



การสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กโทรโครมิกของทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเนต
และท่อนาโนคาร์บอน
Synthesis of Lithium Vanadate/Carbon Nanotube co-doped
Tungsten Trioxide Electrochromic Film

นิติดา อุตมาร์ตัน
Nisida Utamarat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กโทรโครมิกของทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเนต
และท่อนาโนคาร์บอน
Synthesis of Lithium Vanadate/Carbon Nanotube co-doped
Tungsten Trioxide Electrochromic Film

นิติดา อุตมารัตน์
Nisida Utamarat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ของทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต
และท่อนาโนคาร์บอน
ผู้เขียน นางสาวนิตดา อุตมารัตน์
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

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

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

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

.....
(รองศาสตราจารย์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์)

.....กรรมการ
(ดร.มัทนา ชิ่งคะมโน)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ
(รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ
(รองศาสตราจารย์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ
(นางสาวนิศิตา อุตมารัตน์)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นางสาวนิศิตา อุตมารัตน์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ของทังสเตนออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน
ผู้เขียน	นางสาวนิตดา อุตมารัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ของทังสเตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีโซล-เจล และเคลือบฟิล์มลงบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนด้วยวิธีจุ่ม จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการสังเคราะห์ฟิล์มทังสเตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณสารเจือตั้งนี้ คือ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วทำการศึกษาสมบัติไฟฟ้าเคมีของฟิล์มโดยโวลแทมมิทรีแบบรอบ และนำไปวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์ม ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี พบว่าฟิล์มทังสเตนไดรออกไซด์ที่มีการเจือลิเทียมวาเนเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ดีที่สุดคือ 2.6×10^{-9} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และมีค่าผลต่างการส่องผ่านของแสงสูงสุดคือ 54 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับฟิล์มทังสเตนไดรออกไซด์มีค่า 41.7 เปอร์เซ็นต์ และส่วนขั้นตอนที่สอง ได้นำฟิล์มทังสเตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเจือท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.05, 0.10 และ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการเจือท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ดีที่สุดคือ 6.48×10^{-9} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงถึงสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีที่สุด และมีค่าผลต่างการส่องผ่านของแสงสูงสุดคือ 54.7 เปอร์เซ็นต์

Thesis	Synthesis of Lithium Vanadate/Carbon Nanotube co-doped Tungsten Trioxide Electrochromic Film
Author	Miss Nisida Utamarat
Major	Materials Engineering
Academic Year	2017

Abstract

This research aims to synthesize lithium vanadate / carbon nanotube co-doped tungsten trioxide electrochromic film by sol - gel method. Films were deposited onto a clean fluorine doped tin oxide substrate by dip coating method and then were annealed at 300 °C for 2 h. The studies were divided into two parts. For the first part, the synthesized tungsten trioxide films with 5, 10 and 15 by weight (wt.%) lithium vanadate. The electrochromic and transmittance properties of the films were determined from the cyclic voltammetry and UV-Vis spectrophotometer. It was found that the tungsten trioxide with 10 wt.% lithium vanadate film exhibited the highest diffusion coefficient about $2.6 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ and the highest of transmittance modulation about 54 % compared with pure tungsten trioxide films (41.7%). The second part, the tungsten trioxide films with 10 wt.% lithium vanadate doping with carbon nanotube at 0.05, 0.10 and 0.15 wt.%. The result showed that the 0.10 wt.% of carbon nanotube doping provided the highest diffusion coefficient and transmittance properties of $6.48 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ and 54.7 % respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในทุกด้าน และเป็นกำลังใจให้สามารถทำงานวิจัยนี้ ที่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อบุคคลทั่วไปที่สนใจ ได้ไม่มากนัก

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง และรองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์ ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย แสงฉาย ที่เกียรติมาเป็นประธานกรรมการในการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์และให้คำปรึกษาและคำแนะนำสำหรับการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ดร.มัทนา ชั่งคะมโณ ที่เกียรติมาเป็นกรรมการในการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์และให้คำปรึกษาและคำแนะนำสำหรับการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่ให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาเกี่ยวกับการปฏิบัติการและงานด้านเอกสารต่างๆ

ขอขอบคุณสถานวิจัยความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ขอขอบคุณสถานวิจัยความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่อพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบและเงินทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาโท และเอก พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่เป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำและช่วยเหลือที่ดีในทุกโอกาส

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่อยู่เบื้องหลังคอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดเสมอมา

นิศิตา อุตมาร์ตัน

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 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ปรากฏการณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	3
2.1.1 โครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	3
2.1.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กทรอนิกส์	4
2.1.3 สารละลายอิเล็กทรอนิกส์.....	5
2.2 ทังสเตนไดรอกไซด์.....	5
2.2.1 กลไกการเกิดสีของทังสเตนไดรอกไซด์	6
2.3 ลิเทียมวาเนเดต.....	7
2.4 ท่อนาโนคาร์บอน.....	7
2.5 กระบวนการโซล-เจล.....	8
2.6 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	9
2.7 การดูดกลืนทางแสง	10
2.8 ไฟฟ้าเคมี	11
2.8.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี	11
2.8.2 ชั่วไฟฟ้า	12
2.8.3 โวลแทมมิทรีแบบรอบ	13

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
2.9.1 การสังเคราะห์ทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์และลิเทียมวาเนเดต	14
2.9.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของฟิล์มอิเล็กโทรโครมิก	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	17
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	17
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์	17
3.3 ขั้นตอนการวิจัย	18
3.3.1 การสังเคราะห์โซลทั้งสแตนต์และฟิล์มทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์	18
3.3.2 การสังเคราะห์โซลลิเทียมวาเนเดตและฟิล์มทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต	18
3.3.3 การปรับผิวท่อนาโนคาร์บอน	18
3.3.4 การเตรียมผิวของกระจกนำไฟฟ้า	19
3.3.5 การเตรียมฟิล์มทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ	19
3.4 การตรวจสอบคุณลักษณะและสมบัติของฟิล์ม	23
3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์	23
3.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับพื้นผิวของฟิล์ม	23
3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด... ..	23
3.4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุด้วยเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน	24
3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	24
3.4.6 การวิเคราะห์สมบัติการส่งผ่านทางแสงของฟิล์ม	24
3.4.7 การวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้าเคมีของฟิล์มโดยโวลแทมเมทรีแบบรอบ	25
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล	26
4.1 ผลการสังเคราะห์ฟิล์มทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต	26
4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์	26
4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับพื้นผิวของฟิล์ม	26
4.1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิว	29
4.1.4 สมบัติไฟฟ้าเคมีของฟิล์มโดยโวลแทมเมทรีแบบรอบ	36
4.1.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์ม	40
4.2 ผลการสังเคราะห์ฟิล์มทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน..	43

4.2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์	43
4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับพื้นผิวของฟิล์ม	43
4.2.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิว	45
4.2.4 สมบัติไฟฟ้าเคมีของฟิล์มโดยโวลแทมเมทรีแบบรอบ	48
4.2.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์ม	51
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	54
5.1 บทสรุป	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม.....	55

รายการตาราง

ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์และฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต.....	39
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์และฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต.....	42
ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนานาโนคาร์บอน.....	50
ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนานาโนคาร์บอน.....	53

รายการรูป

รูปที่ 2.1 ลักษณะของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โครมิก	3
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกทังสเตนไตรออกไซด์.....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน	8
รูปที่ 2.4 การเคลือบฟิล์มโดยวิธีการจุ่มเคลือบ.....	9
รูปที่ 2.5 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	12
รูปที่ 2.6 โวลแทมมิทรีแบบรอบ.....	13
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์โซลและฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์	20
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์โซลและฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดต.....	21
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการปรับผิวท่อนาโนคาร์บอน.....	22
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดตและท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ	22
รูปที่ 4.1 การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของ (a) ฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ และ (b-d) ฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดต	27
รูปที่ 4.2 สเปกตรัม XPS การสำรวจแบบช่วงกว้างของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดต.....	27
รูปที่ 4.3 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น W 4f.....	28
รูปที่ 4.4 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น O 1s.....	28
รูปที่ 4.5 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น V 2p.....	29
รูปที่ 4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	30
รูปที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดตที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	30
รูปที่ 4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	31
รูปที่ 4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดตที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	31
รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX และการกระจายตัวของธาตุของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์	32
รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX และการกระจายตัวของธาตุของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดตที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	33

รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX และการกระจายตัวของธาตุของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	33
รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX และการกระจายตัวของธาตุของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	34
รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์.....	35
รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	35
รูปที่ 4.16 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	35
รูปที่ 4.17 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	36
รูปที่ 4.18 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์.....	37
รูปที่ 4.19 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	37
รูปที่ 4.20 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	38
รูปที่ 4.21 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	38
รูปที่ 4.22 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์และฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต.....	39
รูปที่ 4.23 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์.....	40
รูปที่ 4.24 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	41
รูปที่ 4.25 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	41
รูปที่ 4.26 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	42
รูปที่ 4.27 การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของ (d) ฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อานาโนคาร์บอนที่ปริมาณ (a) 0.05 (b) 0.10 และ (c) 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	43
รูปที่ 4.28 สเปกตรัม XPS แบบสำรวจช่วงกว้างของฟิล์มทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อานาโนคาร์บอน.....	44

รูปที่ 4.29 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น C 1s	44
รูปที่ 4.30 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	45
รูปที่ 4.31 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	45
รูปที่ 4.32 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือ ลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน	46
รูปที่ 4.33 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโน คาร์บอนที่ปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	47
รูปที่ 4.34 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโน คาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	47
รูปที่ 4.35 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโน คาร์บอนที่ปริมาณ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	47
รูปที่ 4.36 โวลแทมเมทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโน คาร์บอนที่ปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	48
รูปที่ 4.37 โวลแทมเมทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโน คาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	49
รูปที่ 4.38 โวลแทมเมทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโน คาร์บอนที่ปริมาณ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	49
รูปที่ 4.39 โวลแทมเมทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโน คาร์บอน.....	50
รูปที่ 4.40 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักและท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	51
รูปที่ 4.41 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักและท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	52
รูปที่ 4.42 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักและท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	52

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

Ag/AgCl	ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์
cm ²	ตารางเซนติเมตร
cm ² s ⁻¹	ตารางเซนติเมตรต่อวินาที
CNT	ท่อนาโนคาร์บอน
eV	อิเล็กตรอนโวลต์
LiV ₂ O ₅	ลิเทียมวานาเดต
mA	มิลลิแอมแปร์
nm	1 ใน 1,000 ล้านส่วนของเมตร (นาโนเมตร)
wt.%	ความเข้มข้นเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก
PTA	กรดเพอรอกโซทังสติก
FTO	กระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

กระจกอัจฉริยะ เป็นอุปกรณ์ที่เกิดจากการศึกษาหลักการเปลี่ยนแปลงทางแสง หรือการเกิดสีของวัสดุในกลุ่มธาตุทรานซิชันที่มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า และมีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสง หรือการเกิดสีของธาตุนั้น ซึ่งกลไกการเกิดสีของกระจกอัจฉริยะ เกิดจากการกระตุ้นจากพลังงานภายนอกเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุ และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันจึงทำให้เกิดสี แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ เทอร์โมโครมิก (Thermochromic) เป็นการ ใช้พลังงานความร้อนเป็นตัวกระตุ้นวัสดุ โฟโตโครมิก (Photochromic) เป็นการ ใช้พลังงานแสงเป็นตัวกระตุ้นวัสดุ และอิเล็กโทรโครมิก (Electrochromic) เป็นการ ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้นวัสดุ ปัจจุบันอิเล็กโทรโครมิกเป็นที่สนใจอย่างมากเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการหุ้มชั้นอิเล็กโทรโครมิก หาได้ง่ายและใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ วัสดุอิเล็กโทรโครมิก ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของโลหะมีสมบัติทางแสงที่ทำให้แสงผ่านช่วงแสงที่มองเห็นได้ เช่น ไทเทเนียม ทังสเตน วาเนเดียม โมลิบดีนัม นิกเกิล เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ ใช้ทังสเตนไดรอกไซด์ (WO_3) เป็นชั้นอิเล็กโทรโครมิก เนื่องจากมีสมบัติเป็นอิเล็กโทรโครมิก และได้รับความสนใจมาก เพราะเป็นสารกึ่งตัวนำที่สำคัญ สามารถเปลี่ยนจากสีใสเป็นสีน้ำเงิน เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของทังสเตนจาก 6+ เป็น 5+ เมื่อได้รับความต่างศักย์ [1] จึงนิยมนำไปใช้เป็นชั้นเปลี่ยนสีของอุปกรณ์อิเล็กโทรโครมิก เช่น กระจกในอาคาร และใช้ทำกระจกมองหลังของรถยนต์ เป็นต้น นอกจากนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวนำ ที่มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ดีด้วย วิธีการเตรียมฟิล์มสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การระเหย (Evaporation) การสปัตเตอริง (Sputtering) และโซล-เจล (Sol-gel) โดยแต่ละวิธีจะให้ผลที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ในการเตรียมฟิล์ม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาด้วยวิธีโซล-เจล เนื่องจากเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มที่ง่าย โดยไม่ใช้ระบบสุญญากาศ สามารถทำให้สารบริสุทธิ์ได้ง่าย ฟิล์มที่เตรียมได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ใช้อุณหภูมิในการเตรียมต่ำ ต้นทุนต่ำ และสามารถเจือสารอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพได้ [2]

ปัจจุบันมีการเติมธาตุ และสารประกอบทางเคมีลงไป เพื่อปรับปรุงสมบัติทางอิเล็กโทรโครมิก เช่น ลิเทียมวาเนเดต โมลิบดีนัมไดรอกไซด์ ท่อนาโนคาร์บอน และกราฟีน เป็นต้น และในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาลิเทียมวาเนเดต และท่อนาโนคาร์บอน เนื่องจากลิเทียมวาเนเดต มีความสามารถเก็บพลังงานได้มาก และมีระยะเวลาในการใช้งานที่ยาวนานขึ้น [3] และท่อนาโนคาร์บอน มีสมบัติที่เฉพาะ เช่น มีพื้นผิวจำเพาะสูง มีความเสถียรทางอุณหภูมิและทางเคมีที่ดี และมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหรือไอออนได้ดี จึงมีสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีด้วย [4]

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น ในงานวิจัยนี้ได้เน้นศึกษาการเตรียมฟิล์มทั้งสแตนไดร ออกไซด์เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่าย และปรับปรุงประสิทธิภาพของฟิล์ม เพื่อให้สมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์โครมิกให้มีประสิทธิภาพในใช้งานที่ยาวนาน และนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ด้วยการเติมสารลิเทียมวาเนเดต และท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธีโซล-เจล เพื่อสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โครมิกต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์โครมิกของทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธีโซล-เจล
2. เพื่อศึกษาผลของสารเจือต่อสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์โครมิกในการเกิดสีและจางสีของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์ และเตรียมฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์โครมิกของทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน
2. เข้าใจ กลไกการเกิดสีในฟิล์มบาง และสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์ม
3. ได้กระจกที่มีสมบัติอิเล็กทรอนิกส์โครมิก ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์โครมิกของทั้งสแตนไดรออกไซด์ เจือด้วยลิเทียมวาเนเดต และท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธีโซล-เจล เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ด้วยวิธีจุ่ม
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์โครมิกกับตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณของสารเจือ เวลาในสภาวะเกิดสีและจางสี และสัมประสิทธิ์การแพร่ของฟิล์ม
3. ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอิเล็กทรอนิกส์โครมิก ในสภาวะเกิดสีและสภาวะจางสี
4. วิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติของฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์โครมิกที่เตรียม ได้แก่ โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าเคมี

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนสีของโพลีเมอร์ [5]

ปฏิกิริยาการเปลี่ยนสีของโพลีเมอร์ เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนสีของวัสดุที่มีสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ โพลีเมอร์ เกิดการเปลี่ยนแปลงทางแสงหรือการเปลี่ยนสีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นออกไซด์ของโลหะเกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดการดูดซับหรือการสะท้อนกลับออกมา ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนสี โดยทั่วไปวัสดุอิเล็กทรอนิกส์โพลีเมอร์ สามารถเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ดังนี้

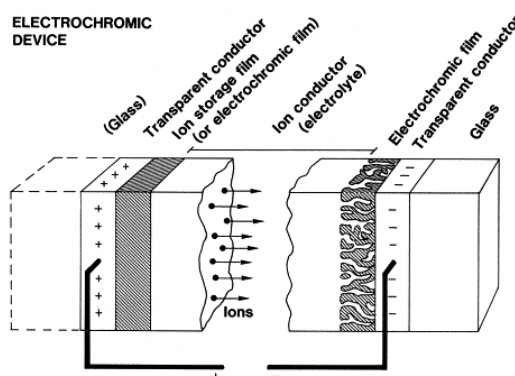
1. สารอนินทรีย์ นิยมใช้ออกไซด์ของโลหะในหมู่ธาตุทรานซิชัน เช่น ทังสเตน (W) วาเนเดียม (V) นิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) ไทเทเนียม (Ti) และอิริเดียม (Ir) เป็นต้น ซึ่งมีสมบัติทางแสงที่ยอมให้แสงสามารถส่องผ่านได้ในช่วงที่ตามองเห็น จึงทำให้มีความโปร่งใส และเมื่อมีการแทรกสอดของอะตอมอื่น จะทำให้วัสดุนั้นเกิดการเปลี่ยนสีได้

2. สารอินทรีย์ ไม่ค่อยนิยมนำมาทำเป็นวัสดุอิเล็กทรอนิกส์โพลีเมอร์ เนื่องจากมีวิธีเตรียมที่ยุ่งยาก เช่น ไวโอโลเจน (Viologens) แลนทาไนด์ ฟาธาโลไซยานิน (Lanthanide phthalocyanine) และไพราโซลีน (Pyrazoline) เป็นต้น

เนื่องจากวัสดุอิเล็กทรอนิกส์โพลีเมอร์ มีสมบัติทางสี สามารถปรับเปลี่ยนได้ง่ายและใช้ต้นทุนต่ำ ขณะเดียวกันสารอนินทรีย์สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิการทำงานที่กว้างและมีเสถียรภาพทางเคมี [6] จึงเป็นที่นิยมในการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โพลีเมอร์ไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น อาคารประหยัดพลังงาน อุตสาหกรรมยานยนต์ และการควบคุมความร้อนจากดาวเทียม เป็นต้น [7]

2.1.1 โครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โพลีเมอร์

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โพลีเมอร์มีส่วนประกอบเป็นชั้นต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 ลักษณะของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โพลีเมอร์ [8]

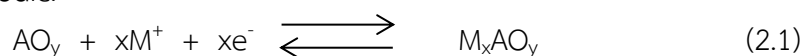
1. ชั้นวัสดุรองรับ (Substrate Layer)
เป็นชั้นที่ใช้สำหรับรองรับระบบฟิล์มของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ส่วนใหญ่เป็นวัสดุโปร่งใส เช่น กระจก พลาสติก หรือวัสดุต่างๆ ที่มีความโปร่งใสูง
2. ชั้นตัวนำโปร่งใส (Transparent Conductor Layer)
เป็นชั้นที่ใช้สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้า เพื่อเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าและอิเล็กตรอนเข้าสู่ชั้นอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีการส่องผ่านแสงสูง เช่น ทินออกไซด์ (SnO_2) และอินเดียมทินออกไซด์ (ITO หรืออินเดียมออกไซด์ In_2O_3 โดยเติมสารเจือทินออกไซด์ SnO_2)
3. ชั้นอิเล็กทรอนิกส์ (Electrochromic Layer)
เป็นชั้นที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุที่นำมาใช้เป็นชั้นอิเล็กทรอนิกส์นั้น ต้องมีความสามารถในการเปลี่ยนสีได้เมื่อได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าและการจ่ายอิเล็กตรอน เป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ เช่น ไวโอโลเจน (Viologens) และไพราโซลีน (Pyrazoline) เป็นต้น และสารอนินทรีย์ เช่น โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) ทังสเตนไตรออกไซด์ (WO_3) และวานาเดียมออกไซด์ (V_2O_5) เป็นต้น และที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด คือ ทังสเตนไตรออกไซด์
4. ชั้นอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytes Layer)
เป็นชั้นที่กำเนิดไอออน และเป็นตัวผ่านของไอออนเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และลิเทียมเปอร์คลอเรต (LiClO_4) ในตัวทำละลาย ในระบบที่เป็นของแข็งเรียกชั้นอิเล็กโทรไลต์ว่าชั้นไอออนคอนดักเตอร์ หรือ อิเล็กโทรไลต์แบบของแข็ง
5. ชั้นเก็บประจุ (Ion Storage layer)
เป็นชั้นที่ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ และจ่ายไอออนให้กับชั้นอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชั้นอิเล็กโทรไลต์ไม่ได้ผลิตไอออนให้กับชั้นอิเล็กทรอนิกส์ ในกรณีที่ชั้นอิเล็กโทรไลต์ผลิตไอออนให้กับชั้นอิเล็กทรอนิกส์ จะเรียกว่าแคโทดอิเล็กโทรด ในทางไฟฟ้าเคมี ขั้วไฟฟ้าที่เป็นแคโทดอิเล็กโทรดมีหน้าที่บังคับการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือเป็นตัวตรวจสอบการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งในบางครั้งชั้นนี้อาจเป็นชั้นอิเล็กทรอนิกส์ด้วย แต่เป็นการเกิดปฏิกิริยาตรงกันข้ามกับชั้นอิเล็กทรอนิกส์หลัก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2.1.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กทรอนิกส์ [5]

เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า ให้มีการแทรกตัวของไอออนบวก (M^+) และอิเล็กตรอน (e^-) ภายในโครงสร้างของชั้นอิเล็กทรอนิกส์ หรือเรียกว่าเป็นปรากฏการณ์ที่ต้องอาศัยการเกิดดับเบิลอินเจกชัน (Double injection) โดยมีไอออนบวก เป็นโลหะอัลคาไลด์ หรือธาตุหมู่ที่ 1 เช่น H^+ , Li^+ , Na^+ หรือ K^+ เป็นต้น วิ่งเข้าหาขั้วแคโทด และอิเล็กตรอนวิ่งเข้าหาขั้วแอโนด

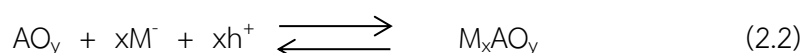
การเกิดสภาวะศักย์กระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี จะเกิดได้ในปฏิกิริยาแบบแคโทดิก (Cathodic) และแอโนดิก (Anodic) แบบการรับประจุบวก และแบบการรับประจุลบ ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

Cathodic:



เมื่อ $M^+ = H^+, Li^+, Na^+$ และ $A =$ โลหะทรานซิชัน

Anodic:



เมื่อ $M^- = H^-, OH^-$ และ $A =$ โลหะทรานซิชัน

2.1.3 สารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ หมายถึง สารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เมื่อสารละลายอยู่ภายใต้ศักย์ไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดการแตกตัว โดยการแตกตัวจะได้ไอออนบวกที่มีประจุไฟฟ้าหรือไอออนลบที่มีประจุลบจะวิ่งเข้าหาขั้วแคโทด เรียกว่าแคตไอออน (Cation) ส่วนไอออนที่มีประจุลบจะวิ่งเข้าหาขั้วแอโนด เรียกว่าแอนไอออน (Anion) สามารถแบ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ 4 ชนิด คือ

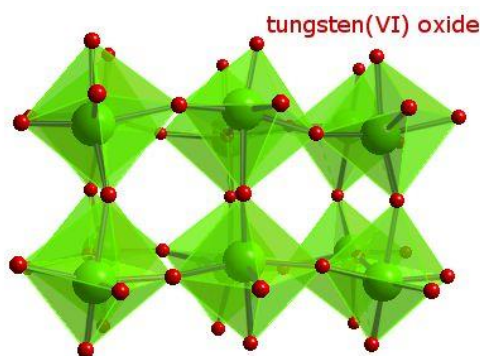
1. สารละลายกรด เช่น ไฮโดรคลอริก ซัลฟิวริก และฟอสฟอริก
2. สารละลายเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และลิเทียมไฮดรอกไซด์
3. สารละลายเกลือ เช่น โซเดียมคลอไรด์
4. สารละลายอินทรีย์ เช่น เมทานอล ยูเรีย และกลูโคส

2.2 ทังสเตนไดรอกไซด์

ทังสเตนไดรอกไซด์ เป็นออกไซด์ของโลหะธาตุทรานซิชัน ที่มีสมบัติอิเล็กโทรโครมิก เป็นสารประกอบแบบพันธะโควาเลนต์ที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ระหว่างทังสเตนกับออกซิเจน มีเลขออกซิเดชัน $6+$ และ $2-$ ตามลำดับ มีโครงสร้างพันธะเป็นแบบ ReO_3 และมีการจับพันธะเดียวกับออกซิเจนในโครงสร้างผลึก (O-W-O) ทำให้มีรูปแบบเป็นรูปทรงแปดด้าน (Octahedral) แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยมีข้อมูลพื้นฐานดังนี้

สูตรโครงสร้าง	: WO_3
ลักษณะโครงสร้าง	: เฮกซะโกนอล (Hexagonal) โมโนคลินิก (Monoclinic) และ ออร์โธรมบิก (Orthorhombic)
น้ำหนักโมเลกุล	: 231.84 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	: 7.16 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	: $1,473^\circ C$
จุดเดือด	: $1,837^\circ C$
สี	: สีเขียวอมเหลือง

สถานะ : ของแข็ง
การละลายน้ำ : ไม่ละลายน้ำ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกทังสเตนไตรออกไซด์

(ที่มา: https://www.webelements.com/compounds/tungsten/tungsten_trioxide.html)

ในการประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสีกลับไปมาได้มากกว่าโครงสร้างผลึกแบบอื่น เนื่องจากมีช่องว่างในโครงสร้างที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้มาก จึงมีความสามารถในการเปลี่ยนสีได้มาก แต่ข้อเสียคือไม่ค่อยเสถียรที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งต่างจากโครงสร้างแบบโมนอกlinikคือมีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง [9] และมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy band gap) เท่ากับ 3.25 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนที่เข้าไปในฟิล์ม จะถูกเก็บไว้ในขั้วไฟฟ้าบริเวณชั้นแถบการนำ จะดูดกลืนพลังงานค่าหนึ่ง และคายพลังงานออกมาอยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 400-500 นาโนเมตร ซึ่งให้โทนสีน้ำเงิน

2.2.1 กลไกการเกิดสีของทังสเตนไตรออกไซด์ [8, 10, 11]

ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นวัสดุที่มีสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ สามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ซึ่งเป็นกระบวนการการเกิดปฏิกิริยาเคมี มีการแทรกตัวของไอออนบวกที่เป็นโลหะอัลคาไลด์ เช่น H^+ , Na^+ , Li^+ หรือ K^+ เป็นต้น วังเข้าหาขั้วแคโทด และอิเล็กตรอนวังเข้าหาขั้วแอโนด ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ ดังสมการที่ 2.3



ภาวะจางสี

ภาวะเกิดสี

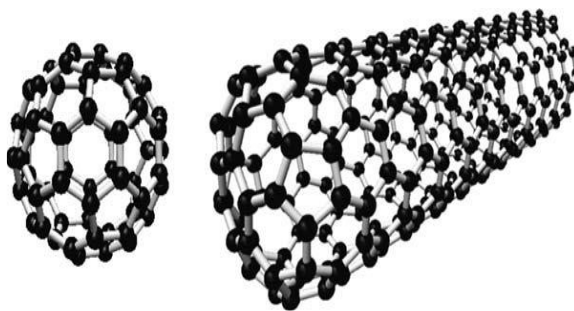
ปฏิกิริยารีดักชัน เป็นปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า ทั้งสแตนไดรออกไซด์ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด เนื่องจากให้อิเล็กตรอนและมีการแทรกตัวของไอออนบวกเข้าสู่โครงสร้าง ทำให้ทั้งสแตนมีเลขออกซิเดชันลดลงจาก W^{6+} เป็น W^{5+} เกิดเป็นทั้งสแตนบรอนซ์ (Tungsten bronze) ฟิล์มจึงเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน และถ้ากลับทิศทางของแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้ประจุเกิดการเคลื่อนตัวออกจากชั้นอิเล็กโทรโครมิก หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้สีวัสดุกลับมาจางสีเหมือนเดิม เลขออกซิเดชัน W^{5+} กลับมาเป็น W^{6+} เหมือนเดิม ในการเปลี่ยนสีของฟิล์มขึ้นกับลักษณะโครงสร้างของฟิล์ม ปริมาณไอออน และอิเล็กตรอนที่แทรกเข้าไปในชั้นอิเล็กโทรโครมิก และสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนในชั้นอิเล็กโทรโครมิก ซึ่งสัมประสิทธิ์การแพร่ของวัสดุที่มีความหนาแน่นของผลึกสูงจะแพร่ได้น้อยกว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นของผลึกต่ำ เนื่องจากวัสดุที่มีความหนาแน่นของผลึกต่ำจะส่งผลให้การแทรกตัว และการถอนตัวของไอออนได้ง่ายและเร็วกว่า ดังนั้นวัสดุที่มีสมบัติทางอิเล็กโทรโครมิกที่ดี ต้องทำให้มีโครงสร้างที่มีความหนาแน่นของผลึกต่ำ ซึ่งทำให้ความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีมีค่าสูง

2.3 ลิเทียมวาเนเดต

ลิเทียมวาเนเดต เป็นวัสดุแคโทดิกที่นิยมนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากที่สุด เช่น แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำ ความหนาแน่นของพลังงานสูง อัตราการคายประจุตัวเองต่ำ และอายุการใช้งานที่ยาวนาน [12] การสังเคราะห์ลิเทียมวาเนเดตนิยมใช้วิธีการระเหยด้วยความร้อนด้วยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) และวาเนเดียมเพนตะออกไซด์ (V_2O_5) ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง [13]

2.4 ท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอน เป็นวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง แสดงดังรูปที่ 2.3 ที่เกิดจากการม้วนของแผ่นกราฟีน มีท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) และมีความยาวถึงประมาณ 10 ไมโครเมตร ที่เกิดจากธาตุคาร์บอน เช่นเดียวกับเพชร กราฟีน แกรไฟต์ ถ่าน และฟูลเลอร์รีน [14] แต่มีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน คือ เพชรมีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่น 4 ตัว เกิดเป็นโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติ จากการเชื่อมต่อของพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอน ทำให้เพชรมีความแข็งแรงแรงมาก ส่วนแกรไฟต์มีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่น 3 ตัว พันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายกับรังผึ้งหรือตาข่ายเรียงกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกัน เรียกว่าแผ่นกราฟีน และมีพันธะเชื่อมต่อกันระหว่างระนาบเป็นชั้น ๆ ส่วนถ่านจากการเผาไหม้จะมีโครงสร้างคล้ายแกรไฟต์ แต่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือเรียกว่า คาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) และฟูลเลอร์รีน ซึ่งมีโครงสร้างของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลมคล้ายลูกฟุตบอล ซึ่งต่างจากท่อนาโนคาร์บอนที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง ที่เกิดจากการม้วนของแผ่นกราฟีน



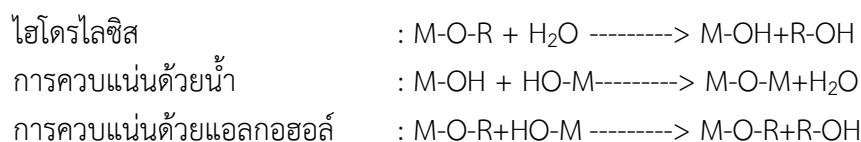
รูปที่ 2.3 โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน [15]

ท่อนาโนคาร์บอน แบ่งเป็นสองชนิดหลัก ๆ ตามจำนวนชั้นของผนังท่อ คือ ผนังท่ออาจมีเพียงแค่ชั้นเดียว (Single-walled) หรือหลายชั้น (Multi-walled) ประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุคาร์บอนเพียงธาตุเดียว เป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่า มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 0-2 อิเล็กตรอนโวลต์ มีความสามารถในการเป็นตัวนำ หรือกึ่งตัวนำไฟฟ้า และนำความร้อนที่ดีอีกด้วย ปัจจุบันพบว่ามีสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ทำเส้นใยเสริมความแข็งแรงในวัสดุคอมโพสิต ทำอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มกำลังไฟและอายุการใช้งานในแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุ เป็นต้น

2.5 กระบวนการโซล-เจล

กระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์วัสดุ ด้วยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า โซล ซึ่งอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน เป็นของแข็งที่เรียกว่า เจล โดยการนำสารละลายต่าง ๆ มาทำปฏิกิริยา สารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะของโซล เมื่อโซลเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดเป็นเจล ในกระบวนการผลิตทั้งจากสถานะที่เป็น โซล และเจล เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เส้นใย แอโรเจล ซีโรเจล และอนุภาคผง เป็นต้น

ปฏิกิริยากระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การควบแน่นด้วยน้ำ และการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสถานะที่ต่างกันจึงทำให้เกิดเป็นโซลและเจลที่มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน

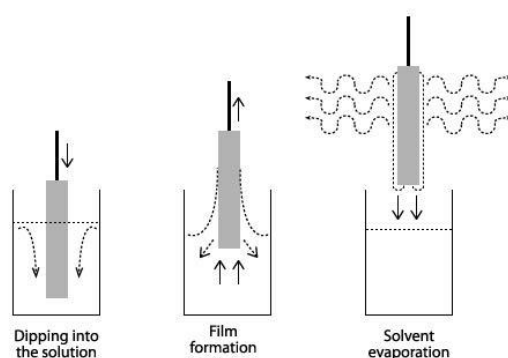


เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce และ OR แทนหมู่อัลคอกซี (Alkoxy group)

2.6 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง [16, 17]

การเคลือบฟิล์มบาง เป็นการทำให้สารเคลือบอยู่ในรูปของอะตอม โมเลกุล หรืออนุภาค แล้วเคลื่อนย้ายให้ไปตกบนวัสดุรองรับ แล้วก่อตัวเป็นนิวเคลียส เต็มโตเป็นชั้นฟิล์มบนวัสดุรองรับ แสดงดังรูปที่ 2.4 สารตั้งต้นที่เตรียมได้จากกระบวนการโซล-เจล สามารถนำมาเคลือบเป็นฟิล์มบางบนแผ่นรองรับได้ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ ซึ่งมีข้อดีคือ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ยุ่งยากและสามารถเคลือบฟิล์มลงบนแผ่นรองรับที่มีขนาดใหญ่ได้ เช่น กระจกอาคารบ้านเรือน ขั้นตอนการเคลือบฟิล์ม มีวิธีการดังนี้

1. ขั้นตอนการจุ่ม และดึงขึ้นงานขึ้น
2. ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาควบแน่น
3. ขั้นตอนการอบฟิล์มให้แห้ง และปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน



รูปที่ 2.4 การเคลือบฟิล์มโดยวิธีการจุ่มเคลือบ

(ที่มา: [http:// www.kmutt.ac.th/hyinae](http://www.kmutt.ac.th/hyinae))

ความหนาของชั้นฟิล์มสามารถคำนวณจากอัตราเร็วในการดึงแผ่นรองรับขึ้นจากสารละลาย โดยความหนาจะแปรผันตรงกับอัตราเร็วในการดึง ดังสมการที่ 2.4

$$d \approx kv^{2/3} \quad (2.4)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม
 v คือ อัตราเร็วในการดึง
 k คือ ค่าคงที่

ค่า k จะรวมสมบัติที่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม ได้แก่ ความหนืด แรงตึงผิว และความดันไอของสารละลาย

2.7 การดูดกลืนทางแสง [18, 19]

แสงเป็นช่วงหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสงที่เราเห็นในธรรมชาติ เรียกว่าแสงที่ตามองเห็น (Visible light) เป็นแสงสีขาวที่เกิดจากการรวมกันของแสงสีต่างๆ มีสีหลักอยู่ 7 สี มีความยาวคลื่นระหว่าง 400-700 นาโนเมตร เมื่อแสงสีขาวตกกระทบกับวัตถุแล้วทำให้มองเห็นวัตถุเป็นสีใด แสดงว่าวัตถุถูกดูดกลืนแสงสีอื่นหมด แต่สะท้อนแสงสีตามี่มองเห็นออกมา แต่ถ้าวัตถุนั้น ๆ ถูกดูดกลืนแสงทุกสีไว้ได้หมดจะมองเห็นวัตถุเป็นสีดำ ส่วนแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light) มีความยาวคลื่นระหว่าง 210-380 นาโนเมตร เป็นแสงที่มีสมบัติให้อิเล็กตรอนของอะตอมเกิดการส่งผ่าน และแสงอินฟราเรด (Infrared light) เป็นแสงที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า สามารถทำให้โมเลกุลของวัตถุต่าง ๆ เกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง จนเกิดความร้อนขึ้นมาก เนื่องจากวัตถุส่วนใหญ่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นในช่วง 3,000-100,000 นาโนเมตรได้ดี จึงนิยมใช้รังสีอินฟราเรดในการทำให้วัตถุต่าง ๆ แห้ง เพราะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ความร้อนแบบธรรมดา

ความเข้มแสงที่ตกกระทบวัตถุต้องเท่ากับความเข้มแสงที่เกิดจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นตามกฎของการอนุรักษ์พลังงาน ดังสมการที่ 2.5

$$I_o = I_r + I_s + I_a + I_t \quad (2.5)$$

เมื่อ	I_o	คือ ความเข้มแสงที่ส่องมาตกกระทบ
	I_r	คือ ความเข้มแสงที่ส่องสะท้อนออก
	I_s	คือ ความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืน
	I_a	คือ ความเข้มแสงที่กระเจิงออก
	I_t	คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านออก

เมื่อพิจารณาด้านการดูดกลืนสเปกตรัมของวัตถุที่มีความเป็นเนื้อเดียว โดยคำนึงถึงค่าการสะท้อนและค่าการกระเจิงของวัตถุ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของวัตถุเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) ดังสมการที่ 2.6

$$I = I_o \exp(-\epsilon c d) \quad (2.6)$$

เมื่อ	I	คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านออกมา
	I_o	คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ
	ϵ	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนหรือสัมประสิทธิ์การดับสูญ (ลูกบาศก์เดซิเมตร/โมลต่อเมตร)
	c	คือ ความเข้มข้น (โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร)
	d	คือ ความหนาของวัตถุ (เมตร)

สำหรับผลคูณของ $\epsilon c d$ ไม่มีหน่วย มีค่าเท่ากับ A เรียกว่า ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) หรือค่าความหนาแน่นทางแสง (Optical density, OD) และอัตราส่วนของ I/I_0 คือ ค่าการส่องผ่าน (Transmittance, $T = I/I_0$) โดยสามารถเปลี่ยนสมการที่ 2.6 เป็นสมการความหนาแน่นทางแสง ดังสมการที่ 2.7 คือ

$$\text{Log } T = -A \quad (2.7)$$

สำหรับค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิก จะแสดงด้วยค่า OD ดังแสดง ในสมการที่ 2.8

$$\text{OD} = \log (I_0/I) \quad (2.8)$$

เมื่อ I และ I_0 คือ ความเข้มแสงที่ส่องผ่านและความเข้มแสงที่ตกกระทบ

ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนสี (Coloration efficiency, CE) เป็นลักษณะที่สำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิก คือเป็นการเปลี่ยนความหนาแน่นทางแสง (OD) ต่อหน่วยของประจุที่แทรกตัวเข้าไป (Q) ดังสมการที่ 2.9

$$\text{CE} = \Delta (\text{OD}) / \Delta Q \quad (2.9)$$

2.8 ไฟฟ้าเคมี [20-22]

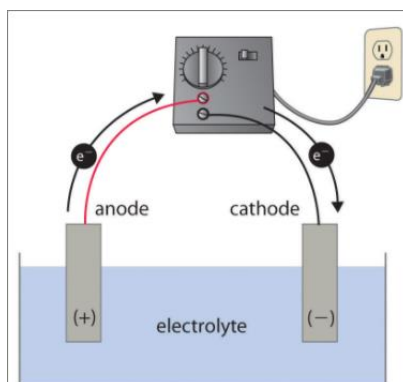
ไฟฟ้าเคมีเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี สามารถบอกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทางเคมี และวิเคราะห์ในรูปของปริมาณทางไฟฟ้า เช่น กระแส ศักย์ไฟฟ้า และปริมาณประจุ หรือความเข้มข้นสาร การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์การวัด และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution)
2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นส่วนประกอบทางเคมีที่นำไฟฟ้าได้
3. อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า เป็นกระแสหรือศักย์ไฟฟ้า

2.8.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมี 1 เซลล์ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือขั้วแคโทด และขั้วแอโนด จุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การวิเคราะห์ไฟฟ้าเคมีจะวัดจากขั้วไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นครึ่งเซลล์ (Half-cell) ของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยแต่ละครึ่งเซลล์จะเกิดปฏิกิริยาการรับหรือให้อิเล็กตรอน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ขั้วแคโทดเป็นครึ่งเซลล์ที่รับอิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน และขั้วแอโนดเป็นครึ่งเซลล์ที่ให้อิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

(ที่มา: https://chem.libretexts.org/Core/Analytical_Chemistry/

Electrochemistry/ Basics_of_Electrochemistry/Electrochemical_Cells)

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งตามลักษณะหน้าที่เซลล์ได้ 2 ชนิด ดังนี้

1. เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยภายในเซลล์เกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ทำให้การไหลของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำอย่างต่อเนื่องจึงเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร เพื่อหาค่าคงที่ของการเกิดสมดุลปฏิกิริยาที่เซลล์ เช่น โพอแทนซีอเมตรี

2. เซลล์อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic cell) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่อาศัยพลังงานจากภายนอกในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งการเกิดปฏิกิริยานี้เป็นไปอย่างไม่ต่อเนื่องขึ้นอยู่กับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ ใช้หาปริมาณสารตามที่ต้องการ เช่น โวลแทมมิตรี

2.8.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrodes)

ขั้วไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์ที่ใช้วัดสัญญาณไฟฟ้า ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode, RE) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามการไหลของกระแสในวงจร ไม่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และไม่ขึ้นกับส่วนประกอบของสารตัวอย่าง โดยต่ออยู่กับขั้วแอโนด ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เพื่อช่วยให้เซลล์เคมีครบวงจร ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ในปัจจุบัน แบ่งเป็น 2 ประเภท

1) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงปฐมภูมิ เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานที่มีค่าเป็นศูนย์ที่ทุกอุณหภูมิ ขั้วไฟฟ้าประเภทนี้มีเพียงชนิดเดียวเท่านั้น คือขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน (Standard hydrogen electrode, SHE)

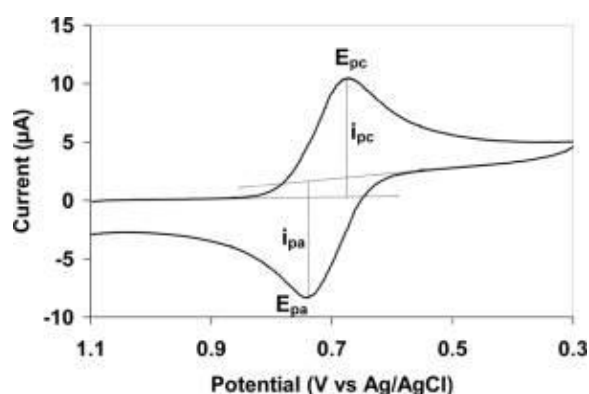
2) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทุดิยภูมิ เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ นิยมใช้กัน 3 ขั้ว ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล (Saturated calomel electrode, SCE) ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ และขั้วไฟฟ้าเมอร์คิวรี-เมอร์คิวรีซัลเฟต

2. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode, WE) เป็นขั้วแคโทดของเซลล์ การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

3. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) หรือ ขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode, CE) ทำหน้าที่ช่วยในการส่งอิเล็กตรอน หรือกระแสไฟฟ้า ไปยังขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยไม่ต้องผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

2.8.3 โวลแทมเมทรีแบบรอบ (Cyclic Voltammetry)

โวลแทมเมทรีแบบรอบ หรือเรียกว่าเทคนิคซีวี (CV) นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงกายภาพของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ข้อดีคือได้ข้อมูลที่รวดเร็วในการตรวจคุณภาพของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดกระบวนการรีดอกซ์ ใช้ศึกษากลไกและอัตราเร็วของการเกิดกระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการบันทึกความสัมพันธ์โวลแทมเมทรีแบบรอบที่วัดได้จากกระแสไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าทำงาน ในระหว่างการสแกนศักย์ไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.6 และนำมาพล็อตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า เมื่อพิจารณาพิกัดด้านบนจากจุดยอดของพีค ลากเส้นมาตัดแกนศักย์ไฟฟ้า จะได้ตำแหน่งศักย์ของพิกัดด้านบน คือพิกัดแอโนดิก (Anodic peak potential, E_{pa}) มีค่าเป็นบวก ในทำนองเดียวกันพิกัดด้านล่าง เป็นศักย์ไฟฟ้าของแคโทดิก (Cathodic peak potential, E_{pc}) ความสูงของพิกัดด้านบน เป็นกระแสไฟฟ้าของพิกัดแอโนดิก (Anodic peak current, i_{pa}) และความสูงของพิกัดด้านล่าง เป็นกระแสของพิกัดแคโทดิก (Cathodic peak current, i_{pc}) โดยขนาดของกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถหาสัมพันธ์ดังกล่าวได้จากสมการของแรนเดิลส์ เซฟลิก (Randles–Sevcik equation) แสดงในสมการที่ 2.10



รูปที่ 2.6 โวลแทมเมทรีแบบรอบ

(ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_voltammetry)

$$i_p = (2.69 \times 10^5) n^{3/2} A D^{1/2} C v^{1/2} \quad (2.10)$$

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

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์และลิเทียมวาเนเดต

จากการศึกษาที่ผ่านมา มีวิธีการสังเคราะห์ทังสเตนออกไซด์หลายวิธี เช่น วิธีสปัตเตอริง สเปรย์ไพโรลิซิส การระเหยด้วยความร้อน และการเคลือบด้วยสารละลายโดยวิธีโซล-เจล โดยแต่ละวิธีจะให้ผลของฟิล์มที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ในการเตรียมฟิล์ม โดย X.-J. Song และคณะ [23] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทังสเตนไตรออกไซด์ ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้สารตั้งต้นโซเดียมทังสเตท และโพแทสเซียมซัลเฟต นำไปอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยเอทานอล และน้ำกลั่น หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่ามีรูปร่างเป็นแบบเส้นลวดนาโน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 นาโนเมตร และมีความยาวระดับไมโครเมตร และพบว่ามีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล นอกจากนี้ยังมีการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยโซเดียมทังสเตท [24] โดยการนำไปละลายในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แล้วนำไปเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าอินเดียมทินออกไซด์ ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบด้วยอัตราการจุ่มที่ 10-50 เซนติเมตรต่อนาที จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 150 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์มีลักษณะเฟสเป็นออสัญฐาน และเป็นผลึก ตามลำดับโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มที่เป็นออสัญฐานจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและไม่แตกหัก และปริมาณของน้ำในฟิล์มอาจจะช่วยปรับปรุงให้ประสิทธิภาพของฟิล์มให้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับฟิล์มแอนดิก [24, 25] และการสังเคราะห์ฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยวิธีการระเหย [26] และมีลักษณะเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ D. L. Sun และคณะ [27] ที่แสดงให้เห็นว่าน้ำมีส่วนเข้าไปช่วยให้เกิดการเปลี่ยนสีของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ให้ดีขึ้น และเวลาในการเปลี่ยนสีก็เร็วขึ้นด้วย นอกจากนี้ B. Munro และคณะ [28] ได้สังเคราะห์ฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์โดยใช้ผงทังสเตนมาเป็นสารตั้งต้น และนำไปละลายในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อให้ได้เป็นกรดเพอรอกโซทังสติก ด้วยวิธีโซล-เจล หลังจากนั้นนำไปเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าอินเดียมทินออกไซด์

ซึ่งพบว่าฟิล์มมีลักษณะเป็นอสัณฐาน มีความเสถียรภาพทางเคมีสูงและมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสีสูง

ในการสังเคราะห์ลิเทียมวาเนเดต เพื่อประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ มีด้วยกันหลายวิธี โดย V. R. Channu และคณะ [29] ได้สังเคราะห์และวิเคราะห์สมบัติของลิเทียมวาเนเดตเพื่อใช้ในการประยุกต์ใช้งานทางไฟฟ้าเคมี ด้วยการควบคุมค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายลิเทียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้วาเนเดียมเพนตะออกไซด์เป็นสารตั้งต้น ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มอล ผลปรากฏว่าได้โครงสร้างเป็นผลึกเฟสโมโนคลินิก จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2 มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเข็ม (Nanoneedles) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 200 - 500 นาโนเมตร ความหนา 60 นาโนเมตร และที่ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6 มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแท่ง (Nanorods) มีความกว้างประมาณ 200 นาโนเมตรและความยาวหลายไมโครเมตร และจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2 และ 6 มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบสายเข็มขัด (nanobelts) มีความยาว 6 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 100 ถึง 500 นาโนเมตร ส่วนการสังเคราะห์ฟิล์มด้วยวิธีโซล-เจล M. Al-Assiri และคณะ [30] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มวาเนเดียมเพนตะออกไซด์ เจือด้วยลิเทียมที่ปริมาณต่าง ๆ โดยใช้วาเนเดียมเพนตะออกไซด์ และลิเทียมคาร์บอนเนตเป็นสารตั้งต้น สังเคราะห์โดยการนำวาเนเดียมเพนตะออกไซด์ปริมาณ 1.82 กรัม ไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และทำให้เย็นตัวเร็วในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นกวนด้วยสารละลายพร้อมกับให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียส ปรับค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2 และเติมลิเทียมคาร์บอนเนตปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ทำให้เกิดปฏิกิริยาการควบแน่นขึ้นได้เป็นเจล แล้วจึงนำเจลไปเคลือบบนฟิล์ม โดยวิธีจุ่มเคลือบ และนำไปอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มมีแถบช่องว่างพลังงานตั้งแต่ 1.75 - 2.0 อิเล็กตรอนโวลต์ และจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของลิเทียมที่ใส่เข้าไป นอกจากการใช้วาเนเดียมเพนตะออกไซด์เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ลิเทียมวาเนเดตแล้ว D. Wang และคณะ [31] ได้ศึกษาการใช้แอมโมเนียมเมตาวาเนเดต (NH_4VO_3) และลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) เป็นสารตั้งต้นด้วยวิธีโซล-เจล โดยการนำมาละลายในน้ำกลั่น และกวนอย่างต่อเนื่อง แล้วจึงเติมกรดออกซาลิกลงในสารละลาย จากนั้นนำสารละลายไปเผาที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายเป็นสีน้ำเงินเข้ม นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนได้เป็นเจล แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และเผาที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ได้เป็นลิเทียมวาเนเดต (LiV_3O_8) และจากการสังเคราะห์ที่ 350 องศาเซลเซียส พบว่ามีสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีที่สุด และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เช่นเดียวกับกับ Y. Wang และคณะ [3] ที่ได้สังเคราะห์ลิเทียมวาเนเดต ($\text{Li}_{1.5}\text{V}_3\text{O}_8$) ด้วยวิธีโซล-เจล โดยใช้ลิเทียมอะซิเตทไดไฮเดรต ($\text{CH}_3\text{COOLi}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) แอมโมเนียมเมตาวาเนเดต และกรดซิตริกเป็นสารตั้งต้น ด้วยการนำมาละลายในน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร กวนอย่างต่อเนื่อง สังเกตการเปลี่ยนสีอย่างช้า ๆ จนเป็นสีน้ำเงิน จากนั้นนำสารละลายอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนได้เจลสีน้ำเงินเข้ม แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 12 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ได้เป็นลิเทียมวาเนเดตเมื่อนำไปทดสอบพบว่ามีความสามารถในการเก็บประจุสูง และมีอายุการใช้งานยาวนาน

2.9.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์โครมิก

ในการทำให้ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์โครมิกมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น สามารถทำได้ด้วยการนำท่อนาโนคาร์บอนมาเจือลงบนฟิล์ม ซึ่ง C.-K. Lin และคณะ [32] ได้นำท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่าง ๆ กัน แล้วทำการเติมกรดไนตริก และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง มาเคลือบลงฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ ด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงที่ 3000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 วินาที หลังจากนั้นนำไปอบที่ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที และนำไปเผาที่ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งได้ผลึกแบบออสทราิน มีความเป็นรูพรุน โดยฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ที่เจือด้วย 0.1 เปอร์เซ็นต์ท่อนาโนคาร์บอนโดยน้ำหนัก จะใช้เวลาในการเปลี่ยนเป็นสีที่เร็วที่สุดคือ 8 วินาที และเวลาในการกลับให้เป็นฟิล์มจางสี หรือโปร่งใสเพียง 1 วินาที มีความสามารถในการส่องผ่าน 69 เปอร์เซ็นต์ และหลังจาก 200 รอบ ความสามารถในการส่องผ่านลดลงเป็น 55.6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โครมิก K. Yanagi และคณะ [33] ได้ศึกษาให้เห็นถึงการทำงานที่แตกต่างกันของขนาดของผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนที่ขนาด 0.84, 1.0 และ 1.4 นาโนเมตร จะเปลี่ยนสีเป็นสีเหลือง สีเหลืองส้ม และสีเขียวแกมน้ำเงิน ตามลำดับ และได้พบว่าฟิล์มมีการเปลี่ยนสีที่ดี และมีประสิทธิภาพ ซึ่งด้วยท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติเฉพาะ เช่น 1) มีความเสถียรภาพในการเปลี่ยนสีด้วยสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ 2) การเกิดสีเนื่องจากโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน และ 3) ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติในการนำไฟฟ้าสูง จึงนิยมนำมาใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โครมิก เช่นเดียวกับ M. S. M. Zambri และคณะ [34] ได้สังเคราะห์ฟิล์ม โดยการนำท่อนาโนคาร์บอน และพอลิอะนิลีนมาละลายในกรดซัลฟิวริก พบว่าฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนที่ขนาด 1.3 นาโนเมตร มีความเป็นผลึกที่ดี และการศักย์ไฟฟ้าเพิ่มจาก 1.1 ถึง 1.7 โวลต์ จะทำให้ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 11 เป็น 19 ไมโครเมตร และมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนเจือด้วยพอลิอะนิลีน 5-7 เปอร์เซ็นต์ ที่ใช้ศักย์ไฟฟ้า ที่ 1.3 โวลต์ เป็นเวลา 5 นาที

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ แบ่งการศึกษาเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สังเคราะห์ทังสเทนไดรออกไซด์ โดยวิธีโซล-เจล สังเคราะห์ลิเทียมวาเนเดต ปรับสภาพผิวท่อนาโนคาร์บอน

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมผิวกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น อะซิโตน และเอทานอล ตามลำดับ และเตรียมฟิล์มด้วยวิธีจุ่มเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาอิทธิพลของสารเจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน ที่มีผลต่อสมบัติทางโครงสร้างวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับพื้นผิวของฟิล์ม สมบัติทางพื้นผิว สมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์ม และสมบัติไฟฟ้าเคมีของฟิล์มโดยโวลแทมมิทรีแบบรอบ

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

- ผงทังสเทน (Tungsten powder) ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Merck
- เอทานอล ความเข้มข้น 99.9 เปอร์เซ็นต์ บริษัท RCI Labscan
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Merck
- แอมโมเนียมเมตาวาเนเดต (NH_4VO_3) บริษัท Ajax Finechem
- ลิเทียมไนเตรต ($LiNO_3$) บริษัท HiMedia Laboratories
- กรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ บริษัท J.T. Baker
- ท่อนาโนคาร์บอน (SWCNTs)
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 38 เปอร์เซ็นต์ บริษัท J.T. Baker
- อะซิโตน บริษัท J.T. Baker
- 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 การสังเคราะห์โซลทั้งสเดนและฟิล์มทั้งสเดนไตรออกไซด์ [2]

การสังเคราะห์ทั้งสเดนไตรออกไซด์ ใช้สารตั้งต้นผงทั้งสเดน ปริมาณ 6.5 กรัม ละลายในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น ปริมาตร 4 มิลลิลิตร กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนได้กรดเพอรอกโซทั้งสติก (Peroxtungstic Acid, PTA) เป็นสีขาวขุ่นเหมือนสีน้ำนม จากนั้นเติมเอทานอลลงไป ในอัตราส่วน 1:1 นำกรดเพอรอกโซทั้งสติก ไปเก็บที่อุณหภูมิ 0-10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนเป็นโซลทั้งสเดน แล้วนำไปเคลือบด้วยวิธีการจุ่มเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ที่ไว้ในบรรยากาศ จากนั้นนำไปอบให้แห้งเพื่อไล่ความชื้น แล้วนำฟิล์มไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ฟิล์มทั้งสเดนไตรออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 3.1

3.3.2 การสังเคราะห์โซลลิเทียมวานาเดตและฟิล์มทั้งสเดนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดต [35]

การสังเคราะห์ลิเทียมวานาเดต แสดงดังรูปที่ 3.2 ใช้สารตั้งต้นแอมโมเนียมเมตาวานาเดต ปริมาณ 1.17 กรัม ละลายในลิเทียมไนเตรท ปริมาณ 0.34 กรัม และน้ำกลั่น ปริมาตร 50 มิลลิลิตร กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก เป็นเวลา 30 นาที จนเป็นสารละลายสีเหลืองขุ่น แล้วให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กลายเป็นสารละลายสีเหลืองใส จากนั้นเติมกรดไนตริก ปริมาณ 1.42 มิลลิลิตร จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีส้ม นำไปเก็บที่อุณหภูมิ 0-10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนเป็นโซลลิเทียมวานาเดต จากนั้นนำไปเจือในโซลทั้งสเดน กวนอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปเคลือบด้วยวิธีการจุ่มเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ที่ไว้ในบรรยากาศ จากนั้นนำไปอบให้แห้งเพื่อไล่ความชื้น แล้วนำฟิล์มไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ฟิล์มทั้งสเดนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดต

3.3.3 การปรับผิวท่อนาโนคาร์บอน [36]

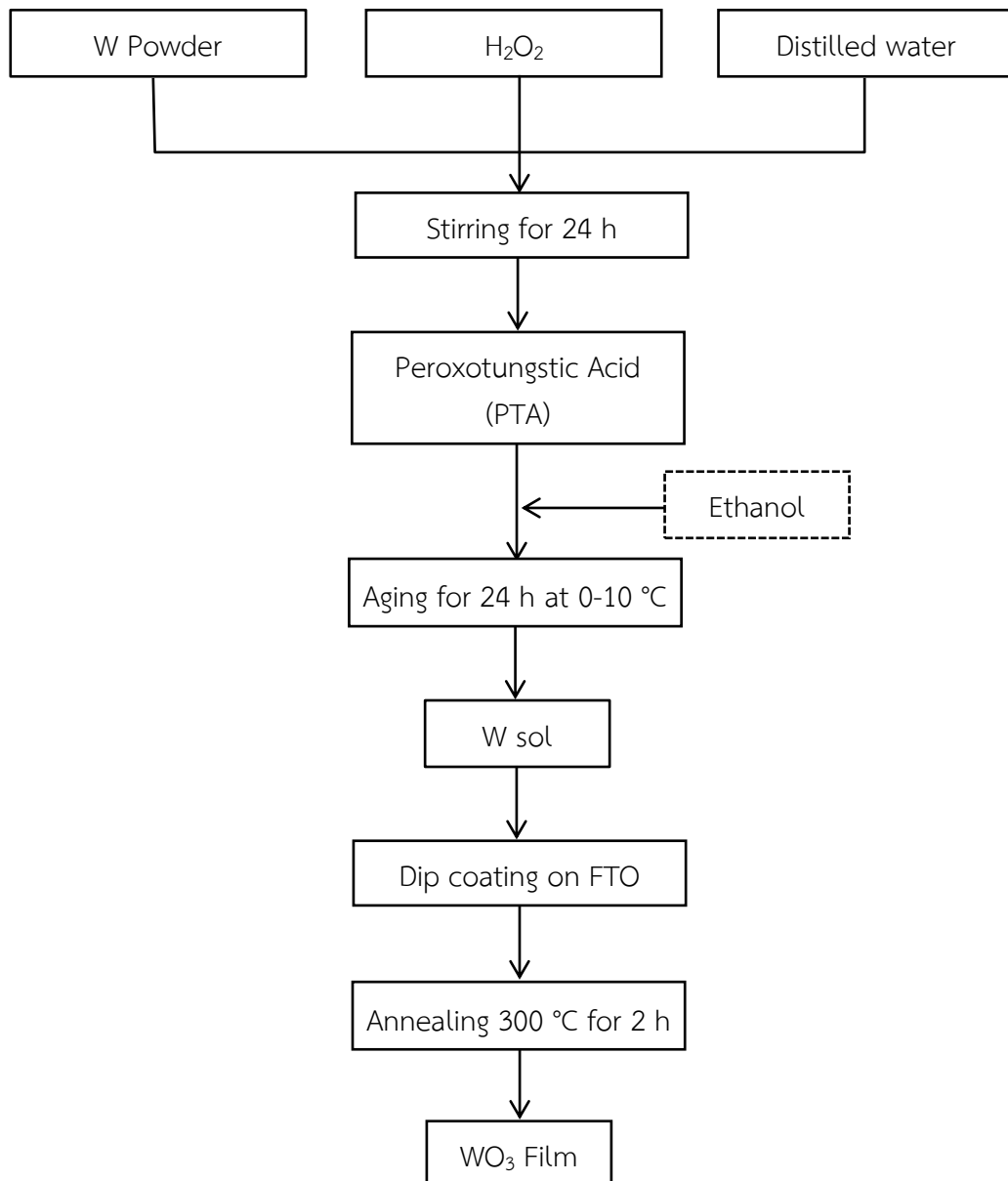
การปรับผิวท่อนาโนคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยการนำท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยว ปริมาณ 50 มิลลิกรัม ผสมกับกรดไฮโดรคลอริก ปริมาตร 20 มิลลิลิตรที่ความเข้มข้น 1 นอร์มอล และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก แล้วให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยแต่ละชั่วโมง จะเติมกรดไฮโดรคลอริก ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง และล้างด้วยน้ำกลั่น ปริมาตร 500 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบให้แห้งที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนถัดไป

