

การศึกษสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง ZnO/PMMA สำหรับการประยุกต์ใช้กับ

อุปกรณ์รวมแสงอาทิตย์

STUDY OF OPTICAL PROPERTIES OF ZnO/PMMA FILMS IN
APPLICATION OF SOLAR CONCENTRATOR

นางสาวณิชากร บุตพักทอนันต์

นางสาวนารี บำรุงจิตต์

นางสาวปิยสิริ แก้วปาน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง ZnO/PMMA สำหรับการประยุกต์ใช้กับ
อุปกรณ์รวมแสงอาทิตย์

STUDY OF OPTICAL PROPERTIES OF ZnO/PMMA FILMS IN
APPLICATION OF SOLAR CONCENTRATOR

นางสาวณิชากร	บุลพิภพอนันต์
นางสาวนารี	บำรุงจิตต์
นางสาวปิยสิริ	แก้วปาน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

**STUDY OF OPTICAL PROPERTIES OF ZnO/PMMA FILMS IN
APPLICATION OF SOLAR CONCENTRATOR**

MISS NICHAKORN

BOONPIPHOBANUN

MISS NAREE

BUMROONGCHIT

MISS PIYASIRI

KAEOPAN

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง ZnO/PMMA สำหรับการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์รวมแสงอาทิตย์

STUDY OF OPTICAL PROPERTIES OF ZnO/PMMA FILMS IN APPLICATION OF SOLAR CONCENTRATOR


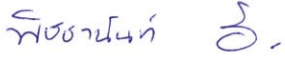

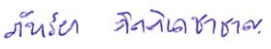
ชื่อนักศึกษา นางสาวณิชากร บูลพิภพอนันต์
นางสาวนารี บำรุงจิตต์
นางสาวปิยสิริ แก้วปาน

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภัทธีรยา กิตติเดชาชาญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กฤษกร โส้เจริญรัตน์	
ดร.พิชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ	
ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก	
ผศ.ดร.ภัทธีรยา กิตติเดชาชาญ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง ZnO/PMMA สำหรับการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์รวมแสงอาทิตย์
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ณิชกร บุญพิภพอนันต์ นางสาว นารี บำรุงจิตต์ นางสาว ปิยสิริ แก้วปาน
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทรียา กิตติเดชาชาญ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงและลักษณะการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ โดยที่ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีค่าเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์แตกต่างกันเตรียมแผ่นฟิล์มขึ้นโดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง ซึ่งความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์มีอิทธิพลต่อการดูดกลืนแสง การปลดปล่อยแสง และกระบวนการย่อยสลาย ได้ตรวจสอบโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ UV/VIS ซึ่งคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางได้นำไปตรวจสอบ วิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 320-390 นาโนเมตร และปลดปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-400 นาโนเมตร ซึ่งการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามความเข้มข้นของสารซิงค์ออกไซด์ มีสเปกตรัมการปลดปล่อยแสงที่มีพีคสูงสุด 372 นาโนเมตร สำหรับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 21wt% สำหรับการศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ได้พบว่ารังสีจากแสงทำให้ฟิล์มบางเสื่อมสภาพลง จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางมีลักษณะของพีคที่โดดเด่นคือ $2\theta = 31.728^\circ$ ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (100) และพีคอื่นๆ $2\theta = 34.400^\circ$ และ 37.212° สอดคล้องกับระนาบ (200) และ (100) ตามลำดับ

คำสำคัญ : การเสื่อมสภาพฟิล์มบาง ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ แผ่นรวมแสงลูมินีสเซนซ์

Title	Study of Optical Properties of ZnO/PMMA Films in Application of Solar Concentrator	
Students	Miss Nichakorn	Boonpipobanun
	Miss Naree	Bumroongchit
	Miss Piyasiri	Kaeopan
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Physics	
Academic Year	2013	
Advisor	Asst. Prof. Dr. Pattareeya Kittidachachan	

ABSTRACT

This project aims to explore the optical properties and photodegradation characteristic of ZnO/PMMA nanocomposite film. The ZnO/PMMA films with different concentration of ZnO were prepared by spin coat technique. The influence of ZnO concentration on the absorption and emission spectra and the photo-degradation process were investigated by UV/VIS spectrometer. The structural properties of the films were examined with an XRD. It was found that the ZnO/PMMA films absorbed the UV light within the wavelength range of 320-390 nm and emitted light within the wavelength range of 350-400 nm. The absorbance increased linearly as ZnO concentration increased. The photoluminescence spectrum has a single emission peak at 372 nm for film with ZnO concentration of 21wt%. For the photogradation studies, it was found that irradiation induced degradation of ZnO/PMMA film. The XRD analysis demonstrated that the prepared ZnO/PMMA film exhibited a dominant peak on $2\theta = 31.728^\circ$ corresponding to the (100) plane of ZnO and other peaks on $2\theta = 34.400^\circ$ and 37.212° corresponding to the (200) and (100) plane respectively.

Keywords: photodegradation, ZnO/PMMA nanocomposite film, photoluminescence

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทริยา กิตติเดชาชาญ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนวทางแก้ปัญหา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วราวุฒิ เถลัดดา ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องแหล่งกำเนิดแสง DH-2000

ขอขอบพระคุณ ดร.พิชชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ ที่ให้ความอนุเคราะห์สารซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เพื่อทำการทดลองเบื้องต้น

ขอขอบพระคุณ ดร.อาภาภรณ์ สกฤตกระเวก และ ดร.กฤษกร โส้เจริญรัตน์ ให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้ความช่วยเหลือทุกๆ ด้าน รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาตลอดระยะเวลาในการทำโครงการพิเศษนี้

