

การสังเคราะห์และการวัดสมบัติฟิล์มบาง ZnO:Al
เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบแบบ Sol-gel
SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO:Al THIN FILM
BY SOL-GEL DIP-COATING METHOD



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การสังเคราะห์และการวัดสมบัติฟิล์มบาง ZnO:Al
เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบแบบ Sol-gel
SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO:Al THIN FILM
BY SOL-GEL DIP-COATING METHOD



T143160

พิชญชญา คำบุศย์
เรณุกา ไชยวรรณ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

143160

22 ส.ย. 2559

b. 12784023
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2557 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO:Al THIN FILM
BY SOL-GEL DIP-COATING METHOD



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ACADEMIC YEAR 2014** มอนูญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

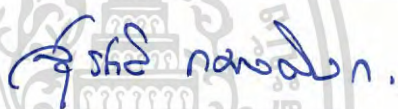
หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์และวัดสมบัติฟิล์มบาง ZnO:Al
เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบแบบ sol-gel
SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO:Al
THIN FILM SOL-GEL DIP-COATING METHOD

ชื่อนักศึกษา นางสาวพิชญ์ชญา คำบุศย์ รหัสนักศึกษา 54050560
นางสาวเรณูภา ไชยวรรณ รหัสนักศึกษา 54050584

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ.สุรชาติ กมลดีลก	
รศ.สาทราย เล็กชะอุ่ม	
อ.ธนภรณ์ สีลาวัฒนานนท์	
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์และการวัดสมบัติฟิล์มบาง ZnO:Al เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบแบบ Sol-gel
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพิชญชญา คำบุศย์ รหัสนักศึกษา 54050560 นางสาวเรณูกา ไชยวรรณ รหัสนักศึกษา 54050584
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศ.ทิพาวรรณ คล้ายบุญมี

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสังเคราะห์และคุณสมบัติฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม ฟิล์มบางถูกเตรียมโดยวิธีการจุ่มเคลือบแบบโซล-เจล บนกระจกสไลด์ ไมโครสโคป เครื่องมือที่ใช้ในการจุ่มเคลือบทำในห้องปฏิบัติการโดยใช้สำหรับควบคุมความเร็วในการตั้งขึ้นและดึงลงโดยมีสปีดมอเตอร์ 5 เฟส เพื่อใช้ในการควบคุม ซิงค์อะซีเตตและอลูมิเนียมไนเตรตเป็นสารตั้งต้นแล้วใช้ซู-เมทริกซ์และโมโนเอทานอลามีนเป็นตัวทำละลาย ในการโซล-เจล ใช้สารละลายซิงค์ ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.35 และ 0.50 โมลต่อลิตร ผลของเวลาในการแช่ อัตราการจุ่มและปริมาณอลูมิเนียมในการเจือเพื่อตรวจสอบพันธะทางเคมี โครงสร้างพื้นผิว เช่นเดียวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสง ผลการทดลองของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์แสดงให้เห็นว่าอัตราการจุ่มขึ้นและจุ่มลงที่เหมาะสมอยู่ที่ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมแสดงระนาบ (002) รามานสเปกตรัมแสดงโหมดที่ 440 หนึ่งส่วนเซนติเมตร ที่กำหนดพันธะของซิงค์ออกไซด์ และโหมด 576 หนึ่งส่วนเซนติเมตร ที่แสดงถึงอลูมิเนียม แถบระดับพลังงานมีค่าเท่ากับ 3.2-3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งได้จากการพิจารณาการส่องผ่านแสงของฟิล์มในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ การส่องผ่านแสงที่ดีประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ สภาพต้านทานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตร คือ 319 โอห์มเซนติเมตร และที่ความเข้มข้น 0.50 โมลต่อลิตร คือ 23,038 โอห์มต่อลิตร ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตร เมื่อเจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ พบว่ามีสภาพต้านทานที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 22.67 โอห์มเซนติเมตร และที่ความเข้มข้น 0.50 โมลต่อลิตร เมื่อเจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ พบว่ามีสภาพต้านทานที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 6.24 โอห์มเซนติเมตร

คำสำคัญ : ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียม จุ่มเคลือบแบบโซล-เจล

Title SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO:Al THIN FILM
BY SOL-GEL DIP-COATING METHOD

Students Miss PICHAYA KUMBUT Student ID 54050560
Miss RANUKA CHAIWAN Student ID 54050584

Degree Bachelor of Science in Applied Physics

Department Physics

Academic Year 2014

Advisor Assoc.Prof.Dr.Warawoot Thowladda

Co-advisor Dr.S.Tipawan Khlayboonme

Abstract

Transparent and conductive Al-doped zinc oxide thin films have been prepared by the sol-gel method. Zinc acetate and aluminum nitrate were used as cat-ion source, 2-methoxyethanal used as solvent and mono-ethanolamine used as sol stabilizer. Depositions of these films were performed by the dip-coating technique on microscope glass slides as substrates. This dip-coating system laboratory-made was precision controlled immersion and withdrawal of the substrates into a reservoir of liquid by a five-phase stepping motor. The effect of immersion rate, withdrawal rate and dopant concentration on the atomic-bonding, crystal structure, morphology as well as the electrical and optical properties was investigated. The immersion and withdrawal rates were optimized. The experiment showed that both optimum rates were 2 mm/s for dip-coating of ZnO thin films and 1mm/s for dip-coating of Al-doped ZnO thin films. The optical transmittance spectra of the films showed a very good transmittance, about 90%, within the visible wavelength region. The minimum resistivity of 6.24 ohm-cm was obtained for the film doped with 1.5 at%Al.

Keywords : Al-doped ZnO thin films, Sol-gel Dip-coating technique

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จด้วยดีเนื่องจากดิฉันได้รับความอนุเคราะห์อย่างสูงจากรศ.ดร.วราวุฒิ
เถาสัตตา ที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการตลอดจนปลูกฝังคุณธรรมจริยธรรม ความดีให้กับลูกศิษย์
ขอขอบคุณดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี อย่างสูงที่ให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม คอยกระตุ้น ให้กำลังใจใน
การทำงาน อีกทั้งยังคอยให้ความรู้ด้านวิชาการในเรื่องใหม่ๆกับลูกศิษย์ ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความ
ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณสุพัตรา หมื่นสมบูรณ์พงษ์นักศึกษาระดับปริญญาโทห้องปฏิบัติการ LASER&
SURFACE สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำตลอดมา

งานวิจัยนี้จะสำเร็จไม่ได้เลยถ้าไม่มี บิดา และมารดา ผู้เป็นกำลังใจให้กับดิฉันเสมอมา เมื่อ
ดิฉันมีปัญหาในเรื่องใดๆท่านทั้งสองก็ให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มที่โดยไม่มีเงื่อนไข ดิฉัน
ขอขอบพระคุณบิดา และมารดาอย่างสุดซึ้ง

คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากงานโครงการพิเศษฉบับนี้ ดิฉันขอมอบบูชาพระคุณบิดา
มารดา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ และขอน้อมบูชาท่านบูรพาจารย์ทุก
ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้วยความรักและเมตตา

นางสาวพิชญชญา คำบุศย์
นางสาวเรณูภา ไชยวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

eV	=	อิเล็กตรอนโวลต์
cm ³ /v	=	ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์
k	=	ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ (Boltzman's constant=1.380×10 ⁻²³)
/c	=	Linear expansion coefficient
Nm	=	นาโนเมตร
g cm ⁻³	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
°c	=	องศาเซลเซียส
cm ⁻³	=	wave number
meV	=	มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์
cm ² /v/s	=	ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์ต่อวินาที
W	=	วัตต์
K	=	เคลวิน
V	=	โวลต์
d	=	ระยะทาง
n	=	ลำดับการสะท้อน
τ	=	ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
hkl	=	ดัชนีมิลเลอร์
a,b,c α,β,φ	=	ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก
a	=	ค่าคงที่แลตทิซ
θ	=	มุมของการเลี้ยวเบน
UV	=	Ultraviolet
SEM	=	Scanning electron microscope
Um	=	ไมโครเมตร
J	=	ความหนาแน่นของกระแส
σ	=	สภาพนำไฟฟ้า (conductivity)
ϵ	=	เอปซิลอน
l	=	กระแส
A	=	พื้นที่หน้าตัด
l	=	ขนาดยาว
ρ	=	ความต้านทาน (Resistivity)
s	=	ระยะ
ml	=	มิลลิลิตร
mm/s	=	มิลลิเมตรต่อวินาที
Speed up	=	ความเร็วในการตั้งขึ้น
Speed down	=	ความเร็วในการตั้งลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Time immerse =	เวลาในการแช่กระจก
Time holding =	เวลาในการพักกระจก
hr =	ชั่วโมง
DI water =	น้ำปลอดประจุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	จ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 फिल्मบาง	3
2.2 สมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์	4
2.3 สมบัติพื้นฐานอะลูมิเนียม	6
2.4 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	6
2.4.1 วิธีทางเคมี (Chemical process)	6
2.4.2 วิธีทางกายภาพ (Physical process)	6
2.5 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบนกระจก	6
2.5.1 กระบวนการแบบแห้ง (Dry process)	6
2.5.2 กระบวนการเคลือบแบบเปียก (Wet process)	6
2.5.2.1 เทคนิคการจุ่มเคลือบ	7
2.5.2.2 เทคนิคการเกิดโซล-เจล	8
2.5.2.2.1 กระบวนการเกิดโซล-เจล	9
2.6 เครื่องมือเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม	11
2.6.1 เครื่องซังสารแบบละเอียด	14
2.6.2 เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน	12
2.6.3 ระบบเคลือบฟิล์มแบบจุ่มเคลือบ	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง	14
2.6.1 เครื่องมือการวิเคราะห์ทะลุผ่านของแสงด้วย เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี	14
2.6.2 เครื่องมือวิเคราะห์เชิงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
2.6.3 เครื่องมือวิเคราะห์สภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีโพรงที่โพรบ	19
2.6.4 เครื่องมือวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน ของรังสีเอ็กซ์	21
2.6.5 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างส่วนประกอบของธาตุ เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี	23
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	28
3.1 การเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์	28
3.2 การเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์	29
3.3 การเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม	29
3.4 อุปกรณ์ในการทดลอง	30
3.5 การเตรียมกระจกสไลด์ที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบาง	35
3.6 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ	39
3.7 เครื่องวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง	41
3.7.1 การวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectroscopy	42
3.7.2 การวิเคราะห์สภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโพรงที่โพรบ	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	46
4.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมบนแผ่นกระจก	46
4.2 ลักษณะเชิงกายภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์และ ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม	46
4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การ ดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียม	53
4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม	62
4.5 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม	68
4.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสและโครงสร้างผลึก ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	80
เอกสารอ้างอิง	81
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก	85
ภาคผนวก ข	86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางขั้นตอนการดำเนินงาน	1
2.1 ตารางแสดงสมบัติกายภาพบางประการของซิงค์ออกไซด์	5
3.1 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มซิงค์ออกไซด์ในโครงการพิเศษนี้	27
3.2 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมในโครงการพิเศษนี้	28
4.1 ค่าพลังงานแถบช่องว่างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.35 โมลต่อลิตร เจือด้วยอลูมิเนียมปริมาณต่างๆ	58
4.2 ค่าพลังงานแถบช่องว่างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.5 โมลต่อลิตร เจือด้วยอลูมิเนียมปริมาณต่างๆ	61
4.3 ค่าความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.35 โมลต่อลิตร เจือด้วยอลูมิเนียมที่ปริมาณต่างๆ	65
4.4 ค่าความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.5 โมลต่อลิตร เจือด้วยอลูมิเนียมที่ปริมาณต่างๆ	67
4.4 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก	68
4.5 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.35 โมลต่อลิตร เจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจก	68
4.6 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.5 โมลต่อลิตร เจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจก	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของฟิล์มบาง	3
2.2 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์	4
2.3 แสดงกระบวนการเคลือบฟิล์มแบบจุ่มเคลือบ	7
2.4 กระบวนการเคลือบฟิล์มแบบจุ่มเคลือบ	8
2.5 การเปลี่ยนสถานะจากSolไปเป็นGel	9
2.6 แผนภาพขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีโซลเจล	12
2.7 เครื่องซังสารแบบละเอียด	12
2.8 เครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน	13
2.9 โครงสร้างภายในของระบบเคลือบจุ่ม	14
2.10 ระบบเคลือบฟิล์มแบบจุ่มเคลือบ	14
2.11 องค์ประกอบพื้นฐานของการเซตเครื่อง	15
2.12 เครื่องSpectrometer unit	16
2.13 เครื่องLight source	16
2.14 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM ที่เป็นจุดกำเนิดภาพ	18
2.15 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโพรพอยท์โพรบ	21
2.16 กฎของ Bragg	22
2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	24
2.18 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	24
2.19 การกระเจิงแสงที่ตกกระทบวัตถุ	25
2.20 กระบวนการกระเจิงแสงในแบบ Reyleigh scattering และแบบ Raman scattering	25
2.21 การกระเจิงแสงแบบ stroke และ anti-stroke	26
2.22 เปรียบเทียบพลังงานที่เกิดจากการการกระเจิงและการสั่นของพันธะในโมเลกุล	26
2.23 เปรียบเทียบสเปกตรัม FTIR และ raman ของพอลิสไตรีน	26
3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์	27
3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียม	27
3.3 อุปกรณ์ในการทดลองสารประกอบด้วยบีกเกอร์ ปิเปต ข้อนตักสาร แท่งแม่เหล็กและจุกยาง	33
3.4 ซิงค์อะซิเตรทไดไฮเดรท (Zinc acetate dehydrate) $(CH_3COO)_2Zn \cdot 2H_2O$	34
3.5 อลูมิเนียมไนเตรท $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	34
3.6 โมโนเอทานอลามีน (Mono-ethanolamine)	35
3.7 2-เมทอกซีเอทานอล (2-methoxyethanol)	35
3.8 เตาอบสาร	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ญ่ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 เต้าอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s	36
3.10 เครื่องชั่งสารแบบละเอียด	37
3.11 เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็ก	37
3.12 ล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน	38
3.13 ล้างด้วยน้ำสะอาดและล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI) ด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที	39
3.14 ล้างด้วยอะซิโตนทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที	39
3.15 ล้างด้วยเมทานอลทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที	40
3.16 ล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI)	40
3.17 นำกระจกมาเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนแห้ง	41
3.18 อบให้แห้งด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °c เป็น 15 นาที	41
3.19 เตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์และสารละลายซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม	42
3.20 ขั้นตอนการจุ่มเคลือบกระจกแผ่นสไลด์	42
3.21 นำกระจกสไลด์ที่เคลือบสารแล้วอบด้วยเต้าไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที	43
3.22 อบรอบสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 °c โดยค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 50 °c จนถึง 500 °c จากนั้นทำการอบฟิล์มเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	43
3.23 สเปคโทรสโกปีของบริษัท Ocean Optics รุ่น 4000- USB	45
3.24 อุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคการวัด 4-point probe	46
3.25 การวางชิ้นงานฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม	47
3.26 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าแบบจุด 4	47
3.27 การบันทึกผลจากเครื่อง Multimeter	48
4.1 ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจกเวลาแช่60 วินาทีเวลาพัก30 วินาที ความเร็วในการติงลง2 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการติงขึ้น2 มิลลิเมตรต่อวินาที	46
4.2 ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจกเวลาแช่60 วินาทีเวลาพัก30 วินาที ความเร็วในการติงลง2 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการติงขึ้น4 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่(ก.) 0.35 โมลต่อลิตร(ข.) 0.5 โมลต่อลิตร	47
4.3 ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจกเวลาแช่60 วินาทีเวลาพัก300 วินาที ความเร็วในการติงลง2 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการติงขึ้น2 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่(ก.) 0.35 โมลต่อลิตร(ข.) 0.5 โมลต่อลิตร	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	
ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจกเวลาแสง 300 วินาทีเวลาพัก 30 วินาที ความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการดิ่งขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อ วินาทีความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร	47
4.5	
ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจก เวลาแสง 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีเจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 1 อะตอม เปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	48
4.6	
ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจก เวลาแสง 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อวินาทีเจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 1 อะตอม เปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	48
4.7	
ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบน กระจกเวลาแสง 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีเจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 1 อะตอม เปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	49
4.8	
ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบน กระจกเวลาแสง 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการดิ่งขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อวินาทีเจืออลูมิเนียมที่ ปริมาณ (ก.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	49
4.9	
ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมปริมาณ 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์บนกระจก เวลาแสง 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 6 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร	50
4.10	
ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ 0.6 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมปริมาณ 1 อะตอม เปอร์เซ็นต์บนกระจกเวลาแสง 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาที ความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตร ต่อวินาที	50
4.11	
ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบน กระจกเวลาแสง 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อ วินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีเจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.12	ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรเจือด้วย อลูมิเนียมบนกระจกเวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการติงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการติงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีเจืออลูมิเนียมที่ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์(ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3อะตอมเปอร์เซ็นต์	52
4.13	สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก เวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีระยะทางความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการติงขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์(ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร	53
4.14	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก เวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร	54
4.15	สเปกตรัมการสะท้อนกลับของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก เวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร	54
4.16	แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการติงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีเวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาที ที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร	55
4.17	สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ 0.35โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจกเวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาที ความเร็วในการติงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการติงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีเจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	56
4.18	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของซิงค์ ออกไซด์0.35โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจก เวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการติงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการติงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีเจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	56
4.19	สเปกตรัมการสะท้อนกลับของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของซิงค์ ออกไซด์0.35 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจกความเร็วในการติงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการติงขึ้น1 มิลลิเมตรต่อวินาทีเจืออลูมิเนียมที่ ปริมาณ (ก.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอม	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ 0.35 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจกเวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการจุ่มเคลือบที่ความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์(ง.)1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	58
4.21 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจกเวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีโดยใช้อลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	59
4.22 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจกเวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีโดยใช้อลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	59
4.23 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจกเวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีโดยใช้อลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์(ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	60
4.24 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ 0.35โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจกความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ(ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์(ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 โครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีเวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาที ที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร	62
4.26 โครงสร้างภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาที ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร	63
4.27 โครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตรเจือ อลูมิเนียมของบนกระจกความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วในการ ดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีเจืออลูมิเนียมที่ ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอม เปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	64
4.28 โครงสร้างภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมบนกระจกความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็วใน การดิ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีเวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาที เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์(ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	65
4.29 โครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมของบนกระจกความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีเวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาที เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	66
4.30 โครงสร้างภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมของบนกระจกความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีความเร็ว ในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีเวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีเจือ อลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	67
4.31 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อ ลิตรเจืออลูมิเนียมของบน ความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็ว ในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที จืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0 อะตอม เปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1 อะตอม เปอร์เซ็นต์ (จ.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ฉ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32	70
4.33	71
4.34	71
4.35	72
4.36	72
4.37	73
4.38	74

4.32 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมของบน ความเร็วในการติ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที จี้อลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ฉ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

4.33 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ความเร็วในการติ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จุ่มเคลือบ 10 รอบ โดยใช้ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ที่ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร

4.34 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมของอลูมิเนียมไนเตรดบนกระจก ความเร็วในการติ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติ่งขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

4.35 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมของอลูมิเนียมไนเตรดบน ความเร็วในการติ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติ่งขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อวินาที (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

4.36 การตรวจสอบองค์ประกอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดโหมด EDS เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ความเร็วในการติ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเข้มข้น (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร

4.37 การตรวจสอบส่วนประกอบของธาตุฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจกด้วยเทคนิครามานสเปคโตรสโคปีเวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ความเร็วในการติ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเข้มข้น (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร

4.38 การตรวจสอบองค์ประกอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมบนกระจกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดโหมด EDS เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ความเร็วในการติ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.39 การตรวจสอบส่วนประกอบของธาตุฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจกด้วยเทคนิครามานสเปคโตรสโคปี เวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีเจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์ 75
- 4.40 การตรวจสอบองค์ประกอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดโหมด EDS เวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาทีความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีเจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์ 76
- 4.41 การตรวจสอบส่วนประกอบของธาตุฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจกด้วยเทคนิครามานสเปคโตรสโคปี ความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์ 77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นสำหรับใช้ในการดำรงชีวิตประจำวันแต่เนื่องจากแหล่งกำเนิดพลังงานส่วนใหญ่มาจากแหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นแหล่งพลังงานที่มีจำนวนจำกัดและปริมาณลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่เดียวกันโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจกมนุษย์จึงหาหนทางเพื่อให้มีพลังงานไฟฟ้าใช้อย่างเพียงพอจึงได้ศึกษาแหล่งพลังงานที่มีอยู่ เช่น ชั่วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

โดยประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับข้อไฟฟ้าโดยข้อไฟฟ้าโปร่งแสงที่มาจากฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เป็นตัวเลือกชนิดหนึ่งฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เป็นสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบผลึกหกเหลี่ยมสามารถนำข้อไฟฟ้าได้ดี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการทำงานของระบบสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ
2. เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ
3. เพื่อศึกษาและวัดคุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค UV-Vis transmission spectroscopy, Four point probe, FE-SEM, XRD และ Raman spectroscopy

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีโครงสร้างและคุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์
2. ศึกษาการทำงานของระบบสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ
3. เพื่อหาพารามิเตอร์ของการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพื่อควบคุมคุณสมบัติฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์
4. ปรับปรุงสมบัติฟิล์มบางด้วยการเจือสารอะลูมิเนียม

1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
ส.ค - ธ.ค พ.ศ.2557	1.ศึกษาลักษณะโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ 2. ศึกษาการทำงานของระบบสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วยวิธีจุ่มเคลือบ
ม.ค - ก.พ พ.ศ. 2558	1. เตรียมกระจกที่ใช้ในการจุ่มเคลือบ 2. เตรียมสารละลายที่ใช้ในการจุ่มเคลือบ
มี.ค - เม.ย พ.ศ. 2558	1. ผสมสารละลายเพื่อให้เกิดซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียม 2. ทดสอบการจุ่มเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมิเนียม
พ.ค - มิ.ย พ.ศ. 2558	วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ให้มีประสิทธิภาพตามความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีโครงสร้างและคุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์
2. สามารถนำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ไปพัฒนาในด้านอื่นๆได้
3. มีความรู้ความเข้าใจการทำงานระบบสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ
4. สามารถพัฒนาระบบสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วยวิธีการจุ่มเคลือบให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟิล์มบาง (Thin film)

ฟิล์มบาง(thin film) หมายถึง ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบางๆ การระบุว่าฟิล์มใดเป็นฟิล์มบางอาจพิจารณาได้จากลักษณะการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์ม กล่าวคือ ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงผิว (surface properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า ฟิล์มบาง แต่ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงปริมาตร (bulk properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า ฟิล์มหนา ทั้งนี้จากความหมายจะเห็นว่าฟิล์มเดียวกันอาจเป็นฟิล์มบางหรือฟิล์มหนาก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญอย่างไรก็ดี การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่เคลือบให้ดีขึ้นเช่น ให้มีความคงทน ทนทาน หรือ สวยงามมากขึ้นรวมถึงเพื่อการใช้ประโยชน์ในงานอื่นๆ

การสร้างทำได้โดยการเคลือบฟิล์มบางจะเป็นกระบวนการทำให้สารเคลือบตกเคลือบบนผิวของวัสดุที่ต้องการ โดยเริ่มจากการสร้างสารเคลือบในรูปของอะตอมโมเลกุลหรืออนุภาคจากนั้นเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับเมื่อสารเคลือบตกกระทบบนผิววัสดุรองรับก็เกิดการควบแน่นและพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับในที่สุด