3.3.4 การเตรียมผิวของกระจกนำไฟฟ้า

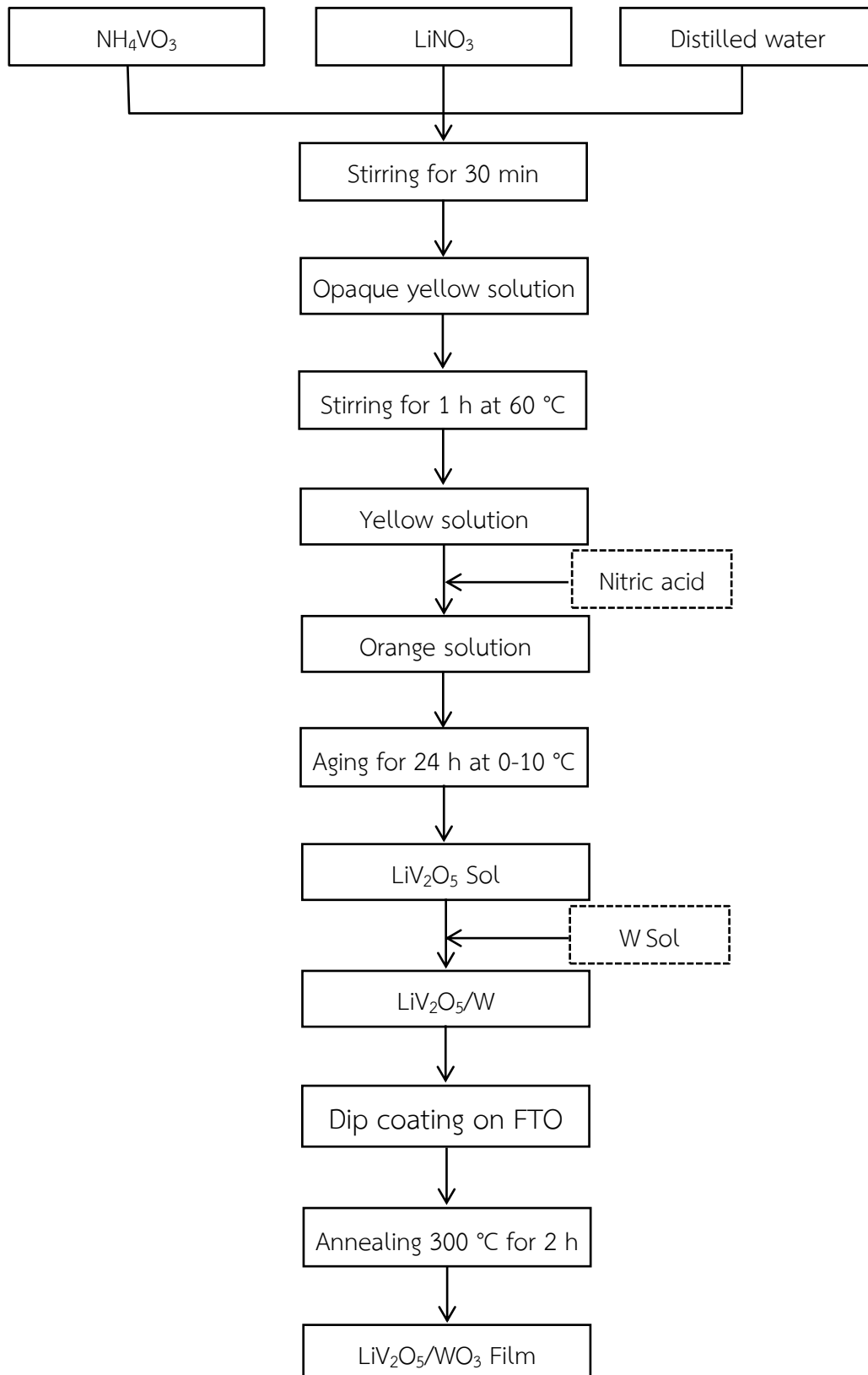
การเตรียมผิวกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว 7 โอห์มต่อตารางหน่วย ($\Omega/\text{sq.}$) ขนาด 1×1 และ 2×2 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น อะซิโตน และเอทานอล ตามลำดับ จากนั้นนำกระจกไฟฟ้าไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.5 การเตรียมฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ

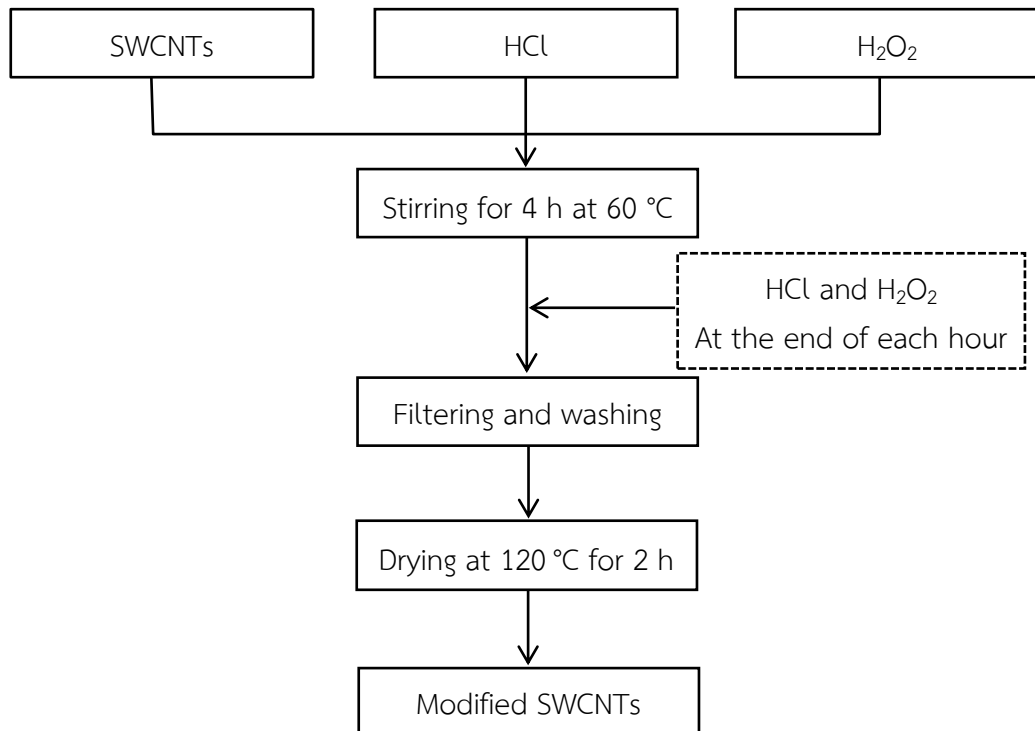
การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ (Dip coating) โดยนำโซลทั้งสแตนท์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในขั้นตอนที่ 3.3.1 มาเจือด้วยโซลลิเทียมวาเนเดต ที่ได้จากการสังเคราะห์ในขั้นตอนที่ 3.3.2 ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กวนอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำไปเจือด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังเดี่ยวที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3.3 ปริมาณ 0.05, 0.1 และ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กวนอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน มาจุ่มเคลือบในโซลแต่ละความเข้มข้น แล้วทิ้งไว้ในบรรยากาศ จากนั้นนำไปอบให้แห้งเพื่อไล่ความชื้น แล้วนำฟิล์มไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ฟิล์มบางทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 3.4



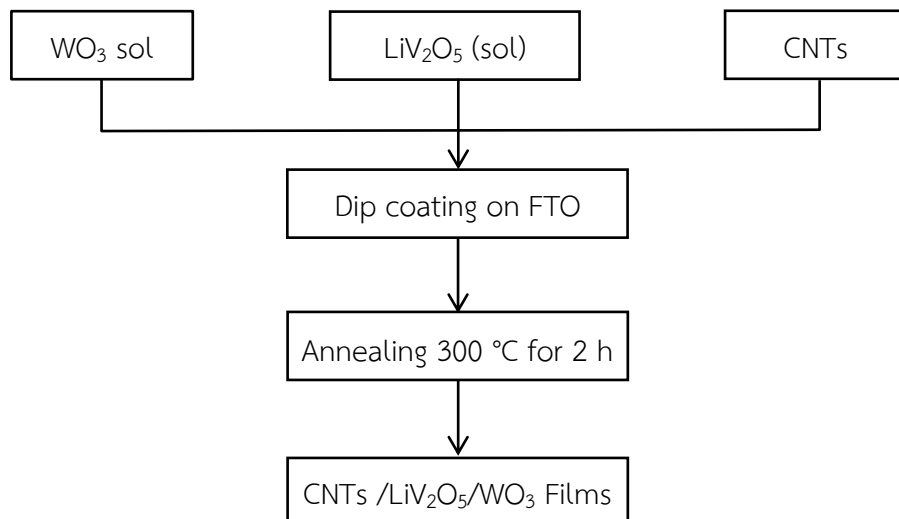
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์โซลและฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์โซลและฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดต



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการปรับผิวท่อนาโนคาร์บอน



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดตและท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ

3.4 การตรวจสอบคุณลักษณะและสมบัติของฟิล์ม

3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

เป็นเทคนิคการวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสาร ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร และวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ รุ่น X'Pert MPD ยี่ห้อฟิลิปส์ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ $\text{CuK}\alpha$ ความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 1.5405 อังสตรอม การคำนวณขนาดของผลึก (Crystallite size) หาค่าได้จากสมการของ Scherrer แสดงในสมการที่ 3.1

$$d = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3.1)$$

เมื่อ	d	คือ ขนาดของอนุภาค (นาโนเมตร)
	k	คือ ค่าคงที่ มีค่า 0.9
	λ	คือ ค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (ทองแดงมีค่า 0.154 นาโนเมตร)
	β	คือ ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุดของกราฟระฆังหรือ full width half maximum (FWHM)
	θ	คือ มุมของแบรกก (Bragg's angle)

3.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับพื้นผิวของฟิล์ม (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

เป็นเทคนิควิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ สามารถให้ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีที่ระดับผิวของวัสดุ เช่น ชนิดและจำนวนธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี ชนิดพันธะทางเคมี และสถานะออกซิเดชันของอะตอม เป็นต้น งานวิจัยนี้ใช้ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ รุ่น AXIS ULTRA^{DL} ยี่ห้อ Kratos analytical ประเทศอังกฤษ

3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ให้เห็นลักษณะพื้นผิว ขนาด และรูปร่างของวัสดุ และแสดงให้เห็นลักษณะและการกระจายของเฟสในโครงสร้าง สามารถแสดงภาพที่ความละเอียดสูงในระดับนา

โนเมตรได้ และภาพที่ได้จะมองเห็นความชัดลึกและมิติของวัสดุ งานวิจัยนี้ใช้ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร ด้วยเครื่อง SEM รุ่น FEI Quanta 400 มีขดลวดทั้งสแตน เป็นแหล่งกำเนิดลำแสงอิเล็กตรอน กระแส 25 กิโลโวลต์

3.4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุด้วยเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDX)

เป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ เพื่อหาธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้คู่กับเครื่องวิเคราะห์พื้นผิวด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถดูลักษณะรูปร่างและการกระจายของธาตุได้ งานวิจัยนี้ใช้ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร ด้วย EDS field emission ของเครื่อง SEM รุ่น FEI Quanta 400

3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy, AFM)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เพื่อตรวจวัดสภาพพื้นผิว ด้วยหัวอ่านขนาดเล็กวัดแรงผลักและแรงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิววัตถุ เพื่อมาสร้างเป็นภาพของพื้นผิวของวัตถุนั้น ด้วยการถ่ายภาพ พื้นผิวของวัสดุ เพื่อวัดคุณสมบัติเฉพาะ เช่น หาค่าความขรุขระของพื้นผิว (Roughness) ค่าขนาดของขนาดโครงสร้าง (Particle) ในระดับนาโนเมตร สามารถบอกความสูงต่ำของพื้นผิวในรูปแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ งานวิจัยนี้ใช้ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตร โดยวิเคราะห์พื้นผิววัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม รุ่น Nano Scope IIIa บริษัท Digital instruments ประเทศอังกฤษ

3.4.6 การวิเคราะห์สมบัติการส่งผ่านทางแสงของฟิล์ม (UV-vis spectrophotometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสง ในช่วงรังสียูวี และช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่แสงผ่าน โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ งานวิจัยนี้ใช้ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร ทดสอบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง (%Transmittance) โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ และกรดซัลฟิวริก ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (M) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 300-900 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตและวิซิเบิลสเปกโทรสโคปี รุ่น GENESYS 10S ยี่ห้อ Thermo Scientific™

3.4.7 การวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้าเคมีของฟิล์มโดยโวลแทมเมตรีแบบรอบ (Cyclic voltammetry)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี ที่ป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าในลักษณะรอบ ซึ่งการป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าครั้งแรกในทิศทางตรงข้ามกับครั้งรอบหลัง จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกให้แก่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ศักย์ไฟฟ้าที่ให้นี้ ทำให้ขั้วไฟฟ้าทำงาน มีค่าศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้สารที่อยู่ในสารละลายเกิดปฏิกิริยาถ่ายเทอิเล็กตรอนบนผิวของขั้วไฟฟ้าได้ คือ มีการให้หรือรับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าทำงาน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทำงาน ขนาดของกระแสมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยา โดยสามารถหาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้จากสมการของ Randles-Sevcik ดังที่แสดงในสมการที่ 2.10

งานวิจัยนี้ใช้ฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ขนาด 2×2 ตารางเซนติเมตร ทดสอบโดยใช้ช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ ด้วยอัตราการป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที และกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ และใช้ขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว คือขั้วไฟฟ้าทำงานเป็นฟิล์มที่ใช้ในการทดสอบ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ และขั้วไฟฟาร่วมเป็นแพลทินัม เพื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่อไป

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

4.1 ผลการสังเคราะห์ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต

จากผลการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต โดยวิธีโซล-เจล และจุ่มเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ดังนี้

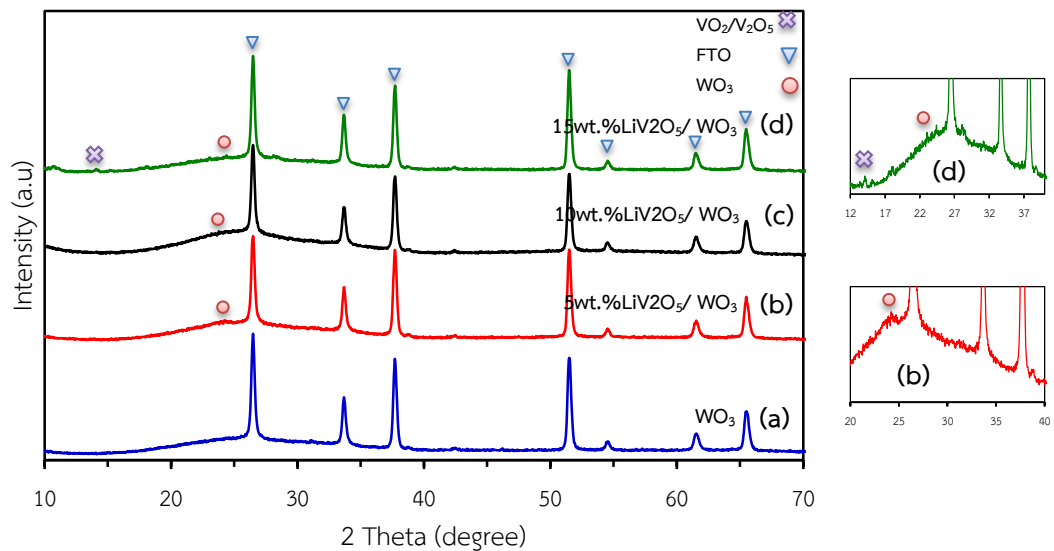
4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ และฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าโครงสร้างของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ ไม่ปรากฏพีคที่ตำแหน่งใด ๆ พบเฉพาะพีคปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งของกระจ่างนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์ม และพบว่าโครงสร้างของฟิล์มมีลักษณะเป็นผลึกน้อยมาก เมื่อมีการเจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีพีคปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง $2\theta = 24.22$ องศา ที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีพีคปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง $2\theta = 23.78$ องศา และที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีพีคปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง $2\theta = 23.76$ องศา ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างแบบโมโนคลินิกของทั้งสแตนไดรออกไซด์ [37] และพบพีคปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งของกระจ่างนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์ม นอกจากนี้พบพีคปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง $2\theta = 14.08$ องศา ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบออร์โทโรห์มบิกของวาเนเดียมเพนออกไซด์ [38] และจากการเจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีขนาดของผลึกของฟิล์มเป็น 27.08, 27.06 และ 27.06 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยหาค่าได้จากสมการ Scherrer ดังที่กล่าวในสมการที่ 3.1

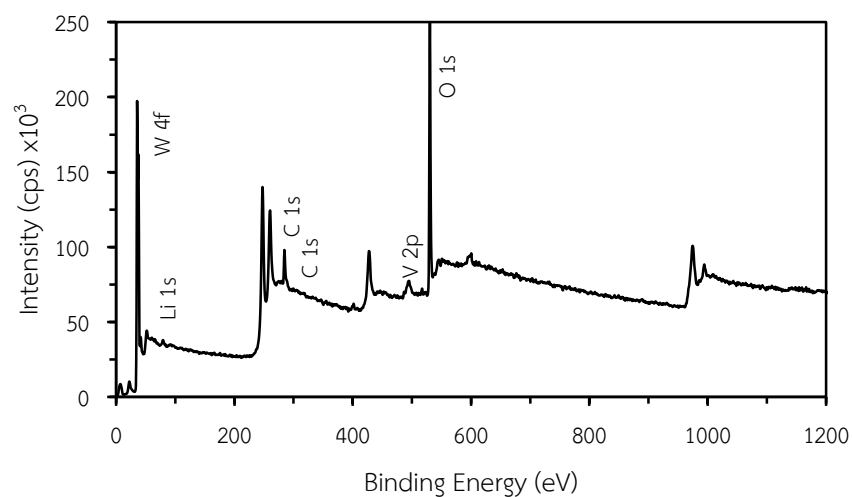
4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับพื้นผิวของฟิล์ม

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับพื้นผิวด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ช่วงค่าพลังงานยึดเหนี่ยว 0-1200 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.2 การสำรวจแบบช่วงกว้างประกอบด้วยธาตุทั้งสแตน วาเนเดียม คาร์บอน ออกซิเจน และลิเทียม และจากรูปที่ 4.3 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น W 4f พบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของทั้งสแตนที่ 36.2 และ 38.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่สัมพันธ์กับชั้น W 4f_{7/2} และ W 4f_{5/2} ตามลำดับ ซึ่งบอกลถึง W⁶⁺ ที่ปรากฏบนผิวของฟิล์ม จากรูปที่ 4.4 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น O 1s พบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของออกซิเจนที่ 530.5, 531.6 และ 533.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งบอกลถึง O²⁻ ที่ปรากฏบนผิวฟิล์ม และสเปกตรัม XPS ในระดับชั้น V 2p

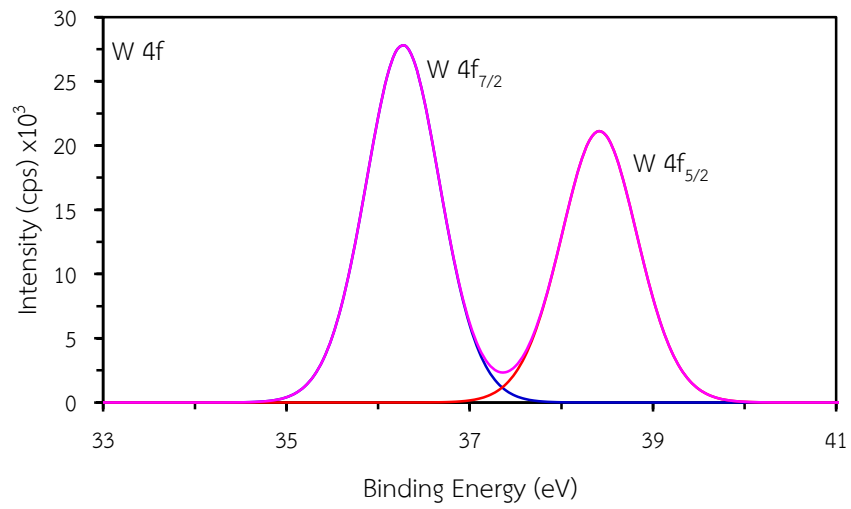
แสดงดังรูปที่ 4.5 พบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของวาเนเดียมที่ 515.7, 517.4, 523.5 และ 525.1 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ [39, 40] ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ามีลิเทียมวาเนเดตอยู่ในฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์