นางสาวณิชกร บุลพิภพนันต์

นางสาวนารี บำรุงจิตต์

นางสาวปิยสิริ แก้วปาน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
คำย่อและสัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 วิธีการดำเนินงาน	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	
2.1 อุปกรณ์รวมแสงลูมิเนสเซนส์และอุปกรณ์แปลงพลังงาน	6
2.2 สมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์	25
2.3 X-ray Diffractometer XRD	28
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 เครื่องมือและระบบการวัดที่เกี่ยวข้อง	31
3.2 กระบวนการจัดเตรียมฟิล์มบาง ZnO/PMMA	36
3.3 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	37
3.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์ม	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	42
4.2 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงลูมิเนสเซนส์ในรูปแบบฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์	43
4.3 ผลการศึกษาสมบัติการส่งผ่านในรูปแบบฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์	44
4.4 ผลการศึกษาสมบัติการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ในรูปแบบฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์	45
4.5 ผลการศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงออกไซด์	48
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	56
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	5
2.1 ชนิดของลูมิเนสเซนส์ประเภทต่างๆ	10
2.2 ตารางแสดงสมบัติทางกายภาพบางประการของซิงค์ออกไซด์	30
4.1 ตารางการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสง 10 ชั่วโมง	53
4.2 ตารางการปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสง 10 ชั่วโมง	55
4.3 ตารางการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสง 15 วัน	57
4.4 ตารางการปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสง 15 วัน	60

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง พี-เอ็น	2
1.2 โครงสร้างแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนส์	3
2.1 แผนภาพแสดงทิศทางการหมุนของอิเล็กตรอนในโมเลกุลต่างๆ	11
2.2 แผนภาพแสดงการดูดกลืนและการปลดปล่อยพลังงานรูปแบบต่างๆ	12
2.3 แผนภาพแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสง	13
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟลูออเรสเซนส์กับความเข้มข้นของสาร	16
2.5 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของแสงภายในอุปกรณ์รวมแสงลูมิเนสเซนส์	17
2.6 แผนภาพสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเรืองแสง	17
2.7 ไดอะแกรมแสดงกลไกต่างๆ ที่ทำให้เกิดการลดทอนของแสงลูมิเนสเซนส์	18
2.8 รูปแสดงปรากฏการณ์ Escape cone loss	19
2.9 รูปแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสง	21
2.10 รูปแสดงปริมาณแสงที่ฉายผ่านมายังสารและปริมาณแสงที่ถูกส่งผ่านออกมา	22
2.11 รูปแสดงองค์ประกอบของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์	24
2.12 Double beam spectrometer	25
2.13 รูปแสดงโครงสร้างซิงค์ออกไซด์	26
2.14 รูปเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	28
2.15 รูปแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	29
3.1 ส่วนประกอบของระบบเคลือบฟิล์มบางแบบหมุนเหวี่ยง	32
3.2 เครื่องฉายแสงจากหลอดควิทิเรียม	32
3.3 สายใยแก้วนำแสงสำหรับนำส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังฟิล์มบาง	33
3.4 สายใยแก้วนำแสงสำหรับนำส่งจากฟิล์มบางไปยังเครื่องสเปกโตรมิเตอร์	33
3.5 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์	34
3.6 อุปกรณ์จับยึดเส้นใยแก้วนำแสง	34
3.7 อุปกรณ์จับยึดแผ่นฟิล์ม ZnO/PMMA	35
3.8 ระบบการวัดการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง	35
3.9 การติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่าการดูดกลืนของฟิล์ม ZnO / PMMA	37
3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่าการส่งผ่านของฟิล์ม ZnO/PMMA	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 การติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่าสเปกตรัมลูมิเนสเซนซ์แบบใช้ หลอดควิเทียเรียม + แบนพาสฟิลเตอร์	39
3.12 การติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่าสเปกตรัมลูมิเนสเซนซ์แบบใช้ ไฮโวลต์แอลอีดี	40
4.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่ปริมาณ 15wt% และ 18wt%	42
4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 12wt% 15wt% 18wt% และ 21wt%	43
4.3 การส่งผ่านในรูปแบบแสงลูมิเนสเซนซ์แต่ละความเข้มข้น 12wt% 15wt% 18wt% และ 21wt%	44
4.4 การปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ที่ความเข้มข้น 12wt%	45
4.5 การปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ที่ความเข้มข้น 15wt%	46
4.6 การปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ที่ความเข้มข้น 18wt%	46
4.7 การปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ที่ความเข้มข้น 21wt%	47
4.8 การปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์แต่ละความเข้มข้น 12wt% 15wt% 18wt% และ 21wt%	47
4.9 การเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงแดดเป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์	48
4.10 การเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงเป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยการวัดค่าการปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์	50
4.11 การเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงแดดเป็นเวลา 15 วัน โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์	52
4.12 การเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงแดดเป็นเวลา 15 วัน โดยการวัดค่าการปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์	54

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
A	ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)
A_{LSC}	พื้นที่ด้านบนแผ่นรวมแสง
A_{PV}	พื้นที่ที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์
c	ความเร็วแสง (Velocity of light)
C	ความเข้มข้นของโมเลกุล
DCM	สารทำละลาย Dichloromethane
E_g	พลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy)
FWHM	ค่าฟลูอิเดวิตี้
h	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant)
I	ปริมาณแสงที่ถูกส่งผ่านออกมา
I_0	ปริมาณแสงที่ฉายผ่านมายังสาร
I_F	ความเข้มของแสงลูมิเนสเซนซ์
I_{LSC}	กระแสโฟโตอินแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์
I_{PV}	กระแสโฟโตอินเซลล์แสงอาทิตย์
IC	การแปลงผันภายใน (Internal conversion)
ISC	การลดระดับพลังงานข้ามสถานะ (Intersystem crossing)
l	ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่างหรือความกว้างของเซลล์
LSC	อุปกรณ์รวมแสงลูมิเนสเซนซ์ (Luminescent Solar Concentrators)
M	โมเมนต์เชิงมุมของออบิทัลแต่ละสถานะ (Molecular multiplicity)
N	จำนวนครั้งของการดูดกลืนซ้ำ
nm	นาโนเมตร
PMMA	พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl Methacrylate)
T	ค่าการส่งผ่าน (Transmittance)
UV	Ultra violet
VIS	Visible
XRD	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer)
ZnO	ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)
Φ_F	ควอนตัมยิลด์ (Quantum yield)
λ	ความยาวคลื่น