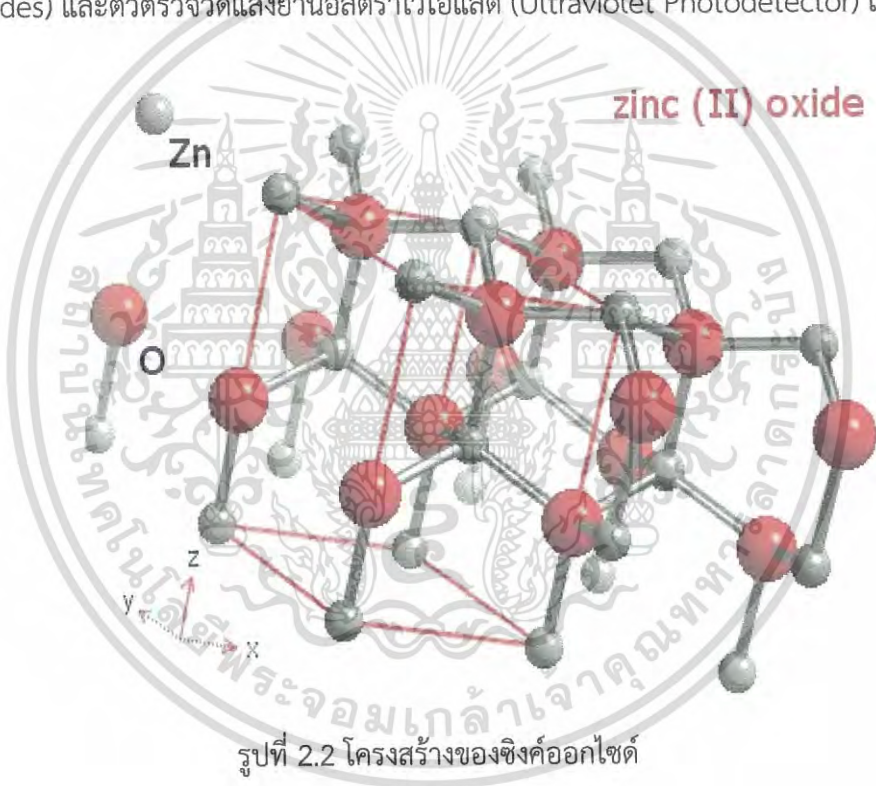


รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide :ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (Direct band gap) มีแถบพลังงาน 3.37 eV ที่อุณหภูมิห้องและ 3.44 eV ที่อุณหภูมิ 4 เคลวิน ซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ไซด์ (Hexagonal wurtzite) หรือคิวบิกซิงค์เบลน (Cubic zinc blende) หรือร็อกซอลต์ (Cubic Rocksalt) แสดงดังรูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ไซด์มีค่าคงที่ผลึก $a = b = 3.24 \text{ \AA}$ และ $c = 5.20 \text{ \AA}$ มีค่ามวลยังผลพาหะ (Carrier effective mass) ของอิเล็กตรอนโฮล คือ $0.24 m_0$ และ $0.59 m_0$ ตามลำดับ มีค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron mobility) ที่ผลึกเดี่ยวซิงค์ออกไซด์ (ZnO single crystal) ระหว่าง 100 ถึง $200 \text{ cm}^2/\text{v}$ และมีค่าความเร็วของการเคลื่อนที่โฮล (Hole mobility) ประมาณ $180 \text{ cm}^2/\text{v}$ สมบัติอื่นๆของซิงค์ออกไซด์แสดงดังตารางที่ 2.1 หลายปีที่ผ่านมาซิงค์ออกไซด์จึงเป็นที่นิยมนำไปสร้างอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวเปล่งแสงย่านสีน้ำเงิน (Light emitting diodes LED) ไดโอดเลเซอร์ (Laser diodes) และตัวตรวจจับแสงย่านอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Photodetector) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสมบัติกายภาพบางประการของซิงค์ออกไซด์

Properties of wurtzite :ZnO	Value
Lattice parameters at 300 k	ao: 0.32495 nm Co:0.52069 nm Ao/C 1.602 (ideal hexagonal structure shows 1.633)
Density	u:0.345
Stable phase at 300 k	5.606 g cm ⁻³
Melting point	Wurtzite
Thermal conductivity	1975 °C
Linear expansion coefficient (1/C)	0.6,1-1.2
Static dielectric constant	Ao:6.5×10 ⁻⁶
Refractive index	8.656
Energy gap	2.008,2.029
Intrinsic carrier concentration	3.37 ev ,direct
Exciton binding energy	<106 cm ⁻³
Electron effective mass	60 meV
Electron Hall mobility at 300 k for low n-type	0.24 200 cm ² v ⁻¹ s ⁻¹
Conductivity	
Hall effective mass	0.59
Hole Hall mobility at 300 k for low p-type	5-50 m ² v ⁻¹ s ⁻¹
conductivity	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สมบัติพื้นฐานของอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะอ่อนที่ขึ้นรูปได้ง่าย แต่จะแข็งขึ้นถ้าผ่านขั้นตอนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำ เช่น การทุบหรือกด หรือเรียกว่า การอบเหนียวโลหะ

สมบัติอื่นที่สำคัญคือ เราสามารถเชื่อมอะลูมิเนียมได้ โดยใช้เครื่องมือที่ใช้อุณหภูมิสูงมาก เช่น เครื่องเชื่อมที่ใช้ประกายไฟฟ้ากับแท่งอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมสามารถถูกบัดกรีที่อุณหภูมิสูงโดยใช้แท่งทองเหลือง หรือใช้โลหะอื่นได้ แต่รอยต่อที่เกิดจากการบัดกรีไม่ทนทานต่อการกัดกร่อนนักทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่เหมาะกับการใช้งานบางอย่าง นอกจากนี้อะลูมิเนียมสามารถทำให้แข็งขึ้นได้ด้วยการผสมกับโลหะอื่นเกิดเป็นโลหะผสม

สารละลายสารประกอบอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความไวมากเมื่ออะลูมิเนียมสัมผัสกับอากาศจะเกิดสารประกอบออกไซด์เคลือบบนพื้นผิวทันทีจึงสามารถป้องกันการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามสารประกอบอะลูมิเนียมสามารถละลายในกรดหรือในเบสได้เช่นเดียวกับโลหะอื่นอีก 2-3 ชนิด สารประกอบโลหะที่สมบัติพิเศษนี้เรียกว่า โลหะแอมโฟเทอริก สมบัติพิเศษนี้ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมคือใช้เป็นวิธีละลายสารประกอบอะลูมิเนียมจากแร่บอกไซต์ และให้สินแร่ที่เหลือคงอยู่ในสภาพที่เป็นของแข็งกระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการเบเยอร์

2.4 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (Thin film process)

วิธีการเตรียมฟิล์มบางมีหลายแบบทั้งขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีปริมาณและคุณภาพของฟิล์มบางสำหรับเทคโนโลยีในการเตรียมฟิล์มบางนั้นแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ

2.4.1 วิธีทางเคมี (Chemical Process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนแผ่นรองรับซึ่งรวมถึงการพ่นสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis) กระบวนการเคลือบไอเคมี (Chemical vapor deposition) และวิธีโซลเจล (Sol-gel)

2.4.2 วิธีทางกายภาพ (Physical Process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวและฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของแผ่นรองรับโดยการใช้ความร้อน (Thermal) และระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporation) รวมถึงวิธีการใช้แสงเลเซอร์ (Laser ablation) และวิธีการสปัตเตอริง (Sputtering)

2.5 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบนกระจก

เทคนิคการเคลือบฟิล์มบนกระจกออกแบ่งได้ 2 วิธีคือ

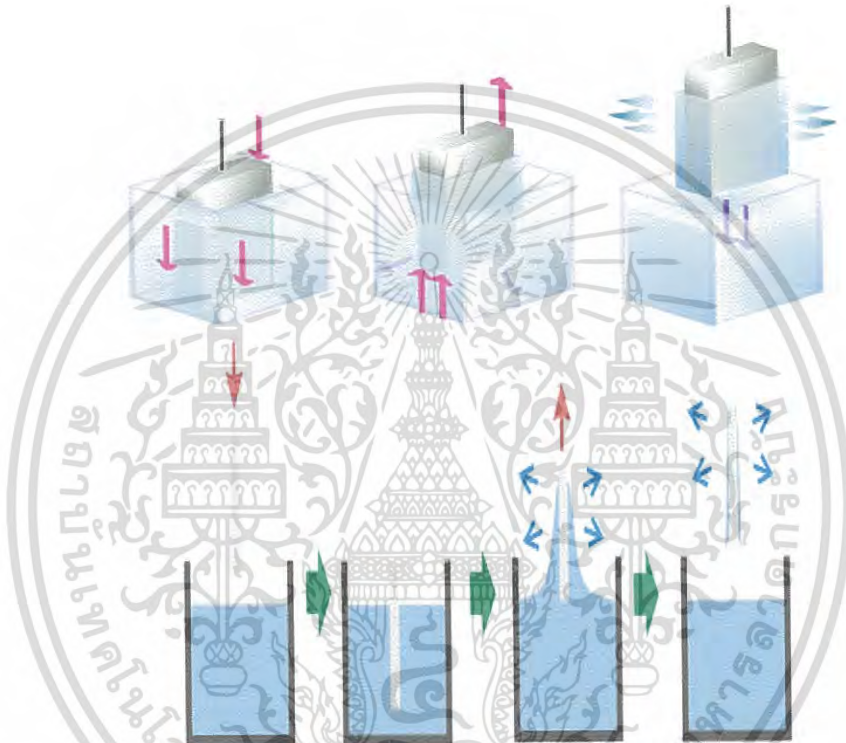
2.5.1 กระบวนการแบบแห้ง (Dry Process) เช่นการเคลือบแบบไอระเหยทางฟิสิกส์ หรือทางเคมี สปัตเตอริง รีแอคทีฟพลาสมาเลเซอร์

2.5.2 กระบวนการเคลือบแบบเปียก (Wet Process) เช่น ไมโครอาร์ค-ออกซิเดชัน ไฮโดรเทอร์มอล และ เทคนิคแบบโซล-เจล โดยการเคลือบจุ่มหรือการเคลือบแบบสปินอาจทำให้ได้ฟิล์มที่เคลือบผิวบนวัสดุรองเคลือบเพียงด้านเดียวหรือสองด้าน เทคนิคการเคลือบโดยการเตรียมแบบโซล-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจล และการเคลือบแบบจุ่มเคลือบเป็นเทคนิคที่ราคาไม่สูงและกระบวนการเตรียมที่ง่ายเหมาะสำหรับการเตรียมฟิล์มสองหน้าดังนั้นก็มีความเหมาะสมสำหรับเคลือบฟิล์มสองหน้าและเหมาะแก่การปรับปรุงสมบัติฟิล์มในภายหลังการเคลือบ

2.5.2.1 เทคนิคการจุ่มเคลือบ (Dip-Coating Method)

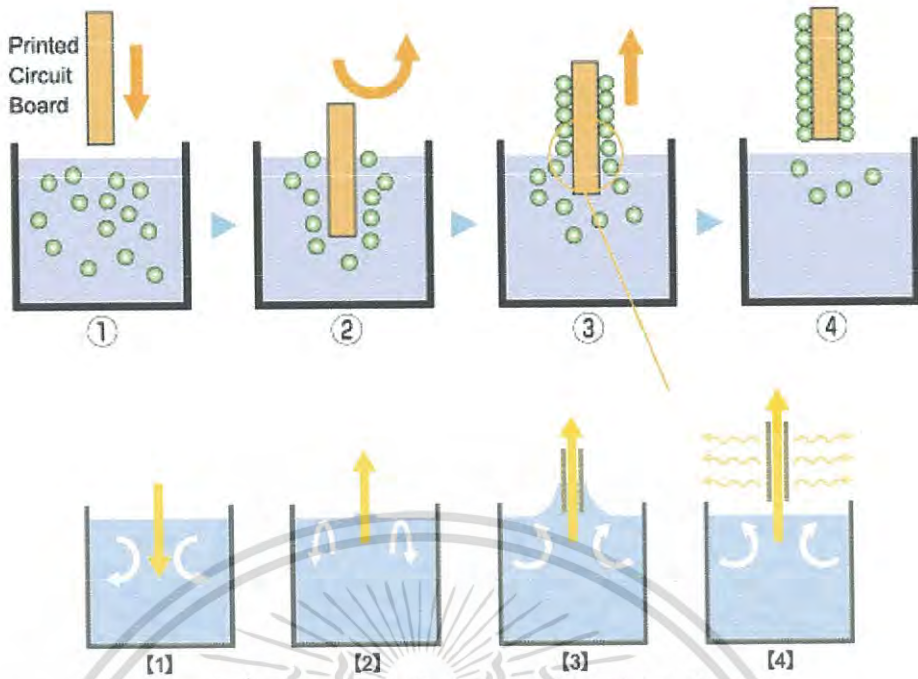
การจุ่มเคลือบ (Dip-coating) เป็นวิธีเคลือบที่ได้สะดวกและรวดเร็วเนื่องจากมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อนทำให้เหมาะสำหรับการเคลือบผลิตภัณฑ์อาหารที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่และต้องการใช้ประโยชน์จากสารเคลือบอย่างเต็มที่ เช่นการจุ่มเคลือบสารเคมีลงบนฟิล์มบางหรือกระจก เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการเคลือบฟิล์มแบบจุ่มเคลือบ

ในกระบวนการจุ่มเคลือบแผ่นรองรับจะถูกจุ่มลงไปในสารละลายแล้วถูกดึงขึ้นจากสารละลายโดยควบคุมความเร็วโดยทั่วไปแล้วความหนาในการเคลือบจะเพิ่มขึ้นโดยแผ่นรองรับจะถูกดึงในความเร็วที่เร็วขึ้นความหนาของฟิล์มจะถูกกำหนดโดยความสมดุลของแรงที่จุดเฉื่อยชา หรือจุดหยุดนิ่ง (Stagnation) บนผิวของเหลวความเร็วในการดึงที่เร็วขึ้นผิวของแผ่นรองรับจะดึงของเหลวได้มากขึ้นก่อนที่จะไหลกลับลงไปในสารละลายความหนาที่ได้จะเป็นผลมาจากความหนืดของของเหลว ความหนาแน่นของของเหลว แรงตึงผิว และความเร็วในการดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

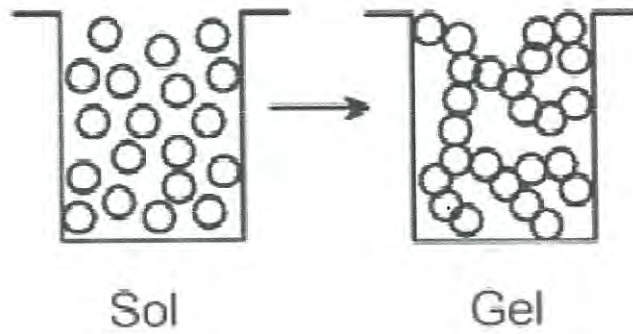


รูปที่ 2.4 กระบวนการเคลือบฟิล์มแบบจุ่มเคลือบ

2.5.2.2 เทคนิคการโซล-เจล (Sol-Gel Process)

เทคนิคโซลเจลเป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการเกิดพันธะทางเคมีหรือการเกาะตัวกันของสารตั้งต้นในระดับโมโนเมอร์ เทคนิคนี้เป็นที่รู้จักครั้งแรกในปี 1800 เทคโนโลยีโซลเจลเริ่มใช้อัลคอกไซด์ในปี 1846 เป็นเวลาร้อยกว่าปีแล้วที่ได้มีความสนใจการเคลือบชั้นออกไซด์หลักการเตรียมสารแขวนลอยในรูปของโซลเจลอย่างไรก็ตามการพัฒนาเทคนิคโซลเจลก็เพิ่งเริ่มสนใจพัฒนาอย่างรวดเร็วไม่กี่สิบปีนี้ โดยเฉพาะการเตรียมสารละลายไอออนโลหะ เช่น อัลคอกไซด์, เกลือในรูปของสารอินทรีย์ (Inorganic salts), เกลือของโลหะอินทรีย์ (Metallo-Organic salts) ในแอลกอฮอล์ที่เป็นตัวทำละลายที่เหมาะสม และเป็นเทคนิคที่กำลังถูกพัฒนาเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุเซรามิก และเป็นตัวอย่างของการเตรียมโลหะออกไซด์ (Metal oxide) โดยเกิดผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของสารประกอบอินทรีย์โลหะเริ่มที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามักจะใช้โลหะแอลคอกไซด์ (Alkoxide) ในสารละลายแอลกอฮอล์ (Alcoholic Solution) ผลที่ได้คือ ไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) การรวมตัวของโมเลกุลไฮดรอกไซด์โดยการกำจัดน้ำออกจะทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของโลหะไฮดรอกไซด์ เมื่อสปีชีส์ (Species) ของไฮดรอกไซด์เชื่อมต่อกันแล้วจะทำให้เกิดเป็นเจลคือการเปลี่ยนจากโซล (Sol) เป็นเจล (Gel) ดังรูปที่ 2.5 และเป็นเจลแน่นที่มีรูพรุน (Porous Gel) ซึ่งกระบวนการทั้งหมดจะผ่านขั้นตอนของการทำให้เกิดสารแขวนลอยที่มีอนุภาคเล็กมาก โดยที่แรงที่กระทำกับโมเลกุลส่วนใหญ่เป็นแรงแวนเดอร์วาล์ว (Vander Waal's Force)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนสถานะจาก Sol ไปเป็น Gel

โดยทั่วไปกระบวนการเกิดโซลเจล คือ การเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า โซล ซึ่งอยู่ในรูปของคอลลอยด์ที่มีอนุภาคประมาณ 0.1 – 1 ไมโครเมตร ไปเป็นสารที่จับตัวกันแข็งเป็นร่างมีความหนืดสูงซึ่งเรียกว่า เจล

โซลเป็นคอลลอยด์ของเหลวที่เกิดจากของแข็งแขวนลอยอยู่ในของเหลวคอลลอยด์บางชนิดจะเปลี่ยนสภาพกลับไปมาระหว่างโซลกับเจลได้ขึ้นอยู่กับสภาวะ เช่น อุณหภูมิ

เจลเป็นคอลลอยด์ของแข็งที่เกิดจากของแข็งแขวนลอยอยู่ในของเหลวซึ่งเป็นโครงข่ายเชื่อมโยง 3 มิติของของแข็งที่มีความพรุนที่กระจายปกคลุมอยู่ทั่วเฟสของเหลว เมื่อผ่านการกำจัดทำละลาย (Solution) และทำให้แห้งที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผงโลหะออกไซด์ที่มีลักษณะที่ดี

กระบวนการเตรียมแบบโซลเจล (Sol-Gel) เป็นกระบวนการเตรียมเชิงเคมีแบบเปียก (Wet Process) ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพและนอกจากนี้ยังสามารถนำไปดัดแปลงประยุกต์ใช้งานในการผลิตวัสดุได้หลายรูปแบบ เช่น การผลิตเป็นวัสดุเซรามิกโดยการทำให้กลายเป็นเจลและนำไปให้ความร้อน การผลิตเป็นแผ่นฟิล์มบางเคลือบผิววัสดุ โดยการจุ่มวัสดุที่ต้องการเคลือบลงในโซล และนำไปให้ความร้อนจนกลายเป็นแผ่นฟิล์มที่มีความหนาแน่นมากขึ้น (Dense Film) การผลิตเป็นเส้นใยเซรามิก (Ceramic Fiber) โดยการดึงยึดภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูงหรือการผลิตเป็นผงขนาดเล็กและสม่ำเสมอ

2.5.2.2.1 กระบวนการเกิดโซลเจล

1. ขั้นตอนเตรียมโซล

การเตรียมโซลสามารถทำได้โดยการผสมสารตั้งต้นชนิดต่างๆ ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร ในปริมาณที่เหมาะสมลงในสารละลายที่เหมาะสมแล้วทำให้อนุภาคเหล่านี้กระจายตัวอยู่ในสารละลายมีสภาพคอลลอยด์อย่างเสถียร สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซลเจล เป็นสารประกอบโลหะหรือกึ่งโลหะที่ถูกล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เช่น โลหะอัลคอกไซด์ที่อยู่ในแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม โลหะอัลคอกไซด์เหล่านี้มีสูตรทั่วไปว่า $M(OR)_4$ หรืออาจได้มาจากแอลกอฮอล์ (ROH) ที่มี R เป็นสารในกลุ่มแอลซิลที่มีโลหะ M เข้าไปแทรกอยู่ที่ไฮดรอกซิลโปรตอน

2. ขั้นตอนการเกิดเจล

การเกิดเจลเป็นขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโดยระเหยของเหลวออกไปบางส่วนหรือปล่อยให้เวลานานเพื่อให้เกิดโครงสร้างโครงข่ายของอัลคอกไซด์ต่อเนื่องในสามมิติโดยมีลักษณะคล้ายกับกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) จากกระบวนการนี้ส่งผลให้โซลมีความหนืดขึ้นเรื่อยๆ เกิดเป็นลักษณะมวลกึ่งแข็งกึ่งเจลสำหรับกระบวนการที่คล้ายการเกิดพอลิเมอร์นี้เป็นกระบวนการที่สำคัญที่คอยควบคุมการยึดเกาะกันขององค์ประกอบทางเคมีและช่วยป้องกันการแยกออกไปกองอยู่ที่ข้างใดข้างหนึ่งมากเกินไปด้วย

เมื่อพิจารณาการเกิดเจล (Gelation) พบว่าในการเกิดเจลนั้นจะอาศัยกลไกที่สำคัญ 2 กลไก คือ การแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) และกลไกการควบแน่น (Condensation) โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้

Hydrolysis:



Water Condensation:



Alcohol Condensation:



เมื่อ M คือโลหะที่มีเวเลนซ์เล็กน้อยเท่ากับ X

R คือหมู่อัลคิล (Alkyl Group) หรือหมู่อัลไครล (Aryl Group)

ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดโดยการเพิ่มเข้าไปของน้ำโดยหมู่อัลคอกไซด์ (OR) ถูกแทนที่ด้วยหมู่อไฮดรอกซี (OH) ลำดับต่อมาจึงเกิดปฏิกิริยารวมตัวโดยหมู่อซิลานอล (Si-OH) จะทำให้เกิดพันธะซิลอกเซน (Si-O-Si) ร่วมกับผลผลิตข้างเคียงที่ได้เป็นน้ำกับแอลกอฮอล์ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่โลหะอัลคอกไซด์สายสั้นๆ ถูกแยกสลายด้วยน้ำซึ่งโลหะอัลคอกไซด์ส่วนใหญ่มีความว่องไวต่อน้ำดังนั้นปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นอย่างรุนแรงเนื่องจากการคายความร้อนออกมามากเกินไปจึงต้องควบคุมให้มีการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ โดยการควบคุมความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาและค่า pH ของสารละลายให้เหมาะสมบางกรณีอาจเติมสารประกอบประเภทคีเลต (Chelating agent) ลงไปเพื่อลดความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยารวมตัวเนื่องจากลิแกนด์ที่เป็นสารคีเลต (Chelating ligand) จะสร้างพันธะกับอะตอมโลหะได้แข็งแรงจึงทำให้เกิดการแทนที่ได้ยากส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้ช้าลงสารระกอบคีเลตที่นิยมใช้ได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid) อะซิติกอะซิโตน (Acetylacetone) หรือเอมีน (Amine)

ปฏิกิริยาต่อมาเป็นการต่อสายโซ่โดยการเกิดผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้น (Oligomers) กลายเป็นเจลเมื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์โดยอาศัยการแยกสลายด้วยน้ำและการควบแน่นเกิดขึ้นและมีการเชื่อมต่อข้ามสายจนเกิดการพันกันเป็นโครงข่ายสามมิติจะทำให้สารผสมมีความหนืดสูงขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าสู่สภาพเป็นเจลซึ่งจะได้สารที่มีลักษณะเป็นโซล และเป็นเจลตามลำดับจากปฏิกิริยาที่เกิดจะทำให้สารผลิตภัณฑ์อื่นร่วมด้วยสารผลิตภัณฑ์อื่นมักเป็นพวกอะลิฟาติกแอลกอฮอล์ (Aliphatic alcohol) ซึ่งเราสามารถขจัด

ออกโดยการนำไปประเหยแต่สารผลิตภัณฑ์ร่วมจำพวกซิลิกอนและฟอสฟอรัสอัลคอกไซด์จะยากแก่การระเหย

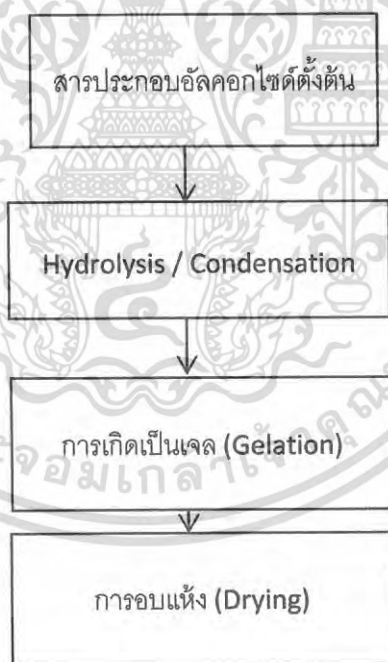
3. ขั้นตอนการระเหยของเหลว

กระบวนการต่อมาคือการระเหยของเหลวที่อยู่ในตัวเจล (Dehydration) ความแข็งแรงของตัวเจลจะช่วยให้สามารถรักษาความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุลให้คงอยู่ได้ นอกจากนี้การกำจัดของเหลวออกจากเจลภายใต้สภาวะวิกฤตยิ่งยวดยิ่ง (Supercritical)

หรือสภาวะวิกฤตเกิน (Hypercritical) นั้นแทบจะไม่ทำให้การหดตัวเกิดขึ้นเลย เจลที่แห้งแล้วจึงไม่มีการแน่นตัวเกิดขึ้นทำให้มีความเปราะจึงสามารถบดย่อยให้กลายเป็นผงละเอียดได้ง่าย