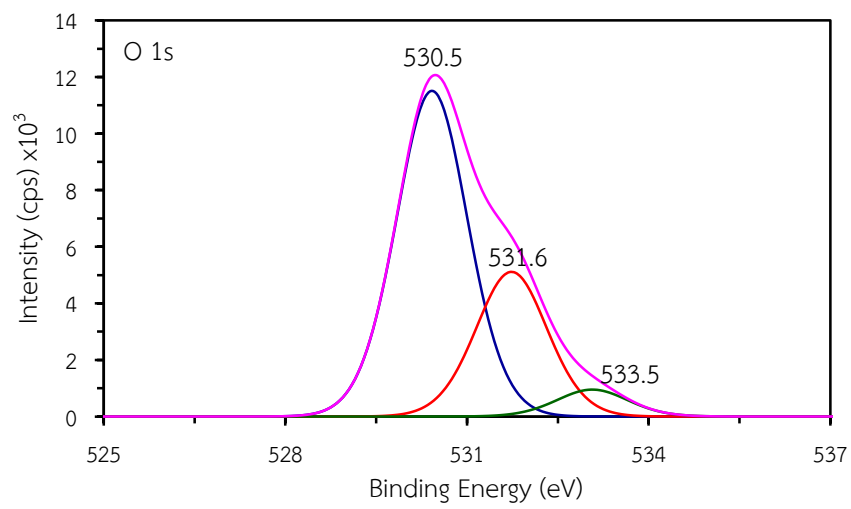
รูปที่ 4.1 การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของ (a) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ และ (b-d) ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต



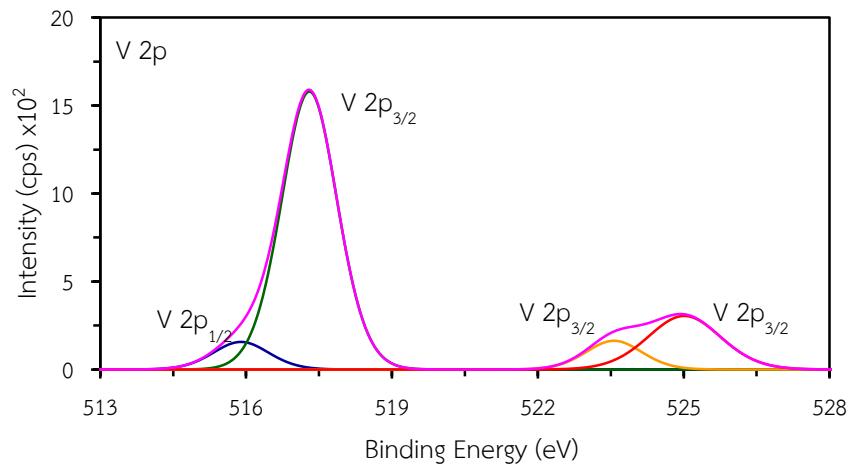
รูปที่ 4.2 สเปกตรัม XPS การสำรวจแบบช่วงกว้างของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต



รูปที่ 4.3 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น W 4f



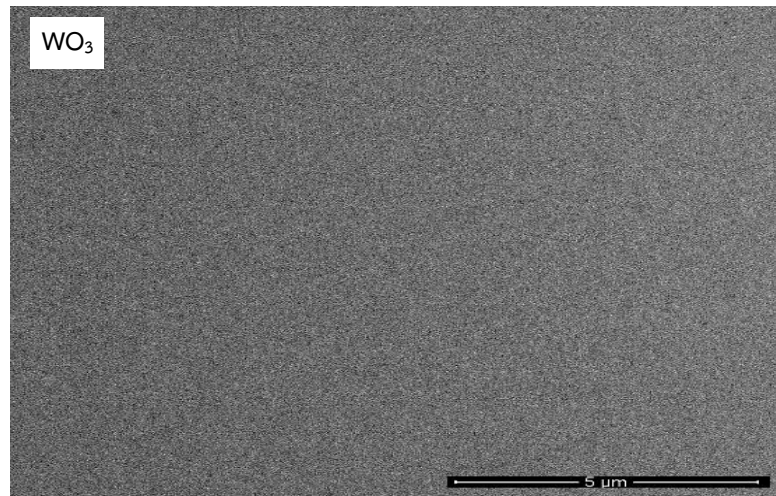
รูปที่ 4.4 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น O 1s



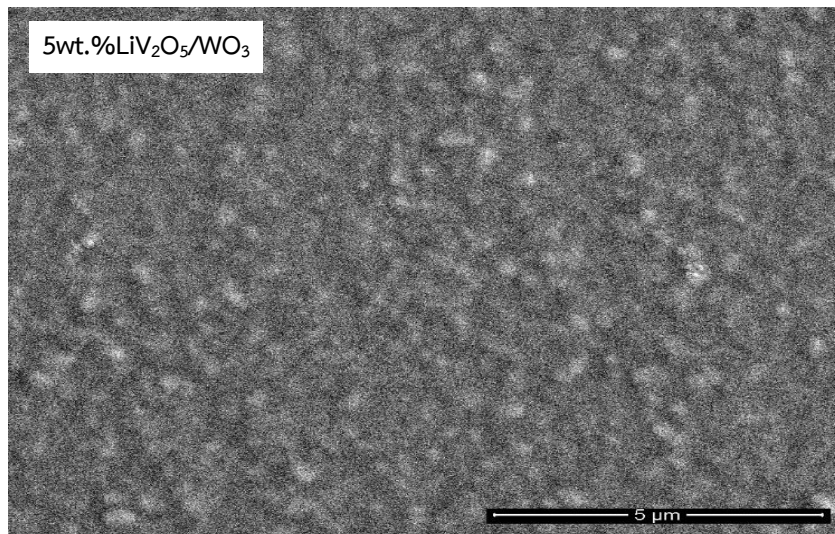
รูปที่ 4.5 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น V 2p

4.1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิว

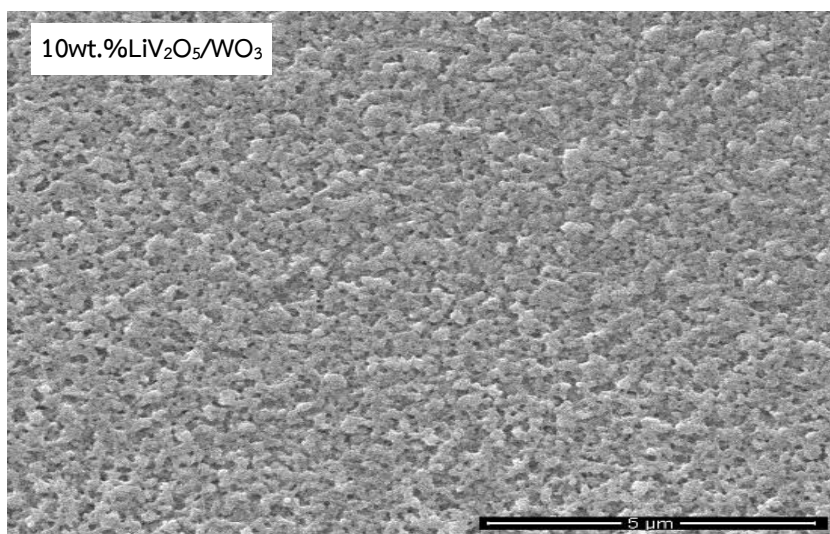
จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.6 มีลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มเรียบและไม่มีลักษณะความเป็นผลึก เมื่อมีการเจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.7 - 4.9 ตามลำดับ มีความเป็นผลึกเกิดขึ้นเล็กน้อย และพื้นผิวมีลักษณะค่อนข้างขรุขระ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ เรียงตัวกันอย่างหนาแน่น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ ซึ่งสัมพันธ์กับการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ เมื่อมีการเจือด้วยลิเทียมวาเนเดตลงไป ฟิล์มจะมีลักษณะความเป็นผลึกเกิดขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มสารเจือที่ปริมาณมากขึ้น ฟิล์มมีผิวที่ขรุขระมากขึ้น โดยเฉพาะที่มีการเจือปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ฟิล์มมีลักษณะเป็นรูพรุน และมีพื้นที่ผิวมากที่สุด จึงทำให้ฟิล์มนี้มีสมบัติอิเล็กโทรโครมิก และสมบัติทางแสงที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อเจือปริมาณลิเทียมวาเนเดตมากเกินไป (15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อนุภาคบนฟิล์มมีการจับตัวเป็นก้อนอย่างเห็นได้ชัด จึงทำให้สมบัติอิเล็กโทรโครมิกด้อยลง



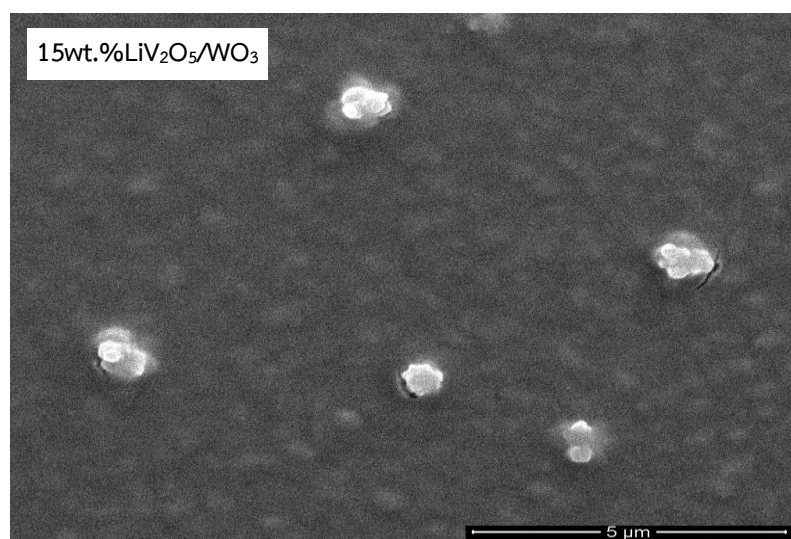
รูปที่ 4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดตที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

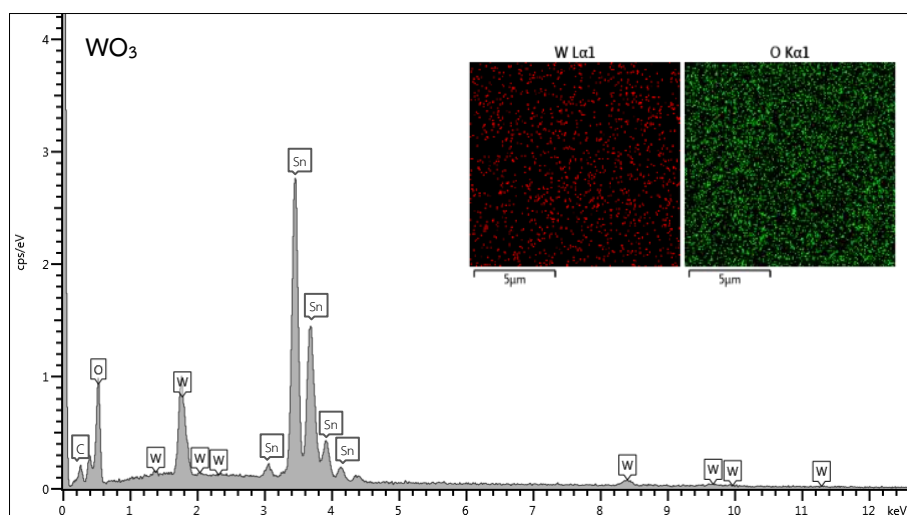


รูปที่ 4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเนตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

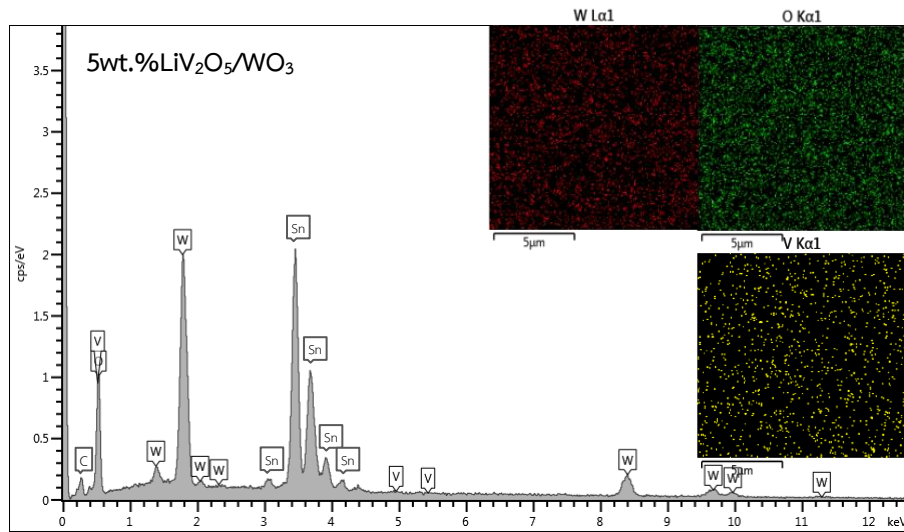


รูปที่ 4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเนตที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

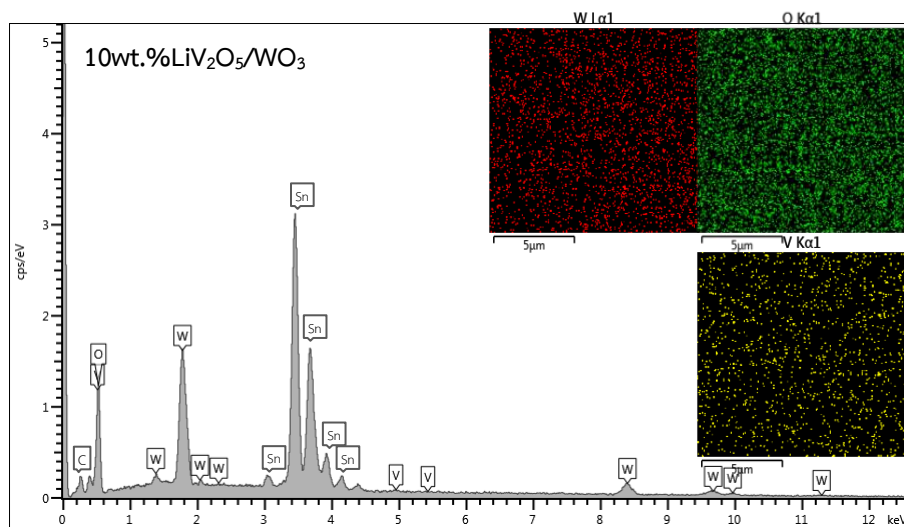
จากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX และลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ด้วยวิธี X-ray mapping ของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์และฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดต มีการกระจายตัวได้ดีและสม่ำเสมอ พบว่าฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.10 มีธาตุองค์ประกอบที่เป็นทังสเตน และออกซิเจน ที่ปริมาณใกล้เคียงกัน คือ 55.1 และ 44.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเจือลิเทียมวานาเดตที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.11 มีธาตุองค์ประกอบที่เป็นทังสเตน ออกซิเจน และวานาเดียม ที่ปริมาณ 63.4, 36.2 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเจือลิเทียมวานาเดตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.12 มีธาตุองค์ประกอบที่เป็นทังสเตน ออกซิเจน และวานาเดียม ที่ปริมาณ 53.8, 45.6 และ 0.6 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเจือลิเทียมวานาเดตที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.13 มีธาตุองค์ประกอบที่เป็นทังสเตน ออกซิเจน และวานาเดียม ที่ปริมาณ 80, 18.7 และ 1.3 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณวานาเดียมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เจือลงไป



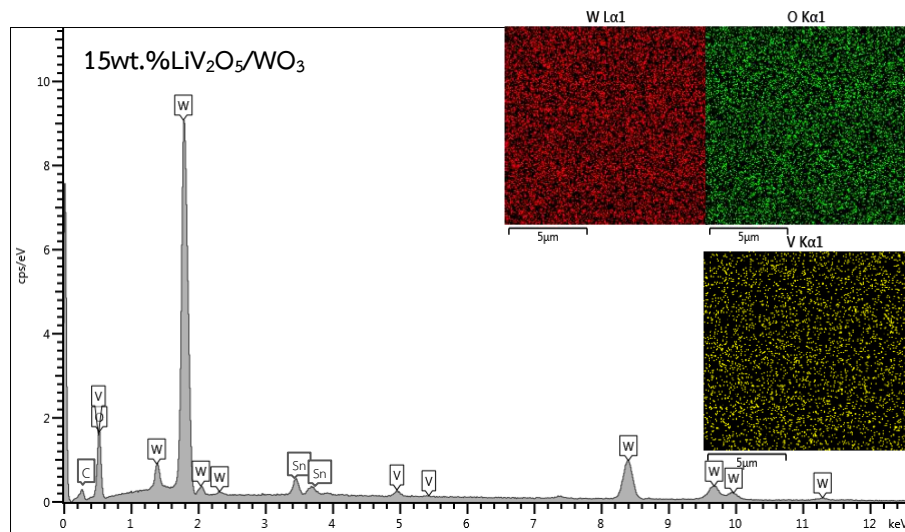
รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX และการกระจายตัวของธาตุของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์



รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX และการกระจายตัวของธาตุของฟิล์ม ทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเนตที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

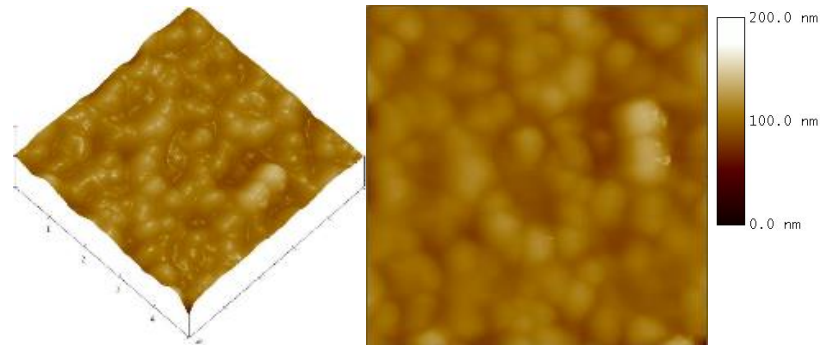


รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX และการกระจายตัวของธาตุของฟิล์ม ทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเนตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

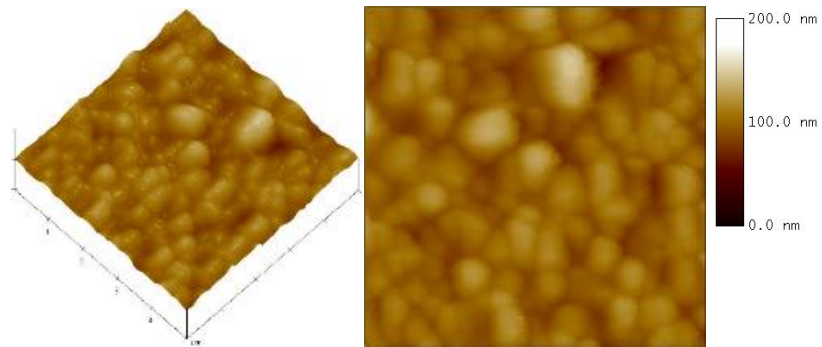


รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX และการกระจายตัวของธาตุของฟิล์ม ทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเนตที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

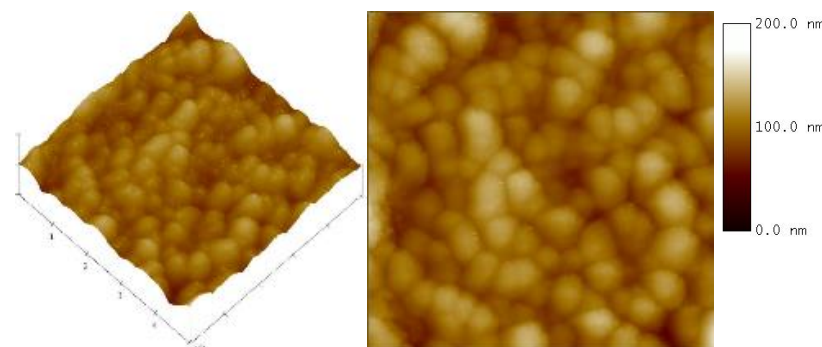
จากผลการวิเคราะห์การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ และฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเนต ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม พบว่าฟิล์มของ ทั้งสแตนไดรออกไซด์ค่อนข้างเรียบ และมีอนุภาคกระจายอย่างสม่ำเสมอ ขนาดเล็ก จึงทำให้ความ ขรุขระของฟิล์มมีค่าต่ำ ซึ่งมีค่า 6.68 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.14 เมื่อเทียบกับฟิล์มที่เจือลิเทียม วานาเนต ยิ่งเจือปริมาณลิเทียมวานาเนตมากขึ้น ความขรุขระของฟิล์มก็มากขึ้น ซึ่งมีค่า 8.75, 12.07 และ 53.47 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.15 - 4.17 ตามลำดับ โดยเฉพาะที่ปริมาณการเจือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นยังเห็นลักษณะของฟิล์มมีความพรุน แสดงดังรูปที่ 4.16 สอดคล้อง กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ถึงแม้ว่า เมื่อปริมาณลิเทียมวานาเนตเพิ่มขึ้นเป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าความขรุขระเพิ่มขึ้น ซึ่ง เกิดจากฟิล์มมีรอยแตกมาก จึงมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าฟิล์มที่เจือปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่ง สอดคล้องกับสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ (ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่) และสมบัติทางแสงของฟิล์มที่เจือ ลิเทียมวานาเนตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีค่าสูงสุด ดังที่จะกล่าวต่อไป