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
ξ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสาร
γ	นุ
η	อีต้า (eta)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

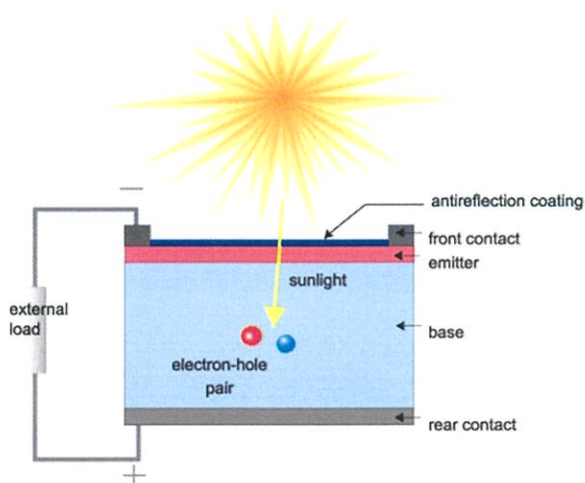
พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของมนุษย์ กิจกรรมทุกประเภทของมนุษย์เราต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น ซึ่งมีแหล่งพลังงานขนาดใหญ่คือ น้ำมันเชื้อเพลิงและถ่านหิน เป็นพลังงานหลักในปัจจุบัน เมื่อการเติบโตทางเศรษฐกิจอุตสาหกรรมและการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก ทำให้มีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้นอย่างมหาศาล เราจึงเริ่มตระหนักว่า น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นพลังงานที่มีจำกัด อาจเกิดปัญหาการขาดแคลนขึ้นอย่างแน่นอนในอนาคต จึงเริ่มมองหาแหล่งพลังงานทดแทน จึงหันไปมองพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานชีวมวล จัดเป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้โดยไม่มียวันหมด

ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกรูปแบบหนึ่งที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษและสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่มียวันหมด การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เป็นวิธีการในรูปแบบหนึ่งของการนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ที่ใช้กันมากในปัจจุบัน โดยสิ่งประดิษฐ์ที่ทำหน้าที่ในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าคือเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์คือสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลก (ทราย) มาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์และมีโครงสร้างรอยต่อพี-เอ็น ดังรูปที่ 1.1 เมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์รังสีของแสงหรือโฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถกระโดดขึ้นมายังแถบความนำ และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เมื่ออิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่ครบวงจรก็จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น [1]

นอกจากนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงประมาณ 25% แต่อย่างไรก็ตามอัตราส่วนระหว่างต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงมีค่าสูงมากเนื่องจากวัสดุซิลิคอนมีการแข่งขันราคาทางการตลาดกับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นการลดขนาดของเซลล์

แสงอาทิตย์ซึ่งหมายถึงการลดปริมาณการใช้วัสดุซิลิคอนให้น้อยลง จะส่งผลทำให้ต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์น้อยลงด้วย

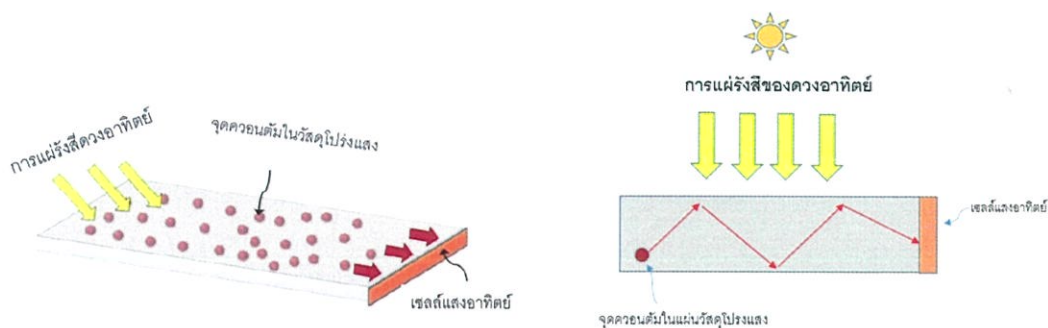


รูปที่ 1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง พี – เอ็น [1]

จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้เกิดแนวความคิดอุปกรณ์รวมแสงลูมิเนสเซนส์ (Luminescent Solar Concentrators : LSCs) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลายกลุ่ม เนื่องจากมีข้อได้เปรียบมากกว่าการใช้เลนส์หรือกระจกในการรวมแสงหลายประการคือ สามารถใช้ประโยชน์จากแสงที่ตกกระทบ ได้ทั้งแสงตรง (Direct light) และแสงที่เกิดจากการกระเจิง(Diffuse light) จากชั้นบรรยากาศหรือก้อนเมฆ จึงไม่จำเป็นต้องมีระบบติดตามดวงอาทิตย์และยังสามารถทำงานได้ดีในสถานะที่มีเมฆมาก นอกจากนี้คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้อุปกรณ์รวมแสงลูมิเนสเซนส์ ยังต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เลนส์ในการรวมแสง ทำให้ไม่ต้องอาศัยระบบหล่อเย็นในการลดอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์

อุปกรณ์รวมแสงลูมิเนสเซนส์มีลักษณะเป็นแผ่นหรือฟิล์มบางพอลิเมอร์โปร่งแสง ซึ่งภายในแผ่นหรือฟิล์มบางมี โมเลกุลของสารเรืองแสงกระจายอยู่ทั่วแผ่นและบริเวณด้านขอบของแผ่นประกบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 1.2

