



รายงานการวิจัย

การสังเคราะห์ $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MoO}_3$ เทอร์โมโครมิกที่มีขนาดอนุภาค
ระดับนาโน

Synthesis of $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MoO}_3$ Thermo chromic
Nanoparticles

ปิยวิทย์ สุวรรณ

Piyavit Suwan

มาหามะสุไฮมี มะแซ

Mahamasuhaimi Masae

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2559

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางของโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) เจือด้วยคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) ได้ทำให้ติดบนกระจกโซดาไลม์โดยวิธีการหล่อ โครงสร้างของเฮกซะโกนอลโมลิบดีนัม (h-MoO_3) ได้ถูกสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการตกตะกอน การวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อศึกษาโครงสร้างกึ่งเสถียรของเฮกซะโกนอล กล้องส่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ศึกษาลักษณะโครงสร้างเฮกซะโกนอลที่มีลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยมที่เป็นแท่งยาวในลักษณะ 1 มิติ ผลการทดลองจากเครื่องวัดสีแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณของโมลิบดีนัมออกไซด์ 100 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะสีจากสีขาวจะกลายเป็นสีฟ้า และเมื่อมีปริมาณโมลิบดีนัมเจือด้วยคิวปรัสออกไซด์ลักษณะสีจากสีขาวจะเปลี่ยนสีเป็นสีเทาเมื่อได้รับแสงยูวี ผลการทดลองการวัดการเลื่อนของแสงด้วยเทคนิคกูเบลกา-มังก์ Kubelka-Munk (K-M) ได้มีการเลื่อนของแสงที่เลื่อนเข้าสู่ช่วงแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอยู่ในช่วง 1.97-2.95 eV จากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสะดวกและประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้ในงานด้านการเปลี่ยนสีทั้งด้านที่มีลักษณะฟิล์มและผงต่อไปได้

คำสำคัญ: โฟโตโครมิก โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) คิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O)



Abstract

Thin films of molybdenum oxide (MoO_3) doped cuprous oxide (Cu_2O) was fabricated on soda lime glass substrate by casting coating technology. Hexagonal molybdenum oxide (h-MoO_3) was synthesized by a solution based precipitation technique. Analysis by X-ray diffraction (XRD) confirmed that the as-synthesized powder had a metastable hexagonal structure. Scanning electron microscopy (SEM) images clearly depicted the morphology and size of h-MoO_3 . The morphology study showed that the product comprises one-dimensional (1D) hexagonal rods. From the color measurement, the result of the color change properties showed the 100% MoO_3 generally white color changing to a generally blue color and the MoO_3 doped with 1% Cu_2O generally white color changing to a generally grey color responsive to exposure with UV irradiations. The optical band gap energy was estimated from the Kubelka–Munk (K–M) function and was found in range 1.97-2.95 eV. It has shown that this convenient and efficient approach could be applied in the mass-production of functional powders and films materials.

Key word: Photochromic, Molybdenum oxide (MoO_3), Cuprous oxide (Cu_2O)



กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย และผู้ช่วยวิจัยทุกคนในห้องทดลองวัสดุนานโน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการจัดทำวิจัยในครั้งนี้ได้อย่างคล่องตัว

รายงานการวิจัยฉบับนี้ขอขอบคุณความดีแก่ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่ดีพร้อมทั้งกำลังใจตลอดมา

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ง
Abstract	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญ (ต่อ)	ซ
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
สารบัญรูป (ต่อ)	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ และที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 ทฤษฎี	4
2.3 กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโน	14
2.4 ขั้นตอนการตกตะกอน	18
2.5 การประยุกต์ใช้	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	21
3.1 แผนการดำเนินงาน	21
3.2 ขั้นตอนและการวิธีดำเนินงาน	22
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการ	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 สารเคมี	40
3.5 สถานที่ทำโครงการ	40
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน และการวิเคราะห์	41
4.1 ลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมโครมิก	41
4.2 ลักษณะสีที่วิเคราะห์จากเครื่อง (Color Meter)	41
4.3 ลักษณะสีที่วิเคราะห์การเปลี่ยนสี (ฟิล์ม) จากกล่องฉายรังสียูวี (UV-BOX)	46
4.4 ผลการวิเคราะห์สารเคลือบโมลิบดีนัม (MoO_3) และคิวปริตออกไซด์ (Cu_2O) ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD)	51
4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง (UV-Vis Absorption Spectra)	52
4.6 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	55
5.1 สรุป	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	56
บรรณานุกรม	57
บรรณานุกรม (ต่อ)	58
บรรณานุกรม (ต่อ)	59
บรรณานุกรม (ต่อ)	60
ภาคผนวก ก	61
ภาคผนวก ข	67
ประวัติผู้เขียน	71

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	เทคโนโลยีกระจกผลึกชนิดต่างๆ แบ่งตามวัสดุที่ใช้ผลิต และการประยุกต์ใช้	6
2.2	ปริมาณรังสีต่างๆที่มีอยู่ในแสงอาทิตย์เทียบกับแสงจากสปอร์ตไลท์	10
2.3	การเปลี่ยนสีของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์โครโมมิคที่เป็นออกไซด์ของโลหะ	10
3.1	ระยะเวลาการดำเนินงาน	21
4.1	แสดงค่าการเปลี่ยนสีของเครื่องวัดสีของสูตร MoO ₃ 95%	43
4.2	แสดงค่าการเปลี่ยนสีของเครื่องวัดสีของสูตร MoO ₃ 98%	43
4.3	แสดงค่าการเปลี่ยนสีของเครื่องวัดสีของสูตร MoO ₃ 99%	44
4.4	แสดงค่าการเปลี่ยนสีของเครื่องวัดสีของสูตร MoO ₃ 99.5%	44
4.5	แสดงค่าการเปลี่ยนสีของเครื่องวัดสีของสูตร MoO ₃ 100%	45
4.6	แสดงค่าการเปลี่ยนสี (ทำเป็นฟิล์ม) ของเครื่องวัดสีของสูตร MoO ₃ 99%	49
4.7	แสดงค่าการเปลี่ยนสี (ทำเป็นฟิล์ม) ของเครื่องวัดสีของสูตร MoO ₃ 100%	49
4.8	ขนาดผลึกของสารเคลือบ โมลิบดินัมและคิวปริสออกไซด์	51
4.9	ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารเคลือบ โมลิบดินัม (MoO ₃) ผสม คิวปริสออกไซด์	53



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบฟิล์มกรองแสงที่วางขายท้องตลาด	5
2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของเอโซเบนซีนซึ่งเกิดผ่านกลไกแบบเอซิส-ทรานส์ ไอโซเมอร์ซึ่งเมื่อได้รับรังสียูวีหรือวิซิเบิล	9
2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของ (ก) สารผสมระหว่างคริสตัลไวโอเลตแลกตอน (crystal violet lactone) และบิสฟีนอลเอ (bisphenol A) ใน 1-เตตราเดคานอล (1-tetradecanol) และ (ข) เมอคิวรี (II) ไอโอไดด์จากรูปผลึกแอลฟาไปเป็นรูปผลึกเบตาเมื่อมีการให้ความร้อน	11
2.4 แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานสารโฟโตโครมิก	12
2.5 โครงสร้างผลึกของ	15
2.6 รังสีดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ	20
2.7 แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานสารโฟโตโครมิก	20
3.1 การสังเคราะห์คิวปริออกไซด์ (Cu_2O)	23
3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์โมลิบดีนัม (MoO_3 , 100%)	24
3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์โมลิบดีนัม ทั้ง 4 อัตราส่วน	24
3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มจากสูตร MoO_3 , 99% และ MoO_3 , 100%	25
3.5 ลักษณะของเตาให้ความร้อน	26
3.6 ลักษณะของเครื่องวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง	26
3.7 ลักษณะของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28
3.8 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM	29
3.9 ลักษณะของเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis)	30
3.10 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	30
3.11 ลักษณะการดูดกลืนแสงตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law)	31
3.12 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องวัดการดูดกลืนแสงแบบ single beam	32
3.13 ลักษณะของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)	33
3.14 ลักษณะของเครื่องวัดสี	34
3.15 ปริมาณสีทุกช่วงความยาวคลื่นจาก 400 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตร	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.16	กราฟแสดงปริมาณสีทุกช่วงความยาวคลื่นจาก 400 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตร	35
3.17	ผลลัพธ์ตัวเลขที่ได้จะเกิดจากการนำองค์ประกอบทั้งสามตัวมาคูณกัน	35
3.18	การกำหนดมาตรฐานลำดับชั้นสีในปัจจุบันนิยมใช้ระบบ CIE 1976 L*a*b (CIELAB) ซึ่งเป็นการกำหนดค่าโคออดิเนตของสีใน 3 มิติ	36
3.19	จะเห็นว่ามีบางจุดอยู่นอกวงรีของการสังเกตวัดสีด้วยสายตามนุษย์ แต่อยู่ในกรอบสีที่หยาบและทำให้เห็นลำดับชั้นสีต่างกัน แต่มีตัวเลขอยู่ในเกณฑ์ผ่าน วิธีการนี้จะมี ความถูกต้องกับความเป็นจริงไม่เกิน 75 %	37
3.20	รูปแบบที่ใกล้เคียงกับวงรีของการสังเกตวัดสีด้วยสายตามนุษย์มากกว่า แต่ยังคงมี จุดที่ลำดับชั้นสีคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง วิธีการนี้มีความถูกต้องกับความเป็นจริงไม่ เกิน 85 %	38
3.21	ลักษณะของเครื่องอัลตราโซนิก	39
3.22	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	40
4.1	ภาพแสดงลักษณะการเปลี่ยนสีของ MoO ₃ ผสม Cu ₂ O ที่เวลาฉายแสงยูวี 0-36 นาที	42
4.2	แสดงการเปลี่ยนสีจากการฉายแสงของสารเคลือบ ด้วยกล่องฉายรังสียูวี (UV-BOX)	46
4.3	ผลการทดสอบการเปลี่ยนสี โดยกล่องฉายรังสียูวี (UV-BOX) ที่นาที่ 0-180	47-48
4.4	แสดงการเปลี่ยนสีในการทำเป็นฟิล์ม จากกล่องฉายแสง	50
4.5	ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของสารเคลือบ โมลิบดินัม (MoO ₃) คิวปรัสออกไซด์ (Cu ₂ O)	51
4.6	ดูคลิกเส้นสเปกตราของสารเคลือบ โมลิบดินัม (MoO ₃) และคิวปรัสออกไซด์ (Cu ₂ O)	52
4.7	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบด้วยอัตราส่วน (MoO ₃ 99% Cu ₂ O 1%)	54

คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ

MoO_3	โมลิบดีนัม
Cu_2O	คิวปรัสออกไซด์
WO_3	ทังสเทนออกไซด์
HNO_3	กรดไนตริก
$\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	แอมโมเนียมเฮปตะโมลิบเดต
$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$	คอปเปอร์อะซิเตต
NH_4VO_4	แอมโมเนียมวานาเดต
CuO	Copper oxide
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
XRD	เครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรกชัน
UV-Vis	เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง
UV-BOX	กล่องฉายแสง ยูวี
PVD	Physical vapor deposition
L	เป็นค่าที่บอกความสว่างของสี
A	เป็นค่าที่บอกความเป็นสีเขียวหรือสีแดง
B	เป็นค่าที่บอกความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน
Δc	อัตราการเปลี่ยนของสีที่เวลาฉายแสง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

เทอร์โมโครมิก (Thermochromic) เป็นสารที่มีคุณสมบัติพิเศษสามารถเปลี่ยนสีได้เมื่ออุณหภูมิของสารเปลี่ยนไป โดยทั่วไปสารเทอร์โมโครมิกมี 2 ประเภทคือ ผลึกเหลว และสารลูโคไดคาย โทนสีที่ปรากฏของผลึกเหลวขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโครงสร้างผลึกที่สะท้อนความยาวคลื่นแสงออกไป ผลึกเหลวที่นำสารเทอร์โมโครมิกมาประยุกต์ใช้ เช่นขวดนมมีรูปเด็กยิ้มสีเขียวเมื่อน้ำดื่มสุกที่ใช้ชงนมมีอุณหภูมิระหว่าง 36-38 องศาเซลเซียส ในขณะที่เมื่อน้ำร้อนเกิน 45 องศาเซลเซียส จะปรากฏรูปเด็กร้องไห้สีแดงแทนผนังเปลี่ยนสวดลาย เมื่อบรรจุหรืออวัยวะอื่นของร่างกายลงบนผนังสักครู่ สีของบริเวณที่สัมผัสจะเปลี่ยนไป ทำให้เกิดสวดลายใหม่ขึ้น [1]

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการวิจัยเกี่ยวกับวัสดุโครมิกมากมายไม่ว่าจะเป็นการสังเคราะห์วัสดุโครมิกชนิดใหม่ขึ้นมาหรือการปรับปรุงวัสดุโครมิกที่มีอยู่แล้วให้มีสมบัติดีขึ้นโดยวิธีทางเคมีหรือกายภาพ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในการนำวัสดุโครมิกเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องการความแปลกใหม่หรือสำหรับการใช้งานเฉพาะทาง โดยพัฒนาวัสดุโครมิกเหล่านี้ให้มีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานด้านนั้นๆ ซึ่งได้แก่ สีที่แสดงทั้งในแง่ของเนื้อสี ความเข้มและหรือความสว่าง อัตราเร็วและความเสถียรในการเปลี่ยนสีความจำเชิงแสง และความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นงาน ซึ่งสมบัติเหล่านี้สามารถถูกควบคุมหรือปรับแต่งโดยการคัดแปลงระดับโมเลกุลหรือการผสมระหว่างสารโครมิกหรือสารอื่นที่เหมาะสม รวมถึงเทคนิคการขึ้นรูปเป็นขึ้นงาน อย่างไรก็ตามในการพัฒนาวัสดุโครมิกนอกจากสมบัติที่โดดเด่นแล้ว ต้นทุนในการผลิตและความยากง่ายในการขึ้นรูปยังเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการผลักดันให้มีการผลิตเชิงพาณิชย์ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [2]

ดังนั้นจากสาเหตุดังกล่าว ผู้จัดทำโครงการงานจึงได้ศึกษาค้นคว้า ทำการทดลองเพื่อให้ได้วัสดุชนิดใหม่ สามารถเปลี่ยนสีได้ เมื่อได้รับความร้อนเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุฉลาดในอนาคต ในด้านเซนเซอร์ วัสดุประหยัดพลังงานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติโฟโตโครมิก หรือเทอร์โมโครมิกของคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโน

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติโฟโตโครมิกหรือเทอร์โมโครมิกของคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) และ โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO_3) ขนาดอนุภาคระดับนาโน

1.3 ขอบเขต

1.3.1 ศึกษาการสังเคราะห์คิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) และ โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO_3) ด้วยวิธีตกตะกอนร่วมให้มีขนาดอนุภาคในระดับนาโน

1.3.2 ศึกษาผลของปริมาณคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) และ โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO_3) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงหรือความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้วัสดุคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) และ โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO_3) ขนาดอนุภาคระดับนาโนที่มีสมบัติเปลี่ยนสี เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์หรือความร้อน

1.4.2 ได้วัสดุคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) และ โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO_3) ที่มีขนาดอนุภาคระดับประยุคต์ใช้สำหรับฟิล์มกรองแสงที่สามารถเปลี่ยนสีได้

1.4.3 ได้ประยุคต์ใช้ในการผสมสีเคลือบแก้ว กระจก หรือในผลิตภัณฑ์สี (Pigment) หรือตัวรับรู้ (Sensor)

บทที่ 2

งานวิจัยและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการใช้สารโด๊ปร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น คอมพอสิต (วัสดุผสม) ของสารประกอบ WO_3 และ MoO_3 ด้วยกันเองหรือ คอมพอสิตสารประกอบอื่นๆ ทำให้สามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานต่ำลง คือ แสงช่วงที่มองเห็น ให้สีที่หลากหลายมากขึ้น เปลี่ยนกลับไป-มาได้เร็วขึ้น วัสดุผสมระหว่าง WO_3 และ MoO_3 [5]

มีการศึกษาการใช้ที่ $92\%\text{WO}_3-8\%\text{MoO}_3$ ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น 1.5 และ 2.7 เท่า ภายใต้บรรยากาศรีเวิร์ค คือ ไอของเอทานอล เมื่อเทียบกับฟิล์ม WO_3 และฟิล์ม MoO_3 บริสุทธิ์ ตามลำดับการพัฒนาเติมสารโด๊ปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สามารถถูกกระตุ้นได้ในแสงช่วงที่มองเห็นสารตัวโด๊ปที่เป็นโลหะ เช่น Au และ Pt [5] สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ฟิล์ม Au หรือ Pt หนา 20 nm บนฟิล์ม MoO_3 หรือ WO_3 เนื่องจาก ชั้นเฟอร์มิ (Fermi level) คือ ระดับพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอน ของทั้งสองอยู่ต่ำกว่าฟังก์ชันงาน (Work function) ซึ่งเป็นพลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะ ของโลหะของทอง (Au) และ แพลตินัม (Pt) ทำให้เกิดกำแพงพลังงานเรียกว่าชอตต์กี แบรีเออร์ (Schottky barrier) ระหว่างรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต เกิดเป็นสนามไฟฟ้าและทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากโลหะมายังสารกึ่งตัวนำ ซึ่งถ้าภายในฟิล์มมีโมเลกุลน้ำก็จะช่วยในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ดีขึ้น [17] แต่เนื่องจากโลหะ Au หรือ Pt มีราคาแพง จึงมีการศึกษาสารโด๊ป Zr ก็สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงในช่วง 900 nm

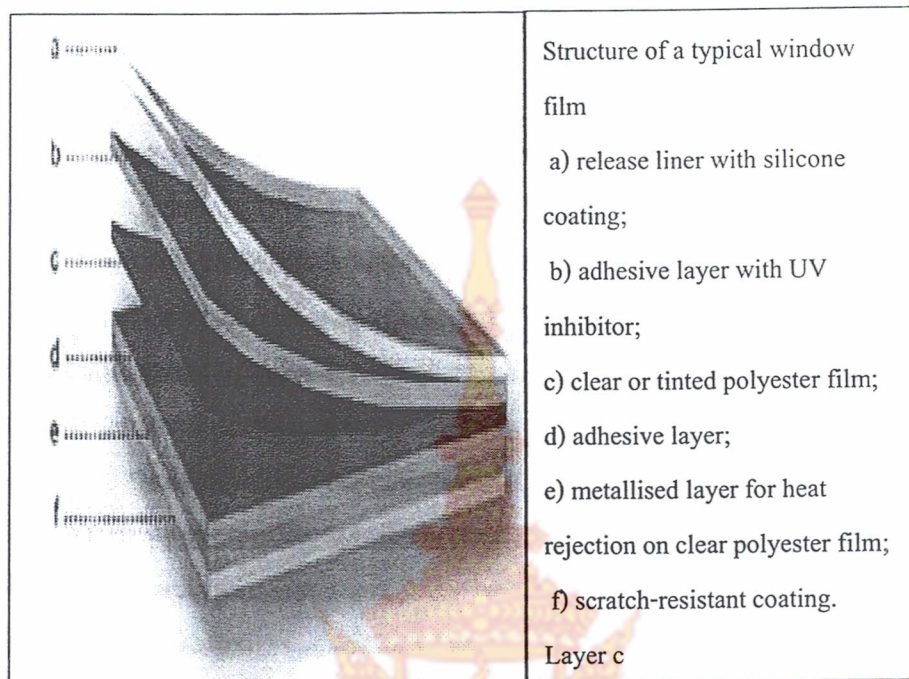
การศึกษาโด๊ปด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแคบ ทำให้สามารถใช้พลังงานแสงช่วงที่มองเห็นที่มีพลังงานต่ำกว่ากระตุ้น เช่น CdSe มีช่องว่างแถบพลังงานเพียง 2.51 eV [15] ที่ไวต่อแสงและอุณหภูมิกระตุ้น อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ของ CdSe ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชันของ MoO_3 และถูกกักไว้ในออกซิเจนวาเลนซ์ของ MoO_3 ในเวลาเพียง 40 นาที สารโด๊ป ZnSe ก็สามารถช่วยเพิ่มสมบัติโฟโต โครมิกของ MoO_3 ได้ดี ซึ่งกลไกคล้ายกันกับ CdSe [18] สารโด๊ประหว่าง CdSe/ TiO_2 / WO_3 [16] สามารถเพิ่มประสิทธิภาพโดยดูดกลืนแสงช่วงน้อยกว่า 500 nm โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ของ CdSe เคลื่อนที่ไปยัง TiO_2 และ WO_3 ตามลำดับ แต่จะชะลอการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนคืนกลับสู่สภาพเริ่มต้นลดลง แต่เนื่องจาก CdSe, ZnSe มีความเป็นพิษทำให้ไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร การศึกษาสารโด๊ปชนิดอื่นๆ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพของฟิล์ม WO_3 ด้วยผสมกับ TiO_2 [19] ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 ประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นในช่วง 900

nm และพบว่า อัตราการเปลี่ยนสีเป็นไปตามลำดับมากไปหาน้อยดังนี้ $a\text{-WO}_3/\text{TiO}_2 > a\text{-WO}_3 > c\text{-WO}_3/\text{TiO}_2 > c\text{-WO}_3$ (a คือ อะมอร์ฟัสฟิล์ม และ c คือ ฟิล์ม โครงสร้างผลึก) [20]

การศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มยูริเทนเรซินที่มีส่วนผสมของ WO_3 ที่ได้ป้ด้วยคอปเปอร์คลอไรด์ (CuCl_2) สามารถช่วยเพิ่มความเข้มในการดูดกลืนสูงสุดที่อัตราส่วน Cu/W เท่ากับ 0.1 [4] ทางเลือกของสาร โด๊ปที่มีสมบัติทางแสงที่สามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงช่วงที่มองเห็นได้เพื่อให้อิเล็กทรอนิกส์ที่ดี เช่น Cu_2O ที่นอกจากไม่เป็นพิษ และราคาถูกแล้ว ยังถูกใช้งานแพร่หลายในงานด้านโฟโตแคตะลิสต์ ซึ่งพบว่า Cu_2O มีประสิทธิภาพด้านโฟโตแคตะลิสต์ดี เมื่อได้ปบนแผ่นนาโน TiO_2 สามารถดูดกลืนแสงช่วงมากกว่า 400 nm [21] และช่วยเพิ่มสมบัติโฟโตแคตะลิสต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงช่วงที่มองเห็นได้ เนื่องจาก Cu_2O มีแถบพลังงานแคบเมื่อเทียบกับ TiO_2 และมีแถบคอนดักชันสูงกว่าจึงเป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่ดีเมื่อถูกแสงกระตุ้น [22], [21] ฟิล์มอะมอร์ฟัส WO_3 ที่ได้ป้ด้วย Cu_2O มีประสิทธิภาพด้านโฟโตแคตะลิสต์ ในการสลาย Orange II สูงกว่าฟิล์มที่ไม่ได้ป้ซึ่งเกิดการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนจากแถบคอนดักชัน Cu_2O ไปขึ้นคอนดักชันของ WO_3 และเกิดหลุมอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ของ Cu_2O [22]