4. ขั้นตอนการเผาเจล

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการเผาเจลที่ปราศจากน้ำให้กลายเป็นสารประกอบที่ต้องการจัดแบ่งประเภทของวิธีการเตรียมแบบโซลเจลนั้นสามารถกระทำได้โดยพิจารณาจากการเลือกโซลหรือสารละลายมาใช้เป็นสารตั้งต้นข้อดีของเทคนิคโซลเจลคือ มีการรวมกันของทุกโมเลกุลเป็นเนื้อเดียวกันสารประกอบที่ได้จึงมีความบริสุทธิ์สูงมีขนาดอนุภาคเล็กมากอยู่ในช่วงประมาณ 20 ถึง 50 นาโนเมตร ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวหน้ามากกว่าการเผาจึงสามารถกระทำได้โดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าในกรณีของผงที่เตรียมได้จากวิธีการเตรียมเชิงกลแบบดั้งเดิม การจัดแบ่งประเภทของวิธีการเตรียมแบบโซลเจลนั้นสามารถกระทำได้โดยพิจารณาจากการเลือกโซลหรือสารละลายมาใช้เป็นสารตั้งต้น



รูปที่ 2.6 แผนภาพขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีโซลเจล

2.6 เครื่องมือเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม

2.6.1 เครื่องชั่งสารแบบละเอียด

เครื่องชั่ง (balance) เป็นเครื่องมือพื้นฐานที่พบได้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการใช้ในการชั่งสารให้ได้ปริมาณตามต้องการโดยส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะเป็นเครื่องชั่งแบบไฟฟ้า แสดงผลเป็นตัวเลข เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความละเอียดของการชั่ง 0.01 ถึง 0.00001 กรัม บริษัทผู้ผลิตมีหลายรุ่นหลายแบบให้เลือกที่คุ้นหน้าคุ้นตา ก็เป็นของ satories Precision และ mettler



รูปที่ 2.7 เครื่องชั่งสารแบบละเอียด

2.6.2 เครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน

คุณสมบัติของเครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน

- เป็นเครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็ก พร้อมให้ความร้อนในเครื่องเดียวกัน
- การปรับอุณหภูมิและความเร็วรอบในการกวนเป็นแบบปุ่มหมุนแยกกัน
- เป็นเครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็ก ชนิดกวนสารได้ปริมาตร 10 ลิตร
- การปรับความเร็วรอบในการกวนสารแบบปุ่มหมุนเพียงปุ่มเดียวตั้งแต่ 100-1,500 รอบต่อนาที โดยมีหน้าปัดเป็นสเกล 1-6
- มีมอเตอร์ขนาด input/output 15/1.5 W
- มีเตาให้ความร้อนขนาด 1000 W
- ให้ความร้อนได้ตั้งแต่ 50-500°C โดยมีปุ่มปรับความร้อนโดยมีหน้าปัดเป็นอิเล็กทรอนิกส์ (digital)
- มีความแม่นยำในการให้อุณหภูมิในของเหลว $\pm 10K$
- แผ่นให้ความร้อนทำด้วย เซรามิกแก้ว มีขนาด 180x180 มิลลิเมตร ซึ่งป้องกันสารเคมี (chemical resistance)
- สามารถใช้กับอุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิในสารตัวอย่างได้ คือ ETS-D5 หรือ ETS-D6
- มีระบบป้องกันเพื่อความปลอดภัย (Safety circuit) ตั้งค่าให้ตัดไฟได้เมื่ออุณหภูมิถึง 550°C ซึ่งไม่สามารถปรับค่าได้
- มีระบบเตือนแผ่นให้ความร้อนยังคงร้อนอยู่หลังจากเครื่องปิดไปแล้ว
- ควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ เพื่อความแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 เครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน

2.6.3 ระบบเคลือบฟิล์มแบบจุ่มเคลือบ

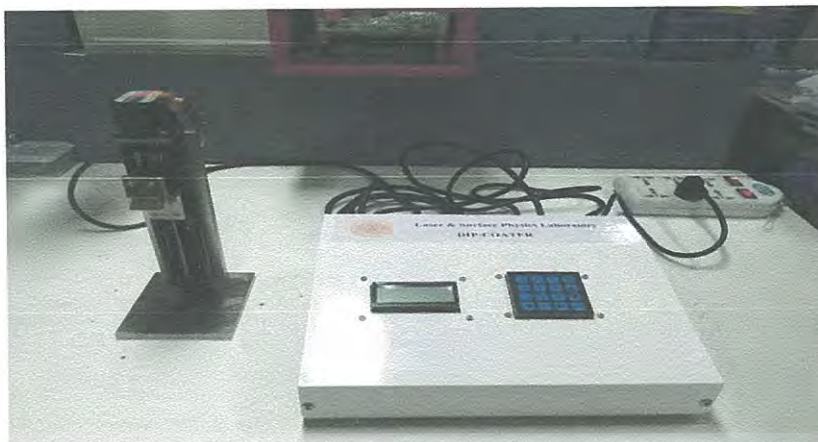
ระบบเคลือบฟิล์มแบบจุ่มที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นเครื่องที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.9 โดยการทำงานของระบบนั้นเป็นการควบคุมสเป็มอเตอร์ด้วยคอนโทรลเลอร์ผ่านชุดขับมอเตอร์ (Driver) และสั่งงานผ่านทางคีย์แพดพร้อมแสดงผลออกทางแอลซีดีส่วนประกอบภายในประกอบไปด้วย

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 5 v, 12 v และ 24 v
2. วงจรขับมอเตอร์ (Driver)
3. ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51



รูปที่ 2.9 โครงสร้างภายในของระบบเคลือบจุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ระบบเคลือบฟิล์มแบบจุ่มเคลือบ

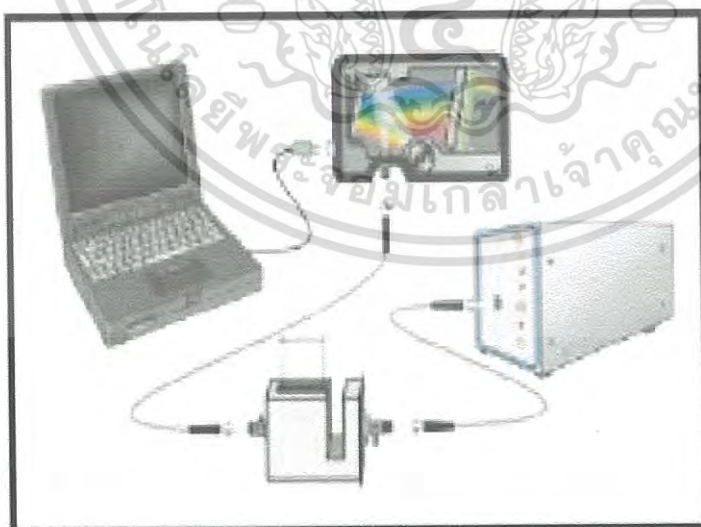
2.7 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

2.7.1 เครื่องมือวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Uv-Vis Transmission Spectroscopy)

การตรวจวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงฟิล์มบางซึ่งค้อออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมในโครงงานพิเศษนี้ทำได้โดยการวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Ocean Optics รุ่น USB-4000 แสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งทำการตรวจสอบในช่วงความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตร จากข้อมูลการส่องผ่านของแสงของฟิล์มบาง สามารถนำไปวิเคราะห์ค่าความหนา ดัชนีหักเหของแสง สำหรับฟิล์มบางสามารถใช้วิธีสวานโปเอล (Swanpoel) ได้อีกด้วย

Controller

USB 2000



Light source

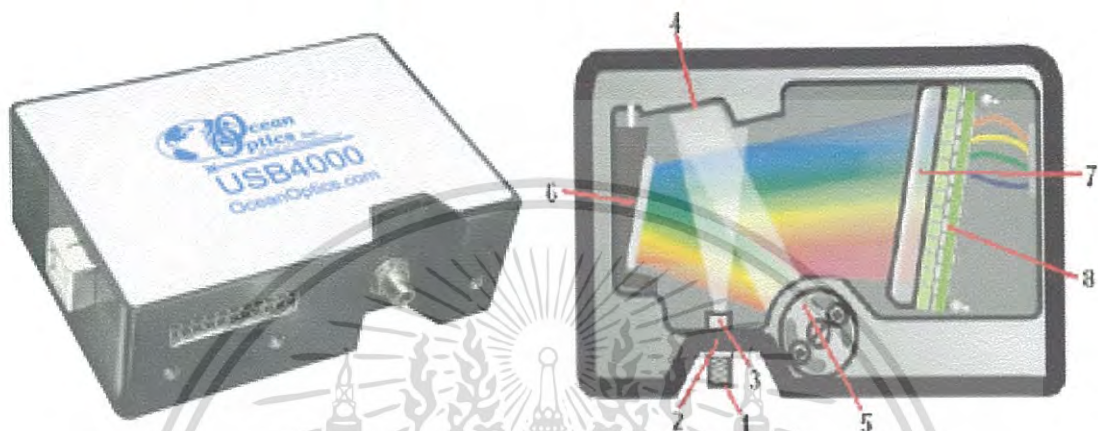
Absorption

รูปที่ 2.11 องค์ประกอบพื้นฐานของการเซ็ทเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งพื้นฐานควรมี 5 องค์ประกอบดังนี้

- 1) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ Spectrophotometer unit
- 2) แหล่งกำเนิดแสง Light Source
- 3) ที่วางตัวอย่าง Sample Holder
- 4) สายใยแก้วนำแสง Fiber Optics
- 5) คอมพิวเตอร์ Computer

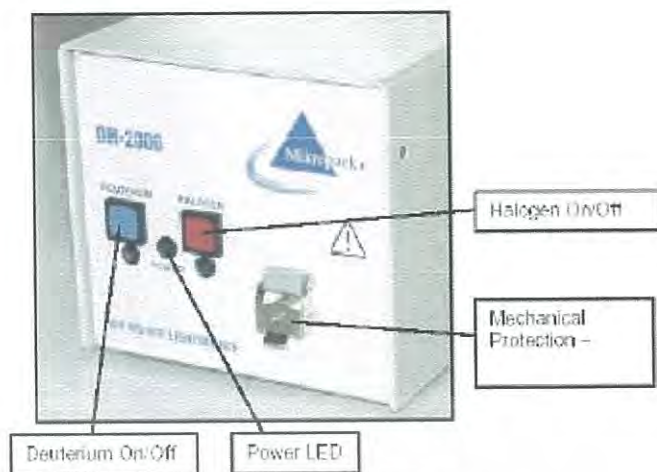


รูปที่ 2.12 เครื่อง Spectrometer unit

ส่วนประกอบ

1. SMA connector
2. Slit
3. Filter
4. Collimating mirror
5. Grating
6. Focusing mirror
7. L2 detector and protecting
8. CCD Detector (UV-Vis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



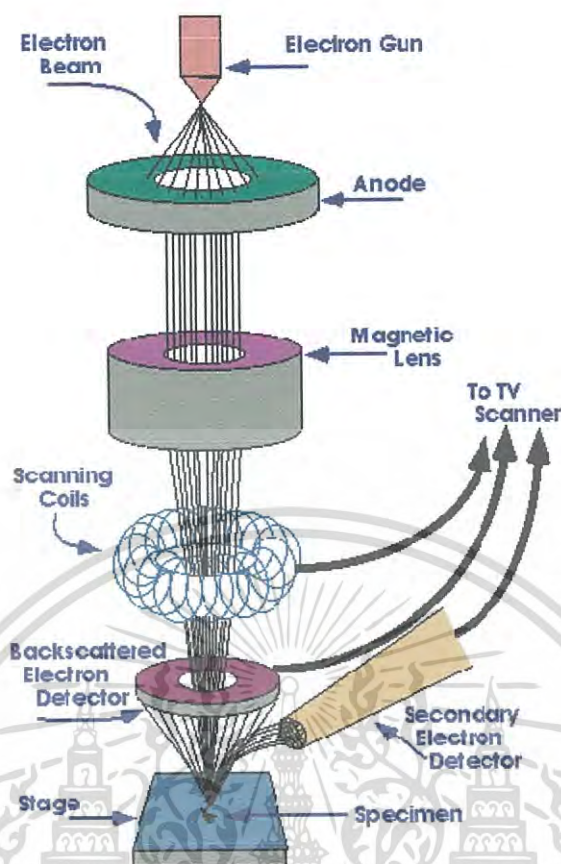
รูปที่ 2.13 เครื่อง Light source

แหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงออกมาในช่วง UV-Visible ในอุปกรณ์ชุดนี้จะแก้ปัญหาที่มีในแหล่งกำเนิดแสงแบบทั่วไป คือ การทำให้ปริมาณของแสง UV (จาก deuterium lamp) นั้นมีความเข้มที่ใกล้เคียงกับในช่วง Visible (จาก Halogen lamp) ทำให้การวัดได้ข้อมูลที่ดีขึ้น-ให้เปิดเครื่องและแสดงให้เห็นแสงที่ออกมาจาก lamp แต่ละแหล่งกำเนิด และ ทั้งสองแหล่งกำเนิด-แสดงให้เห็นถึงการควบคุมปริมาณแสงโดยใช้ FVA fiber optic attenuator-แสดงถึงการเลือกค่า excitation wavelength

2.7.2 เครื่องมือวิเคราะห์เชิงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

Scanning Electron Microscope เรียกโดยย่อว่า SEM หรือในภาษาไทยเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้อิเล็กตรอนในการสร้างภาพขยายเช่นเดียวกับเครื่อง Transmission Electron Microscopy (TEM) แต่มีความแตกต่างในรายละเอียดของกระบวนการในการสร้างภาพอย่างมาก เครื่อง SEM เครื่องแรกประดิษฐ์ในช่วงทศวรรษที่ 1960 จากนั้น เครื่อง SEM ก็ค่อยๆกลายเป็นเครื่องมือที่นำไปประยุกต์ใช้แพร่หลายทั่วไปทั้งในด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี การแพทย์ อุตสาหกรรม นิติวิทยาศาสตร์ โบราณคดี และอื่นๆอีกหลายด้านซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้ Electron Gun จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสให้เข้มข้นและเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงโดย Condenser Lens จากนั้นจะถูกโฟกัสให้ตกลงบนผิวตัวอย่างโดย Objective Lens ซึ่ง ณ ตอนนี อิเล็กตรอนที่ตกลงบนผิวตัวอย่างจะเป็นเพียงจุดที่เล็กมาก Scan Coil จะควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนให้กวาดจากซ้ายไปขวา เมื่อสุดก็เลื่อนลงอีกชั้นและกวาดจากซ้ายไปขวาอีกครั้ง เป็นเช่นนี้จนครบเฟรม การกวาดลำอิเล็กตรอนเช่นนี้เรียกว่า Raster scan และเมื่อครบเฟรม แล้วก็จะไปเริ่มสแกนที่จุดแรกใหม่ ในการกวาดลำอิเล็กตรอนในแต่ละเฟรม จะถูกกำหนดจำนวนจุดและแถวไว้อย่างแน่นอน โดยในภาพตัวอย่าง 1 เฟรม ตามเส้นตามแนวนอนจะประกอบด้วยจุด 1000 จุด ละมีทั้งหมด 1000 เส้น ที่ผิวตัวอย่างที่อิเล็กตรอนตกใส่ จะเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนขึ้นหลายรูปแบบ ซึ่งคล้ายกับการที่แสงตกกระทบวัตถุและสะท้อนออกจากผิววัตถุ ในที่นี้ถ้ากล่าวอย่างง่าย ๆ ว่าถ้าผิวตัวอย่างเรียบก็จะให้สัญญาณสะท้อนอิเล็กตรอนได้ดี แต่ถ้าผิวตัวอย่างเป็นหลุมลึกก็จะมีสัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือให้ได้น้อย ซึ่งเราสามารถรับสัญญาณได้โดยใช้ตัวตรวจจับที่เหมาะสมกับชนิดของสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะนำมาขยายให้มีความแรงที่เหมาะสมแล้วนำมาสร้างเป็นภาพ ถ้าเราใช้หลอดรังสีแคโทด (Cathod ray tube , CRT) เพื่อแสดงภาพ ในหลอดรังสีแคโทดจะมีการสร้างอิเล็กตรอน และถูกบีบให้เป็นลำเล็กๆ แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าในกล้องของเครื่อง SEM มาก กล่าวคือ ในเครื่อง SEM ลำอิเล็กตรอนมีขนาดศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร แต่ในจอภาพมีขนาดศูนย์กลางประมาณ 0.1 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของลำอิเล็กตรอนของเครื่อง SEM ต่อ จอภาพจะพบว่าห่างกันถึง 20000 เท่า ทำให้เกิดเป็นอัตราส่วนของกำลังขยายที่จะทำให้ภาพที่รายละเอียดได้ดีซึ่งจะได้กล่าวต่อไป การสแกนในจอภาพจะถูกควบคุมให้มีการสแกนแบบ Raster scan พร้อมๆกับการสแกนของลำอิเล็กตรอนในกล้อง ขณะเดียวกันความสว่างของจุดอิเล็กตรอนในจอภาพจะขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณจาก Amplifier ที่ขยายสัญญาณจากตัวตรวจจับ รับสัญญาณอิเล็กตรอนในกล้อง ถ้าสัญญาณแรงก็จะให้ความสว่างของลำอิเล็กตรอนมากเมื่อส่งลงบนจอภาพก็จะปรากฏเป็นจุดสว่าง ในทางกลับกันถ้าสัญญาณเบาาก็จะได้จุดที่มีความสว่างน้อย บนจอก็จะปรากฏเป็นจุดสว่างน้อยด้วย บนจอภาพจะทำการเรียงจุดของสัญญาณที่ได้นี้เป็นแถวจนครบเฟรมก็จะได้เป็นภาพออกมา ถ้าบนจอภาพมีขนาดกว้างและยาวเป็น 20 เซนติเมตรและเรากำหนดการกวาดลำอิเล็กตรอนในกล้องให้ 1 เฟรมมีพื้นที่ขนาด กว้างยาวเป็น 20 เซนติเมตร ด้วยอัตราส่วนการขยายของภาพก็จะเป็น 1 เท่า แต่ถ้าเราให้การกวาดลำอิเล็กตรอนในกล้องเป็นพื้นที่ 1×1 เซนติเมตร ก็จะทำให้ขยายภาพเป็น 20 เท่า แต่ในความเป็นจริงขนาดของการสแกน 1 เฟรมในกล้องอาจควบคุมให้เล็กมากถึงระดับนาโนไมโครเมตรโดยที่การสแกนบนจอยังเท่าเดิม ดังนั้นการขยายจึงได้ถึงระดับหมื่นเท่าอิเล็กตรอนจาก Column ของเครื่อง SEM เราเรียกว่า Primary Electron เมื่อตกกระทบผิวตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายอย่างเกิดขึ้นแต่พอจะแบ่งเป็นกลุ่มได้สองกลุ่มคือ Inelastic scattering และ Elastic scattering ซึ่งมีส่วนประกอบพื้นฐานของ SEM ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM ที่เป็นจุดกำเนิดภาพ

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun)

อยู่ด้านปลายบนสุดของ Column ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงจาก 110 โวลต์ หรือ 220 โวลต์ เป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูงคือระหว่าง 1-30 กิโลโวลต์ ซึ่งเพียงพอสำหรับ SEM แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วยลวดโลหะ Tungsten ที่บิดเป็นรูปตัววี เรียกว่า Filament และล้อมด้วยโลหะรูปกรวย (Wehnelt cylinder) มีรูอยู่ปลายกรวยเมื่อกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 1000 โวลต์ จะไปเข้ามาสู่ Filament ลวดตัววีดังกล่าวก็จะมีความร้อนสูงประจุอิเล็กตรอนก็จะกระจายออกมาในสภาวะสุญญากาศภายใน Column ประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะถูกดึงดูดด้วยแผ่นขั้วบวก (Anode plate) ที่อยู่ด้านล่างของ Electron gun ประจุอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดึงผ่านรูของกรวยไปยังทิศทางที่กำหนด คือ บริเวณสนามแม่เหล็กที่สามารถรวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่มีอยู่ให้เป็นลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นเพียงพอสำหรับฉายลงบนตัวอย่าง Electron gun ซึ่งมี filament และ Wehnelt cylinder อยู่ภายในสามารถทำให้ขยับเขยื้อนได้ด้วยสกรูที่อยู่รอบๆด้านนอก Electron gun ทั้งนี้เพื่อปรับให้ Electron gun อยู่ในแนวตรงได้ ศูนย์กลางหรือตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของเลนส์สนามแม่เหล็กภายใน Column ใน SEM สมัยใหม่นอกจากจะมีปุ่มหรือสกรูที่ช่วยปรับ Electron gun ให้ได้ศูนย์แล้วยังมีขดลวดที่มีสนามไฟฟ้าบริเวณแผ่นขั้วบวกเพื่อจะช่วยปรับลำแสงอิเล็กตรอนให้อยู่ศูนย์กลางของ สนามแม่เหล็กในเลนส์ชุดแรกขดลวดดังกล่าวเรียกว่า Alignmentcoil ซึ่งสามารถควบคุมและปรับได้ตามต้องการโดยหมุนและปรับปุ่ม (Alignment knobs) บนแผงของ Console Unit เหตุที่ต้องปรับ Electron gun ก็เพื่อให้ลำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์เป็นรูปทรง กระบอกที่ไม่บิดเบี้ยวออกไปจากศูนย์กลางหากมีการบิดของลำแสงอิเล็กตรอนออกนอกทิศทางอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) บางส่วนจะถูกกั้นออกไปซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron)

2. เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนพร้อมขดลวดขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอน (Electromagnetic Lens & Scan coil)

เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ลำแสงดังกล่าวไปตกกระทบ บนผิวตัวอย่างและจะใช้สนามแม่เหล็กขับเคลื่อนหรือผลักให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณ รูปลี่เหลี่ยมจัตุรัส เลนส์แต่ละชุดมี Aperture ซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาวทองเหลืองมีรูปร่างต่างๆกัน (50-400 μm) และสามารถเปลี่ยนได้ตามขนาดที่ต้องการ Aperture ดังกล่าวมักจะจัดไว้ในเลนส์แต่ละชุดภายในบริเวณที่ไร้สนามแม่เหล็กของเลนส์ Aperture เหล่านี้ทำหน้าที่กำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่สนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้มีรูปกรวยที่สมมาตร Aperture ของเลนส์ชุดสุดท้ายก่อน ที่ลำแสงอิเล็กตรอนจะมาสัมผัสกับตัวอย่างเป็น Aperture พิเศษเรียกว่า Objective Aperture มีไว้เพื่อกรองลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวย ขนาดเล็กที่มีความสมมาตรที่สุดและกำหนดขนาดและปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบจุดต่างๆบนผิวตัวอย่างเพื่อให้ภาพที่มีความลึกมากกว่าปกติ ขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้กราดไปบนผิวของตัวอย่างชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์นี้เรียกว่า Scan coil ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้าและยังควบคุมการกราดของลำแสงที่เป็นเส้นในจอร์รับภาพ ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทาง และเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอน

3. ช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง SEM (Specimen Chamber)

เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้ายส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่างคือฐานวางตัวอย่างและปุ่มควบคุม โดยใช้เฟืองขนาดต่างๆเพื่อเลื่อนไปมาภายในช่องตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทางฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า Goniometer stage

4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector & Scintillator)

เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมลทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอะลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุบวกขนาด 30-250 โวลต์ เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

5. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (Imaging & Photographic devices)

ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอภาพก็พร้อมที่จะทำการบันทึกอุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อลำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นแสงไฟฟ้าการสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภทท่อลำแสงในลักษณะของแสงแสงที่ผ่านท่อแท่งแก้วนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (Photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงแสงชนิดโฟตอนนี้ไปอิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพที่ติดตั้งไว้บน Console unit

2.7.3 การวิเคราะห์สภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe)

ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของแท่งสารกึ่งตัวนำ สามารถทำได้โดยง่าย ในกรณีที่สามารถเตรียมให้แท่งสารนั้น มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมพื้นที่หน้าตัด A มีขนาดยาว l และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สำคัญก็คือ ต้องทำขั้วไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งสารให้สมบรูณ์เป็นรอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลโดยตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของแท่งสาร ซึ่งกรณีนี้ เมื่อวางความต่างศักย์แก่แท่งสารนี้ V โวลต์ และวัดกระแสที่ไหลผ่านแท่งสาร I จะได้ว่า

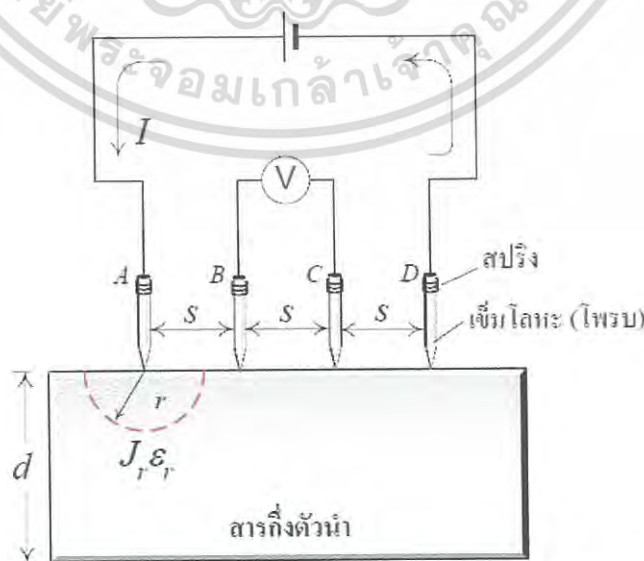
$$J = \sigma \cdot \varepsilon$$

$$\frac{I}{A} = \frac{l V}{\rho l}$$

ดังนั้น สภาพต้านทาน หรือ Resistivity $\rho = \frac{A V}{I \cdot l}$ (2.1)