เมื่อแสงตกกระทบบนผิวหน้าของแผ่นรวมแสง วัสดุลูมิเนสเซนส์ภายในแผ่นจะดูดกลืนแสงในย่านพลังงานที่เหมาะสมและคายพลังงานออกมาในรูปของแสงลูมิเนสเซนส์ โดยแสงลูมิเนสเซนส์จะถูกปลดปล่อยออกมาทุกทิศทางและแสงบางส่วนถูกดูดกลืนด้วยสารเรืองแสงที่อยู่ภายในแผ่น (ประมาณ 75%) จะเคลื่อนที่อยู่ภายในแผ่นรวมแสงโดยอาศัยกลไกการสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection) และเคลื่อนที่ไปยังเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกบติดอยู่บริเวณขอบของแผ่นรวมแสง ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ทำการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 1.2 โครงสร้างแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2497 ได้มีการออกแบบและขบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงาน โดยมีแนวโน้มในการนำกระจกและเลนส์มาใช้เพื่อช่วยรวมแสงให้กับสิ่งประดิษฐ์ ทำให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการรวมแสงโดยอาศัยกระจกและเลนส์นั้นจะทำให้มีอุณหภูมิของเซลล์เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการติดตามระบบระบายความร้อนให้กับเซลล์ อีกทั้งในการรับแสงจะต้องอาศัยระบบติดตามดวงอาทิตย์เพื่อให้ได้รับแสงในทิศทางที่เหมาะสมอยู่ตลอดเวลา ทำให้ระบบมีราคาสูงขึ้น

โครงการพิเศษนี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ โดยจัดเตรียมแผ่นจากวัสดุ ZnO และ PMMA ทั้งนี้วัตถุประสงค์หลักคือเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุ ZnO มาประยุกต์ใช้ในการสร้างแผ่นรวมแสง โดยผู้วิจัยจะได้ทำการศึกษากระบวนการในการจัดเตรียมแผ่นรวมแสง รวมถึงทำการศึกษาสมบัติทางแสงของแผ่นรวมแสงที่จัดเตรียมได้ อาทิ การดูดกลืนแสง การส่งผ่านแสง การคายพลังงานในรูปของแสงลูมิเนสเซนซ์ และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสงของแผ่นเมื่อได้รับแสงเป็นระยะเวลาต่างๆ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการที่เหมาะสมในการจัดเตรียมแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของวัสดุ ZnO ในรูปของสารละลายและในรูปของฟิล์มบาง
3. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ ZnO มาใช้สร้างแผ่นรวมแสงเพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจกระบวนการที่เหมาะสมในการจัดเตรียมแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนส์
2. มีความรู้ความเข้าใจในหลักการวัดสมบัติทางแสงของสารละลายซิงค์ออกไซด์
3. ทราบถึงความเหมาะสมในการใช้สาร ZnO และ PMMA เพื่อจัดเตรียมแผ่นรวมแสง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในการพัฒนาฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ในรูปแบบของอุปกรณ์รวมแสงลูมิเนสเซนซ์หรือ LSC เพื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ จึงจำเป็นต้องทราบถึงพื้นฐานและหลักการทํางานต่างๆ ของอุปกรณ์รวมแสงลูมิเนสเซนซ์ เพราะฉะนั้นในบทนี้จึงอธิบายเกี่ยวกับหลักการทํางานและทฤษฎีพื้นฐานของอุปกรณ์รวมแสงลูมิเนสเซนซ์

2.1 อุปกรณ์รวมแสงลูมิเนสเซนซ์และอุปกรณ์แปลงพลังงาน

อุปกรณ์ LSC ได้ถูกศึกษาในรูปแบบของฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งส่วนประกอบของฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

2.1.1 สารเรืองแสง

สารเรืองแสงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ เนื่องจากเป็นตัวที่ทำหน้าที่ในการเกิดกลไกการเรืองแสง หรืออีกนัยหนึ่งคือเป็นวัสดุสำคัญในการแปลงความยาวคลื่นหรือพลังงานของแสง สมบัติของสารเรืองแสงที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานในรูปแบบของอุปกรณ์มีดังนี้

- มีความเสถียรเชิงแสง
- มีค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนสูงเพื่อให้เกิดการดูดกลืนแสงได้ดี
- มีย่านการดูดกลืนแสงที่กว้างและสามารถปลดปล่อยแสงในย่านที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์
- มีค่าควอนตัมยิลด์สูง
- ไม่เกิดปรากฏการณ์ดูดกลืนซ้ำ
- ราคาถูกและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบันยังไม่มีสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ชนิดใดที่มีสมบัติครบถ้วนดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่ในสารแต่ละชนิดจะมีข้อได้เปรียบและข้อบกพร่องที่แตกต่างกันออกไปตามแต่ละชนิดของสาร ซึ่งขอยกตัวอย่างสาร 2 ชนิดดังนี้

- สารเรืองแสงชนิดอนินทรีย์ (Inorganic dyes)

ในอุปกรณ์ LSC เมื่อแรกเริ่ม ได้ใช้สารเรืองแสงในการผลิตเป็นสารอนินทรีย์ คือ Nd^{3+} ในสารเรืองแสงชนิดอนินทรีย์มีข้อได้เปรียบกว่าสารเรืองแสงชนิดอื่นคือมีความทนทานต่อความร้อนได้สูง และในสารอนินทรีย์จำพวกสารจากธาตุ rare earth จะมีการเกิดปรากฏการณ์ การดูดกลืนซ้ำ ขึ้นน้อย นอกจากนั้นสารอนินทรีย์ยังมีความเสถียรเชิงแสงสูง แต่มีข้อบกพร่องในเรื่องของประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ได้ค่อนข้างต่ำ และมีความสามารถดูดกลืนแสงได้ไม่คืนัก ซึ่งแนวทางในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้คือการใช้ความเข้มข้นของสารที่มากขึ้น แต่การแก้ปัญหาด้วยวิธีนี้จะทำให้โอกาสในการเกิดปัญหาการดูดกลืนซ้ำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

