



การสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กโทรโครมิกของทั้งสแตนออกไซด์  
เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์

Synthesis of Li-molybdate/AgCl co-doped  $WO_3$  electrochromic film

ฐิตินันท์ อินเฒ่า  
Thitinun Inmae

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Master of Engineering in Materials Engineering  
Prince of Songkla University

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กโทรโครมิกของทังสเตนออกไซด์  
เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์  
Synthesis of Li-molybdate/AgCl co-doped  $WO_3$  electrochromic film

ฐิตินันท์ อินเฒ่า  
Thitinun Inmae

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Master of Engineering in Materials Engineering  
Prince of Songkla University  
2560  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ของทั้งสแตนออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและ  
ซิลเวอร์คลอไรด์  
ผู้เขียน นางสาวฐิตินันท์ อินเม้  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
(รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย แสงฉาย)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ คณิติต เจษฎ์พัฒนานนท์)

.....กรรมการ  
(ดร.มัทนา ชั่งคะมโณ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี  
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....  
(รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ .....  
(นางสาวฐิตินันท์ อินแม่)  
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....

(นางสาวฐิตินันท์ อินเม้)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ของทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต และซิลเวอร์คลอไรด์  
 ผู้เขียน นางสาวฐิตินันท์ อินเม้  
 สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ  
 ปีการศึกษา 2560

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ของทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ด้วยกระบวนการโซล-เจล แล้วนำไปเคลือบกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ โดยเคลือบฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์และฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล แล้วอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ วิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอน วิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับพื้นผิวของฟิล์ม วิเคราะห์สมบัติไฟฟ้าเคมีของฟิล์มโดยโวลแทมมิทรีแบบรอบ และวิเคราะห์สมบัติการส่งผ่านทางแสงของฟิล์ม พบว่า ฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีสัมประสิทธิ์การแพร่สูงสุดคือ  $3.98 \times 10^{-9}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และมีความแตกต่างของการส่งผ่านของแสง สูงสุดคือ 55.93 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นนำฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมลมาเจือซิลเวอร์คลอไรด์ เมื่อเจือซิลเวอร์คลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ฟิล์มมีสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ดีขึ้นมีสัมประสิทธิ์การแพร่สูงสุดคือ  $4.55 \times 10^{-9}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซิลเวอร์คลอไรด์ทำให้ฟิล์มบนกระจกมีสีทึบขึ้น

<b>Thesis</b>	Synthesis of Li-molybdate/AgCl co-doped WO <sub>3</sub> electrochromic film
<b>Author</b>	Miss Thitinun Inmae
<b>Major</b>	Materials Engineering
<b>Academic Year</b>	2017

## Abstract

This thesis aims to synthesize lithium molybdate/silver co-doped tungsten trioxide electrochromic film via sol-gel method and then the sol-gel solution was deposited on FTO glass substrates by dip coating. The WO<sub>3</sub> doped with Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> thin films (5, 10, 15 mol%) were dried at 60 °C for 1 h and calcined at 300 °C for 2 h. The synthesized film was characterized by XRD, SEM, EDX, AFM and XPS. The electrochromic and optical properties of the films were determined by using cyclic voltammetry and UV-vis spectrometer. It was found that 10 mol% Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> doped WO<sub>3</sub> exhibited the highest electrochromic properties in terms of the highest diffusion coefficient of  $3.98 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ , and it had high color modulation of 55.93%. Furthermore, AgCl of 10 mol% doping in this film could give superior electrochromic property and its diffusion coefficient was about  $4.55 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ . AgCl made the films become darker.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูง ทั้งที่ออกนามและไม่ออกนาม ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกด้านไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง และรองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ คนดิต เจษฎ์พัฒนานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย แสงฉายและดร.มัทนา ช่างกะโมนีที่คอยให้คำแนะนำสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่คอยให้คำแนะนำและเป็นพี่ปรึกษาเกี่ยวกับการปฏิบัติการและงานด้านเอกสารต่างๆ

ขอขอบคุณสถานวิจัยความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่อพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบและซิลเวอร์คลอไรด์ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณสถานวิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาเอกและโท พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่เป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำและช่วยเหลือที่ดีในทุกโอกาส

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่อยู่เบื้องหลังคอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดเสมอมา ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนบุคคลทั่วไปที่สนใจ หากพบว่ามีข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนก็ขอภัยไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ฐิตินันท์ อินเม้



## สารบัญ

บทคัดย่อ.....	(5)
Abstract.....	(6)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
รายการตาราง.....	(11)
รายการรูป.....	(12)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ.....	(15)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตในงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปรัชญาการณ้อเล็กโทรโครมิก.....	5
2.2 วัสดุโครมิก.....	5
2.3 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์อเล็กโทรโครมิก.....	6
2.3.1 วัสดุรองรับ.....	6
2.3.2 ตัวนำโปร่งใส.....	6
2.3.3 วัสดุอเล็กโทรโครมิก.....	7
2.3.4 อเล็กโทรไลต์.....	7
2.3.5 ชั้นเก็บประจุ.....	7
2.4 วัสดุที่ใช้เป็นสารอเล็กโทรโครมิก.....	8
2.4.1 สารอินทรีย์.....	8
2.4.2 สารอนินทรีย์.....	8
2.5 หลักการทำงาน และกลไกการเกิดสีของอเล็กโทรโครมิก.....	9
2.6 ทังสเทนไดรออกไซด์.....	9
2.6.1 กลไกการเกิดสีของทังสเทนไดรออกไซด์.....	10
2.6.2 ความบกพร่องทางโครงสร้างของทังสเทนไดรออกไซด์.....	13
2.7 ซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl).....	16
2.8 ลิเทียมโมลิบเดต (Li-Molybdate).....	17
2.9 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีโซล-เจล.....	18
2.9.1 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ (Dip coating).....	19

2.9.2 การอบฟิล์ม (Drying) .....	19
2.10 การดูกลืนทางแสง .....	20
2.11 เคมีไฟฟ้า .....	22
2.11.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี .....	22
2.11.2 ขั้วไฟฟ้า .....	23
2.11.3 การหาปริมาณทางเคมีไฟฟ้าด้วยโวลแทมเมทรีแบบรอบ (Cyclic voltammetry) .....	25
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีวิจัย.....	33
3.1 วิธีการวิจัย.....	33
3.2 วัสดุและอุปกรณ์.....	33
3.3 ขั้นตอนการวิจัย.....	34
3.3.1 การสังเคราะห์ทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์.....	34
3.3.2 การเจือลิเทียมโมลิบเดต.....	35
3.3.3 การสังเคราะห์ซิลเวอร์และเจือซิลเวอร์.....	36
3.3.4 การทำความสะอาดผิวกระจกนำไฟฟ้า.....	37
3.3.5 การเตรียมฟิล์ม.....	37
3.4 การตรวจสอบบัติและคุณลักษณะของฟิล์ม.....	38
3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์.....	38
3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	38
3.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุด้วยเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน.....	38
3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	38
3.4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับพื้นผิวของฟิล์ม.....	39
3.4.6 การวิเคราะห์สมบัติการส่งผ่านทางแสงของฟิล์ม.....	39
3.4.7 การวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้าเคมีของฟิล์มโดยโวลแทมเมทรีแบบรอบ.....	39
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล.....	41
4.1 สมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต.....	41
4.1.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสีด้วยวิธี CV.....	41
4.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่งผ่านของแสงด้วยเทคนิค UV-Vis.....	43
4.2 สมบัติทางโครงสร้างและพื้นผิวของฟิล์มทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต.....	45
4.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหรือเฟสของฟิล์มทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD.....	45
4.2.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฟิล์มทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คอลลอยด์ด้วยเทคนิค SEM.....	46

4.2.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือ ลิเทียมโมลิบเดตและด้วยเทคนิค EDX.....	47
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ความขรุขระของฟิล์มด้วยเทคนิค AFM.....	48
4.2.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้างเคมีของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือ ลิเทียมโมลิบเดตด้วยเทคนิค XPS.....	49
4.3 สมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์ คลอไรด์.....	51
4.3.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสีด้วยวิธี CV.....	51
4.3.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิค UV-Vis.....	53
4.4 สมบัติทางโครงสร้างและพื้นผิวของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิล เวอร์คลอไรด์.....	54
4.4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหรือเฟสของฟิล์มที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD.....	54
4.2.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต และซิลเวอร์คลอไรด์ด้วยเทคนิค SEM.....	55
4.2.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือ ลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ด้วยเทคนิค EDX.....	55
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ความขรุขระของฟิล์มด้วยเทคนิค AFM.....	57
4.2.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้างเคมีของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือ ลิเทียมโมลิบเดตและด้วยเทคนิค XPS.....	58
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 บทสรุป.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
บรรณานุกรม.....	62

## รายการตาราง

ตารางที่ 2.1 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชั้นอิเล็กทรอนิกส์เป็นสารอินทรีย์.....	9
ตารางที่ 2.2 สมบัติของโลหะทั้งสแตนไดรออกไซด์.....	10
ตารางที่ 2.3 สัดส่วนการแทรกตัวของไอออนไฮโดรเจนหรือลิเทียมที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีใน $WO_3$ ที่แตกต่างกัน.....	12
ตารางที่ 2.4 สมบัติของซิลเวอร์คอลลอยด์.....	17
ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต.....	43
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต.....	45
ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คอลลอยด์.....	52
ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คอลลอยด์.....	54

## รายการรูป

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบฟิล์มกรองแสงที่วางขายท้องตลาด.....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของโลหะทั้งสแตนไดรออกไซด์.....	10
รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของ $H^+$ จากสารละลายกรดซัลฟิวริก และอิเล็กตรอนมีการจ่าย สนามไฟฟ้า.....	11
รูปที่ 2.5 (ก) หน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ของ (Li, Na) $WO_3$ และ (ข) $HWO_3$ .....	12
รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่าง 2 อะตอมของโลหะ.....	13
รูปที่ 2.7 แสดงความบกพร่องของผลึก (ก) Schottky และ (ข) Frenkel.....	14
รูปที่ 2.8 จุดบกพร่องเกิดขึ้นในแนวระนาบของทั้งสแตนไดรออกไซด์ ( $WO_{3-x}$ ) เมื่อมีสถานะออกซิเจนขาด ดุล ในระนาบต่างๆ (ก) {102}CS (ข) {103}CS (ค) {104}CS (ง) {105}CS และ (จ) {001}CS.....	15
รูปที่ 2.9 จุดบกพร่องเนื่องจาก Pentagonal column ของทั้งสแตนไดรออกไซด์ $WO_{3-x}$ ในโครงสร้าง เฟสต่างๆ (ก) Pentagonal column (ข) $W_{12}O_{34}$ (ค) $W_{18}O_{49}$ (ง) $W_5O_{14}$ และ (จ) $W_{17}O_{47}$ .....	16
รูปที่ 2.10 โครงสร้างผลึกแบบเตตระฮีดรอลของลิเทียมโมลิบเดต.....	18
รูปที่ 2.11 กระบวนการจุ่มเคลือบ.....	19
รูปที่ 2.12 ลักษณะสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	20
รูปที่ 2.13 การดูดกลืนแสงในเนื้อวัสดุ.....	21
รูปที่ 2.14 การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	23
รูปที่ 2.15 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (ก) SHE และ (ข) SCE.....	24
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของโวลแทมมิทรีแบบรอบ.....	26
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโวลแทมโมแกรมแบบรอบของระบบ ที่ผันกลับได้เมื่อกราฟส่วนบน คือ การเกิดปฏิกิริยารีดักชันและกราฟส่วนล่าง คือ การ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และค่า $i_c$ และ $i_a$ คือ ค่ากระแสสูงสุดในแต่ละปฏิกิริยา และเป็น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดปฏิกิริยามากที่สุด.....	27
รูปที่ 2.18 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางทั้งสแตนไดรออกไซด์.....	29
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์โซลทั้งสแตนไดรออกไซด์.....	34
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเจือลิเทียมโมลิบเดตในโซลทั้งสแตนไดรออกไซด์.....	35
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซิลเวอร์คลอไรด์และเจือซิลเวอร์คลอไรด์ในโซลทั้งสแตนไดรออกไซด์ เจือลิเทียมโมลิบเดต.....	36
รูปที่ 3.4 การเตรียมฟิล์ม $WO_3$ หรือ $WO_3/Li_2MoO_4$ หรือ $WO_3/Li_2MoO_4/AgCl$ ด้วยวิธีจุ่ม เคลือบ.....	37

รูปที่ 4.1	โวลเทมโมแกรมของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต (ก) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ และฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต (ข) 1 (ค) 5 (ง) 10 (จ) 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และ (ฉ) กราฟเปรียบเทียบผลของปริมาณลิเทียมโมลิบเดตต่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต.....	42
รูปที่ 4.2	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต (ก) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ และฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต (ข) 1 (ค) 5 (ง) 10 และ (จ) 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล.....	44
รูปที่ 4.3	XRD สเปกตรัมของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์และฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต .....	45
รูปที่ 4.4	ภาพพื้นผิวของฟิล์ม (ก) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ (ข) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (ค) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และ (ง)ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล.....	46
รูปที่ 4.5	การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต.....	47
รูปที่ 4.6	การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต.....	48
รูปที่ 4.7	ภาพความขรุขระของพื้นผิวฟิล์ม (ก)ทั้งสแตนไดรออกไซด์ (ข)ทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (ค)ทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล.....	49
รูปที่ 4.8	สเปกตรัม XPS แบบ survey ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต.....	50
รูปที่ 4.9	สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น W 4f.....	50
รูปที่ 4.10	สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น Mo 3d.....	50
รูปที่ 4.11	โวลเทมโมแกรมของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ (ก) 5 (ข) 10 (ค) 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และ (ง) กราฟเปรียบเทียบผลของปริมาณซิลเวอร์คลอไรด์ต่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์.....	52
รูปที่ 4.12	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล.....	53
รูปที่ 4.13	XRD สเปกตรัมของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์.....	54
รูปที่ 4.14	ภาพพื้นผิวของฟิล์ม (ก) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมลและซิลเวอร์คลอไรด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (ข) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และ (ค) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมลและซิลเวอร์คลอไรด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล....	55
รูปที่ 4.15	การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์.....	56

รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ .....	56
รูปที่ 4.17 ภาพความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ (ก) 5 (ข) 10 (ค) 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล.....	57
รูปที่ 4.18 สเปกตรัม XPS แบบ survey ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์.....	58
รูปที่ 4.19 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น W 4f.....	58
รูปที่ 4.20 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น Mo 3d.....	59
รูปที่ 4.21 สเปกตรัม XRD ในระดับชั้น Ag 3d.....	59

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

%T	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสง
$\Delta T$	ความแตกต่างของการส่องผ่านแสง
AFM	Atomic force microscope
APCVD	Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition
CV	Cyclic voltammetry
EDX	Energy dispersive x-ray spectrometer
eV	อิเล็กตรอนโวลต์
FTO	กระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน
mol%	เปอร์เซ็นต์โดยโมล
nm	นาโนเมตร
SEM	Scanning electron microscope
$T_c$	ค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มในสถานะเกิดสี
$T_b$	ค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มในสถานะจางสี
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy
XRD	X-ray diffractometer



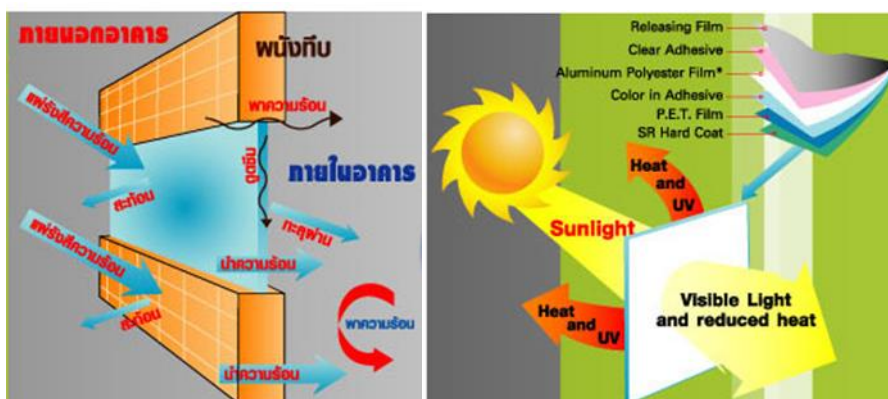
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

ในปัจจุบันสถาปัตยกรรมอาคารบ้านเรือน ตึก สำนักงาน และสิ่งก่อสร้างอื่นๆ รวมทั้งอุตสาหกรรมยานยนต์ มักนำกระจกหรือแก้วมาใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญ เช่น ประตู หรือ หน้าต่าง ด้วยสมบัติที่พิเศษของกระจก คือ มีความโปร่งแสง โปร่งใส ติดตั้งง่าย สะดวก รวดเร็ว และมีน้ำหนักเบากว่าผนังซีเมนต์ และสามารถตัดแต่งเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ เพื่อเพิ่มความสวยงาม แต่ข้อเสียคือ กระจกไม่สามารถระบายอากาศได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องปรับอากาศภายในอาคาร ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นักวิจัยจึงได้พยายามคิดค้นหาวิธีการผลิตวัสดุโปร่งแสงและโปร่งใสที่สามารถสะท้อนคลื่นความร้อนได้ดี และสามารถควบคุมระดับความเข้มแสงในช่วงที่ตามองเห็น กระจกที่มีความสามารถดังกล่าวนี้คือ กระจกอัจฉริยะ (Smart glass) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยประหยัดและใช้พลังงานที่มีอยู่ให้คุ้มค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกระจกมีความพิเศษที่สามารถควบคุมปริมาณแสงและความร้อนส่งผ่านกระจกได้โดยการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าที่สิ้นเปลืองไฟต่ำ ดังนั้นจึงมีการนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้ทำเป็นกระจกในหน้าต่างอัจฉริยะสำหรับกระจกอาคารบ้านเรือน หรือ ยานพาหนะ เพื่อป้องกันหรือสะท้อนความร้อน สามารถปรับปริมาณแสงสว่างและความร้อนที่ผ่านเข้าสู่ภายในอาคารได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้สามารถจัดการเรื่องการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งถือเป็นการอนุรักษ์พลังงานอีกทางหนึ่ง

เมื่อแสงอาทิตย์ส่องผ่านกระจกเข้ามาจะมีรังสีความร้อนอินฟราเรด (Infrared, IR) ทำให้อาคารบ้านเรือนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการเคลือบฟิล์มบางบนกระจก ทำให้กระจกมีสมบัติที่ยอมให้คลื่นในช่วงที่ตามองเห็นผ่านเข้ามาได้ ในขณะที่เดียวกันก็สะท้อนคลื่นความร้อนออกนอกอาคาร โดยควบคุมปริมาณแสงสว่างที่ผ่านเข้ามาในอาคารให้อยู่ในระดับที่เพียงพอ และสะท้อนคลื่นความร้อนได้เมื่ออากาศร้อนและอุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ดังนั้นจึงมีการคิดค้นวัสดุเพื่อใช้กับกระจกอัจฉริยะที่อาศัยการกระตุ้นสารเหล่านี้ด้วยไฟฟ้า เรียกว่า วัสดุอิเล็กโทรโครมิก (Electrochromic materials) วัสดุที่สามารถเปลี่ยนสีกลับไปมาได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้า เช่น ทังสเทนไดรออกไซด์ เปลี่ยนจากสีใสเป็นสีฟ้าเมื่อการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าที่เหมาะสม และเปลี่ยนกลับจากสีฟ้าเป็นสีใสเมื่อทำการปิดสวิตช์ไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 การเคลือบฟิล์มบางกรองแสงบนกระจก  
(ที่มา : <http://www.thaiwindowfilm.com>)

วัสดุอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติเด่น คือ การส่องผ่านของแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ในสภาวะโปร่งใส (Bleaching) ประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์ และในสภาวะเกิดสี (Coloring) ประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำประมาณ 1-5 โวลต์ มีอายุและรอบการใช้งานที่ยาวนาน สามารถคงสภาพได้นาน 12-48 ชั่วโมง มีความคมชัด สามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง และสามารถผลิตเป็นขนาดใหญ่ได้ จากสมบัติดังกล่าวจึงมีการนำฟิล์มบางอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ทำเป็นหน้าต่าง หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ตัวอย่างเช่น กระจกสำหรับอาคาร กระจกมองหลังรถยนต์ แว่นกันแสง และอุปกรณ์แสดงผล เป็นต้น โดยที่อุปกรณ์แต่ละชนิดมีสมบัติต่างกันไป

นอกจากนี้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยังสามารถช่วยส่งเสริม และเพิ่มประสิทธิภาพทางการผลิตในอุตสาหกรรมกระจกเพื่อเพิ่มมูลค่าแก่วัตถุดิบ และนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ อีกทั้งยังสามารถช่วยลดการนำเข้านี้เนื่องจากอุตสาหกรรมกระจกเป็นอุตสาหกรรมทดแทนการนำเข้าได้



รูปที่ 1.2 การประยุกต์ใช้งานของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์  
(ที่มา : <http://www.kmutt.ac.th/hynae>)

เป็นที่ทราบกันว่าประสิทธิภาพของกระจกในระบบอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นอยู่กัประสิทธิภาพของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ ที่นิยมในการศึกษาปรากฏการณ์อิเล็กทรอนิกส์มากที่สุด เช่น ออกไซด์ของโลหะ ทั้งสแตน โมลิบดีนัม ไทเทเนียม วาเนเดียม นิกเกิล และอิริเดียม เป็นต้น เนื่องจากโลหะออกไซด์เหล่านี้มีสมบัติทางแสงที่ยอมให้แสงส่องผ่านได้ในขณะที่ตามองเห็นจึงทำให้มีความโปร่งใส ซึ่งนอกจากชนิดของวัสดุแล้วยังต้องคำนึงถึงความไวในการเปลี่ยนสีกลับไปกลับมา ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค รูปร่าง และพื้นที่ผิวเป็นสำคัญ ขนาดอนุภาคยิ่งเล็กยิ่งมีประสิทธิภาพดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกวัสดุที่ใช้เป็นชั้นอิเล็กทรอนิกส์ คือ ทั้งสแตนออกไซด์ ( $WO_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยในสภาวะปกติจะมีสีใส เรียกสภาวะนี้ว่า “สภาวะจางสี” และเมื่อถูกกระตุ้นจากพลังงานไฟฟ้าภายนอกจะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำชิลเวอร์คลอไรด์ เรียกสภาวะนี้ว่า “สภาวะเกิดสี” ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของทั้งสแตนจาก  $6+$  เป็น  $5+$  ตามลำดับ วิธีหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของทั้งสแตนออกไซด์คือการเจือสารหรือไอออน ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้เลือกเจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ ทั้งนี้เพราะลิเทียมโมลิบเดตนั้นอาจช่วยควบคุมเฟสและขนาดของทั้งสแตนออกไซด์และยังเป็นออกไซด์ของโลหะทรานซิชันและลิเทียมไอออนที่อาจช่วยเพิ่มความไวในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของระบบ สำหรับซิลเวอร์คลอไรด์เองมีสมบัติเป็นวัสดุโฟโตโครมิกที่นิยมตัวหนึ่งอาจมีผลต่อการใช้พลังงานกระตุ้นที่น้อยลง

ในการเตรียมฟิล์มบางที่ใช้เป็นชั้นอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ ทางกายภาพ เช่น Physical vapor deposition (PVD) และทางเคมี เช่น Chemical vapor deposition (CVD) สเป็คเตอริง การเคลือบด้วยการพ่นสารละลาย การระเหยด้วยความร้อน และการเคลือบด้วยสารละลายด้วยวิธีโซล-เจล เป็นต้น โดยแต่ละวิธีให้ผลของฟิล์มที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ในการเตรียมฟิล์ม

ดังนั้นในงานวิจัยได้เลือกทั้งสแตนออกไซด์เป็นวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ และมีการเจือสารอื่นๆ ร่วมด้วย ได้แก่ ลิเทียมโมลิบเดต และซิลเวอร์คลอไรด์ ตลอดจนศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม เช่น สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมกระจก เพื่อช่วยควบคุมปริมาณความร้อนจากภายนอก และช่วยประหยัดพลังงาน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มทั้งสแตนออกไซด์เจือซิลเวอร์คลอไรด์และลิเทียมโมลิบเดต
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มที่เตรียมได้ เช่น สมบัติอิเล็กทรอนิกส์
- 1.2.3 ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม

## 1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ได้รับความรู้ในการสังเคราะห์ฟิล์มที่มีสมบัติในการเปลี่ยนสีด้วยตัวเอง
- 1.3.2 ทราบปริมาณของสารเจือที่เพิ่มประสิทธิภาพของฟิล์มในด้านต่างๆ เช่น สมบัติอิเล็กทรอนิกส์

1.3.3 ได้องค์ความรู้และเทคนิคในการผลิตฟิล์มที่มีสมบัติอิเล็กทรอนิกส์

1.3.4 สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนา และประดิษฐ์ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมไทยต่อไป

#### 1.4 ขอบเขตในงานวิจัย

1.4.1 สังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนที่เปลี่ยนสีโดยการกระตุ้นด้วยความต่างศักย์ทางไฟฟ้า

- ศึกษากระบวนการโซล-เจล ที่ใช้ในการสังเคราะห์

- ศึกษาชนิดและปริมาณของสารเจือ (Li-molybdate และ AgCl)

1.4.2 การเตรียมฟิล์มกรองแสงเปลี่ยนสีด้วยความต่างศักย์ทางไฟฟ้า

- ศึกษาเทคนิคการเคลือบฟิล์มลงบนกระจกให้มีความราบเรียบสม่ำเสมอ

- ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเจือและกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของ

ฟิล์ม

- ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติอิเล็กทรอนิกส์

โครมิก และสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของฟิล์ม

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปฏิกิริยาการเกิดอิเล็กโทรโครมิก [1]