ซึ่งเมื่อแทนค่าต่างๆลงไปในสมการที่ (2.9) เราสามารถคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของสารได้ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้ว ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถแยกสารกึ่งตัวนำออกมาจากแผ่นผลึก ในสภาพที่เป็นรูปทรงแท่งสี่เหลี่ยมได้ และการทำจุดสัมผัสโอห์มิกที่ปลายของแท่งผลึกให้สม่ำเสมอก็ทำได้ยาก และเมื่อทำรอยสัมผัสแล้วสารกึ่งตัวนำนั้นก็ไม่สามารถนำไปใช้งานอื่นได้อีก รวมทั้งการกำหนดขนาดความยาวหรือพื้นที่หน้าตัดให้แน่นอนก็ทำได้ยาก ดังนั้นการวัดด้วยวิธีการนี้จึงเป็นปัญหาและไม่นิยมกัน วิธีที่ได้รับความนิยมสูงคือ “วิธีฟร็อยท์โพรบ” (Four point probe) หรือ “เข็ม 4 จุด” ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ทำการวัดได้ง่ายและสะดวก สามารถวัดได้ทุกขนาดของแท่งสารไม่ว่าจะมีขนาดรูปร่างอย่างไร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไม่จำเป็นต้องทำรอยสัมผัสโอห์มิก จึงไม่สิ้นเปลืองวัสดุอีกด้วย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและทดลอง ประกอบด้วยเข็มโลหะจำนวน 4 เข็ม มีปลายแหลม และอาจมีสปริงช่วยให้ปลายของเข็มถูกกดลงสามารถสัมผัสกับระนาบผิวหน้าด้านที่ขัดมันของชิ้นสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี เข็มทั้ง 4 อยู่ห่างกันเป็นระยะ s เท่าๆกัน ซึ่งในทางปฏิบัติทั่วไป $S = 0.5 - 1$ มม. ดังแสดงในรูปที่ 9.2 และอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน ในการวัดจะเริ่มจากการปล่อยกระแสคงที่เข้าที่เข็มด้านนอกสุดคือเข็ม A และ D ทำให้มีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำไปยังเข็ม D จึงเกิดมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสารและถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำค่ากระแสคงที่ I และแรงดัน V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้

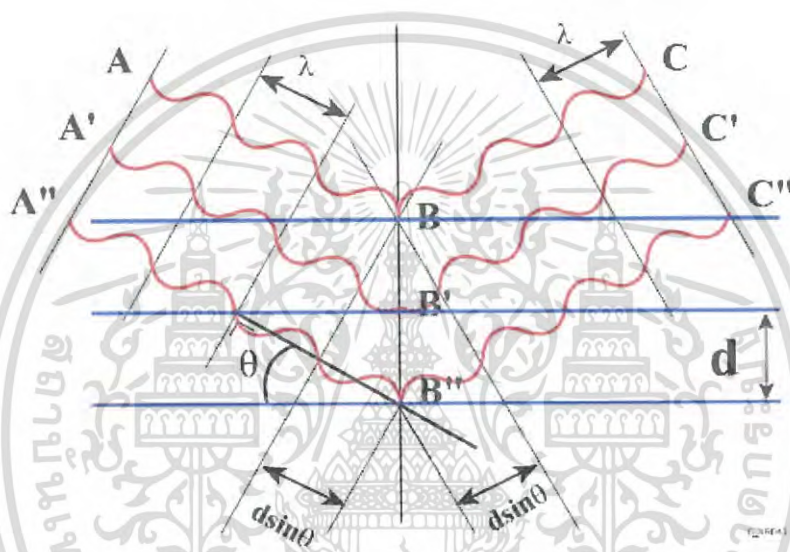


รูปที่ 2.15 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีฟร็อยท์โพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 เครื่องมือวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction XRD)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่างซึ่งวัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นเส้นระนาบเส้นตรงขนานกันแต่ระยะห่างจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึกจะเป็นไปตามกฎของ Bragg ดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.16 กฎของ Bragg

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.2)$$

ซึ่งการเกิดรังสีเอ็กซ์จะถูกสร้างขึ้นภายในหลอดปิดซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยให้กระแสไฟฟ้าได้แก่ เส้นลวดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่อยู่ในหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูงทำให้เคลื่อนที่เส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดด้วยความเร็วสูงเข้าชนขั้วแอโนดซึ่งโดยทั่วไปทำจากโลหะทองแดงอิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมทองแดงหลุดออกไปจึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้นเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L- และ M-Shell) เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้นโดยการคายรังสีเอ็กซ์ออกมา รังสีเอ็กซ์ที่คายออกมาจะผ่านออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ไปยังสารตัวอย่างและรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์สมการที่ (2.1) เรียกว่า กฎของแบรกก์ ในทางผลึกวิทยา (Crystallography) สามารถมองผลึกว่าประกอบด้วยระยะห่างของอะตอมต่างๆโดยระบุระยะห่างด้วยสัญลักษณ์ (hkl) ซึ่งค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) เป็นเลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 0,1,2,... ระยะห่างระหว่างระนาบในชุดเดียวกันขึ้นอยู่กับดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และค่าคงที่ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึก ($a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกจะมีต่างกันไปตามระบบผลึกแบบต่างๆในกรณีอย่างง่าย เมื่อพิจารณาผลึกที่มีโครงสร้างแบบคิวบิก (Cubic) ซึ่งมีค่าคงที่โครงสร้างผลึกดังนี้ $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.3)$$

จากสมการ (2.2) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการ (2.3) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกดังสมการ

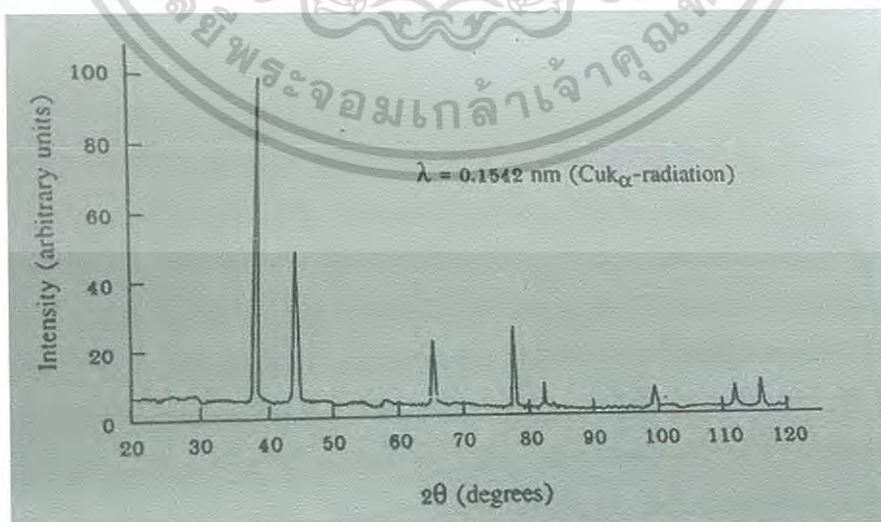
$$\frac{1}{d^2} = \frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ a คือ ค่าคงที่แลตทิซ

λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

ระนาบต่างๆในผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไประนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) มุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของมุมสะท้อนเมื่อฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นมาไปวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆจะถูกตรวจหาค่าทั้งสองนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์มบาง กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า แบบอย่างการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน เมื่อได้ข้อมูลที่กล่าวมาแล้วก็จะสามารถคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

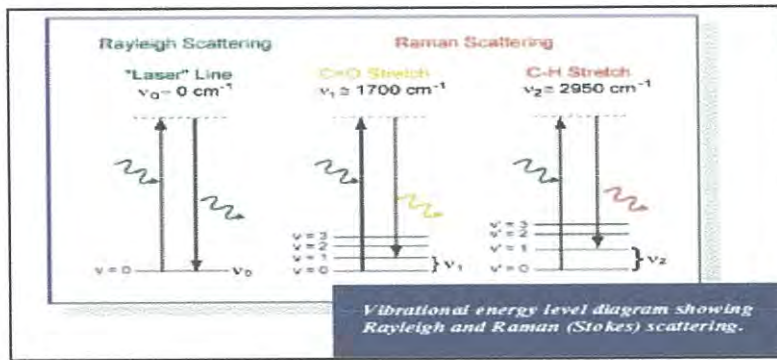
2.6.5 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างส่วนประกอบของธาตุเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

รามานเป็นปรากฏการณ์ในการกระเจิงของแสงรูปแบบหนึ่ง ที่เกิดจากการที่แสงตกกระทบวัตถุ และ ส่งผลทำให้โมเลกุลของสารถูกกระตุ้นให้อยู่ในสถานะเร้า (หากพิจารณาให้ลึกซึ้งเข้าไปในระดับโมเลกุล ก็คือการทำพันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลถูกชักนำให้มีสภาพขั้วหรือ polarizability เปลี่ยนแปลงไป) และเมื่อโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นพยายามที่จะกลับคืนสู่สถานะปกติซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า (และไม่มี dipole moment ในพันธะเคมี) ก็จะทำให้เกิดการกระเจิงแสง (scattered light) ออกมา ดังรูปที่ 2.19



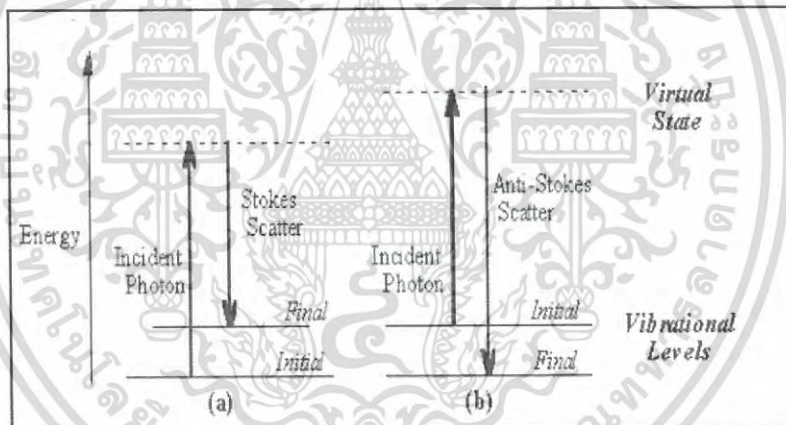
รูปที่ 2.19 การกระเจิงแสงที่ตกกระทบวัตถุ

ซึ่งการกระเจิงแสงดังกล่าวข้างต้น จะมีทั้งกระบวนการกระเจิงแสงแบบ elastic process (พลังงานแสงคงที่) และกระบวนการกระเจิงแสงแบบ inelastic process (ที่แสงที่กระเจิงออกมามีพลังงานหรือความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นเริ่มต้นของแสงที่ตกกระทบ) ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กระบวนการกระเจิงแสงในแบบ Rayleigh scattering และแบบ Raman scattering

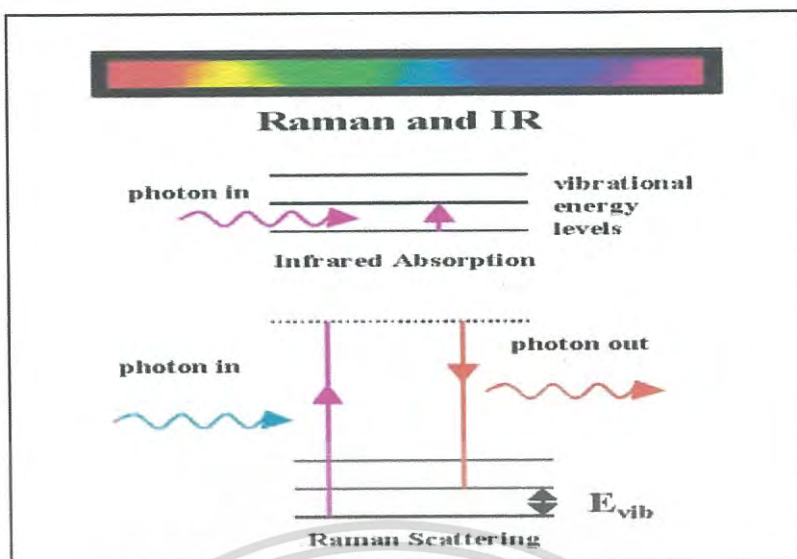
ส่วนใหญ่แล้วแสงที่ตกกระทบจะเกิดการกระเจิงแสงแบบ Rayleigh scattering ซึ่งเป็นกระบวนการแบบ elastic process ในขณะที่เพียง 1 ใน 10⁶ ของแสงที่ตกกระทบจะเป็นแบบ รามาน หรือเป็นกระบวนการ แบบ Inelastic process โดยที่พลังงานแสงเปลี่ยนแปลงไปนั้นอาจจะ เป็นได้ทั้งแบบเพิ่มขึ้น [anti-stoke scatter] หรือลดลง [stoke scatter] ดังรูปที่ 2.22 และส่วนใหญ่ จะเกิดแบบ stoke scatter ง่ายกว่า



รูปที่ 2.21 การกระเจิงแสงแบบ stroke และ anti-stroke

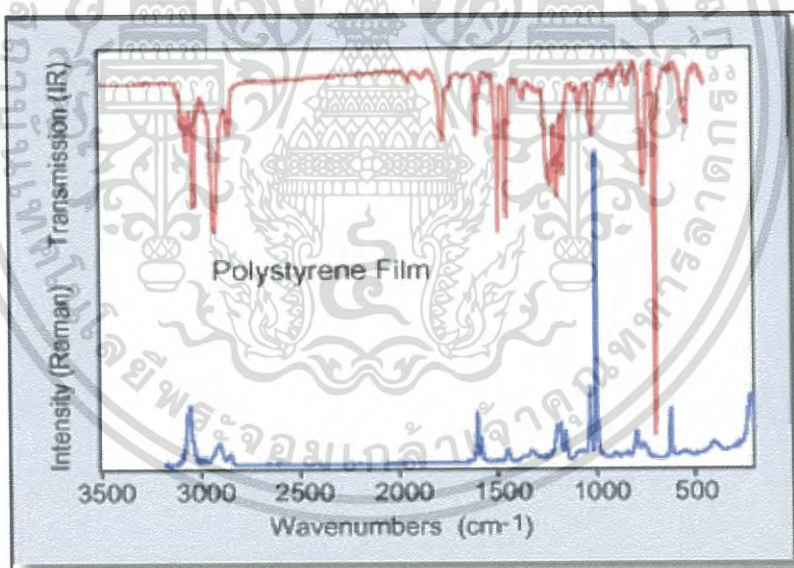
แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากการกระเจิงในแบบรามานนี้ ก็มีประโยชน์มากในการนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์พอลิเมอร์ (และนิยมใช้เสริมกับเทคนิคอินฟราเรด) สิ่งที่น่าสนใจในส่วนของการกระเจิงแบบรามาน ก็คือการที่ผลต่างของพลังงาน(หรือความถี่) ของแสง ที่ตกกระทบกับพลังงานแสงที่กระเจิง (เรียกว่า Raman shift) จะมีค่าตรงกันกับพลังงาน (หรือความถี่) ของพันธะในการสั่นของโมเลกุลที่วัดได้จากเทคนิคอินฟราเรด ดังรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 เปรียบเทียบพลังงานที่เกิดจากการการกระเจิงและการสั่นของพันธะในโมเลกุล

ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิครามาน จึงมีลักษณะคล้ายกันกับสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิคอินฟราเรด ดังตัวอย่างของสเปกตรัมพอลิสไตรีนในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 เปรียบเทียบสเปกตรัม FTIR และ Raman ของพอลิสไตรีน

อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากเทคนิคทั้ง 2 อาจจะแตกต่างกันบ้างในบางประเด็น กล่าวคือพีคบางพีคจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้จากสเปกตรัมอินฟราเรด แต่จะสามารถสังเกตเห็นได้ในสเปกตรัมรามาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของเทคนิครามาน

1. เนื่องจากปรากฏการณ์รามานเป็นกระบวนการกระเจิงของแสง ดังนั้น สารตัวอย่างที่ใช้อาจจะ มีรูปทรงหรือขนาดใดๆ ก็ได้
2. สามารถใช้วัดสารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นหรือปริมาณน้อยได้
3. สามารถใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างที่ละลายในน้ำได้ เนื่องจากโมเลกุลน้ำซึ่งมีสภาพขั้วสูงจะไม่ เกิดสัญญาณรบกวนสเปกตรัมรามาน
4. ที่ใส่สารตัวอย่าง (sample holder) เป็นวัสดุประเภทแก้ว ซึ่งมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับ IR window บางตัว เช่น ZnSe
5. สามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การปลูกฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม (ZnO : Al) เพื่อสังเคราะห์และวัดสมบัติฟิล์มบาง ZnO : Al ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเคลือบสารละลายโซลเจลด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ (Dip coating) มาใช้ในการปลูกฟิล์มบางเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายมีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก ราคาถูก สามารถทำได้ในระบบเปิดและควบคุมปริมาณของสารเจือได้

3.1 การเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีสารตั้งต้นดังนี้ซิงค์อะซิเตรทไดไฮเดรท (Zinc acetate dehydrate $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 0.35 mol 2-เมททอกซีเอทานอล (2-methoxyethanol) จำนวน 100 ml และโมโนเอทานอลามีน (Mono-ethanolamine) ที่มีอัตราส่วน Molar ratio 1:1 กับซิงค์อะซิเตรทไดไฮเดรท ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีสารตั้งต้นดังนี้ซิงค์อะซิเตรทไดไฮเดรท (Zinc acetate dehydrate $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 0.35, 0.5 mol/l 2-เมททอกซีเอทานอล (2-methoxyethanol) จำนวน 100 ml และโมโนเอทานอลามีน (Mono-ethanolamine) ที่มีอัตราส่วน Molar ratio 1:1 กับซิงค์อะซิเตรทไดไฮเดรทและเจืออะลูมิเนียมปริมาณต่างๆฟิล์มที่เตรียมจะถูกจุ่มเคลือบบนฐานรองรับกระจกใส

สำหรับการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียมนี้กระทำภายใต้เงื่อนไขดังนี้

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มซิงค์ออกไซด์ในโครงการพิเศษนี้

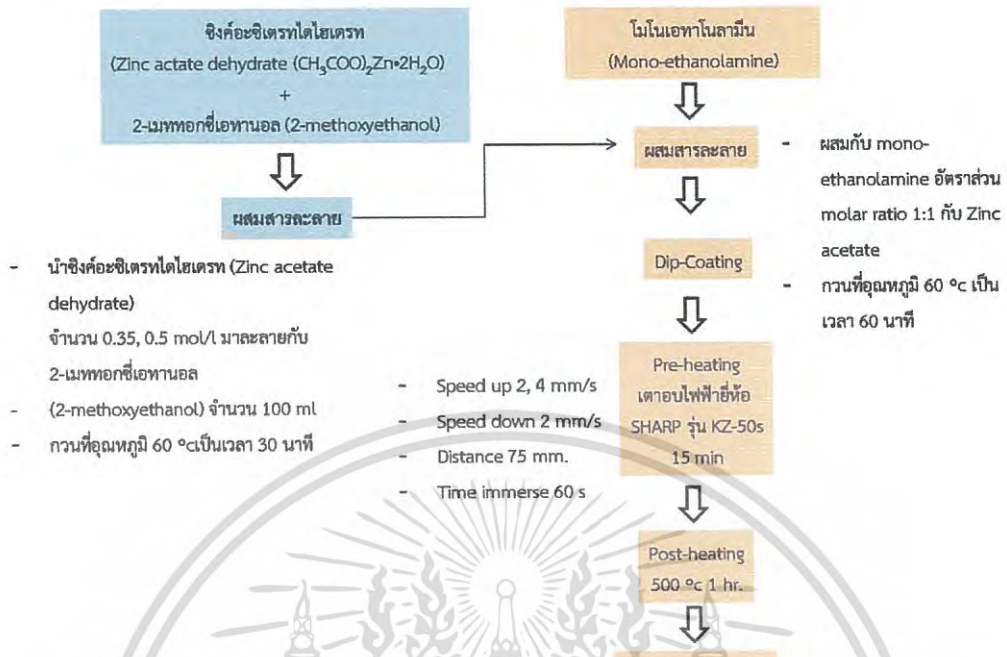
ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ (mol/l)	ความเร็ว (mm/s)		เวลา (s)		จำนวนการจุ่มเคลือบ (Cycle)	ระยะทาง (mm)
	ขึ้น	ลง	แช่	พัก		
0.35	2	2	60	30	10	75
	4		300		20	
0.5	2	2	60	30	10	75
	4		300		20	

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์มซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมในโครงการพิเศษนี้

ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ (mol/l)	ปริมาณอลูมิเนียม (at.%)	ความเร็ว (mm/s)		เวลา (s)		จำนวนการจุ่มเคลือบ (cycle)	ระยะทาง (mm)
		ลง	ขึ้น	แช่	พัก		
0.35	0.25	1	1	60	30	75	10
	0.5						
	1						
	1.5						
	3						
0.5	0.25	1	1	60	30	75	10
	0.5						
	1						
	1.5						
	3						

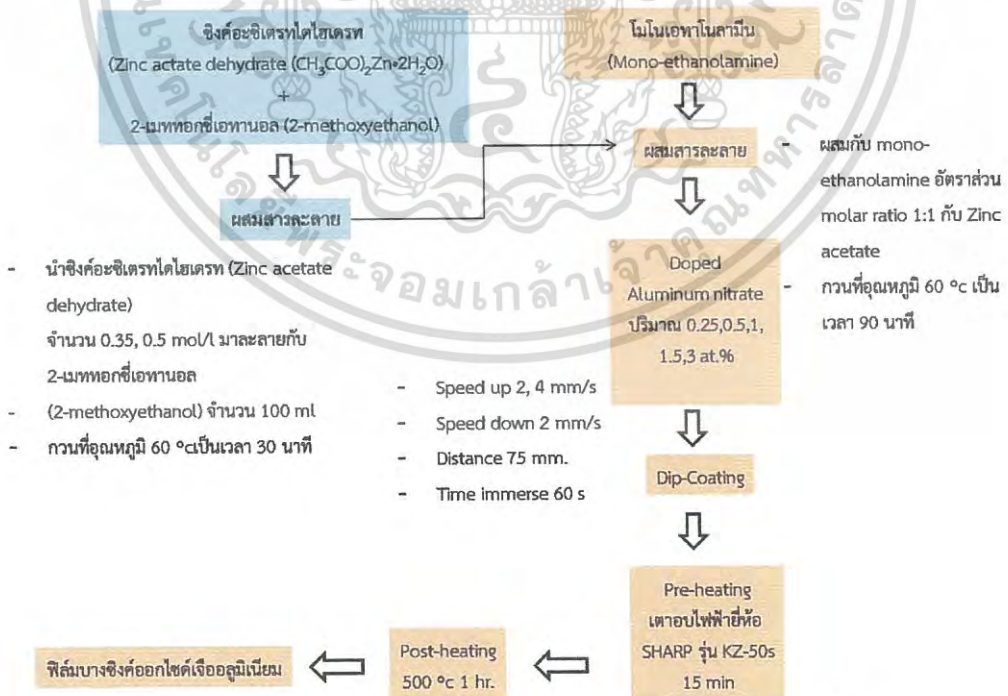
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์