- สารเรืองแสงชนิดอินทรีย์ (Organic dyes)

สารอินทรีย์มีข้อได้เปรียบกว่าสารชนิดอื่น คือมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนส์อยู่ในย่านความยาวคลื่นที่หลากหลาย และมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูง อีกทั้งในสารอินทรีย์หลายชนิดมีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์สูงเข้าใกล้หนึ่งและในปัจจุบันยังได้มีการสังเคราะห์สารอินทรีย์ชนิดใหม่ขึ้นอย่างแพร่หลายเพื่อให้มีการดูดกลืนแสงที่ครอบคลุมหลายความยาวคลื่นและปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ได้สูง แต่สารอินทรีย์มีข้อบกพร่องในแง่ของความเสถียรเชิงแสงที่ค่อนข้างต่ำ นอกจากนั้นสารอินทรีย์หลายชนิดที่มีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์สูงจะปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ที่มีความยาวคลื่นในช่วงของแสงสีเขียว-เหลือง ซึ่งถ้าพิจารณาเพื่อนำมาใช้ประโยชน์กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนย่านแสงดังกล่าวซึ่งจะไกลจากแถบพลังงาน E_g ของสารซิลิกอนอยู่มาก

2.1.2 วัสดุตัวกลาง

วัสดุตัวกลางในฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์ทำหน้าที่เป็นตัวกลางทางเดินแสงในกับโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยจากกลไกการเรืองแสง ลักษณะสมบัติของวัสดุตัวกลางที่ดี ดังนี้

- มีความโปร่งแสง
- มีความเสถียรในเชิงเคมี
- สามารถขึ้นรูปได้ง่าย

- มีแรงเชิงกลสูง
- ทนทานต่อสภาพอากาศในฤดูกาลต่างๆ ได้ดี
- มีความหนาแน่นต่ำ
- ราคาถูก
- ไม่มีความเป็นพิษ
- มีค่าดัชนีหักเหสูง

จากสมบัติที่แสดงข้างต้น พบว่ามีสารหลายชนิดที่คุณสมบัติเหมาะสม เช่น สารพอลิเมอร์ โปร่งแสงจำพวกพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl Methacrylate : PMMA) เป็นต้น ซึ่งสาร PMMA เป็นวัสดุตัวกลางที่มีความนิยมนมากที่สุด เนื่องจากมีความโดดเด่นในเรื่องของความเหนียว ทนความร้อน คงทนต่อการใช้งาน มีความเสถียรในเชิงเคมีที่สูง มีน้ำหนักเบา มีเสถียรภาพเชิงแสง มีราคาถูกและง่ายต่อการสังเคราะห์อีกด้วย ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมในการนำมาเป็นวัสดุตัวกลาง ที่ทนทานต่อแสงอาทิตย์ได้ดี

2.1.3 Polymethmethaacrylate (PMMA)

PMMA รู้จักกันดีในชื่อว่าการค้าที่ว่า เพลคซิกกลาส(Plexiglass) ลูซิซท์(Lucite) โพลีกลาส (Polyglass) ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมในสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 1936 PMMA ได้ถูกนำไปผสมกับพลาสติกชนิดอื่นๆ เช่น สไตรีน (styrene) พิววีซี เกิดเป็นพลาสติกชนิดใหม่ เช่น Methyl Methacrylate Styrene เป็นต้น PMMA มีลักษณะใส ไม่มีสี สามารถให้แสงส่องผ่านได้ถึง 92% มีความแข็งแรงและทนทานต่อดินฟ้าอากาศได้ดี กว่า Polystyrene สมบัติเชิงกล และความคงทนต่อความร้อนดีมาก ส่วนสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าดีปานกลาง เนื่องจากสมบัติเด่นของ PMMA คือ ความโปร่งใส และการนำไปซ่อมสีได้ง่าย จึงถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้าและส่วนประกอบรถยนต์ เช่น ไฟเลี้ยว ไฟท้าย กระจกรถยนต์ หน้าปัดเข็มไมล์ ประโยชน์การใช้งานอื่นๆ เช่น ป้ายโฆษณา แวนตา เลนส์ ใช้ทำกระจกแทนแก้ว หลังคาโปร่งแสง ก๊อกน้ำ เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องประดับ เป็นต้น

คุณสมบัติ เป็นพลาสติกที่ใสที่สุดชนิดหนึ่ง แข็งแรงพอสมควร เป็นรอยขีดข่วนง่ายทนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี ทนความร้อน ความเย็น เป็นฉนวนไฟฟ้าดี ทนสารเคมีพอสมควร ไม่ควรให้ถูกน้ำมันเบนซิน อาซิโตน คลอโรฟอร์ม สเปรย์น้ำหอม มีความเข้มข้น ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นพิษ โปร่งใส PMMAยังทำเป็นสีต่างๆ ได้มีทั้งชนิดใส ฝ้าและทึบแสง

ประโยชน์ นิยมนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ป้ายร่ายคำ ป้ายโฆษณา โคมหลังคา กรอบ แวนตา เลนซ์ โคมไฟ เฟอร์นิเจอร์ ฝ้า และถ้วยบรรจุของเหลวชนิดใส เป็นต้น

2.1.4 กลไกการเรืองแสงของสารเรืองแสง

กลไกหลักในการแปลงพลังงานแสงของสารเรืองแสงประกอบด้วย 2 กระบวนการ ดังนี้

2.1.4.1 กระบวนการดูดกลืนแสง

เมื่อแสงที่มีพลังงานที่เหมาะสมตกกระทบที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ แสงเหล่านี้จะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารเรืองแสงโดยปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนเข้าไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางที่แสงเดินทางผ่านวัสดุและความเข้มข้นของสารเรืองแสง ดังสมการ

$$A(\lambda) = \log\left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}\right) = \xi(\lambda) IC \quad (2.1)$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืน

ξ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสาร ($Lmol^{-1}cm^{-1}$)

I คือ ระยะทางที่แสงเดินทางผ่าน ซึ่งในที่นี้หมายถึงความหนาของฟิล์มบาง

C คือ ความเข้มข้นของสารเรืองแสง (M)

I_0 และ I คือ ความเข้มข้นของแสงก่อนและหลังเดินทางผ่านฟิล์มบาง ตามลำดับ

จากกฎของ Beer-Lambert สามารถหาประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งเป็นสัดส่วนของแสงที่ถูกดูดกลืน โดยสารเรืองแสงต่อแสงที่ตกกระทบพื้นผิวของฟิล์มบาง ดังสมการ

$$\eta_{abs} = \frac{\int_0^\infty I_0(\lambda)[1-10^{-A(\lambda)}]d\lambda}{\int_0^\infty I_0(\lambda)d\lambda} \times 100 \quad (2.2)$$

2.1.4.2 กระบวนการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ของสารเรืองแสง

แสงที่ถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารเรืองแสงที่อยู่ภายในฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ถูกใช้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนในอะตอมของโมเลกุลสารเรืองแสงอยู่ในระดับชั้น

พลังงานที่สูงขึ้น หรืออยู่ในสถานะกระตุ้นและเพื่อให้เข้าสู่ความเสถียรของระบบ อิเล็กตรอนในสถานะดังกล่าวจะตกกลับมายังสถานะพื้น กระบวนการตกกลับลงมาของอิเล็กตรอนจากสถานะกระตุ้นมายังสถานะพื้นจะมีการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence) ออกมา แสงลูมิเนสเซนซ์สามารถจำแนกได้หลายประเภทดังตารางที่ 2.1 ซึ่งแต่ละประเภทจะถูกแบ่งตามแหล่งพลังงานที่กระตุ้น โมเลกุลของสารเรืองแสงแล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ เช่น โฟโตลูมิเนสเซนซ์ เกิดจากโมเลกุลทำอันติริยากับโฟตอนและเรดิโอลูมิเนสเซนซ์ เกิดจากโมเลกุลของสารนั้นได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปเป็น โมเลกุลที่สถานะกระตุ้น เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ชนิดของลูมิเนสเซนซ์ประเภทต่างๆ

ชนิดของลูมิเนสเซนซ์	แหล่งพลังงานในการกระตุ้น โมเลกุล
Bioluminescence	Biological process
Cathodoluminescence	Cathode ray
Chemiluminescence	Chemical energy
Electroluminescence	Electric field
Photoluminescence	Photon
Thermoluminescence	Thermal

สารเรืองแสงได้อาศัยหลักการในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ประเภทโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งมีแหล่งพลังงานในการกระตุ้น โมเลกุลสารเรืองแสงเป็นแสงอาทิตย์ที่มากกระทบบนผิวหน้าของฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ โดยโฟโตลูมิเนสเซนซ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือฟลูออเรสเซนซ์และฟอสฟอเรสเซนซ์ โดยกระบวนการในการเกิดแสงลูมิเนสเซนซ์เป็นดังนี้

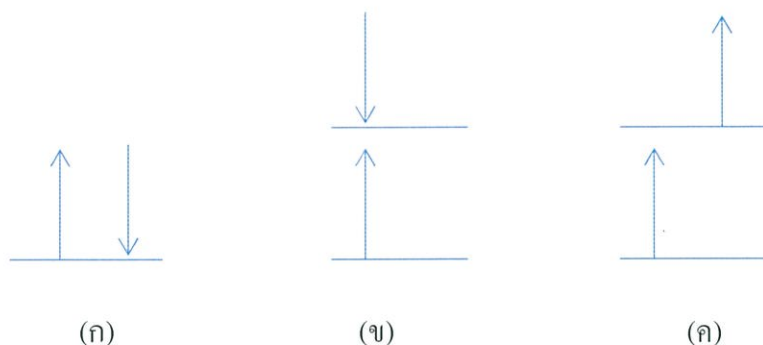
- กระบวนการกระตุ้น (Excitation)

โมเลกุลทั่วไปจะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ ที่สถานะพลังงานต่ำสุดหรือสถานะพื้น อิเล็กตรอนจะอยู่เป็นคู่ในออร์บิทัลและมีทิศทางการหมุนตรงกันข้าม ถ้า M คือ Molecular multiplicity ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงโมเมนต์เชิงมุมของออร์บิทัลของแต่ละสถานะมีค่า

$$M = 2S + 1 \quad (2.3)$$

เมื่อ S คือ เลขควอนตัมการหมุนของโมเลกุลและเป็นผลรวมของการหมุนสุทธิของอิเล็กตรอนในโมเลกุล ซึ่งสารอินทรีย์ส่วนมากจะมีค่า $S=0$ เพราะมีจำนวนเป็นคู่และทิศทางตรงกัน

ข้ามเพราะฉะนั้น ค่า $M = 1$ มีความหมายว่าเป็นสถานะเดี่ยว สถานะเดี่ยวที่สถานะพื้นหรือมีพลังงานต่ำสุดจะแทนด้วย S_0 ถ้าเป็นสถานะเดี่ยวที่หนึ่งและที่สองจะเป็น S_1 และ S_2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงทิศทางการหมุนของอิเล็กตรอนในโมเลกุลใน (ก) สถานะเดี่ยวในสถานะพื้น (ข) สถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น (ค) และสถานะสามในสถานะกระตุ้น