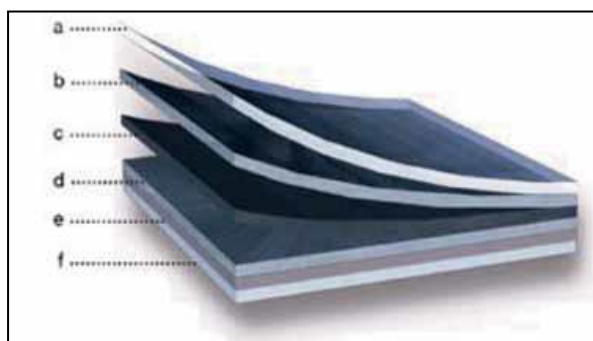
ปรากฏการณ์อิเล็กโทรโครมิก เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้า และการเปลี่ยนสี (Chromic) คือ เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังบริเวณเซลล์ของอุปกรณ์อิเล็กโทรโครมิก ที่มีสารอิเล็กโทรไลต์เป็นส่วนประกอบอยู่ในเซลล์ เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าไปยังเซลล์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะแตกตัวเป็นประจุ (Ion) และแทรกตัวเข้าไปในชั้นอิเล็กโทรโครมิกของเซลล์ ทำให้วัสดุนั้นเข้าสู่สภาวะการเปลี่ยนแปลงสี และเมื่อหยุดจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับเซลล์จะเกิดการถอนตัวของประจุทำให้วัสดุนั้นกลับเข้าสู่สภาวะปกติ เรียกสภาวะทั้งสองว่า สภาวะการเกิดสี (Coloring) และสภาวะการจางสี (Bleaching) ตามลำดับ ในการศึกษาปรากฏการณ์อิเล็กโทรโครมิก Shulman และ Compton [2] ได้ศึกษาปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของสารประกอบระหว่างธาตุหมู่ 1 (อัลคาไลน์) กับหมู่ 7 (ฮาโลเจน) เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หรือโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) โดยพบว่าเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าผ่านขั้ววัสดุของสารประกอบจะทำให้วัสดุเหล่านี้เกิดการเปลี่ยนสีได้โดยมีสีแดงและสีน้ำเงินซิลเวอร์คลอไรด์ ตามลำดับ และเมื่อหยุดการจ่ายศักย์ไฟฟ้าสารประกอบจะกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ในเวลาต่อมา Satyen (1995) ได้ศึกษาการเปลี่ยนสีของโลหะออกไซด์กลุ่มทรานซิชัน เช่น  $WO_3$ ,  $MoO_3$ ,  $TiO_2$  และ  $V_2O_5$  ที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งสามารถประดิษฐ์จอแสดงผลอิเล็กโทรโครมิกได้สำเร็จ

จากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของวัสดุอิเล็กโทรโครมิกจึงเป็นที่มาของการนำไปประยุกต์ใช้และผลิตเป็นอุปกรณ์อิเล็กโทรโครมิกที่มีประโยชน์ต่อไป เช่น การทำจอแสดงผลที่มีความคมชัดสูง และกระจกอัจฉริยะ เป็นต้น

#### 2.2 วัสดุโครมิก (Chromic Materials)

วัสดุโครมิก คือ วัสดุที่มีสมบัติสามารถเปลี่ยนสีกลับไปกลับมา ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามกลไกการเปลี่ยนสี ได้หลายแบบ เช่น Halochromism เปลี่ยนสีเมื่อ pH เปลี่ยน Solvatochromism เปลี่ยนสีเนื่องจากเปลี่ยนสภาพขั้วในตัวทำละลาย Halosolvatochromism เปลี่ยนสีเนื่องจากความแรงของไอออน (Ionic strength) เปลี่ยนโดยไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้าง Ionochromism เปลี่ยนสีเนื่องจากการเติมไอออน และที่นิยมในปัจจุบันสำหรับการป้องกันรังสีและความร้อน คือ อิเล็กโทรโครมิก (Electrochromism) เปลี่ยนสีที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า เทอร์โมโครมิก (Thermochromism) เปลี่ยนสีเมื่อถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ และโฟโตโครมิก (Photochromism) เปลี่ยนสีเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง วัสดุอิเล็กโทรโครมิกได้รับความนิยมสูง เนื่องจากกระจกไม่จำเป็นต้องมีช่องว่างตรงแกนกลางสำหรับบรรจุของเหลว แต่อาศัยการซ้อนกันของขั้วอิเล็กโทรดที่มีแผ่นฟิล์มนำไฟฟ้าที่มีสมบัติเปลี่ยนสีเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้า แต่มีข้อเสียที่ยังคงต้องปิด-เปิด สวิตช์ ปัจจุบันมีการพัฒนาอนุภาคสารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์ที่มีสมบัติโฟโตโครมิก หรือ เทอร์โมโครมิก ซึ่ง

สามารถผลิตฟิล์มกรองแสงที่มีสมบัติป้องกันรังสีและความร้อนดวงอาทิตย์ ในขณะที่มีความหนาไม่กี่มิลลิเมตร รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของฟิล์มกรองแสงที่วางขายท้องตลาด ประกอบด้วยชั้นฟิล์มหลายชั้น ในชั้น b แสดงสมบัติในการป้องกันรังสีและความร้อนดวงอาทิตย์ โดยการฉาบวัสดุ หรือผสมอนุภาคลงในฟิล์ม นอกจากสมบัติข้างต้นแล้วนั้นตัวฟิล์มยังต้องมีสมบัติทนต่อสภาพแวดล้อม สภาพอากาศ ความชื้น การเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตอีกด้วย



#### Structure of a typical window film

- a) release liner with silicone coating;
- b) adhesive layer with UV inhibitor;
- c) clear or tinted polyester film;
- d) adhesive layer;
- e) metallised layer for heat rejection on clear polyester film;
- f) scratch-resistant coating. Layer c may have added UV inhibitors for extended durability

### รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบฟิล์มกรองแสงที่วางขายท้องตลาด

(<http://www.scottmadden.com/?a=strm&aid=352>)

## 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

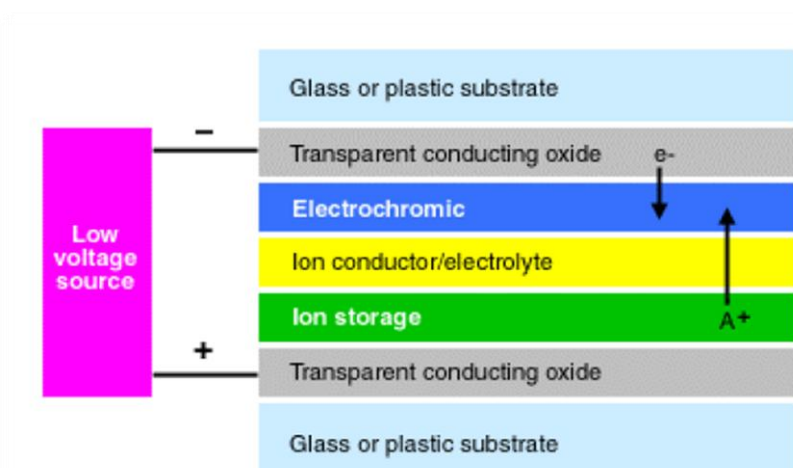
การเกิดสีเกิดจากการให้ศักย์ไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยแก่วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ผ่านวัสดุที่ใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ และการเปลี่ยนสีกลับไปกลับมาที่เกิดจากการสลับขั้วแอโนดและแคโทด อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีส่วนประกอบเป็นชั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 5 ส่วน ดังนี้

### 2.3.1 วัสดุรองรับ (Substrate)

วัสดุรองรับใช้สำหรับรองรับระบบฟิล์มของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ส่วนใหญ่เป็นวัสดุโปร่งใส เช่น พลาสติก หรือกระจก เป็นต้น

### 2.3.2 ตัวนำโปร่งใส (Transparent Conductor Oxide)

ชั้นตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส (TCO) เป็นฟิล์มบางของสารประกอบกึ่งตัวนำที่โปร่งใสนำไฟฟ้าได้ เคลือบลงบนวัสดุรองรับ ทำหน้าที่เป็นขั้วนำไฟฟ้า เพื่อจ่ายกระแสและอิเล็กตรอนเข้าสู่ชั้นของอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) อินเดียมทินออกไซด์ (ITO หรือ  $\text{In}_2\text{O}_3$  เติมสารเจือเป็น  $\text{SnO}_2$ ) หรือ ซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ )



รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โครมิก

(ที่มา: <http://arch-re-review.blogspot.com/2010/09/electrochromic-glazing.html>)

### 2.3.3 วัสดุอิเล็กทรอนิกส์โครมิก (Electrochromic material)

วัสดุอิเล็กทรอนิกส์โครมิกที่นำมาใช้ต้องมีความสามารถในการเปลี่ยนสีได้เมื่อได้รับการจ่ายสนามไฟฟ้าและการจ่ายอิเล็กตรอน โดยวัสดุที่นำมาใช้เป็นชั้นอิเล็กทรอนิกส์โครมิกมีทั้งชนิดที่เป็นสารอินทรีย์ ได้แก่ ไวโวลเจน แลนทาไนด์ฟทาโลไซยานีน และไพลาโซลีน (Pyrazoline) เป็นต้น แต่ยังไม่นิยมใช้เนื่องจากมีวิธีการเตรียมที่ยุ่งยาก และสารอินทรีย์ ส่วนมากนิยมใช้ออกไซด์ของโลหะในหมู่ทรานซิชัน ได้แก่ โมลิบดีนัมไดออกไซด์ ทังสเตนออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และวานาเดียมออกไซด์ เป็นต้น แต่วัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด คือ ทังสเตนไดออกไซด์

### 2.3.4 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytes)

อิเล็กโทรไลต์เป็นส่วนประกอบที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และเป็นทางผ่านของไอออนอยู่ในสถานะของเหลวหรือของแข็ง สำหรับที่เป็นของเหลว เช่น กรดซัลฟิวริก ที่เป็นแหล่งกำเนิดของ  $H^+$  โซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ ) แหล่งกำเนิดของ  $Na^+$  และลิเทียมเปอร์คลอเรต ( $LiClO_4$ ) ในตัวทำละลาย (เช่น อะซิโตนไนไตร,  $CH_3CN$  และอะซิโตน) ที่เป็นแหล่งกำเนิด  $Li^+$  ส่วนระบบที่เป็นของแข็งจะเรียกชั้นอิเล็กโทรไลต์นี้ว่า ไอออนคอนดักเตอร์ (Ion Conductor) หรืออิเล็กโทรไลต์แบบของแข็ง (Solid electrolyte layer) ส่วนใหญ่ทำหน้าที่ผ่านไอออน ไม่ได้ผลิตอิเล็กตรอน เช่น  $Ta_2O_5$ ,  $Cr_2O_3$  และ  $TiO_2$  ซึ่งเป็นตัวผ่านของไอออน ได้แก่  $H^+$  และสารบางชนิดเป็นแหล่งกำเนิดไอออนด้วย ได้แก่  $LiNbO_3$ ,  $Li_3N$  และ  $Li$

### 2.3.5 ชั้นเก็บประจุ (Ion Storage Layer)

ชั้นเก็บประจุทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุและจ่ายไอออนให้กับชั้นอิเล็กทรอนิกส์โครมิก สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โครมิกที่ชั้นอิเล็กโทรไลต์ไม่ได้ผลิตไอออนให้กับชั้นอิเล็กทรอนิกส์โครมิก และในกรณีที่ชั้นอิเล็กโทรไลต์ผลิตไอออนให้กับชั้นอิเล็กทรอนิกส์โครมิกจะเรียกว่า เคาน์เตอร์อิเล็กโทรด

(Counter electrode) ซึ่งมีหน้าที่บังคับการไหลของกระแส หรือเป็นตัวตรวจสอบการไหลของกระแส เช่น NiO, TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> และ V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

## 2.4 วัสดุที่ใช้เป็นสารอิเล็กโทรโครมิก [1]

วัสดุที่ใช้เป็นสารอิเล็กโทรโครมิกต้องมีสมบัติที่สามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้า มีลักษณะแตกต่างกันขึ้นกับรูปร่าง สถานะ โครงสร้างผลึก และสัดส่วนทางเคมี ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

### 2.4.1 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์จะเป็นออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน (Transition metal oxides) และวัสดุที่เกิดจากการแทรกสอดด้วยอะตอมอื่น (Intercalated material) เป็นต้น จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สารอินทรีย์ประเภทออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน เป็นที่นิยมในการศึกษาปรากฏการณ์อิเล็กโทรโครมิกมากที่สุด เช่น ทังสเตน โมลิบดีนัม ไทเทเนียม วาเนเดียม นิกเกิล และอิริเดียม เป็นต้น เนื่องจากโลหะออกไซด์เหล่านี้มีสมบัติทางแสงที่ยอมให้แสงส่องผ่านได้ในช่วงที่ตามองเห็นจึงทำให้มีความโปร่งใส อีกทั้งวัสดุที่เกิดจากการแทรกอะตอมอื่นเข้าไป

### 2.4.2 สารอนินทรีย์

สารอนินทรีย์ยังไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กโทรโครมิกมากนัก เนื่องจากมีวิธีการเตรียมที่ยุ่งยาก เช่น ไวโวลเจน แลนทาไนด์พทาโลไซยานิน และไพลาโซลีน เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 2.1 รายงานสรุปผลวิธีการเตรียมชั้นอิเล็กโทรโครมิกประเภทต่างๆ ทั้งอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แสดงให้เห็นการเปลี่ยนสีของชั้นอิเล็กโทรโครมิก ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้หลากหลายสีขึ้นอยู่กับประเภทของอิเล็กโทรโครมิก และจำนวนการแทรกตัวของไอออนเข้าสู่โครงสร้างของชั้นอิเล็กโทรโครมิก



ตารางที่ 2.1 ระบบอิเล็กโทรโครมิกที่มีชั้นอิเล็กโทรโครมิกเป็นสารอินทรีย์ [1]

วัสดุที่ใช้เป็นชั้นอิเล็กโทรโครมิก	วิธีการเตรียมทางเคมี	สีที่เปลี่ยนแปลงเกิดสี/จางสี
Pyrazoline	Dissolved	เหลือง/น้ำซิลเวอร์คลอไรด์, เขียว
Diheptyl viologen dibromide	Dissolved	ใส/น้ำซิลเวอร์คลอไรด์-ม่วง
Benzyl viologen	Dissolved	ใส/น้ำซิลเวอร์คลอไรด์
Tetrathaifulvalence (TIF)	Spin cast	เหลืองอ่อน/เขียว, ม่วง
C <sub>6</sub> Li-C <sub>2</sub> Li	Dissolved	ดำ/น้ำซิลเวอร์คลอไรด์, เขียว, เหลือง, ทอง

## 2.5 หลักการทำงาน และกลไกการเกิดสีของอิเล็กโทรโครมิก [1]

ในการเกิดสีซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีทางไฟฟ้าของปรากฏการณ์อิเล็กโทรโครมิกเกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้า ส่งผลให้มีการแทรกตัวของไอออนบวก (M<sup>+</sup>) และอิเล็กตรอน (e<sup>-</sup>) ภายในโครงสร้างของชั้นอิเล็กโทรโครมิก หรือเรียกว่าเป็นปรากฏการณ์ที่ต้องอาศัยการเกิดดับเบิลอินเจคชัน (Double injection) โดยมีไอออนบวกเป็นโลหะอัลคาไลด์ หรือธาตุในหมู่ 1 วิ่งเข้าหาขั้วแคโทด (Cathodic) และอิเล็กตรอนวิ่งเข้าหาขั้วแอโนด (Anodic) ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ



เมื่อ M<sup>+</sup> คือ H<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup> และ K<sup>+</sup> ส่วน A คือ โลหะทรานซิชัน



เมื่อ M<sup>-</sup> คือ H<sup>-</sup> และ OH<sup>-</sup> ส่วน A คือ โลหะทรานซิชัน

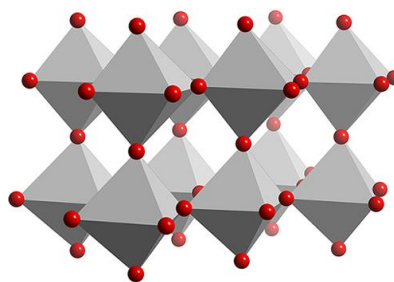
จากความแตกต่างของวัสดุที่นำมาใช้เป็นสารอิเล็กโทรโครมิกจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน ดังแสดงตัวอย่างของวัสดุที่นำมาใช้เป็นสารอิเล็กโทรโครมิก ปฏิกิริยาเคมีเมื่อมีการเปลี่ยนสี และสีที่เกิด (ตารางที่ 2.2 และ 2.3)

## 2.6 ทังสเตนไดรอกไซด์ (WO<sub>3</sub>)

ทังสเตนไดรอกไซด์เป็นสารประกอบแบบพันธะโคเวเลนต์ที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างทังสเตน (W) กับออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นออกไซด์ของโลหะกลุ่มทรานซิชันที่แสดงสมบัติการเป็นอิเล็กโทรโครมิก ทังสเตนออกไซด์เป็นโลหะอีกชนิดหนึ่งในหมู่ VI-B ซึ่งแสดงสมบัติการเป็นอิเล็กโทรโครมิก และได้รับความสนใจมากที่สุด เพราะสามารถเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความต่างศักย์ จึงนำไปทำเป็นชั้นอิเล็กโทรโครมิกที่เปลี่ยนสีได้ [3] สมบัติของทังสเตนออกไซด์ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของโลหะทังสเตนไตรออกไซด์ [3]

สูตรโครงสร้าง	WO <sub>3</sub>
ลักษณะโครงสร้าง	Hexagonal, Monoclinic และ Orthorhombic
น้ำหนักโมเลกุล	231.84
สี	เขียวอมเหลือง (Lemon yellow)
สถานะ	ของแข็ง
จุดหลอมเหลว	1473°C
จุดเดือด	1837°C
ความหนาแน่น	7200 kg/m <sup>3</sup>
เลขออกซิเดชันของ W	+3, +4, +5 และ +6



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของโลหะทังสเตนไตรออกไซด์

(ที่มา: <http://www.chem.ox.ac.uk/ic4/moleculeshtml/WO3-poly.html>)

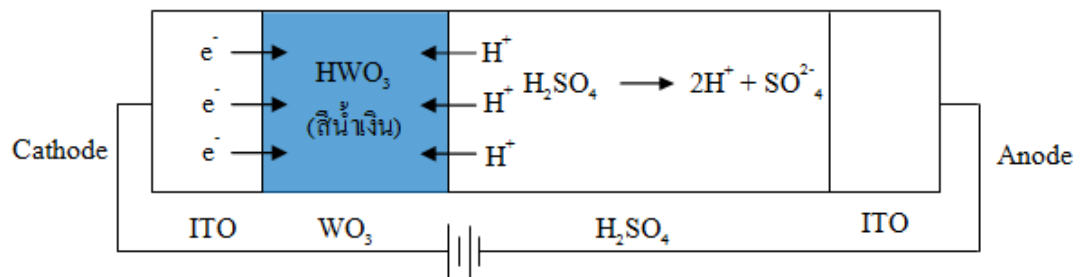
โครงสร้างผลึกของทังสเตนไตรออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 โครงสร้าง ซึ่งมียูนิตเซลล์พื้นฐานที่เป็น WO<sub>6</sub> มีรูปแบบเป็น Octahedral ในการฟอร์มโครงสร้างที่แตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์และอุณหภูมิในการเกิดเฟสต่างๆ ได้แก่ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal h-WO<sub>3</sub>) โมโนคลินิก (Monoclinic m-WO<sub>3</sub>) และออร์โธโรมบิก (Orthorhombic o-WO<sub>3</sub>) ในการประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสีกลับไปมาได้มากกว่าโครงสร้างผลึกแบบอื่นๆ เนื่องจากโครงสร้างผลึกของโลหะทังสเตนไตรออกไซด์แบบเฮกซะโกนอลนั้นมีช่องว่างเยอะกว่าโครงสร้างแบบอื่น ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนเข้ามาแทรกในช่องว่างได้มากกว่าโครงสร้างแบบอื่น จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสีกลับไปกลับมาได้มากกว่าโครงสร้างแบบอื่น [4]

#### 2.6.1 กลไกการเกิดสีของทังสเตนไตรออกไซด์ [5]

สมบัติของทังสเตนไตรออกไซด์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อให้สนามไฟฟ้า โดยมีการใส่เข้าหรือนำออกของไอออน (M<sup>+</sup>) และอิเล็กตรอน (e<sup>-</sup>) ซึ่งเรียกว่า ดับเบิลอินเจกชัน สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.3 โดยที่ไอออนบวกที่เป็นโลหะอัลคาไลน์ หรือธาตุในหมู่ 1 เช่น H<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> หรือ Li<sup>+</sup> วิ่งเข้าหาขั้วแคโทดและอิเล็กตรอนวิ่งเข้าหาขั้วแอโนด ดังรูปที่ 2.4



เมื่อ  $x$  คือ ปริมาณของไอออนที่ใส่เข้าไปต่อปริมาณทังสแตน  
 $\text{WO}_3$  คือ ทังสแตนไดรอกไซด์ที่อยู่ในสถานะของความโปร่งใส หรือไม่มีสี  
 $\text{M}_x\text{WO}_3$  คือ ทังสแตนไดรอกไซด์ที่อยู่ในสถานะของการเกิดสี เรียกว่า ทังสแตนบรอนซ์



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของ  $\text{H}^+$  จากสารละลายกรดซัลฟิวริก และอิเล็กตรอนมีการจ่ายสนามไฟฟ้าให้กับฟิล์มทังสแตนไดรอกไซด์ [3]

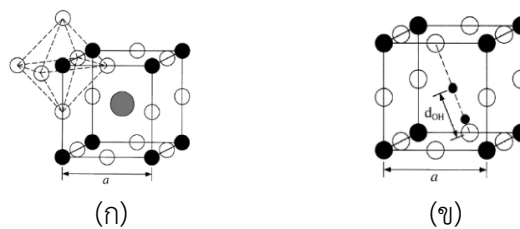
จากรูปที่ 2.4 ไอออนบวกที่ได้จากสารละลายซัลฟิวริก คือ  $\text{H}^+$  จะเคลื่อนที่ไปยังสารอิเล็กโทรโครมิกแล้วจัดรูปแบบใหม่เป็นทังสแตนบรอนซ์ ( $\text{HWO}_3$ ) จากนั้นอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดจะเคลื่อนเข้าไปยังสารอิเล็กโทรโครมิกเช่นกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) (สมการที่ 2.3) ถ้าปฏิกิริยาไปทางขวา เรียกว่า ปฏิกิริยารีดักชัน เป็นปฏิกิริยาที่บริเวณขั้วไฟฟ้า  $\text{ITO}/\text{WO}_3$  ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด เนื่องจากทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน ประกอบกับการแทรกตัวของโลหะอัลคาไลน์เข้าสู่โครงสร้าง ส่งผลให้ทังสแตนที่มีเลขออกซิเดชัน  $\text{W}^{6+}$  เปลี่ยนเป็น  $\text{W}^{5+}$  เรียกว่า ทังสแตนบรอนซ์ ทำให้ฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน และหากกลับขั้วของแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการดึงประจุออกจากชั้นอิเล็กโทรโครมิก หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้สีของวัสดุกลับมาโปร่งใสอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจาก  $\text{W}^{5+}$  กลับมาเป็น  $\text{W}^{6+}$  เช่นเดิม แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของปรากฏการณ์อิเล็กโทรโครมิกสามารถกลับไปกลับมาได้ (Reversible reaction) ภายใต้สนามไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีกลับไปกลับมาได้โดยขึ้นกับสัดส่วนของไอออนที่แทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของ  $\text{WO}_3$  ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนการแทรกตัวของไอออนไฮโดรเจนหรือลิเทียมที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีใน  $\text{WO}_3$  ที่แตกต่างกัน [6]

ค่าสัดส่วน X	สี
0	ไม่มีสี
0.1	เทา
0.2-0.4	น้ำซิลเวอร์คลอไรด์
0.6	ม่วง
0.7	น้ำตาล
0.8-1.0	บรอนซ์ทอง

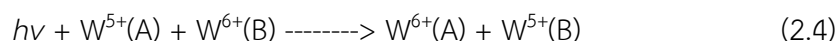
หมายเหตุ X คือ จำนวนไอออนที่แทรกตัวต่อจำนวนช่องว่างของไอออนทั้งหมด

จากสมการ (2.3) เมื่อไอออนเข้าแทรกตัวใน  $\text{WO}_3$  แล้วอาจมองหน่วยเซลล์ของผลึกใหม่ในรูปแบบลูกบาศก์ (Cubic) แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งพบในกรณีที่ไอออนบวกเข้าไปแทรกเป็นไอออนของธาตุอัลคาไลด์ เช่น  $\text{Li}^+$  หรือ  $\text{Na}^+$  (รูปที่ 2.5ก) ไอออนจะเข้าไปอยู่บริเวณตำแหน่งตรงกลางของลูกบาศก์ แต่ถ้ากรณีที่ไอออนเป็น  $\text{H}^+$  (รูปที่ 2.5ข) จะเข้าไปสร้างพันธะกับอะตอมของออกซิเจนเป็น O-H ดังนั้นระยะของ  $\text{H}^+$  อยู่บริเวณตำแหน่งตรงกลางของลูกบาศก์ เนื่องจากการแทรกตัวของไอออน  $\text{M}^+$  จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดจึงต้องเข้าไปในชั้นอิเล็กโทรโครมิก และเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนเข้าไปในชั้นอิเล็กโทรโครมิก อิเล็กตรอนจะถูกจับไว้ที่ด้านหนึ่งของอะตอมทั้งสอง ซึ่งก็เป็นตำแหน่งด้านหนึ่งของโครงสร้างผลึกที่ถูกโพลาไรซ์ (Polarization) เป็นสาเหตุที่ทำให้ทั้งสองบางตัวเปลี่ยนสถานะจาก  $\text{W}^{6+}$  เป็น  $\text{W}^{5+}$

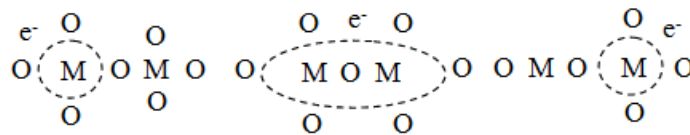


รูปที่ 2.5 (ก) หน่วยเซลล์ที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ของ  $(\text{Li, Na})\text{WO}_3$  และ (ข)  $\text{HWO}_3$  [3]

การเกิดสีของทั้งสองชนิดออกไซด์เกิดจาก Cathodic polarization ที่มีการใส่ไอออนและอิเล็กตรอนเข้าไป พิล์มที่มีการแทรกตัวของไอออน  $\text{M}^+$  จากสมการ (2.3) จะเกิดเป็นสีน้ำซิลเวอร์คลอไรด์ เนื่องจากการดูดกลืนพลังงานของโพลารอน (Polarons) ในการเปลี่ยนสถานะของทั้งสองซึ่งอยู่ในรูป  $\text{W}^{6+}$ ,  $\text{W}^{5+}$  และ  $\text{W}^{4+}$  และเมื่ออิเล็กตรอนที่แทรกเข้าไปอยู่ในตำแหน่งของ  $\text{W}^{5+}$  โฟตอนที่ตกกระทบถูกดูดกลืนโดยโพลารอนเล็กๆ เหล่านั้นแล้วกระโดดจากตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่ง ตามสมการ (2.4) และ (2.5)