2.2 ทฤษฎี

2.2.1 วัสดุโครมิก (Chromic) คือ วัสดุที่มีสมบัติสามารถเปลี่ยนสีกลับไป-กลับมา ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามกลไกการเปลี่ยนสี ได้หลายแบบ เช่น Halochromism เปลี่ยนสีเมื่อ pH เปลี่ยน, Piezochromism เปลี่ยนสีเนื่องจากแรงอัดทาง Solvatochromism เปลี่ยนสีเนื่องจากเปลี่ยนสภาพขั้วในตัวทำละลาย Halosolvatochromism เปลี่ยนสีเนื่องจากความแข็งแรงไอออน (Ionic strength) เปลี่ยน โดยไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้าง Ionochromism เปลี่ยนสีเนื่องจากการเติมไอออนและที่นิยมในปัจจุบันสำหรับการป้องกันรังสีและความร้อน คือ อิเล็กโทรโครมิก (Electrochromism) เปลี่ยนสีที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า เทอร์โมโครมิก (Thermochromism) เปลี่ยนสีเมื่อถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ และโฟโตโครมิก (Photochromism) เปลี่ยนสีเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงวัสดุอิเล็กโทรโครมิกได้รับความนิยมนสูง เนื่องจากกระจกไม่จำเป็นต้องมีช่องว่างตรงแกนกลางสำหรับบรรจุของเหลว แต่อาศัยการซ้อนกันของขั้วอิเล็กโทรดที่มีแผ่นฟิล์มนำไฟฟ้าที่มีสมบัติเปลี่ยนสีเมื่อได้รับกระแส แต่มีข้อเสียที่ยังคงต้องปิด - เปิด สวิตซ์ ปัจจุบันมีการพัฒนาอนุภาคสารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์ที่มีสมบัติโฟโตโครมิก หรือ เทอร์โมโครมิก ซึ่งสามารถผลิตฟิล์มกรองแสง [8]



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบฟิล์มกรองแสงที่วางขายท้องตลาด [8]

ที่มีสมบัติป้องกันรังสีและความร้อนดวงอาทิตย์ ในขณะที่มีความหนาไม่กี่ปมิลลิเมตร ส่วนประกอบของฟิล์มกรองแสงที่วางขายท้องตลาด ประกอบด้วยชั้นฟิล์มหลายชั้น จากรูปที่ 2.1 ในชั้น b แสดงสมบัติในการป้องกันรังสีและความร้อนดวงอาทิตย์ โดยการฉาบวัสดุ หรือผสมอนุภาคลงในฟิล์ม นอกจากสมบัติข้างต้นแล้วนั้นตัวฟิล์มยังต้องมีสมบัติทนต่อสภาพแวดล้อม สภาพอากาศ ความชื้น การเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตอีกด้วย [8]

ตาราง 2.1 เทคโนโลยีกระจกฉลาดชนิดต่างๆ แบ่งตามวัสดุที่ใช้ผลิต และการประยุกต์ใช้ [8]

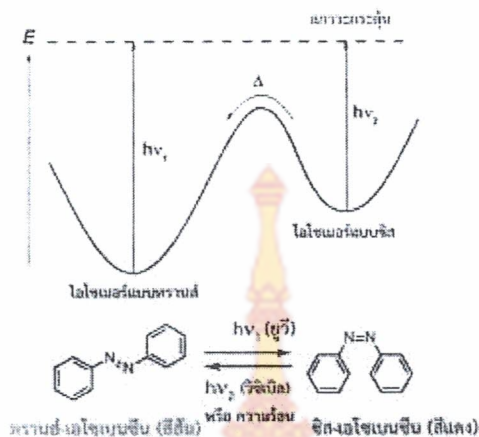
เทคโนโลยี	การประยุกต์	มีการเปลี่ยนแปลง	เริ่มเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องระหว่างที่โปร่งใสและทึบแสง	ต้องใช้พลังงาน
Photocromics or Photocromatics	Color-changing sunglass lenses Supramolecular chemistry -Data storage Novelty Items	การเปลี่ยนแปลงของแสง	Yes	Yes, a light source
Liquid Crystals or Polymer Liquid Crystal	Privacy	Switched on	No	Yes
Suspended Particle Displays	-Architectural -Aerospace -Automotive -Appliances -Eyewear -Eyewear -Displays -Architectural	Switched on	Yes	Yes
Electrochrommics	-Architectural -Automotive -Aerospace -Space Exploration	Switched off	Yes	No

ในศตวรรษที่ 19 มีความสนใจศึกษาสมบัติด้านโฟโตโครมิก (Photochromic) มากมาย โดยเฉพาะที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ ทั้งที่สารประกอบพวกอนินทรีย์มีสมบัติที่ตีความยาก สมบัติความคงตัวต่อความร้อน (Thermal Stability) คือไม่สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนความแข็งแรงต้านทานสารเคมีที่อันตราย และง่ายต่อการผลิตให้อยู่ในรูปแบบต่างๆ เช่น ฟิล์มและอนุภาค เป็นต้น หลังจากศตวรรษที่ 20 ได้ให้ความสนใจสารประกอบอินทรีย์มากขึ้น เช่น Alkali halides, Alkaline earth halides, Alkali metal azides, TiO_2 สารประกอบเกลือของปรอท (Mercury salts) เป็นต้น และมีผลการศึกษาโลหะทรานซิชันออกไซด์ เช่น WO_3 และ MoO_3 เป็นต้น [8]

2.2.2 โฟโตโครมิก (Photochromism) คือ สมบัติของวัสดุที่สามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง การเปลี่ยนสีเกิดจาก 2 กระบวนการ คือ การดูดซับรังสีซึ่งมีพลังงานกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีความเสถียรน้อยกว่า และกระบวนการพลังงานแสงกระตุ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำ ขึ้นไปสู่ระดับพลังงานชั้นที่สูงกว่าและเกิดการให้หรือรับอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาคใกล้เคียงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเลขวาเลนซ์ซึ่งทำให้เกิดสีที่แตกต่างจากเดิมสมบัติบางประการเปลี่ยนไปจากเดิม เช่น ดัชนีการหักเหของแสง (Refractive index), ความสามารถในการละลาย (Solubility), ความหนืด (Viscosity), ความสามารถในการเปียกของพื้นผิว (Surface wettability) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constants) ที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (Polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ เป็นต้น การเปลี่ยนสีสามารถกลับสู่สภาวะเริ่มต้นด้วยการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ (T-Type photochromic) เช่น Azobenzene, Spiropyran และ Diarylethenes เป็นต้น และการกระตุ้นด้วยแสง (P-Type photochromic) เช่น Silver halide เป็นต้น ยังสามารถแบ่งได้อีกเป็น โฟโตโครมิกแบบบวก (Positive photochromic) คือ การดูดซับรังสีซึ่งมีพลังงานกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก ซึ่งพบได้ในโฟโตโครมิกทั่วไป เช่น Spiropyrans เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต จะเปลี่ยนสีจากใส หรือเหลืองอ่อน เป็นสีฟ้าหรือแดง และเปลี่ยนสีกลับสู่สภาวะเริ่มต้นด้วยอุณหภูมิหรือแสง เป็นต้นและโฟโตโครมิกแบบลบ (Negative หรือ Inverse photochromic) คือ การกระตุ้นที่รังสีจะต้องมีความยาวคลื่นมีพลังงานค่าหนึ่งเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสีกลับไปกลับมา เช่น Spiropyran บางชนิด มีสีในที่มืด และใสไม่สีเมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ตกระตุ้น เป็นต้น โดยทั่วไปสารโฟโตโครมิกมี 2 ประเภทคือ [9]

- 1) สารประกอบอินทรีย์ (Organic compounds) ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี
- เกิดปฏิกิริยาเพริไซคลิก (Pericyclic reaction) คือปฏิกิริยาการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนภายในวงแหวนเบนซีนในโมเลกุลทำให้เกิดการแตกออกของพันธะในวงแหวน
 - เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างซิส-ทราน (Cis- trans) โดยการกระตุ้นด้วยแสงเช่น Azo compound, Azines, Tioindigoids เป็นต้น
 - การถ่ายโอนไฮโดรเจนภายในโมเลกุล (Intramolecular hydrogen transfers) Benzylpyridines, Aci-nitrocompound เช่น Salicylates, Triazoles, Oxazoles, Metal dithizonates Perimidinespirohexadienones เป็นต้น
 - การถ่ายโอนหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล (Intramolecular group transfers) เช่น Polycyclic quinines (Periaryloxyparaquinones)
 - กระบวนการช่วย ได้แก่การเกิด Heterolytic cleavage คือ การเปลี่ยนสีที่เกิดการแตกของพันธะชั่วคราวด้วยการกระตุ้นด้วยแสง เช่น Spiropyrans เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต จะเปลี่ยนสีจากใส หรือเหลืองอ่อน เป็นสีฟ้าหรือแดง เป็นต้น Homolytic cleavage คือ การเปลี่ยนสีที่เกิดจากการเกิดพันธะชั่วคราวด้วยการกระตุ้นด้วยแสง เช่น Pyrroles, Hydrazines, Sydnones, Disulfides และ Nitroso dimmers เป็นต้น
 - การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Oxidation-reduction) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งคล้ายกับอิเล็กโตรโครมิก

2) สารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic compounds) หรือสารประกอบออกแกนนอนเมทัลลิก (Organometallic compounds) ได้แก่พวกออกไซด์ โลหะ Alkaline earth metal sulfides, Titanates, mercury compounds, Copper compounds, โลหะทรานซิชัน เช่น Carbonyls, Silver halide เช่น Silver bromide, Silver chloride, Silver iodide เป็นต้นหรือแร่ในธรรมชาติเช่น Hackmanite เป็นต้น วัสดุโลหะออกไซด์ ซึ่งมีสมบัติเปลี่ยนสีได้ เมื่อให้หรือรับอิเล็กตรอนดังตารางที่4เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Oxidation-reduction) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งคล้ายกับอิเล็กโตรโครมิก [8]



รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของเอโซเบนซีนซึ่งเกิดผ่านกลไกแบบเอซิส-ทรานส์ ไอโซเมอร์ ซึมเมื่อได้รับรังสียูวีหรือวิสิเบิล [4]

แสงอาทิตย์เดินทางสู่บรรยากาศโลกในลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Spectrum) โดยมีความยาวคลื่น (Wavelength) ที่แตกต่างกันส่วนที่ที่ตกกระทบมายังพื้นโลกนั้น แบ่งตามความยาวคลื่น ได้ 3 กลุ่ม ดังรูปที่ 3 คือ [9]

- อัลตราไวโอเลต (UV) ทำให้วัตถุสีซีดจาง กรอบแห้ง, ผิวหนังหมองคล้ำ เหี่ยว ย่น และทำให้สายตาเกิดต้อกระจกและทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้ความยาวคลื่นระหว่าง 100-400 nm มีพลังงาน $3 - 10^3 \text{ eV}$ รังสี UV มีส่วนประกอบ 3 ส่วนคือ UV-A, UV-B และ UV-C แตกต่างกันที่ความยาวคลื่น โดย UV-A ความยาวคลื่น 300-400 nm ความยาวคลื่น 100-250 nm สามารถป้องกันด้วยฟิล์มกรองแสงได้เกือบ 100%, UV-B ความยาวคลื่น 250-300 nm เป็นต้นเหตุของมะเร็งผิวหนังแต่สามารถป้องกันได้ด้วยวัสดุป้องกันแสงทั่วไป เช่น กระจกหน้าต่าง เสื้อผ้า เป็นต้น UV-C ความยาวคลื่น 100-250 nm มีอันตรายมากที่สุด ชั้นโอโซนของโลกในชั้นบรรยากาศดูดซับไว้ทั้งหมด
- แสงที่มองเห็นได้ (Visible light) ช่วยให้เกิดการมองเห็นวัตถุมีความยาวคลื่นระหว่าง 380-780 nm มีพลังงาน 2 – 3 eV ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เป็นแสงสีขาวที่ประกอบด้วยแสงสีรวมกัน เรียกว่า มี 7 สี ได้แก่ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม แดง โดยสีม่วงจะมีพลังงานมากที่สุด (ความยาวคลื่นสั้น) และพลังงานจะลดลงเรื่อยๆตามลำดับ จนกระทั่งสีแดงที่มีพลังงานต่ำสุด (ความยาวคลื่นยาว)

- อินฟราเรด (Infrared) ทำให้เกิดความร้อนที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 780 nm มีพลังงาน 0.01 – 2 eV ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

ตาราง 2.2 ปริมาณรังสีต่างๆที่มีอยู่ในแสงอาทิตย์เทียบกับแสงจากสปอร์ตไลท์ [10]

ชนิดของรังสี	แสงแดด	แสงสปอร์ตไลท์
รังสีอุลตราไวโอเลต (100-400 nm.)	3%	น้อยมาก
รังสีอินฟราเรด (700-2,400 nm.)	53%	80-90%
แสงสว่าง (380-780 nm.)	47%	10-20%

ตาราง 2.3 การเปลี่ยนสีของวัสดุเล็กโครโครมิกที่เป็นออกไซด์ของโลหะ [11]
การเปลี่ยนสีของโลหะออกไซด์

Metal	Oxidised form	Reduced form
Cobalt	Pale Yellow	Dark brown
Copper	Black	Red-brown
Iridium	Colourless	Blue-grey
Manganese	Dark brown	Pale yellow
Molybdenum	Colourless	Intense blue
Nickel	Brown-black	Colourless
Tantalum	Colourless	Very pale blue
Tungsten	Very pale yellow	Intense blue
Vanadium	Brown-yellow	Very pale blue

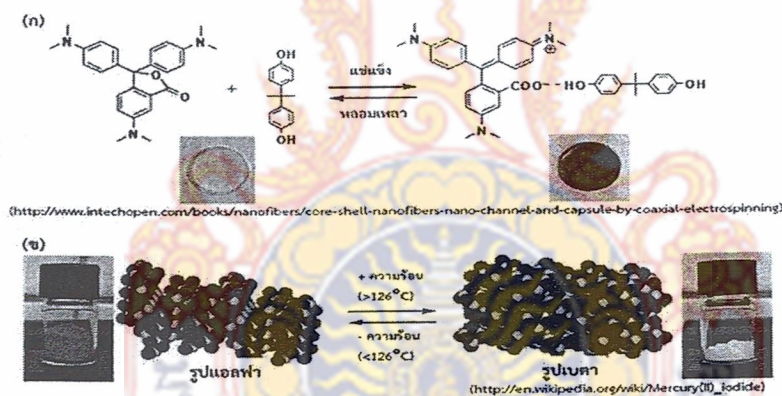
2.2.3 เทอร์โมโครมิก (Thermochromic) คือสมบัติพิเศษของสารที่สามารถเปลี่ยนสีได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงโดยทั่วไปสารเทอร์โมโครมิกมี 2 ประเภทคือ [10]

1) สารประกอบอินทรีย์ (Organic compounds) ได้แก่ ผลึกเหลว (Liquid crystal) เช่น Cholesterylester, สารลูโคดาย (Leuco dye) เช่น Spiropyrans ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้มากที่สุด และ พอลิเมอร์ (Polymer) เช่น Polythiophenes, Polysilanes, Polydiacetylene เป็นต้น

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้แก่

- เกิด Stereoisomerism คือปรากฏการณ์ที่เกิดจากสารมีโครงสร้างและพันธะเหมือนกัน แต่อะตอมหรือกลุ่มอะตอมจัดเรียงตัวในตำแหน่งต่างกันเช่น Bianthrone, Dioxanthylene และ Xanthylidenanthrone เป็นต้น
- เกิดการจัดเรียงตัวโมเลกุล (Molecular rearrangement) ใหม่ เช่น เกิดการแตกออกของพันธะโควาเลนต์ใน Bis-spiropyran ลักษณะมีสีขาว เมื่อให้ความร้อน 60°C ในสารละลาย N-propanol จะเปลี่ยนเป็นสีแดง และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ณ อุณหภูมิ 70°C

ข้อดีของสารเทอร์โมโครมิกที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ (Organic compounds) เกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างรวดเร็วและมีหลายปัจจัยที่ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของ (ก) สารผสมระหว่างคริสตัลไวโอเลตแลคโตน (Crystal violet lactone) และบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) ใน 1-เตตราเดคานอล (1-Tetradecanol) และ (ข) เมอคิวรี (II) ไอโอไดด์จากรูปผลึกแอลฟาไปเป็นรูปผลึกเบตาเมื่อมีการให้หรือลดความร้อน [12]

2) สารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic compounds) ออกไซด์โลหะ เช่น Vanadium oxide (VO_2), Zinc oxide (ZnO), Bismuth oxide (BiO), Copper oxide (CuO) เป็นต้น ไอโอไดด์โลหะ เช่น Mercury (II) iodide เป็นต้นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้แก่

- เกิดการเปลี่ยนเฟส (Phase transition) เช่น Cu_2HgI_4 มีสีแดงที่อุณหภูมิ 20°C เปลี่ยนเป็นสีดำที่อุณหภูมิ 70°C และ VO_2 เปลี่ยนจากโมโนคลินิกเป็นเตตระโกนอลที่ 68°C

- การเปลี่ยนแปลงของลิแกนด์เช่น $(Et_3NH_2)_2CuCl_4$ มีสีเขียวใสที่อุณหภูมิ $20^\circ C$ มีสีเหลืองที่อุณหภูมิ $43^\circ C$
- การลดลงของช่องว่างแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เช่น ZnO ที่มีสีขาวจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น In_2O_3 มีสีเหลืองที่อุณหภูมิต่ำจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองน้ำตาลเมื่อถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูง
- รูปผลึกแตกต่างกันเช่น Cr_2O_3 - Al_2O_3 มีสีแดงที่อุณหภูมิ $20^\circ C$ และมีสีเทาที่อุณหภูมิ $400^\circ C$
- การเปลี่ยนค่าเลขโคออดิเนชัน เช่น Isopropanolic $CoCl_2$ โครงสร้างผลึกเป็นออกตระฮีดรอลมีสีชมพูที่อุณหภูมิ $20^\circ C$ และเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ที่อุณหภูมิ $75^\circ C$ โครงสร้างผลึกเป็น tetrahedral ออกไซด์โลหะหลายชนิดเช่น Ta_2O_5 , ZnO , NiO , MoO_3 เป็นต้น แต่เนื่องจาก Ta_2O_5 , ZnO , NiO มีระดับช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างประมาณ $3.7 eV$ ทำให้ต้องใช้พลังงานกระตุ้นสูง แสงอาทิตย์มีพลังงานประมาณ $1.7-3.1 eV$ ซึ่งไม่เพียงพอในการกระตุ้น แต่ WO_3 และ MoO_3 ที่มีระดับช่องว่างแถบพลังงานที่แคบกว่า คือประมาณ $3.0-3.2 eV$ ทำให้มีสมบัติเปลี่ยนสีเมื่อกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตได้



รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานสารโฟโตโครมิก [2]

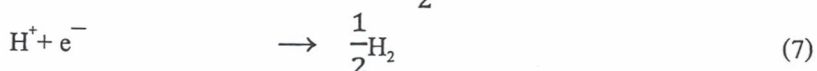
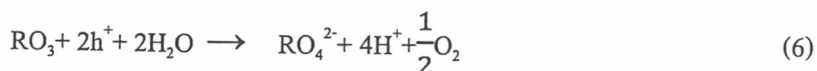
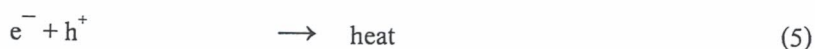
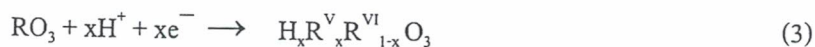
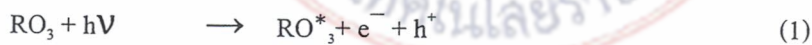
2.2.4 โมลิบดีนัมไดรออกไซด์ (MoO_3) มีสมบัติพิเศษที่สามารถเปลี่ยนสีได้หลายกรณีคือเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงภายใต้สถานะก๊าซที่มีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน กระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตหรือการให้กระแสไฟฟ้า ทำให้เปลี่ยนสีจากสีขาว หรือใส เป็น สีฟ้าเข้ม แต่พบว่าสมบัติโฟโตโครมิกและเทอร์โมโครมิกเปลี่ยนสีกลับใช้เวลานาน หลังจากหยุดกระตุ้นด้วย

แสง หรือใช้อุณหภูมิตั้ง 300 °C ในการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสีภายใต้สภาวะอากาศกระบวนการโฟโตโครมิกของ WO_3 และ MoO_3 สามารถอธิบายได้ 2 แบบ คือ

1) Double insertion/extraction ของไอออน และ Electrons and intervalence-charge transfer model อธิบายการเปลี่ยนสีในอเล็กโทโรโครมิกที่สามารถใช้ได้กับโฟโตโครมิก ซึ่งใน MoO_3 มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยเมื่ออนุภาคถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตซึ่งมีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานของ MoO_3 ($h\nu > E_g$) เกิดการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์เบนไปสู่อิเล็กตรอนที่ต่ำกว่าคือแถบคอนดักชันเบนเกิดหลุมอิเล็กตรอน (Holes) ที่วาเลนซ์เบนดังสมการที่ 1 และถ้าหากมีโมเลกุลน้ำในโมเลกุลหลุมอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2 ทำให้โฟตอนที่เกิดขึ้นแพร่เข้าสู่โครงสร้างของ MoO_3 เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในฟิล์มดังสมการที่ 3 และทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนชั้นคอนดักชันเบนในโครงสร้างเกิดไฮโดรเจนบรอนซ์ (Hydrogen bronze, $\text{H}_x\text{R}^{\text{V}}\text{R}^{\text{VI}}_{1-x}\text{O}_3$) ที่ภายในโมเลกุลประกอบด้วยส่วนที่มีวาเลนซ์ 6+ (R^{VI}) และส่วนที่รับอิเล็กตรอนทำให้วาเลนซ์เป็น 5+ (R^{V}) ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีฟ้าเข้มขึ้น แต่ออกซิเจนเรดิคัล ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับน้ำเข้าไปอยู่ในช่องว่างในผลึก (Vacancy) หรือรวมกันเป็นก๊าซออกซิเจนระเหยออกไป

2) โมเดลการดูดซับของโพลารอน (Small-polaron absorption model) อธิบายเกี่ยวกับการกระโดดของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในสภาพการมีออกซิเดชันแตกต่างกันพบได้ง่ายในสารประกอบกลุ่มออกไซด์ของพวกโลหะทรานซิชัน จากที่มีความหนาแน่นสูงไปบริเวณข้างเคียงซึ่งมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่ำกว่าเมื่อโมเลกุลได้รับอิเล็กตรอนทำให้ระดับพลังงานชั้นเฟอร์มิสูงขึ้นประกอบกับความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างอะมอร์ฟัส (Amorphous) เช่น ใน MoO_3 เมื่อเกิดการกระโดดของอิเล็กตรอน อะตอมที่ได้รับอิเล็กตรอนทำให้วาเลนซ์เป็น 5+ (R^{V}) เปลี่ยนสีเป็นสีฟ้าเข้มขึ้น และอะตอมที่ให้อิเล็กตรอน 6+ แสดงดังสมการที่ 4 [5]

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง



เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างอะมอร์ฟัส และผลึก พบว่าโครงสร้างที่เป็นผลึกมีการเปลี่ยนแปลงสีและการสะท้อนกลับในช่วงอินฟราเรดน้อยกว่าโครงสร้างที่เป็นอะมอร์ฟัส ถึงแม้ว่าสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อโครงสร้างมีความเป็นระเบียบมากขึ้น แต่โครงสร้างอะมอร์ฟัสที่มีความไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดช่องว่าง (Void) และโมเลกุลของน้ำสามารถแทรกอยู่ในช่องว่างนั้น ซึ่งมีส่วนช่วยในกระบวนการเปลี่ยนสีและให้ความเข้มสีมากกว่าโครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบ [14]

จากตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณรังสีที่มีอยู่ในแสงอาทิตย์พบว่า รังสีอัลตราไวโอเล็ตมีปริมาณน้อยมากเพียง 3% โดยส่วนใหญ่เป็นรังสีอินฟราเรดหรือความร้อนและแสงที่มองเห็นได้ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่าทำให้เป็นการยากที่จะใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสี ทำให้สาร WO_3 และ MoO_3 เพียงชนิดเดียวแสดงสมบัติด้านโฟโตโครมิกได้ไม่ดีเท่าที่ควร ประสิทธิภาพด้านการเปลี่ยนสี