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้ไปที่ระดับพลังงานสูงขึ้นโดยการกระตุ้นนั้นจะมี 2 แบบคือ กระตุ้นไปสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น และสถานะสามในสถานะกระตุ้น ดังรูปที่ 2.1 (ข) และ (ค) ตามลำดับ ซึ่งในกรณีของการกระตุ้นอิเล็กตรอนไปยังสถานะสามในสถานะกระตุ้น เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นมีโอกาสในการหมุนกลับทิศทางทำให้ค่า S เปลี่ยนไป เมื่อมีการหมุน $S = 1/2 + 1/2 = 1$ เพราะฉะนั้นค่า M จะเป็น 3 มีความหมายว่าสถานะสามจะแทนที่ด้วย T_1 และที่สถานะสามหรือสถานะที่มีค่าพลังงานต่ำสุดของสถานะสามจะแทนด้วย T_1 และที่สถานะสามนี้จะไม่พบในสถานะพื้นของโมเลกุลที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นคู่เมื่อมีโมเลกุลถูกกระตุ้นอิเล็กตรอนจะไปอยู่ในสถานะกระตุ้นในช่วงเวลาหนึ่งและจะตกกลับสู่สถานะพื้นหลังการดูคดสั้น เรียกการตกกลับของอิเล็กตรอนนี้ว่ากระบวนการลดระดับพลังงาน

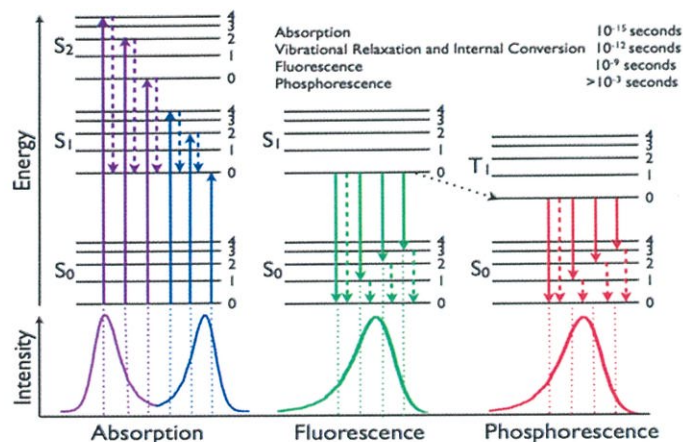
- กระบวนการลดระดับพลังงาน (Deexcitation)

อิเล็กตรอนของโมเลกุลสารเรืองแสงที่อยู่ในสถานะกระตุ้นต้องเกิดการตกกลับสู่สถานะพื้นด้วยกระบวนการลดระดับพลังงาน แบ่งได้ 2 ลักษณะ ดังนี้

1. กระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เกิดแสง

- การลดระดับพลังงานการสั่นของโมเลกุล (Vibrational relaxation: VR)

เมื่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลของสารเรืองแสงได้รับพลังงาน อิเล็กตรอนจะขึ้นไปสู่สถานะพลังงานกระตุ้น ซึ่งมีระดับพลังงานการสั่นหลายค่า โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นในโมเลกุลที่อยู่ในรูปแบบของสารละลาย อิเล็กตรอนนั้นจะเกิดการสูญเสียพลังงานออกมาในรูปของความร้อนที่เกิดจากการสั่นในการชนกับตัวทำละลาย มีผลทำให้ตัวทำละลายมีพลังงานสูงขึ้น



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการดูดกลืนและการปลดปล่อยพลังงานรูปแบบต่างๆ [3]

- การแปลงผันภายใน (Internal conversion: IC)

กระบวนการนี้จะไม่เกิดการคายพลังงานแสงหรือพลังงานความร้อนออกมา แต่จะเกิดการส่องผ่านพลังงานระหว่างโมเลกุลเท่านั้น โคนโมเลกุลที่ส่องผ่านจะมีค่าพลังงานที่สถานะกระตุ้นต่างกันไม่มากนักหรือมีช่วงระดับพลังงานซ้อนทับกัน เช่นการส่องผ่านพลังงานในสถานะ S1 ไปยังสถานะ S2 ที่ระดับพลังงานเดียวกันดังรูปที่ 2.2

- การลดระดับพลังงานข้ามสถานะ (Intersystem crossing: ISC)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนของโมเลกุลในสถานะกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนทิศทางการหมุน ซึ่งการที่อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนทิศทางการหมุนได้ก็ต่อเมื่อระดับพลังงานการสั่นของสถานะเดี่ยวและระดับชั้นพลังงานการสั่นของสถานะสามในสถานะกระตุ้นตรงกัน (พลังงานเท่ากัน) หรือการทรานซิชันจากสถานะเดี่ยวที่มีระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดไปสู่สถานะสามในสถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานการสั่นมากกว่า

2. กระบวนการลดระดับพลังงานแบบเกิดแสง

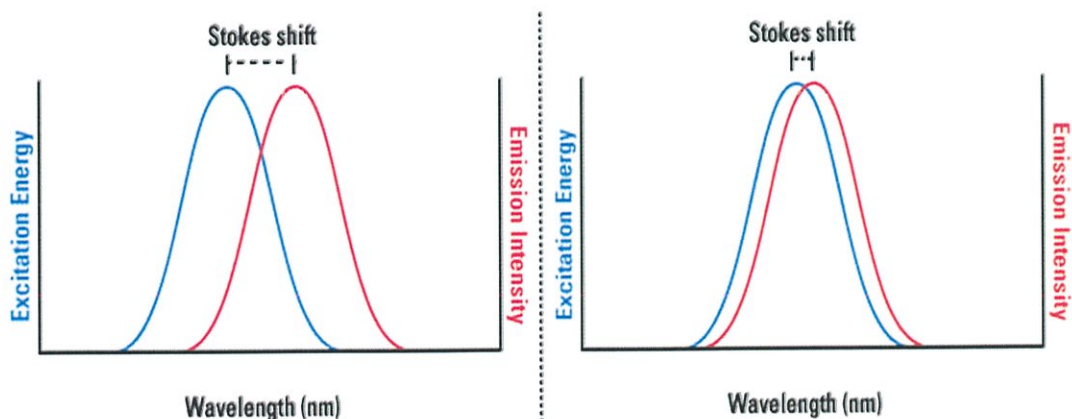
- ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence)