จากการเปลี่ยนสถานะของทั้งสแตนบางตัวทำให้อิเล็กโตรโครมิกประกอบไปด้วย  $W^{6+}$  และ  $W^{5+}$  (โดยอาจจะมี  $W^{4+}$  ปนอยู่จากเวเลนซ์ของ W คือ  $5d^4 6s^2$ ) สำหรับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าไปในผลึก และเกิดปฏิกิริยากับการสั่นของโครงร่างผลึก (Phonon) เรียกว่า โพลารอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนเข้าไปในผลึกแล้วถูกจับไว้ที่ด้านหนึ่งอะตอมของทั้งสแตน โดยการโพลาริซของโครงร่างผลึก เรียกว่า Small polaron สำหรับลักษณะการเคลื่อนตัวจะขึ้นกับอุณหภูมิ คือ เมื่ออุณหภูมิต่ำ (สูงกว่าประมาณครึ่งหนึ่งของ Debye temperature) จะเคลื่อนตัวโดยการกระโดดจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่งโดยการกระตุ้นของอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนในกรณีที่อุณหภูมิต่ำ Small polaron จะเกิดการเคลื่อนที่ แบบทะลุผ่าน (Tunneling) และการนำไฟฟ้าจะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ซึ่งเป็นแถบการนำไฟฟ้าของ Small polaron นอกจากนี้พฤติกรรมทางแสงของ Small polaron ในสารที่ประกอบด้วยเวเลนซ์หลายแบบเรียกว่า การแลกเปลี่ยนเวเลนซ์ (Intervalence transitions)



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่าง 2 อะตอมของโลหะ [7]

ในกรณีของ  $WO_3$  จะเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนจาก  $W^{5+}$  กับ  $W^{6+}$  ข้างๆ และจากการเปลี่ยนสถานะกลับไปกลับมาระหว่าง  $W^{5+}$  กับ  $W^{6+}$  ทำให้อิเล็กตรอนมีการไหลวนคล้ายกับการเกิด F-color center (รูปที่ 2.6) เมื่อโฟตอนของแสงมาตกกระทบจะเกิดการดูดกลืนแสง ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณการเกิด Intervalence transitions โดยอาจเกิดจากการเปลี่ยนสถานะของ  $W^{4+}$  กับ  $W^{5+}$  หรือ  $W^{5+}$  กับ  $W^{6+}$  ดังสมการ (4) และ (5) และสาเหตุที่มีการเปลี่ยนสถานะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนและอิเล็กตรอนที่แทรกตัวเข้าไปในชั้นอิเล็กโตรโครมิก นอกจากนี้ผลกระทบต่อการศึกษาสแตนบรอนซ์ ยังขึ้นกับลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์และปริมาณของไอออน และอิเล็กตรอนที่เข้าไปในเนื้อฟิล์ม สำหรับการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงสีขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของไอออนในวัสดุที่มีสมบัติทางอิเล็กโตรโครมิก โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนวัสดุอะมอร์ฟัสจะเร็วกว่าในวัสดุที่มีความเป็นผลึก เพราะความหนาแน่นของวัสดุอะมอร์ฟัสจะต่ำกว่าที่มีความเป็นผลึก การแทรกตัว (Intercalation) และการถอนตัว (Deintercalation) ของไอออนสามารถกระทำได้ง่ายและรวดเร็วกว่า ดังนั้นถ้าวัสดุที่มีสมบัติทางอิเล็กโตรโครมิกถูกทำให้มีโครงสร้างที่มีความหนาแน่นต่ำจะทำให้ความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีมีค่าสูง

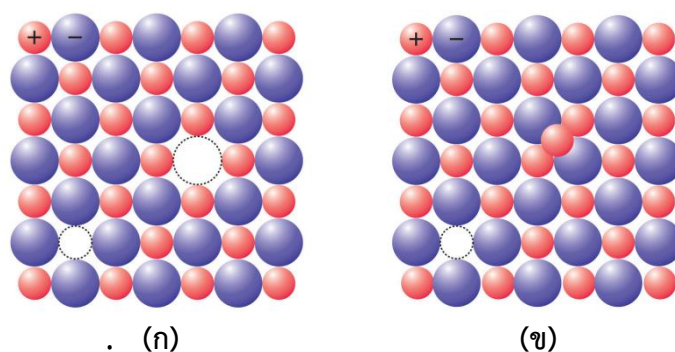
### 2.6.2 ความบกพร่องทางโครงสร้างของทั้งสแตนออกไซด์

โครงสร้างผลึกจะมีอะตอมเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบแต่ในทางปฏิบัติแล้วผลึกที่สมบูรณ์ทุกอย่างนั้นหายาก มักจะมีข้อบกพร่องอยู่เสมอและความบกพร่องที่เกิดขึ้นในลักษณะแตกต่างกันไป หากพิจารณาการจัดเรียงตัวแบบ 3 มิติ พบว่าจุดบกพร่องเกิดขึ้นทุกทิศ เรียกว่า Point imperfection จุดบกพร่องเกิดขึ้นในแนวเดียวกัน เรียกว่า Line imperfection และจุดบกพร่อง

เกิดขึ้นในแนวระนาบ เรียกว่า Plane imperfection ซึ่งสามารถพิจารณาตามลักษณะความบกพร่องที่เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้

- |   |                    |
|---|--------------------|
| - เกิดช่องว่างอะตอม (Atomic vacancy)      | Point imperfection |
| - เกิดอะตอมแทรก (Interstitial atom)       | Point imperfection |
| - เกิดอะตอมเจือปน (Impurity atom)         | Point imperfection |
| - ดิสโลเคชัน (Dislocation)                | Line imperfection  |
| - เกิดผิวผลึก (Crystal surface)           | Plane imperfection |
| - ขอบเกรนของผลึก (Crystal grain boundary) | Plane imperfection |
| - โพรงช่องว่าง (Void)                     | Volume defect      |

ความบกพร่องที่เกิดจากอะตอมบางตัวหายไปจากโครงสร้างเป็นคู่ โดยมีประจุตรงข้ามกันหายไป เรียกความบกพร่องนี้ว่า Schottky (รูปที่ 2.7ก) และถ้าความบกพร่องใดมีอะตอมตรงตำแหน่งนั้นขาดหายไป แต่เข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอะตอมใกล้เคียง เรียกความบกพร่องนี้ว่า Frenkel (รูปที่ 2.7ข) ความบกพร่องที่เกิดในผลึกอาจส่งผลให้สมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป เช่น สภาพการนำไฟฟ้า ความแข็งแรงของเนื้อวัสดุ และสี เป็นต้น สำหรับทั้งสแตนออกไซด์จะมีความบกพร่องที่เกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ Crystallographic shear (CS) และ Pentagonal column (PC) [8]



รูปที่ 2.7 แสดงความบกพร่องของผลึก (ก) Schottky และ (ข) Frenkel

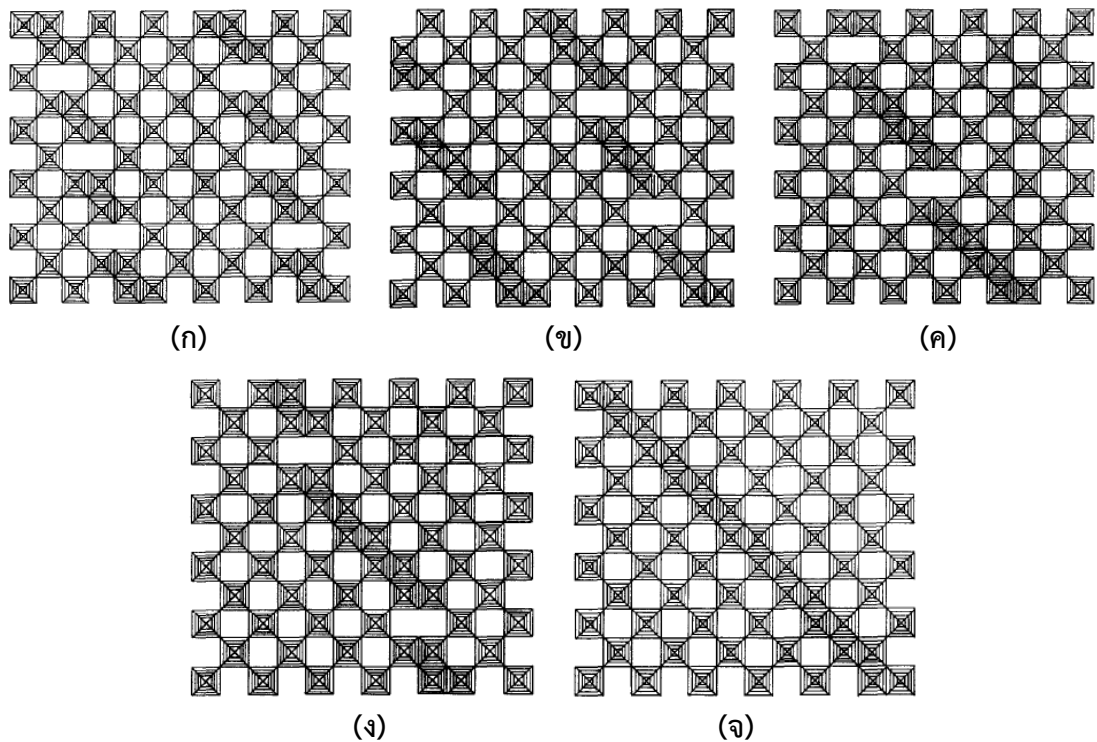
(ที่มา: [http://2012books.lardbucket.org/books/general-chemistry-principles-patterns-and-applications-v1.0/section\\_16\\_04.html](http://2012books.lardbucket.org/books/general-chemistry-principles-patterns-and-applications-v1.0/section_16_04.html))

#### 2.6.2.1 Crystallographic shear (CS)

เมื่อทั้งสแตนเกิดสภาวะออกซิเจนขาดดุลจะเกิดความบกพร่องในการใช้พันธะร่วมของ  $WO_6$  Octahedral ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ส่งผลให้เกิดจุดบกพร่องขึ้นในแนวระนาบ เช่น  $WO_{2.9997}$  เกิด CS plane  $\{102\}$  (รูปที่ 2.8ก)  $WO_{2.92}$  เกิด CS plane  $\{103\}$  (รูปที่ 2.8ข) เป็นต้นโดยลักษณะความบกพร่องเป็นระนาบใดขึ้นอยู่กับเฟสของทั้งสแตนออกไซด์ เช่น

- ทั้งสแตนออกไซด์มีเฟสที่มีสูตรโมเลกุลเป็น  $W_nO_{3n-1}$  จะเกิด  $\{102\}$ CS โดย n มีค่าอยู่ในช่วง 15-25 ได้แก่  $W_{25}O_{74}$  มีสูตรทางเคมีอย่างง่ายเป็น  $WO_{2.96}$  และ  $W_{15}O_{44}$  มีสูตรทางเคมีอย่างง่ายเป็น  $WO_{2.933}$

- ทังสเตนออกไซด์มีเฟสที่มีสูตรโมเลกุลเป็น  $W_nO_{3n-2}$  จะเกิด {103}CS โดย n มีค่าอยู่ในช่วง 18-25 ได้แก่  $W_{25}O_{73}$  มีสูตรทางเคมีอย่างง่ายเป็น  $WO_{2.92}$  และ  $W_{18}O_{52}$  มีสูตรทางเคมีอย่างง่ายเป็น  $WO_{2.889}$

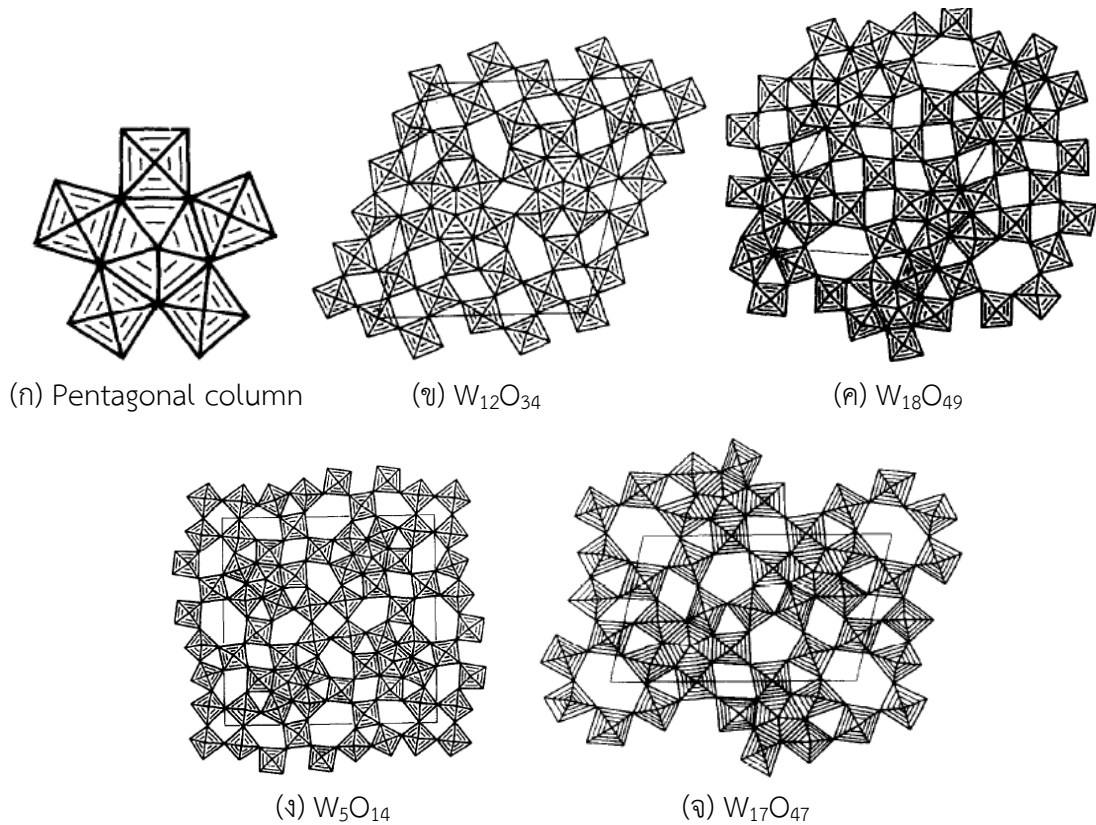


รูปที่ 2.8 จุดบกพร่องเกิดขึ้นในแนวระนาบของทังสเตนออกไซด์ ( $WO_{3-x}$ ) เมื่อมีสภาวะออกซิเจนขาดดุล ในระนาบต่างๆ (ก) {102}CS (ข) {103}CS (ค) {104}CS (ง) {105}CS และ (จ) {001}CS [8]

จากรูปที่ 2.8 ความบกพร่องในระนาบต่างๆ เมื่อเฟสของทังสเตนออกไซด์เป็น  $WO_{3-x}$  ที่แตกต่างกัน ซึ่งลักษณะความบกพร่องในแต่ละนาบส่งผลให้การแทรกตัวของอะตอมอื่นๆ แตกต่างกันไป

#### 2.6.2.2 Pentagonal column (PC)

ความบกพร่องแบบ PC เกิดขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนมีมากเกินไป เกิดเป็นสูตรโครงสร้าง  $WO_7$  Pentagonal ฐานห้าเหลี่ยม มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.9ก และส่งผลต่อระนาบ {102} เกิดความบกพร่องขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.9 ข-จ



รูปที่ 2.9 จุดบกพร่องเนื่องจาก Pentagonal column ของทั้งสเตนออกไซด์  $WO_{3-x}$  ในโครงสร้างเฟสต่างๆ (ก) Pentagonal column (ข)  $W_{12}O_{34}$  (ค)  $W_{18}O_{49}$  (ง)  $W_5O_{14}$  และ (จ)  $W_{17}O_{47}$

จากความบกพร่องของโครงสร้างรูปที่ 2.8 และ 2.9 พบว่าช่องว่างที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีความบกพร่องมีลักษณะแตกต่างกัน โดยความบกพร่องแบบ PC จะมีลักษณะช่องว่างใหญ่และเล็กต่างกันไปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของ W และ O ดังนั้นความบกพร่องแบบ PC น่าจะมีโอกาสแทรกตัวของไอออนบวกของอะตอมเล็ก ๆ ได้สูงกว่าจากช่องว่างเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณจุดบกพร่องที่มีมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นแบบ CS

## 2.7 ซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl)

ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นสารประกอบคลอไรด์ของโลหะ ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ สมบัติของซิลเวอร์คลอไรด์แสดงดังตารางที่ 2.4



ตารางที่ 2.4 สมบัติของซิลเวอร์คลอไรด์

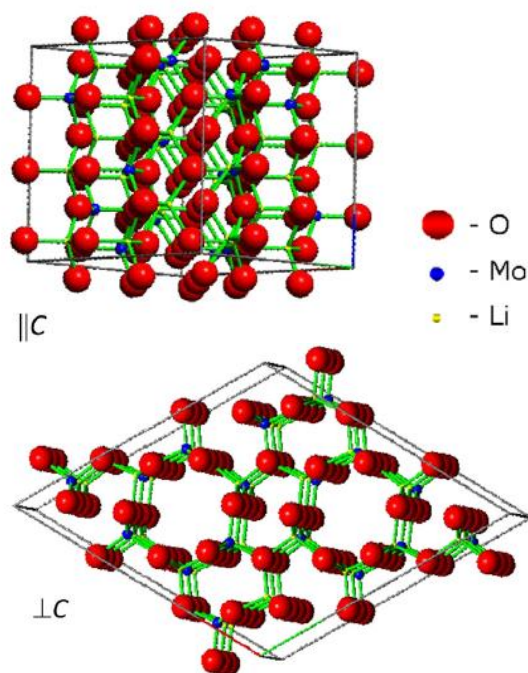
สูตรโครงสร้าง	AgCl
น้ำหนักโมเลกุล	143.32 g/mol
สี	ผงสีขาว
ความหนาแน่น	5.56 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	455 °C
จุดเดือด	1550 °C
ช่องว่างพลังงาน	4.7 eV

## 2.8 ลิเทียมโมลิบเดต (Li-Molybdate)

ลิเทียมโมลิบเดตมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นตัวแคตะลิสต์ที่ดี สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ ซึ่งสมบัติของลิเทียมโมลิบเดตแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติของลิเทียมโมลิบเดต

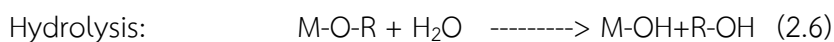
สูตรโครงสร้าง	Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>
น้ำหนักโมเลกุล	173.82 g/mol
สี	ผงสีขาว
ความหนาแน่น	2.66 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	705 °C
ช่องว่างพลังงาน	4.2 eV



รูปที่ 2.10 โครงสร้างผลึกแบบเตตระฮีดรอลของลิเทียมโมลิบเดต [9]

## 2.9 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีโซล-เจล

กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel) เป็นที่น่าสนใจอีกกระบวนการหนึ่งซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นในระดับโมเลกุล การใช้โมเลกุลเป็นสารตั้งต้นสามารถเตรียมได้จากออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาควบแน่น โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจลเป็น กระบวนการที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอนเป็นของแข็งที่เรียกว่า “เจล” ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล-เจลมี 3 ปฏิกิริยา คือ Hydrolysis, Water condensation และ Alcohol condensation ดังสมการ 2.6-2.8 มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสถานะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติโครงสร้างต่างกัน



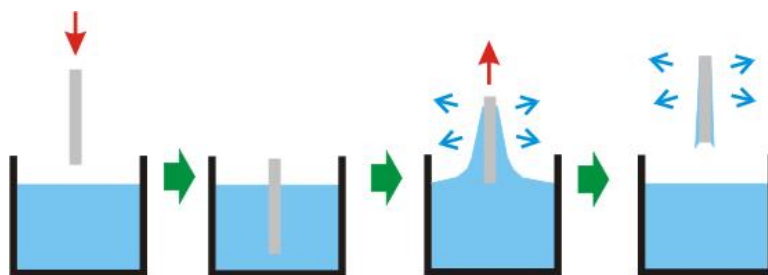
เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce และ OR แทน Alkoxy group

สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจลเป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น Metal alkoxide ในกระบวนการผลิตทั้งจากสถานะที่เป็นโซลและเจล เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น Fiber, Aerogel, Xerogel, Power และ Coating film เป็นต้น การนำเทคโนโลยีโซล-เจลมาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น อยู่ในรูปของผงละเอียด ฟิล์มบาง เส้นใย และวัสดุก้อน เป็นต้น ซึ่ง

เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ แนวโน้มการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในเชิงพาณิชย์มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากกระบวนการโซล-เจลเป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ทำได้ที่อุณหภูมิห้องสามารถทำได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรม

### 2.9.1 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ (Dip coating)

สารตั้งต้นที่เตรียมได้จากกระบวนการโซล-เจลสามารถนำมาเคลือบเป็นฟิล์มบางบนแผ่นรองรับได้ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ ซึ่งมีข้อดีคือ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ยุ่งยาก และสามารถเคลือบฟิล์มลงบนแผ่นรองรับที่มีขนาดใหญ่ได้ เช่น กระจกอาคารบ้านเรือน การเคลือบด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนในการเคลือบออกเป็น (1) ขั้นตอนการจุ่ม (Dip) และดึงขึ้นงานขึ้น (Withdraw) (2) ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาควบแน่น และ (3) ขั้นตอนการอบฟิล์มให้แห้ง และปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน (Heat treatment) เทคนิคการเคลือบแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กระบวนการจุ่มเคลือบ

(ที่มา: <http://www.nadetech.com/index.php/en/technologies>)

ความหนาของชั้นฟิล์มสามารถคำนวณจากอัตราเร็วในการดึงแผ่นรองรับขึ้นจากสารละลาย โดยความหนาจะแปรผันตรงกับอัตราเร็วในการดึง ดังสมการที่ 2.9

$$D \approx kv^{2/3} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $D$  คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม

$v$  คือ อัตราเร็วในการดึง

$k$  คือ ค่าคงที่

ซึ่ง  $k$  ในที่นี้จะรวมสมบัติที่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม ได้แก่ ความหนืด แรงตึงผิว และความดันไอของสารละลาย

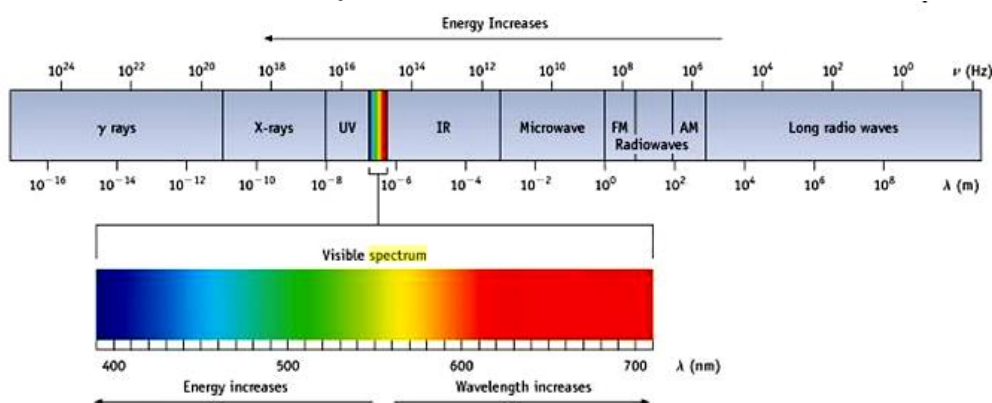
### 2.9.2 การอบฟิล์ม (Drying)

หลังจากการจุ่มเคลือบฟิล์มจนเกิดเป็นเจลบางๆ ชั้นที่ผิวของแผ่นรองรับต้องนำฟิล์มที่ได้ออบเพื่อกำจัดน้ำที่ถูกดูดซึมอยู่ในฟิล์มและในโครงสร้างผลึก และเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ตกค้างอยู่ เช่น แอลกอฮอล์ ทำให้ฟิล์มเปลี่ยนสถานะจากเจลเป็นของแข็ง โดยแต่ละชนิดของเจล คือ Colloidal

และ Polymeric gel นั้นมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน และใน Polymeric gel เมื่อใช้ในสภาวะที่เป็นกรด และต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เมื่อทำการอบเจลมีโครงสร้างที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน

## 2.10 การดูดกลืนทางแสง [10]

แสงเป็นช่วงหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นคลื่นตามขวางที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับการสั่น สำหรับช่วงที่เรียกว่าแสงนั้นจะอยู่ในช่วงที่ตามองเห็น ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 400 ถึง 700 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.12 สำหรับช่วงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าช่วงที่ตามองเห็น เรียกว่า รังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยแบ่งเป็นอัลตราไวโอเล็ต A, B และ C ซึ่งช่วง B และ C เป็นช่วงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าช่วง A เป็นอันตรายต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่นำมาสู่การเกิดการไหม้ และสามารถเกิดเป็นมะเร็งผิวหนังได้ ส่วนช่วงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าช่วงที่ตามองเห็น เรียกว่า อินฟราเรด นอกจากนี้ยังกล่าวถึงแสงในรูปแบบของพลังงานได้จากสมการที่ 2.10



รูปที่ 2.12 ลักษณะสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

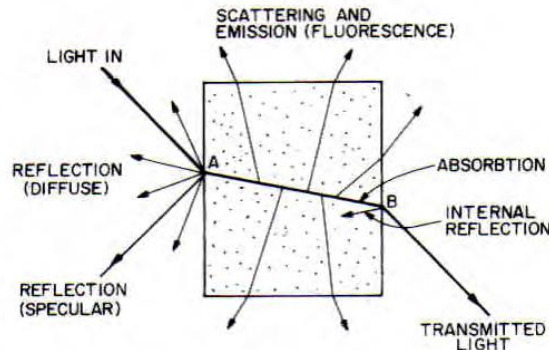
(ที่มา: <http://ritchem.blogspot.com>)

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,239.8}{\lambda} \quad (2.10)$$

เมื่อ	E	คือ	แถบช่องว่างพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
	h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ (6.67 × 10 <sup>-34</sup> จูลวินาที)
	v	คือ	ความถี่ (เฮิร์ตซ์, 1 ครั้งต่อวินาที)
	c	คือ	ความเร็วของแสง (3 × 10 <sup>8</sup> เมตรต่อวินาที)
	λ	คือ	ความยาวคลื่นที่ดูดกลืน (นาโนเมตร)