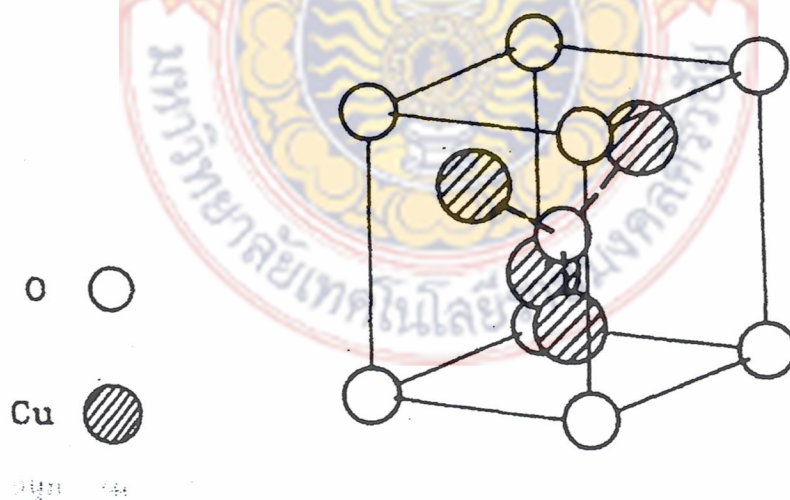
2.2.5 กระบวนการ โมลิบดีนัมไดรอกไซด์ (MoO_3) WO_3 และ MoO_3 เกิด 2 กระบวนการ ซึ่งคล้ายกันกับกระบวนการเกิดโฟโตโครมิก คือ เมื่อทำให้ MoO_3 มีอุณหภูมิสูงขึ้น $350^{\circ}C$ และ $100^{\circ}C$ ในสุญญากาศตามลำดับอนุภาคถูกรีดิวซ์ ซึ่งจากการศึกษาด้วย XPS พบว่าเลขออกซิเดชันในโมเลกุล 6+ ลดลงเหลือ 5+ และ 4+ อิเล็กตรอนถูกจับด้วยออกซิเจนวาเลนซ์ ทำให้เปลี่ยนเป็นสีฟ้าเข้ม ดังสมการที่ 4 และเกิดการกระโดดของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในสภาพการมีออกซิเดชันแตกต่างกันไปบริเวณข้างเคียง การเปลี่ยนสีกลับทำได้โดยการให้ความร้อนในบรรยากาศออกซิเจนทำให้เกิดออกซิเดชัน เลขออกซิเดชันในโมเลกุล 6+ และอนุภาคเปลี่ยนเป็นสีขาวที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ [23],[24] การพัฒนาสมบัติเทอร์โมโครมิก MoO_3 สามารถทำได้โดยการได้ปคอมพอสิต (วัสดุผสม) ของสารประกอบ WO_3 และ MoO_3 คอมพอสิตของสารประกอบอื่นๆ เช่นเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มอะมอร์ฟัสผสมระหว่าง WO_3/MoO_3 จะเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสง และที่ $400^{\circ}C$ มีผลในการจัดเรียงโครงสร้างผลึกใหม่ ทำให้ช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap, E_g) ก่อนและหลังเผาตกลงจากเดิมโดยในฟิล์มผสมลดลงจาก 3.23 เหลือเพียง 2.9 eV [25] การได้ปสารสามารถลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสี สารได้ป เช่น 5%ZnSe พบว่า มีสมบัติเทอร์โมโครมิกของ MoO_3 ที่อุณหภูมิสูงสุด $125^{\circ}C$ สามารถดูดกลืนแสงสูงกว่าฟิล์มที่ไม่ได้ป [18]

2.3 กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโน

1) โมลิบดีนัมไดรอกไซด์ (MoO_3) [26], [5] เป็นโลหะทรานซิชันที่เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ชนิดเอ็น (n-type) มีช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap, E_g) ประมาณ 3.0 ถึง 3.4 eV และระดับชั้นพลังงานเฟอร์มิ (Fermi level, E_F) อยู่ในช่วง 4.3–4.9 eV มีสมบัติโฟโตโครมิก

(Photochromic),เทอร์โมโครมิก (Thermochromic) และอิเล็กโตรโครมิก (Electrochromic) โครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ (Perovskite) ประกอบด้วย อะตอมออกซิเจน 6 อะตอม จับกันแบบ ออกตะฮีดรอล ที่ช่องว่างถูกแทนที่ด้วยอะตอม W สำหรับ WO_3 หรืออะตอม Mo ใน MoO_3 และแต่ละหน่วยเซลล์เชื่อมต่อกันโดยใช้ออกซิเจนที่ขอบ หรือ มุมร่วมกัน WO_3 และ MoO_3 มีโครงสร้างผลึกได้หลายแบบ (Polymorphism) WO_3 มีโครงสร้างผลึกเป็น Monoclinic II (ϵ - WO_3 , $< -43^\circ C$) \rightarrow Triclinic (δ - WO_3 , $-43^\circ C$ ถึง $17^\circ C$) \rightarrow Monoclinic I (γ - WO_3 , $17^\circ C$ ถึง $330^\circ C$) \rightarrow Orthorhombic (β - WO_3 , $330^\circ C$ ถึง $740^\circ C$) \rightarrow Tetragonal (α - WO_3 , $> 740^\circ C$) [27] ส่วน MoO_3 มีโครงสร้างผลึกเป็น monoclinic เปลี่ยนเป็นออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) อุณหภูมิประมาณ $300^\circ C$ และช่องว่างแถบพลังงานลดลง

2) คิวปรัสออกไซด์ (Copper (I) oxide, Cu_2O) [28] สารประกอบอนินทรีย์ มีลักษณะผงสีแดงที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี (p-type) ช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap, E_g) ต่ำ ประมาณ 2.0-2.2 eV ทำให้สามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงช่วงที่สามารถมองเห็นเพื่อให้อิเล็กตรอน โครงสร้างผลึกเป็นคิวบิก (Cubic) ค่าคงที่ผลึก (Lattice constant) เท่ากับ 4.2696 Å อะตอมทองแดง จัดเรียงตัวแบบ Face center cubic (FCC) ดังรูปที่ 4 ที่มีออกซิเจนบริเวณขอบแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) การเกิดออกซิเดชัน Cu_2O ทำให้ช่องว่างแถบพลังงานลดลง



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของ Cu_2O [28]

การประยุกต์ใช้งาน, MoO_3 และ Cu_2O ใช้เป็นส่วนประกอบในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cell) ขั้วแอโนด ใน Li-battery ถูกใช้เป็นสารตัวเร่งที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง (Photocatalyst) ตัวเร่งในการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดในกระบวนการต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือเกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม่สมบูรณ์ในรถยนต์ ตัวเร่งในการสลายตัวของน้ำ ได้ผลิตผลเป็น ก๊าซไฮโดรเจน และ ก๊าซออกซิเจนตัวเพิ่มคุณภาพผิวสำหรับใยแสง (Optics) ตัวเร่งในอุตสาหกรรมโพลีเอทิลีน Cu_2O ใช้เป็นสีสำหรับทาห้องเรือเพื่อป้องกันเพรียงทะเลเกาะ และยังมีสมบัติยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้อีกด้วย

3) กระบวนการ โมลิบดีนัมไดออกไซด์ (MoO_3) และ คิวปริคออกไซด์ (Cu_2O) ขนาดนาโนเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคในระดับนาโนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการ คือ

- กระบวนการสร้างจากใหญ่ไปเล็ก (Up - bottom process) เป็นกระบวนการผลิตวัสดุนาโน โดยการลดขนาดลงจนได้วัสดุที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตร ได้แก่ การบดโดยใช้แรงทางกล (Mechanical ball milling) เป็นกระบวนการบดและผสมวัสดุเข้าด้วยกัน ภายในหม้อบดรูปทรงกระบอกที่บรรจุลูกบด และสารที่ต้องการบดเอาไว้ได้อนุภาคขนาดเล็ก แต่มีข้อเสียคือใช้เวลานาน และมีการปนเปื้อนได้ง่าย วิธีใช้ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) กระบวนการที่ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการสังเคราะห์ ซึ่งลักษณะอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ขึ้นกับกระแสไฟฟผลิตได้ในปริมาณน้อยต่อครั้ง
- กระบวนการสร้างจากเล็กไปใหญ่ (Bottom - up process) คือ กระบวนการผลิตวัสดุนาโน โดยการจัดเรียงอะตอม โมเลกุล หรือการเตรียมโดยปฏิกิริยาเคมีเพื่อสังเคราะห์วัสดุที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตร ข้อดีของกระบวนการนี้คือ สามารถทำได้ง่ายกว่า กระบวนการสร้างจากใหญ่ไปเล็ก วิธีการเคลือบหรือตกไอระเหยทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition, PVD) ใช้กระบวนการทางฟิสิกส์เพื่อทำให้สารตั้งต้นในลักษณะที่เป็นของแข็งหรือผงกลายเป็นไอและควบแน่นตกสะสมบนชิ้นงาน เช่น สเปคเตอรริง (Sputtering) ลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam) เลเซอร์ (Laser irradiation) เป็นต้น ซึ่งสามารถควบคุมส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ ลักษณะอสัณฐาน ขนาด ความเป็นผลึก ได้จากการควบคุมกระบวนการสังเคราะห์ กระบวนการมีเพียงขั้นตอนเดียว ทำให้ได้ความบริสุทธิ์สูง สามารถผลิตฟิล์มที่มีความหนาแน่นดี หรือ ผลิตท่อนาโนได้ แต่มีข้อเสียที่ขั้นตอนค่อนข้างยุ่งยาก ต้นทุนสูง ผลิตได้ต่อครั้งไม่มาก ใช้เวลานาน

และเกิดไอระเหยที่เป็นพิษ หรือไอระเหยกรดจากกระบวนการเป็นอันตรายต่อร่างกาย กระบวนการใช้ไอระเหยทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) กระบวนการสังเคราะห์ อนุภาคนาโนของโลหะ และออกไซด์ของโลหะ หรือแผ่นฟิล์มที่มีอนุภาคระดับนาโนที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยสารตั้งต้น ถูกแยกสลายกลายเป็นไอ ก่อนที่จะทำให้เกิดการรวมตัวกันและควบแน่นให้ไอของสารตั้งต้นดังกล่าวกลายเป็นสถานะของของเหลว ที่ อุณหภูมิ และความดันภายใต้บรรยากาศของก๊าซ เช่น ก๊าซไนโตรเจน ทำให้เกิดนิวเคลียสจำนวนมาก นิวเคลียสเกิดการเติบโต ในขั้นตอนนี้จะเกิดออกไซด์ของโลหะโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในบรรยากาศที่มี ก๊าซออกซิเจนผสม นิวเคลียสเกิดการเติบโตและรวมตัวกันกลายเป็นอนุภาคนาโน และดักเก็บ หรือ ปล่อยให้อนุภาคเคลือบบนพื้นผิวที่ต้องการ เกิดเป็นฟิล์มบางๆแต่กระบวนการยุ่งยาก อุปกรณ์ เครื่องมือมีราคาแพง ใช้อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้เกิดการระเหยถึงแม้ในปัจจุบัน วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis) และวิธีเฟรมสเปรย์ไพโรไลซิส (Flame spray pyrolysis) เป็นวิธีที่ทำให้หยดของเหลวของสารตั้งต้นกลายเป็นของแข็งโดยใช้ความร้อนโดยการระเหยตัวทำละลายทำให้เกิดการควบแน่นการสลายตัวเกิดปฏิกิริยาของตัวถูกละลายและเกิดการรวมตัวกันสามารถผลิตอนุภาคนาโน แต่ใช้อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้เกิดการระเหย และเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดคราบเขม่าเกาะบริเวณผิวอนุภาควิธีที่ทำให้หยดของเหลวของสารตั้งต้นกลายเป็นของแข็งโดยใช้ความร้อนการสังเคราะห์ด้วยจากเฟสของเหลวเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเนื่องจากต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่า ผลิตได้ในปริมาณมาก สามารถควบคุม โครงสร้างอัญฐาน ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับสังเคราะห์ด้วยจากเฟส ไอระเหยอุณหภูมิในการสังเคราะห์ไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือมีความบริสุทธิ์น้อยกว่าสังเคราะห์ด้วยจากเฟสไอระเหย และอนุภาคที่สังเคราะห์ได้อาจเกิดการเกาะกัน (Agglomeration) วิธีสังเคราะห์ด้วยจากเฟสของเหลว เช่น โซล-เจล (Sol-Gel) ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) การตกตะกอน (Precipitation) เป็นต้น โซล-เจล เป็นเทคโนโลยีการผลิตอนุภาคนาโนที่ทำได้ที่อุณหภูมิห้อง สามารถทำได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรมสังเคราะห์อนุภาคที่มีขนาดนาโนเมตรได้ที่อุณหภูมิต่ำ สารตั้งต้นราคาไม่แพง สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ในตัวทำละลาย เรียกว่า โซล ซึ่งสามารถจุ่มเคลือบเพื่อทำฟิล์มบาง หรือ ตกตะกอน

เพื่อผลิตผงที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตรได้ วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method) กระบวนการสังเคราะห์ที่ ต้องอาศัยการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง โดยใช้ความดันภายในระบบปิดหม้อปฏิกิริยาที่ควบคุมความดันและใช้เวลานาน

4) การตกตะกอน (Precipitation) [29] การตกตะกอนเป็นวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยวิธีทางเคมีสารละลายที่สามารถทำได้ง่าย กระบวนการไม่ซับซ้อน สารเคมีราคาไม่แพงและสามารถผลิตได้ในโรงงานอุตสาหกรรม สารที่สังเคราะห์ได้อยู่ในรูปของคอลลอยด์ (Colloid) ในสารละลาย ซึ่งจะต้องทำการกรองอนุภาค กลไกการควบคุมขนาดให้อยู่ในระดับนาโนเมตร ทำได้โดยควบคุมปริมาณสารตั้งต้นปฏิกิริยา อุณหภูมิ การสังเคราะห์โดยจำกัดขนาดให้อยู่ภายในหยดไมเซลล์ (Micells) หรือเติมสารที่เรียกว่า Capping agent ป้องกันการเกิดรวมตัวกัน (Agglomeration) ของอนุภาค

2.4 ขั้นตอนการตกตะกอน

2.4.1 สารละลายอิ่มตัววดยิ่ง (Supersaturated solution) การเติมสารตั้งต้นมากเกินไปความสามารถในการละลายได้ที่อุณหภูมิหนึ่ง เกิดสารละลายอิ่มตัววดยิ่ง (Supersaturated solution) ระบบมีพลังงานมากขึ้น

2.4.2 การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) สารละลายอิ่มตัววดยิ่ง ลดอุณหภูมิลง และปรับพีเอช (pH) เกิดนิวเคลียส (Nuclei) และเกิดนิวเคลียสขึ้น

2.4.3 การเติบโตของนิวเคลียส (Growth) เพื่อลดพลังงานในระบบ เข้าสู่ความเสถียร เป็นอนุภาคคอลลอยด์ (Colloid) เกิดการจับกลุ่มก้อนของอนุภาค (Agglomeration) หรือ รวมเป็นเนื้ออนุภาคเดียวกัน (Ostwald ripening) ขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อลดพลังงานผิว (Surface energy)

2.4.4 สารตั้งต้นมีผลต่อเฟสและลักษณะอัญฐานแตกต่างกัน เนื่องอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันความเข้มข้นสารตั้งต้นสูง อนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่

2.4.5 ตัวทำละลายมีผลต่อลักษณะอัญฐาน ตัวทำละลายแต่ละชนิดมีสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันตัวทำละลายที่ดีจะต้องสามารถทำละลายได้โดยไม่ขึ้นกับเงื่อนไขปฏิกิริยา ละลายสารตั้งต้นได้หมด มีจุดเดือดที่เหมาะสมสำหรับระบบที่ต้องใช้ความร้อน และกำจัดได้ง่ายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ

2.4.6 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) มีผลต่อขนาดอนุภาคจะถูกดูดซับบนผิวทำให้อัตราการโตของอนุภาคลดลงเนื่องจากขัดขวางการรวมตัวกันของอนุภาค

2.4.7 พีเอช (pH) มีผลต่อขนาดสารบางชนิดละลายได้ดีและตกตะกอนที่ pH แตกต่างกัน การสังเคราะห์ MoO_3 สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยกรดไนตริกเข้มข้น สาร

ตั้งต้น เช่น Ammonium heptamolybdate ซึ่งสามารถสังเคราะห์อนุภาค MoO_3 ขนาด 12-14 nm ปริมาณสารตั้งต้น อุณหภูมิมีผลต่อลักษณะอัญฐานของอนุภาคเช่น อุณหภูมิ 30 °C และความเข้มข้น 0.07 M, 0.10 M สารตั้งต้นได้โครงสร้างที่เรียกว่า Supramolecular structure (Mo_3O_{11}) ในขณะที่สารตั้งต้น 0.14 M และอุณหภูมิสังเคราะห์ 50 °C ได้โครงสร้าง เฮกซะโกนอล (Hexagonal- MoO_3) เป็นผลมาจากความสามารถในการละลายของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น [30] การใช้สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) สามารถลดขนาดอนุภาคและทำให้ได้โครงสร้างอัญฐานแตกต่างกัน เช่น ยูเรียให้อนุภาคที่สังเคราะห์ขนาดนาโน และลักษณะค่อนข้างกลม ในขณะที่ EDTA, PEG200 และ Sorbitol ให้ผงรูปทรงแท่ง (Rod) ปริมาณสารตั้งต้นอุณหภูมิ และ pH มีผลต่อขนาดที่โตขึ้นและรูปร่างเป็นแท่งมากขึ้นของผลิตภัณฑ์[30]การสังเคราะห์อนุภาคนาโน Cu_2O ด้วยวิธีการตกตะกอนโดยใช้ Copper acetate, NaOH, น้ำ, กรดเอสโครบิก หรือวิตามินซี ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) และ Poly vinylpyrrolidone (PVP) [31] สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโน Cu_2O ที่ดูดกลืนแสงช่วง 500 nm ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.25 mmol โดยเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคโต เมื่อปริมาณ PVP ปริมาณมากขึ้นทำให้อนุภาคมีรูปร่างเป็นลูกบาศก์มากขึ้นอุณหภูมิการสังเคราะห์ ที่ 30°C อนุภาคมีลักษณะทรงกลมขนาด 100 nm ขนาดลดลง และ เมื่อใช้อุณหภูมิการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจะได้อนุภาครูปทรงลูกบาศก์

2.5 การประยุกต์ใช้

2.5.1 เทคโนโลยีกระจกฉลาด (Smart windows technologies) เทคโนโลยีกระจกเพื่อป้องกันรังสี และความร้อนจากดวงอาทิตย์ เพื่อการประหยัดพลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องปรับอากาศ และแสงสว่าง และลดค่าไฟฟ้า ซึ่งเมื่อเทียบสัดส่วนแล้วพบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในที่พักอาศัย ถูกใช้สำหรับเครื่องปรับอากาศ และแสงสว่าง เป็นหลัก การประยุกต์ใช้กระจกฉลาด เช่น กระจกประตูหน้าต่าง สำหรับอาคาร บ้านเรือน รถยนต์ หรือแม้กระทั่งสำหรับยานอวกาศ วัสดุที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีกระจกฉลาดในปัจจุบันได้แก่ ผลึกเหลวและพอลิเมอร์ผลึกเหลว (Liquid crystal and polymer liquid crystal) โดยปกติผลึกเหลวจะแขวนลอยกระจายตัวในของเหลวทำให้เกิดการบดบังแสง แต่เมื่อให้สนามไฟฟ้าผลึกเหลวจะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบไปในทิศทางเดียวกันทำให้แสงแดดสามารถผ่านเข้ามาทางกระจกได้การแขวนลอยผงอนุภาคเงิน (Silver particle dispersion, SPD) อนุภาคเงินขนาดเล็กที่แขวนลอยกระจายตัวในสารละลาย ซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายกับผลึกเหลวและพอลิเมอร์ผลึกเหลว คือเมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าอนุภาคกระจายทั่วทั้งสารละลายจะบดบังแสง เมื่อให้กระแสไฟฟ้าอนุภาคจะเกิดการจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบทำให้แสงสามารถทะลุผ่านได้ข้อเสียของกระจกที่ผลิตด้วยผลึกเหลว และอนุภาคแขวนลอย กระจกจะมีความหนาเนื่องจาก

ต้องบรรจุของเหลวที่มีอนุภาคแขวนลอยภายใน และต้องปิด – เปิด สวิตช์ เพื่อทำให้เกิดการจัดเรียงตัวผลึก ดังแสดงในตารางที่ 2 [8]



รูปที่ 2.6 รังสีดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ [11]

การประยุกต์ใช้งาน: เลนส์ปรับแสง อุปกรณ์ตรวจจับยูวี फिल्मกรองแสงสำหรับอาคารและยานพาหนะ แผ่นดิสก์หรือการ์ดสำหรับเก็บและแสดงข้อมูล เม็ดสีสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติก สิ่งทอ และกระดาษ องค์ประกอบในเครื่องสำอาง ของเล่น เป็นต้น



รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานสารโฟโตโครมิก [11]

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินโครงการมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์สารเคลือบ โมลิบดินัม ออกไซด์ (MoO_3) และ ผงคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) เพื่อนำไปเคลือบบนกระจก ทำการเปรียบเทียบกับแต่ละอัตราส่วน ทดลองทั้งหมด 5 อัตราส่วน คือ MoO_3 , 95 เปอร์เซ็นต์, MoO_3 , 98 เปอร์เซ็นต์, MoO_3 , 99 เปอร์เซ็นต์, MoO_3 , 99.5 เปอร์เซ็นต์, MoO_3 , 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องได้แก่ เครื่องวัดสี (Color meter), UV-BOX, UV-VIS และ SEM หาอัตราส่วนที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

การศึกษาระบวนการเตรียมสารเคลือบผิว การทดลอง ตลอดจนทดสอบ และ ผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

ตาราง 3.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	(มกราคม 2558-สิงหาคม 2558) ปี 2558							
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
1.ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	←-----→							
2.เตรียมวัสดุ อุปกรณ์	←-----→							
3.ศึกษาการสังเคราะห์ Cu_2O / MoO_3 ผลของสัดส่วนผสมต่อสมบัติด้าน โฟโต-เทอร์โมโครมิก		←-----→						
4.ศึกษาผลของสาร Cu_2O ต่อสมบัติด้าน โฟโต-เทอร์โมโครมิก			←-----→					
5.วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง						←-----→		