3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียม

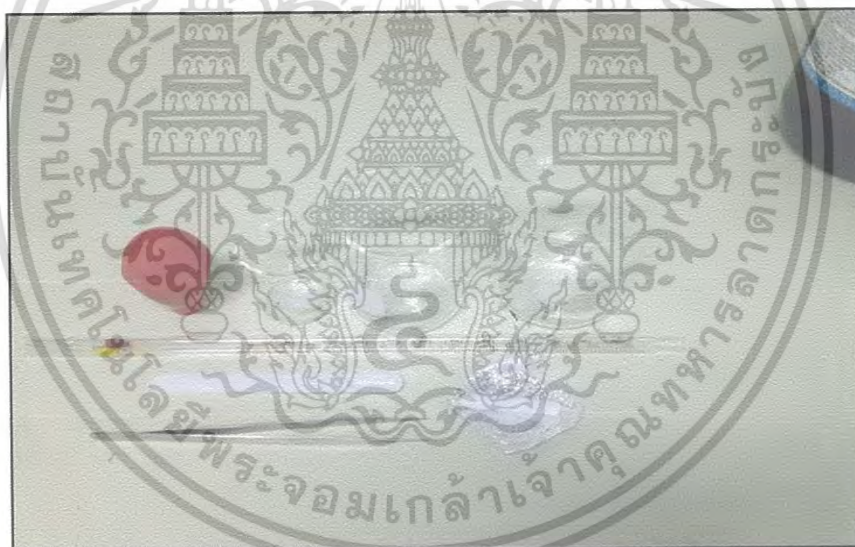


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

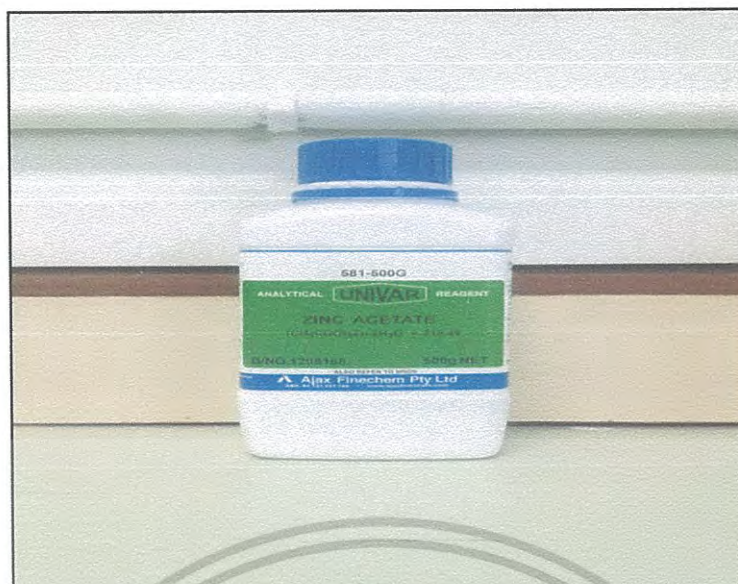
3.4 อุปกรณ์ในการทดลอง

1. กระจก
2. เครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก
3. ซิงค์อะซิเตรทไดไฮเดรท (Zinc acetate dehydrate) $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
4. 2-เมททอกซีเอทานอล (2-methoxyethanol)
5. โมโนเอทานอลามีน (Mono-ethanolamine)
6. อลูมิเนียมไนเตรท $(\text{Al}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O})$
7. ปีกเกอร์ขนาด 100 ml, 200 ml และ 250 ml
8. ปีเปตขนาด 1 ml
9. จุกยาง
10. แท่งแม่เหล็ก
11. ซ้อนตักสาร
12. เตาอบสาร
13. เครื่องชั่งสาร
14. เครื่องกวนสาร



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ในการทดลองสารประกอบด้วยปีกเกอร์ ปีเปต ซ้อนตักสาร แท่งแม่เหล็ก และจุกยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

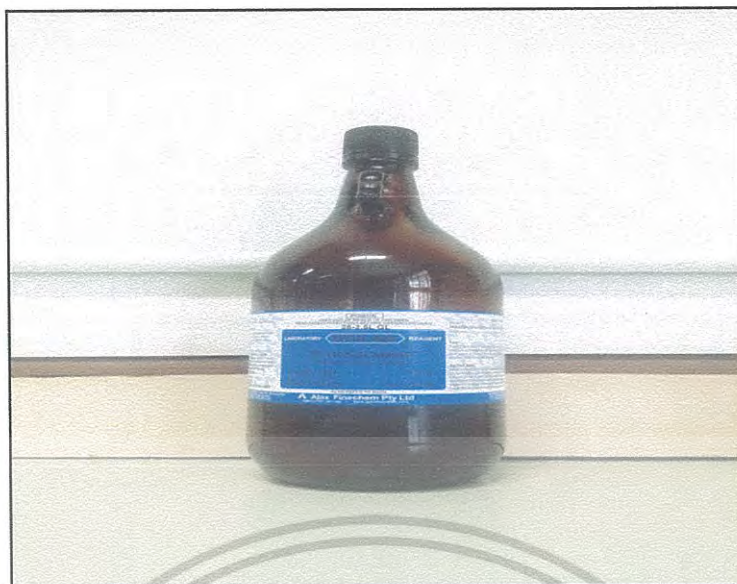


รูปที่ 3.4 ซิงค์อะซิเตทไดไฮเดรท (Zinc acetate dehydrate) $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$



รูปที่ 3.5 อลูมิเนียมไนเตรท $(\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 โมโนเอทานอลามีน (Mono-ethanolamine)



รูปที่ 3.7 2-เมททอกซีเอทานอล (2-methoxyethanol)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

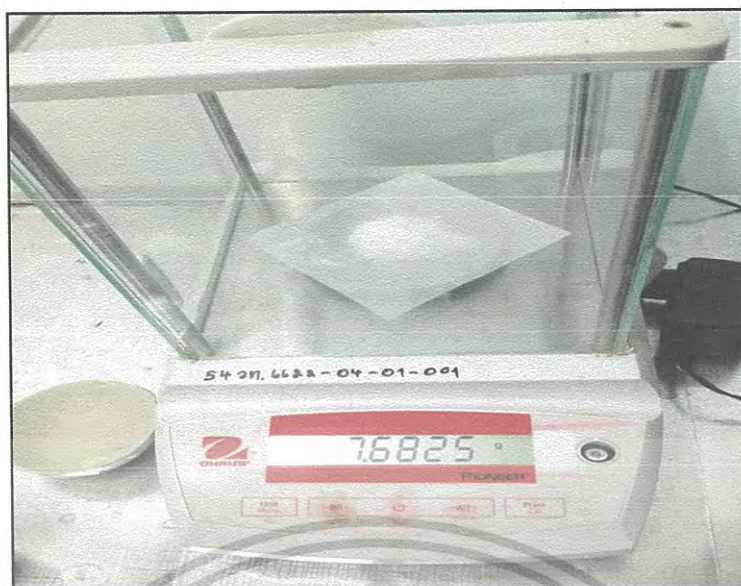


รูปที่ 3.8 เตาอบสาร



รูปที่ 3.9 เตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 เครื่องชั่งสารแบบละเอียด



รูปที่ 3.11 เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การเตรียมกระจกสไลด์ที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบาง

งานวิจัยนี้ใช้ฐานรองรับเป็นกระจกสไลด์ในการปลูกการฟิล์มซิงค์ออกไซด์มีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

1. กระจกสไลด์ขนาด กว้าง 76 มิลลิเมตร ยาว 26 มิลลิเมตรหนา 1 มิลลิเมตร
2. ล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
3. ล้างด้วยน้ำสะอาดและล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI) ด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
4. ล้างด้วยอะซิโตน ทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
5. ล้างด้วยเมทานอล ทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
6. ล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI)
7. นำกระจกมาเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนจนแห้ง
8. อบให้แห้งด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °c เป็น 15 นาที



รูปที่ 3.12 ล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ล้างด้วยน้ำสะอาดและล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI) ด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยเครื่องอตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที

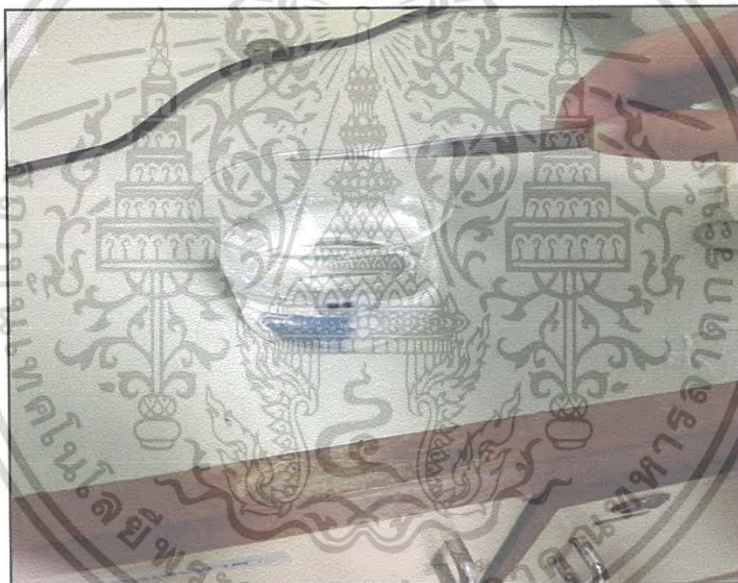


รูปที่ 3.14 ล้างด้วยอะซิโตนทำความสะอาดด้วยเครื่องอตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ล้างด้วยเมทานอลทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 15 นาที

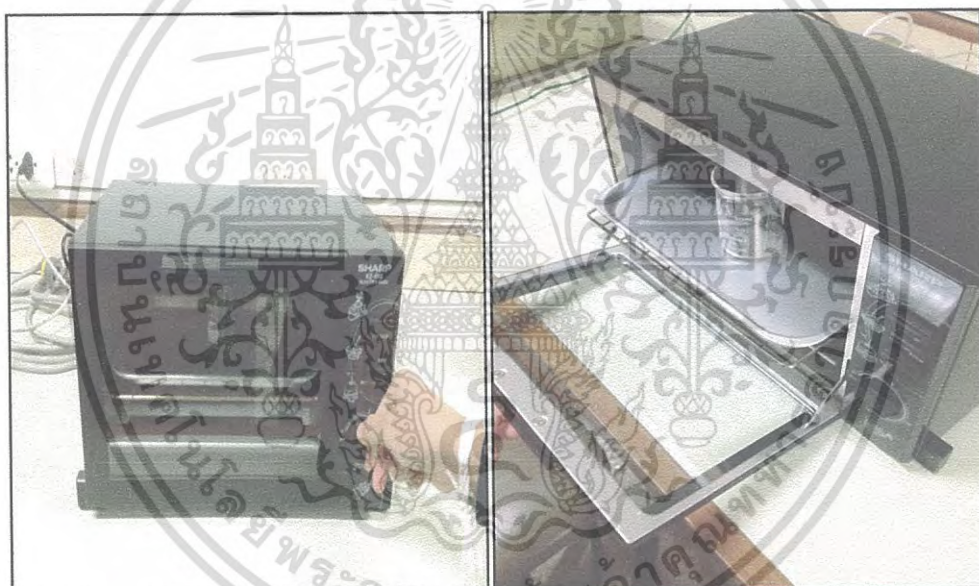


รูปที่ 3.16 ล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 นำกระจกมาเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนแห้ง

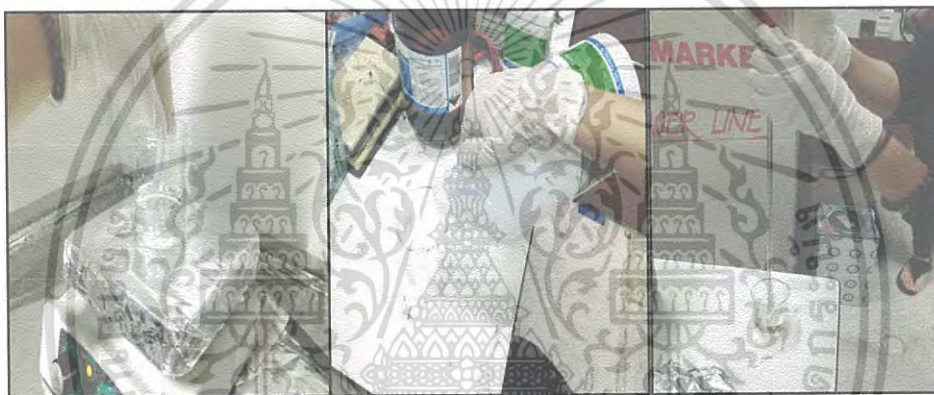


รูปที่ 3.18 อบให้แห้งด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °c เป็น 15 นาที

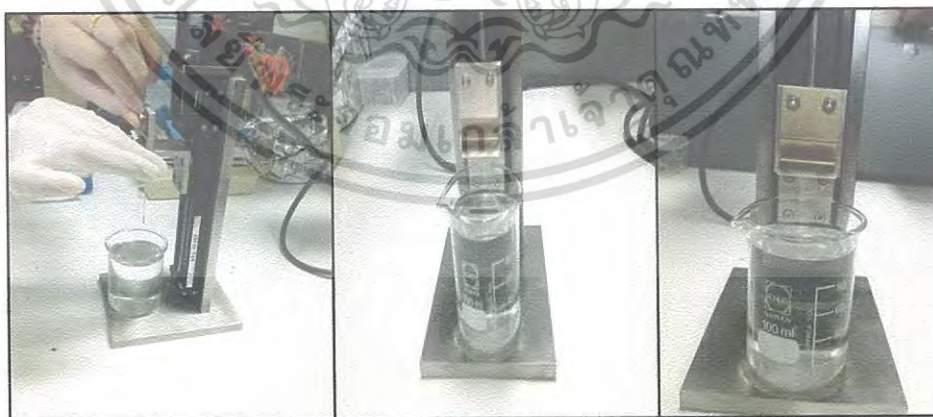
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ (Dip coating)

1. เตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์ที่มีสารตั้งต้นเป็น
2. นำกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้มาอบอุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 15 นาที
3. กำหนดอัตราการจุ่ม 1 ครั้ง ความเร็วในการดึงขึ้น (Speed up) 2, 4 mm/s ความเร็วในการดึงลง (Speed down) 2 mm/s ระยะเวลาในการจุ่มกระจกในสารละลายซิงค์ออกไซด์ (Time immerse) เป็นเวลา 60,300 s แซ่กระจกในสารละลายซิงค์ออกไซด์ (Time holding) เป็นเวลา 30 s และระยะทางในการจุ่มกระจกในสารละลายซิงค์ออกไซด์ (Distance) 75 mm.
4. นำกระจกสไลด์ที่เคลือบสารแล้วอบด้วยเตาอบไฟฟ้าเป็นเวลา 10 นาที
5. อบรอบสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500°C โดยค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 50°C เป็นทุกๆ 15 นาที จนถึง 500°C จากนั้นทำการอบฟิล์มเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.19 เตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์และสารละลายซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม



รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการจุ่มเคลือบกระจกแผ่นสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 นำกระจกสไลด์ที่เคลือบสารแล้วอบด้วยเตาไฟฟ้าห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที



รูปที่ 3.22 อบรอบสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 °c โดยค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 50 c จนถึง 500 °c จากนั้นทำการอบฟิล์มเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติฟิล์มบางซึ่งคือออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม

ในการศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มบางซึ่งคือออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง จำเป็นต้องใช้เทคนิคในการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของฟิล์มบางดังนี้

1. เครื่องมือวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction XRD)
2. เครื่องมือวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่องยูวีวิเบิลสเปกโทรสโกปี (Uv-Vis Spectrophotometry)
3. เครื่องมือวิเคราะห์เชิงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)
4. การวิเคราะห์สภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีไฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe)
5. เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างของสารด้วยวิธี FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

ซึ่งแต่ละเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟิล์มบางซึ่งคือออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม มีขั้นตอนการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันโดยในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

1. ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy
2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดแบบ 4 จุด (4-point probe)

3.7.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์การส่งผ่านของแสงด้วยเครื่อง UV-VIS transmission spectroscopy

ตรวจสอบการส่งผ่านของแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Ocean Optics รุ่น USB-4000 ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งทำการตรวจสอบในช่วงความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตร จากข้อมูลการส่งผ่านนำไปวิเคราะห์ค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบาง



รูปที่ 3.23 สเปกโตรสโกปีของบริษัท Ocean Optics รุ่น 4000-USB

ขั้นตอนการวัดสเปกตรัมการส่งผ่าน

1. จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.35
2. เปิดโปรแกรม Ocean Optics
3. เลือกโหมดการวัดแบบส่องผ่าน
4. บันทึกค่า Dark Spectrum ขณะนำแผ่นโลหะมาบังแสง
5. ทำการวัดฟิล์มบางตัวอย่าง
6. บันทึกค่าที่สเปกตรัมการส่งผ่านที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดสภาพไฟฟ้าแบบ 4 จุด



รูปที่ 3.24 อุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคการวัด 4-point probe

1. จัดอุปกรณ์ดังรูป
2. เปิดเครื่อง Constant Current Source และเครื่อง Multimeter (ควรเปิดทิ้งไว้ก่อนอย่างน้อย 30 นาที)
3. ตั้งค่าเครื่อง Constant Current Source โดยเริ่มต้นจากตั้งค่า V-Limit ก่อนจากนั้นกดปุ่ม Source เพื่อตั้งค่ากระแสตามที่ต้องการจะป้อนให้กับชิ้นงาน ชิ้นงานแต่ละชิ้นงานจะมีการป้อนกระแสต่างกัน.4
4. วางชิ้นงานฟิล์มบางซึ่งคือออกไซด์และฟิล์มบางซึ่งคือออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียมที่เตรียมไว้ โดยแท่นที่วางจะต้องมีแผ่นฉนวนวางกันชิ้นงานกับแท่น และการที่จะนำชิ้นงานมาวางบนแท่นต้องมีความระมัดระวังมาก โดยให้จับที่ขอบของแผ่นและหลีกเลี่ยงการสัมผัสบนผิวหน้าทั้งสองด้านของชิ้นงานเพราะจะทำให้ผิวด้านสัมผัสของชิ้นงานเป็นรอยซึ่งอาจจะทำให้ชิ้นงานวัดค่าไม่ดีหรือวัดไม่ได้เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 การวางชั้นงานฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม



รูปที่ 3.26 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าแบบ จุด 4

5. หมุน 4-point probe ลงโดยให้ปลายเข็มทั้ง 4 ตะทะผิวหน้าของชั้นงานพอดี
6. กดปุ่ม Output ที่เครื่อง Constant Current Source เพื่อจ่ายกระแสไปยังขั้ว 1 และขั้ว 4 ของ 4-point probe
7. บันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Multimeter และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า Resistivity (ρ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 การบันทึกผลจากเครื่อง Multimeter

8. เพิ่มกระแสขึ้นตามความเหมาะสมของชิ้นงาน และชิ้นงานแต่ละชิ้นงานจะวัดซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งเพื่อความแม่นยำ
9. ทำการทดลองซ้ำข้อ 4 ข้อ 8 แต่เปลี่ยนชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจก

จากการศึกษาวิธีการสังเคราะห์สารละลายโซล-เจล ในเงื่อนไขต่างๆเพื่อนำมาเตรียมเป็นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมในเงื่อนไขที่เหมาะสมไว้ในตารางที่ 3.1 ขั้นตอนต่อไปจึงเป็นการวิเคราะห์ฟิล์มบางดังกล่าวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ที่เหมาะสมต่อฟิล์มบางดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์เคมี โครงสร้าง สมบัติทางแสง และทางไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมที่เหมาะสม และนำไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่ให้ประสิทธิภาพต่อไป

4.2 ลักษณะเชิงกายภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์และฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนิงครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนิงครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่ (ก.) 0.5 โมลต่อลิตร (ข.) 0.35 โมลต่อลิตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 फिल्मบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 फिल्मบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 300 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร



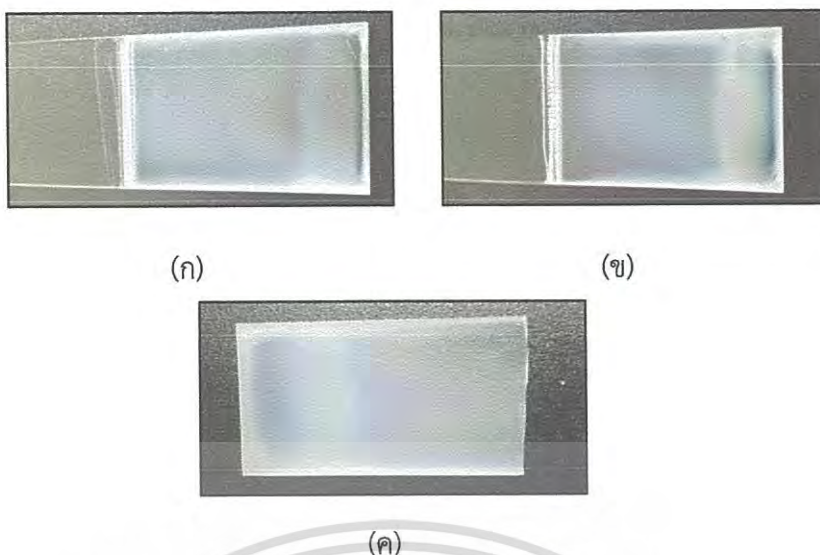
(ก)



(ข)

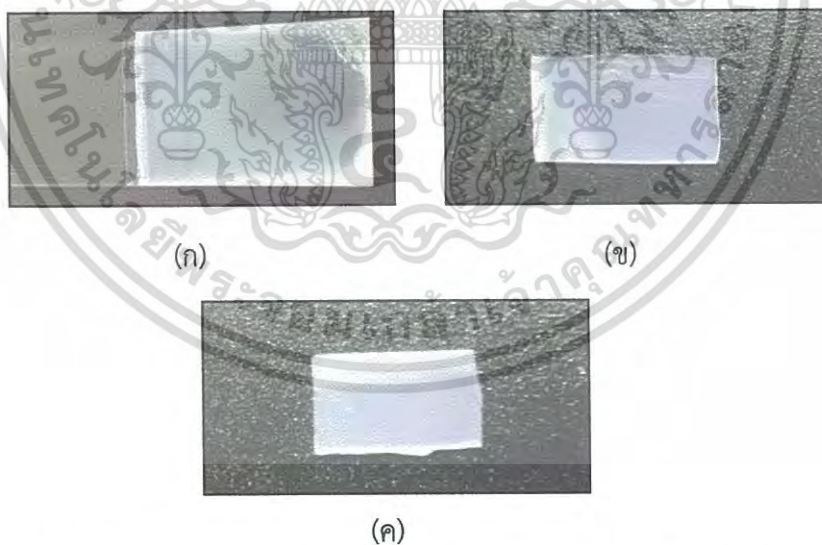
รูปที่ 4.4 फिल्मบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 300 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



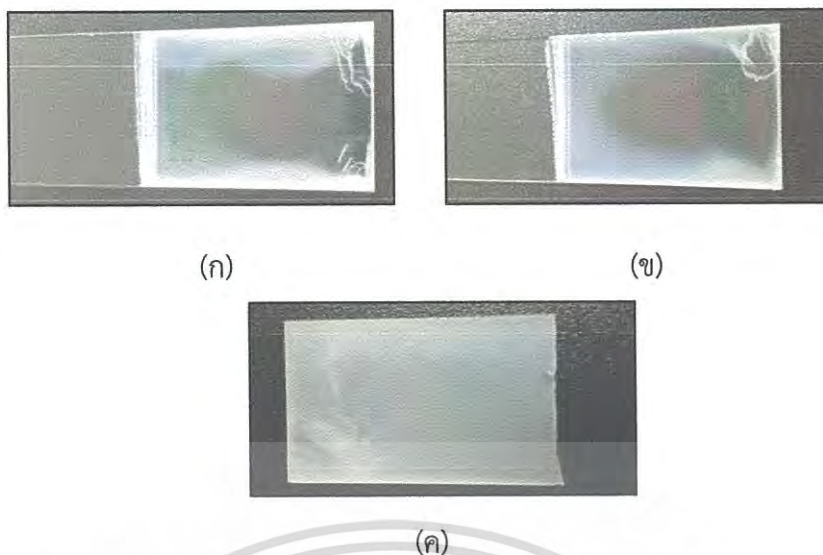
รูปที่ 4.5 พิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจก

ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ ปริมาณ (ก.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

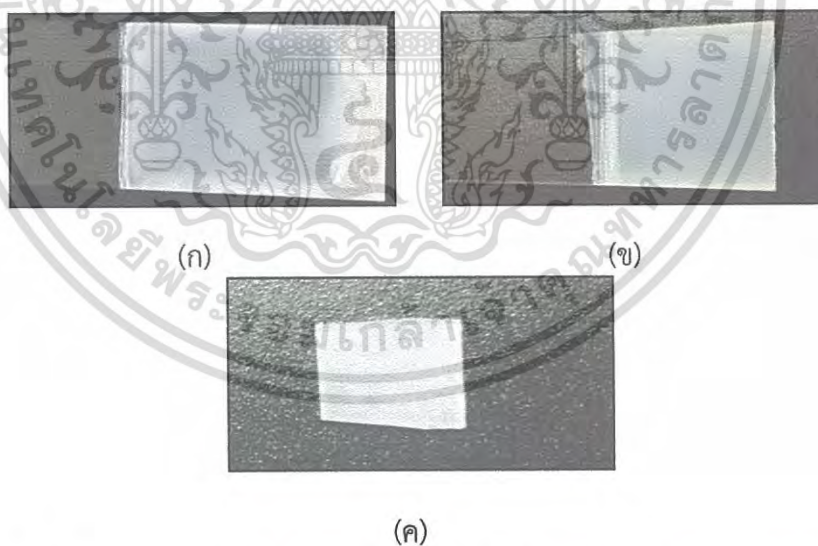


รูปที่ 4.6 พิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจก

ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ ปริมาณ (ก.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

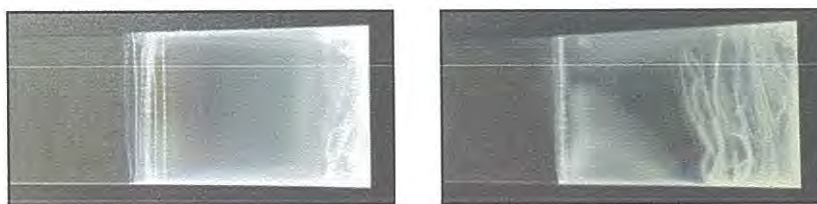


รูปที่ 4.7 फिल्मบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ ปริมาณ (ก.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.8 फिल्मบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ ปริมาณ (ก.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