โดยทั่วไปปริมาณของแสงมักกล่าวในรูปแบบหนึ่งของพลังงาน คือ ความเข้มแสง (Intensity, I) ที่มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแอมพลิจูดยกกำลังสอง จากรูปที่ 2.13 เมื่อแสงเดินทางไปยังวัตถุจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การสะท้อนทั้งแบบตรง (Specular reflection) และแบบกระจาย (Diffused reflection) ซึ่งจะเกิดขึ้นมากหากผิวของวัตถุไม่เรียบ ถ้าแสงที่ทะลุผ่านเข้ามาใน

วัตถุก็สามารถเกิดการกระเจิงแสง (Scattering) และการดูดกลืนแสง (Absorption) และที่เหลือจะทะลุผ่านวัตถุนั้นออกมา



รูปที่ 2.13 การดูดกลืนแสงในเนื้อวัสดุ [3]

ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นสาเหตุให้ความเข้มแสงที่ผ่านออกจากวัตถุลดลง โดยที่ความเข้มแสงมาตกระบบวัตถุต้องเท่ากับความเข้มแสงที่เกิดจากปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งเป็นตามกฎของการอนุรักษ์พลังงาน ดังสมการที่ 2.11

$$I_0 = I_r + I_s + I_a + I_t \quad (2.11)$$

เมื่อ	$I_0$	คือ	ความเข้มแสงที่ส่องมาตกระบบ
	$I_r$	คือ	ความเข้มแสงที่ส่องสะท้อนออก
	$I_s$	คือ	ความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืน
	$I_a$	คือ	ความเข้มแสงที่กระเจิงออก
	$I_t$	คือ	ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านออก

จากสมการที่ 2.11 สามารถเทียบความเข้มต่างๆ กับความเข้มแสงที่ตกระบบได้เป็นสมการที่ 2.12

$$1 = R + S + A + T \quad (2.12)$$

เมื่อ  $R, S, A$  และ  $T$  คือ ค่าการสะท้อน การกระเจิง การดูดกลืน และการส่งผ่านของความเข้มแสงเมื่อเทียบกับความเข้มแสงที่ตกระบบ ตามลำดับ

นอกจากนี้ปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างแสงกับวัตถุยังเป็นสาเหตุของการเกิดสีของวัตถุ ในกรณีที่แสงมาตกระบบวัตถุที่มีคุณภาพทางแสงที่ดี ค่าการกระเจิงและการดูดกลืนในวัตถุนั้นจะมีค่าน้อย ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12 จะลดเหลือเป็นสมการที่ 2.13

$$I_0 = I_r + I_t \quad \text{และ} \quad 1 = R + T \quad (2.13)$$

หากพิจารณาเกี่ยวกับการดูดกลืนสเปกตรัมของวัตถุที่มีความเป็นเนื้อเดียว โดยคำนึงถึงค่าการสะท้อนและค่าการกระเจิงของวัตถุ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของวัตถุเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) ดังสมการที่ 2.14

$$I = I_0 \exp(-\epsilon c d) \quad (2.14)$$

เมื่อ	$I$	คือ	ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านออกมา
	$I_0$	คือ	ความเข้มแสงที่ตกระบบ

$\epsilon$	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Absorption or extinction coefficient) ( $\text{dm}^3 \text{mol}^{-1} \text{m}^{-1}$ )
$c$	คือ	ความเข้มข้น ( $\text{mol}/\text{dm}^3$ )
$d$	คือ	ความหนาของวัตถุ (m)

สำหรับผลคูณของ  $\epsilon c d$  ไม่มีหน่วย มีค่าเท่ากับ  $A$  เรียกว่า ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) หรือ ค่าความหนาแน่นทางแสง (Optical density, OD) และอัตราส่วนของ  $I/I_0$  คือ ค่าการส่งผ่าน (Transmittance,  $T = I/I_0$ ) โดยสามารถเปลี่ยนสมการที่ 2.14 เป็นสมการความหนาแน่นทางแสง ดังสมการที่ 2.15 คือ

$$\text{Log } T = -A \quad (2.15)$$

สำหรับค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะแสดงด้วยค่า OD ดังแสดงในสมการที่ 2.16

$$\text{OD} = \log (I_0/I) \quad (2.16)$$

เมื่อ  $I$  และ  $I_0$  คือ ความเข้มแสงที่ส่งผ่านและความเข้มแสงที่ตกกระทบ ลักษณะที่สำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือ ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนสี (Coloration efficiency, CE) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนความหนาแน่นทางแสงต่อหน่วยของประจุที่แทรกตัวเข้าไป ( $Q$ ) ดังสมการที่ 2.17

$$\text{CE} = \Delta (\text{OD}) / \Delta Q \quad (2.17)$$

สำหรับค่า CE ของฟิล์ม  $\alpha\text{-WO}_{3-y}$  ได้รับอิทธิพลมาจากเงื่อนไขของการปลูกฟิล์ม และถูกให้สัมพันธ์กับปริมาณการขาดออกซิเจน อย่างไรก็ตามในทางกลไกแล้วยังมาสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง CE และการขาดออกซิเจนในสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของฟิล์ม  $\alpha\text{-WO}_{3-y}$  สามารถหาความสำคัญทางกลไกของอิเล็กทรอนิกส์และการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

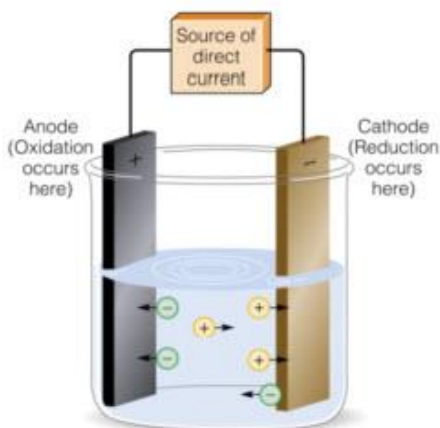
## 2.11 ไฟฟ้าเคมี

ไฟฟ้าเคมีเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ผลวิเคราะห์จะถูกวัดออกมาในรูปของปริมาณทางไฟฟ้า เช่น กระแส ศักย์ไฟฟ้า ปริมาณประจุ และความเข้มข้นของสารที่ต้องการได้ การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้ามีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ (1) ขั้วไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์การวัด และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (2) สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นส่วนประกอบทางเคมีที่นำไฟฟ้าได้ และ (3) อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นกระแสหรือศักย์ไฟฟ้า

### 2.11.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมี 1 เซลล์ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วจมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างกัน ดังรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ถือเป็นครึ่งเซลล์ (Half-cell) ของเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ โดยแต่ละครึ่งเซลล์จะเกิดปฏิกิริยาการรับหรือคายอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

โดยครึ่งเซลล์ที่รับอิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน เรียกว่า ขั้วแคโทด และครึ่งเซลล์ที่คายอิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียกว่า ขั้วแอโนด



### รูปที่ 2.14 การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมี

(ที่มา:[http://www.promma.ac.th/main/chemistry/web\\_electrochemistry.htm](http://www.promma.ac.th/main/chemistry/web_electrochemistry.htm))

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งตามลักษณะหน้าที่ของเซลล์ได้ 2 ชนิด ได้แก่

1. เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมี หรือระบบที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยภายในเซลล์เกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยที่สารตั้งต้นไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง ทำให้การไหลของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำอย่างต่อเนื่องจึงเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร

2. เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งการเกิดปฏิกิริยานี้เป็นไปอย่างไม่ต่อเนื่องขึ้นอยู่กับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ

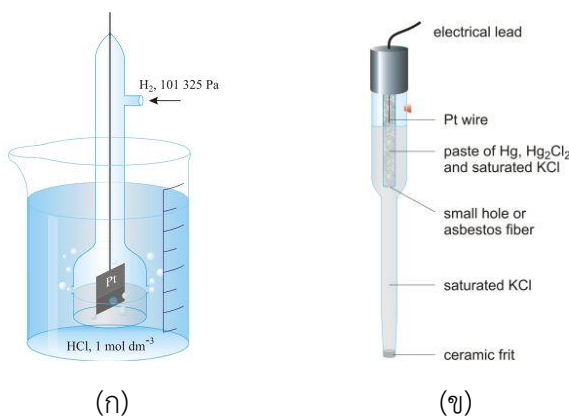
#### 2.11.2 ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์ที่ใช้ทำการวัดสัญญาณไฟฟ้า ดังนั้นทำการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคต่างๆ จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode, RE) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ไม่แปรเปลี่ยนตามการไหลของกระแสในวงจร ไม่ขึ้นกับส่วนประกอบของสารตัวอย่าง ไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิมักต่ออยู่กับขั้วแอโนด ในการวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เพื่อช่วยให้เซลล์เคมีครบวงจร ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ในปัจจุบัน แบ่งเป็น 2 ประเภท

1.1 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงปฐมภูมิ เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานที่มีค่าเป็นศูนย์ที่ทุกอุณหภูมิขั้วไฟฟ้าประเภทนี้มีเพียงชนิดเดียวเท่านั้น คือ ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน (Standard hydrogen electrode, SHE) แสดงดังรูปที่ 2.15ก

1.2 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทุติยภูมิ เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่มีประมาณ 3 ขั้วที่ใช้กันมากในปัจจุบัน ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าคาลอเมล (Saturated calomel electrode, SCE) ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ และขั้วไฟฟ้าเมอร์คิวรี-เมอร์คิวรีซัลเฟต แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (ก) SHE และ (ข) SCE

(ที่มา: <http://glossary.periodni.com>)

2. ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode, WE) เป็นขั้วแคโทดของเซลล์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น ขั้วไฟฟ้าใช้งานนี้มีการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

3. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) หรือ ขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode, CE) ทำหน้าที่ช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอน หรือกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยไม่ต้องผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

สมการสำคัญในการควบคุมกลไกทางปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่อิเล็กโทรด เรียกว่าสมการของ Nernst แสดงดังสมการที่ 2.18

$$E = E^\circ - RT/(nF) \ln (a_o/a_r) \quad (2.18)$$

เมื่อ	E	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าสมดุลของอิเล็กโทรดที่ขึ้นกับ E <sup>o</sup>
	E <sup>o</sup>	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด
	R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส (8.31441 J/mol.K)
	T	คือ	อุณหภูมิ (K)
	n	คือ	จำนวนอิเล็กตรอน
	F	คือ	ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,485 C/mol)
	a <sub>o</sub>	คือ	ความเข้มข้นของการเกิดออกซิเดชันที่ผิวอิเล็กโทรด
	a <sub>r</sub>	คือ	ความเข้มข้นของการเกิดรีดักชันที่ผิวอิเล็กโทรด

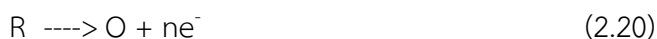
เมื่อศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเริ่มเปลี่ยนไปจากสมดุล (หรือกระแสเท่ากับศูนย์) พบว่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าสมดุลจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างอิเล็กโทรดและโมเลกุลของสารละลาย ถ้าป้อนไฟฟ้าเป็นลบมากขึ้นพลังงานของอิเล็กตรอนใน



อิเล็กโทรดจะมีค่ามากขึ้น ทำให้มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลในสารละลาย เพื่อให้กลับสู่สถานะสมดุลทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด ดังสมการที่ 2.19



และที่ขั้วแอโนดเมื่อป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็นบวกมากขึ้น พบว่าจะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารละลายให้กับอิเล็กโทรดจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และสามารถหากระแสที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ 2.21



$$I = AFj \quad (2.21)$$

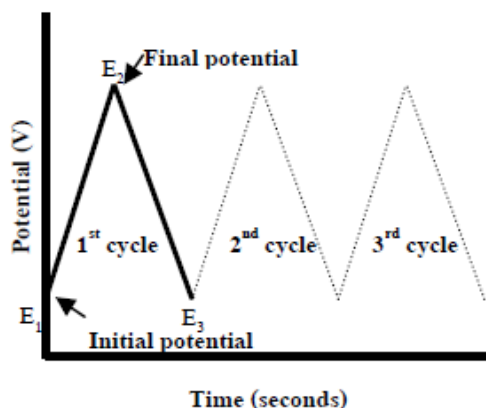
เมื่อ	F	คือ	ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,485 C/mol)
	A	คือ	พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด (cm <sup>2</sup> )
	j	คือ	ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรด (mol/cm <sup>2</sup> .s)
	I	คือ	กระแสที่เกิดขึ้น (A)

เมื่อศักย์ไฟฟ้าแตกต่างไปจากสถานะสมดุลทำให้เกิดการไหลของกระแสที่มาจาก การเปลี่ยนปฏิกิริยาออกซิเดชันให้กับปฏิกิริยารีดักชันที่รอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดกับสารละลาย ความเข้มข้นของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่บริเวณผิวหน้าอิเล็กโทรดจะเริ่มน้อยกว่าในสารละลาย เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วกว่าสารละลายจะแพร่เข้ามาถึงบริเวณรอยต่อ ปริมาณกระแสขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวที่เกิดปฏิกิริยาบริเวณผิวหน้าของอิเล็กโทรด

### 2.11.3 การหาปริมาณทางไฟฟ้าเคมีด้วยโวลแทมเมทรีแบบรอบ (Cyclic voltammetry)

เทคนิคการหาปริมาณทางไฟฟ้าเคมีมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับสัญญาณที่ให้แก่สารตัวอย่างแล้ววัดค่าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้น การเลือกเทคนิคการวิเคราะห์ต้องพิจารณาจากสารตัวอย่าง การจัดรูปแบบเซลล์ที่ทำการทดลอง และปริมาณสารที่ต้องการวัด เพื่อเลือกวิเคราะห์ที่เหมาะสม

โวลแทมเมทรีแบบรอบเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้กันมากในการตรวจหาข้อมูลเชิงกายภาพ ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ข้อดีของโวลแทมเมทรีแบบรอบเกิดจากความสามารถที่ให้ข้อมูลที่ต้องการพิจารณาอย่างรวดเร็วเกี่ยวกับกระบวนการรีดอกซ์ และจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน ซึ่งลักษณะสำคัญของโวลแทมเมทรีแบบรอบคือ การให้ตำแหน่งอย่างรวดเร็วของศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ของสปีชีส์ที่มีสมบัติทางไฟฟ้า และใช้ในการตรวจคุณภาพของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดกระบวนการรีดอกซ์ ใช้ศึกษากลไกและอัตราเร็วของการเกิดกระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน โดยอาศัยการบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและศักย์ไฟฟ้าต่อเวลาที่อิเล็กโทรดทำงานเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม (Triangular wave form) แสดงดังรูปที่ 2.16



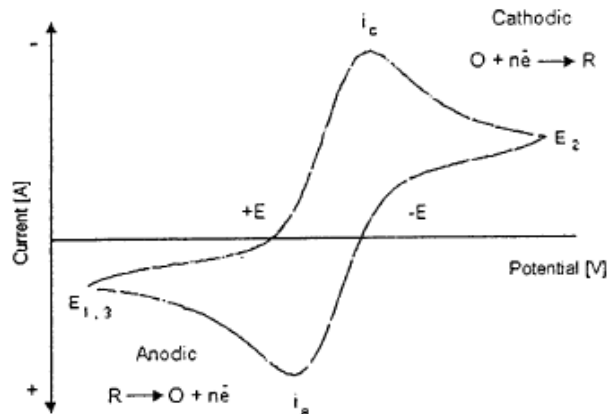
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของโวลแทมมิทรีแบบรอบ [3]

โดยเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดทำงานเคลื่อนที่จาก  $E_1$  ไปยัง  $E_2$  สามารถหาอัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้าได้จากสมการที่ 2.22

$$E(t) = E_1 + V_s t \quad (2.22)$$

เมื่อ	$E(t)$	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เวลาผ่านไปเท่ากับ $t$ (V)
	$E_1$	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (V)
	$V_s$	คือ	อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้า (V/s)
	$t$	คือ	เวลาที่ใช้ในการป้อนศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่ง (s)

ในขณะที่อิเล็กโทรดจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ กระแสจะเกิดขึ้นจากอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างรอยต่อของอิเล็กโทรดและสารละลาย เมื่อศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเคลื่อนที่ไปในทิศทางจาก  $E_1$  ถึง  $E_2$  โดยทราบอัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้า ( $V_s$ ) สารออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากสารละลายไปยังอิเล็กโทรดใช้งาน และทำให้เกิดกระแสออกซิเดชันขึ้น ( $i_a$ ) ถ้าศักย์ไฟฟ้ามากพอ  $i_a$  จะถึงจุดสูงสุดที่ความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ที่บริเวณผิวหน้าอิเล็กโทรดมากที่สุดและเริ่มลดลง เพราะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่ามวลในสารละลาย ทำให้บริเวณผิวหน้าขาดช่วงของการเกิดออกซิเดชัน เช่นเดียวกันเมื่อทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าในทิศทางย้อนกลับ ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดจะสแกนกลับในทิศทางกลับไปยังศักย์ไฟฟ้าเบื้องต้น  $E_1$  หรือต่อเนื่องไปยัง  $E_3$  จะมีปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้น และความเข้มข้นของสารรีดิวซ์ที่บริเวณผิวลดลง ทำให้กระแสไหลจากอิเล็กโทรดไปยังสารละลาย โดยกระแสที่เกิดขึ้นเป็นกระแสรีดักชัน ( $i_c$ ) และความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ที่บริเวณผิวหน้าอิเล็กโทรดจะมีความเข้มข้นลดลง ซึ่งลักษณะของโวลแทมโมแกรม แสดงดังรูปที่ 2.17 พบว่าปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์และสารรีดิวซ์ที่บริเวณผิวหน้าของอิเล็กโทรด ทำให้สามารถหาปริมาณกระแสที่เกิดขึ้นได้ [11] ซึ่งสามารถหาสัมพันธ์ได้จากสมการของแรนเดิลส์ เซฟลิค (Randles-Sevcik equation) ซึ่งแสดงในสมการที่ 2.23



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโวลแทมโมแกรมแบบรอบของระบบที่ผันกลับได้เมื่อกราฟส่วนบน คือ การเกิดปฏิกิริยารีดักชันและกราฟส่วนล่าง คือ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และค่า  $i_c$  และ  $i_a$  คือ ค่ากระแสสูงสุดในแต่ละปฏิกิริยา และเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดปฏิกิริยามากที่สุด

$$i_p = (2.69 \times 10^5) n^{3/2} A D^{1/2} C v^{1/2} \quad (2.23)$$

เมื่อ	$i_p$	คือ กระแสไฟฟ้าที่จุดสูงสุด (แอมแปร์, A)
	$n$	คือ จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชัน ( $n=1$ )
	$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้าทำงาน (ตารางเซนติเมตร, $\text{cm}^2$ )
	$D$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที, $\text{cm}^2/\text{s}$ )
	$C$	คือ ความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, $\text{mol}/\text{cm}^3$ )
	$v$	คือ อัตราการป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์ต่อวินาที, $\text{V}/\text{s}$ )

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการศึกษาสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของโลหะออกไซด์กลุ่มโลหะทรานซิชันได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้น โลหะออกไซด์ที่นำมาเป็นสารอิเล็กทรอนิกส์ เช่น W, Ni, Ir, V, Ti, Co, Nb, Cu และ Mo เป็นต้น [12] จึงเป็นผลให้มีการผลิตฟิล์มบางของโลหะออกไซด์เหล่านี้ออกมาในเชิงพาณิชย์ เช่น อุปกรณ์แสดงผล กระจกหรือหน้าต่างอัจฉริยะ และแว่นตากันแดด เป็นต้น [13] ฟิล์มบางที่มีสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ ในงานวิจัยจะเลือกใช้ทั้งสแตนออกไซด์ เนื่องจากมีความเสถียรภาพสูง [14] เมื่ออยู่ในสภาวะปกติฟิล์มจะใสไม่มีสี และเมื่อได้รับความต่างศักย์จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำซิลเวอร์คลอไรด์ จึงนำไปเป็นฟิล์มเปลี่ยนสีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ กระจกในอาคาร หรือกระจกมองหลังรถยนต์ เนื่องจากสมบัติการดูดกลืนแสงสีอื่นยกเว้น สีน้ำซิลเวอร์คลอไรด์จึงเป็นสารที่เหมาะสมสำหรับลดแสงไฟสะท้อนจากไฟหน้ารถได้ [3]

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ ได้แก่ Sodium tungstate ( $\text{Na}_2\text{WO}_4$ ) [15], Hexacarbonyls ( $\text{W}(\text{CO})_6$ ) [16], Tungsten hexachloride ( $\text{WCl}_6$ ) [17], Tungsten powder [18], Phosphotungstic acid [19] และ Tungsten wire [20]

เทคนิคในการสังเคราะห์ฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ ได้แก่ Sputtering [21], CVD [16], PVD [22], Hydrothermal method [23], Thermal evaporation [20], Solvothermal method [24] และ Sol-gel [20]

ตัวอย่างการสังเคราะห์ฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ด้วยวิธีต่างๆ เช่น

- การสังเคราะห์ฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ด้วยวิธีสปีดเตอริง

ภาณุพงศ์ บุญเพียร [3] ได้เตรียมฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์จากการทำรีแอกทีฟทั้งสแตนบริสุทธิ์เป็นทั้งสแตนออกไซด์ ซึ่งในการทดลองจะทำในระบบสุญญากาศประมาณ  $5 \times 10^{-6}$  mbarr จากนั้นปรับเพิ่มปริมาณค่าความดันของก๊าซออกซิเจนขณะเตรียมฟิล์มบาง โดยป้อนปริมาณก๊าซอาร์กอนเพื่อให้ได้ค่าความดันรวมคงที่ สุดท้ายได้ฟิล์มใสซึ่งเคลือบอยู่บนวัสดุรองรับ

- การสังเคราะห์ฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน

พรเทพ ถวายทรัพย์ [25] ได้เตรียมฟิล์มบางเริ่มจากการนำผงทั้งสแตนออกไซด์บรรจุลงในกล่องระเหยแบบปลั๊กซ์ที่ทำจากโลหะโมลิบดีนัม แล้วนำฟิล์มวางบนแท่นวางแผ่นรองรับ ปิดโถครอบแก้วและทำการปั๊มอากาศ โดยการกำหนดค่าความดันในการเริ่มต้นระเหยที่  $6 \times 10^{-6}$  mbarr เปิดเครื่องวัดความหนาด้วยผลึกควอร์ซ และใส่ค่าคงที่ที่ใช้การคำนวณค่าความหนาของฟิล์มทั้งสแตนออกไซด์ เริ่มจ่ายไฟฟ้าภายนอกด้วยอัตรา 5 เอร์เซ็นต์ต่อ 30 วินาที เพื่อให้ความร้อนแก่กล่องระเหยเมื่อศักย์ไฟฟ้าเหมาะสมในการระเหยจึงปิดที่บ่งระเหย เมื่อได้ความหนาที่ต้องการจึงค่อยๆ ลดศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกล่องระเหยด้วยอัตรา 5 เอร์เซ็นต์ต่อ 10 วินาที และปิดปั๊ม ได้เป็นฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์

- การสังเคราะห์ฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ด้วยวิธี Polymeric precursor

W. Li และคณะ [14] สังเคราะห์ฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์โดยนำ Ammonium metatungstate ปริมาณ 1.887 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร และเติมสารลดแรงตึงผิวชนิด Polyethylene glycol (PEG1000) ปริมาณ 0.944 กรัม กวนสารละลายอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ได้เป็นโซลสำหรับเตรียมฟิล์มบาง ซึ่งพบว่าฟิล์มมีความยึดเกาะกับกระจกนำไฟฟ้า FTO ได้ดี และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

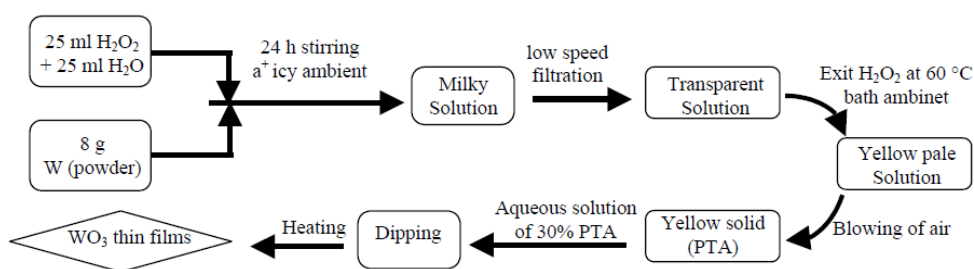
- การสังเคราะห์ฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล

วิธีโซล-เจลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการเตรียมฟิล์มบาง เนื่องจากสามารถเคลือบฟิล์มบนพื้นที่ใหญ่ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ราคาถูก สามารถควบคุมโครงสร้างจุลภาคและความหนาของฟิล์มได้ โดยโครงสร้างจุลภาคมีความสำคัญต่ออัตราเร็ว และความสามารถในการเปลี่ยนสีของฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ โดยในกระบวนการโซล-เจลกระทำโดยการให้สารตั้งต้น คือ

โลหะอัลคอกไซด์ ( $M(OR)_n$ ) เปลี่ยนเป็นเจลโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาควบแน่นด้วยน้ำหรือแอลกอฮอล์ (สมการที่ 2.6-2.8) फिल्मบางที่มีสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถสังเคราะห์ได้วิธีการโซล-เจล มีงานวิจัยหลากหลายที่สนใจวิธีการโซล-เจลในการสังเคราะห์ฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ เช่น

ชลาธร จันทร์ทัต [26] การเตรียมฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์โดยวิธีการจุ่มเคลือบด้วยการละลาย  $WCl_6$  ปริมาณ 5 กรัม ในเอทานอล 50 มิลลิลิตร ได้เป็นสารละลายสีน้ำซีลเวอร์คไลไรด์ ทำการรีฟลักซ์สารละลายที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สังเกตจนสารละลายใสไม่มีสี ซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดของปฏิกิริยาเป็นทั้งสแตนออกไซด์ จากนั้นจึงนำกระจกสไลด์จุ่มเคลือบลงในสารละลายทั้งสแตนออกไซด์ ทั้งกระจกให้แห้งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที แล้วเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นศึกษาผลกระทบของโครงสร้างของฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ที่มีต่อสมบัติทางแสง ทำโดยการวัดการส่องผ่านของแสงของฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานและแบบผลึก พบว่าฟิล์มที่เป็นอสัณฐานจะมีความเร็วในการเกิดสี และจางสีมากกว่าฟิล์มที่มีความเป็นผลึก