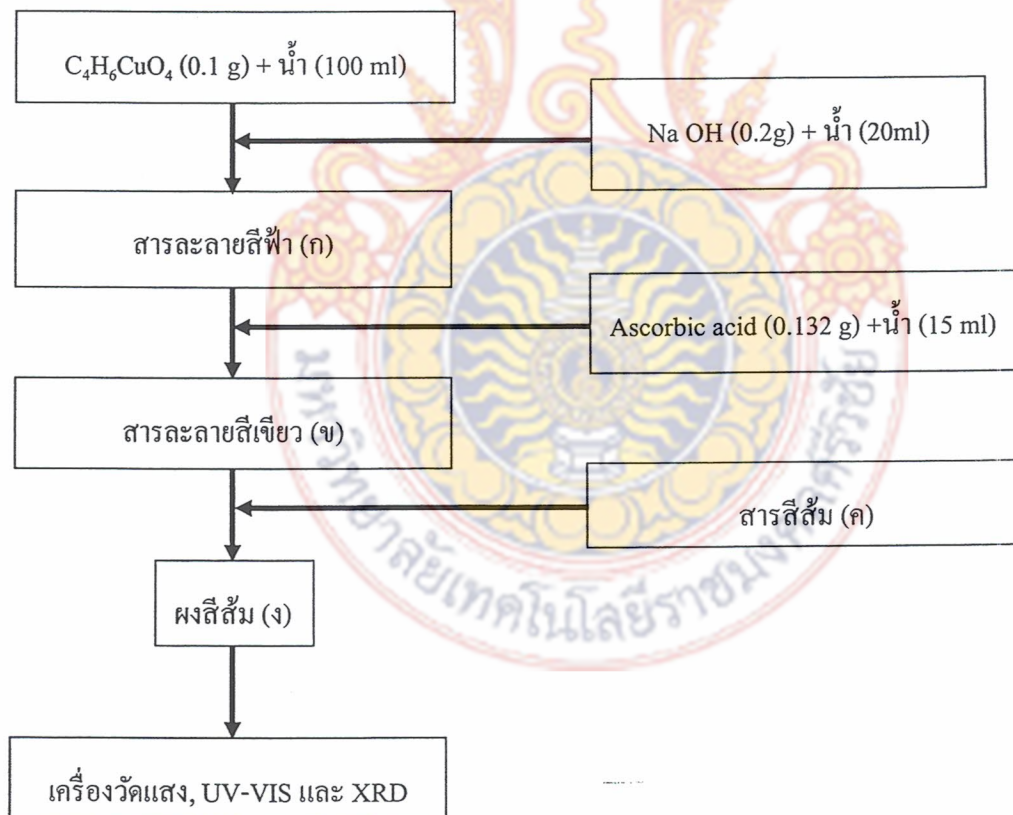
หมายเหตุ แสดงแผนการดำเนินงาน ←-----→

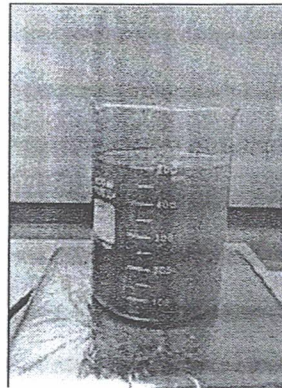
 แสดงการดำเนินงานจริง ←-----→

3.2 ขั้นตอนและการวิธีดำเนินงาน

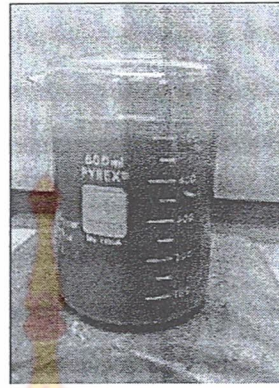
สังเคราะห์คิวปรัสออกไซด์ออกไซด์ (Cu_2O) และ โมลิบดินัมออกไซด์ (MoO_3) ด้วยวิธีตกตะกอนร่วมโดยอัตราส่วน Cu_2O ต่อ MoO_3 ที่แตกต่างกัน (Cu_2O 0.05% MoO_3 0.95%), (Cu_2O 0.02% MoO_3 0.98%), (Cu_2O 0.01% MoO_3 0.99%), (Cu_2O 0.005% MoO_3 0.995%), (Cu_2O 0.0% MoO_3 100%) (รูปที่ 3.1) ให้มีขนาดอนุภาคในระดับนาโน และศึกษาสมบัติโฟโตโครมิก (Photochromic) และเทอร์โมโครมิก (Thermochromic) โดยกระตุ้นด้วยแสงหรือความร้อน ทดสอบวัดค่าการดูดกลืนแสง ความเข้มสีที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเทคนิค เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) และเครื่องวัดสี (Color Measuring) ศึกษาโครงสร้างอัญฐานด้วย เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD: X-ray Diffraction) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM: Electron microscope)

3.2.1 ขั้นตอนการทดลองการสังเคราะห์ คิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O)





(ก) สารละลายสีฟ้า



(ข) สารละลายสีเขียว



(ค) สารสีส้ม

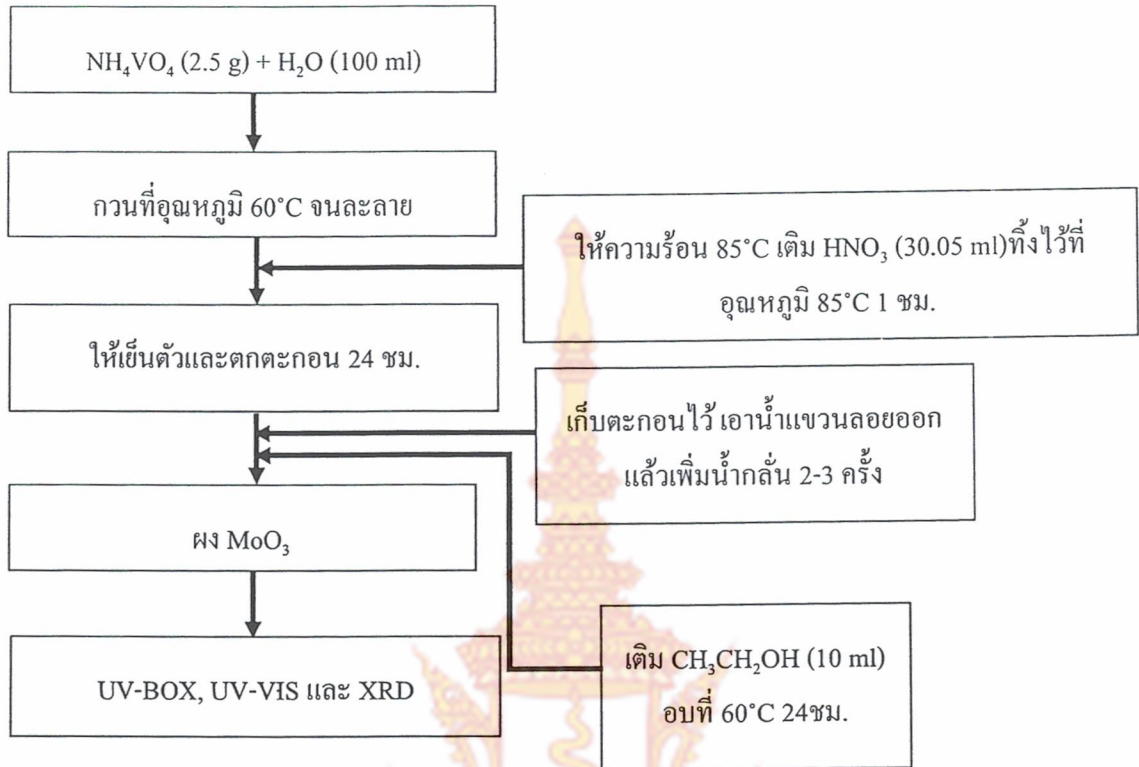


(ง) ผงสีส้ม

รูปที่ 3.1 การสังเคราะห์คิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O)

3.2.2 ขั้นตอนการทดลอง การสังเคราะห์โมลิบดีนัม (MoO_3 , 100%)

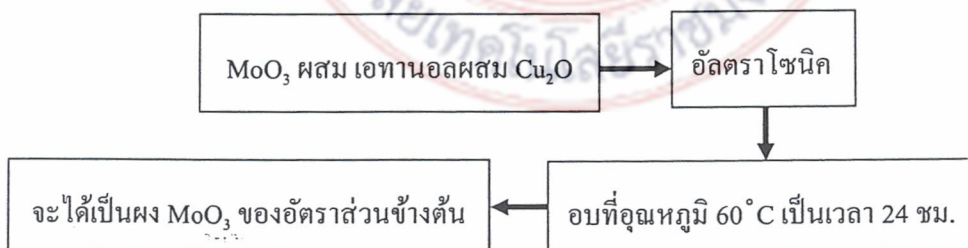
นำ NH_4VO_4 ปริมาตร (2.5 g.) ผสมกับน้ำกลั่น ปริมาตร (100 ml) ทำให้ละลายที่ อุณหภูมิ 60°C ใช้เวลา 30 นาทีจนละลาย (รูปที่ 3.2) ให้ความร้อนที่ 85°C เติมกรดไนตริก (HNO_3) ปริมาตร (30.05 ml) ที่ไว้ที่อุณหภูมิ 85°C ใช้เวลา 1 ชั่วโมง รอให้เย็นตัว แล้วตกตะกอน 24 ชั่วโมง เติมน้ำที่เป็นสารแขวงลอยออก แล้วเติมน้ำกลั่นใหม่ 2-3 ครั้งจากนั้นเติมเอทานอล ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) ปริมาตร (10 ml) อบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เป็นผงโมลิบดีนัม นำไปทดสอบกับ กล้องฉายแสง (UV-BOX), เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS) และ เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD: X-ray Diffraction)



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์โมลิบดีนัม (MoO_3 , 100%)

3.2.3 ขั้นตอนการทำโมลิบดีนัมผสมคิวปรัสออกไซด์ (MoO_3 , 99.5, 99, 98 และ 95 % Cu_2O)

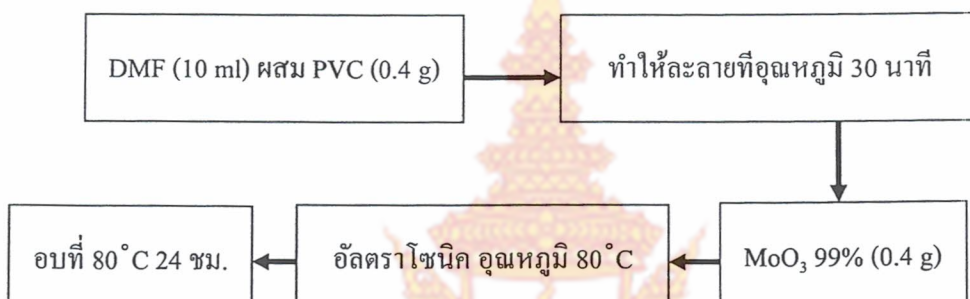
นำโมลิบดีนัม (MoO_3) ปริมาตร 99.5, 99, 98 และ 95 กรัม เติมเอทานอล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทำให้ละลายเป็นเวลา 30 นาที เติมคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) ปริมาตร 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.5 กรัม ทำให้ละลาย เป็นเวลา 30 นาที นำมาเข้าเครื่องอัลตราโซนิคส์ (Ultrasonic) เป็นเวลา 30 นาที และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์โมลิบดีนัมทั้ง 4 อัตราส่วน

3.2.4 ขั้นตอนการทำเป็นฟิล์ม MoO_3 99% และ MoO_3 100%

นำสารไดเมทิลฟูมาเรท (Dimethyl ,DMF) ปริมาตร (10 ml) ผสม พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) ปริมาตร (0.4 g) ทำให้ละลายที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที จนสารละลายใส เติม MoO_3 99% ปริมาตร (0.4 g) ลงในสารละลายใส คน 15 นาที จากนั้นนำไปอัลตราโซนิก (Ultrasonic) ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที เทลงบนจานเลี้ยงเชื้อ (จานเลี้ยงเชื้อต้องอยู่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 80°C) อบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ลอกฟิล์มออกจากจานเลี้ยงเชื้อ



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มจากสูตร MoO_3 99% และ MoO_3 100%

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงาน

(ก) แท่นให้ความร้อน (Hot plate), (ข) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter), (ค) เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), (ง) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis), (จ) เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction, XRD), (ฉ) เครื่องวัดสี (Color Meter) และ (ช) เครื่องอัลตราโซนิก(Ultrasonic)

ก) แท่นให้ความร้อน (Hot Plate Stirrer)

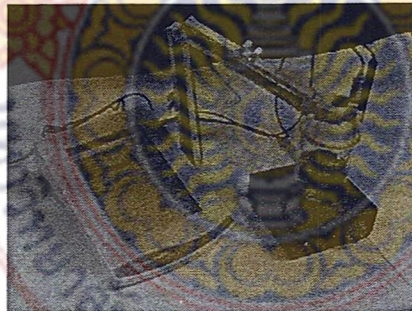
เป็นอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการที่มีพลังงานแม่เหล็กหมุนที่จะทำให้เกิดแถบกวน (เรียกว่า "Flea") ช่องของเหลวหมุนอย่างรวดเร็วจึงกวนมันสนามหมุนอาจถูกสร้างขึ้นไม่ว่าจะโดยการหมุนแม่เหล็กหรือชุดของแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ วางอยู่ใต้เครื่องด้วยของเหลว เครื่องกวนสารมักจะรวม Hotplate stirrer หรือบางวิธีการอื่น ๆ สำหรับให้ความร้อนของเหลว



รูปที่ 3.5 ลักษณะของแท่งให้ความร้อน [32]

ข) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)

เครื่องวัด pH อาศัยหลักการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrical potential) ที่เกิดขึ้นระหว่าง Indicator electrode และ Reference electrode ซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลาย แล้วเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็นค่า pH โดยการเทียบค่ากับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน แต่เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้น เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลให้ค่า pH เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เครื่องวัด pH จึงต้องมีการชดเชยค่าของการวัดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิด้วย เพื่อให้ค่าที่วัดได้เป็นค่า pH ที่ถูกต้อง แม่นยำ แม้ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม



รูปที่ 3.6 ลักษณะของเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง [33]

หลักการของ Potentiometry โปเทนทิโอเมทรี เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีเชิงไฟฟ้า วิธีหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการทำปริมาณวิเคราะห์ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการวัดค่าศักย์ของสารละลายตัวอย่างภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลซึ่งค่าศักย์ที่เกิดขึ้นในเซลล์เคมีไฟฟ้าเป็นผลที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยาเคมีเซลล์เคมีไฟฟ้าของเทคนิคโปเทนทิโอเมทรี จัดเป็นเซลล์กัลวานิกซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีสามารถเกิดขึ้นได้

เองที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเซลล์เคมีไฟฟ้าประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนดซึ่งต่อเป็นขั้วลบ และแคโทด ซึ่งเป็นขั้วบวกค่าความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดเรียกว่า ศักย์อุณหภูมิ หรืออาจเรียกว่า ศักย์เซลล์ (Cell potential, E_{cell}) ซึ่งในสภาวะมาตรฐานอาจแสดงสมการแสดงค่าศักย์เซลล์

$$E_{cell} = E_{cathode} - E_{anode} + E_j \dots 3.1$$

ในสมการจะมีการรวมเทอมของศักย์รอยต่อ (E_j) ไว้ด้วยเพราะการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอมิตรีอาจมีค่าศักย์ รอยต่อเกิดขึ้นร่วมด้วย กรณีที่ปฏิกิริยาทางเคมีไม่ได้เกิดขึ้นที่สภาวะมาตรฐาน เราสามารถคำนวณค่าศักย์เซลล์ที่เกิดขึ้นโดยใช้สมการของเนิร์นสต์ (Nernst equation)

$$E_{cell} = E_o - + \frac{RT}{nF} \ln(keq) \dots 3.2$$

กำหนด

E = ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะมาตรฐาน

R = ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ 8.314472 J/K.mol

T = อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K)

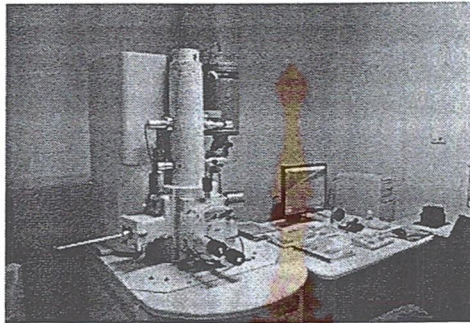
n = จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดการแลกเปลี่ยนในปฏิกิริยา

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ มีค่าเท่ากับ 96,485 คุลอมบ์ (C) หรือ 6.022×10^{23} อิเล็กตรอน

Keq = Reaction Quotient

โดยทั่วไปวิธีการวิเคราะห์แบบโพเทนทิโอมิตรีขั้วแคโทดที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นขั้วไฟฟ้าแบบเลือกไอออน (Ion-selective electrodes) ซึ่งจะยอมให้เฉพาะไอออนที่สนใจที่จะวิเคราะห์ผ่านเยื่อ (Membrane) เข้าไปได้ทำให้เกิดศักย์เซลล์เคมีไฟฟ้า

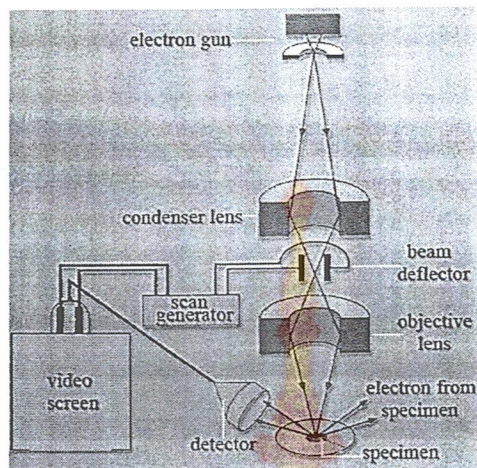
ค) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 3.7 ลักษณะของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [34]

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัส โดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

ตรวจดูโครงสร้างจุลภาคของผง และพื้นผิวฟิล์ม ตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์มด้วย EDX และวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 และสารเติมแต่งที่กระจายอยู่บนฟิล์มด้วยวิธี X-Ray Mapping ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM; JEOL JSM-5800 LV)



รูปที่ 3.8 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM [34]

ง) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis)

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า Intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อ โมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่าง เทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

โดยทำการสแกนที่ความยาวคลื่น 200 - 800 นาโนเมตร โดยรายงานออกมาในรูปแบบเส้นกราฟ แสดงให้เห็นถึงการเลื่อน (Shift to Visible) ของเส้นกราฟไปในทางช่วงความยาวคลื่นที่แสงมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ด้วยเครื่องรุ่น Shimadzu ISR-3100 Spectrophotometer

$$E_g = 1239.8 / \lambda \dots\dots\dots 3.3$$

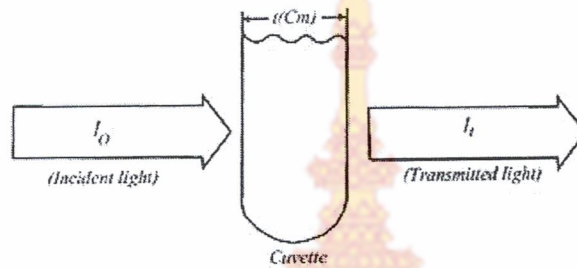
เมื่อ E_g คือ แถบช่วงพลังงาน (eV)

λ คือ ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)

กฎแห่งการดูดกลืนแสง

1. กฎของแลมเบิร์ต (ค.ศ.1760) กล่าวว่า แสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของตัวกลางที่แสงผ่าน

$$I_t = I_0 \times 10^{-kt} \text{-----3.4}$$



รูปที่ 3.11 ลักษณะการดูดกลืนแสงตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) [35]

2. กฎของเบียร์ (Beer's law) กฎของเบียร์ (ค.ศ.1852) กล่าวว่า แสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารในของเหลว ซึ่งเมื่อคำนวณเช่นเดียวกับกฎของแลมเบิร์ต จะได้สมการ

$$I_t = I_0 \times 10^{-kc} \text{----- 3.5}$$

เมื่อรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกัน (Beer-Lambert's law) โดยการบวกสมการที่ (๑) และสมการที่ (๒) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$I_t = I_0 \times 10^{-ct} \text{-----3.6}$$

แต่แสงส่องผ่าน (Transmittance, T) มีค่าเท่ากับ I_t/I_0 และแสงที่ถูกดูดกลืน (Absorbance, A หรือ optical density, OD) มีค่าเท่ากับ $\log(I_0/I_t)$ ดังนั้น

$$A = ct \text{----- 3.7}$$

หรือ

$$A = -\log T \text{----- 3.8}$$

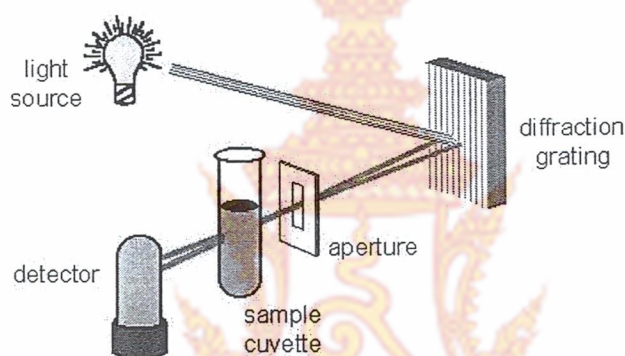
? = molar absorptivity สารแต่ละชนิดมีค่า? คงที่ในแต่ละช่วงคลื่นมีหน่วยเป็น $\text{mole}^{-1} \text{cm}^{-1}$

c = ความเข้มข้นของสารในหน่วย mole/L

t = ความหนาของสารละลายในหน่วย ซม.

ชนิดของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง

1. ชนิดลำแสงเดี่ยว (Single beam type) ใช้ลำแสงลำเดียวกันสำหรับวัดสารอ้างอิง (Reference หรือ Blank) และสารตัวอย่าง (Sample) การวัดความเข้มแสงกระทำโดยปรับ 0 %T แล้วปรับ 0A หรือ 100 %T ด้วยสารอ้างอิง หลังจากนั้นวัดค่าของสารตัวอย่างในหน่วย A หรือ %T ชนิดลำแสงเดี่ยวมีข้อดีตรงที่มีองค์ประกอบน้อย และมีแสงผ่านไปยังสารตัวอย่างมากกว่าแบบอื่นๆ แต่มีข้อเสียตรงที่มีเสถียรภาพในการอ่านค่าต่ำและค่าเปลี่ยนแปลงได้ง่าย นอกจากนี้ยังไม่สามารถกวาด (Scan) คูการดูดกลืนของแสงต่างๆ อย่างต่อเนื่องได้



รูปที่ 3.12 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องวัดการดูดกลืนแสงแบบ Single beam [35]

2. ชนิดลำแสงคู่ (Double beam type) วัดความเข้มของแสงโดยการสะท้อนแสงที่ผ่านออกมาจากตัวแยกแสงให้ผ่านสารอ้างอิงและสารตัวอย่างสลับกัน ทำให้ความเข้มแสงที่ผ่านตัวอย่างลดลงครั้งหนึ่ง วงจรจะขยายสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้รับจากสารตัวอย่างกับสารอ้างอิงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีเสถียรภาพในการวัดความเข้มของแสงดีมาก แต่เครื่องวัดชนิดนี้มีองค์ประกอบซับซ้อน เนื่องจากใช้ตัวไวแสงอันเดียวจึงต้องมีวงจรเลือกวัดสัญญาณ และใช้หลอดไฟฟ้ากำเนิดแสงมีกำลังส่องสว่างสูง จึงทำให้มีราคาแพงกว่าเครื่องมือชนิดลำแสงเดี่ยว

จ) เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD)

XRD ย่อมาจากคำว่า X-ray Diffractometer มีชื่อภาษาไทยว่า “เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน” เครื่องมือชนิดนี้อาศัยหลักการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุ หรืออนุภาค จะเกิดการหักเหของลำรังสี สะท้อนออกมาทำมุม กับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตก

กระทบ เป็นเครื่องมือที่ใช้ ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ สารประกอบและแร่ ทำให้ นักวิทยาศาสตร์กลุ่มนี้ สามารถแยกแยะประเภท และชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติ ว่ามีรูปแบบ โครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้ม ของรังสี ที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัด โดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มี รูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็น ระเบียบ ก็แตกต่างกันไปด้วย ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิด จะมี รูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.13 ลักษณะเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) [36]

เทคนิค XRD ศึกษาโครงสร้างผลึกของเฟส และคำนวณหาขนาดของผลึกของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นบนฟิล์มเคลือบ โดยใช้สมการ Scherer

$$t = 0.9\lambda / \beta \cos \theta_B \dots\dots\dots 3.9$$

เมื่อ t คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (CuK α = 0.15406 นาโนเมตร)

β คือ Line Width at Half Maximum Height (เรเดียน)

θ คือ มุมสะท้อน (องศา)

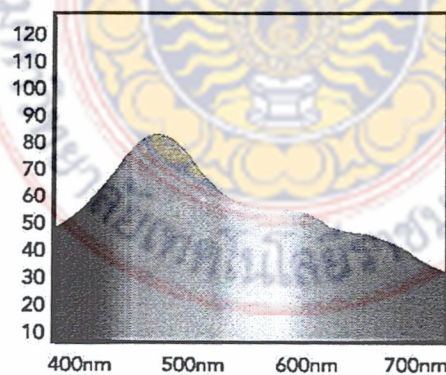
ฉ) เครื่องวัดสี (Color Meter)



รูปที่ 3.14 ลักษณะของเครื่องวัดสี [37]

หลักการการทำงานของเครื่องมือวัดสี ตามมาตรฐานของ Commission International de l'Eclairage (CIE) ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

1. แหล่งกำเนิดแสง ซึ่งมีหลายชนิด เช่น หลอดไฟทังสเตน หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดไฟซีนอนอาร์ค ฯลฯ การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับความต้องการนำไปใช้งาน ถ้านำไปใช้ในที่โล่งแจ้งกลางแสงแดด การวัดเปรียบเทียบสีจะใช้แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ D65 ซึ่งจะให้แสงที่มีสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกับแสงแดดในตอนกลางวัน

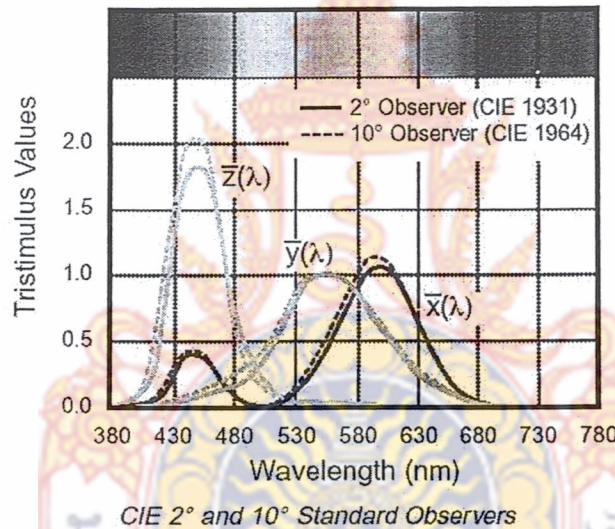


"Bluish" daylight reflectance

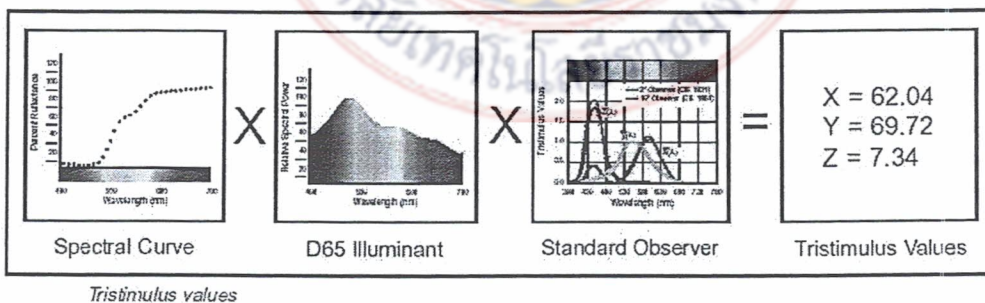
รูปที่ 3.15 ปริมาณสีทุกช่วงความยาวคลื่นจาก 400 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตร [37]

2. วัตถุตัวอย่างที่มีสี เนื้อสีจะมีคุณสมบัติดูดกลืนคลื่นแสงบางส่วนจากแหล่งกำเนิดแสง แล้วสะท้อนแสงสีส่วนที่เหลือเข้าสู่สายตาผู้สังเกต/อุปกรณ์วัดสี

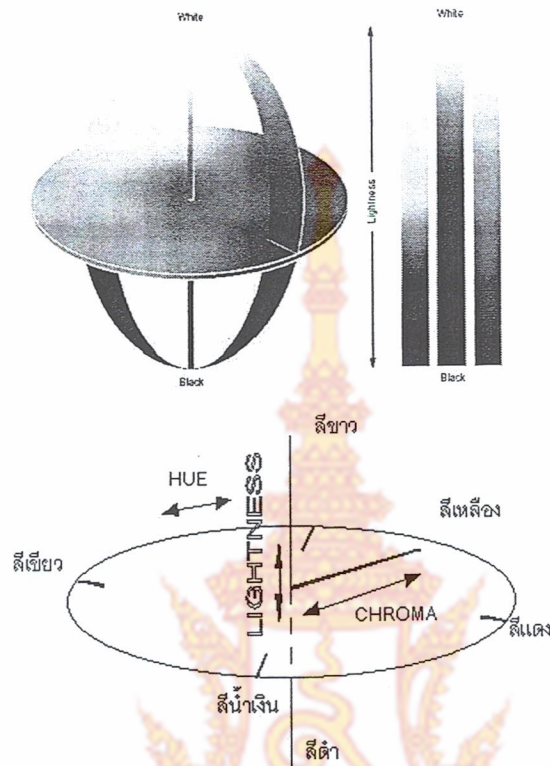
3. อุปกรณ์สังเกตวัดสี สามารถวัดปริมาณสีทุกช่วงความยาวคลื่นจาก 400 นาโนเมตร (สีม่วง) ถึง 700 นาโนเมตร (สีแดง) และการวัดสีนี้จะต้องสามารถวัดค่าให้ได้สอดคล้องกับการสังเกตด้วยสายตาของมนุษย์ จากการทดลองของนักวิทยาศาสตร์ 2 ท่าน คือ Wright และ Guild สามารถหาค่าปริมาณการตอบสนองของดวงตามนุษย์ที่ไวต่อแสงสีแดง เขียว น้ำเงิน ได้ค่าสรุปเป็นตัวเลขตามมาตรฐาน 2° CIE Standard Observer 1964 และได้แก้ไขปรับปรุงให้มีค่าสอดคล้องกับการตอบสนองของดวงตาในช่วงแสงสีเขียวและสีน้ำเงินมากขึ้นเป็นมาตรฐาน 10° CIE Standard Observer 1964 ดังรูป



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงปริมาณสีทุกช่วงความยาวคลื่นจาก 400 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตร [37]



รูปที่ 3.17 ผลลัพธ์ตัวเลขที่ได้จะเกิดจากการนำองค์ประกอบทั้งสามตัวมาคูณกัน [37]



รูปที่ 3.18 การกำหนดมาตรฐานลำดับชั้นสีในปัจจุบันนิยมใช้ระบบ CIE 1976 L^*a^*b (CIELAB) ซึ่งเป็นการกำหนดค่าโคออดิเนตของสีใน 3 มิติ [37]

L ใช้กำหนดค่าความสว่าง ของเนื้อสี

$L = 0$ จะมองเห็นเป็นสีดำ

$L = 100$ จะมองเห็นเป็นสีขาว

(ค่าที่ทำให้มองเห็นเนื้อสีเด่นชัดจะเป็นค่ากลาง ๆ ประมาณ 50 – 60 ถ้าต่ำกว่านี้เนื้อสีจะค่อนข้างไปทางสีดำมืด แต่ถ้าสูงกว่านี้เนื้อสีจะค่อนข้างสว่าง หรือจางลง)

A ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างสีแดงกับสีเขียว

ถ้า a มีค่า + สีจะไปในทิศทางของสีแดง

ถ้า a มีค่า - สีจะไปในทิศทางของสีเขียว

B ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างสีเหลืองกับสีน้ำเงิน

ถ้า B มีค่า + สีจะไปในทิศทางของสีเหลือง

ถ้า B มีค่า - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน

การกำหนดค่าตัวเลขในลักษณะนี้ มีที่มาจากทฤษฎีสีตรงข้าม ของ E.Q.Adam และ R.S.Hunter ซึ่งค้นพบในปีค.ศ. 1942 กล่าวว่า "ในระบบการมองเห็นสีของมนุษย์นั้น ก่อนที่สัญญาณจากเซลล์ที่ไวต่อแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน (Cone receptors) ที่อยู่บริเวณจอภาพ (Retina) จะส่งผ่านเส้นประสาทตาไปยังสมองเพื่อวิเคราะห์สีของวัตถุนั้น จะมีระบบการแปลงสัญญาณข้อมูลในชั้นกลาง ซึ่งทำการเปรียบเทียบสีแดงกับเขียว เหลืองกับน้ำเงิน ขาวกับดำ แล้วจึงส่งข้อมูลไปยังส่วนรับรู้สีของสมองต่อไป"

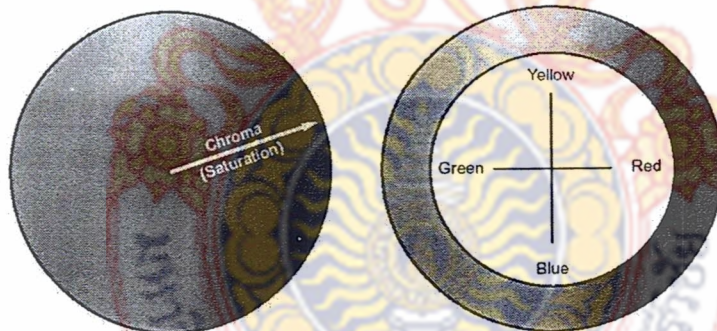
นอกจากการกำหนดโคออดิเนตแบบ $L^*a^*b^*$ แล้ว CIE ยังได้นำเสนอแนวความคิดในการมองเห็นสีเป็น hue (h) และ Chroma (C) ดังนี้

H เป็นตัวเลขที่ระบุตำแหน่งของสีมีหน่วยเป็นองศา เรียงตามลำดับสี แดง แสด เหลือง เขียว น้ำเงิน คราม ม่วง

$$= \tan^{-1} (b/a)$$

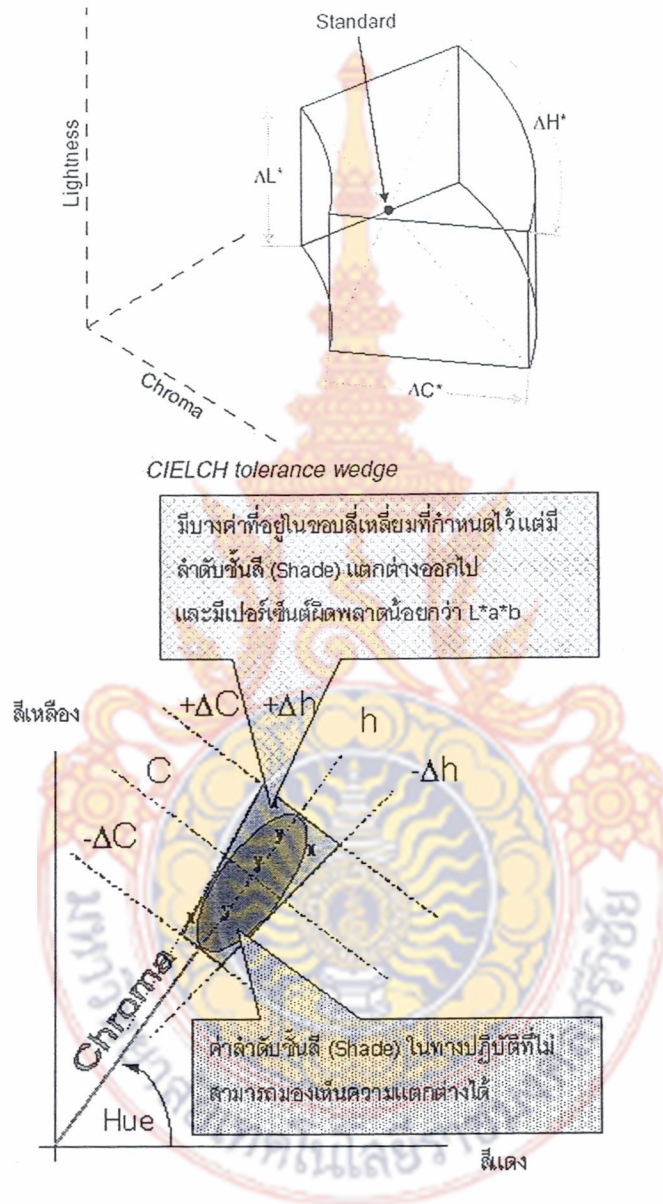
C เป็นตัวเลขบ่งบอกความสดใสของเนื้อสีถ้ามีค่าน้อยสีจะทึบ และถ้ามีค่ามากเนื้อสีจะสดใส

$$= (a^2 + b^2)^{1/2}$$



รูปที่ 3.19 จะเห็นว่ามีบางจุดอยู่นอกวงรีของการสังเกตสีด้วยสายตามนุษย์ แต่อยู่ในกรอบสีเหลืองและทำให้เห็นลำดับชั้นสีต่างกัน แต่มีตัวเลขอยู่ในเกณฑ์ผ่าน วิธีการนี้จะมีความถูกต้องกับความเป็นจริงไม่เกิน 75 % [37]

การกำหนดความคลาดเคลื่อน โดยใช้ DL, DC และ Dh



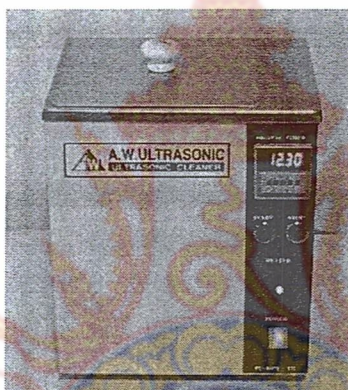
รูปที่ 3.20 รูปแบบที่ใกล้เคียงกับวงรีของการสังเกตสีด้วยสายตามนุษย์มากกว่า แต่ยังคงมีจุดที่ลำดับชั้นสีคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง วิธีการนี้มีความถูกต้องกับความเป็นจริงไม่เกิน 85 % [37]

การกำหนดความคลาดเคลื่อน โดยใช้ DE

CIE ได้พยายามที่จะกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยได้กำหนดสมการค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (The ColorDifference, ΔC) ซึ่งเป็นตัวเลขเดียว ดังนี้

$\Delta C = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2}$ และ $\Delta C = (\Delta L^2 + \Delta C^2 + \Delta H^2)^{1/2}$ เมื่อ H เป็นหน่วยมุมในระบบ SI คิดเป็น Radian ($180^\circ = \pi$ Radian) เมื่อพิจารณารูปแบบของสมการแล้ว พบว่าเป็นสมการของทรงกลมรัศมี ΔC $\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2 = \Delta C^2$

ช) เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic)



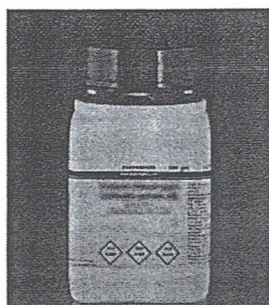
รูปที่ 3.21 ลักษณะของเครื่องอัลตราโซนิก [38]

คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz ขึ้นไป จะสูงขึ้นจนถึงเท่าใดไม่ได้ระบุจำกัดเอาไว้ ซึ่งเป็นความถี่ที่สูงเกินกว่าที่ประสาทมนุษย์จะได้ยิน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ว่าประมาณ 15 KHz

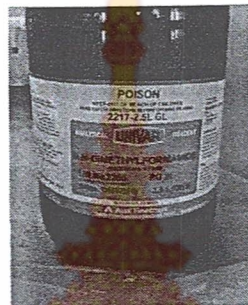
สมบัติเด่นของคลื่นอัลตราโซนิกส์ คือเป็นคลื่นที่มีทิศทางทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง ไม่มีการเลี้ยวเบนที่ขอบ จึงพุ่งออกมาเป็นลำแคบๆ หรือที่เรียกว่า มีทิศทาง

3.4 สารเคมี

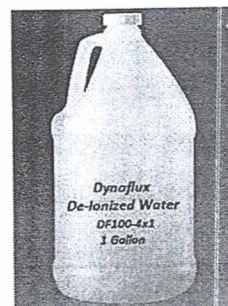
(ก) แอมโมเนียมเฮปตะ โมลิบเดต $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ (ข) กรดไนตริก (HNO_3) (ค) น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water) (ง) พอลีเอสเตอร์เรซิน (Polyester resin) (ฉ) คอปเปอร์อะซิเตต ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$)



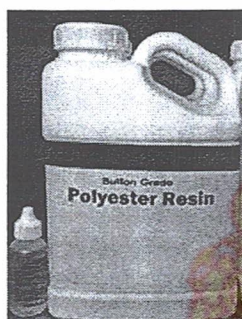
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(ฉ)

รูปที่ 3.22 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.5 สถานที่ทำโครงการ

สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
 สถานีวิจัยวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

จากการทดลองสังเคราะห์สารเคลือบผิวเปลี่ยนสี โมลิบดีนัมออกไซด์ กับคิวปรัสออกไซด์ ที่เป็นผงและฟิล์มเคลือบบนกระจก โดยศึกษาอิทธิพลของเวลาในการฉายแสง และปริมาณของสารเติม โมลิบดีนัมออกไซด์ผสมกับคิวปรัสออกไซด์ ได้เติมในปริมาณคงที่ เพื่อพัฒนาให้สมบัติโฟโตโครมิกและเทอร์โมโครมิกให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นแล้วโฟโตโครมิกและเทอร์โมโครมิกที่เคลือบอยู่บนกระจก สามารถนำไปพัฒนาเพื่อต่อยอดให้ได้ประโยชน์ เช่น ในด้านวัสดุเปลี่ยนสี, สีทาอาคาร และตัวรับรู้ (Senser) มากยิ่งขึ้น

4.1 ลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมโครมิก

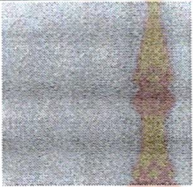
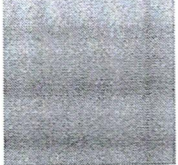

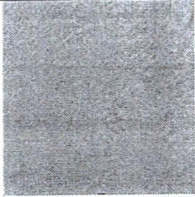




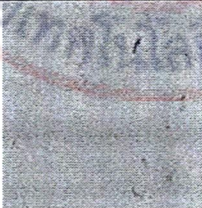

4.1.1 ผลการทดสอบการเปลี่ยนสีโดยการฉายแสงด้วย UV-BOX

อัตราส่วนผงโมลิบดีนัม (MoO_3) 95% ผสม ผงคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) 0.5% ฉายแสงที่เวลาเริ่มต้น จะเป็นสีส้มรูปที่ 4.1 (ก) เมื่อฉายแสงจนครบ 360 นาที ก็จะเปลี่ยนเป็นสีส้มเข้ม อัตราส่วน ผงโมลิบดีนัม (MoO_3) 98% ผสม ผงคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) 0.2% ฉายแสงที่เวลาเริ่มต้น จะเป็นสีน้ำตาล รูปที่ 4.1 (ข) เมื่อฉายแสงจนครบ 360 นาที ก็จะเปลี่ยนเหมือนกับสีของทองคำเปลว อัตราส่วนผงโมลิบดีนัม (MoO_3) 99% ผสม ผงคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) 0.1% ฉายแสงที่เวลาเริ่มต้น จะเป็นสีเทา รูปที่ 4.1 (ค) เมื่อฉายแสงจนครบ 360 นาที ก็จะเปลี่ยนเป็นสีเทาปนสีขาว อัตราส่วน ผงโมลิบดีนัม (MoO_3) 99.5% ผสม ผงคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) 0.05% ฉายแสงที่เวลาเริ่มต้น จะเป็นสีเทาอมฟ้ารูปที่ 4.1 (ง) เมื่อฉายแสงจนครบ 360 นาที ก็จะเปลี่ยนเป็นสีที่ใกล้เคียงกัน สีค่อนข้างจะไม่เปลี่ยนไปมากนัก อัตราส่วน MoO_3 100% ไม่มีผง Cu_2O ผสมอยู่ ฉายแสงที่เวลาเริ่มต้น จะเป็นสีขาวยอมม่วงรูปที่ 4.1 (จ) เมื่อฉายแสงจนครบ 360 นาที ก็จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินอมม่วง อัตราส่วนนี้มีการเปลี่ยนแปลงของสีเห็น ได้ชัดมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.1

4.2 ลักษณะสีที่วิเคราะห์จากเครื่องวัดสี (Color Meter)

จาก 5 อัตราส่วน คือ MoO_3 95%, MoO_3 98%, MoO_3 99%, MoO_3 99.5% และ MoO_3 100% อัตราส่วนที่มีการเปลี่ยนสีได้ดีที่สุด คือ MoO_3 100% ดูจากตาราง 4.5 ซึ่งค่าในช่อง L A B มีการเพิ่มขึ้นต่อเนื่องสม่ำเสมอ จากค่าน้อยไปหาค่ามากในกรณีที่มีการติดลบของค่า แสดงว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีการเปลี่ยนสี แต่ที่ต้องการ คือ อัตราส่วน MoO_3 99% เพราะมีส่วนผสมของ

Cu₂O อยู่ด้วย ดูจากตาราง 4.3 ค่าในช่อง L A B มีค่าเพิ่มขึ้นและค่าติดลบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงแสดงให้เห็นว่า ในกลุ่มอัตราส่วนที่ผสม คิวปริสออกไซด์(Cu₂O) มีการเปลี่ยนแปลงของสีได้ดีที่สุด

อัตราส่วน	เวลาเริ่มต้น(0 นาที)	เวลา 360 นาที
(ก) MoO ₃ 95%/ Cu ₂ O 5%		
(ข) MoO ₃ 98%/ Cu ₂ O 2%		
(ค) MoO ₃ 99%/ Cu ₂ O 1%		
(ง) MoO ₃ 99.5%/ Cu ₂ O 0.5%		
(จ) MoO ₃ 100%		

รูปที่ 4.1 ภาพแสดงลักษณะการเปลี่ยนสีของ MoO₃ ผสม Cu₂O ที่เวลาฉายแสงยูวี 0-360 นาที

ลักษณะสีที่วิเคราะห์จากเครื่องวัดสี (Color Meter)

ตาราง 4.1 แสดงค่าการเปลี่ยนสีของเครื่องวัดสีของสูตร MoO_3 95%

เวลา	L	A	B	ΔC
0	54.00	14.30	30.18	0
10	59.15	14.84	30.76	5.2106142
20	59.27	14.68	30.74	5.3132758
30	59.70	14.65	31.14	5.7908635
40	59.82	14.89	31.17	5.9330094
50	59.79	14.72	31.06	5.871533
60	60.11	14.86	31.85	6.3588206
90	59.89	14.82	31.61	6.0833708
120	60.31	14.88	32.38	6.7076449
180	60.53	14.83	32.90	7.0936732
240	60.52	15.15	32.78	7.0705657
300	60.69	15.36	32.94	7.3141848
360	60.57	15.41	32.79	7.1560534

ตาราง 4.2 แสดงค่าการเปลี่ยนสีของเครื่องวัดสีของสูตร MoO_3 98%

เวลา	L	A	B	ΔC
0	60.75	4.00	16.30	0
10	61.15	4.09	16.65	0.5390733
20	60.96	4.17	19.69	3.4007499
30	61.52	3.93	19.93	3.7114283
40	61.60	3.91	19.93	3.7292761
50	64.75	3.93	19.75	5.2827455
60	62.38	3.19	20.17	4.2766693
90	61.98	3.20	19.80	3.7951153
120	63.02	2.85	20.43	4.8510102
180	64.51	2.01	20.65	6.0844227
240	64.58	2.05	21.17	6.4952521
300	66.02	1.64	21.69	7.8990253
360	63.97	1.55	22.01	6.9982141

ตาราง 4.3 แสดงค่าการเปลี่ยนสีของเครื่องวัดสีของสูตร MoO_3 99%

เวลา	L	A	B	ΔC
0	73.90	-0.61	7.40	0
10	74.92	-0.74	6.29	1.5130763
20	76.35	-1.52	5.53	3.2136428
30	77.20	-1.50	5.34	3.9907017
40	77.89	-1.83	5.08	4.7739816
50	78.93	-2.05	4.77	5.8558859
60	78.42	-2.23	4.65	5.5332902
90	80.98	-2.87	4.07	8.1438873
120	81.49	-3.33	3.98	8.7580192
180	83.45	-3.90	3.95	10.673758
240	85.09	-4.33	3.29	12.487858
300	85.96	-4.56	3.34	13.324027
360	87.01	-4.83	3.20	14.398628

