel method

Kumariga Wanichchang<sup>1,\*</sup>, Chittra Kedkaew<sup>2</sup>, Attapol Choeysuppaket<sup>1,2</sup>,  
Tanattha Rattana<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Faculty of Science, Burapha's University, Chonburi, 20130, Thailand

<sup>2</sup> Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140, Thailand

\*Corresponding Author: kp\_beam@hotmail.com

### ABSTRACT

The aim of this study was to fabricate the p-n heterojunction of zinc oxide (ZnO) and nickel oxide (NiO) thin film using sol-gel dip coating method. The structural property of thin film was characterized by the X-ray diffraction (XRD) and the surface morphology was examined by Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM). The electrical property was investigated I-V characteristic measurement by Source Meter. The XRD results showed that the NiO/ZnO heterojunction thin film was polycrystalline while FESEM image of thin film showed smooth surface morphology and average grain size was about 50 nm. For electrical result, the current-voltage curve of thin film exhibited the diode characteristic with forward threshold voltage of 0.6 V.

**Keywords:** NiO/ZnO, heterojunction thin film, sol-gel, dip coating.

### INTRODUCTION

Zinc oxide (ZnO) is a n-type semiconductor that has been widely used materials for optoelectronic application such as UV-light emitting diode (LEDs) (Chichibu, 2005), laser diodes (Singh, 2001) and ultraviolet photodetectors (Zhou, 2011) due to its unique properties such as wide band-gap (3.37 eV), large exciton binding energy (60 meV) at room temperature (Adler, 1970). Recently, there are several reports on the growth n-type ZnO on p-type materials to form p-n heterojunction which has potential applications in nanoelectronic and materials science (Gupta, 2011, Zahedi, 2013 and Jlassi, 2014). Among the p-type

semiconductor, NiO has been extensively investigated because of its excellent chemical stability and has wide band-gap energy range from 3.6 to 4.0 eV at room temperature (Cavas, 2012). In the present study, NiO/ZnO p-n heterojunctions thin film was fabricated on indium tin oxide (ITO) coated glass substrates by a sol-gel process. The structural, surface morphology and electrical properties of thin film were investigated.

### MATERIALS AND METHOD

All chemicals were of analytical grade and they were used as received without further purification. The NiO/ZnO heterojunctions thin film has been deposited on ITO coated glass by sol-gel dip coating process. Firstly,



nickel acetate tetrahydrate ( $C_4H_8NiO_6 \cdot 4H_2O$ ) was dissolved in 2-methoxyethanol solution and monoethanolamine (MEA) at room temperature. The concentration of Nickel acetate was 0.4 M and the molar ratio of MEA to  $Ni^{2+}$  was 1:1. The solution was continuously stirred at 80 °C for 1 h until homogenous solution was obtained. For the deposition of thin film, the ITO coated glass substrate was dipped into the prepared sol and pulled up with constant rate of 4.0  $cm\ min^{-1}$ . After each layer deposition, the coated film was dried at 100 °C in air for 10 min to remove organic solvent in the film and this procedure was repeated 4 times. The dried film was annealed in air at 300 °C for 1 h to obtain NiO thin film.

The next step, ZnO thin film was deposited on the layer of NiO thin film by the sol-gel process with using zinc acetate dehydrate ( $C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$ ) as a Zn source. The concentration of Zinc acetate was 0.7 M and the molar ratio of MEA to  $Zn^{2+}$  was 1:1. The process of ZnO thin film preparation was the same as the process using for the NiO thin film. After ZnO deposition, the sample was annealed in air at 530 °C for 1 h to obtain the NiO/ZnO thin film.

The structural properties of thin films were carried out by X-ray diffractometer (XRD, Bruker D8 ADVANCE) with  $CuK\alpha$  radiation as X-ray source and measured in a low angle mode. The surface morphology and cross-section of thin film was examined by using

the Field-Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM, Hitachi, S-4700). The current-voltage measurements at room temperature were performed by a Keithley Current-Voltage Source meter with used silver electrode to form ohmic contact for NiO/ZnO heterojunctions thin film.

## RESULTS AND DISCUSSION

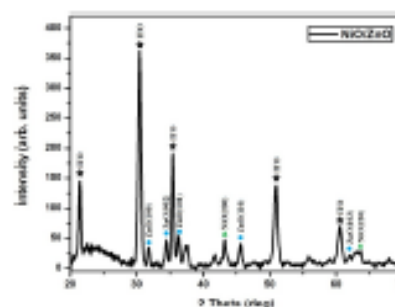


Fig. 1 XRD patterns of NiO/ZnO heterojunction thin film

The grazing angle X-ray diffraction patterns of NiO/ZnO heterojunctions thin film are shown in Fig. 1. It was found that all samples showed the diffraction peaks matched the standard diffraction pattern of a hexagonal wurtzite ZnO structure (JCPDS card file no. 36-1451) and NiO cubic structure phase (JCPDS no. 01-1239). This indicated that ZnO and NiO thin films were polycrystalline structure. The average grain size ( $D$ ) has been calculated using Scherrer formula (B. D. Cullity, 2001):

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

where  $\lambda$ ,  $\theta$ , and  $\beta$  are the X-ray wavelength (1.5406 Å), Bragg diffraction angle, and full

width at half maximum of diffraction peak, respectively. The crystallite size obtained was 22 nm. and 21 nm. for ZnO and NiO respectively.