M. Sharbatdaran และคณะ [27] ได้เตรียมฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ด้วยการละลายผงทั้งสแตนในน้ำ 25 มิลลิลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) 25 มิลลิลิตร กวนอย่างต่อเนื่องได้โซลสีนํ้านม จากนั้นกรองเพื่อกำจัด  $H_2O_2$  โดยการให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส ได้เป็นสารละลายสีเหลืองแล้วทำให้เกิดการควบแน่นด้วยการเป่าที่อุณหภูมิห้องจนได้เป็นผงสีเหลือง ตามด้วยนำผงตัวอย่างละลายในน้ำหรือตัวทำละลายมีขั้วอื่นๆ แล้วนำฟิล์มจุ่มเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า ITO และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสได้เป็นฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ ขั้นตอนการสังเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.18 หลังจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสฟิล์มที่มีการเปลี่ยนสีที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.18 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ [27]

W. Wang และคณะ [28] สังเคราะห์ฟิล์มบางทั้งสแตนโดยใช้ผง  $H_2WO_4$  5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร และเติม  $H_2O_2$  ความเข้มข้น 35%wt 33 มิลลิลิตร กวนสารละลายอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้วนำไปอบได้ผงสีเหลือง จึงนำไปละลายใน Peroxotungstic acid (PTA) จากนั้นนำกระจกนำไฟฟ้า ITO จุ่มเคลือบในสารละลาย แล้วนำไปเผาได้เป็นฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์สำหรับทดสอบสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าเผาที่อุณหภูมิ 190 องศา

เซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและเพิ่มอุณหภูมิเป็น 350 องศาเซลเซียสอีก 2 ชั่วโมง ฟิล์มมีความเสถียรสามารถเปลี่ยนสีกลับไป-มา ได้มากกว่า 10 รอบ

R. R. Kharade และคณะ [29] ได้สังเคราะห์ทั้งสแตนออกไซด์โดยใช้ Sodium tungstate เป็นสารตั้งต้นโดยละลายสาร 100 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร และหยดกรดไฮโดรคลอริก 3 โมลาร์ กวนสารละลายอย่างต่อเนื่องได้เป็นตะกอนสีเหลืองของกรดทั้งสติก จากนั้นนำตะกอนไปล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดโซเดียมและคลอไรด์ที่ตกค้างออกได้เป็นเจล แล้วจึงเติมกรดออกซาลิกและโพแทสเซียมซัลเฟต ( $K_2SO_4$ ) ปริมาณ 5 กรัม ในสารละลายให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และอบด้วยไมโครเวฟ 960 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้เป็นคอลลอยด์ของทั้งสแตนออกไซด์สำหรับเตรียมฟิล์มบาง พบว่าฟิล์มทั้งสแตนออกไซด์มีโครงสร้างเป็นเฮกซะโกนอล และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสี  $57.9 \text{ cm}^2/\text{C}$  ซึ่งเป็นค่าการเปลี่ยนสีที่ดีที่สุด

L. Yang และคณะ [18] สังเคราะห์โซลของทั้งสแตนออกไซด์ โดยมีสารตั้งต้นเป็นผงทั้งสแตนโดยนำผงทั้งสแตน 4.6 กรัม ละลายใน  $H_2O_2$  25 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเติมเอทานอล 20 มิลลิลิตร แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยได้โซลสีเหลืองใสแล้วจึงนำฟิล์มจุ่มเคลือบในสารละลายที่อัตราเร็ว 18 เซนติเมตร/นาที่ ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง โดยจุ่มเคลือบซ้ำ 4 ครั้ง แล้วนำฟิล์มที่เคลือบอบอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง สุดท้ายนำฟิล์มเผาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้เป็นฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์

L. Bertus และ A. Duta [30] สังเคราะห์ทั้งสแตนออกไซด์และเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิค Spray pyrolysis ซึ่งมีการเตรียมสารละลายของทั้งสแตนออกไซด์โดยใช้  $WCl_6$  1.2 กรัม ละลายในเอทานอล และเติม Hexadecylthyl methyl ammonium bromide (HTAB) ความเข้มข้นต่าง ๆ (50, 200, 500 และ 1,000 ppm) และนำฟิล์มที่ผ่านการเคลือบอบที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าที่ความเข้มข้น 50 ppm ฟิล์มทั้งสแตนออกไซด์มีโครงสร้างเป็นโมโนคลินิก ฟิล์มที่ได้เป็นฟิล์มใสนำไฟฟ้าได้ดีที่สุด

จากการวิจัยการเตรียมฟิล์มบางทั้งสแตนออกไซด์ พบว่ามีสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และลิเทียมไอออน ( $Li^+$ ) เตรียมด้วยวิธีโซล-เจลมีค่าสูงกว่าการเคลือบด้วยวิธีสปีดเทอริงและการระเหยด้วยความร้อน โดยมีสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนเท่ากับ  $5 \times 10^{-11}$ ,  $2.6 \times 10^{-11}$  และ  $2.8 \times 10^{-11}$  ตารางเซนติเมตร/วินาที ตามลำดับ [26]

#### การเพิ่มประสิทธิภาพ

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มบางอิเล็กโทรโครมิก นอกจากสารตั้งต้น วิธีการเตรียม ชนิดและปริมาณของสารเจือแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อสมบัติอิเล็กโทรโครมิก เช่น

- การควบคุมโครงสร้างผลึก รูปร่าง และขนาดของฟิล์มบาง

อุณหภูมิมีผลต่อการเกิดเฟสและโครงสร้างของฟิล์ม พบว่าการเกิดเฟสอะมอร์ฟัสจะช่วยให้ไอออนแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของฟิล์มบางได้ดีกว่าแบบโครงสร้างผลึก เนื่องจากเฟสอะมอร์ฟัสมีความหนาแน่นน้อยกว่า Y. S. Krasnov และคณะ [15]

L. Yang และคณะ [18] ได้อธิบายไว้ว่าการสังเคราะห์ฟิล์มบางของทังสเตนออกไซด์ให้มีรูพรุน หรือเส้นลวดนาโนจะช่วยปรับปรุงสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจากการทดลองฟิล์มบางที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งมีผลให้อิออนสามารถแทรกตัวและถอนออกได้เร็วกว่าฟิล์มที่มีลักษณะผิวเรียบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ E. Khoo และคณะ [31] และ D.-H. Kim และคณะ [32] ซึ่งกล่าวไว้ว่าฟิล์มบางลวดนาโนทังสเตนออกไซด์ที่มีรูพรุนจะแสดงประสิทธิภาพการเกิดสีได้ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ และสามารถเกิดและจางสีได้เร็ว 28.8 และ 4.5 วินาที ตามลำดับ นอกจากนี้เวลาในการบ่มยังมีผลต่อสมบัติ อิเล็กทรอนิกส์เช่นกัน จากงานวิจัยของ M. Giannouli และคณะ [33] อธิบายไว้ว่าการทดสอบฟิล์มบางด้วยเทคนิคโวลแทมเมทรีแบบรอบ โดยบ่มเป็นเวลา 32, 56, 80 และ 96 ชั่วโมง พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มนานกว่า 80 ชั่วโมง จะทำให้ปริมาณลิเทียมไอออนที่เข้าไปแทรกตัวในโครงสร้างฟิล์มเพิ่มขึ้น

P. Jittiarporn [34] ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ของทังสเตนไตรออกไซด์เจือด้วยโมลิบดีนัมด้วยกระบวนการโซล-เจล แล้วนำมาจุ่มเคลือบฟิล์มด้วยกระจกนำไฟฟ้า ITO เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าความเป็นผลึกของทังสเตนไตรออกไซด์ลดลงเมื่อเจือโมลิบดีนัมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมลิบดีนัมเข้าไปแทรกในโครงสร้างของทังสเตนไตรออกไซด์ และยังพบว่าการเจือโมลิบดีนัมในฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลดีต่อสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ ถ้านำฟิล์มไปเผาที่อุณหภูมิไปเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสจะทำให้ฟิล์มมีคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ลดลง

#### อิทธิพลของสารเจือ

-ซิลเวอร์คลอไรด์ การสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ที่เจือด้วยซิลเวอร์คลอไรด์ซึ่งเป็นอีกตัวเลือกตัวหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า ส่งผลทำให้ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์สามารถเปลี่ยนสีกลับปกลับไปกลับมามีได้เร็วขึ้น งานวิจัยที่กล่าวถึงการเจือซิลเวอร์คลอไรด์ลงไปอิเล็กทรอนิกส์ฟิล์ม เช่น

R. R. Kharade และคณะ [29] ได้ศึกษาการสังเคราะห์และสมบัติของทังสเตนออกไซด์เจือด้วยซิลเวอร์ ( $WO_3$ -Ag) ด้วยวิธี Microwave assisted sol-gel หลังจากนั้นนำไปทดสอบประสิทธิภาพพบว่า ค่าของช่องว่างพลังงานจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มความหนาของ Ag โดยที่ค่าช่องว่างพลังงานนั้นจะลดลงจาก 3.80 eV เป็น 3.54 eV ทำให้ลดระยะเวลาที่ทำให้สีของฟิล์มเปลี่ยนเร็วขึ้น

-ลิเทียม ช่วยเพิ่มสมบัติทางไฟฟ้าให้กับฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยที่กล่าวถึงการเจือลิเทียมลงไปอิเล็กทรอนิกส์ฟิล์ม เช่น

I. Porqueras และคณะ [35] ได้นำผง  $WO_3$  มาระเหยเป็นไอลงบนกระจก หลังจากนั้นนำลิเทียมเข้าไปโดยการทำให้ลิเทียมกลายเป็นไอ เพื่อที่จะให้  $Li^+$  แทรกเข้าไปในโครงสร้าง  $WO_3$  แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง FTIR ผลที่ได้คือ  $Li^+$  มีผลทำให้ฟิล์ม  $WO_3$  มีความใสมากยิ่งขึ้น

- โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มบางอเล็กโทรโครมิกด้วย โมลิบดีนัมไตรออกไซด์เป็นอีกตัวเลือกหนึ่งที่น่าสนใจนำมาใช้รองจากทังสเตนออกไซด์ เนื่องจากมีสมบัติอเล็กโทรโครมิกที่ดี สามารถเปลี่ยนสีกลับไปกลับมาได้เร็ว และมีอายุการใช้งานนาน งานวิจัยที่กล่าวถึงการสังเคราะห์ฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ เช่น

W. Luo และคณะ [36] ได้ศึกษาการสังเคราะห์และสมบัติของทังสเตนออกไซด์เจือด้วยโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ ( $\text{MoO}_3\text{-WO}_3$ ) ด้วยการนำสารละลายของ Sodium tungstate และ Sodium molybdate มาผ่านเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน และเติม  $\text{H}_2\text{O}_2$  and  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$  ลงไปในสารละลาย ต่อมาจุ่มเคลือบฟิล์มบนกระจก ITO แล้วอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และเผาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าฟิล์มทังสเตนออกไซด์มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน และมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสง 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อฟิล์มมีสีเข้ม และ 60 เปอร์เซ็นต์เมื่อฟิล์มจางสี

T. Ivanova และคณะ [37] ศึกษากระบวนการอเล็กโทรโครมิกผสมระหว่างทังสเตนออกไซด์และโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ด้วยวิธีการ APCVD โดยใช้สารตั้งต้นเป็น  $\text{W}(\text{CO})_6$  เเผาฟิล์มที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าได้ฟิล์มมีโครงสร้างแบบโมโนคลินิกที่มีหนา 280 และ 200 นาโนเมตร ที่อัตราการไหลของแก๊ส 1/32 และ 1/16 ตามลำดับ ฟิล์มมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน เกาะกลุ่มกัน และมีสมบัติ อเล็กโทรโครมิกที่ดี นั่นคือสามารถเปลี่ยนสีกลับไปกลับมาได้เร็ว

M. Dhanasankar และคณะ [38] ได้ศึกษาสมบัติทางแสง โครงสร้างและอเล็กโทรโครมิกของฟิล์มบางโมลิบดีนัมออกไซด์นาโนรอดโดยใช้เทคนิคโซล-เจล และเคลือบฟิล์มด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ การสังเคราะห์เริ่มด้วยนำ Ammonium molybdate hepta hydrate ปริมาณ 0.8636 กรัม ละลายใน 2-methoxyethanol จากนั้นหยดกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายให้ความร้อน 80 องศาเซลเซียส และกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงจุ่มเคลือบฟิล์มในสารละลาย อบและเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อทดสอบโครงสร้างผลึกพบว่าเกิดเฟสออร์โทโรมบิก เมื่อทดสอบการเกิดสีพบว่าฟิล์มที่เคลือบ 6 ชั้น แสดงความสามารถการเปลี่ยนสีกลับไปกลับมาได้ถึง 49 เปอร์เซ็นต์ ที่ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร และมีความหนาแน่นทางแสงเท่ากับ 0.68

สำหรับในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาทังสเตนออกไซด์ด้วยวิธี โซล-เจล เป็นวัสดุอเล็กโทรโครมิก เนื่องจากมีความเสถียรต่อการเปลี่ยนสีกลับไปกลับมาได้ดี นอกจากนั้นยังเจือสารลิเทียม โมลิเบตและซิลเวอร์คลอไรด์เพื่อปรับปรุงสมบัติอื่นๆ ที่นอกเหนือจากสมบัติอเล็กโทรโครมิกที่ดี เช่น การนำไฟฟ้า ยืดอายุการใช้งาน เป็นต้น ตลอดจนศึกษาการเตรียมฟิล์มบางและสมบัติของฟิล์มบางอเล็กโทรโครมิกที่เปลี่ยนสีได้โดยการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า สำหรับประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมกระจก เพื่อช่วยควบคุมปริมาณความร้อนภายในอาคารหรือยานพาหนะและช่วยประหยัดพลังงาน



## บทที่ 3

### วัสดุ อุปกรณ์และวิธีวิจัย

#### 3.1 วิธีการวิจัย

ในการวิจัยได้แบ่งการศึกษาและการสังเคราะห์เป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้  
 ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาและสังเคราะห์ทังสเตนไดรอกไซด์ ด้วยกระบวนการโซล-เจล หลังจากนั้นนำมาเคลือบกระจก FTO ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ แล้วนำฟิล์มมาศึกษาสมบัติต่างๆ ด้วยเทคนิค CV, SEM, EDX, XRD, AFM, XPS และ UV-vis

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของสารเจือลิเทียมโมลิบเดตที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของฟิล์ม และหาปริมาณของสารเจือลิเทียมโมลิบเดตที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพดีขึ้น แล้วนำฟิล์มมาศึกษาสมบัติต่างๆ ด้วยเทคนิค CV, SEM, EDX, XRD, AFM, XPS และ UV-vis

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาอิทธิพลของซิลเวอร์คลอไรด์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของฟิล์ม และหาปริมาณของซิลเวอร์คลอไรด์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพดีขึ้น แล้วนำฟิล์มมาศึกษาสมบัติต่างๆ ด้วยเทคนิค CV, SEM, EDX, XRD, AFM, XPS และ UV-vis

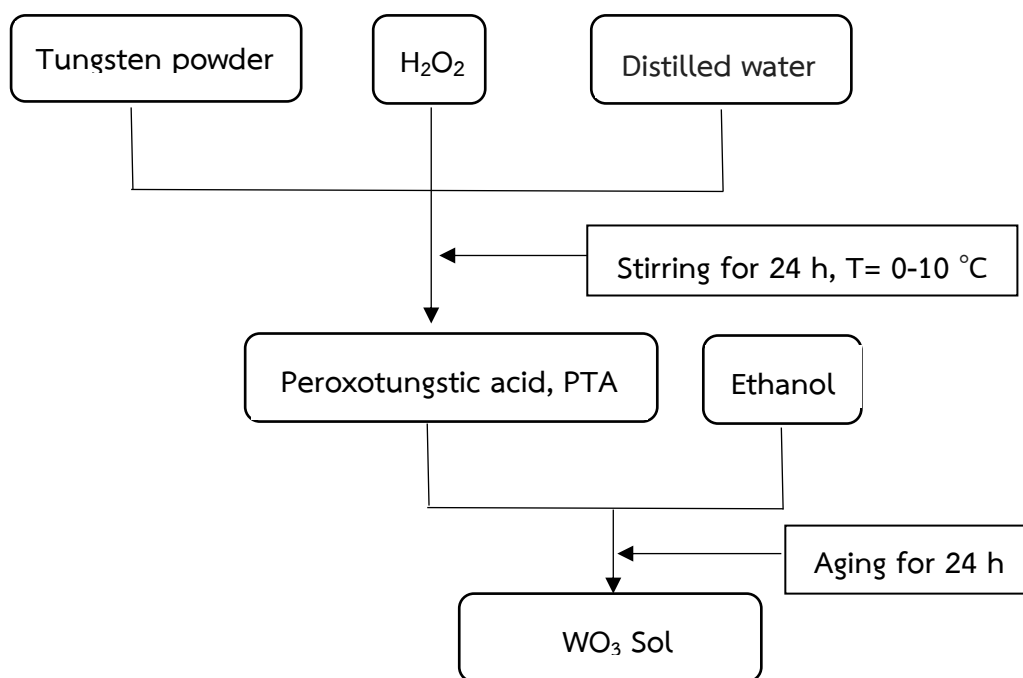
#### 3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

- ผงทังสเตน (Tungsten powder) ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Merck
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Merck
- เอทานอล ความเข้มข้น 99.9 เปอร์เซ็นต์ บริษัท RCI Labscan
- อะซิโตน บริษัท J.T. Baker
- ลิเทียมโมลิบเดต ( $Li_2MoO_4$ ) ความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Sigma-Aldrich
- ซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ) บริษัท POCH
- โซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ ) ความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Ajax Finechem
- กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ความเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์ บริษัท J.T. Baker
- กระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)
- เครื่องกวนผสมแบบใช้แรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำพร้อมแท่งแม่เหล็ก
- เตาอบความร้อน
- เตาเผา
- เครื่องอัลตราโซนิก
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

### 3.3 ขั้นตอนการวิจัย

#### 3.3.1 การสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์

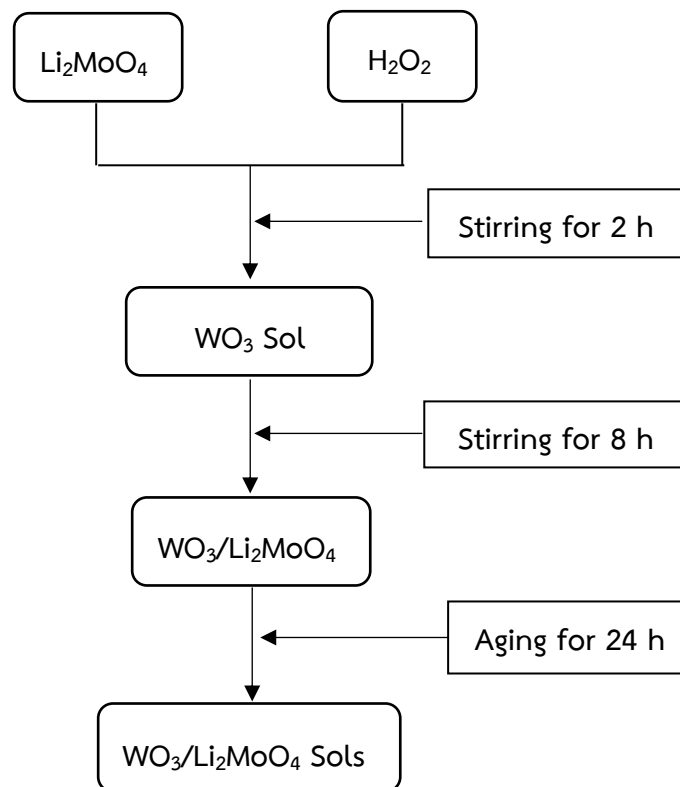
ใช้ผงทังสเตนปริมาณ 6.5 กรัม เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ โดยละลายในสารละลายผสมระหว่าง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาตร 40 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น ปริมาตร 4 มิลลิลิตร แล้วกวนด้วยผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนกลายเป็นสารละลายใส จึงได้เป็นกรดเพอรอกโซทังสติก (Peroxtungstic Acid, PTA) หลังจากนั้นเติมเอทานอลในอัตราส่วน กรดเพอรอกโซทังสติก : เอทานอล 1 : 1 แล้วกวนด้วยเครื่องแม่เหล็กเป็นเวลา 45 นาที หลังจากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงได้โซลทังสเตนไตรออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 3.1 ที่จะนำมาเคลือบลงบนกระจก FTO ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบต่อไป และก่อนนำกระจก FTO มาจุ่มเคลือบนั้นต้องมีการทำความสะอาดพื้นผิวกระจกก่อนดังหัวข้อ 3.3.4



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์โซลทังสเตนไตรออกไซด์

### 3.3.2 การเจือลิเทียมโมลิบเดต

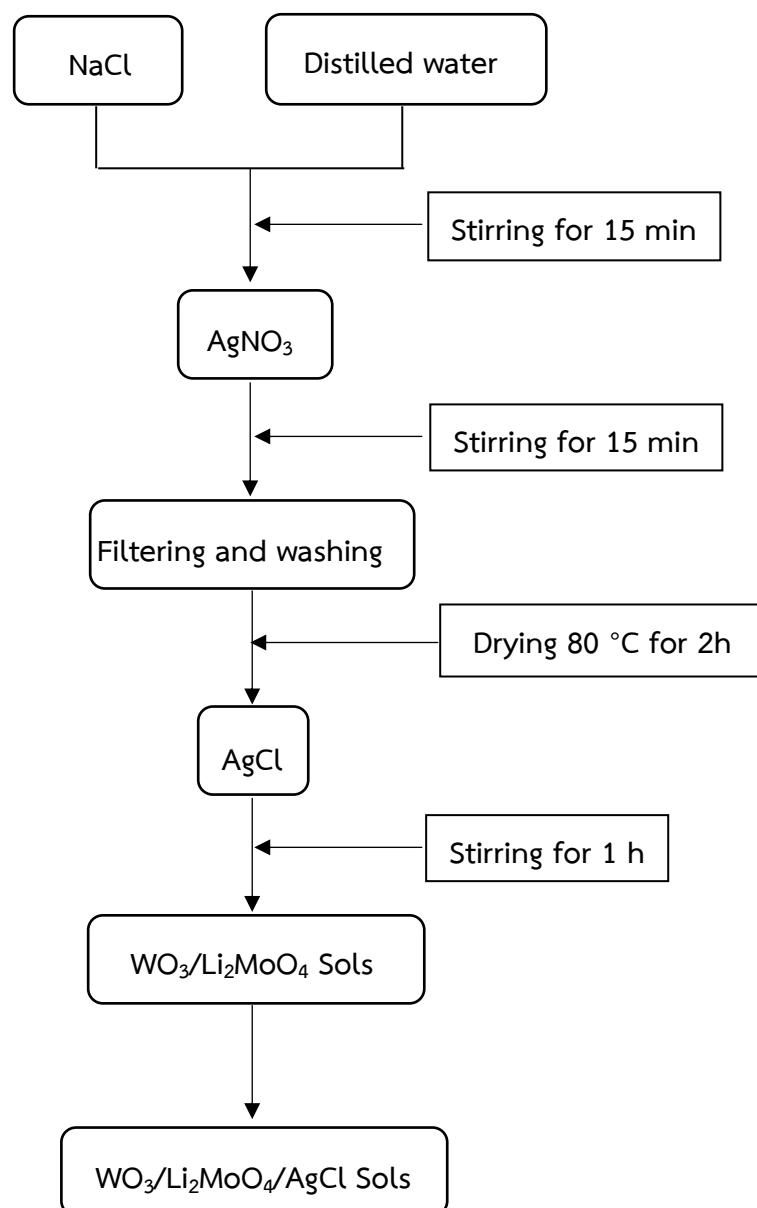
เจือลิเทียมโมลิบเดตปริมาณ 5, 10, และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ตามลำดับ โดยเตรียมจากการนำผงลิเทียมโมลิบเดตละลายลงในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แล้วทำการกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้สารละลายใส หลังจากนั้นนำมาผสมในโซลทั้งสแตนไดรออกไซด์ แล้วกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงได้โซลทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต แสดงดังรูปที่ 3.2 ที่จะนำมาเคลือบลงบนกระจก FTO



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเจือลิเทียมโมลิบเดตในโซลทั้งสแตนไดรออกไซด์

### 3.3.3 การสังเคราะห์ซิลเวอร์และเจือซิลเวอร์

สังเคราะห์โดยใส่โซเดียมคลอไรด์ลงในน้ำกลั่น แล้วกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นเติมซิลเวอร์ไนเตรดลงไปแล้วกวนต่ออีก 15 นาที จะมีตะกอนสีขาวเกิดขึ้น นำมากรองด้วยกระดาษกรองแล้วทำการล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง หลังจากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 3.3 แล้วนำมาเติมลงในโซลทั้งสเตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต แล้วกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงได้โซลทั้งสเตนไดรออกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์



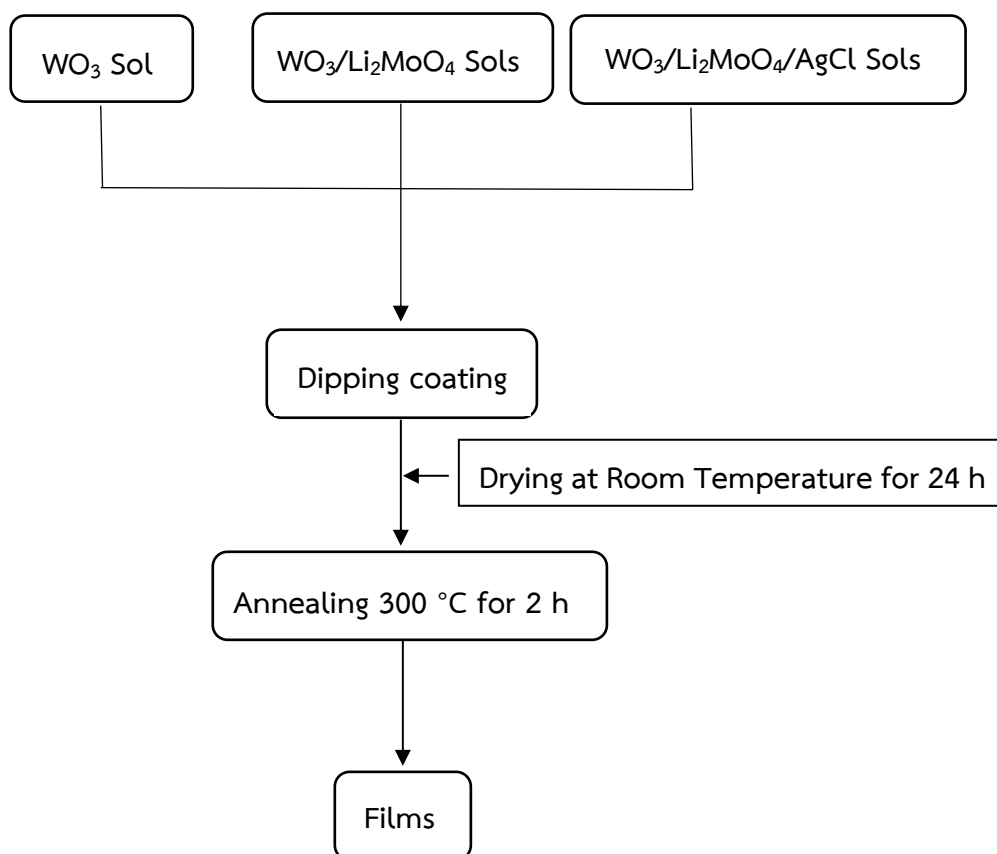
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซิลเวอร์คลอไรด์และเจือซิลเวอร์คลอไรด์ในโซลทั้งสเตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต

### 3.3.4 การทำความสะอาดผิวกระจกนำไฟฟ้า

ก่อนที่จะนำกระจกนำไฟฟ้า FTO ไปเคลือบด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบนั้นต้องมีการทำความสะอาดผิวของกระจกก่อน โดยการใช้คลื่นอัลตราโซนิกด้วยน้ำกลั่น เป็นเวลา 15 นาที ต่อด้วยอะซิโตน 15 นาที และเอทานอล 15 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้นก็นำกระจก FTO ไปอบเพื่อไล่ความชื้นออกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

### 3.3.5 การเตรียมฟิล์ม

เตรียมฟิล์มด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ (Dip coating) โดยการนำโซลทั้งสแตนไดรออกไซด์ โซลทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดต และโซลทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ ในหัวข้อ 3.3.1, 3.3.2 และ 3.3.3 ตามลำดับ ออกจากตู้เย็นมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องจนโซลเป็นอุณหภูมิห้อง จึงนำกระจก FTO มาเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำฟิล์มที่เคลือบบนกระจก FTO ไปเผา ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที แล้วปล่อยให้ฟิล์มเย็นในเตา ก็จะได้ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การเตรียมฟิล์ม  $\text{WO}_3$  หรือ  $\text{WO}_3/\text{Li}_2\text{MoO}_4$  หรือ  $\text{WO}_3/\text{Li}_2\text{MoO}_4/\text{AgCl}$  ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ

### 3.4 การตรวจสอบบัติและคุณลักษณะของฟิล์ม

3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-Ray diffractometer, XRD)

XRD เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้ศึกษาชนิดของสารประกอบที่อยู่ในสารตัวอย่าง สามารถใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารประกอบ การคำนวณหาขนาดผลึกของเฟสที่เกิดขึ้น ด้วยสมการ Scherer's ดังสมการที่ 3.1

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.1)$$

กำหนดให้  $t$  คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ( $\text{CuK}\alpha = 0.15406$  นาโนเมตร)

$\beta$  คือ Line width at half maximum height (เรเดียน)

$\theta$  คือ มุมสะท้อน (องศา)

3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

SEM หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือเครื่องมือที่มีประโยชน์สำหรับการใช้งานวิจัยเป็นอย่างมากในการใช้อธิบายและการวิเคราะห์ถึงลักษณะ รูปร่าง ขนาดและพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถแสดงภาพที่ความละเอียดสูง กล่าวคือสามารถแสดงภาพในระดับนาโนเมตรได้ โดยในบางรุ่นของเครื่องมือสามารถแสดงภาพที่กำลังขยายสูงถึง 100,000 เท่า และภาพที่ได้จะมองเห็นความชัดลึก และมิติของตัวอย่าง สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาถึงรูปร่างและลักษณะอนุภาคของผงตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง SEM รุ่น FEI Quanta 400

3.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุด้วยเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive x-ray spectrometer, EDX)

EDX เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพเพื่อวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างด้วยอุปกรณ์นี้โดยส่วนใหญ่จะคู่กับ SEM สามารถดูลักษณะรูปร่างพร้อมกับตรวจสอบธาตุได้ในขั้นตอนเดียว ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ EDS file emission ของเครื่อง SEM รุ่น FEI Quanta 400

3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน (Scanning probe microscopy) ประเภทหนึ่งที่สามารถใช้ถ่ายภาพวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร หรือถ่ายภาพอะตอมของสารได้ โดยที่กล้อง AFM จะมีลักษณะการทำงานที่พิเศษเฉพาะตัว คือ จะใช้หัวอ่าน

ขนาดเล็กวัดแรงผลักและแรงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิวของวัสดุ เพื่อมาสร้างเป็นภาพของพื้นผิวของวัตถุนั้นได้ โดยที่กล้อง AFM สามารถนำมาใช้ในการถ่ายภาพขยายในระดับนาโนเมตรของวัตถุที่นำไฟฟ้าและวัตถุที่ไม่นำไฟฟ้า

### 3.4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับพื้นผิวของฟิล์ม (X-ray Photoelectron, XPS)

XPS เป็นเทคนิควิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ซึ่งสามารถให้ผลวิเคราะห์ทั้งสมบัติทางเคมีที่ระดับพื้นผิวของวัสดุ เช่น ชนิดและจำนวนธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี รูปแบบพันธะทางเคมี และสถานะออกซิเดชันของอะตอม เป็นต้น ยังรวมถึงความสม่ำเสมอของธาตุองค์ประกอบ สภาพทางเคมีของผิวที่เปลี่ยนแปลงไป หลังถูกกระทบด้วยความร้อน สารเคมี ลำโพงอินฟราเรด หรือรังสี UV ใช้วิเคราะห์วัสดุได้มากมายหลายชนิด ทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ โลหะผสม สารกึ่งตัวนำ พอลิเมอร์ แก้ว สารเคลือบ กระดาษ เป็นต้น จึงมีอุตสาหกรรมหลายประเภทที่ต้องอาศัยเครื่อง XPS เครื่องที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เครื่อง XPS ยี่ห้อ AXIS ULTRA<sup>DLD</sup>

### 3.4.6 การวิเคราะห์สมบัติการส่งผ่านทางแสงของฟิล์ม (UV-vis Spectrophotometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสง ในช่วงรังสียูวี และช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่แสงผ่าน โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ เครื่องที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิลสเปกโทรสโกปี รุ่น GENESYS 10S ยี่ห้อ Thermo Scientific<sup>TM</sup>

### 3.4.7 การวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้าเคมีของฟิล์มโดยโวลแทมเมทรีแบบรอบ (Cyclic voltammetry, CV)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า ที่ป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าในลักษณะรอบ ซึ่งการป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าครั้งแรกในทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกหลังจากวงจรอิเล็กโทรนิกส์ภายนอกแก่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ศักย์ไฟฟ้าที่หันทำให้ขั้วไฟฟ้าทำงาน มีค่าศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้สารที่อยู่ในสารละลายเกิดปฏิกิริยาถ่ายเทอิเล็กตรอนบนผิวของขั้วไฟฟ้าได้ คือ มีการให้หรือรับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าทำงาน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านของขั้วไฟฟ้าทำงานซึ่งขนาดของกระแสมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถความสัมพันธ์ดังกล่าวได้จากสมการของแรนเดลส์ เชฟลิก ดังที่แสดงในสมการที่ 2.23

โดยการศึกษาการเปลี่ยนสีของฟิล์มมีเงื่อนไขดังนี้

- ความต่างศักย์ : -1 โวลต์ ถึง 1 โวลต์
- อัตราการสแกน : 100 มิลลิโวลต์ต่อนาที
- อิเล็กโทรดช่วย : แพรดทินัม
- อิเล็กโทรดใช้งาน : ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์

- อิเล็กโทรดอ้างอิง : ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์
- อิเล็กโทรดไลต์ : กรดซัลฟิวริก 0.5 โมลาร์



## บทที่ 4

### ผลและการอภิปรายผล

#### 4.1 สมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสีด้วยวิธี CV

ในการศึกษาด้วยวิธี CV หรือการศึกษาการเปลี่ยนสีของฟิล์มโดยใช้กระแสไปเป็นตัวกระตุ้นนั้น เราสามารถทำการศึกษาด้วยเครื่องโวลเทมเมทรีแบบรอบ โดยจะศึกษาตามสภาวะที่กำหนดดังนี้

Counter electrode : Pt electrode

Reference electrode : Ag/AgCl

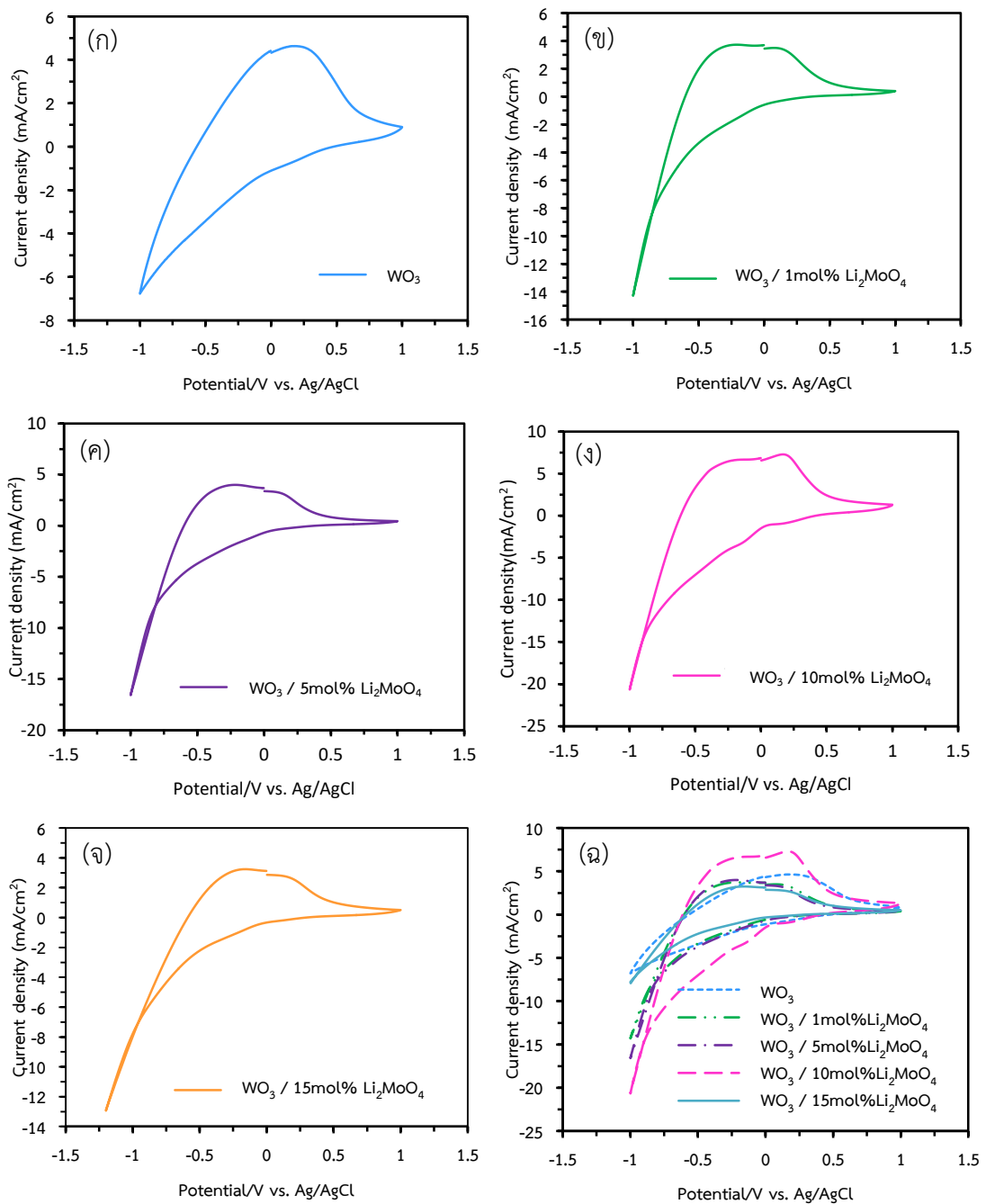
Working electrode :  $WO_3$

Electrolyte :  $H_2SO_4$  0.5 M

Scan rate : 100 mV/s

Potential : -1 to 1 V

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์และฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดต 1, 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยโวลเทมเมทรีจาก FTO โดยฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเวอร์คัลไรต์เข้มอย่างชัดเจนเมื่อค่าความต่างศักย์เป็น -1 โวลต์ และสีจะจางที่สุดเมื่อค่าความต่างศักย์เปลี่ยนแปลงไปเป็น 1 โวลต์ เนื่องจากมีการแทรกตัวของอิเล็กตรอนเข้าสู่โครงสร้าง ส่งผลให้ทังสเตนที่มีเลขออกซิเดชัน  $W^{6+}$  เปลี่ยนเป็น  $W^{5+}$  เรียกว่า ทังสเตนบรอนซ์ ทำให้ฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน และหากกลับขั้วของแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการดึงประจุออกจากชั้นอิเล็กทรอนิกส์ หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้สีของวัสดุกลับมาโปร่งใสอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจาก  $W^{5+}$  กลับมาเป็น  $W^{6+}$  เช่นเดิม และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าพีคแอนอดิกของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน และเมื่อนำพื้นที่ใต้กราฟมาคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) พบว่าฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโวลต์มีค่า D สูงที่สุดคือ  $3.98 \times 10^{-9}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โวลเทมโมแกรมของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต (ก) ฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์ และฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต (ข) 1 (ค) 5 (ง) 10 (จ) 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และ (ฉ) กราฟเปรียบเทียบผลของปริมาณลิเทียมโมลิบเดตต่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต

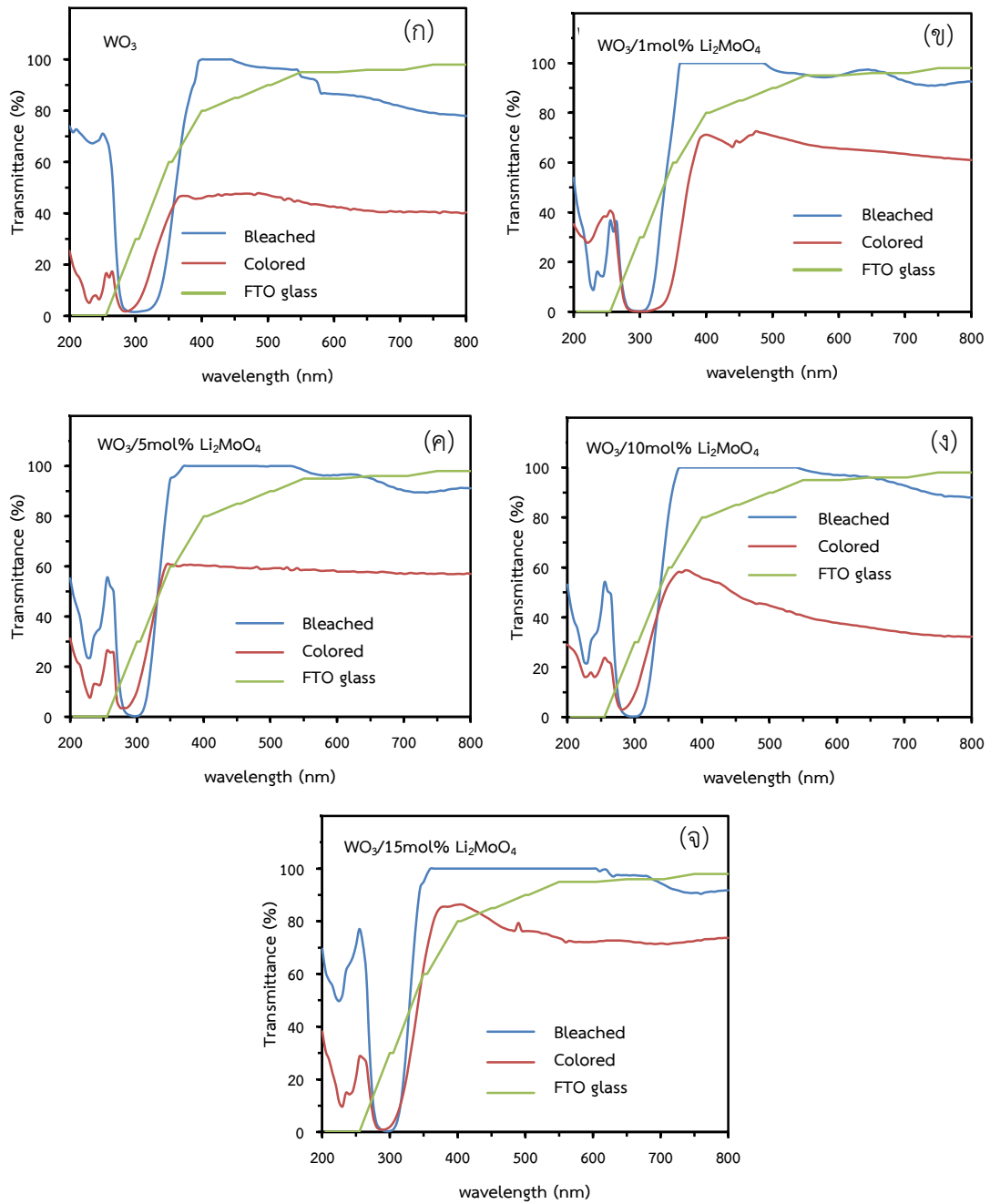
ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต

Sample	Diffusion coefficient, D (cm <sup>2</sup> /s)
WO <sub>3</sub>	1.07 × 10 <sup>-9</sup>
WO <sub>3</sub> /1 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	1.14 × 10 <sup>-9</sup>
WO <sub>3</sub> /5 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	1.33 × 10 <sup>-9</sup>
WO <sub>3</sub> /10 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	3.98 × 10 <sup>-9</sup>
WO <sub>3</sub> /15 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	0.64 × 10 <sup>-9</sup>

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อมีการเจือลิเทียมโมลิบเดตลงไปในฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมลพบว่าฟิล์มมีสัมประสิทธิ์การแพร่ดีที่สุด คือ  $3.98 \times 10^{-9}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าลดลงเมื่อเจือลิเทียมโมลิบเดตเพิ่มขึ้น

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิค UV-Vis

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ส่องผ่านของแสงของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตนั้น ทำโดยการใช้เทคนิค UV-Vis จะมีการเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงในขณะที่ฟิล์มเป็นสีน้ำเงินและกลับมาเป็นสีใส แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยใช้ความยาวคลื่นในช่วง 400-800 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของแสงที่มองเห็นได้โดยใช้อากาศเป็นตัวเทียบค่าในการวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงของกระจกนำไฟฟ้า FTO ส่วนกระจกนำไฟฟ้า FTO ที่เคลือบฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์จะใช้กระจกนำไฟฟ้า FTO เป็นตัวเทียบค่าในการวัด พบว่าฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมลนั้น มีค่าความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงมากที่สุดคือ 55.93 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต (ก) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ และฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต (ข) 1 (ค) 5 (ง) 10 และ (จ) 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

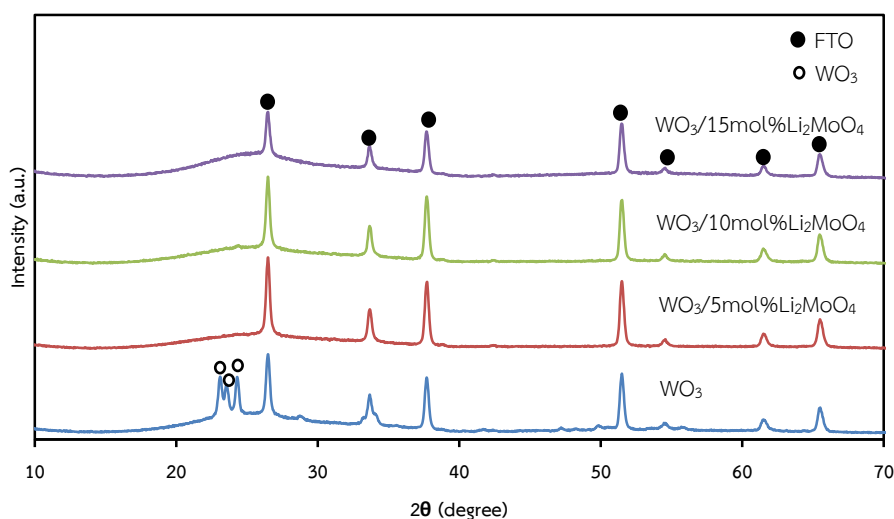
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต

Sample	Bleached state Transmittance (T <sub>b</sub> , %)	Colored state Transmittance (T <sub>c</sub> , %)	Transmittance modulation (ΔT, %)
WO <sub>3</sub>	92.16	44.36	47.80
WO <sub>3</sub> /1 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	97.03	67.43	29.60
WO <sub>3</sub> /5 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	97.48	58.66	38.82
WO <sub>3</sub> /10 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	98.12	42.19	55.93
WO <sub>3</sub> /15 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	99.17	75.67	23.50

#### 4.2 สมบัติทางโครงสร้างและพื้นผิวของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต

4.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหรือเฟสของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD

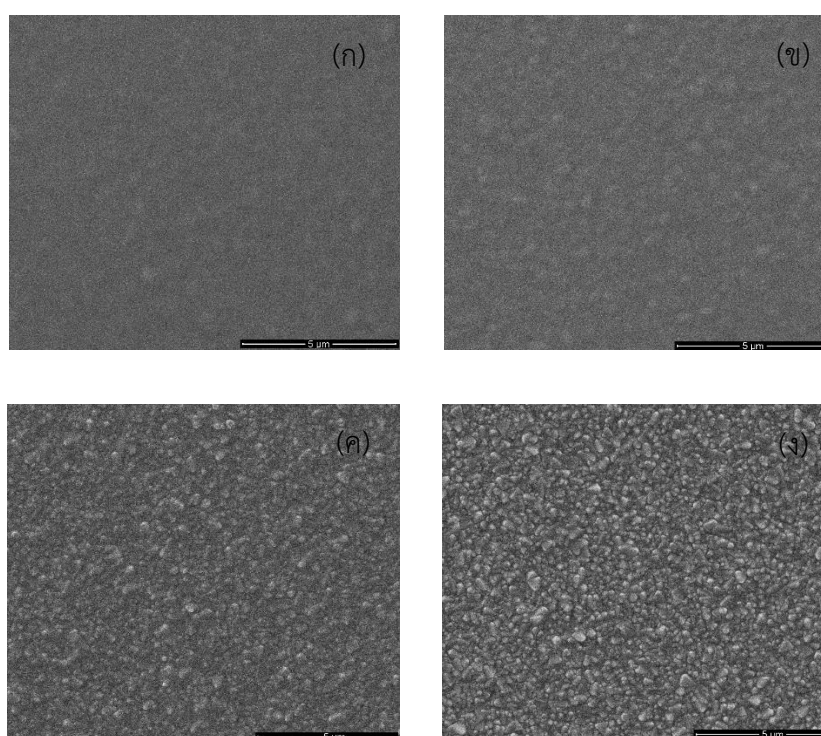
การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ปรากฏว่าฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์พบพีคที่  $2\theta = 23.2, 23.7$  และ  $24.3$  องศา ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบโมนอคลินิก และเมื่อเจือลิเทียมโมลิบเดตไม่ทำให้โครงสร้างของทังสเตนเปลี่ยนแปลงจะทำให้พีคต่ำลง จากรูปที่ 4.3 พบว่า ความเข้มข้นของพีคที่เกิดขึ้นยังไม่เด่นชัดที่จะระบุว่าเป็นพีคของทังสเตนไดรอกไซด์ มีเพียงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นสารประกอบของทินออกไซด์ซึ่งเป็นเพียงสารเคลือบกระจกนำไฟฟ้า FTO เท่านั้น



รูปที่ 4.3 XRD สเปกตรัมของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์และฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต

#### 4.4.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ด้วยเทคนิค SEM

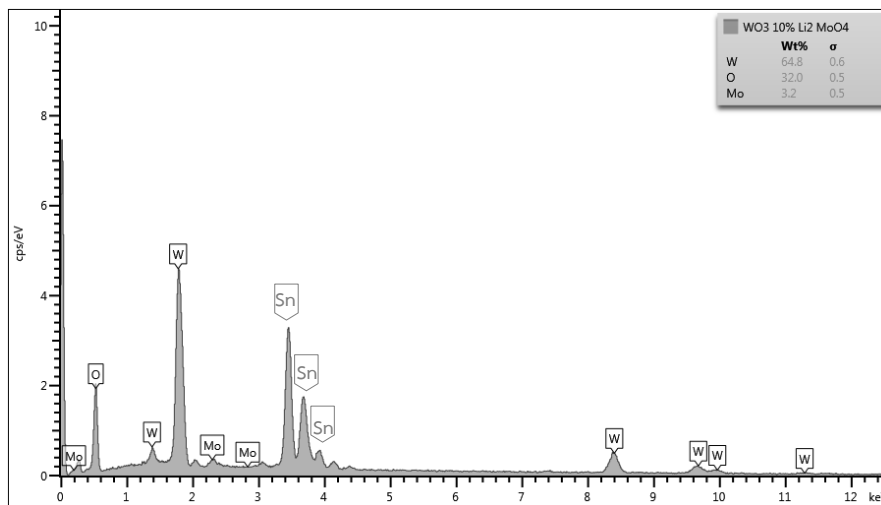
จากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยเทคนิค SEM โดยใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าพื้นผิวฟิล์มมีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบแสดงดังรูปที่ 4.4(ก) และเมื่อเจือลิเทียมโมลิบเดตพบว่าพื้นผิวฟิล์มมีลักษณะที่ขรุขระเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เจือเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.4(ค-ง) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค CV พบว่าฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จากกราฟสามารถนำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่พบว่ามีค่าสูงที่สุด และความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงระหว่างฟิล์มที่มีสีเข้มและจางสีมีค่าสูงที่สุด ซึ่งหมายถึงเมื่อพื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้นทำให้ฟิล์มมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลต่อสมบัติอิเล็กทรอนิกส์