ตาราง 4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนสีของเครื่องวัดสีของสูตร MoO_3 99.5%

เวลา	L	A	B	ΔC
0	78.75	-4.80	-0.95	0
10	78.55	-4.72	-0.91	0.219089
20	78.41	-4.58	-0.38	0.6992138
30	79.29	-4.71	-0.85	0.556507
40	79.33	-4.78	-0.83	0.5926213
50	79.44	-4.54	-0.83	0.7470609
60	79.89	-4.60	-0.97	1.1575837
90	80.60	-4.64	-1.17	1.869893
120	80.64	-4.86	-1.16	1.9025772
180	81.77	-4.76	-0.90	3.0206787
240	82.56	-4.82	-0.84	3.8116401
300	83.32	-4.80	-0.70	4.576833
360	83.32	-4.49	-0.52	4.6006413

ตาราง 4.5 แสดงค่าการเปลี่ยนสีของเครื่องวัดสีของสูตร MoO_3 100%

เวลา	L	A	B	ΔC
0	94.68	-3.41	-1.40	0
10	94.45	-3.68	-1.75	0.219089
20	93.38	-4.60	-2.91	0.699214
30	93.01	-5.28	-3.39	0.556507
40	92.34	-5.53	-3.99	0.592621
50	91.70	-6.17	-4.38	0.747061
60	91.61	-6.37	-4.73	1.157584
90	89.99	-7.66	-6.27	1.869893
120	89.20	-8.15	-7.43	1.902577
180	87.03	-9.81	-9.15	3.020679
240	86.21	-9.88	-9.84	3.81164
300	83.35	-11.47	-12.39	4.576833
360	81.87	-11.70	-13.17	4.600641

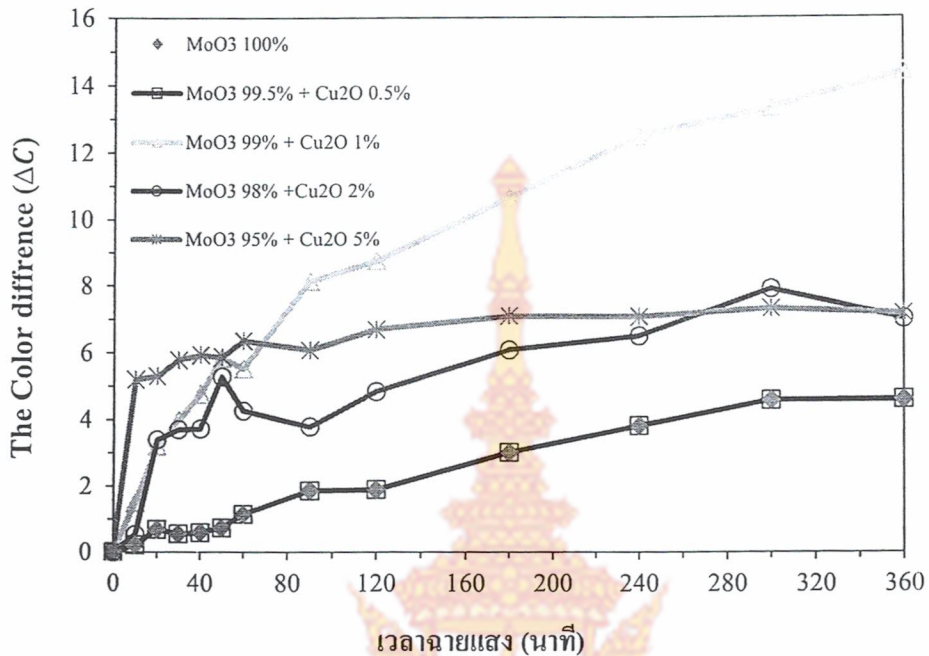
หมายเหตุ

L = เป็นค่าที่บอกความสว่างของสี

A = เป็นค่าที่บอกความเป็นสีเขียวหรือสีแดง

B = เป็นค่าที่บอกความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน

ΔC = อัตราการเปลี่ยนของสีที่เวลาฉายแสง

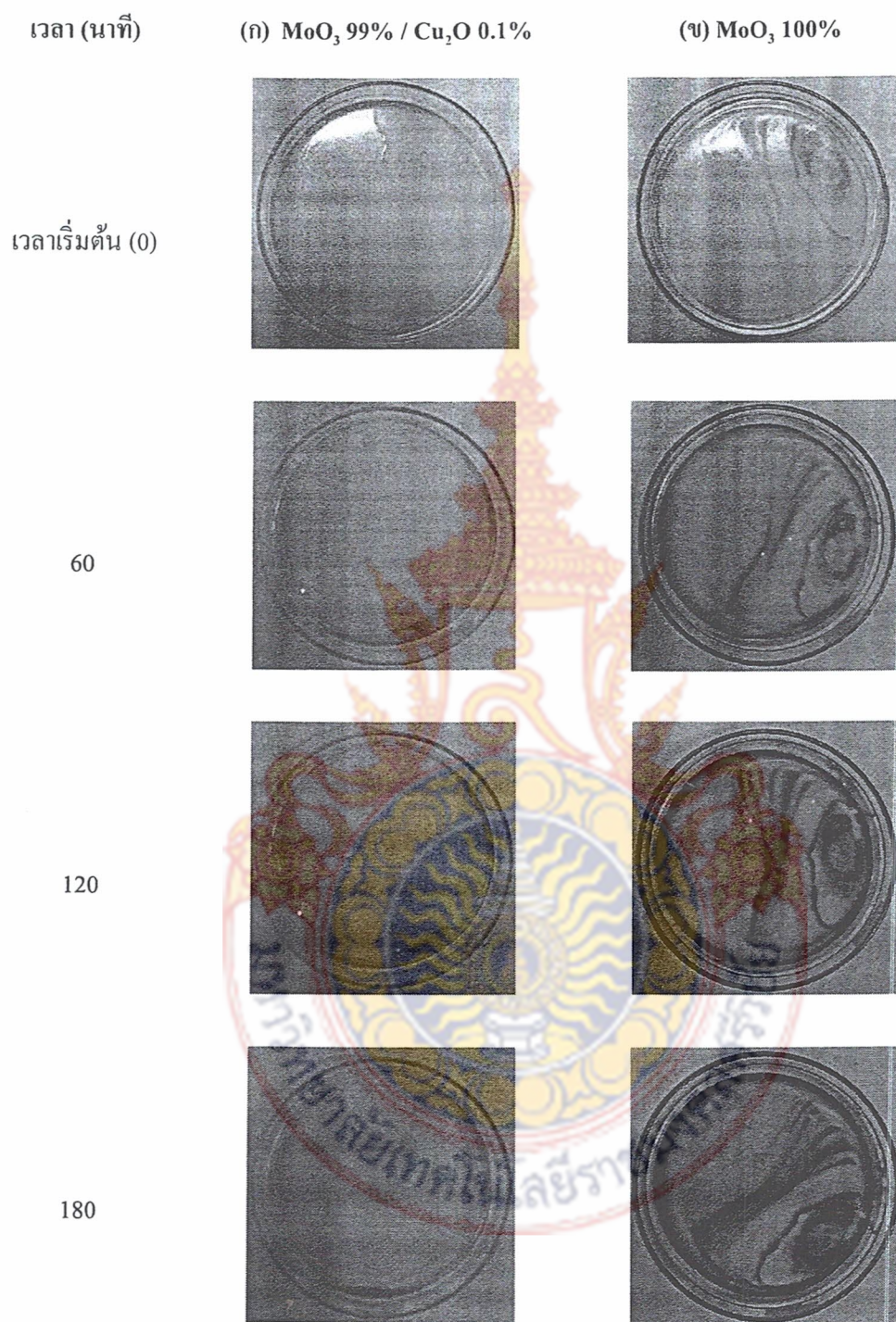


รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนสีจากการฉายแสงของสารเคลือบ ด้วยกล่องฉายรังสียูวี (UV-BOX)

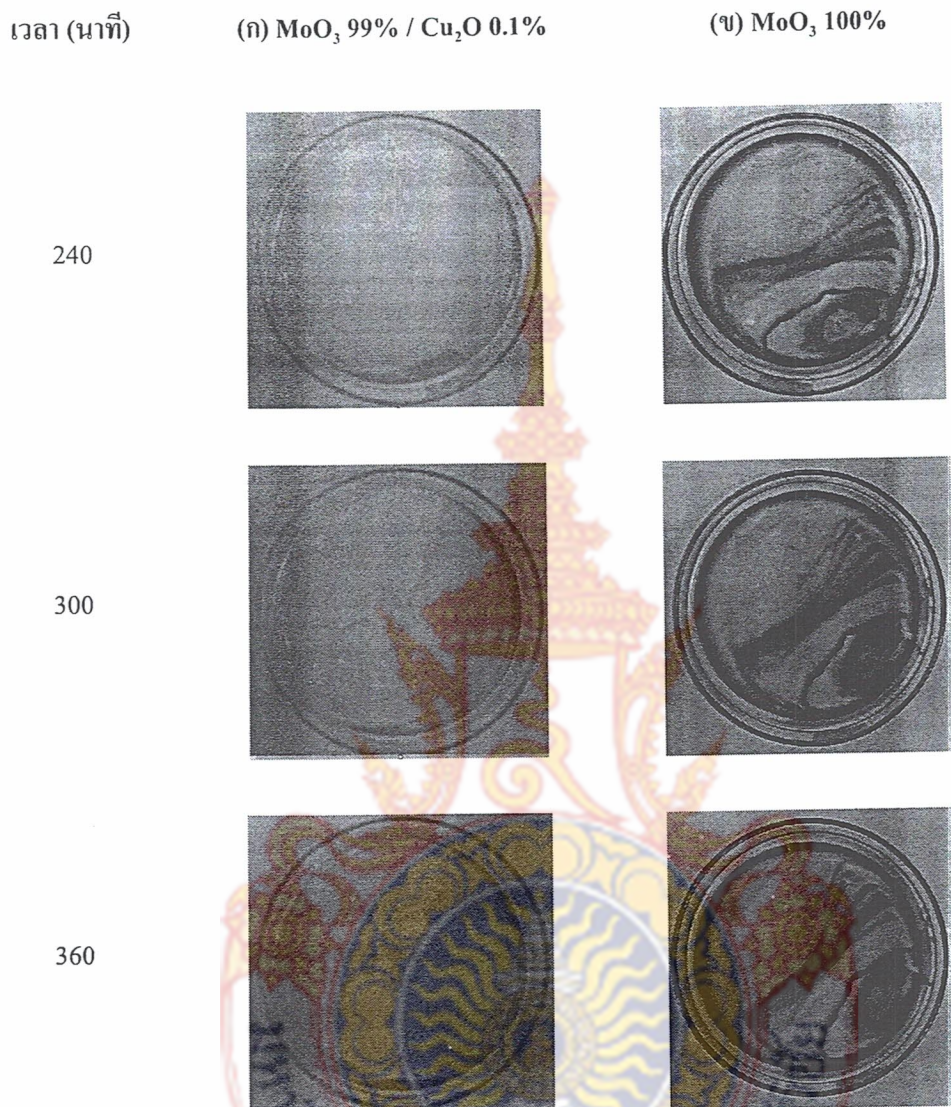
โมลิบดีนัม (MoO_3)100% ดูจากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไป เส้นกราฟขึ้นเป็นแนวเส้นตรง แสดงว่าเกิดการเปลี่ยนสีอย่างต่อเนื่อง และเป็นอัตราส่วนที่เกิดการเปลี่ยนสีได้ดีที่สุดในทั้ง 5 อัตราส่วน โมลิบดีนัม (MoO_3) 99.5% ผสม คิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) 0.5% เส้นกราฟค่อนข้างอยู่ในแนวเดียวกับอัตราส่วน (MoO_3)100% เป็นอัตราส่วนที่ค่อนข้างเปลี่ยนสีได้ดีรองจากโมลิบดีนัม (MoO_3)100% โมลิบดีนัม (MoO_3) 99% + คิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) 1% ดูจากเส้นกราฟค่อนข้างเป็นแนวเดียวกัน

4.3 ลักษณะสีที่วิเคราะห์การเปลี่ยนสี (ฟิล์ม) จากกล่องฉายรังสียูวี (UV-BOX)

โมลิบดีนัม (MoO_3) 99% ผสมคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) 0.1% จากอัตราส่วนนี้จะเห็นว่า จากเวลาฉายแสงเริ่มต้น จนไปถึง 360 นาทีไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยมาก จนไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า รูปที่ 4.7 (ก) โมลิบดีนัม (MoO_3)100% ไม่ผสมกับคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) อัตราส่วนนี้จะเห็นได้ว่าจากเวลาฉายแสงเริ่มต้น จนไปถึง 360 นาที จะมีการเปลี่ยนแปลงของสีชัดเจนรูปที่ 4.7 (ข) ทุกๆช่วงเวลาที่กำหนด ตามลำดับ ทำให้แน่ใจได้ว่าอัตราส่วน คือ โมลิบดีนัม (MoO_3) 100% เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการทดสอบทำฟิล์มในครั้งนี้อย่างที่แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการเปลี่ยนสี โดยกล่องฉายรังสียูวี (UV-BOX) ที่นาที่ 0-360



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการเปลี่ยนสี โดยกล่องฉายรังสียูวี (UV-BOX) ที่นาที 0-360 (ต่อ)

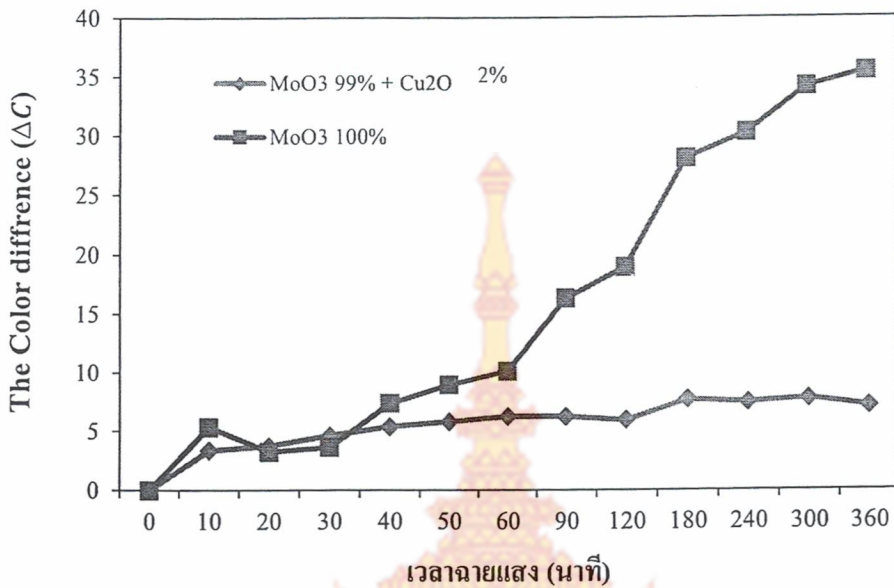
4.3.1 ผลการทดลองค่าการเปลี่ยนสี ด้วยเครื่องวัดสี ในกระบวนการทำเป็นฟิล์ม

ตาราง 4.6 แสดงค่าการเปลี่ยนสีของเครื่องวัดสีของสูตร MoO_3 99%

เวลา	L	A	B	Δc
0	80.26	-0.44	-0.42	0
10	77.59	-0.13	1.60	3.3623504
20	77.26	-0.40	1.82	3.7442222
30	77.18	-0.10	3.01	4.6224344
40	77.09	0.61	3.83	5.4049884
50	76.51	0.07	3.99	5.8112563
60	76.06	0.31	4.11	6.2228129
90	76.05	0.26	4.14	6.2456145
120	76.37	0.31	4.00	5.9355707
180	75.25	0.43	5.34	7.6833977
240	74.26	0.18	4.01	7.4839361
300	74.5	0.25	4.76	7.777281
360	74.89	0.14	4.26	7.1467265

ตาราง 4.7 แสดงค่าการเปลี่ยนสีของเครื่องวัดสีของสูตร MoO_3 100%

เวลา	L	A	B	Δc
0	77.55	-4.47	-5.58	0
10	72.22	-4.66	-5.16	5.3498972
20	74.3	-4.73	-5.50	3.2613647
30	74.01	-5.30	-5.58	3.6360006
40	70.45	-6.50	-5.61	7.384565
50	69.29	-7.81	-6.44	8.951134
60	68.04	-7.83	-6.57	10.134584
90	62.37	-9.82	-8.34	16.33011
120	59.85	-10.35	-8.92	18.947823
180	50.79	-11.32	-10.53	28.062833
240	48.54	-11.05	-11.03	30.242007
300	44.23	-10.25	-10.28	34.142654
360	42.89	-10.00	-10.42	35.430525



รูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนสีในการทำเป็นฟิล์ม จากกล้องฉายแสง

จากกราฟรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าเส้นกราฟของอัตราส่วน โมลิบดินัม (MoO₃) 99 เปอร์เซ็นต์ ผสม คิวปริสออกไซด์ (Cu₂O) 1 เปอร์เซ็นต์ จากช่วงเวลาเริ่มต้น คือ 0 นาที จนถึงเวลา 360 นาที เส้นกราฟค่อนข้างอยู่ในระดับเดียวกัน แสดงว่าอัตราส่วนนี้มีการเปลี่ยนสีน้อยมาก และ เส้นกราฟของอัตราส่วน โมลิบดินัม (MoO₃) 100 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลา แสดงว่ามีการเปลี่ยนสีได้ดีกว่าอัตราส่วน โมลิบดินัม (MoO₃) 99 เปอร์เซ็นต์ ผสมคิวปริสออกไซด์ (Cu₂O) 2 เปอร์เซ็นต์

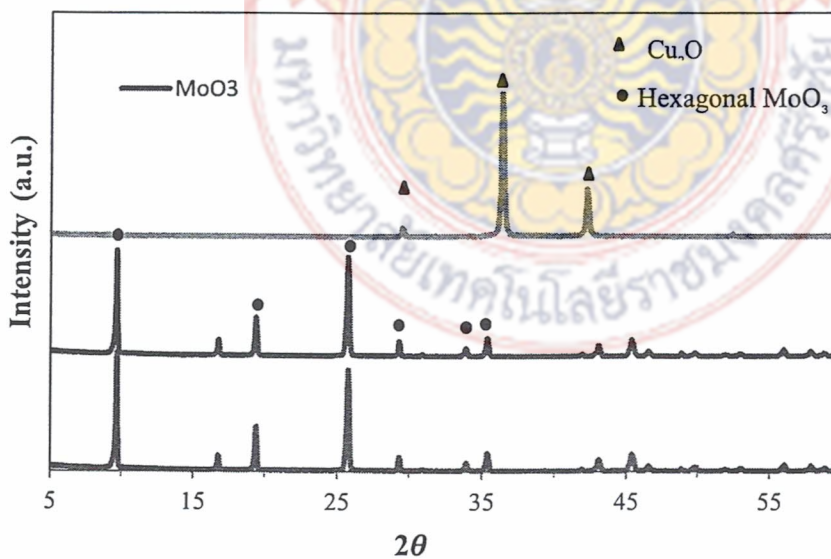
อัตราส่วน โมลิบดินัม (MoO₃) 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบที่มีการเปลี่ยนสีได้ดีที่สุด แต่ต้องการที่จะทดลองผสมคิวปริสออกไซด์ (Cu₂O) เพื่อที่จะเปรียบเทียบว่า โมลิบดินัม (MoO₃) จะผสมกับคิวปริสออกไซด์ (Cu₂O) ที่เปอร์เซ็นต์ที่จะเกิดการเปลี่ยนสีได้ใกล้เคียงอัตราส่วน โมลิบดินัม (MoO₃) 100 เปอร์เซ็นต์

4.4 ผลการวิเคราะห์สารเคลือบโมลิบดีนัม (MoO_3) และคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD)

จากการวิเคราะห์หาเฟสของสารเคลือบโมลิบดีนัม (MoO_3) มีเฟสของ Hexagonal MoO_3 ที่ $9.68^\circ, 19.43^\circ, 25.78^\circ, 29.33^\circ, 34.08^\circ$ และ 35.48° และคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) เกิดขึ้นที่ $29.68^\circ, 36.43^\circ$ และ 42.33° ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นเฟสที่มีความไวต่อแสง (Photo) และความร้อน (Thermo) และ โมลิบดีนัม (MoO_3) มีขนาดผลึก 54.02 นาโนเมตร, โมลิบดีนัม ผสมคิวปริสออกไซด์ (99% MoO_3 , 1% Cu_2O) มีขนาดผลึก 54.01 นาโนเมตร และคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) มีขนาดผลึก 34.76 นาโนเมตร ดังแสดงในตาราง 4.8 และผลของการวัดสี (Color meter) ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตาราง 4.8 ขนาดผลึกของสารเคลือบโมลิบดีนัมและคิวปริสออกไซด์

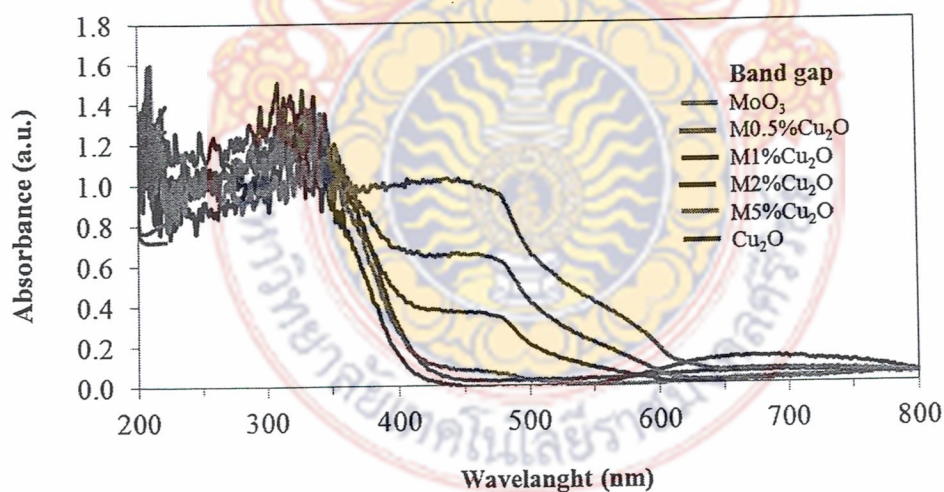
สารเคลือบ	ขนาดผลึก (nm)
โมลิบดีนัม (MoO_3)	54.02
โมลิบดีนัมผสมคิวปริสออกไซด์ (99% MoO_3 , 1% Cu_2O)	54.01
คิวปริสออกไซด์ (Cu_2O)	34.76



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของสารเคลือบโมลิบดีนัม (MoO_3) คิวปริสออกไซด์ (Cu_2O)

4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง (UV-Vis Absorption Spectra)

จากผลการดูดกลืนสเปกตรัม (UV-Vis Absorption Spectra) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ของสารเคลือบคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) โมลิบดีนัม (MoO_3 , 95% Cu_2O 5%), (MoO_3 , 98% Cu_2O 2%), (MoO_3 , 99.5% Cu_2O 0.5%) และ (MoO_3 , 100%) สารเคลือบการดูดกลืนแสงของคิวปรัสออกไซด์ จะมีค่าที่สูงกว่า 400 นาโนเมตร และผลการดูดกลืนแสงของสารเคลือบ โมลิบดีนัมเจือด้วยคิวปรัสออกไซด์ ค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 600 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงที่เป็นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible Light) แสดงให้เห็นถึงการทำงานของสารเคลือบที่มีประสิทธิภาพในการทำงานในช่วงแสงที่มีความยาวคลื่นที่สูง เพื่อให้สารเคลือบผิวของกระจกทำงานได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานต่ำ ซึ่งอัตราส่วนโมลิบดีนัมที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อแถบพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้แถบส่งผลต่อการเปลี่ยนสีในช่องพลังงานต่ำ แสดงถึงประสิทธิภาพของสารเคลือบที่สามารถทำงานได้เองโดยไม่ต้องใช้พลังงานกระตุ้นนั่นเอง ดังแสดงในตาราง 4.9 กลไกการทำงานของสารเคลือบ โมลิบดีนัมเจือด้วยคิวปรัสออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ผลจากการวิเคราะห์ในครั้งนี้นี้แถบช่วงพลังงานจะมีค่าน้อยสุดคือสารเคลือบ โมลิบดีนัมเจือด้วยคิวปรัสออกไซด์ ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาในแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าได้