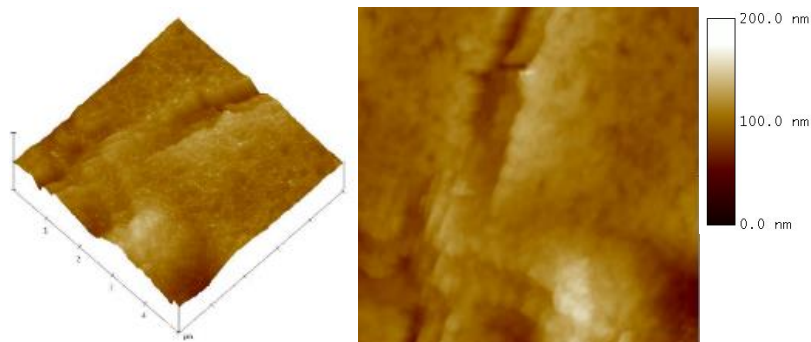
รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์



รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวานาเนต ที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก



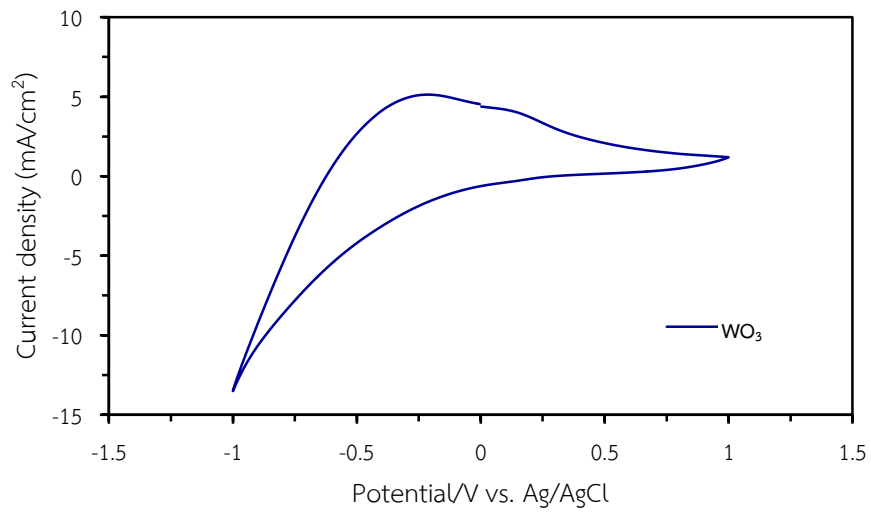
รูปที่ 4.16 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวานาเนต ที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก



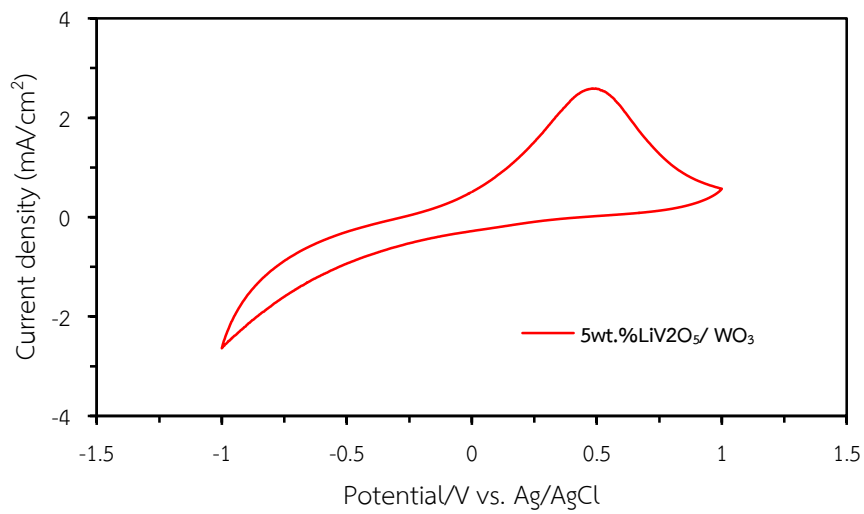
รูปที่ 4.17 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

4.1.4 สมบัติไฟฟ้าเคมีของฟิล์มโดยโวลแทมมิทรีแบบรอบ

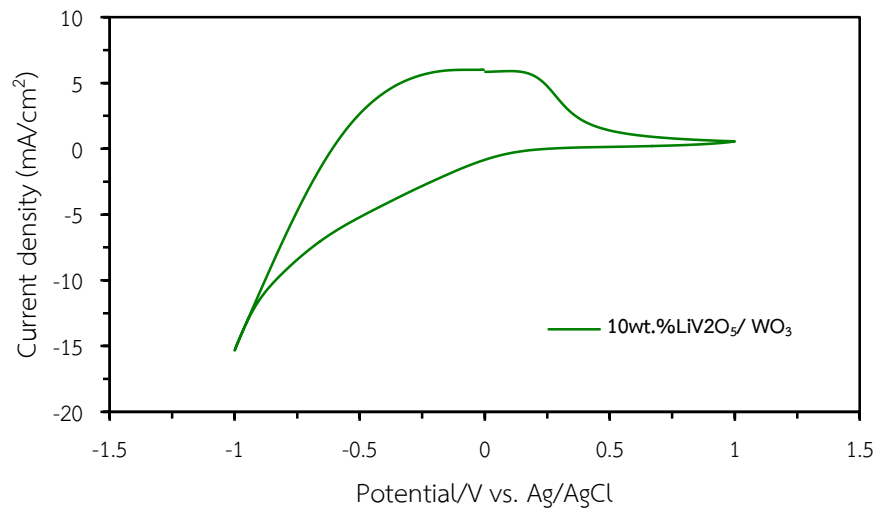
จากการวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้าเคมีโดยโวลแทมมิทรีแบบรอบ ของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์และฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต บนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยพลูออรีน เพื่อดูปฏิกิริยาการเปลี่ยนสี และจางสี ซึ่งในการเปลี่ยนสีของทังสเตนไตรออกไซด์ สามารถเปลี่ยนสีได้ เมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้า จะมีการแทรกตัวของไอออนบวก และอิเล็กตรอนในชั้นฟิล์ม [41] ถ้ามีการให้อิเล็กตรอน ส่งผลทำให้ทังสเตนมีเลขออกซิเดชันลดลงจาก W^{6+} เป็น W^{5+} เกิดเป็นทังสเตนบรอนซ์ ฟิล์มจึงเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ในทางกลับกันเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกจากชั้นอิเล็กโทรโครมิก ทำให้เลขออกซิเดชันจาก W^{5+} กลับมาเป็น W^{6+} ฟิล์มจึงเปลี่ยนเป็นจางสีเหมือนเดิม จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ และฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต แสดงดังรูปที่ 4.19 - 4.22 ตามลำดับ เมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าจาก -1.0 ถึง $+1.0$ โวลต์ ฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน และค่ากระแสไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดทำให้ฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม ซึ่งเป็นจุดที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้มาก และมีการแทรกตัวของไอออนบวกที่เกิดจากการแตกตัวของกรดซัลฟิวริก จากนั้นกระแสไฟฟ้าจะลดลงจนเป็นศูนย์ ทำให้ฟิล์มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเข้มเป็นจางสีหรือสีใส อิเล็กตรอนและไอออนบวกเคลื่อนตัวออกจากชั้นอิเล็กโทรโครมิก และจากการทดสอบฟิล์มพบว่าตำแหน่งที่มีกระแสไฟฟ้าสูงสุดและฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มมากที่สุด คือฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีการเจือลิเทียมวาเนเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องด้วยตำแหน่งนี้มีไอออนบวกที่เกิดจากการแตกตัวของกรดซัลฟิวริก และลิเทียม [42] และจากกราฟสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ [43] ได้จากสมการที่ 2.10 ซึ่งฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีการเจือลิเทียมวาเนเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ดีที่สุดคือ 2.6×10^{-9} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และมีค่ามากกว่าฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ส่วนฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีการเจือลิเทียมวาเนเดต 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสัมประสิทธิ์การแพร่ที่น้อยที่สุดคือ 0.23×10^{-9} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของฟิล์ม แสดงดังตารางที่ 4.1



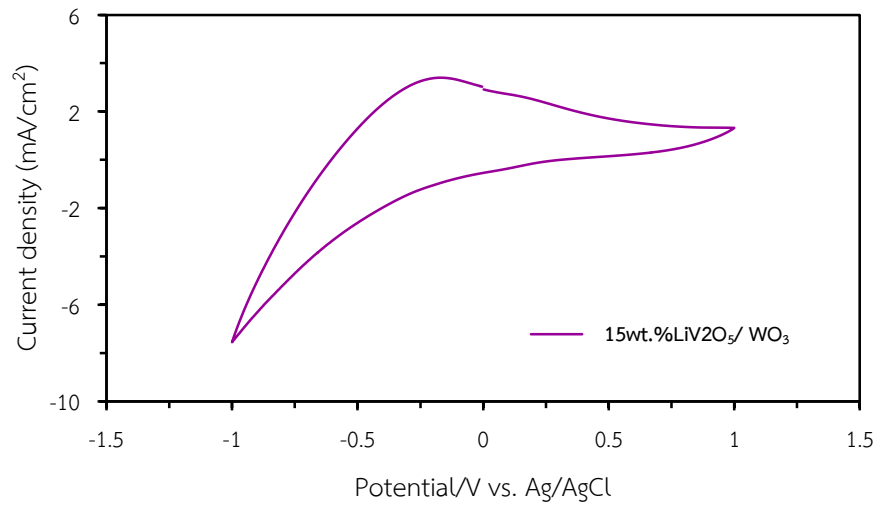
รูปที่ 4.18 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์



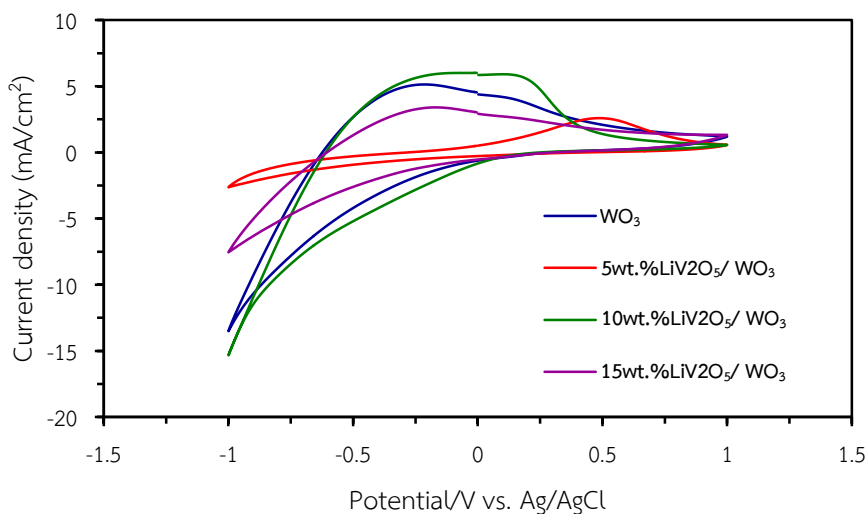
รูปที่ 4.19 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเดตที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.20 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.21 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.22 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์และฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวานาเดต

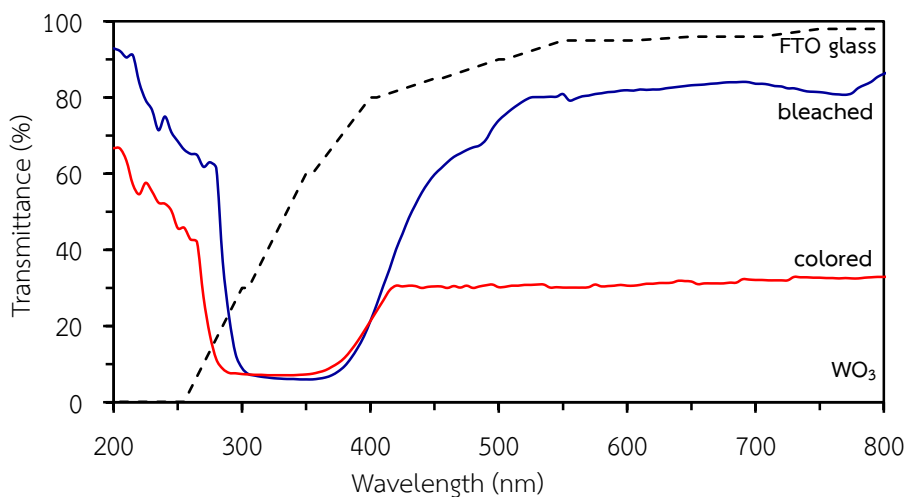
ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์และฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวานาเดต

Film	Diffusion coefficient (cm^2s^{-1})
WO_3	1.6×10^{-9}
5wt.% $\text{LiV}_2\text{O}_5/\text{WO}_3$	0.23×10^{-9}
10wt.% $\text{LiV}_2\text{O}_5/\text{WO}_3$	2.6×10^{-9}
15wt.% $\text{LiV}_2\text{O}_5/\text{WO}_3$	0.46×10^{-9}

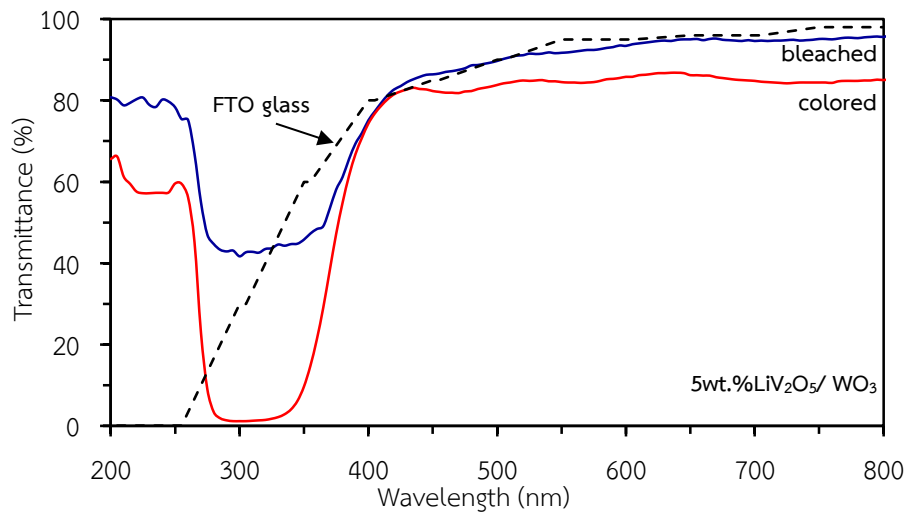
การที่สมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์ม (สัมประสิทธิ์การแพร่, D) ที่เจือลิเทียมวานาเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าสูงสุด เมื่อเทียบกับฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์ และฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวานาเดตที่ปริมาณอื่น ๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวของฟิล์ม ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้น ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

4.1.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์ม

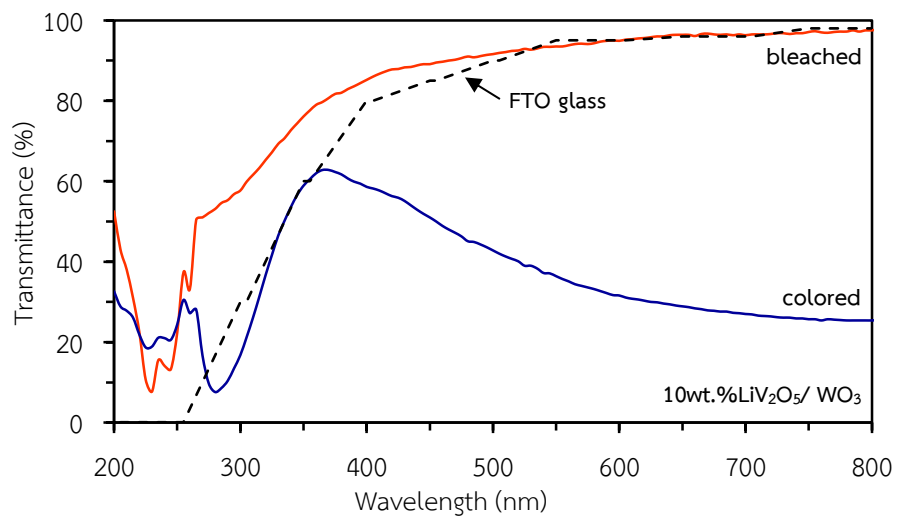
การวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์ม ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี บนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ซึ่งการวัดค่าการส่องผ่านของแสงใช้ความยาวคลื่นที่ 400-700 นาโนเมตร เนื่องจากเป็นช่วงของความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น โดยการวัดค่าการส่องผ่านแสงของกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (กระจกเปล้า) จะใช้อากาศเป็นตัวเทียบค่า โดยทดสอบฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ และฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณการเจือ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านแสง และความยาวคลื่นของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.23 มีค่าการส่องผ่านแสง 41.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม เรียกว่าสถานะเปลี่ยนสีมีค่า 30.4 เปอร์เซ็นต์ และฟิล์มจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเข้มเป็นไม่มีสี เรียกว่าสถานะจางสีมีค่า 72.1 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อมีการเจือลิเทียมวาเนเดต แสดงดังรูปที่ 4.24, 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ โดยที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าผลต่างการส่องผ่านแสงสูงที่สุดคือ 54.0 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ และฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 5 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์ม ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี มีความสอดคล้องกับผลของของการวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้าเคมีโดยโวลแทมมิทรีแบบรอบ



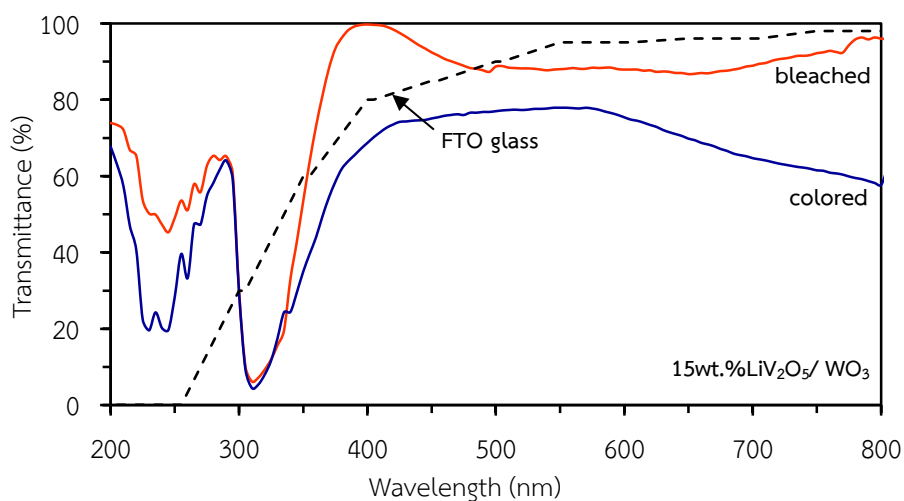
รูปที่ 4.23 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์



รูปที่ 4.24 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.25 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.26 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์และฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต

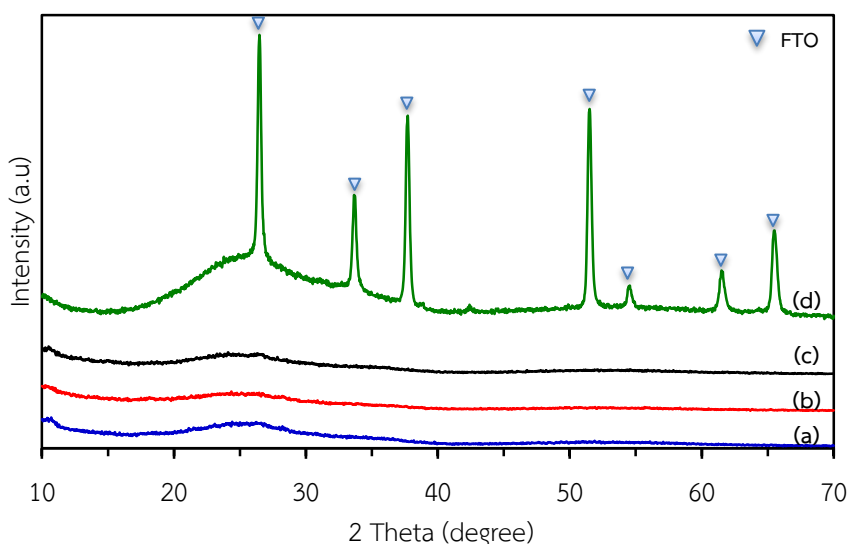
Film	Bleached state Transmittance (T _b , %)	Colored state Transmittance (T _c , %)	Transmittance modulation (ΔT, %)
WO ₃	72.1	30.4	41.7
5wt.%LiV ₂ O ₅ / WO ₃	90.5	84.1	6.4
10wt.%LiV ₂ O ₅ / WO ₃	92.9	38.9	54.0
15wt.%LiV ₂ O ₅ / WO ₃	89.7	73.9	15.8