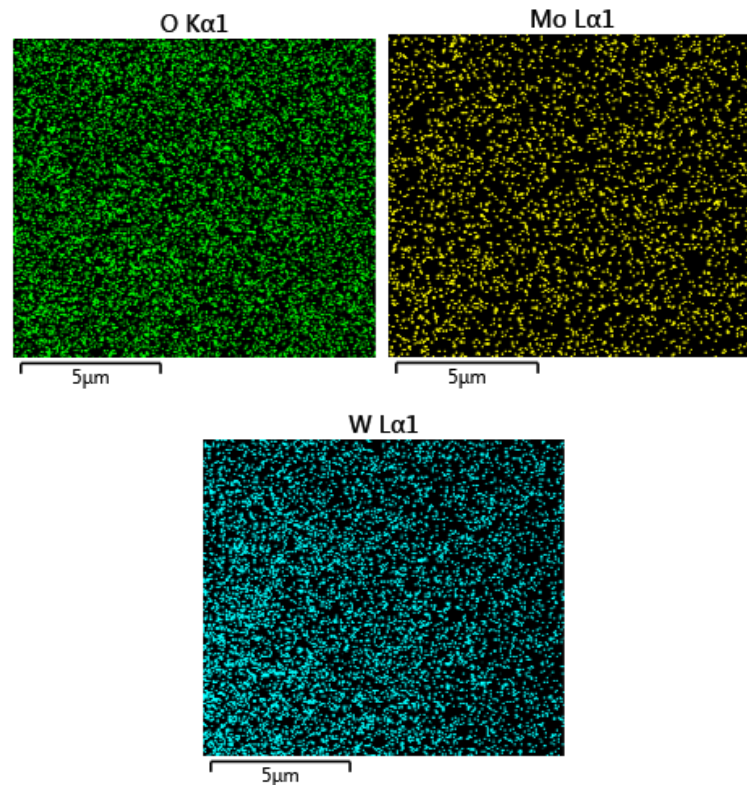
**รูปที่ 4.4** ภาพพื้นผิวของฟิล์ม (ก) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ (ข) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (ค)ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และ (ง)ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและด้วยเทคนิค EDX

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุพบว่าบนฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตมีธาตุ ทังสเตน 64.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โมลิบดินัม 3.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และออกซิเจน 32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งธาตุต่างๆมีการกระจายตัวของธาตุอย่างสม่ำเสมอบนแผ่นฟิล์มซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ส่วนลิเทียมไม่สามารถวิเคราะห์พบด้วยเทคนิคนี้เนื่องจากเป็นธาตุที่มีน้ำหนักเบาเกินไปซึ่งเป็นข้อจำกัดของเครื่อง



รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต

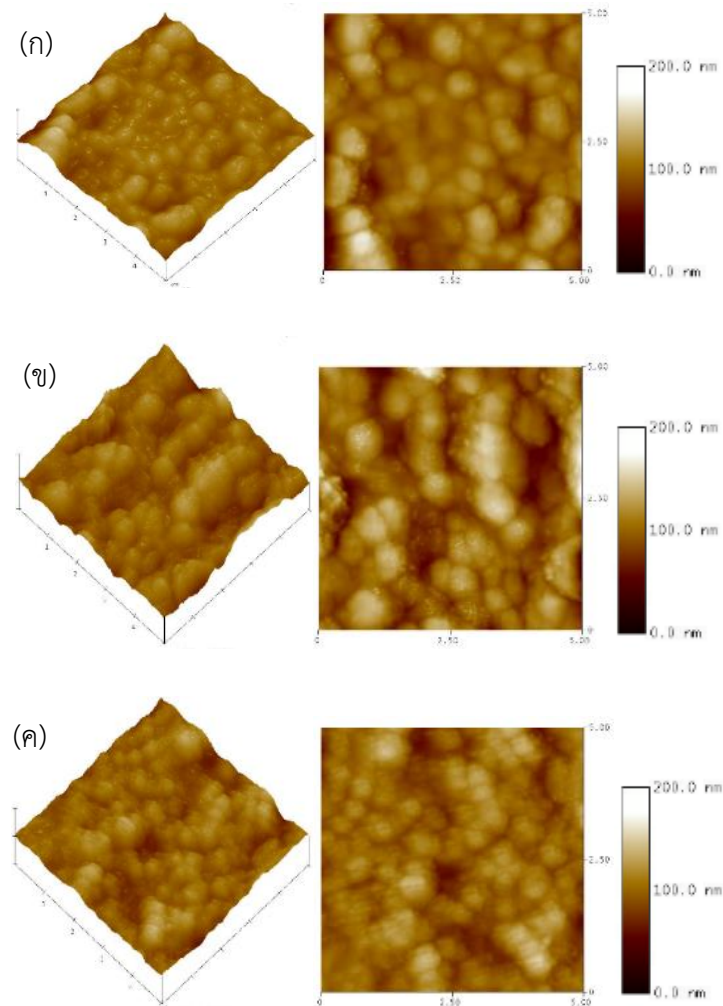


รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต

#### 4.2.4 ผลการวิเคราะห์ความขรุขระของฟิล์มด้วยเทคนิค AFM

การวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์และทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตด้วยเทคนิค AFM พบว่าฟิล์มมีความหนาประมาณ 100 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.7-4.9 และพบว่าเมื่อเจือลิเทียมโมลิบเดตลงไป 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมลค่าความขรุขระของฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 6.4 นาโนเมตร เป็น 11.08 นาโนเมตร และเมื่อเจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ค่าความขรุขระเพิ่มขึ้นเป็น 14.44 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.7 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับเทคนิค SEM และเมื่อดูจากภาพที่ 4.7 (ค) จะเห็นได้ว่าพื้นผิวฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมลพื้นผิวก่อนข้างหยาบและมีพื้นที่ผิวมากกว่าผิวของฟิล์มทั้งสแตน แสดงดังรูปที่ 4.7 (ก) กล่าวคือ เมื่อเจือลิเทียมโมลิบเดตในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้พื้นผิวของฟิล์มพื้นผิวของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นก็ส่งผลดีต่อสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีพื้นที่ในการไหลของอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้นด้วย

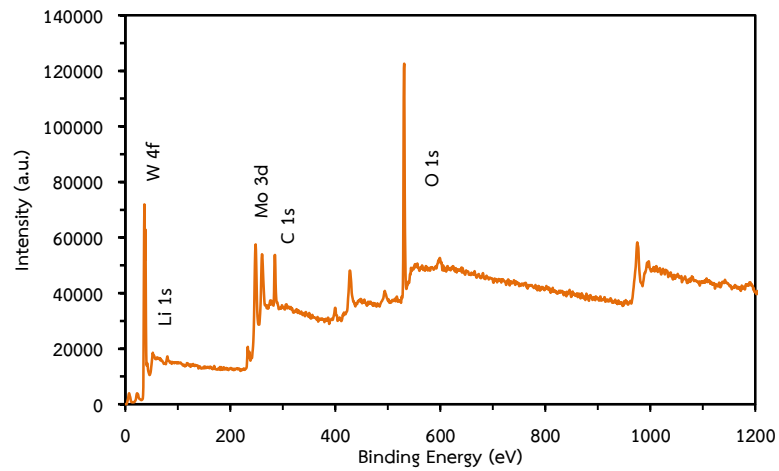




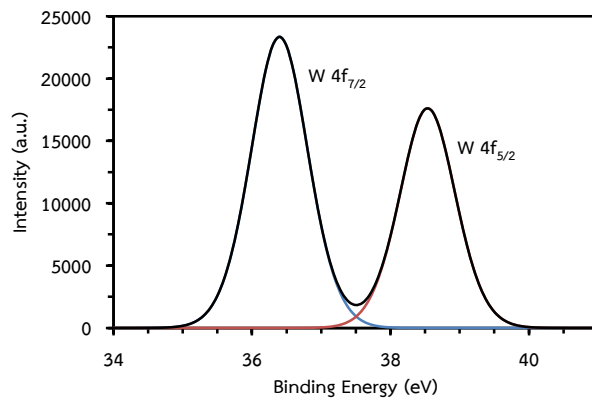
รูปที่ 4.7 ภาพความขรุขระของพื้นผิวฟิล์ม (ก) ทั้งสแตนไดรออกไซด์ (ข) ทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (ค) ทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

#### 4.2.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้างเคมีของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตด้วยเทคนิค XPS

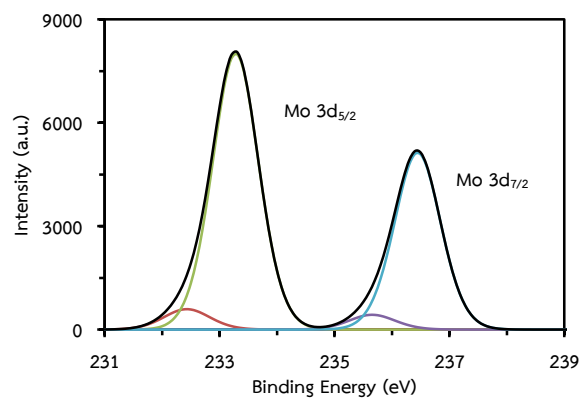
จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต ในช่วงค่าพลังงานยึดเหนี่ยว 0-1200 อิเล็กตรอนโวลต์ ปรากฏสเปกตรัมของธาตุทั้งสแตน โมลิบดินัม ออกซิเจน และคาร์บอนในปริมาณ 9.35, 0.54, 50.84 และ 39.27 เปอร์เซ็นต์อะตอม ตามลำดับ จากรูปที่ 4.11 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น W 4f พบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของทั้งสแตนที่ 36.3 และ 38.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่สัมพันธ์กับชั้น W 4f<sub>7/2</sub> และ W 4f<sub>5/2</sub> ตามลำดับ ซึ่งบอกลถึง W<sup>6+</sup> ที่ปรากฏอยู่บนผิวของฟิล์ม จากรูปที่ 4.12 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น Mo 3d พบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของโมลิบดินัมที่ 233.5 และ 236.5 อิเล็กตรอนโวลต์ที่สัมพันธ์กับชั้น Mo 3d<sub>5/2</sub> และ Mo 3d<sub>7/2</sub> ตามลำดับ ซึ่งบอกลถึง Mo<sup>3+</sup>



รูปที่ 4.8 สเปกตรัม XPS แบบ survey ของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต



รูปที่ 4.9 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น W 4f



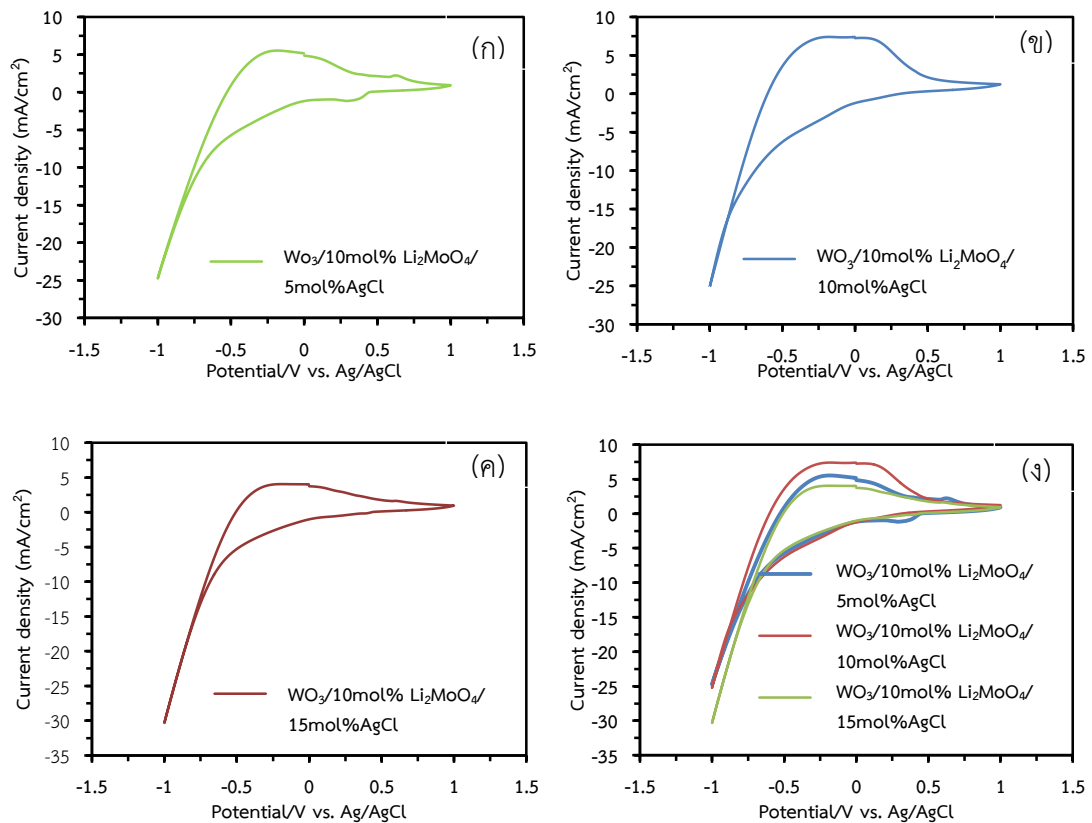
รูปที่ 4.10 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น Mo 3d

- อิทธิพลของลิเทียมโมลิบเดตต่อสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์จะเห็นได้ว่าลิเทียมโมลิบเดตมีผลต่อโครงสร้าง  $WO_3$  ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดต [34] กล่าวคือ ทั้งสแตนไดรออกไซด์มีโครงสร้างเป็นออสถุณฐาน (รูปที่ 4.3) ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ในเทอมของสัมประสิทธิ์การแพร่ประจุของฟิล์ม (ตารางที่ 4.1) ยกเว้นสูตรที่เจือ  $Li_2MoO_4$  15 mol% ซึ่งจะได้ฟิล์มที่แตก ผล XRD สอดคล้องกับการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค SEM รูปที่ 4.4 พบว่าลิเทียมโมลิบเดตในฟิล์มทำให้มีเกรนขนาดลดลง ซึ่งมีผลทำให้พื้นที่ผิวของฟิล์มเพิ่มขึ้น และสมบัติอิเล็กทรอนิกส์สูงขึ้น เทคนิคการวิเคราะห์แบบ EDX ในรูปที่ 4.5-4.6 แสดงให้เห็นการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ในฟิล์มซึ่งปรากฏธาตุหลักคือ W ซึ่งมาจากฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ Mo ซึ่งมาจากการเจือลิเทียมโมลิบเดต และ Sn ซึ่งมาจากกระจกซึ่งเป็นวัสดุฐาน นอกจากนั้นก็เป็น C และ O ซึ่งมาจากการเผาสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์ม และบรรยากาศจากการเผา จากรูปที่ 4.6 พบว่าฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดต มีธาตุทั้งสแตน 64.8 โมลิบดินัม 3.2 และออกซิเจน 32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการกระจายตัวของธาตุ W และ Mo อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งฟิล์ม (รูปที่ 4.6) ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS พบธาตุ Mo, W, C และ O ในปริมาณ 0.54, 9.35, 39.27 และ 50.84 ตามลำดับ (รูปที่ 4.8) และมี Li เล็กน้อย จากรูปที่ 4.9 และจากรูปที่ 4.10 พบระดับชั้น W 4f ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 36.3 และ 38.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่สัมพันธ์กับชั้น W  $4f_{7/2}$  และ W  $4f_{5/2}$  ซึ่งบอกถึง  $W^{6+}$  ที่ปรากฏอยู่ที่ผิวของฟิล์ม และพบระดับชั้น Mo 3d ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 233.5 และ 236.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่สัมพันธ์กับชั้น Mo  $3d_{5/2}$  และ Mo  $3d_{7/2}$  ตามลำดับ ซึ่งบอกถึง  $Mo^{3+}$

#### 4.3 สมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คอลลอยด์

##### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสีด้วยวิธี CV

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดตพบว่าที่เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมลมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงที่สุดจึงนำมาเจือซิลเวอร์คอลลอยด์ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมลบนกระจก FTO จะเห็นได้ว่าพิกแอนด์อินดิกของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.13(ง) และจากกราฟเมื่อมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) พบว่าฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คอลลอยด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมลมีค่า D สูงที่สุดคือ  $4.55 \times 10^{-9}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.3



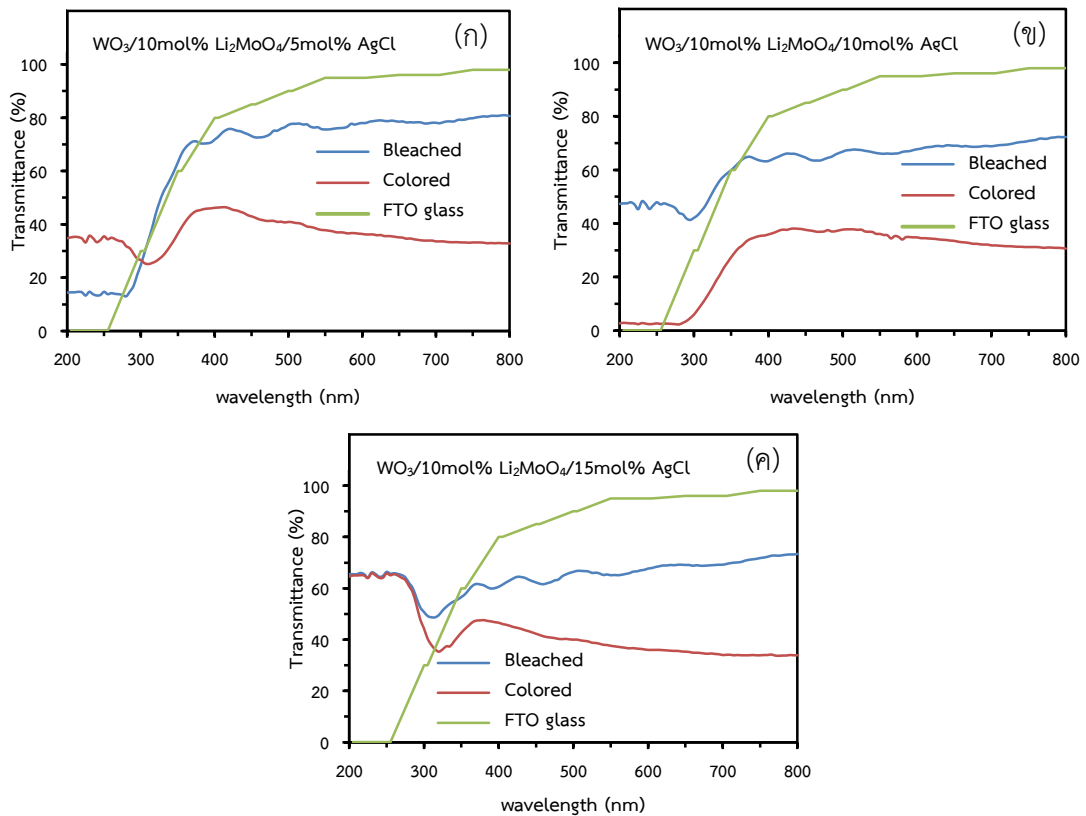
**รูปที่ 4.11** โวลเทมโมแกรมของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ (ก) 5 (ข) 10 (ค) 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และ (ง) กราฟเปรียบเทียบผลของปริมาณซิลเวอร์คลอไรด์ต่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์

**ตารางที่ 4.3** สัมประสิทธิ์การแพร่ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์

Sample	Diffusion coefficient, D (cm <sup>2</sup> /s)
WO <sub>3</sub> /10 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> /5 mol%AgCl	2.43 × 10 <sup>-9</sup>
WO <sub>3</sub> /10 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> /10 mol%AgCl	4.55 × 10 <sup>-9</sup>
WO <sub>3</sub> /10 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> /15 mol%AgCl	1.68 × 10 <sup>-9</sup>

#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิค UV-Vis

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียม โมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์นั้น ทำโดยการใช้เทคนิค UV-Vis จะมีการเปรียบเทียบระหว่าง เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงในขณะที่ฟิล์มเป็นสีน้ำเงินและกลับมาเป็นสีใส แสดงดังรูปที่ 4.14 โดยใช้ความยาวคลื่นในช่วง 400-800 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวแสงที่มองเห็นได้ โดยใช้อากาศเป็นตัวเทียบค่าในการวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงของกระจกนำไฟฟ้า FTO ส่วนกระจกนำไฟฟ้า FTO ที่เคลือบฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์จะใช้กระจกนำไฟฟ้า FTO เป็นตัวเทียบค่าในการวัด พบว่าฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมลนั้น มีค่าความแตกต่างของ เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงมีค่าใกล้เคียงกันแสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

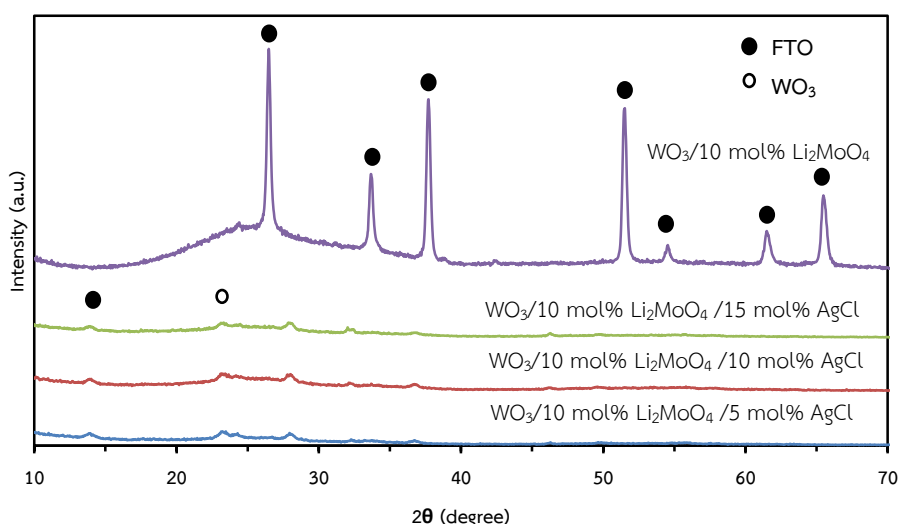
ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์

Sample	Bleached state Transmittance (T <sub>b</sub> , %)	Colored state Transmittance (T <sub>c</sub> , %)	Transmittance modulation ( $\Delta T$ , %)
WO <sub>3</sub> /10 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> /5 mol% AgCl	77.29	37.46	39.83
WO <sub>3</sub> /10 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> /10 mol% AgCl	67.77	34.49	33.02
WO <sub>3</sub> /10 mol% Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> /15 mol% AgCl	67.46	37.44	30.02

#### 4.4 สมบัติทางโครงสร้างและพื้นผิวของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์

##### 4.4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหรือเฟสของฟิล์มที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD

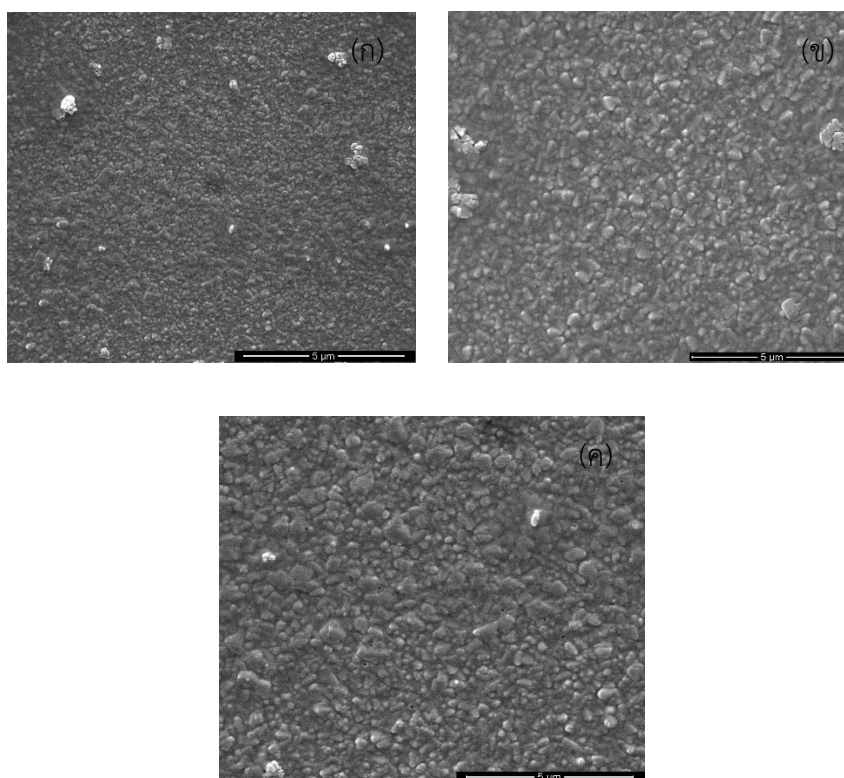
การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ปรากฏว่าฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต ไม่ทำให้โครงสร้างของทังสเตนเปลี่ยน จากรูปที่ 4.15 พบว่า ความเข้มของพิกที่เกิดขึ้นพบพิกเล็ก ๆ ซึ่งเป็นพิกของทังสเตนไดรอกไซด์ และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นสารประกอบของทินออกไซด์ซึ่งเป็นสารเคลือบกระจกนำไฟฟ้า FTO เท่านั้น



รูปที่ 4.13 XRD สเปกตรัมของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์

#### 4.4.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ด้วยเทคนิค SEM

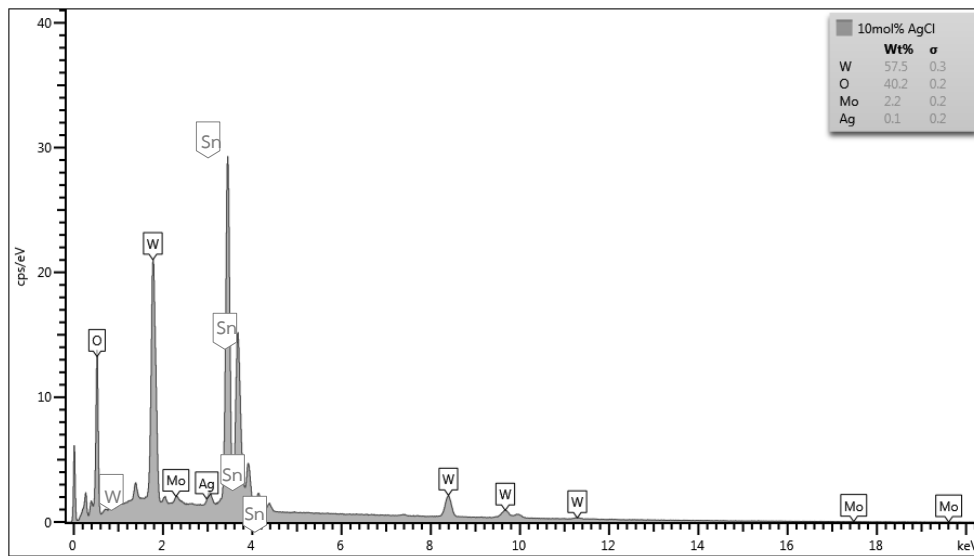
จากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ด้วยเทคนิค SEM โดยใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าพื้นผิวฟิล์มมีลักษณะที่ไม่เรียบแสดงดังรูปที่ 4.16(ก) และเมื่อเจือซิลเวอร์คลอไรด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นพบว่าพื้นผิวฟิล์มมีลักษณะที่ขรุขระเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เจือเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.16(ข-ค) และยังพบรูพรุนเล็กๆ เกิดขึ้นบนผิวฟิล์มอีกด้วย