รูปที่ 4.6 ดูดกลืนสเปกตรัมของสารเคลือบโมลิบดีนัม (MoO_3) และคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O)

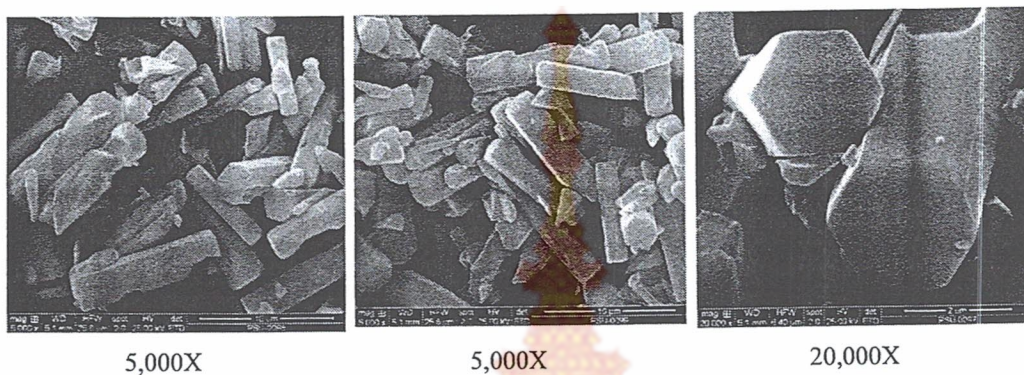
ตาราง 4.9 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารเคลือบ โมลิบดินัม (MoO_3) ผสม คิวปริสออกไซด์ (Cu_2O)

สารเคลือบ	แถบพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ (eV)
โมลิบดินัม (MoO_3)	1.97
โมลิบดินัม(M0.5%) คิวปริสออกไซด์ (Cu_2O)	2.03
โมลิบดินัม(M1%) คิวปริสออกไซด์ (Cu_2O)	2.10
โมลิบดินัม(M2%) คิวปริสออกไซด์ (Cu_2O)	2.91
โมลิบดินัม(M5%) คิวปริสออกไซด์ (Cu_2O)	2.95
คิวปริสออกไซด์ (Cu_2O)	3.02

4.6 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากผลการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าที่กำลังขยาย 5,000 เท่า จะเห็นลักษณะของผงแท่งเฮกซะโกนอล โมลิบดินัมออกไซด์ (h-MoO_3) เมื่อขยายที่กำลังขยายเพิ่มที่ 20,000 เท่า จะเห็นเป็นลักษณะแท่งทรงหกเหลี่ยมได้อย่างชัดเจน ซึ่งที่กำลังขยายที่แตกต่างกันจะเห็นแท่งเฮกซะโกนอล โมลิบดินัมออกไซด์ (h-MoO_3) ในภาพ 1 มิติ ซึ่งจากการสังเคราะห์ดังกล่าว ขนาดอนุภาคที่ได้จากการทดสอบพบว่าขนาดอนุภาคใน 1 มิติ จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ ~ 300 นาโนเมตร และมีความยาว 800 นาโนเมตร กลไกการเปลี่ยนสีเกิดจากการฟอร์มตัวของ เฮกซะโกนอล โมลิบดินัมออกไซด์ (h-MoO_3) เนื่องจากโมลิบดินัมเป็นธาตุที่อยู่ตรงกลางจับด้วยอะตอมของออกซิเจนหกตำแหน่งเป็นลักษณะออกตะฮีดรอล (Octahedral site) ในขณะที่เกิดการนิวเคลียชัน (Nucleation) นั้นจะเกิดการสัมผัสที่แกน a (a-axis) และแกน c (c-axis) เป็นการทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตระหว่างไอออนของ NH_4^+ กับ OH^- เนื่องจากสารตั้งต้นที่ใช้เป็นแอมโมเนียมเฮปตะโมลิเบต ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) และกรดไนตริก HNO_3 อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการเกิดนิวเคลียชันนั้นจะส่งผลให้เกิดยูนิตเซลล์ของเฮกซะโกนอลส่งผลให้เกิดผลึกระดับนาโนในภาพ 1 มิติที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว เฮกซะโกนอล โมลิบดินัมออกไซด์ (h-MoO_3) ที่เกิดจากออกซิเจนวาแคนซีและการที่อะตอมของโมลิบดินัมไปแทรก (Interstitial molybdenum) ส่งผลให้เกิดการรับรู้ (Sensing) เนื่องจากปฏิกิริยาของออกซิเจนที่เปลี่ยนรูป (O_2^- , O^- และ O^{2-}) บนพื้นผิว

ของวัสดุโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) เนื่องจากดัชนีการหักเหและการดูดซับความยาวคลื่น
Angamuthuraj et al., (2011)



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบด้วยอัตราส่วน (MoO_3 , 99% Cu_2O 1%)



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองสำหรับการศึกษาอิทธิพลการเปลี่ยนสีของโมลิบดีนัมออกไซด์ผสมคิวปรัสออกไซด์ ($\text{MoO}_3 + \text{Cu}_2\text{O}$) คือ แสง อุณหภูมิ และส่วนผสมทางเคมี เป็นตัวแปรสำคัญของการเปลี่ยนสี จากการทดลองหาค่าการเปลี่ยนสีผลที่ได้ดังนี้

5.1 สรุป

5.1.1 ผลการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔC) ของสารเคลือบและฟิล์มเทอร์โคโรมิก

- สารเคลือบเทอร์โคโรมิก (MoO_3 99.9% + Cu_2O 0.1%) เป็นสูตรที่ดีที่สุด จะเห็นได้ว่าลักษณะทางกายภาพจะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีครีม

- สารเคลือบ โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3 100%) เป็นสูตรที่มีลักษณะทางกายภาพที่ชัดเจนที่สุด สารเคลือบโมลิบดีนัม จะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีฟ้า

- ฟิล์มเทอร์โคโรมิก (MoO_3 99.9% + Cu_2O 0.1%) เป็นสูตรที่ดีที่สุด จะเห็นได้ว่าลักษณะทางกายภาพจะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีฟ้า

- ฟิล์ม โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3 100%) เป็นสูตรที่มีลักษณะทางกายภาพที่ชัดเจนที่สุด จะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีน้ำเงิน

5.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย (X-Ray Diffraction, XRD)

- สารเคลือบเทอร์โคโรมิก (MoO_3 99.9% + Cu_2O 0.1%) ที่นำไปทดสอบด้วยเครื่อง (X-Ray Diffraction, XRD) จะเห็นโครงสร้างจากเฮกซะโกนอล (Hexagonal) เป็นโครงสร้างโมลิบดีนัมเฮกซะโกนอล (Hexagonal MoO_3)

5.1.3 ผลการทดสอบการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่อง (UV-Vis Spectrophotometer)

- สารเคลือบโมลิบดีนัม (MoO_3 99.9% + Cu_2O 0.1%) นำไปทดสอบในเครื่องฉายแสง UV ผลการทดสอบ จะมีแถบพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ 2.10 eV

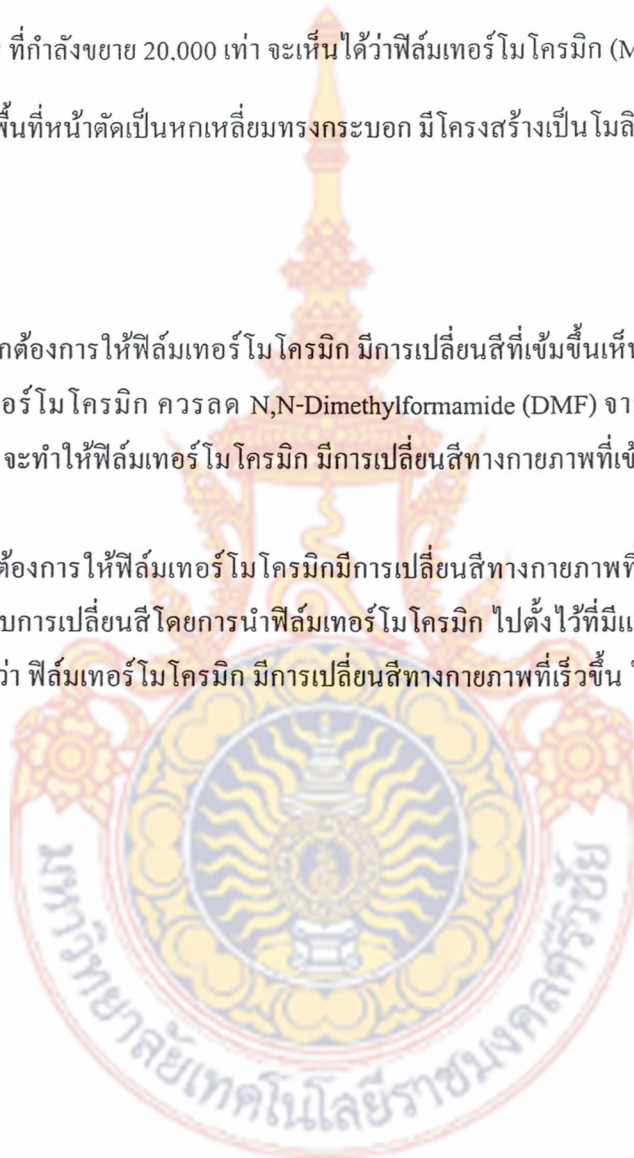
5.1.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของสารเคลือบจากกล้อง (Scanning Electron Microscope, SEM)

- ฟิล์มเทอร์โมโครมิก ($(\text{MoO}_3 \text{ 99.9\%} + \text{Cu}_2\text{O 0.1\%})$) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า จะมีรูปร่างเป็นแท่งสี่เหลี่ยม ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า จะเห็นได้ว่าฟิล์มเทอร์โมโครมิก ($(\text{MoO}_3 \text{ 99.9\%} + \text{Cu}_2\text{O 0.1\%})$) มีลักษณะพื้นที่หน้าตัดเป็นหกเหลี่ยมทรงกระบอก มีโครงสร้างเป็น โมลิบดีนัมเฮกซะโกนอล (Hexagonal)

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ในอนาคตหากต้องการให้ฟิล์มเทอร์โมโครมิก มีการเปลี่ยนสีที่เข้มขึ้นเห็นชัดเจนขึ้น ในการสังเคราะห์ฟิล์มเทอร์โมโครมิก ควรลด N,N-Dimethylformamide (DMF) จาก 50 มิลลิลิตร เหลือเพียง 30 มิลลิลิตร จะทำให้ฟิล์มเทอร์โมโครมิก มีการเปลี่ยนสีทางกายภาพที่เข้มขึ้น และเห็นได้ชัดขึ้น

- ในอนาคตถ้าต้องการให้ฟิล์มเทอร์โมโครมิกมีการเปลี่ยนสีทางกายภาพที่เร็วขึ้น ในการทดลองควรเลือกทดสอบการเปลี่ยนสีโดยการนำฟิล์มเทอร์โมโครมิก ไปตั้งไว้ที่มีแดดแรงๆ ทิ้งไว้ 30 – 60 นาที จะเห็นได้ว่า ฟิล์มเทอร์โมโครมิก มีการเปลี่ยนสีทางกายภาพที่เร็วขึ้น ใช้เวลาเพียงแค่ 30 – 60 นาที



บรรณานุกรม

- [1] ความสำคัญ [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 9 มิถุนายน 2557) เข้าถึงได้จาก
<http://www.nstda.or.th/nstda-knowledge/19012-thermochromic>
- [2] ประวัติความเป็นมา [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 9 มิถุนายน 2557) เข้าถึงได้จาก
<http://www.kmutt.ac.th/hynea>
- [3] ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานสารโฟโตโครมิก (วันที่ค้นข้อมูล: 9 มิถุนายน 2557) เข้าถึงได้จาก
https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fmis.en.kku.ac.th%2Fadministrator%2Fdoc_upload%2F20140303152634.pdf&ei=OaPuVKKWA82fugTx3IDwAg&usg=AFQjCNGphszk3zbCVYeQAduYTPUth0f3fg&sig2=Qi3IAYUpAR6CnW34kPsJYQ
- [4] การเปลี่ยนสีของไอโซเบนซีอิล [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 13 มิถุนายน 2557) เข้าถึงได้จาก
<https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1>
- [5] H. Miyazaki, Y. Baba, M. Inada, A. Nose, H. Suzuki, T. Ota. "Fabrication of WO₃-based composite films and improvement its photochromic properties by copper doping." Bulletin of the chemical society of japan 85(2012), 1053–1056.
- [6] J.N. Yao, T. He. "Photochromism of molybdenum oxide." Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 4(2003), 125–143 and A.I. Gavriluk. "Photochromism in WO₃ thin films." Electrochimica Acta 44(1999), 3027–3037
- [7] C.O. Avellaneda, L.O.S. Bulhões. "Photochromic properties of WO₃ and WO₃:X (X=Ti, Nb, Ta and Zr) thin films." Solid State Ionics 165 (2003), 117–121
- [8] ทฤษฎี [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 15 มิถุนายน 2557) เข้าถึงได้จาก
<http://www.scottmadden.com/?a=strm&aid=352>
- [9] H. Dürr, H.B. Laurent. "Photochromism molecules and systems." Elsevier, td (2006)
- [10] ปริมาตรรังสีต่างๆ เทียบกับแสงสเปกตรัม [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 27 มิถุนายน 2557) เข้าถึงได้จาก
<http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/spectrum.html>
- [11] การเปลี่ยนสีของโลหะออกไซด์ [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 1 กรกฎาคม 2557) เข้าถึงได้จาก
<http://www.mtec.or.th>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] P. Bamfield, M.G. Hutchings. “**Chromic phenomena: technological applications of colour colour chemistry.**” RSC Publishing, Cambridge, U.K. (2010)
- [13] C.O. Avellaneda, L.O.S. Bulhões. “**Photochromic properties of WO_3 and $WO_3:X$ ($X=Ti, Nb, Ta$ and Zr) thin films.**” Solid State Ionics 165 (2003), 117– 121.
- [14] J. Scarminio, A. Lourenco, A. Gorenstein. “**Electrochromic and photochromic in amorphous molybdenum oxide films.**” Thin Solid Films 302 (1997), 66-70
- [15] M.A. Quevedo-Lopez, R.F. Reidy, R.A. Orozco-Teran. “**Enhancement of the photochromic and thermochromic properties of molybdenum oxide thin films by a cadmium sulfide underlayer.**” Journal of Materials Science, Materials in Electronics 11(2000), 151-155
- [16] H. Kim, J. Kim, W. Kim, W. Choi. “**Enhanced photocatalytic and photoelectrochemical activity in the ternary hybrid of $CdS/TiO_2/WO_3$ through the cascaded electron transfer.**” J. Phys. Chem. C 115 (2011), 9797–9805
- [17] T. He, Y. Ma, Y. Cao, Y. Yin, W. Yang, J.N. Yao. “**Enhanced visible-light coloration and its mechanism of MoO_3 thin films by Au nanoparticles.**” Applied Surface Science 180(2001), 336-340.
- [18] S.A. Tomás, M.A. Arvizu, O. Zelaya-Angel, P. Rodríguez. “**Effect of ZnSe doping on the photochromic and thermochromic properties of MoO_3 thin films.**” Thin Solid Films, 518(2009), 1332–1336
- [19] S. Yamazaki, T. Yamate, K. Adachi. “**Kinetic study on photochromism of WO_3 aqueous sol and its enhancement accompanying spectral changes by the addition of TiO_2 aqueous sol.**” Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 392(2011), 163–170.
- [20] S. Higashimoto, N. Kitahata, K. Mori, M. Azuma. “**Photo-electrochemical properties of amorphous WO_3 supported on TiO_2 hybrid catalysts.**” Catalysis Letters Vol. 101 (2005), Nos.1–2.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] L. Li, M. Zhang. "Preparation, characterization, and photocatalytic property of $\text{Cu}_2\text{O} - \text{TiO}_2$ nanocomposites." *International Journal of Photoenergy* (2012).
- [22] J.P. Yasomanee, J. Bandara. "Multi-electron storage of photoenergy using $\text{Cu}_2\text{O}-\text{TiO}_2$ thin film photocatalyst." *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92 (2008), 348–352 and L. Liu, X. Gu, C. Sun, H. Li, Y. Deng, F. Gao, L. Dong. "In situ loading of ultra-small Cu_2O particles on TiO_2 nanosheets to enhance the visible-light photoactivity." *Nanoscale* Issue 20(2012).
- [23] G. Leftheriotis, S. Papaefthimiou, P. Yianoulis, A. Siokou. "Effect of the tungsten oxidation states in the thermal coloration and bleaching of amorphous WO_3 films." *Thin solid films* 384 (2001), 298-306. And A. Romanyuk, P. Oelhafen. "Evidence of different oxygen states during thermal coloration of tungsten oxide." *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006), 1945–1950.
- [24] A. Romanyuk, P. Oelhafen. "Evidence of different oxygen states during thermal coloration of tungsten oxide." *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006), 1945–1950.
- [25] A.I. Gavrilyuk. "Photochromism in WO_3 thin films." *Electrochimica Acta* 44(1999), 3027-3037
- [26] H.N. Cui. "Preparation and characterization of optical multilayered coatings for smart windows applications." Ph.D. Sciences, University of Minho (2005), 109-112. And J.N. Yao, Y.A. Yang, B. H. Loo. "Enhancement of photochromism and electrochromism in MoO_3/Au and MoO_3/Pt thin films." *J. Phys. Chem. B* 102(1998), 1856-1860.
- [27] H. Zheng, J.Z. Ou, M.S. Strano, R.B. Kaner, A. Mitchell, K. Kalantar-zadeh. "Nanostructured tungsten oxide – properties synthesis and applications." *Adv. Funct. Mater.* 21(2011), 2175–2196.
- [28] Y.N. Xu, W.Y. Ching. "Ground-state and optical properties of Cu_2O an CuO crystal." *The American Physical Society* 40 (1989).
- [29] G.Z. Cao. "Nanostructure & nanomaterials: synthesis, properties and applications." *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd* (2004).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [30] D. Parviz, M. Kazemeini, A.M. Rashidi, K.J. Jozani. "Synthesis and characterization of MoO₃ nanostructures by solution combustion method employing morphology and size control." J Nanopart Res 12(2010), 1509–1521.
- [31] Y. Bai , T. Yang , Q. Gu, G. Cheng, R. Zheng. "Shape control mechanism of cuprous oxide nanoparticles in aqueous colloidal solutions." Powder Technology 227 (2012),
- [32] แท่นให้ความร้อน (Hot Plate Stirrer) [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 9 กรกฎาคม 2557) เข้าถึงได้จาก
<http://stirbar.blogspot.com/2013/01/blog-post.html>
- [33] เครื่องวัดค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH meter) [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 15 กรกฎาคม 2557) เข้าถึงได้จาก
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3216/ph-meter>
- [34] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 15 กรกฎาคม 2557) เข้าถึงได้จาก
<http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [35] เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis) [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 27 กรกฎาคม 2557) เข้าถึงได้จาก
<http://www.aquatoyou.com/index.php/2013-05-16-04-06-08/874-uv-vis-spectrophotometer>
- [36] เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 27 กรกฎาคม 2557) เข้าถึงได้
<http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/APRIL/RADIO4-1.HTM>
- [37] เครื่องวัดสี (Color Meter) [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 27 กรกฎาคม 2557) เข้าถึงได้จาก
<http://www.pballtechno.com>
- [38] เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) [ออนไลน์]. (วันที่ค้นข้อมูล: 27 กรกฎาคม 2557) เข้าถึงได้
<http://www.rmutphysics.com/charud/invention/invention1/ultrasonic/index.htm>

โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) ผสม คิวปริสต์ออกไซด์ (Cu_2O) มีด้วยกัน 5 อัตราส่วน

1. MoO_3 95% + Cu_2O 5%

เวลา	L	A	B
0	54.00	14.30	30.18
10	59.15	14.84	30.76
20	59.27	14.68	30.74
30	59.70	14.65	31.14
40	59.82	14.89	31.17
50	59.79	14.72	31.06
60	60.11	14.86	31.85
90	59.89	14.82	31.61
120	60.31	14.88	32.38
180	60.53	14.83	32.90
240	60.52	15.15	32.78
300	60.69	15.36	32.94
360	60.57	15.41	32.79

2. MoO₃ 98% +Cu₂O 2%

เวลา (นาที)	L	A	B
0	60.75	4.00	16.30
10	61.15	4.09	16.65
20	60.96	4.17	19.69
30	61.52	3.93	19.93
40	61.60	3.91	19.93
50	64.75	3.93	19.75
60	62.38	3.19	20.17
90	61.98	3.20	19.80
120	63.02	2.85	20.43
180	64.51	2.01	20.65
240	64.58	2.05	21.17
300	66.02	1.64	21.69
360	63.97	1.55	22.01

3. MoO₃ 99% + Cu₂O 1%

เวลา (นาที)	L	A	B
0	73.90	-0.61	7.40
10	74.92	-0.74	6.29
20	76.35	-1.52	5.53
30	77.20	-1.50	5.34
40	77.89	-1.83	5.08
50	78.93	-2.05	4.77
60	78.42	-2.23	4.65
90	80.98	-2.87	4.07
120	81.49	-3.33	3.98
180	83.45	-3.90	3.95
240	85.09	-4.33	3.29
300	85.96	-4.56	3.34
360	87.01	-4.83	3.20