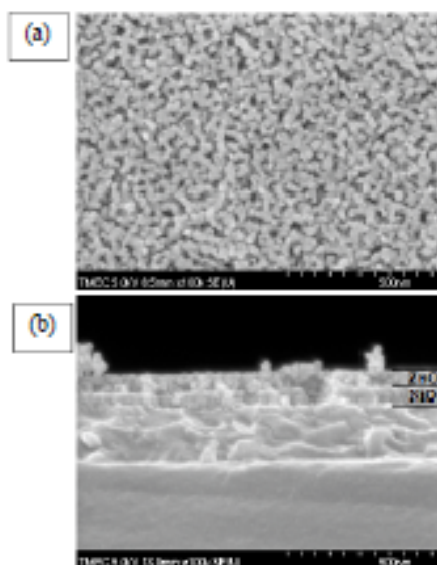


Fig. 2 FESEM images of NiO/ZnO heterojunction thin film (a) surface morphology (b) cross section morphology

Fig. 2 shows the FESEM photographs of the surface (a) and cross-section (b) morphologies of NiO/ZnO heterojunctions thin film. It was observed that the surface morphologies of ZnO thin film coated on NiO thin film annealed at 530 °C had very fine microstructure with average grain size of about 50 nm. Cross-section FESEM images revealed the thicknesses of NiO and ZnO thin films about 60 and 55 nm, respectively.

Fig. 3 shows the results of the current-voltage (I-V) measurements at room temperature for

NiO/ZnO heterojunction thin film. It was observed that the I-V curve rectifying behavior with threshold voltage 0.6 V. The maximum forward to reverse current ratio was about 50 at 1.0 V. These results were confirmed the formation of the p-n heterojunction at the interface of ZnO and NiO layers.

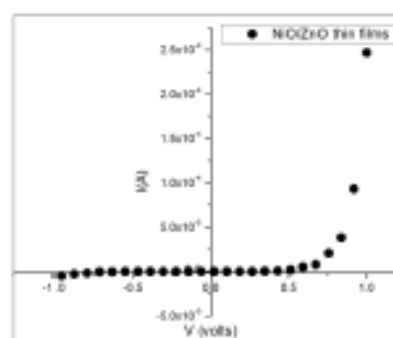


Fig. 3 Current-voltage characteristics of NiO/ZnO heterojunction thin film

## CONCLUSION

In this work, NiO/ZnO heterojunction thin films have been successfully deposited on ITO substrate by sol-gel dip coating method. The structural, morphological and electrical properties of NiO/ZnO thin films were investigated. The XRD and FESEM results indicated that NiO/ZnO thin film was polycrystalline and average grain size in nano range. The current-voltage characteristics of NiO/ZnO heterojunction exhibited the diode behavior with maximum forward to reverse current ratio about 50 at 1.0 V

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Faculty of Science, Burapha University.



## REFERENCES

- S. F. Chichibu, T. Ohmori, N. Shibata, T. Koyama, T. Omura. (2005). Fabrication of p-CuGaS<sub>2</sub>/n-ZnO:Al heterojunction light-emitting diode grown by metalorganic vapor phase epitaxy and helicon-wave-excited-plasma sputtering methods. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 66, 1868–1871.
- A. V. Singh, R. M. Mehra, N. Buthrath, A. Wakahara, A. Yoshida. (2001). Highly conductive and transparent aluminum-doped zinc oxide thin films prepared by pulsed laser deposition in oxygen ambient. *Journal of App Phy*, V. 90, p. 5661-5665.
- H. Zhou, G. J. Fang, N. Liu, X. Z. Zhao. (2011). Effects of thermal annealing on the performance of Al/ZnO nanorods/Pt structure ultraviolet photodetector. *Materials Science and Engineering: B*, Wuhan, China, 176, 740–744.
- D. Adler, J. Feinleib. (1970). Electrical and optical properties of narrow-band materials. *Phys Rev B-Solid State*, p. 3112-3134.
- R. K. Gupta, F. Yakuphanoglu, K. Ghosh, P. K. Kahol. (2011). Fabrication and characterization of p-n junctions based on ZnO and CuPc. MO, USA, *Microelectron. Eng.*, V. 88, P. 3067–3069.
- F. Zahedi, R. S. Dariani, S. M. Rozati. (2013). Ultraviolet photoresponse properties of ZnO:N/p-Si and ZnO/p-Si heterojunctions. *Sensors and Actuators A*, V. 199, p. 123–128.
- M. Jassi, I. Sta, M. Hajji, B. BenHaoua, H. Ezzaouia. (2014). Effect of annealing atmosphere on the electrical properties of nickel oxide/zinc oxide p-n junction grown by sol-gel technique. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 26, 395–403.
- M. Cavas, R. K. Gupta, A. A. Al-Ghamdi, O. A. Al-Hartoumy, F. El-Tantawy, F. Yakuphanoglu. (2012). Fabrication and electrical characterization of transparent NiO/ZnO p-n junction by the sol-gel spin coating method. Elazig, Turkey, *J Sol-Gel Sci Technol*, V. 64, p. 219–223.
- B. D. Cullity, S. R. Stock. (2001). *Elements of X-ray Diffraction*. Prentice Hall, New Jersey.