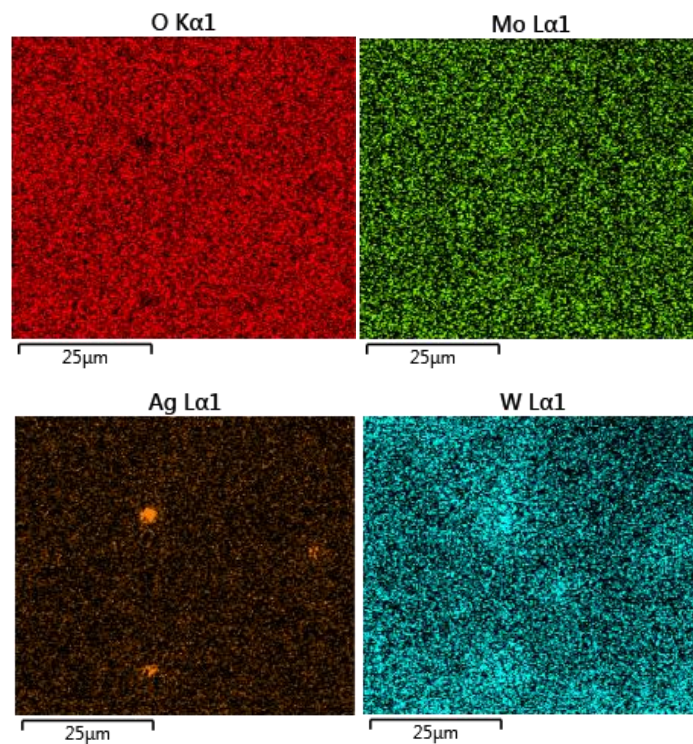
**รูปที่ 4.14** ภาพพื้นผิวของฟิล์ม (ก) ฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมลและซิลเวอร์คลอไรด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (ข) ฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และ (ค) ฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมลและซิลเวอร์คลอไรด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

#### 4.4.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุประกอบของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ด้วยเทคนิค EDX

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุพบว่าบนฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์พบว่ามีธาตุทังสเตน 57.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, โมลิบดินัม 2.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, ซิลเวอร์คลอไรด์ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และออกซิเจน 40.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าธาตุต่างๆ มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนแผ่นฟิล์มซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจอร์เมเนียมโมลิบดีตและซิลเวอร์คลอไรด์

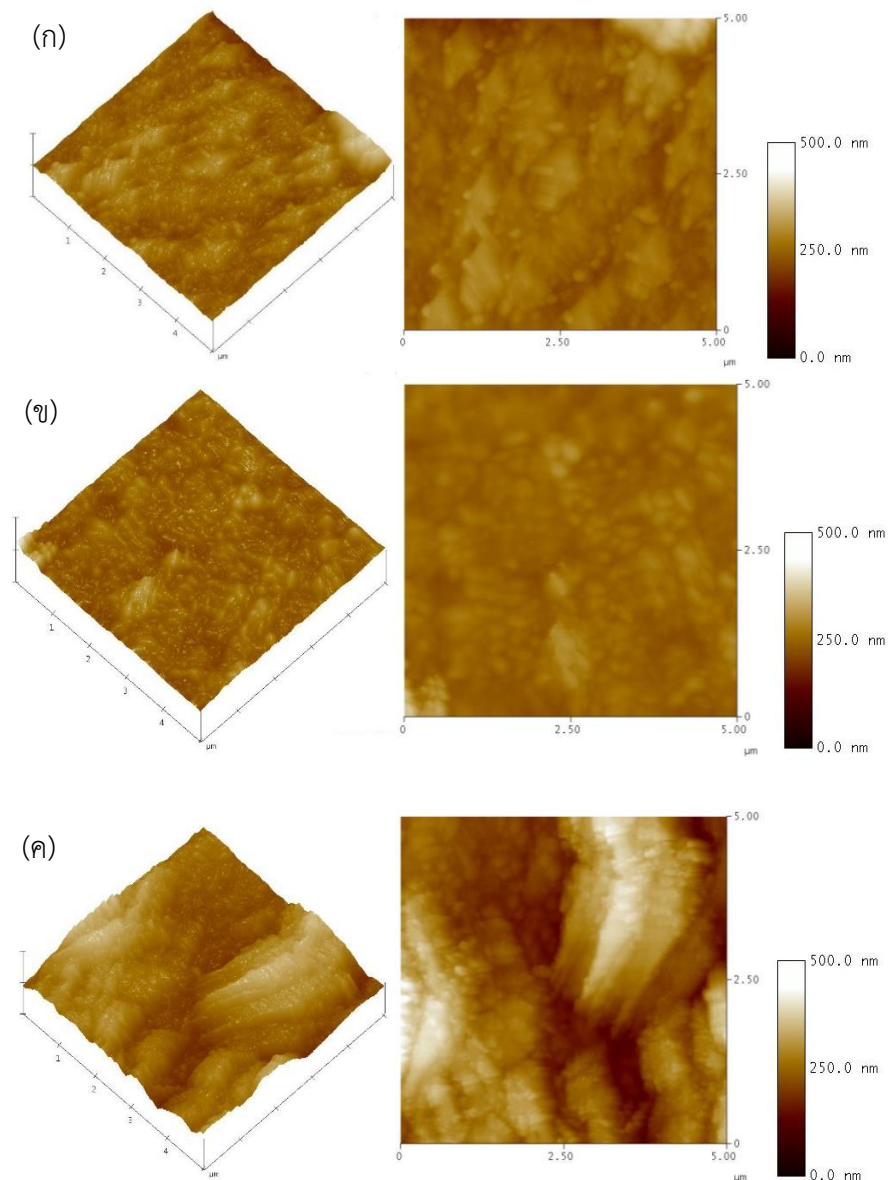


รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจอร์เมเนียมโมลิบดีตและซิลเวอร์คลอไรด์



#### 4.2.4 ผลการวิเคราะห์ความขรุขระของฟิล์มด้วยเทคนิค AFM

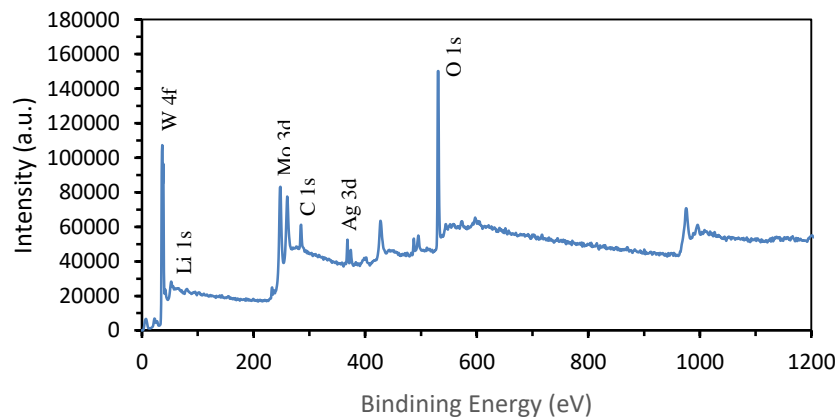
การวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์และทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ด้วยเทคนิค AFM พบว่าฟิล์มมีความหนาประมาณ 250 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.17 และพบว่าเมื่อซิลเวอร์คลอไรด์ไป 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมลจะพบค่าความขรุขระของฟิล์มเป็น 10.47 นาโนเมตร เมื่อเจือซิลเวอร์คลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ค่าความขรุขระเพิ่มขึ้นเป็น 17.46 นาโนเมตร และเมื่อเจือซิลเวอร์คลอไรด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ค่าความขรุขระเพิ่มขึ้นเป็น 19.35 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.17 ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM



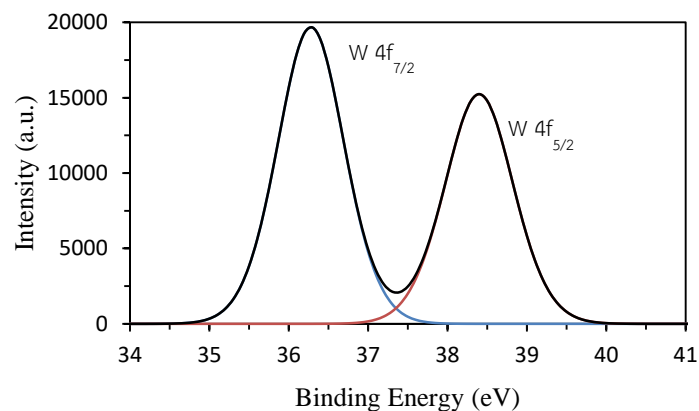
รูปที่ 4.17 ภาพความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ (ก) 5 (ข) 10 (ค) 15 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

#### 4.2.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้างเคมีของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและด้วยเทคนิค XPS

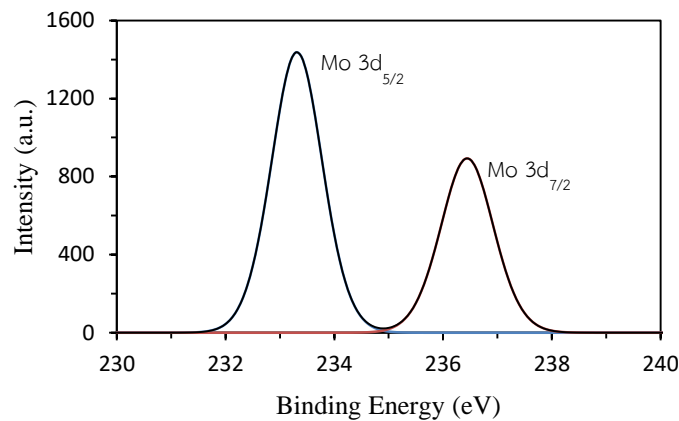
จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต ในช่วงค่าพลังงานยึดเหนี่ยว 0-1200 อิเล็กตรอนโวลต์ ปรากฏสเปกตรัมของธาตุทังสเตน โมลิบดินัม ออกซิเจน ซิลเวอร์ และคาร์บอนในปริมาณ 14.41, 0.57, 52.62, 1.66 และ 29.77 เปอร์เซ็นต์อะตอม ตามลำดับ จากรูปที่ 4.19 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น W 4f พบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของทังสเตนที่ 36.3 และ 38.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่สัมพันธ์กับชั้น W 4f<sub>7/2</sub> และ W 4f<sub>5/2</sub> ตามลำดับ ซึ่งบอกลถึง W<sup>6+</sup> ที่ปรากฏอยู่บนผิวของฟิล์ม จากรูปที่ 4.20 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น Mo 3d พบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของโมลิบดินัมที่ 233.3 และ 236.4 อิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งบอกลถึง Mo<sup>3+</sup> ที่ปรากฏอยู่บนผิวฟิล์ม และรูปที่ 4.21 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น Ag 3d พบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของซิลเวอร์ที่ 268.5 และ 274.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งบอกลถึง Ag<sup>+</sup> ที่ปรากฏอยู่บนผิวฟิล์ม



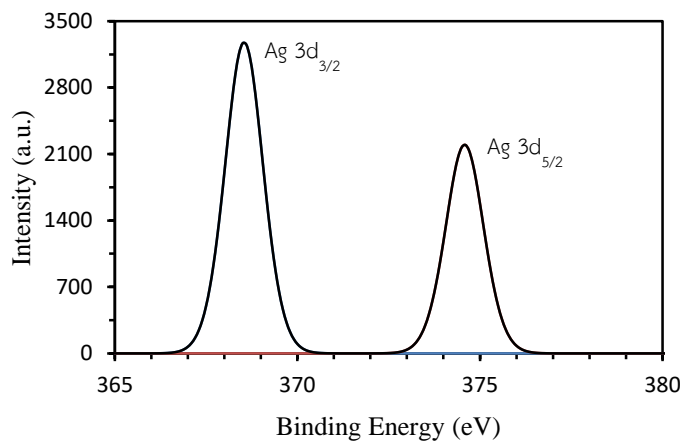
รูปที่ 4.18 สเปกตรัม XPS แบบ survey ของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์



รูปที่ 4.19 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น W 4f



รูปที่ 4.20 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น Mo 3d



รูปที่ 4.21 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น Ag 3d

- อิทธิพลของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต และซิลเวอร์คโลไรด์ จะเห็นได้ว่าซิลเวอร์คโลไรด์มีผลต่อโครงสร้าง  $WO_3$  ของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดต กล่าวคือ ทังสเตนไดรอกไซด์มีโครงสร้างเป็นอนิสทรอป (รูปที่ 4.13) ซึ่งมีผลดีต่อการเพิ่มสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ในเทอมของสัมประสิทธิ์การแพร่ประจุของฟิล์ม (ตารางที่ 4.3) ยกเว้นสูตรที่เจือ  $AgCl$  15 mol% ซึ่งจะได้ฟิล์มที่แตกและจับตัวเป็นก้อน จึงทำให้สมบัติอิเล็กทรอนิกส์ลดลง เทคนิคการวิเคราะห์แบบ EDX ในรูปที่ 4.15-4.16 แสดงให้เห็นการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ในฟิล์มซึ่งปรากฏธาตุหลักคือ W ซึ่งมาจากฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์ Mo ซึ่งมาจากการเจือลิเทียมโมลิบเดต Ag ซึ่งมาจากการเจือซิลเวอร์คโลไรด์ และ Sn ซึ่งมาจากการกระจกซึ่งเป็นวัสดุฐาน นอกจากนั้นก็เป็น C และ O ซึ่งมาจากการเผาสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์ม และบรรยากาศจากการเผา จากรูปที่ 4.16 พบว่าฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดต มีธาตุทังสเตน 57.5 โมลิบดินัม 2.2 ซิลเวอร์ 0.1 และออกซิเจน 40.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการกระจายตัวของธาตุ W และ Mo อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งฟิล์ม (รูปที่ 4.16) ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS พบธาตุ W, Mo, O, Ag

และ C ในปริมาณ 14.41, 0.57, 52.62, 1.66 และ 29.77 ตามลำดับ (รูปที่ 4.18) และมี Li เล็กน้อย จากรูปที่ 4.19 - 4.21 พบระดับชั้น W 4f ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 36.3 และ 38.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่สัมพันธ์กับชั้น W 4f<sub>7/2</sub> และ W 4f<sub>5/2</sub> ซึ่งบอกถึง W<sup>6+</sup> ที่ปรากฏอยู่ที่ผิวของฟิล์ม พบระดับชั้น Mo 3d ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 233.3 และ 236.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่สัมพันธ์กับชั้น Mo 3d<sub>5/2</sub> และ Mo 3d<sub>7/2</sub> ซึ่งบอกถึง Mo<sup>3+</sup> และพบระดับชั้น Ag 3d ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 268.5 และ 274.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่สัมพันธ์กับชั้น Ag 3d<sub>3/2</sub> และ Ag 3d<sub>5/2</sub> ตามลำดับ ซึ่งบอกถึง Ag<sup>+</sup>

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ ด้วยกระบวนการโซล-เจล และวิธีการจุ่มเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า FTO พบว่าฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมโมลิบเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล พบว่าทำให้ได้ฟิล์มที่มีค่าประสิทธิภาพการแพร่  $3.98 \times 10^{-9}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีการเปลี่ยนเป็นสีเข้มและมีการจางสีได้ดี และยังมีค่าความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงระหว่างสถานะการเกิดสีและสถานะการจางสีของฟิล์มอยู่ที่ 55.93 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความขรุขระอยู่ที่ 14.44 นาโนเมตร ความหนาของฟิล์มนั้นอยู่ที่ประมาณ 100 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสูตรที่ดีที่สุดในการเจือลิเทียมโมลิบเดตลงไปในทังสเตนไตรออกไซด์ หลังจากนั้นจึงนำสูตรที่ดีที่สุดมาเจือซิลเวอร์คลอไรด์ พบว่าฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ที่เจือลิเทียมโมลิบเดตเจือซิลเวอร์คลอไรด์ที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีค่าประสิทธิภาพการแพร่ของฟิล์มสูงถึง  $4.55 \times 10^{-9}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ค่าความขรุขระ 10.47 นาโนเมตร ความหนาของฟิล์มประมาณ 250 นาโนเมตร ซึ่งพบว่าเมื่อเจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์ทำให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ที่ไม่ได้เจือลิเทียมโมลิบเดตและซิลเวอร์คลอไรด์

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาว่าผลของความหนาและจำนวนชั้นของฟิล์มมีผลต่อสมบัติอิเล็กทรอนิกส์
2. ควรศึกษาอายุการใช้งานของฟิล์ม
3. ควรศึกษาเทคนิคในการขึ้นรูปของฟิล์มเพื่อให้ได้ความหนาที่สม่ำเสมอ

## บรรณานุกรม

- [1] C. M. Lampert, "Electrochromic materials and devices for energy efficient windows," *Solar Energy Materials*, vol. 11, pp. 1-27, 1984.
- [2] W. Phillips and R. Duncan, "Preparation of photochromic calcium fluoride by additive coloration," *Metallurgical Transactions*, vol. 2, pp. 769-775, 1971.
- [3] ภ. บุญเพียร, "การศึกษาปรากฏการณ์อิเล็กโตรโครมิกของทังสเตนออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง," สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [4] H. Zheng, J. Z. Ou, M. S. Strano, R. B. Kaner, A. Mitchell, and K. Kalantar-zadeh, "Nanostructured tungsten oxide—properties, synthesis, and applications," *Advanced Functional Materials*, vol. 21, pp. 2175-2196, 2011.
- [5] C. G. Granqvist, "Electrochromic tungsten oxide films: review of progress 1993–1998," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 60, pp. 201-262, 2000.
- [6] H. Kamal, A. Akl, and K. Abdel-Hady, "Influence of proton insertion on the conductivity, structural and optical properties of amorphous and crystalline electrochromic WO<sub>3</sub> films," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 349, pp. 192-205, 2004.
- [7] P. A. Cox, *Transition metal oxides: an introduction to their electronic structure and properties* vol. 27: Oxford university press, 2010.
- [8] R. Tilley, "The crystal chemistry of the higher tungsten oxides," *International journal of refractory metals and hard materials*, vol. 13, pp. 93-109, 1995.
- [9] O. Barinova, S. Kirsanova, A. Sadovskiy, and I. Avetissov, "Properties of Li<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> single crystals grown by Czochralski technique," *Journal of Crystal Growth*, vol. 401, pp. 853-856, 2014.
- [10] R. J. Tilley, *Colour and the optical properties of materials: an exploration of the relationship between light, the optical properties of materials and colour*: John Wiley & Sons, 2010.
- [11] A. J. Bard, L. R. Faulkner, J. Leddy, and C. G. Zoski, *Electrochemical methods: fundamentals and applications* vol. 2: wiley New York, 1980.
- [12] J. Zhang, J. Tu, X. Xia, Y. Qiao, and Y. Lu, "An all-solid-state electrochromic device based on NiO/WO<sub>3</sub> complementary structure and solid hybrid polyelectrolyte," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, pp. 1840-1845, 2009.
- [13] Y.-S. Lin, P.-W. Chen, and D.-J. Lin, "Electrochromic performance of NiV x O y thin films deposited onto flexible PET/ITO substrates by reactive plasma

- sputtering for flexible electrochromic devices," *Thin Solid Films*, vol. 518, pp. 7416-7420, 2010.
- [14] W. Li, J. Li, X. Wang, J. Ma, and Q. Chen, "Photoelectrochemical and physical properties of  $\text{WO}_3$  films obtained by the polymeric precursor method," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 13137-13145, 2010.
- [15] Y. S. Krasnov, S. Volkov, and G. Y. Kolbasov, "Optical and kinetic properties of cathodically deposited amorphous tungsten oxide films," *Journal of non-crystalline solids*, vol. 352, pp. 3995-4002, 2006.
- [16] T. Ivanova, K. Gesheva, M. Kalitzova, F. Hamelmann, F. Luekermann, and U. Heinzmann, "Electrochromic mixed films based on  $\text{WO}_3$  and  $\text{MoO}_3$ , obtained by an APCVD method," *Journal of optoelectronics and advanced materials*, vol. 11, pp. 1513-1516, 2009.
- [17] X. Chang, S. Sun, Z. Li, X. Xu, and Y. Qiu, "Assembly of tungsten oxide nanobundles and their electrochromic properties," *Applied Surface Science*, vol. 257, pp. 5726-5730, 2011.
- [18] L. Yang, D. Ge, J. Zhao, Y. Ding, X. Kong, and Y. Li, "Improved electrochromic performance of ordered macroporous tungsten oxide films for IR electrochromic device," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 100, pp. 251-257, 2012.
- [19] J. Guo, Y. Li, S. Zhu, Z. Chen, Q. Liu, D. Zhang, W.-J. Moon, and D.-M. Song, "Synthesis of  $\text{WO}_3$  @ Graphene composite for enhanced photocatalytic oxygen evolution from water," *Rsc Advances*, vol. 2, pp. 1356-1363, 2012.
- [20] M. Choobtashani and O. Akhavan, "Visible light-induced photocatalytic reduction of graphene oxide by tungsten oxide thin films," *Applied Surface Science*, vol. 276, pp. 628-634, 2013.
- [21] H. Sadiki, J. Pierson, C. Rousselot, N. Martin, and G. Terwagne, "Properties and electrochromic performances of reactively sputtered tungsten oxide films with water as reactive gas," *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, pp. 232-235, 2005.
- [22] G. F. Fine, L. M. Cavanagh, A. Afonja, and R. Binions, "Metal oxide semiconductor gas sensors in environmental monitoring," *Sensors*, vol. 10, pp. 5469-5502, 2010.
- [23] Z. Jiao, J. Wang, L. Ke, X. W. Sun, and H. V. Demir, "Morphology-tailored synthesis of tungsten trioxide (hydrate) thin films and their photocatalytic properties," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 3, pp. 229-236, 2011.

- [24] J. Zhang, J.-p. Tu, G.-h. Du, Z.-m. Dong, Y.-s. Wu, L. Chang, D. Xie, G.-f. Cai, and X.-l. Wang, "Ultra-thin  $WO_3$  nanorod embedded polyaniline composite thin film: synthesis and electrochromic characteristics," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 114, pp. 31-37, 2013.
- [25] พ. ถวายทรัพย์, "การสร้างชั้นฟิล์มบางทังสแตนออกไซด์เพื่อประยุกต์ใช้ทางด้านกระจกอัจฉริยะ," สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554.
- [26] ช. จันทร์ทัต, "การเตรียมฟิล์มบางทังสแตนออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล," สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- [27] M. Sharbatdaran, A. Novinrooz, and H. Noorkojouri, "Preparation and characterization of  $WO_3$  electrochromic films obtained by the sol-gel process," *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, vol. 25, pp. 25-29, 2006.
- [28] W. Wang, Y. Pang, and S. N. Hodgson, "Preparation, characterisation and electrochromic property of mesostructured tungsten oxide films via a surfactant templated sol-gel process from tungstic acid," *Journal of sol-gel science and technology*, vol. 54, pp. 19-28, 2010.
- [29] R. R. Kharade, K. Patil, P. Patil, and P. Bhosale, "Novel microwave assisted sol-gel synthesis (MW-SGS) and electrochromic performance of petal like h- $WO_3$  thin films," *Materials Research Bulletin*, vol. 47, pp. 1787-1793, 2012.
- [30] L. Bertus and A. Duta, "Synthesis of  $WO_3$  thin films by surfactant mediated spray pyrolysis," *Ceramics International*, vol. 38, pp. 2873-2882, 2012.
- [31] E. Khoo, P. S. Lee, and J. Ma, "Electrophoretic deposition (EPD) of  $WO_3$  nanorods for electrochromic application," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 30, pp. 1139-1144, 2010.
- [32] D.-H. Kim, "Effects of phase and morphology on the electrochromic performance of tungsten oxide nano-urchins," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 107, pp. 81-86, 2012.
- [33] M. Giannouli and G. Leftheriotis, "The effect of precursor aging on the morphology and electrochromic performance of electrodeposited tungsten oxide films," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, pp. 1932-1939, 2011.
- [34] P. Jittiarporn, L. Sikong, K. Kooptarnond, W. Taweepreda, S. Stoenescu, S. Badilescu, and V.-V. Truong, "Electrochromic properties of  $MoO_3$ - $WO_3$  thin films prepared by a sol-gel method, in the presence of a triblock copolymer template," *Surface and Coatings Technology*, vol. 327, pp. 66-74, 2017.



- [35] I. Porqueras and E. Bertran, "Optical properties of Li<sup>+</sup> doped electrochromic WO<sub>3</sub> thin films," *Thin solid films*, vol. 377, pp. 8-13, 2000.
- [36] W. Luo, X. K. Fu, and L. H. Ma, "The research on the high quality TiO<sub>2</sub>, MoO<sub>3</sub>-doped WO<sub>3</sub> electrochromic film," *Chinese Chemical Letters*, vol. 18, pp. 883-886, 2007.
- [37] T. Ivanova, K. Gesheva, M. Kalitzova, F. Hamelmann, F. Luekermann, and U. Heinzmann, "Electrochromic mixed films based on WO<sub>3</sub> and MoO<sub>3</sub>, obtained by an APCVD method," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 11, 2009.
- [38] M. Dhanasankar, K. Purushothaman, and G. Muralidharan, "Optical, structural and electrochromic studies of molybdenum oxide thin films with nanorod structure," *Solid State Sciences*, vol. 12, pp. 246-251, 2010.

<http://www.nadetech.com/index.php/en/technologies>

<http://ritchem.blogspot.com>

[http://www.promma.ac.th/main/chemistry/web\\_electrochemistry.htm](http://www.promma.ac.th/main/chemistry/web_electrochemistry.htm)

<http://glossary.periodni.com>

[http://www.chem.ox.ac.uk/ic4/moleculeshtml/WO<sub>3</sub>-poly.html](http://www.chem.ox.ac.uk/ic4/moleculeshtml/WO3-poly.html)

[http://2012books.lardbucket.org/books/general-chemistry-principles-patterns-and-applications-v1.0/section\\_16\\_04.html](http://2012books.lardbucket.org/books/general-chemistry-principles-patterns-and-applications-v1.0/section_16_04.html)

<http://ritchem.blogspot.com>

<http://arch-re-review.blogspot.com/2010/09/electrochromic-glazing.html>

<http://www.thaiwindowfilm.com>

<http://www.kmutt.ac.th/hynae>

<http://www.scottmadden.com/?a=strm&aid=352>

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวฐิตินันท์ อินแม่

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610120053

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555
บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2559

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนผู้ช่วยวิจัย สถานวิจัยความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่อการพลังงาน (CENE) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน (ถ้ามี)

T. Inmae, L. Sikong, and K. Kooptarnond, "The Effect of Lithium Molybdate in Tungsten Trioxide Electrochromic Film," in Applied Mechanics and Materials, 2017, pp. 32-36.