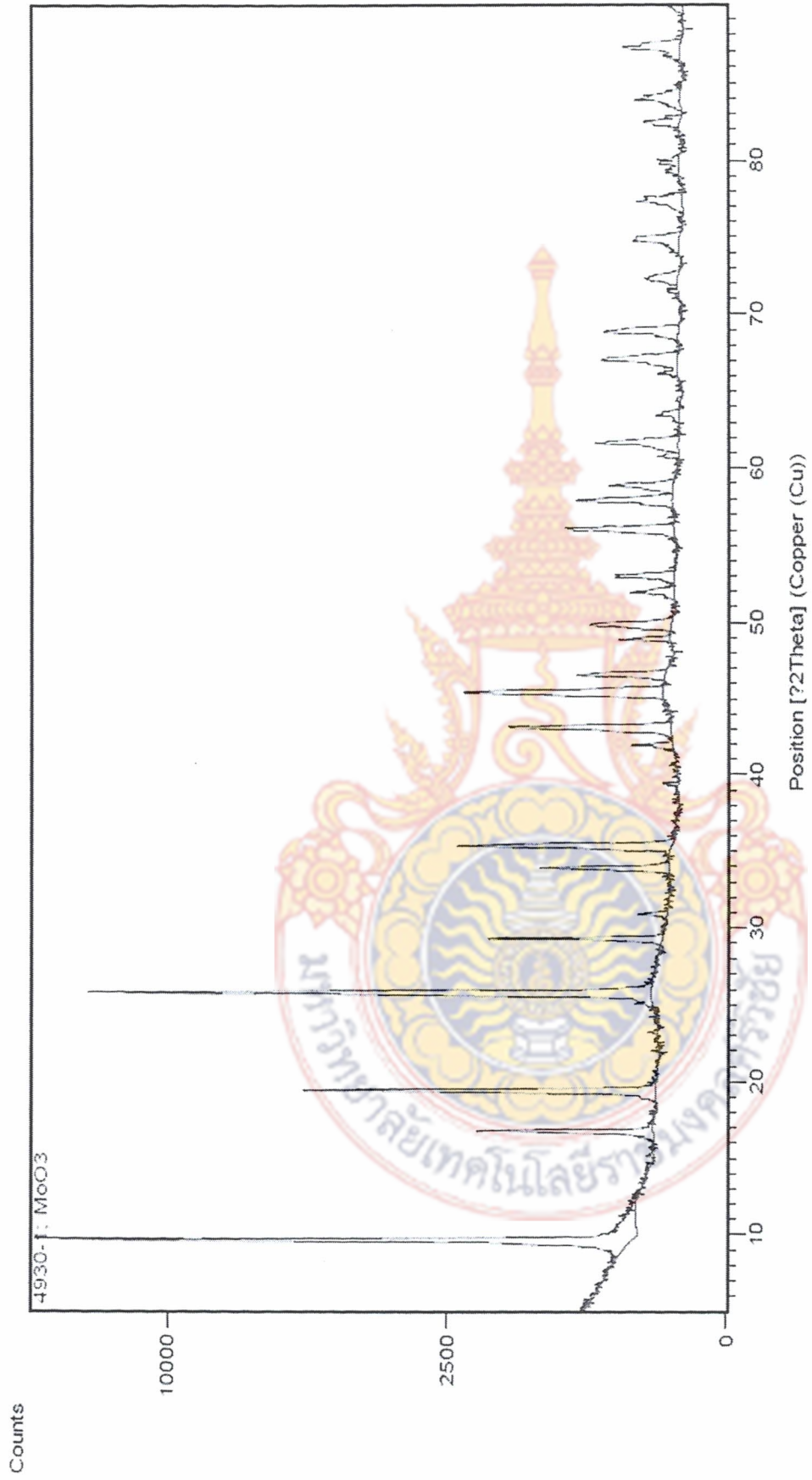
4. MoO₃ 99.5% + Cu₂O 0.5%

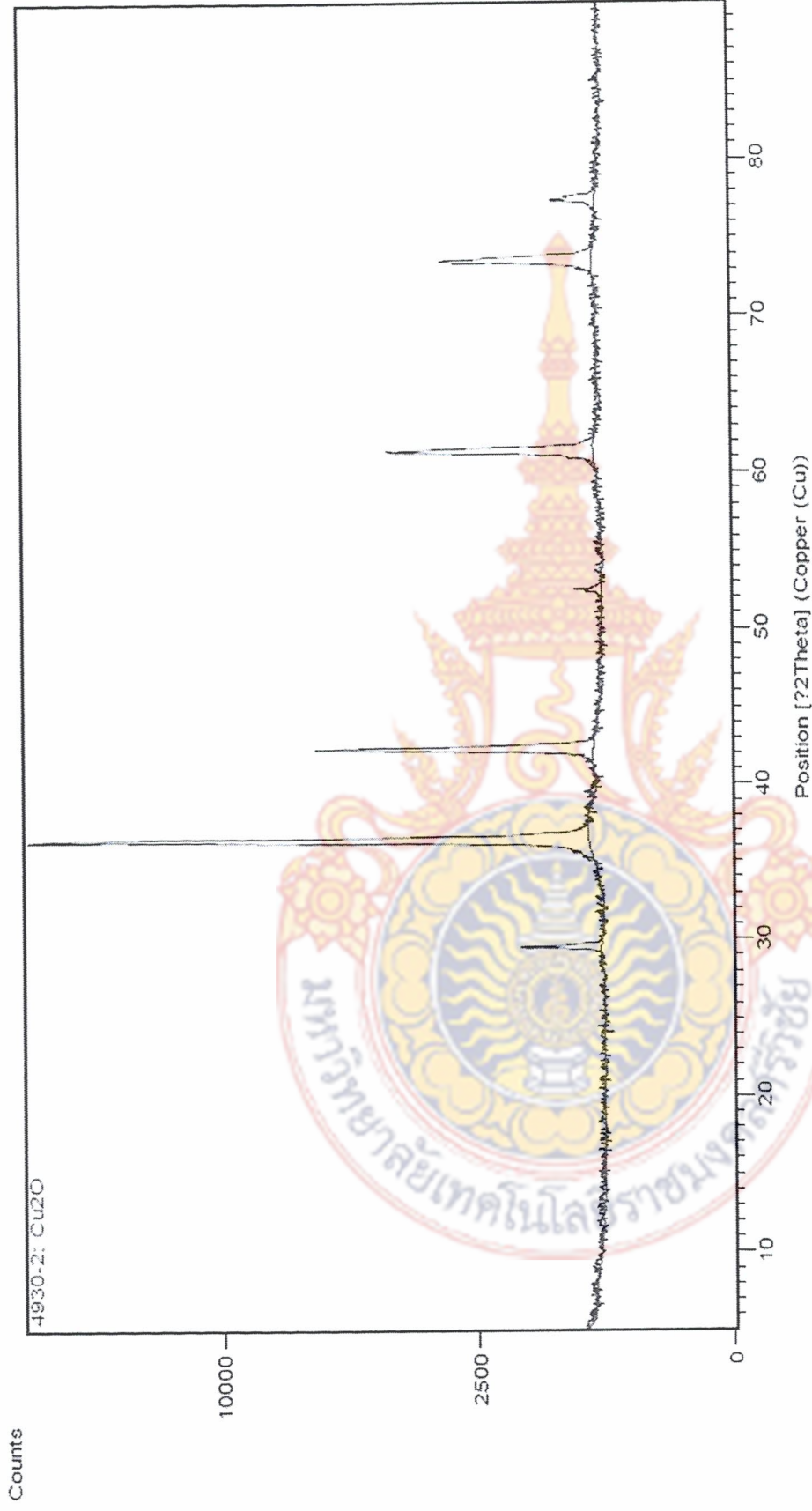
เวลา (นาที)	L	A	B
0	78.75	-4.80	-0.95
10	78.55	-4.72	-0.91
20	78.41	-4.58	-0.38
30	79.29	-4.71	-0.85
40	79.33	-4.78	-0.83
50	79.44	-4.54	-0.83
60	79.89	-4.60	-0.97
90	80.60	-4.64	-1.17
120	80.64	-4.86	-1.16
180	81.77	-4.76	-0.90
240	82.56	-4.82	-0.84
300	83.32	-4.80	-0.70
360	83.32	-4.49	-0.52

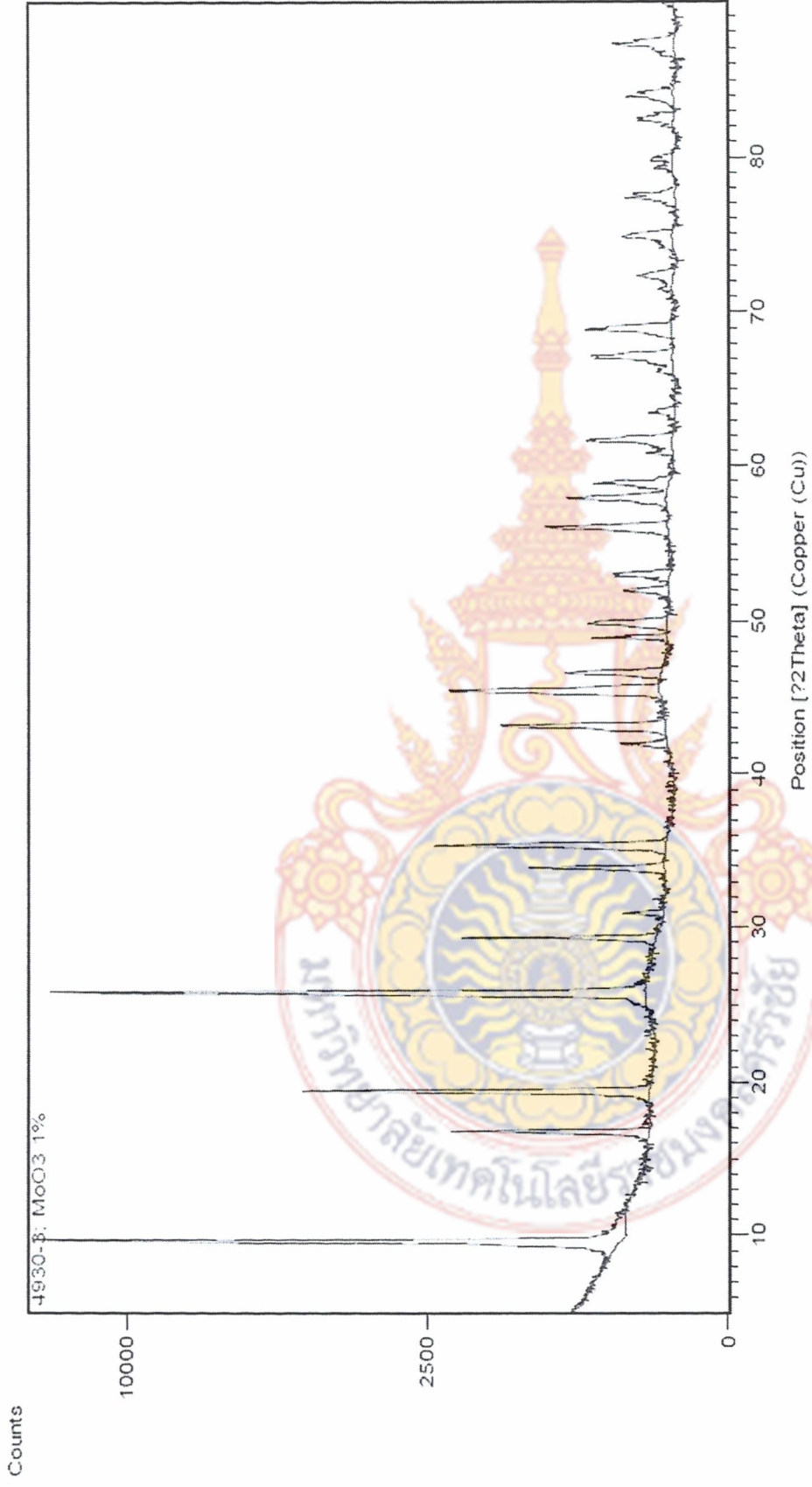
5. MoO₃ 100%

เวลา (นาที)	L	A	B
0	94.68	-3.41	-1.40
10	94.45	-3.68	-1.75
20	93.38	-4.60	-2.91
30	93.01	-5.28	-3.39
40	92.34	-5.53	-3.99
50	91.70	-6.17	-4.38
60	91.61	-6.37	-4.73
90	89.99	-7.66	-6.27
120	89.20	-8.15	-7.43
180	87.03	-9.81	-9.15
240	86.21	-9.88	-9.84
300	83.35	-11.47	-12.39
360	81.87	-11.70	-13.17









ประวัติผู้เขียน

1. ชื่อ สกุล นายปิยวิทย์ สุวรรณ

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล	2528
การศึกษามหาบัณฑิต (บริหารการศึกษา)	มหาวิทยาลัยทักษิณ	2544

2. ชื่อ สกุล นายมาหามะฐุไฮมี มะแซ

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

-โครงการทุนศึกษากันณุกฎคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ประจำปี 2551-2552

-ศูนย์เครือข่ายความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีภาคใต้
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (NANOTEC Center of Excellence at Prince of Songkla University)
ประจำปี 2551-2552

-โครงการทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2551

-ทุนโครงการพัฒนาอาจารย์และบุคลากรสำหรับสถาบันอุดมศึกษาในเขตพัฒนา
เฉพาะกิจจังหวัดชายแดนใต้ประจำปี 2552-2554

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito “Photoactivity and hydrophilicity of B and Ni co-doped TiO₂ films” *Advanced Materials Research* Vols. 148-149 (2011) pp 1473-1479.

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito “Improvement of hydrophilic property of rubber dipping former surface with Ni/B/TiO₂ nano-composite film” *Applied Surface Science*, Vol 258, (2012), Issue 10, pp4436-4443.

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Peerawas Kongsong, Phatcharee Phoempoon, Surasit Rawangwong, and Witthaya Sririkun “Application of rubber wood ash for removal nickel and copper from aqueous solution” *Environment and Natural Resources J. Vol 11, No.2, (2013)* pp17-27.

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Peerawas Kongsong, Pichaya Pitsuwan, Zuhaidee Seni, Withaya Sririkun and Julaluck Rodjananugoon “Comparative of paraffin and turpentine used in wax resist dying on batik fabric” *Journal of community development research* 6 (1) (2013) pp 31-41. (Thai)

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirach Taweepreeda, Fumio Saito and Pitchaya Pitsuwan “Influence of nitrogen doped TiO₂ nano composite film on hydrophilic property of rubber dipping former surface” *Key Engineering Materials* Vol. 608 (2014) pp 141-146.

Mahamasuhaimi Masae, Auttakorn Pradupjan, Anon Pisutthipongchoto, Lek Sikong and Peerawas Kongsong “The Efficiency of Synthesized Tungsten Oxide (WO₃) –Doped Titanium Dioxide (TiO₂) in Inhibition of Escherichia coli Growth and Prolonging of Fresh Vegetables and Fruits” *Science and Technology Journal* Vol. 22 (2014) pp 327-336. (Thai)

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Peerawas Kongsong, Patcharee Phoempoon and Pichya Pitsuwan “Thermo- physical characterization of paraffin and beeswax on cotton fabric” *Thammasat International Journal of Science and Technology (TIJSAT)* Vol. 19 No.4 (2014) pp 69-77.

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Peerawas Kongsong, Pichaya Pitsuwan, Chaturong Pholthawon and Niti Pawanwatcharakorn “Synthesis of Na doped TiO₂ nano

photocatalysts film on its photoactivity and hydrophilicity” *Thammasat International Journal of Science and Technology (TIJSAT)* Vol. 20 No.2 (2015) pp 63-71.

Mahamasuhaimi Masae, Pichaya Pitsuwan, Lek Sikong , Peerawas Kongsong, Arun Rattanapong, and Chainarong Jaidum “Low Temperature Preparation of Thiocarbamide Doped TiO₂ Film on Stainless Steel and its Antibacterial Efficiency Against *Staphylococcus aureus*.” *Applied Mechanics and Materials* Vol. 835 (2016) pp 78-83.

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong , Kalayanee Kooptarnond, Parnumart Choopool, and Anurak Bonbang “Antibacterial activity and UV blocking of silk fabrics dyed with pericarp of *Garcinia Mangostana*” *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials* 2016, 46 (2),pp 152 -159.

M. MASAE, L. SIKONG, P. CHOOPOOL, P. PITSUWAN, W. SRIWITTAYAKUL, A. BONBANG, N. KIMTHONG “DYEING SILK FABRICS WITH STINK BEAN POD (*PARKIA SPECIOSA* HASSK.) NATURAL DYE IN THE COLOR FASTNESS AND UV PROTECTION” 12 (7) 2017.

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Peerawas Kongsong, Chaturong Pholthawon, Niti Pawanwatcharakorn, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah and Victor Sandu “Super hydrophilicity and photocatalytic activity of potassium doped TiO₂ nanoparticulate films” *Revista De Chimie* 67, no.9, 2016

Mahamasuhaimi Masae, Withaya Sririkun and Ausmee Jeenarong “Antibacterial Activity of Se²⁺ Doped TiO₂ Nanoparticles Synthesized at Low Temperature” *CROATICA CHEMICA ACTA* (Article inpress, 2016)

การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

Masae, M. Tonnyapas, D. Kooptarnond, K. “Development and investigation of granite waste tiles body incorporated with oil palm fiber ash” International Conference on Mining, Materials, and Petroleum Engineering: The Frontiers of Technology (ICFT-2007) Phuket, Thailand. 10-12 May 2007

Lek Sikong, **Mahamasuhaimi Masae**, Kalayanee Kooptarnond and Wirat Tawiprida. “The effect of B and Ni co-doped TiO₂ film coated on glass substrate” 4th International

conference on recent advances in materials minerals & environment and 2nd Asian symposium on materials & processing (RAMM&ASMP 2009) Penang, Malaysia. 1-3 June 2009

Lek Sikong, **Mahamasuhaimi Masae**, Kalayanee Kooptarnond and Wirat Tawiprida. “Influence of Ni doping on photoactivity and hydrophilicity of TiO₂ composite film” 10th International seminar on environment & architecture, and 1st international conference on engineering, environment, economic, safety & health (10th SENVAR& 1st CONVEESH 2009) Sulawesi Island, Indonesia. 26-27 October 2009

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito “Photoactivity and hydrophilicity of B and Ni co-doped TiO₂ films” 2010 International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes (ICAMMP 2010) Shenzhen, China. 6-8 November 2010

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito “Improvement of photoactivity and hydrophilicity of rubber latex formers by B and Ni co-doped TiO₂ films” Commission on Higher Education Congress IV: University Staff Development Consortium (CHE-USDC Congress IV) Pattaya, Thailand. 14-16 September 2011

Mahamasuhaimi Masae, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarnond, Wirat Tawiprida and Fumio Saito “Influence of Ni/B/N/TiO₂ nano composite film on hydrophilic property of rubber dipping former surface” 2012 International Conference on Frontiers of Mechanical Engineering, Materials and Energy (ICFMEME 2012) Beijing, China December 20-21 2012

Mahamasuhaimi Masae, Pichaya Pitsuwan, Lek Sikong, Peerawas Kongsong, Arun Rattanapong, and Chainarong Jaidum “Low Temperature Preparation of Thiocarbamide Doped TiO₂ Film on Stainless Steel and its Antibacterial Efficiency Against *Staphylococcus aureus*.” The 2016 3rd International Conference on Advanced Engineering and Technology (3rd ICAET) Incheon National University, South Korea, December 16~18, 2016.

สิทธิบัตรและอนุสิทธิบัตร ฯลฯ

๑. สิทธิบัตร เรื่อง สารเคลือบแม่พิมพ์ไทเทเนียมไดออกไซด์และกรรมวิธีเคลือบสารเคลือบนี้ โดย เล็กสีกง กัลยาณี คุปตานนท์ มหามะสุไฮมี มะแซ และวิรัช ทวีปรีดา เลขที่คำขอ 1101000103 (18 มกราคม 2554)
๒. อนุสิทธิบัตร เรื่อง กรรมวิธีผลิตฟิล์มยางด้วยแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม โดย เล็ก สีกง กัลยาณี คุปตานนท์ มหามะสุไฮมี มะแซ และ

วิรัช ทวีปรีดา เลขที่คำขอ 1103000475 (10 พฤษภาคม 2554) และได้รับอนุมัติการ
คุ้มครอง ตั้งแต่ 5 กันยายน 2554 ถึง 9 พฤษภาคม 2560

๓. อนุสิทธิบัตร เรื่อง เทียนไขเขียนผ้าบาติกและกรรมวิธีผลิตเทียนไขนี้ โดย มหามะสุโฮมี
มะแซ เล็ก
สีคง พีรวัต คงสง ชูไฮศิ สนิ จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล และพิชญา พิศสุวรรณ เลขที่คำขอ
1303000461 (30 เมษายน 2556) และได้รับอนุมัติการคุ้มครอง ตั้งแต่ 3 มีนาคม 2557 ถึง
25 เมษายน 2562
๔. อนุสิทธิบัตร เรื่อง ตัวดูดซับสารละลายโลหะหนักที่ได้จากเถ้าชีวมวลและกรรมวิธีผลิตตัว
ดูดซับนี้ โดย มหามะสุโฮมี มะแซ เล็ก สีคง พีรวัต คงสง สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และวิทยา ศิ
ริคุณ เลขที่คำขอ 1303000462 (30 เมษายน 2556)
๕. อนุสิทธิบัตร เรื่อง กรรมวิธีในการผลิตแคลเซียมฟอสเฟตจากเถ้าไม้ยางพารา โดย มหา
มะสุโฮมี มะแซ เล็ก สีคง พีรวัต คงสง พชรวิทย์ วรรณอและ ศราวุธ สุภเพียร เลขที่คำ
ขอ 1403000145 (16 กุมภาพันธ์ 2557)
๖. อนุสิทธิบัตร เรื่อง สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยสารอินทรีย์เคลือบพลาสติก
และโลหะและกรรมวิธีเคลือบสารเคลือบนี้ โดย มหามะสุโฮมี มะแซ เลขที่คำขอ
1403000894 (13 สิงหาคม 2557)
๗. อนุสิทธิบัตร เรื่อง กรรมวิธีการย้อมผ้าด้วยสีธรรมชาติในท้องถิ่นภาคใต้ โดย มหามะ
สุโฮมี มะแซ เลขที่คำขอ 1503001761 (16 ตุลาคม 2558)
๘. อนุสิทธิบัตร เรื่อง फिल्मที่เปลี่ยนสีได้เมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนที่ผลิตได้จากไม้ฝางและ
กรรมวิธีผลิตฟิล์มนี้ โดย มหามะสุโฮมี มะแซ เลขที่คำขอ 1603000587 (8 เมษายน
2559)

รางวัลผลงานวิจัยที่ได้รับ

๑. โครงการเรื่อง กรรมวิธีผลิตฟิล์มยางด้วยแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับ
ผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม ได้รับรางวัล Special Prize ด้านเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรม ในงานวันนัก
ประดิษฐ์ 2556 เมื่อวันที่ 2-5 กุมภาพันธ์ 2556 จัดโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
(วช) ณ อิมแพค เมืองทองธานี
๒. รางวัลวิทยานิพนธ์ระดับดีมาก ประจำปี 2555 ระดับปริญญาเอก คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
๓. รางวัลวิทยานิพนธ์ชมเชย ประจำปี 2555 ระดับปริญญาเอก กลุ่มวิทยาศาสตร์กายภาพ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วันนักวิจัยและนวัตกรรม ม.อ. ครั้งที่ 7 ประจำปี 2556

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1. โครงการวิจัย: การพัฒนาคุณภาพการผลิตผ้าบาติกตามภูมิปัญญาท้องถิ่นในพื้นที่สามจังหวัดชายแดนใต้, หัวหน้าโครงการ, โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ประจำปี 2556, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 300,000 บาท, เสร็จสิ้นโครงการ
2. โครงการเรื่อง แบบขึ้นรูปถุงมือยางและถุงยางอนามัยที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ใต้อุปกรณ์โทรเจนและธาตุแอลคาไลน์ที่ทำความสะอาดตัวเองได้, หัวหน้าโครงการ, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปี 2556, งบประมาณที่ได้รับ 350,000, เสร็จสิ้นโครงการ
3. โครงการวิจัย: การพัฒนาคุณภาพการย้อมสีผ้าไหมพุ่มเรียงจากสีธรรมชาติตามภูมิปัญญาท้องถิ่นในพื้นที่ภาคใต้, หัวหน้าโครงการ, โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ประจำปี 2558, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 350,000 บาท, เสร็จสิ้นโครงการ
4. โครงการวิจัย: การต้านการยับ การยับยั้งจุลินทรีย์และต้านรังสียูวีของผ้าฝ้ายที่ย้อมจากวัสดุเศษเหลือของพืชตามภูมิปัญญาท้องถิ่นภาคใต้, หัวหน้าโครงการ, โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ประจำปี 2559, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 200,000 บาท, เสร็จสิ้นโครงการ
5. โครงการวิจัย: การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและการต้านรังสียูวีของผ้าฝ้ายย้อมจากสีธรรมชาติในท้องถิ่นภาคใต้, หัวหน้าโครงการ, งบประมาณแผ่นดิน (วช.) ประจำปี 2559, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 268,300 บาท, เสร็จสิ้นโครงการ
6. โครงการวิจัย: การประยุกต์ใช้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับปูนเบญจกานีและเปลือกมังคุดเพื่อเป็นวัสดุผสมผสานอาคาร, หัวหน้าโครงการ, งบประมาณแผ่นดิน (วช.) ประจำปี 2560, งบประมาณที่ได้รับ จำนวน 300,000 บาท, กำลังดำเนินการ