จากค่าผลต่างการส่องผ่านแสงของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ที่เจือลิเทียมวาเนเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแปรตั้งที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อเทียบกับฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ และฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณอื่น ๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวของฟิล์ม ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้น ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

4.2 ผลการสังเคราะห์ฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน

4.2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ ของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต ที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเจือด้วยท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มเข้าไปที่ปริมาณ 0.05, 0.10 และ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.27 มีลักษณะเป็นเฟสออสถุฐาน ไม่ปรากฏตำแหน่งของพีคที่ตำแหน่งใด ๆ แสดงว่าการเจือท่อนาโนคาร์บอนไม่ได้ทำให้โครงสร้างของทังสเตนไดรอกไซด์เปลี่ยน และแสดงเฉพาะพีคของกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยฟิล์มเท่านั้น

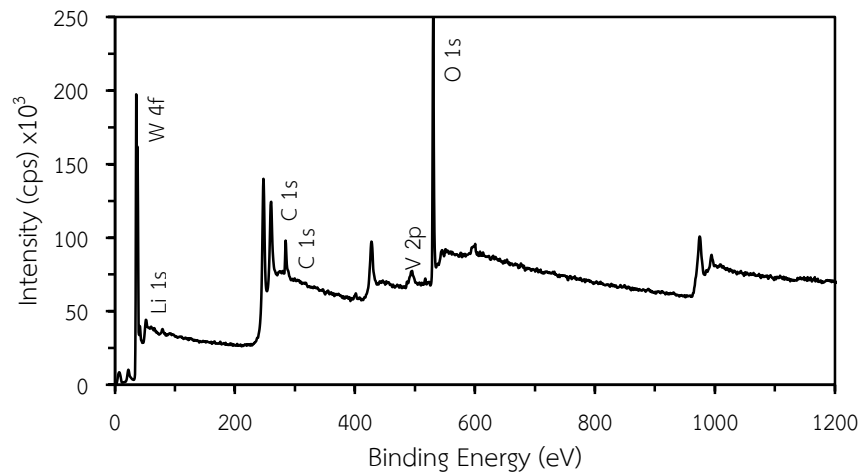


รูปที่ 4.27 การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของ (d) ฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ (a) 0.05 (b) 0.10 และ (c) 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

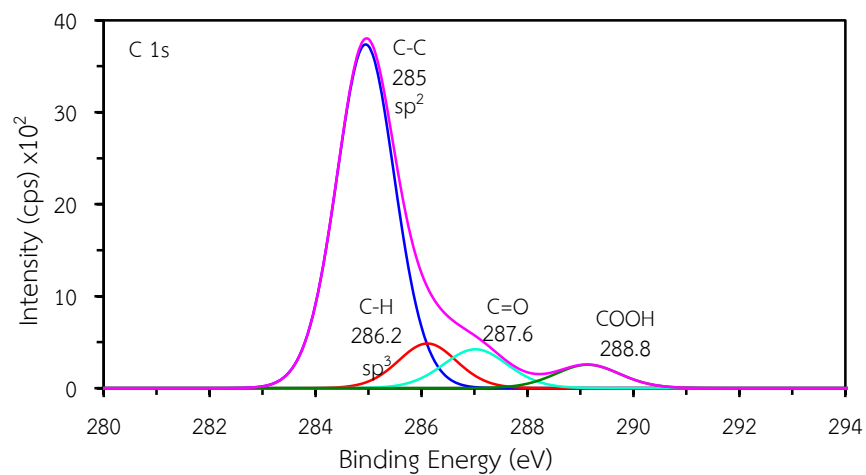
4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับพื้นผิวของฟิล์ม

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับพื้นผิวด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ ของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน ช่วงค่าพลังงานยึดเหนี่ยว 0-1200 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.28 แบบช่วงกว้าง ประกอบด้วยธาตุทังสเตน วาเนเดียม คาร์บอน ออกซิเจน และลิเทียม และจากรูปที่ 4.29 และสเปกตรัม XPS ในระดับชั้น C 1s พบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของคาร์บอนที่ 285, 286.2, 287.6 และ 288.8 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับ C-C, C-H, C=O และ COOH [44] ซึ่งพีคหลักที่ 285

อิเล็กตรอนโวลต์ ประกอบด้วยโครงสร้างแบบกราฟฟิติก sp^2 [45] และพีคที่ 286.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ไฮบริดไดซ์ของอะตอมคาร์บอน sp^3 [46]



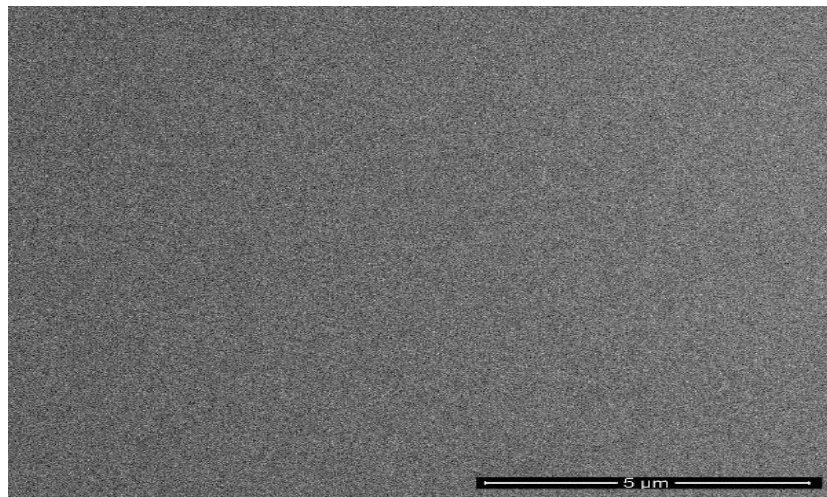
รูปที่ 4.28 สเปกตรัม XPS แบบสำรวจช่วงกว้างของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต และท่อนาโนคาร์บอน



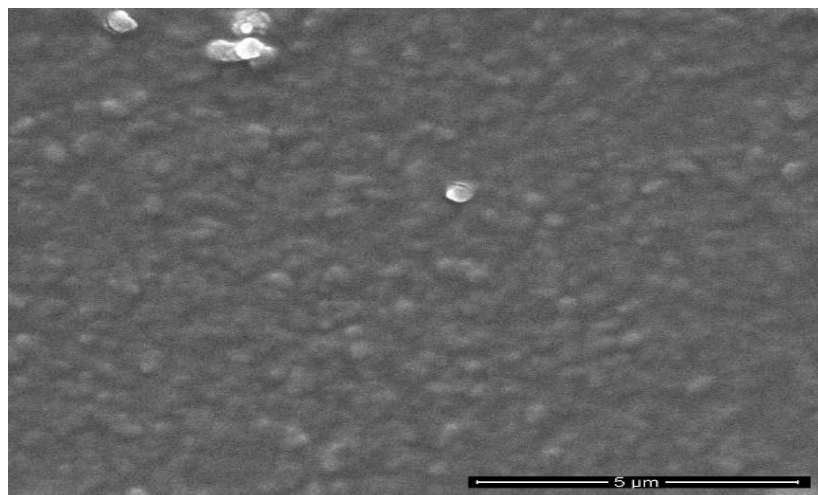
รูปที่ 4.29 สเปกตรัม XPS ในระดับชั้น C 1s

4.2.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิว

จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์พื้นผิวมีลักษณะเรียบ และฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ผลึกมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เรียงตัวกันอย่างหนาแน่น แสดงดังรูปที่ 4.30 - 4.31 ตามลำดับ จะเห็นว่าท่อนาโนคาร์บอน ทำให้ผิวฟิล์มขรุขระมากขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวฟิล์ม



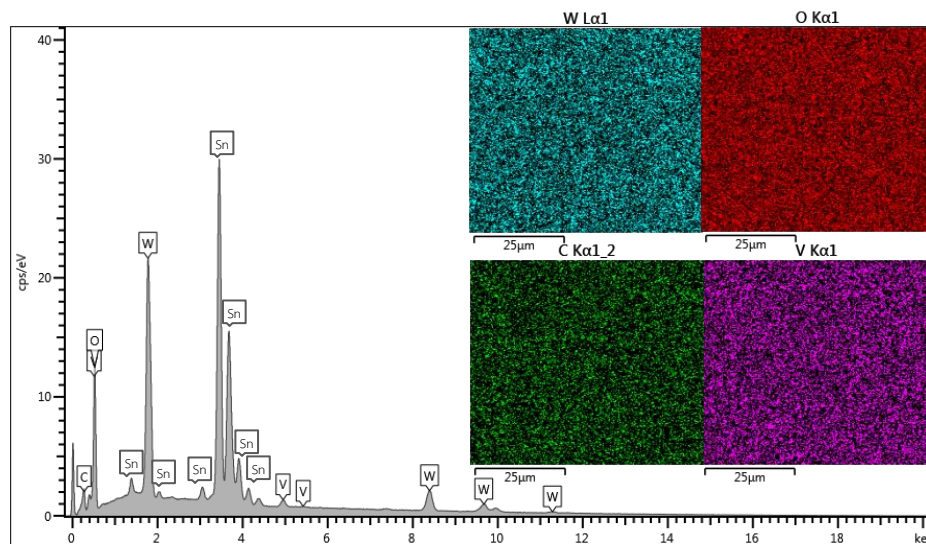
รูปที่ 4.30 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



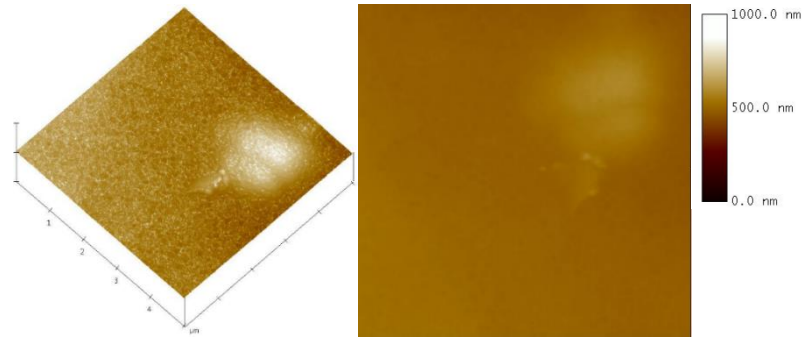
รูปที่ 4.31 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน ที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

จากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบและลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน ด้วยเทคนิค EDX และใช้วิธี X-ray mapping แสดงดังรูปที่ 4.32 มีการกระจายตัวได้ดีและสม่ำเสมอ มีธาตุองค์ประกอบที่เป็นทั้งสแตนไดรออกไซด์และออกซิเจน ที่ปริมาณใกล้เคียงกัน คือ 55.1 และ 44.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.11 มีธาตุองค์ประกอบที่เป็นทั้งสแตนไดรออกไซด์ คาร์บอน และวาเนเดียม ที่ปริมาณ 51.3, 36.5, 10.5 และ 1.7 เปอร์เซ็นต์

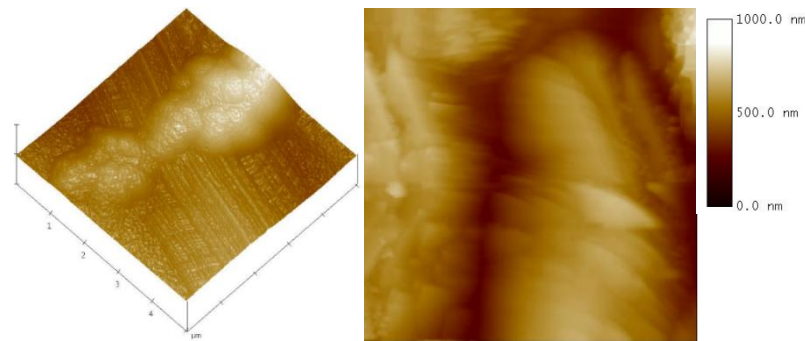
การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน พบว่าฟิล์มมีความหนาประมาณ 300 นาโนเมตร เมื่อเจือปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.05, 0.1 และ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.33 - 4.35 ตามลำดับ ค่าความขรุขระมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 15.69, 50.84 และ 67.38 นาโนเมตร ตามลำดับ



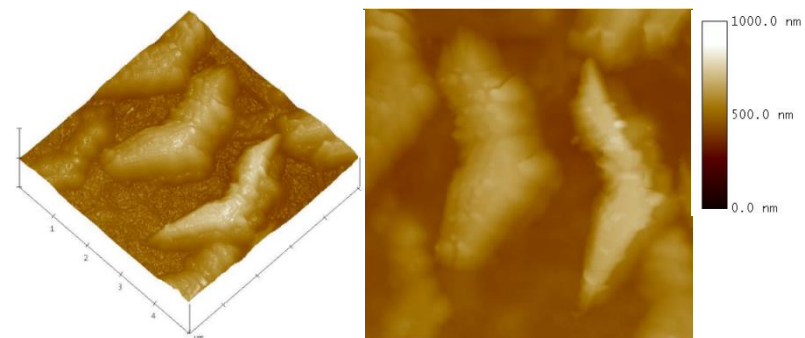
รูปที่ 4.32 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน



รูปที่ 4.33 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน ที่ปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



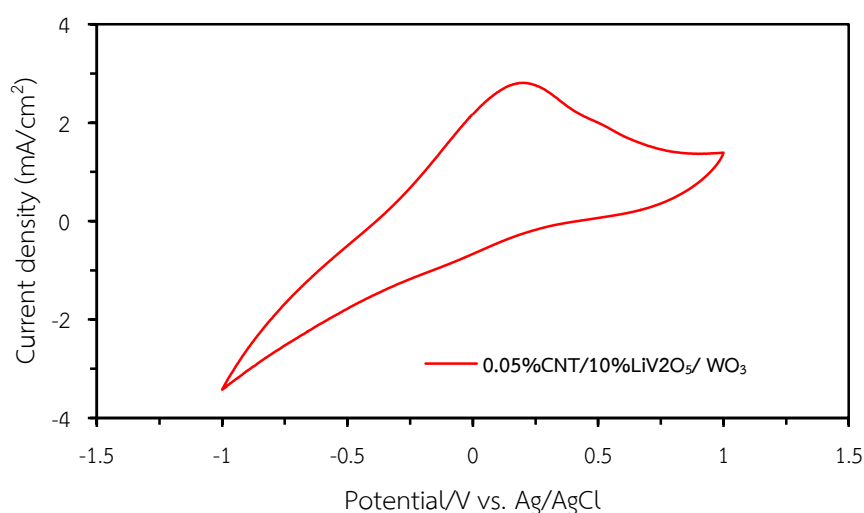
รูปที่ 4.34 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



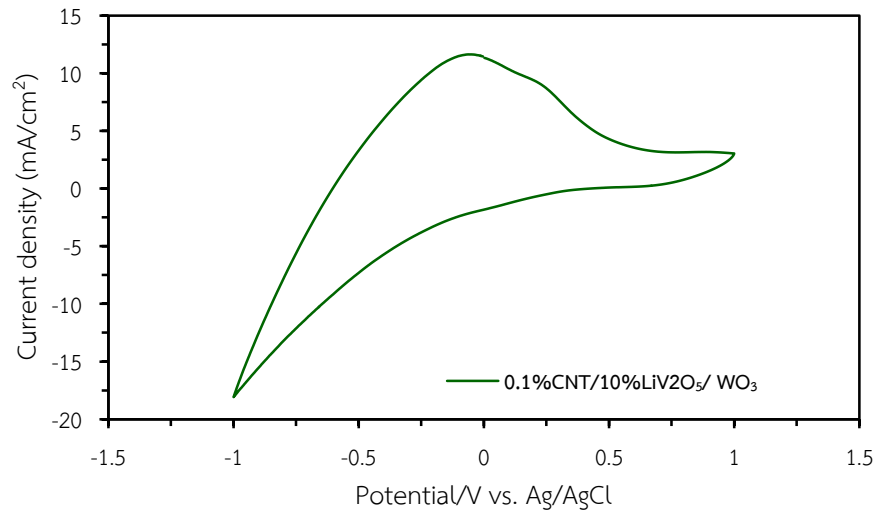
รูปที่ 4.35 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มของฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.2.4 สมบัติไฟฟ้าเคมีของฟิล์มโดยโวลแทมมิทรีแบบรอบ

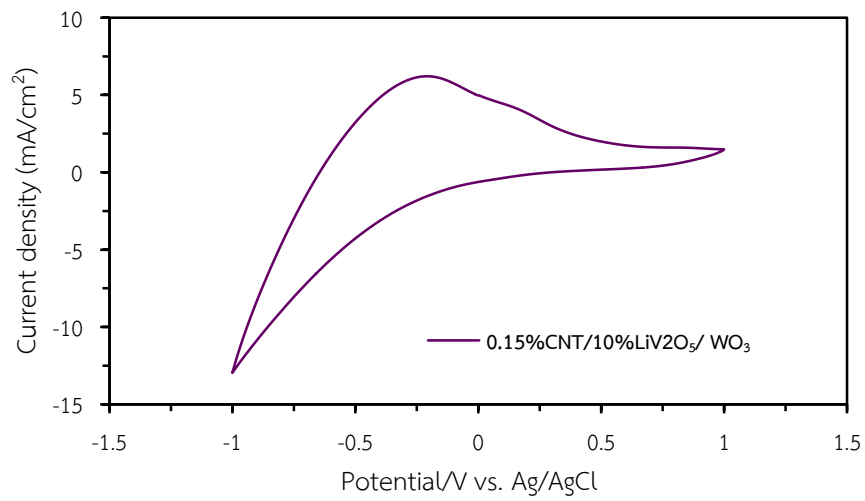
จากการวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้าเคมีโดยโวลแทมมิทรีแบบรอบ ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเจือด้วยท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.05, 0.10 และ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.36, 4.37, 4.38 และ 4.39 เพื่อหาสมบัติทางไฟฟ้าเคมี พบว่าการเจือท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงที่สุด และจากกราฟสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ ซึ่งมีค่าที่ดีที่สุดคือ 6.48×10^{-9} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งสัมพันธ์กับผลการซึ่งแสดงถึงการเป็นสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ดียิ่งขึ้นด้วย แสดงดังตารางที่ 4.3



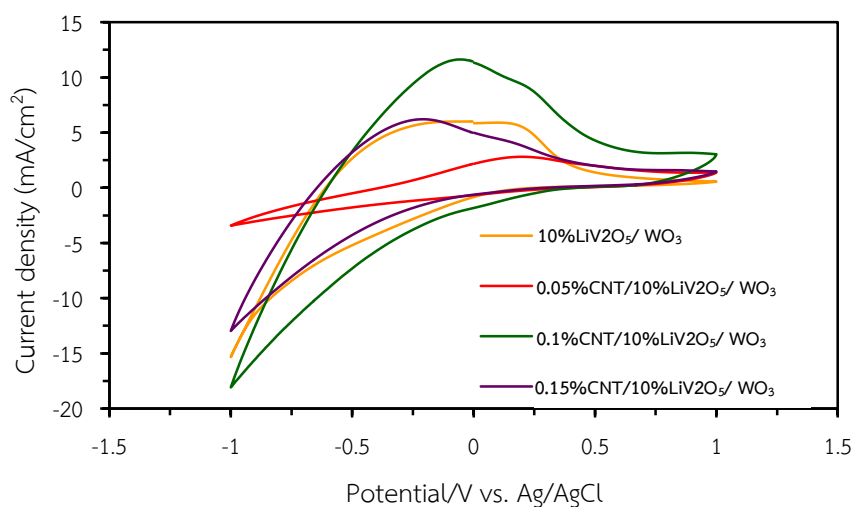
รูปที่ 4.36 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.37 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.38 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.39 โวลแทมมิทรีแบบรอบของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเนตและท่อนาโนคาร์บอน