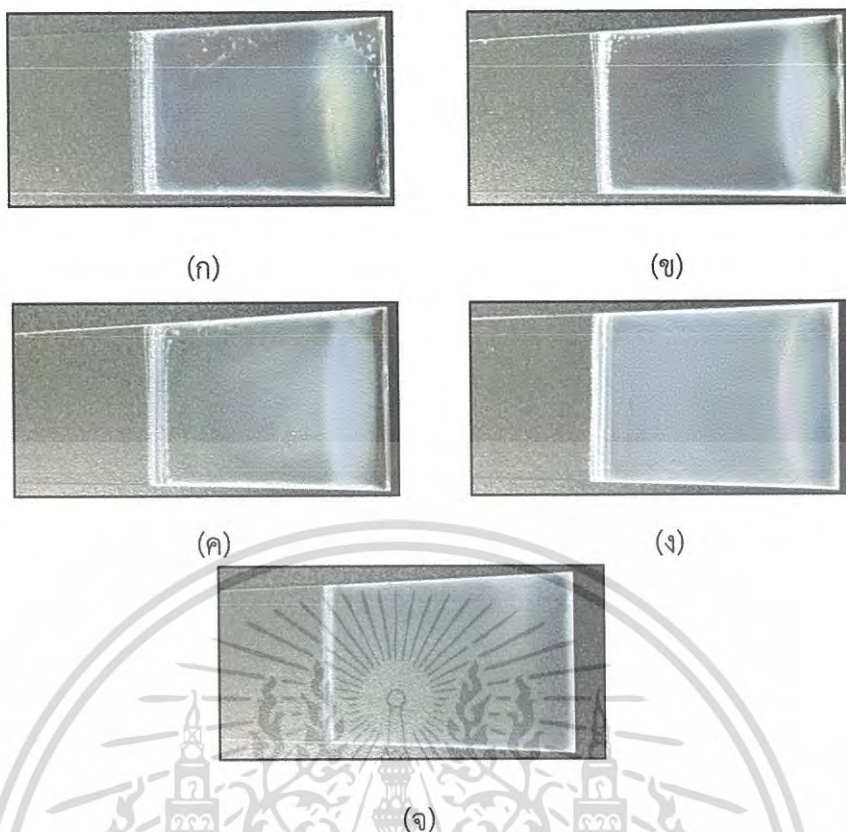
(ข)

รูปที่ 4.9 फिल्मบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมปริมาณ 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้าที่ห่อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 6 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร



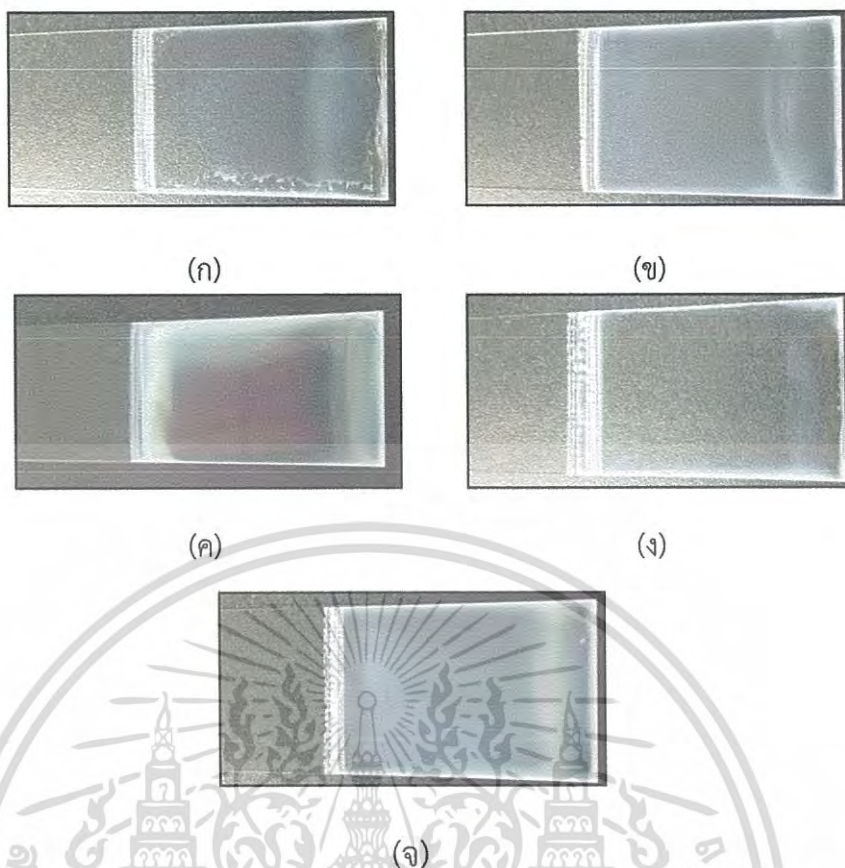
รูปที่ 4.10 फिल्मบางซิงค์ออกไซด์ 0.6 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมปริมาณ 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้าที่ห่อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 फिल्मบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนีสครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนีสครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการ ดึงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดึงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอม เเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจกที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

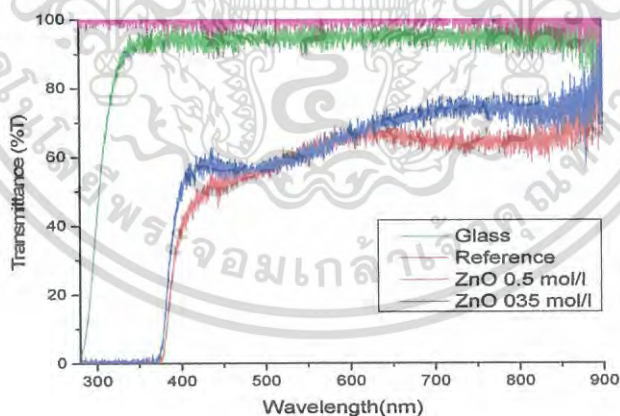
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียม

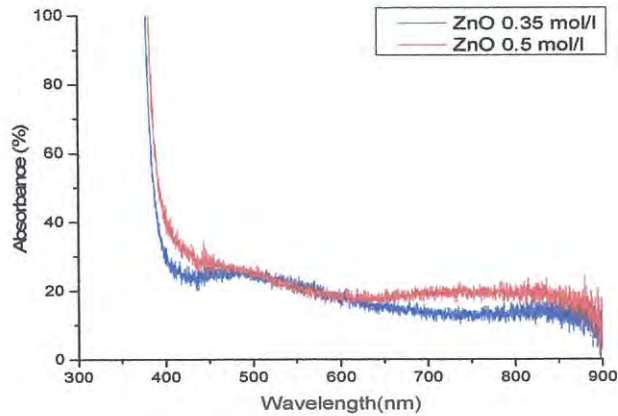
ค่าการส่งผ่านของแสงและการสะท้อนกลับของแสงของฟิล์มบางเป็นสมบัติทางแสงที่มีความจำเป็นสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสง ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการวัดค่าการส่งผ่านของแสงและการสะท้อนกลับของแสง อันเนื่องมาจากผลของปริมาณสารเจืออลูมิเนียมและความเร็วในการจุ่มเคลือบที่มีต่อค่าพลังงานแถบช่องว่างทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียมโดยเลือกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35, 0.5 โมลต่อลิตร ความเร็วในการดึงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ดึงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที มาทำการศึกษาดังนี้

4.3.1 ผลของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อค่าพลังงานแถบช่องว่างทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

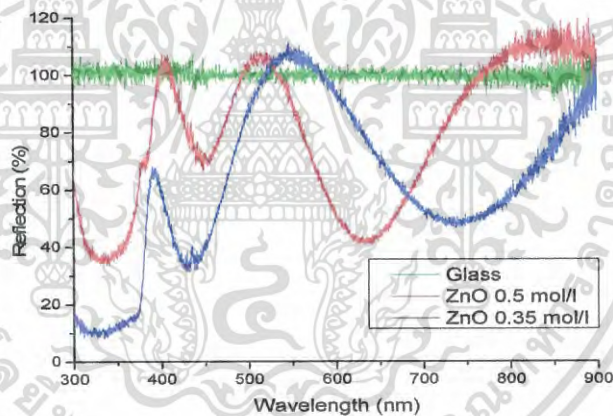
รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมของการส่งผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 800 นาโนเมตร ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตรต่อวินาที จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ สเปกตรัมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแสงสามารถส่งผ่านฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ได้ดีมากกว่าร้อยละ 60 ในช่วงแสงที่สายตามนุษย์มองเห็นได้ (400 ถึง 800 นาโนเมตร) พบว่าที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตร มีการส่งผ่านของแสงได้ดีที่สุดซึ่งเป็นผลมาจากเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางจากสารละลายโซล-เจล ที่ให้เกรนของซิงค์ออกไซด์ที่เล็กจึงช่วยลดการกระเจิงของแสงที่มากกระทบบนผิวของฟิล์มบาง



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรก โดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตรต่อวินาที จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการดึงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดึงขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร



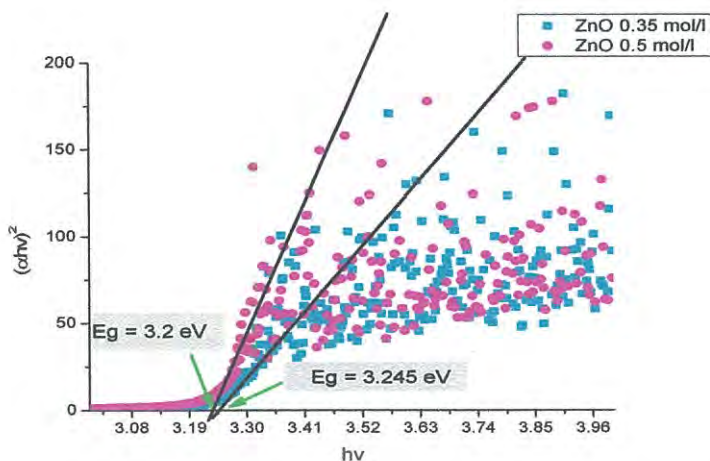
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรก โดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตรต่อวินาที จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการดึงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดึงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมการสะท้อนกลับของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตรต่อวินาที จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการดึงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดึงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร

จากข้อมูลค่าการส่งผ่านของแสง รูปที่ 4.13 ค่าการดูดกลืนของแสงและค่าการสะท้อนกลับของแสงรูปที่ 4.14, 4.15 ตามลำดับ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) และค่าพลังงานแถบช่องว่าง (Optical band gap) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ได้ดังรูปที่ 4.16 พบว่าซิงค์ออกไซด์ที่ปราศจากการเจือมีผลต่อค่าพลังงานแถบช่องว่างน้อยมากจึงส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน

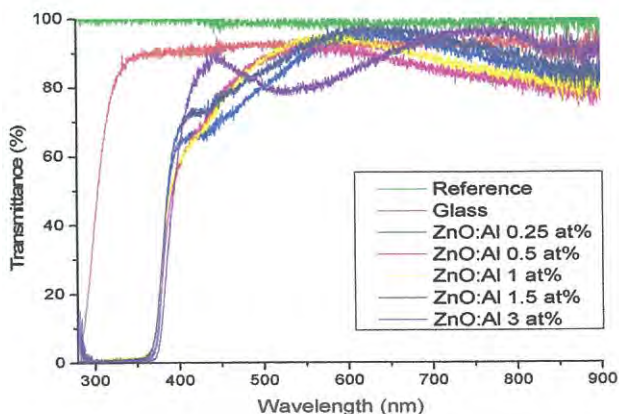
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



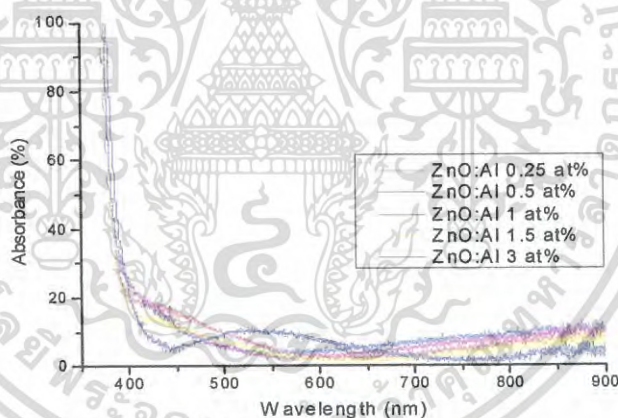
รูปที่ 4.16 แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการดึงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดึงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จำนวนการจุ่มเคลือบ 10 รอบ ที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร

4.3.2 ผลของปริมาณเจือด้วยอลูมิเนียมของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 โมลต่อลิตร

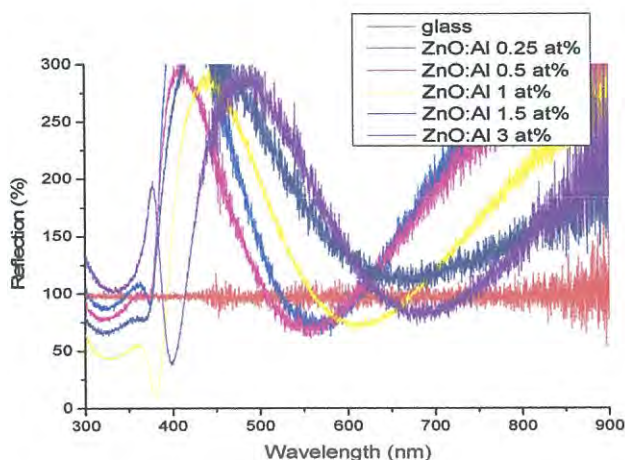
ที่มีต่อค่าพลังงานแถบช่องว่างทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม จากอัตราการจุ่มเคลือบที่ความเร็วดึงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วดึงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ต่ำกว่าความเร็วดึงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วดึงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีเนื่องจากพื้นผิวของฟิล์มบางมีความสม่ำเสมอและโปร่งใสจึงเลือกใช้ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมมาทำการศึกษาผลของปริมาณเจือด้วยอลูมิเนียมที่มีต่อสมบัติทางแสง โดยทำการวิเคราะห์ค่าการส่งผ่านของแสงและค่าการสะท้อนกลับของแสง ดังรูปที่ 4.17, 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ พบว่าแสงสามารถส่งผ่านฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมที่ 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์ส่งผ่านได้ดีมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงแสงที่สายตามนุษย์มองเห็นได้



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ 0.35 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่ม เคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์



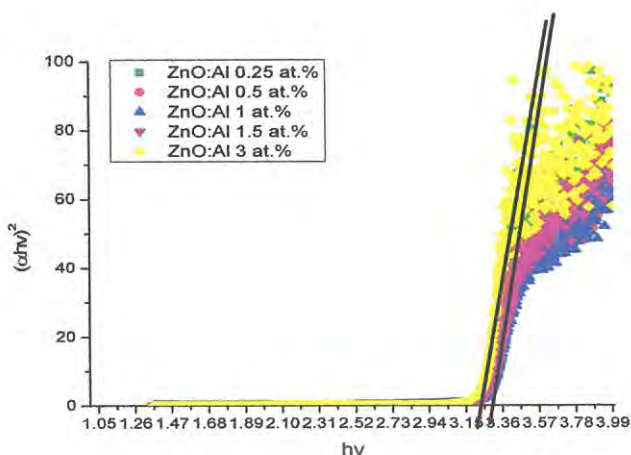
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ 0.35 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่ม เคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมการสะท้อนกลับของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ 0.35 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้าฮีท SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งที่ทำที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่ม เคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

จากข้อมูลค่าการส่งผ่านของแสง รูปที่ 4.17 ค่าการดูดกลืนของแสง และค่าการสะท้อนกลับของแสง รูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) และค่าพลังงานแถบช่องว่าง (Optical band gap) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมได้ดังรูปที่ 4.20 พบว่าสารเจืออลูมิเนียมปริมาณต่างๆเมื่อเจือปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลค่าแถบช่องว่างพลังงานเพิ่มขึ้น โดยที่ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ปราศจากสารเจือมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ 3.2 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ 0.35

โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตรต่อวินาที จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการจุ่มเคลือบที่ ความเร็วในการดึงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดึงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.1 ค่าพลังงานแถบช่องว่างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.35 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียม ปริมาณต่างๆจุ่มเคลือบ 10 รอบ หลังผ่านการแอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

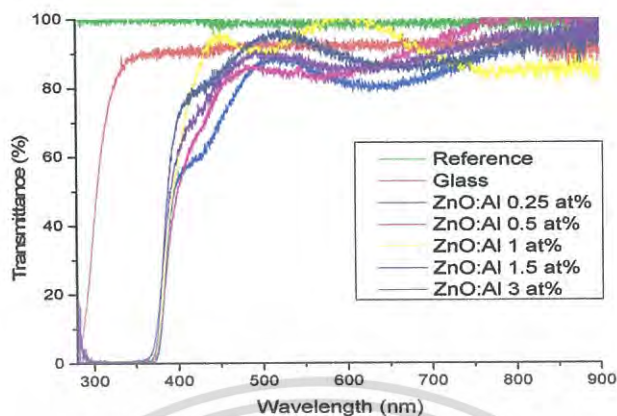
ปริมาณอลูมิเนียม (at.%)	ความเร็ว (mm/s)		ค่าพลังงานแถบช่องว่าง (อิเล็กตรอนโวลต์, eV)
	ลง	ขึ้น	
0.25			3.26
0.5			3.3
1	1	1	3.3
1.5			3.3
3			3.26

4.3.3 ผลของปริมาณเจือด้วยอลูมิเนียมของความเร็วซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรที่มีต่อค่าพลังงานแถบช่องว่างทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม

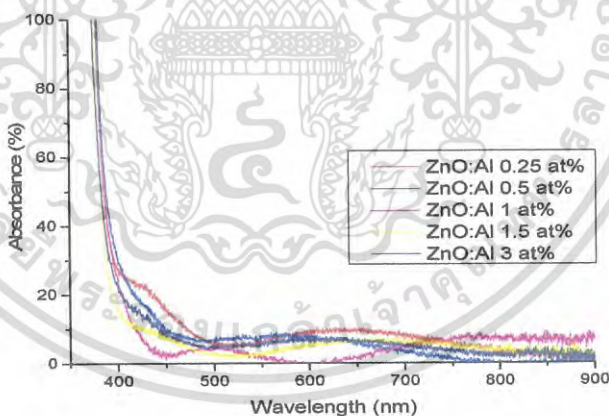
จากอัตราการจุ่มเคลือบที่ความเร็วดึงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วดึงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ดีกว่าความเร็วดึงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วดึงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีเนื่องจากพื้นผิวของฟิล์มบางมีความสม่ำเสมอและโปร่งใสจึงเลือกใช้ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมมาทำการศึกษาผลของปริมาณเจือด้วยอลูมิเนียมที่มีต่อสมบัติทางแสง โดยทำการวิเคราะห์ค่าการส่งผ่านของแสงและค่าการสะท้อนกลับของแสง ดังรูปที่ 4.21, 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าแสงสามารถส่งผ่านฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมที่ 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ส่งผ่านได้ดีมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงแสงที่สายตามนุษย์มองเห็นได้

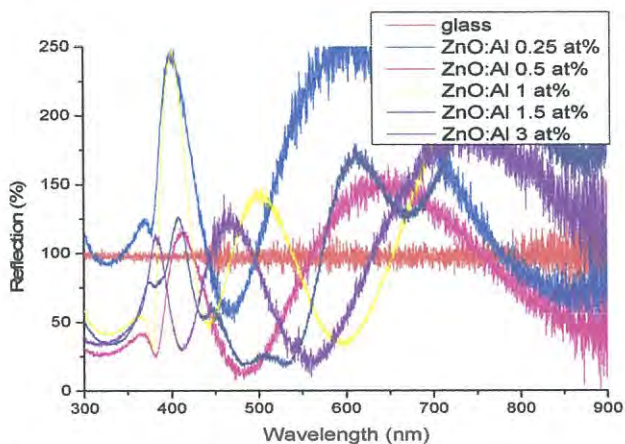


รูปที่ 4.21 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตรต่อวินาที จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยใช้อลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.22 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเจืออลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตรต่อวินาที จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการติงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยใช้อลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

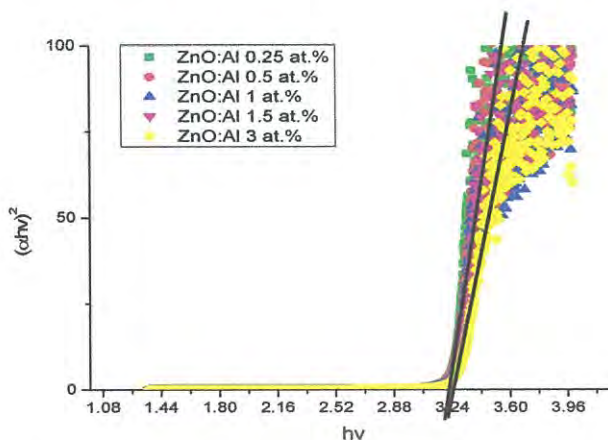
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเจือ อลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้าที่ชื่อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตรต่อวินาที กลุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการดึงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดึงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยใช้อลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

จากข้อมูลค่าการส่งผ่านของแสง รูปที่ 4.21 ค่าการดูดกลืนของแสง และค่าการสะท้อนกลับของแสง รูปที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และค่าพลังงานแถบช่องว่าง (Optical band gap) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมได้ดังรูปที่ 4.24 พบว่าสารเจืออลูมิเนียมปริมาณต่างๆเมื่อเจือปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลค่าแถบช่องว่างพลังงานน้อยมาก โดยที่มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ปราศจากสารเจือมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ 3.2 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ 0.5

โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้าที่ชื่อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตรต่อวินาที จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการจุ่มเคลือบที่ ความเร็วในการดึงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดึงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.2 ค่าพลังงานแถบช่องว่างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.5 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียม ปริมาณต่างๆจุ่มเคลือบ 10 รอบ หลังผ่านการแอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

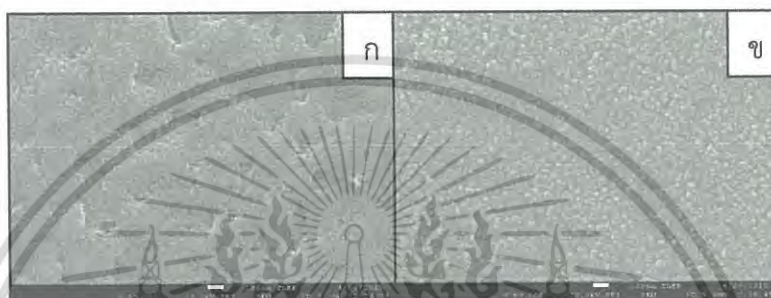
ปริมาณอลูมิเนียม (at.%)	ความเร็ว (mm/s)		ค่าพลังงานแถบช่องว่าง (อิเล็กตรอนโวลต์, eV)
	ลง	ขึ้น	
0.25			3.22
0.5			3.22
1	1	1	3.22
1.5			3.22
3			3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม

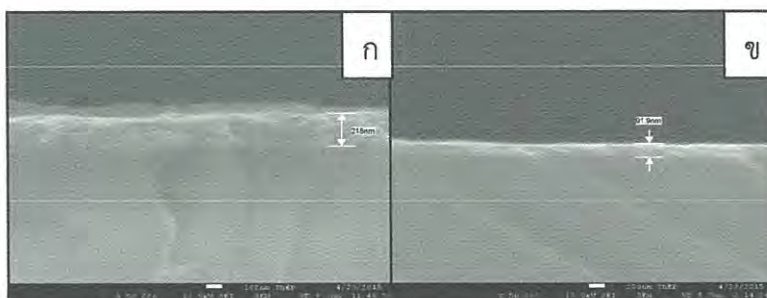
4.4.1 ผลของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อคุณภาพโครงสร้างผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

รูปที่ 4.25 ภาพพื้นผิวโครงสร้างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบแบบโซล-เจล ของการจุ่มเคลือบ 10 รอบ ผ่านการแอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มที่เตรียมมีรอยแตกร้าว (crack) เกิดขึ้น ลักษณะผิวมีความขรุขระและมีขนาดของอนุภาคในความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 โมลต่อลิตร ชัดเจนมากที่สุด ด้วยเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางจุ่มเคลือบ 10 รอบ ประกอบกับการตัดชิ้นส่วนของฟิล์มนั้นอาจทำให้ฟิล์มเกิดรอยแตกร้าวได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงได้ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบางที่จุ่มเคลือบมากกว่า 1 รอบ



รูปที่ 4.25 โครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการดึงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดึงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จำนวนการจุ่ม 10 รอบ ที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร

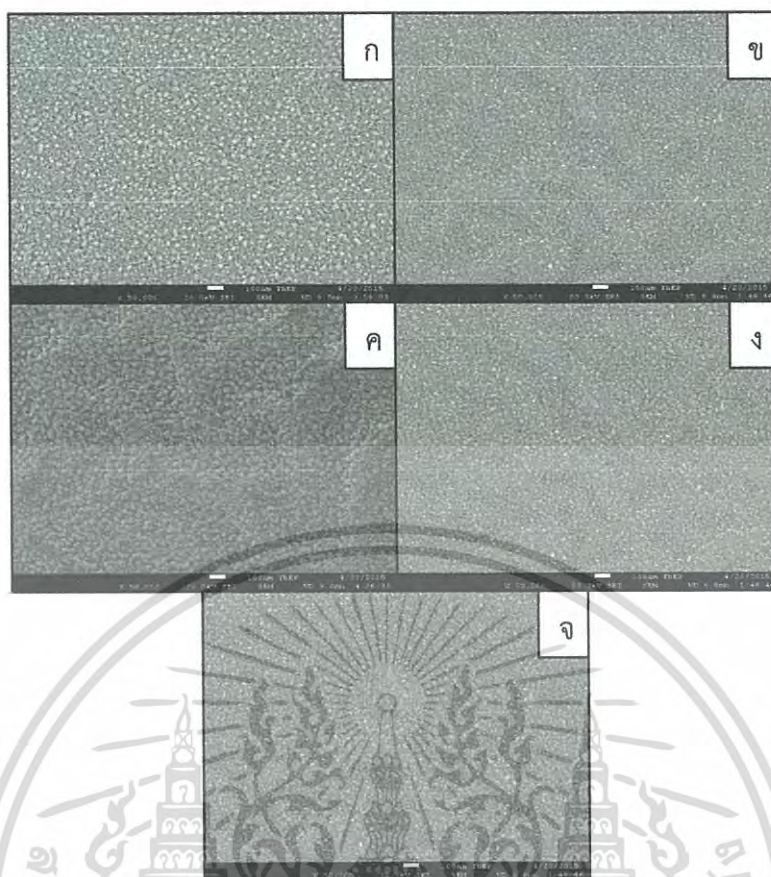
การศึกษาความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ในเงื่อนไขที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 และ 0.5 โมลต่อลิตร โดยใช้หลักการของความแตกต่างของความสูงระหว่างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์และแผ่นกระจก รูปที่ 4.26 โครงสร้างภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจกที่แสดงลักษณะความแตกต่างของความสูงที่ใช้ในการวัดความหนาของฟิล์มบาง พบว่าค่าความหนาของฟิล์มบางมีค่าแตกต่างกันมาก โดยมีความหนาแตกต่างกันถึง 116.1 นาโนเมตร



รูปที่ 4.26 โครงสร้างภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการติ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จำนวนการจุ่ม 10 รอบ ที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร

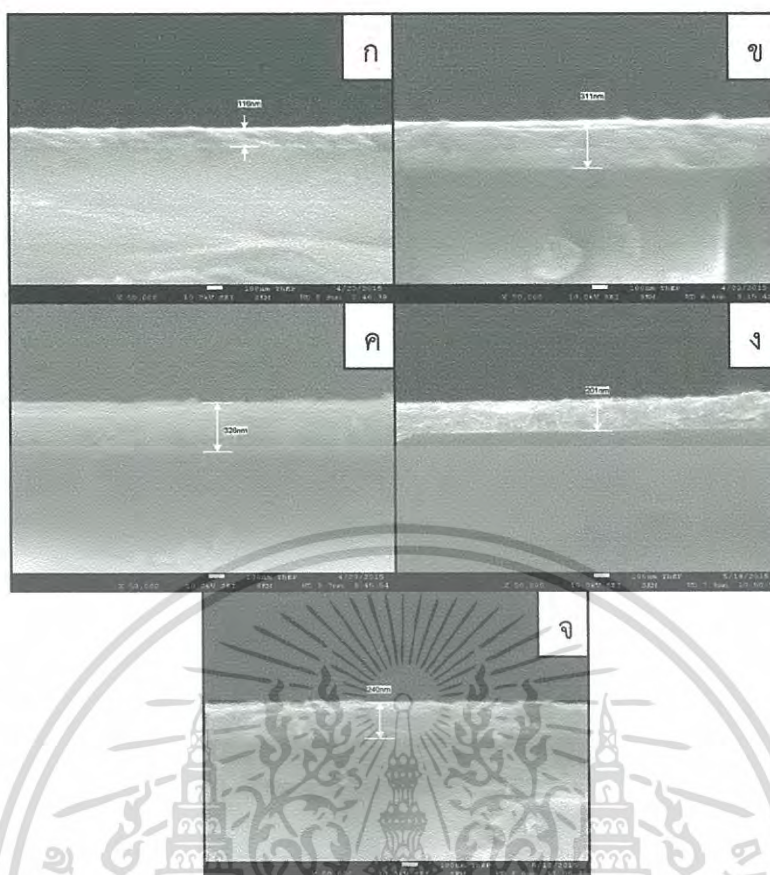
4.3.3 ผลของปริมาณอนุภาคนิยมนของควมเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 โมลต่อลิตรที่มีต่อคุณภาพโครงสร้างผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนิยม

รูปที่ 4.27 ภาพพื้นผิวโครงสร้างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.35 โมลต่อลิตรเจือด้วยอนุภาคนิยมปริมาณต่างๆ ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบแบบโซล-เจล ของการจุ่มเคลือบ 10 รอบ ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มที่เตรียมมีรอยแตกร้าว (crack) เกิดขึ้นลักษณะผิวมีความขรุขระในทุกเงื่อนไขของการเจือ อย่างไรก็ตามขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีแนวโน้มที่จะมีขนาดลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณสารเจืออนุภาคนิยมมากขึ้น



รูปที่ 4.27 โครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมของบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการติงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จำนวนการจุ่ม 10 รอบ เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

การศึกษาความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ในเงื่อนไขที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 โมลต่อลิตรและปริมาณอลูมิเนียมต่างๆ โดยใช้หลักการของความแตกต่างของความสูงระหว่างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์และแผ่นกระจก รูปที่ 4.28 โครงสร้างภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียมบนกระจกที่แสดงลักษณะความแตกต่างของความสูงที่ใช้ในการวัดความหนาของฟิล์มบางพบว่าผลของปริมาณสารเจืออลูมิเนียมที่เจือในปริมาณต่างๆมีผลมากต่อความหนาของฟิล์มบาง โดยให้ค่าความหนาดังตาราง 4.3



รูปที่ 4.28 โครงสร้างภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จำนวนการจุ่ม 10 รอบ เจืออลูมิเนียมที่ ปริมาณ (ก.) 0อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

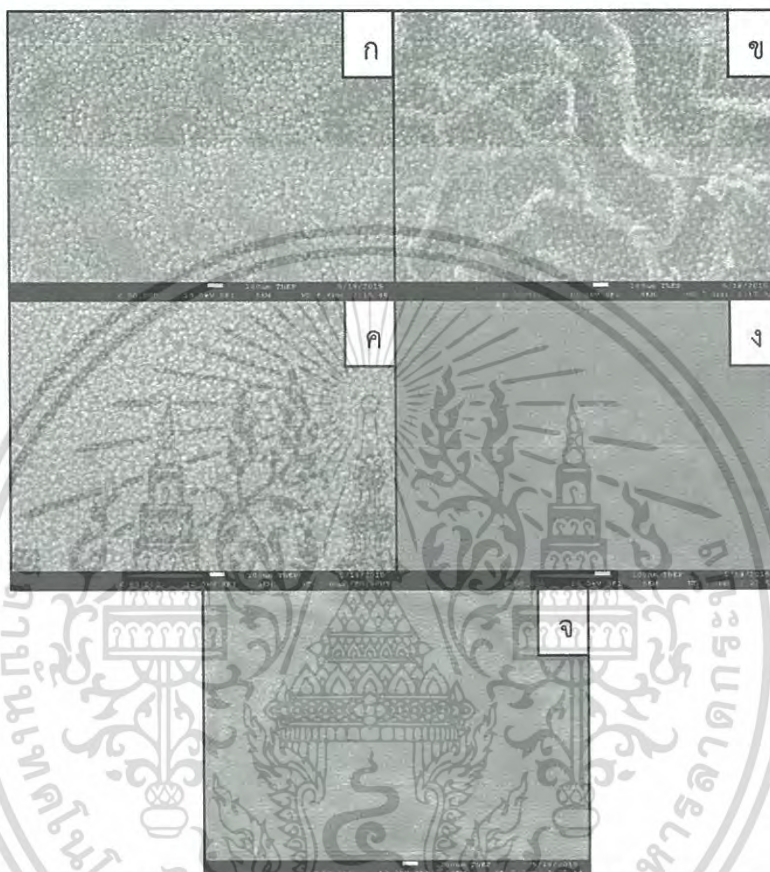
ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.35 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมที่ปริมาณ ต่างๆ ที่ผ่านการแอนนัลครั้งสุดท้ายที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จุ่มเคลือบ 10 รอบ

ปริมาณอลูมิเนียม (at.%)	ความเร็ว (mm/s)		ความหนา (nm)
	ลง	ขึ้น	
0.25	1	1	116
0.5			311
1			326
1.5			201
3			240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลของปริมาณอนุภาคนิยมของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรที่มีต่อคุณภาพโครงสร้างผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนิยม

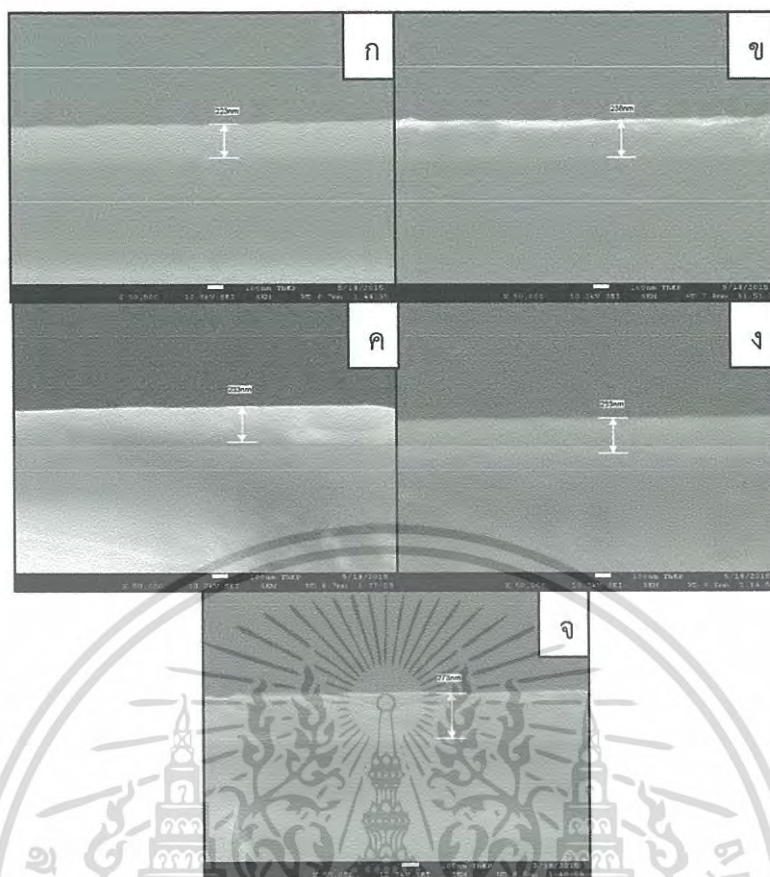
รูปที่ 4.29 ภาพพื้นผิวโครงสร้างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.5 โมลต่อลิตรเจือด้วยอนุภาคนิยมปริมาณต่างๆ ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบแบบโซล-เจล ของการจุ่มเคลือบ 10 รอบ ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่า



รูปที่ 4.29 โครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เจืออนุภาคนิยมของบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จำนวนการจุ่ม 10 รอบ เจืออนุภาคนิยมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

การศึกษาความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออนุภาคนิยม ในเงื่อนไขที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรและปริมาณอนุภาคนิยมต่างๆ โดยใช้หลักการของความแตกต่างของความสูงระหว่างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออนุภาคนิยมและแผ่นกระจก รูปที่ 4.30 โครงสร้างภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจกที่แสดงลักษณะความแตกต่างของความสูงที่ใช้ในการวัดความหนาของฟิล์มบางพบว่าผลของปริมาณสารเจืออนุภาคนิยมที่เจือในปริมาณต่างๆมีผลมากต่อความหนาของฟิล์มบาง โดยให้ค่าความหนาดังตาราง 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 โครงสร้างภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมของบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาทีเวลาพัก 30 วินาที จำนวนการจุ่ม 10 รอบ เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.5 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมที่ปริมาณต่างๆ ที่ผ่านการแอนนัลครั้งสุดท้ายที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จุ่มเคลือบ 10 รอบ

ปริมาณอลูมิเนียม (at.%)	ความเร็ว (mm/s)		ความหนา (nm)
	ลง	ขึ้น	
0.25	1	1	223
0.5			238
1			233
1.5			233
3			273

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม

4.5.1 ผลของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อค่าความนำทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ตารางที่ 4.4 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งสุดท้าย 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จุ่มเคลือบ 10 รอบ

ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ (mol/L)	ความเร็ว (mm/s)		เวลา (s)		Resistivity (Ω .cm)
	ลง	ขึ้น	แช่	พัก	
0.35	2	2	60	30	319.24
0.5					23038

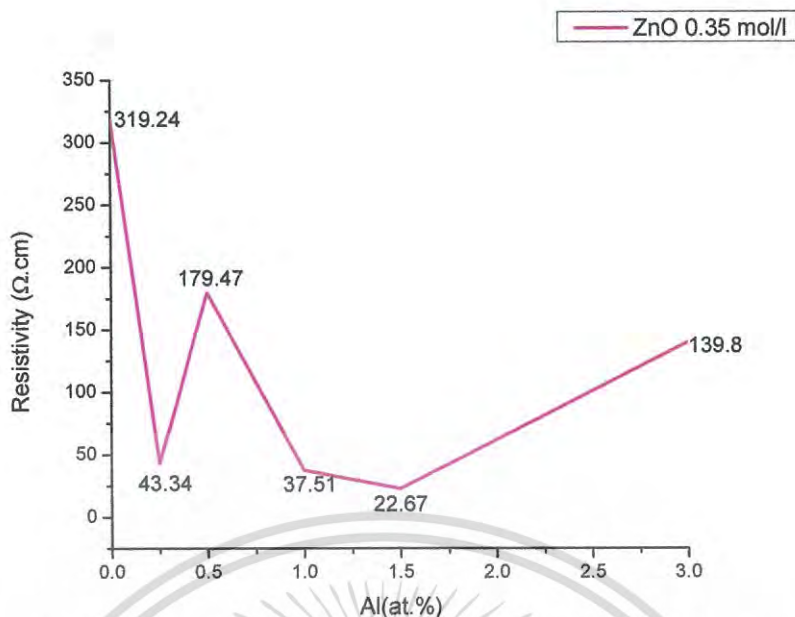
4.5.2 ผลของปริมาณอลูมิเนียมของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 โมลต่อลิตรที่มีต่อค่าความนำทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียม ตารางที่ 4.5 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.35 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งสุดท้าย 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จุ่มเคลือบ 10 รอบ

ปริมาณอลูมิเนียม (at.%)	ความเร็ว (mm/s)		เวลา (s)		Resistivity (Ω .cm)
	ลง	ขึ้น	แช่	พัก	
0.25					43.34
0.5					179.47
1	1	1	60	30	37.51
1.5					22.67
3					139.81

4.5.3 ผลของปริมาณอลูมิเนียมของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรที่มีต่อค่าความนำทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียม ตารางที่ 4.6 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ 0.5 โมลต่อลิตรเจือด้วยอลูมิเนียมบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งสุดท้าย 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จุ่มเคลือบ 10 รอบ

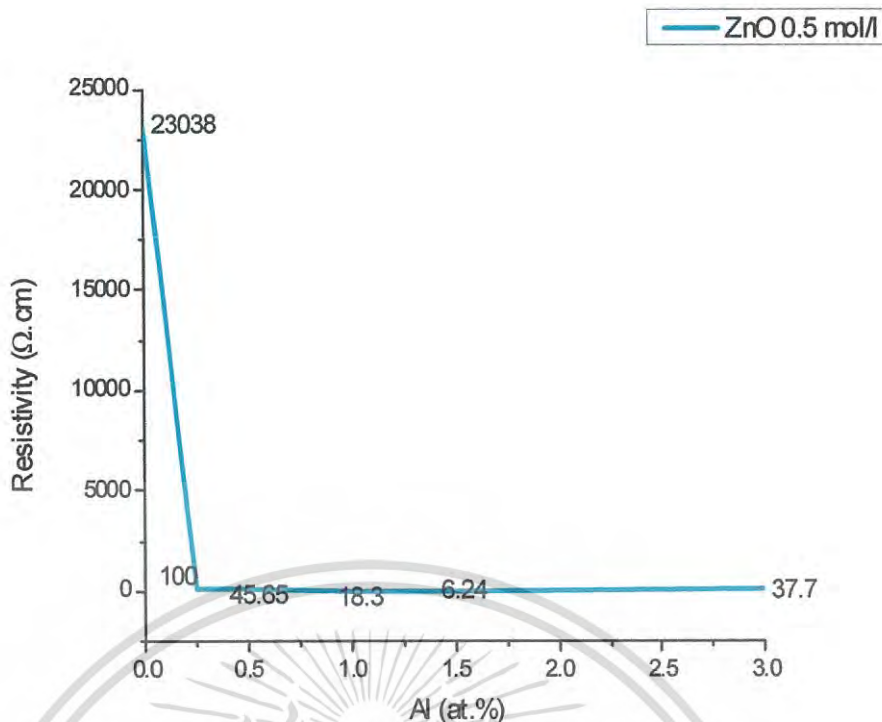
ปริมาณอลูมิเนียม (at.%)	ความเร็ว (mm/s)		เวลา (s)		Resistivity (Ω .cm)
	ลง	ขึ้น	แช่	พัก	
0.25					100
0.5					45.65
1	1	1	60	30	18.30
1.5					6.24
3					37.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมของบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการตั้งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการตั้งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จำนวนการจุ่ม 10 รอบ เจืออลูมิเนียมที่ ปริมาณ (ก.) 0 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ฉ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

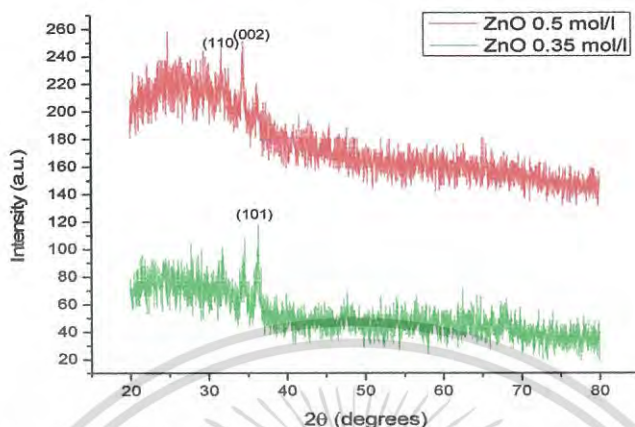


รูปที่ 4.32 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมของบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการติงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการติงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จำนวนการจุ่ม 10 รอบ เจืออลูมิเนียมที่ ปริมาณ (ก.) 0 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ฉ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

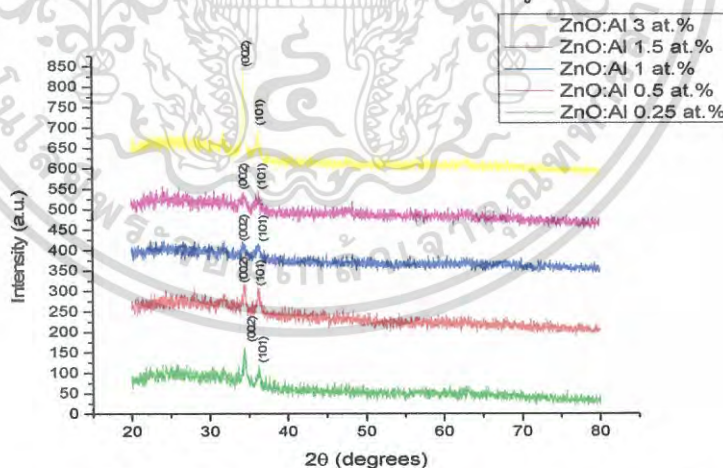
4.6 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเฟสและโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม

4.6.1 ผลของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์กับออกไซด์



รูปที่ 4.33 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้าที่ชื่อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จุ่มเคลือบ 10 รอบ โดยใช้ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ที่ (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร

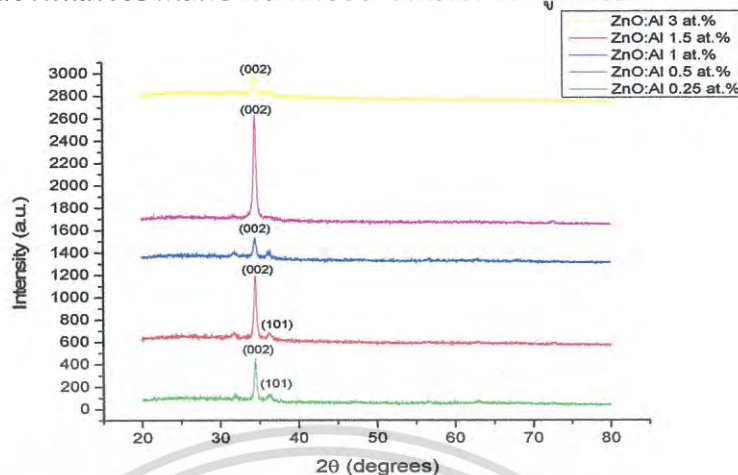
4.6.2 ผลของปริมาณอลูมิเนียมของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 โมลต่อลิตรที่มีต่อโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์กับออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม



รูปที่ 4.34 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมของอลูมิเนียมไนเตรดบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้าที่ชื่อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จุ่มเคลือบ 10 รอบ เจืออลูมิเนียมที่ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

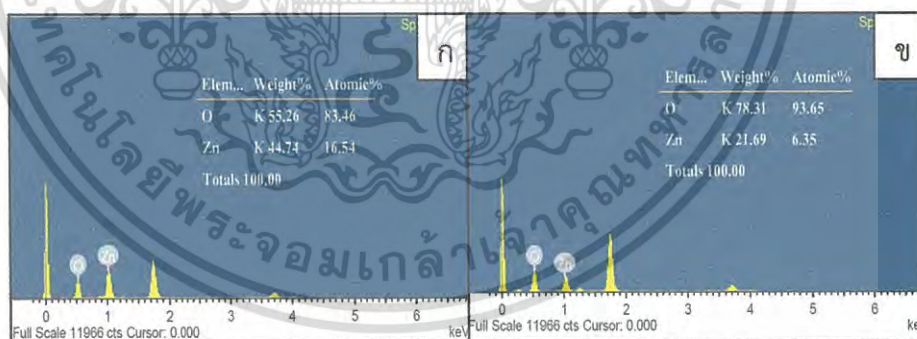
4.4.3 ผลของปริมาณอนุภาคนิยมของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรที่มีต่อโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์กับออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนิยม



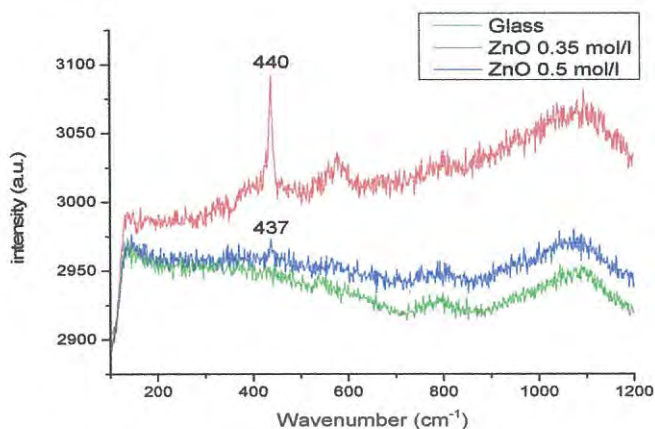
รูปที่ 4.35 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เจืออนุภาคนิยมของอนุภาคนิยมไนเตรดบนกระจก ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้าที่ชื่อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 4 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จุ่มเคลือบ 10 รอบ เจืออนุภาคนิยมที่ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

4.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนิยม

4.7.1 ผลของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อการเกาะเกี่ยวพันธะระหว่างซิงค์กับออกไซด์



รูปที่ 4.36 การตรวจสอบองค์ประกอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดโหมด EDS ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้าที่ชื่อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความเข้มข้น (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร

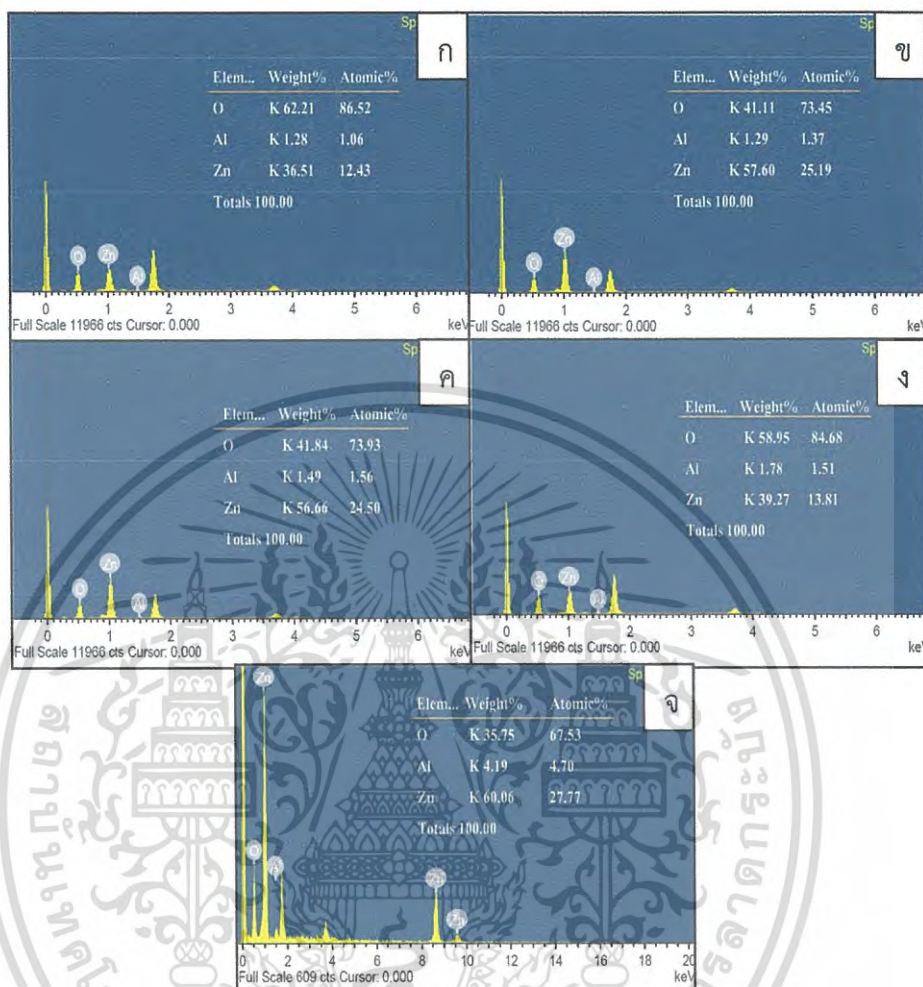


รูปที่ 4.37 การตรวจสอบส่วนประกอบของธาตุฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจกด้วยเทคนิค

รามานสเปกโตรสโคปี ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้าที่ชื่อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอนนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการดิ่งลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความเข้มข้น (ก.) 0.35 โมลต่อลิตร (ข.) 0.5 โมลต่อลิตร

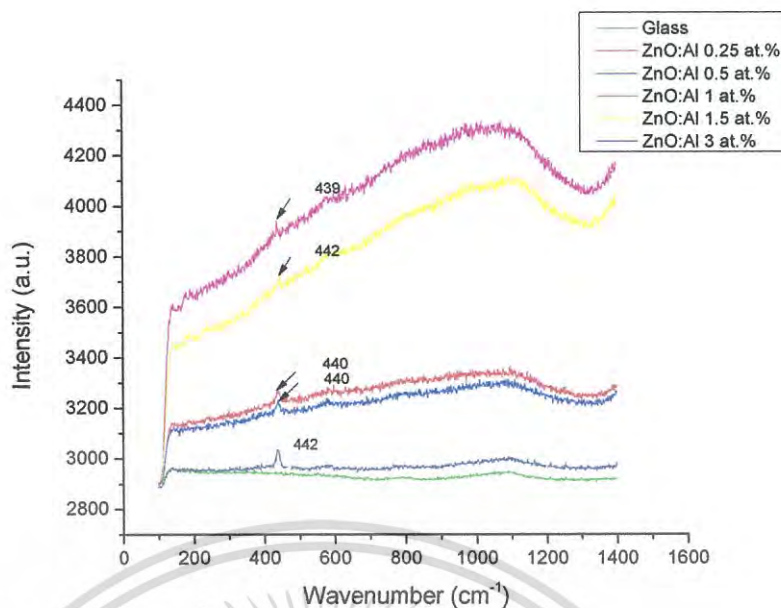
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 ผลของปริมาณอลูมิเนียมเนียมของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 โมลต่อลิตรที่มีต่อการเกาะเกี่ยวพันธะระหว่างอลูมิเนียมเนียมกับซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 4.38 การตรวจสอบองค์ประกอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตรเจือ อลูมิเนียมบนกระจก ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดโหมด EDS ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้าที่ชื่อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการดึงลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดึงขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

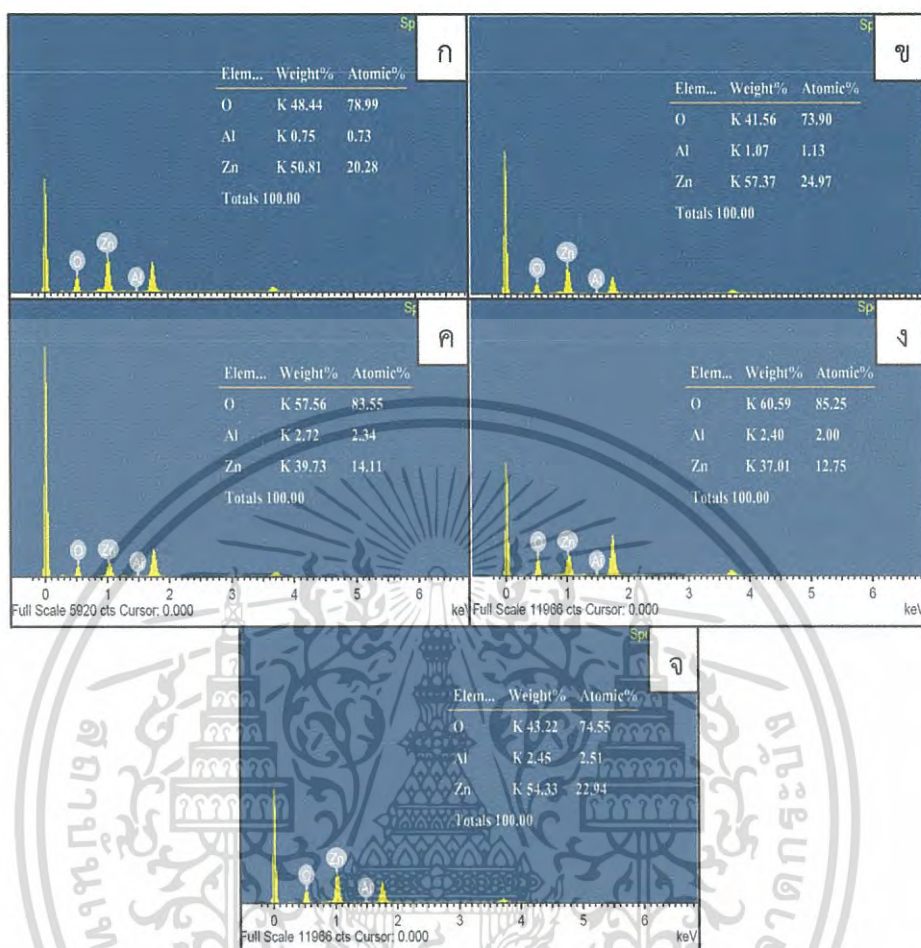
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 การตรวจสอบส่วนประกอบของธาตุฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมบนกระจกด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อSHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

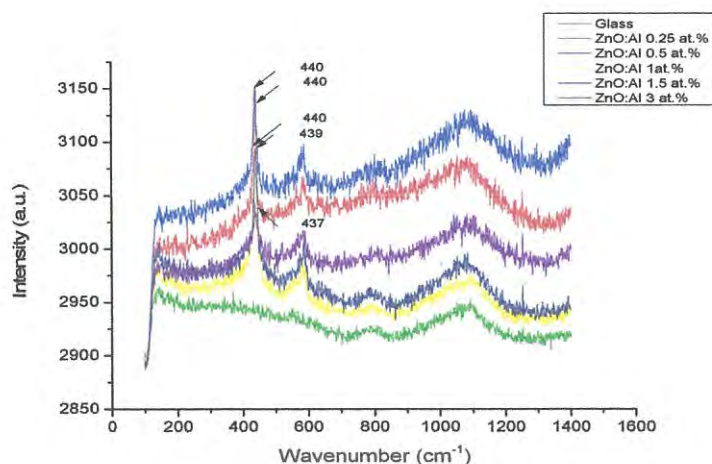
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.3 ผลของปริมาณอลูมิเนียมเนียมของความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตรที่มีต่อการเกาะเกี่ยวพื้นระหว่างอลูมิเนียมเนียมกับซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 4.40 การตรวจสอบส่วนประกอบของธาตุฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมเนียมบนกระจกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดโหมด EDS ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที จำนวนการจุ่ม 10 รอบ เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข) 0.5 อะตอม เปอร์เซ็นต์ (ค) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 การตรวจสอบส่วนประกอบของธาตุฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เจืออลูมิเนียมบนกระจกด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี ที่ผ่านการแอนนัลครั้งแรกโดยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KZ-50s เป็นเวลา 15 นาที แอลนัลครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เวลาแช่ 60 วินาที เวลาพัก 30 วินาที ระยะทาง 75 มิลลิเมตร จุ่มเคลือบจำนวน 10 รอบ ความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที เจืออลูมิเนียมที่ปริมาณ (ก.) 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ข.) 0.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ค.) 1 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (ง.) 1.5 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (จ.) 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางเพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ที่เรียกว่า “ชั้นนำไฟฟ้าโปร่งแสง” โดยซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานแถบช่องว่างแบบตรง (Direct band gab) นอกจากนี้ยังมีแถบพลังงานช่องว่างที่กว้าง (wide band gap) จึงมีสมบัติเหมาะสมสำหรับสิ่งประดิษฐ์ทางแสง เช่น ชั่วนำไฟฟ้าโปร่งแสง เซลล์แสงอาทิตย์ โครงงานพิเศษนี้ได้ศึกษาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 และ 0.5 โมลต่อลิตรเจือด้วยอะตอมอลูมิเนียมในความเข้มข้น 0.25, 0.5, 1, 1.5, 3 อะตอมเปอร์เซ็นต์ (เขียนแทนด้วย ZnO : Al Al=1, 1.5, 3 at%) ที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้สำหรับชั้นนำไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยวิธีการสังเคราะห์แบบ sol-gel แบบจุ่มเคลือบ (dip coating) ลงบนแผ่นกระจก จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้ไปผ่านการแอนนัลในอุณหภูมิครั้งแรกโดยใช้เตาอบไฟฟ้าที่ชื่อ SHARP รุ่น KZ-01 เป็นเวลา 15 นาที และนำไปแอนนัลครั้งสุดท้ายที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ศึกษาผลของความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ ความเร็วในการดึงลง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ดึงขึ้น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่มีต่อสมบัติทางโครงสร้างทางเคมี โครงสร้างพื้นผิว สมบัติทางแสงและวัดสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สำหรับชั้นนำไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

จากการวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่องยูวีซีบีเลทธานสมิสมัน พบว่าที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 โมลต่อลิตร มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ดีกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการดูดกลืน สามารถนำไปคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งความเข้มข้นทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อค่าแถบช่องว่างพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ของซิงค์ออกไซด์ เท่ากับ 3.2 eV

วิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) พบว่าที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 mol/L มีขนาดของผลึกที่ชัดเจนและมีความหนา 218 nm ที่ดีกว่าความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 mol/L มีความหนา 91.9 nm พบว่ามีความแตกต่างกันมากเนื่องจากฟิล์มมีความหนาไม่สม่ำเสมอ โดยที่ความหนาสามารถนำไปคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิเคราะห์ผลสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี Four point probe เมื่อนำค่าคุณสมบัติต้านทานไฟฟ้าจากความหนา พบว่าที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 mol/L มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ส่งผลให้ฟิล์มบางนำกระแสไฟฟ้าได้ดีที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่าแถบช่องว่างพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ ช่องว่างอิเล็กทรอนิกส์มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มบางนำกระแสไฟฟ้าได้ดีขึ้น

วิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-ray Diffraction (XRD) พบว่าที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 mol/L แสดงระนาบผลึก (101) อย่างชัดเจน และความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 mol/L แสดงระนาบผลึก (002) อย่างชัดเจน

วิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุด้วยวิธี Raman Spectroscopy พบว่าที่ความเข้มข้น 0.35 mol/L พบพีคซิงค์ออกไซด์ แต่ที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 mol/L นั้นไม่พบพีคเนื่องจากฐานรองฟิล์มที่ใช้เป็นกระจกซึ่งเป็น Si₂O โดยที่ O ของ Si₂O เข้าไปแทนที่ Zn

วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดโหมด EDS แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.5 mol/L มีปริมาณ O มาก แต่กลับมี Zn น้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุด้วยวิธี Raman Spectroscopy

ศึกษาผลของความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม ความเร็วในการดิ่งลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ดิ่งขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่มีต่อสมบัติทางโครงสร้างทางเคมี โครงสร้างพื้นผิว สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สำหรับขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวิเคราะห์ที่ความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์แตกต่างกันดังนี้

1. ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.35 mol/L เจืออลูมิเนียมบนกระจก

จากการวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่องยูวีซีบีลทรานสมิสชัน พบว่าที่ปริมาณอลูมิเนียม 3 at.% มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ดีกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็น ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยนำค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการดูดกลืนสามารถนำไปคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของอิเล็กตรอนสามารถหาค่าความกว้างของแถบพลังงานของฟิล์มได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^{1/2}$ กับค่า $h\nu$ พบว่าเมื่อเจืออลูมิเนียมมากขึ้นส่งผลให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยน

วิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) พบว่าเมื่อเจืออลูมิเนียมมากขึ้นขนาดของผลึกลดลงและความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมโดยใช้หลักการของความแตกต่างของความสูงระหว่างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมกับกระจกซึ่งแสดงลักษณะความสูงแตกต่างกันเมื่อเจืออลูมิเนียม

วิเคราะห์ผลสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี Four point probe เมื่อนำค่าความสภาพต้านทานไฟฟ้าจากความหนา พบว่าที่ปริมาณอลูมิเนียม 1.5 at.% มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ส่งผลให้ฟิล์มบางนำกระแสไฟฟ้าได้ดีที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่าแถบช่องว่างพลังงานอิเล็กตรอน เมื่อค่าแถบช่องว่างอิเล็กตรอนมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มบางนำกระแสไฟฟ้าได้ดีขึ้น

วิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-ray Diffraction (XRD) พบว่าเมื่อเจืออลูมิเนียมมากขึ้นระนาบของผลึกที่ (002),(101) ชัดเจนขึ้นตามลำดับ

วิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุด้วยวิธี Raman Spectroscopy พบว่าเมื่อเจืออลูมิเนียมมากขึ้น พีคซิงค์ออกไซด์จะหายไป แต่ที่ปริมาณอลูมิเนียม 0.25, 0.5 at.% นั้นพบพีคซิงค์ออกไซด์

วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดโหมด EDS แสดงให้เห็นว่าปริมาณอลูมิเนียมที่มากขึ้น

2. ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 mol/L เจืออลูมิเนียมบนกระจก

จากการวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่องยูวีซีบีลทรานสมิสชัน พบว่าที่ปริมาณอลูมิเนียม 1 at.% มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ดีกว่า 90-100 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็น ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยนำค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการดูดกลืนสามารถนำไปคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของอิเล็กตรอนสามารถหาค่าความกว้างของแถบพลังงานของฟิล์มได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^{1/2}$ กับค่า $h\nu$ พบว่าเมื่อเจืออลูมิเนียมมากขึ้นส่งผลให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) พบว่าที่ปริมาณอลูมิเนียม 0.5 at.% มีขนาดของผลึกที่ใหญ่ที่สุด และที่ปริมาณอลูมิเนียม 3 at.% มีขนาดของผลึกน้อยที่สุด โดยนำค่าความหนาไปคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิเคราะห์ผลสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี Four point probe เมื่อนำค่าความสภาพต้านทานไฟฟ้าจากความหนา พบว่าที่ปริมาณอลูมิเนียม 1.5 at.% มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ส่งผลให้ฟิล์มบางนำกระแสไฟฟ้าได้ดีที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่าแถบช่องว่างพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อค่าแถบช่องว่างอิเล็กทรอนิกส์มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มบางนำกระแสไฟฟ้าได้ดีขึ้น

วิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-ray Diffraction (XRD) พบว่าเมื่อเจืออลูมิเนียมมากขึ้นระนาบของผลึกที่ (002), (101) โดยที่ระนาบ (002) ชัดเจนที่สุด

วิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุด้วยวิธี Raman Spectroscopy พบว่าเมื่อเจืออลูมิเนียมมากขึ้น พิกเชิงค้่ออกไซด์จะหายไป แต่ที่ปริมาณอลูมิเนียม 0.25, 0.5, 1 at.% นั้นไปพบพิกเชิงค้่ออกไซด์ วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดโหมด EDS แสดงให้เห็นว่าปริมาณอลูมิเนียมที่มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมด้วยวิธีการโซล-เจล เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ในการเตรียมฟิล์มบางในโครงการพิเศษนี้พบปัญหาบางประการที่เป็นอุปสรรคในการเตรียมฟิล์มบาง จึงมีแนวทางแก้ไขพร้อมทั้งข้อเสนอแนะบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงในการพัฒนาคุณภาพการเตรียมฟิล์มบางให้ดียิ่งขึ้นดังนี้

1. ในการผสมสารละลายนั้นพบปัญหาในเรื่องของสารละลายไม่เป็นสารเนื้อเดียวกัน พบว่าสาเหตุมาจากภาชนะที่ทำความสะอาดเก็บไว้อาจมีฝุ่นเกาะ เพราะฉะนั้นไม่ควรที่จะเก็บไว้นานเกินไป ควรที่จะทำความสะอาดแล้วอบภาชนะเพื่อทำการเตรียมฟิล์มบางเลย
2. ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียมมีความไวต่อความชื้นสูง ดังนั้นควรเก็บรักษาฟิล์มบางที่มีโลกันความชื้นไว้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] พิษริดา เนื้อแก้วงาม,สุภกร ผันผล. 2556. “สมบัติตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือด้วยอะตอม F และ Sb”. หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] พรทิพย์ รอดพลอย,วรุทธิ์ คำอ่อน. 2554. “การสร้างไดโอดรอยต่อพีเอ็นของ p-Si/n-ZnO”.หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] ปริญญาภัทร กุลสุวรรณ,สุพรรณิ บาลัน.2555.“การพัฒนาระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีการจุ่มเคลือบ”.หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] ศิริวิวัฒนา อุ่นผาง.2555. “การเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง (ZnO:Cu) โดยเตรียมด้วยกระบวนการโซลเจล”.หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] เกียรติพงษ์ ได้การ. 2012. X-ray Diffractometer XRD. <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87-เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์-xrd.html>. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแม่ฟ้าหลวง.
- [6] บริษัท เนชั่นแนล โคเร็ค เน็ทเวิร์ค จำกัด. 2015.เครื่องสเปกโตรมิเตอร์. http://ndn.co.th/th/spectrometer_basic_knowledge_thai.html.
- [7] National Nanotechnology Center (NANOTEC). 2015. E-SEM (Environment Scanning Electron Microscope). <http://www.nanotec.or.th/lab/viewTool.php?toolId=7>.
- [8] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแม่ฟ้าหลวง. 2015. FTIR-Raman Spectrometer. <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/chemical-analysis-instrument-menu/itemlist/tag/FTIR.html>.
- [9] AsumiGiken. 2010. Processes of dip coating. http://www.dip-coater.com/english/about_dip_coating.html.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ก.1 คำนวณปริมาณสารตั้งต้นของสารละลายซิงค์ออกไซด์

ตัวอย่าง เช่น ที่ความเข้มข้น 0.35 โมลต่อลิตร

ในกระบวนการจุ่มเคลือบแบบโซล-เจล ในสารละลายตั้งต้นโดยใช้อัตราส่วน

Zinc acetate : ethanolamine เท่ากับ 1:1 mol/l และใช้ 2-methoxyethanol จำนวน 100 ml

สารละลายที่ใช้เตรียมสารตั้งต้นของสารละลายซิงค์ออกไซด์ มีดังนี้

สารตั้งต้น	สูตรเคมี	มวลโมเลกุล	หน้าที่
ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (Zinc Acetate Dihydrate)	$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$	219.49	สารตั้งต้นซิงค์ออกไซด์
2-methoxyethanol	$C_3H_8O_2$	76.09	ตัวทำละลายซิงค์ออกไซด์
โมนอเอทานอลามีน (Monoethanolamine)	$NH_2C_2H_4OH$	61.08	สารช่วยเพิ่มความเสถียรของสารละลายโซล-เจล
อลูมิเนียมไนเตรต (Aluminum nitrate)	$Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	375.13	สารเจือในอะตอมอลูมิเนียม

หาจำนวนโมลของ Zinc acetate dehydrate

สารละลายซิงค์ออกไซด์ 1000 ml มีความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 mol/l

สารละลายซิงค์ออกไซด์ 100 ml มีความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ $\frac{100 \times 0.35}{1000} = 0.035 \text{ mol}$

หาจำนวนกรัมของ Zinc acetate dihydrate

$$\text{จาก } n = \frac{g}{m}$$

n = จำนวนโมล

g = น้ำหนักหรือมวลสารเป็นกรัม

m = น้ำหนักหรือมวลอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ มวลอะตอมของ Zinc acetate dihydrate เท่ากับ 219.51

$$g = n \times m$$

$$g = 0.035 \times 219.51 = 7.68 \text{ g}$$

หาจำนวนโมลของ ethanolamine

เมื่อ Zinc acetate : ethanolamine เท่ากับ 1:1 mol/L ดังนั้น ethanolamine เท่ากับ 0.35 mol/L

สารละลายซิงค์ออกไซด์ 1000 ml มีความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ 0.35 mol/L

สารละลายซิงค์ออกไซด์ 100 ml มีความเข้มข้นซิงค์ออกไซด์ $\frac{100 \times 0.35}{1000} = 0.035 \text{ mol}$

หาจำนวนปริมาตรของ ethanolamine

$$\text{จาก } \rho = \frac{m}{v}$$

ρ = ความหนาแน่น

m = น้ำหนักหรือมวลอะตอม

v = ปริมาตร

โดยที่ ความหนาแน่นของ ethanolamine เท่ากับ 1.02 g/cm³

$$V = \rho \times m$$

$$V = 1.02 \times 61.08 =$$

ก.2 คำนวณสารละลายอลูมิเนียมไนเตรทที่ต้องเติมในสารละลายโซล-เจล

ตัวอย่าง เช่น ที่ปริมาณอลูมิเนียม 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์

$$\text{จาก } \frac{[Al]}{[Al] + [Zn]} \times 100 = \text{at.}\%$$

โดยที่ [Al] คือ ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมไนเตรท (mol)

[Zn] คือ ความเข้มข้นของซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (mol)

$$\frac{[Al]}{[Al] + [Zn]} \times 100 = 0.25 \text{ at.}\%$$

$$[Al] = \frac{0.25}{100} [Al] + \frac{0.25 \times 0.5}{100}$$

$$= 0.002[Al] + 0.001$$

$$(1 - 0.002)[Al] = 0.001$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[Al] = \frac{0.001}{0.998}$$

$$[Al] = 0.001$$

หาจำนวนกรัมของ Aluminum nitrate

$$\text{จาก } n = \frac{g}{m}$$

n = จำนวนโมล

g = น้ำหนักหรือมวลสารเป็นกรัม

m = น้ำหนักหรือมวลอะตอม

โดยที่ มวลอะตอมของ Aluminum nitrate เท่ากับ 375.13

$$g = n \times m$$

$$g = 0.001 \times 375.13 = 0.3751 \text{ g}$$

เพราะฉะนั้น จะต้องเติมสารละลายอลูมิเนียมไนเตรทปริมาตร 0.3751 กรัม เพื่อให้ได้สารเจือ
อลูมิเนียมปริมาณ 0.25 อะตอมเปอร์เซ็นต์

ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต $[Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O]$ 1 mol

จะมี $[Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O]$ จำนวน 6.02×10^{23} โมเลกุล

ดังนั้น จึงมีอะตอมของซิงค์ (Zn) ทั้งหมด 6.02×10^{23} อะตอม เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

Pattern : 79-206

Radiation = 1.540600

Quality : Calculate

Zn O

Zinc Oxide

Lattice : Hexagonal

S.G. : P63mc (186)

a = 3.24992

c = 5.20658

Z = 2

I/cor = 5.30

Mol. weight = 81.38

Volume [CD] = 47.62

Dx = 5.675

2th	l	h	k	l
31.768	58	1	0	0
34.422	42	0	0	2
36.253	100	1	0	1
47.539	21	1	0	2
56.594	30	1	1	0
62.858	27	1	0	3
66.374	4	2	0	0
67.947	21	1	1	2
69.085	10	2	0	1
72.568	2	0	0	4
76.959	3	2	0	2
81.387	2	1	0	4
89.613	6	2	0	3

ICSD COLLECTION CODE : 065120
 TEMPERATURE FACTOR : ATF
 REMARKS FROM ICSD : REM TEM 300.

*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference :

*Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, volume 45, page 34, (1989) :
 Albertsson, J., Abrahams, S.C., Kvick, A.

Radiation : CuKα1

Filter : Not specified

Lambda : 1.54060

d-sp : Calculated spacings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้