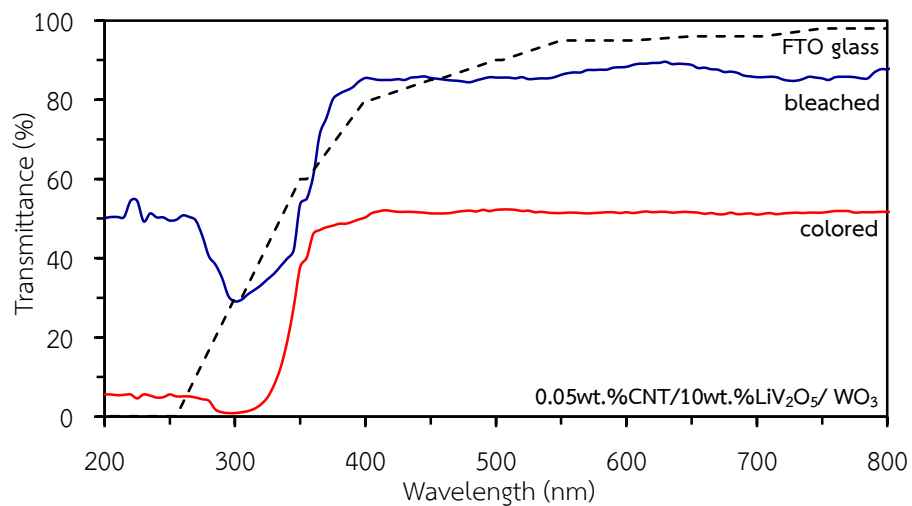
ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเนตและท่อนาโนคาร์บอน

Film	Diffusion coefficient (cm^2s^{-1})
10wt.% $\text{LiV}_2\text{O}_5/\text{WO}_3$	2.6×10^{-9}
0.05wt.%CNT/10wt.% $\text{LiV}_2\text{O}_5/\text{WO}_3$	0.46×10^{-9}
0.10wt.%CNT/10wt.% $\text{LiV}_2\text{O}_5/\text{WO}_3$	6.48×10^{-9}
0.15wt.%CNT/10wt.% $\text{LiV}_2\text{O}_5/\text{WO}_3$	2.1×10^{-9}

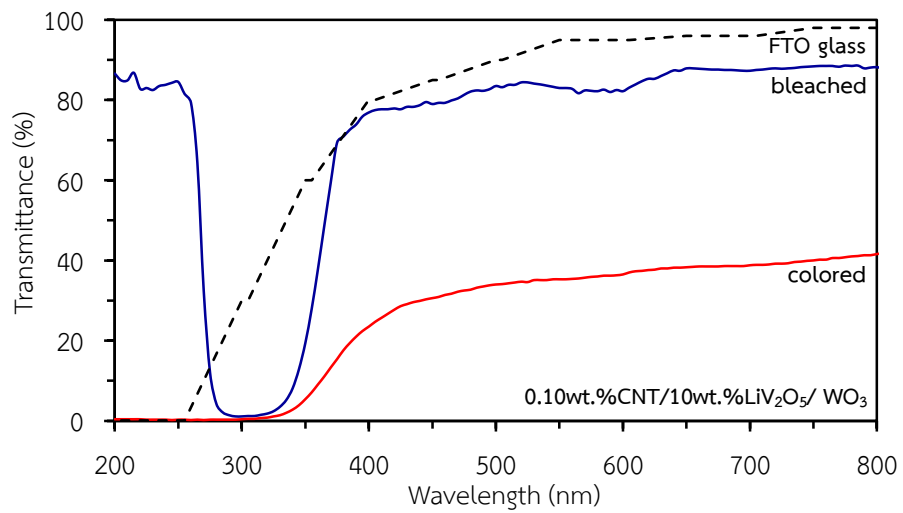
จากการวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้าเคมี โดยโวลแทมมิทรีแบบรอบ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวานาเนตและท่อนาโนคาร์บอน ดังที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าการเจือท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณเหมาะสม คือ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าของสัมประสิทธิ์การแพร่ของฟิล์มมีค่าสูงสุด เพราะอิทธิพลของท่อนาโนคาร์บอนที่โครงสร้างมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าหรือถ่ายเทประจุได้ดี โดยเฉพาะเมื่อมีการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในฟิล์มอย่างสม่ำเสมอ ในทางกลับกัน ถ้าท่อนาโนคาร์บอนไม่มีการกระจายตัวที่ดี เนื่องจากมีปริมาณน้อย (เจือจาง) หรือมากเกินไป (จับตัวเป็นก้อน) จะทำให้สมบัติการถ่ายโอนประจุมีประสิทธิภาพลดลงไป ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม จึงนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์ม ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสมบัติทางออปติคัลที่สำคัญ ดังที่จะกล่าวต่อไป

4.2.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์ม

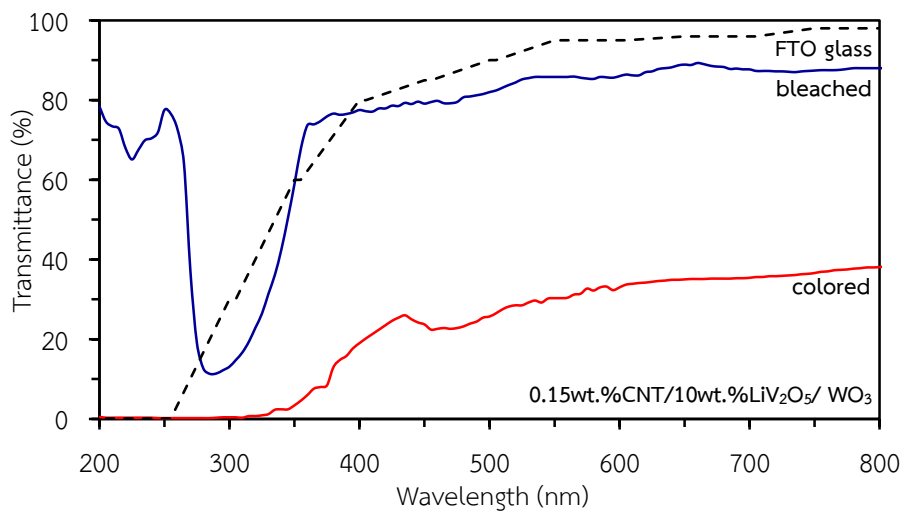
การวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์ม ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี บนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ซึ่งการวัดค่าการส่องผ่านแสงใช้ความยาวคลื่นที่ 400-700 นาโนเมตร เนื่องจากเป็นช่วงของความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น โดยการวัดค่าการส่องผ่านแสงของกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (กระจกเปล่า) จะใช้อากาศเป็นตัวเทียบค่า โดยทดสอบฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน มาวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสง แสดงดังรูปที่ 4.40 – 4.42 ตามลำดับ พบว่าฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเจือด้วยท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าผลต่างการส่องผ่านแสงดีที่สุดคือ 54.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการเจือที่ปริมาณอื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์ม มีความสอดคล้อง และเป็นในแนวทางเดียวกันกับผลของการวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้าเคมี โดยโวลแทมเมทรีแบบรอบ



รูปที่ 4.40 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.41 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.42 การส่องผ่านแสงของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน

Film	Bleached state Transmittance (Tb, %)	Colored state Transmittance (Tc, %)	Transmittance modulation (ΔT , %)
10wt.%LiV ₂ O ₅ / WO ₃	92.9	38.9	54.0
0.05wt.%CNT/10wt.%LiV ₂ O ₅ / WO ₃	86.6	51.6	35
0.10wt.%CNT/10wt.%LiV ₂ O ₅ / WO ₃	84.1	29.4	54.7
0.15wt.%CNT/10wt.%LiV ₂ O ₅ / WO ₃	83.1	34.5	48.6

จากการวิเคราะห์สมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน ทั้งสมบัติไฟฟ้าเคมีของฟิล์มโดยโวลแทมเมทรีแบบรอบ และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี พบว่าสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มที่ดีที่สุดคือ ฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพราะเป็นตำแหน่งที่มีการแทรกตัวของไอออนบวก และมีการรับอิเล็กตรอนมากที่สุด แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมากที่สุด จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันที่ดีที่สุด

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตและท่อนาโนคาร์บอน บนกระจกนำไฟฟ้าทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน โดยวิธีโซล-เจล ที่อุณหภูมิการเผา 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์มีสัมประสิทธิ์การแพร่เท่ากับ 1.6×10^{-9} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที เมื่อมีการเจือลิเทียมวาเนเดต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเท่ากับ 2.6×10^{-9} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และเมื่อมีการเจือท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสัมประสิทธิ์การแพร่ 6.48×10^{-9} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

การเจือลิเทียมวาเนเดต มีผลต่อลักษณะฟิล์มที่เพิ่มพื้นที่ผิวฟิล์ม ในขณะที่ท่อนาโนคาร์บอน ช่วยเพิ่มสมบัติการถ่ายโอนประจุของฟิล์มด้วยฟิล์ม และจากการวัดค่าการส่องผ่านแสงช่วงความยาวคลื่นที่ 400-700 นาโนเมตร เนื่องจากเป็นช่วงของความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น พบว่าฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์สามารถเปลี่ยนสีกลับไปมาจากสีใสเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน มีค่าผลต่างของการส่องผ่านแสง 41.7 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อมีการเจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าผลต่างของการส่องผ่านของแสงสูงขึ้นเป็น 54 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเจือด้วยท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าฟิล์มมีผลต่างของการส่องผ่านแสงดีที่สุดคือ 54.7 เปอร์เซ็นต์ และในการเปลี่ยนสีของฟิล์มขึ้นกับลักษณะโครงสร้างของฟิล์ม ปริมาณไอออนและอิเล็กตรอนที่แทรกเข้าไปในชั้นอิเล็กทรอนิกส์ และสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนในชั้นอิเล็กทรอนิกส์

ฟิล์มที่สมบัติอิเล็กทรอนิกส์และสมบัติทางแสงดีที่สุด คือฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์เจือลิเทียมวาเนเดตที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.1 ควรศึกษาอายุการใช้งานในการเปลี่ยนสีกลับไปมาของฟิล์ม ในกรณีที่ต้องการนำฟิล์มไปประยุกต์ใช้งานจริง

5.2 ควรศึกษาตัวแปรอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์ม เช่น ความหนาของฟิล์ม และอุณหภูมิในการเผา เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] C.-L. Lin, Y.-W. Chen, and E. Chen, "Preparation and characterization of electrochromic tungsten oxide–titania composite thin films with different tungsten/titanium ratios," *Thin Solid Films*, vol. 556, pp. 48-53, 2014.
- [2] C. L. Wu, C. K. Wang, C. K. Lin, S. C. Wang, and J. L. Huang, "Electrochromic properties of nanostructured tungsten oxide films prepared by surfactant-assisted sol–gel process," *Surface and Coatings Technology*, vol. 231, pp. 403-407, 2013.
- [3] Y. Wang, X. Xu, C. Cao, C. Shi, W. Mo, and H. Zhu, "Synthesis and performance of $\text{Li}_{1.5}\text{V}_3\text{O}_8$ nanosheets as a cathode material for high-rate lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 242, pp. 230-235, 2013.
- [4] Y. Jin, M. Shi, Y. Chu, Y. Xu, W. Jia, Q. Yuan, J. Chen, H. Pan, and Q. Dai, "Highly active Pd/ WO_3 -CNTs catalysts for formic acid electrooxidation and study of the kinetics," *Ionics*, vol. 20, pp. 1419-1426, 2014.
- [5] C. M. Lampert, "Electrochromic materials and devices for energy efficient windows," *Solar Energy Materials*, vol. 11, pp. 1-27, 1984.
- [6] S. Xiong, S. Yin, Y. Wang, Z. Kong, J. Lan, R. Zhang, M. Gong, B. Wu, J. Chu, and X. Wang, "Organic/inorganic electrochromic nanocomposites with various interfacial interactions: A review," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 221, pp. 41-53, 2017.
- [7] P. R. Somani and S. Radhakrishnan, "Electrochromic materials and devices: present and future," *Materials chemistry and physics*, vol. 77, pp. 117-133, 2003.
- [8] C. Granqvist, "Progress in electrochromics: tungsten oxide revisited," *Electrochimica Acta*, vol. 44, pp. 3005-3015, 1999.
- [9] 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.
- [10] C. G. Granqvist, "Electrochromic tungsten oxide films: review of progress 1993–1998," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 60, pp. 201-262, 2000.
- [11] K. Nishio and T. Tsuchiya, "Electrochromic thin films prepared by sol–gel process," *Solar energy materials and solar cells*, vol. 68, pp. 279-293, 2001.
- [12] G. Liu, C. Zeng, and K. Yang, "Study on the synthesis and properties of LiV_3O_8 rechargeable lithium batteries cathode," *Electrochimica Acta*, vol. 47, pp. 3239-3243, 2002.

- [13] A. Wadsley, "Crystal chemistry of non-stoichiometric pentavalent vanadium oxides: crystal structure of $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$," *Acta Crystallographica*, vol. 10, pp. 261-267, 1957.
- [14] W. Krätschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, and D. R. Huffman, "Solid C60: a new form of carbon," *Nature*, vol. 347, pp. 354-358, 1990.
- [15] D. M. Guldi and N. Martín, *Carbon nanotubes and related structures: synthesis, characterization, functionalization, and applications*: John Wiley & Sons, 2010.
- [16] H. Pulker, "Coatings on Glass, Thin Films Science and Technology," *Elsevier, Amsterdam, Holanda*, vol. 3, pp. 34-51, 1984.
- [17] L. C. Klein, *Sol-gel technology for thin films, fibers, preforms, electronics, and specialty shapes*: William Andrew Publishing, 1988.
- [18] K. Nassau, "The physics and chemistry of color: the fifteen causes of color," *The Physics and Chemistry of Color: The Fifteen Causes of Color, 2nd Edition*, by Kurt Nassau, pp. 496. ISBN 0-471-39106-9. Wiley-VCH, July 2001., p. 496, 2001.
- [19] 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.
- [20] C. Brett, M. O. Brett, A. M. C. M. Brett, and A. M. O. Brett, *Electrochemistry: principles, methods, and applications*, 1993.
- [21] A. J. Bard, L. R. Faulkner, J. Leddy, and C. G. Zoski, *Electrochemical methods: fundamentals and applications* vol. 2: wiley New York, 1980.
- [22] K. Oldham and J. Myland, *Fundamentals of electrochemical science*: Elsevier, 2012.
- [23] X.-J. Song, P.-R. Guo, H.-T. Chen, and T.-C. Duan, "Determination of arsenic in lead-based alloy using hydride generation atomic fluorescence spectrometry," *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, vol. 35, pp. 1183-1186, 2007.
- [24] H. Wang, M. Zhang, S. Yang, L. Zhao, and L. Ding, "Preparation and properties of electrochromic tungsten oxide film," *Solar energy materials and solar cells*, vol. 43, pp. 345-352, 1996.
- [25] L. Burke, J. Mulcahy, and S. Venkatesan, "An investigation of anodic film formation on electrodeposited ruthenium by potential sweep techniques," *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, vol. 81, pp. 339-346, 1977.
- [26] H. Zeller and H. Beyeler, "Electrochromism and local order in amorphous WO_3 ," *Applied physics*, vol. 13, pp. 231-237, 1977.

- [27] D. L. Sun, S. Heusing, J. Puetz, and M. A. Aegerter, "Influence of water on the electrochemical properties of $(\text{CeO}_2)_x(\text{TiO}_2)_{1-x}$ and WO_3 sol-gel coatings and electrochromic devices," *Solid State Ionics*, vol. 165, pp. 181-189, 2003.
- [28] B. Munro, S. Krämer, P. Zapp, and H. Krug, "Characterization of electrochromic WO_3 -layers prepared by sol-gel nanotechnology," *Journal of sol-gel science and technology*, vol. 13, pp. 673-678, 1998.
- [29] V. R. Channu, R. Holze, E. H. Walker Jr, S. Wicker Sr, R. R. Kalluru, Q. L. Williams, and W. Walters, "Synthesis and characterization of lithium vanadates for electrochemical applications," *Int. J. Electrochem. Sci*, vol. 5, pp. 1355-1366, 2010.
- [30] M. Al-Assiri, M. El-Desoky, A. Alyamani, A. Al-Hajry, A. Al-Mogeeth, and A. Bahgat, "Spectroscopic study of nanocrystalline $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ films doped with Li ions," *Optics & Laser Technology*, vol. 42, pp. 994-1003, 2010.
- [31] D. Wang, L. Cao, J. Huang, and J. Wu, "Synthesis and electrochemical properties of LiV_3O_8 via an improved sol-gel process," *Ceramics International*, vol. 38, pp. 2647-2652, 2012.
- [32] C.-K. Lin, S.-C. Tseng, C.-H. Cheng, C.-Y. Chen, and C.-C. Chen, "Electrochromic performance of hybrid tungsten oxide films with multiwalled-CNT additions," *Thin Solid Films*, vol. 520, pp. 1375-1378, 2011.
- [33] K. Yanagi, R. Moriya, Y. Yomogida, T. Takenobu, Y. Naitoh, T. Ishida, H. Kataura, K. Matsuda, and Y. Maniwa, "Electrochromic Carbon Electrodes: Controllable Visible Color Changes in Metallic Single-Wall Carbon Nanotubes," *Advanced Materials*, vol. 23, pp. 2811-2814, 2011.
- [34] M. S. M. Zambri, M. M. Norani, and C. F. Kait, "Preparation and Characterization of Carbon Nanotube-Based Electrochromic Material," in *Advanced Materials Research*, 2012, pp. 338-343.
- [35] D. Wang, L. Cao, J. Huang, and J. Wu, "Effects of different chelating agents on the composition, morphology and electrochemical properties of LiV_3O_8 crystallites synthesized via sol-gel method," *Ceramics International*, vol. 39, pp. 3759-3764, 2013/05/01/ 2013.
- [36] Y. Wang, H. Shan, R. H. Hauge, M. Pasquali, and R. E. Smalley, "A highly selective, one-pot purification method for single-walled carbon nanotubes," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 111, pp. 1249-1252, 2007.
- [37] S. Wang, X. Shi, G. Shao, X. Duan, H. Yang, and T. Wang, "Preparation, characterization and photocatalytic activity of multi-walled carbon nanotube-

- supported tungsten trioxide composites," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 69, pp. 2396-2400, 2008.
- [38] N. Li, H. x. Gong, and Y. t. Qian, "Orthorhombic γ - LiV_2O_5 as Cathode Materials in Lithium Ion Batteries: Synthesis and Property," *Chinese Journal of Chemical Physics*, vol. 26, pp. 597-600, 2013.
- [39] W. Wang, H. Wang, S. Liu, and J. Huang, "Synthesis of γ - LiV_2O_5 nanorods as a high-performance cathode for Li ion battery," *Journal of Solid State Electrochemistry*, vol. 16, pp. 2555-2561, 2012.
- [40] S. Ni, X. Lv, J. Ma, X. Yang, and L. Zhang, "Electrochemical characteristics of lithium vanadate, Li_3VO_4 as a new sort of anode material for Li-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 248, pp. 122-129, 2014.
- [41] R. Vijayalakshmi, M. Jayachandran, and C. Sanjeeviraja, "Structural, electrochromic and FT-IR studies on electrodeposited tungsten trioxide films," *Current Applied Physics*, vol. 3, pp. 171-175, 2003/04/01/ 2003.
- [42] I. Porqueras and E. Bertran, "Efficiency of Li^+ doping on electrochromic WO_3 thin films," *Thin Solid Films*, vol. 377, pp. 129-133, 2000.
- [43] A. Srivastava, M. Deepa, S. Singh, R. Kishore, and S. Agnihotry, "Microstructural and electrochromic characteristics of electrodeposited and annealed WO_3 films," *Solid State Ionics*, vol. 176, pp. 1161-1168, 2005.
- [44] K. A. Wepasnick, B. A. Smith, J. L. Bitter, and D. H. Fairbrother, "Chemical and structural characterization of carbon nanotube surfaces," *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 396, pp. 1003-1014, 2010.
- [45] B. Smith, K. Wepasnick, K. E. Schrote, H.-H. Cho, W. P. Ball, and D. H. Fairbrother, "Influence of surface oxides on the colloidal stability of multi-walled carbon nanotubes: A structure– property relationship," *Langmuir*, vol. 25, pp. 9767-9776, 2009.
- [46] M. X. Pulikkathara, O. V. Kuznetsov, and V. N. Khabashesku, "Sidewall covalent functionalization of single wall carbon nanotubes through reactions of fluoronanotubes with urea, guanidine, and thiourea," *Chemistry of Materials*, vol. 20, pp. 2685-2695, 2008.

https://www.webelements.com/compounds/tungsten/tungsten_trioxide.html

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

https://chem.libretexts.org/Core/Analytical_Chemistry/Electrochemistry/Basics_of_Electrochemistry/Electrochemical_Cells

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวนิตดา อุตมาร์ตัน

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610120102

วุฒิการศึกษา

วุฒิ

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
(วิศวกรรมอุตสาหการ)

ชื่อสถาบัน

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีที่สำเร็จการศึกษา

2544

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนผู้ช่วยวิจัย สถานวิจัยความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่อการพลังงาน (CENE) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

N. Utamarat, L. Sikong, and K. Chetpattananondh, "Electrochromic Properties of Lithium Vanadate Doped Tungsten Trioxide Film," in Applied Mechanics and Materials, 2017, pp. 9-13