เมื่ออิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงมากผ่านกระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เกิดแสงดังที่กล่าวมาแล้ว จนกระทั่งเมื่ออิเล็กตรอนในโมเลกุลลดระดับพลังงานมาถึงระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดของสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้นจะเกิดการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้น ซึ่งการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้นนี้จะเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของแสงและเรียกกระบวนการคายพลังงานนี้ว่าฟลูออเรสเซนซ์

- ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence)

การคายพลังงานในกระบวนการนี้จะแตกต่างจากการคายพลังงานแบบฟลูออเรสเซนซ์เนื่องจากฟอสฟอเรสเซนซ์เป็นการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานการสั่นต่ำที่สุดของสถานะสามของสถานะกระตุ้น ซึ่งถ้าเป็นฟลูออเรสเซนซ์จะเป็นการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดของสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น การปลดปล่อยพลังงานแสงแบบนี้ถูกเรียกว่าฟอสฟอเรสเซนซ์

กระบวนการคายพลังงานแบบที่เกิดแสงทั้งสองชนิดจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในย่านความยาวคลื่นที่ยาวกว่าความยาวคลื่นที่กระตุ้น โมเลกุล โดยการเลื่อนของสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนซ์ถูกเรียกว่า Stokes shift ซึ่งมีนิยามว่าเป็นระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนซ์ในการเกิดฟอสฟอเรสเซนซ์ระยะห่างจากจุดสูงสุดของทั้งสองสเปกตรัมจะมากกว่าการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ เพราะว่าชั้นพลังงานของสถานะสามในสถานะกระตุ้นจะสูงกว่าสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสง[4]

2.1.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดแสงฟลูออเรสเซนซ์

- ผลจากสารเคมีชนิดอื่นๆที่เจือปน

หากมีสารเจือปนอยู่ในสารละลาย สารเหล่านั้นอาจมีผลกระทบต่อ การเกิดแสงฟลูออเรสเซนซ์ ถ้าสารเจือปนสามารถดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นเดียวกันกับแสงฟลูออเรสเซนซ์ จะทำให้ความเข้มฟลูออเรสเซนซ์ลดลงไปส่วนหนึ่ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Inner-filter effect

- ผลจากค่าควอนตัมยิลด์ของสาร

ควอนตัมยิลด์หรือ Φ_F คืออัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากสารเรืองแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนโดยสารเรืองแสง ดังนั้นสารเรืองแสงสามารถปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ได้มากหรือน้อยสามารถดูได้จากค่า Φ_F ถ้าค่า Φ_F มีค่าเข้าใกล้ 1 จะเป็นตัวบ่งบอกว่าสารเรืองแสงสามารถปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ได้ดี

- ผลกระทบของอุณหภูมิต่อตัวทำละลาย (Temperature effect)

เมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลเพิ่มมากขึ้นทั้งที่อยู่ในสถานะพื้น ดังนั้นโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะชนกับโมเลกุลที่อยู่ในสถานะพื้น ทำให้เกิด Internal conversion เพิ่มขึ้นเป็นเหตุให้ฟลูออเรสเซนซ์ลดลงและค่านี้ทำให้ค่า Φ_F นั้นลดลงด้วย

- ผลของการมีออกซิเจนเจือปนต่อความเข้มลูมิเนสเซนซ์

การมีออกซิเจนอยู่ในสารเรืองแสงอาจรบกวนการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ได้ โดยการเกิดออกซิเดชันโดยตรง ทำให้สารที่เกิดฟลูออเรสเซนซ์ได้เปลี่ยนไปเป็นสารที่ไม่เป็นฟลูออเรสเซนซ์

- ผลของความเข้มข้นที่มีต่อความเข้มฟลูออเรสเซนซ์

ปริมาณแสงที่เกิดจากโฟโตลูมิเนสเซนซ์ขึ้นอยู่กับปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนเพื่อทำให้เกิดการกระตุ้น จะได้ว่า

$$I_F \propto (I_0 - I) \quad (2.4)$$

$$I_F = \Phi_F(I_0 - I) \quad (2.5)$$

เมื่อ I_F คือความเข้มของแสงลูมิเนสเซนส์

จากความสัมพันธ์ของ Beer-Lambert

$$I = I_0 \times 10^{-\epsilon lc} = I_0 \times e^{-2.303\epsilon lc} \quad (2.6)$$

นำสมการที่ (2.6) ไปแทนในสมการที่ (2.5)

$$I_F = \phi_F I_0 (1 - e^{-2.303\epsilon lc}) \quad (2.7)$$

กระจายสมการที่ (2.7) ด้วยอนุกรม

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} \dots + \frac{x^n}{n!} \quad (2.8)$$

จะได้ว่า

$$I_F = \phi_F I_0 (1 - 1 + 2.303\epsilon lc - \frac{(2.303\epsilon lc)^2}{2!} + \frac{(2.303\epsilon lc)^3}{3!} + \dots) \quad (2.9)$$

$$I_F = \phi_F I_0 (2.303\epsilon lc - \frac{(2.303\epsilon lc)^2}{2} + \frac{(2.303\epsilon lc)^3}{6} + \dots) \quad (2.10)$$

ถ้าสารละลายเจือจางจะส่งผลให้ ϵlc มีค่าน้อย และถ้ามีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 เทอมที่ 2 และเทอมต่อไปในสมการที่ (2.10) จะมีค่าน้อยด้วย (ประมาณ 2.5% ของเทอมแรก) เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (2.10) จะได้ความสัมพันธ์ใหม่เป็น

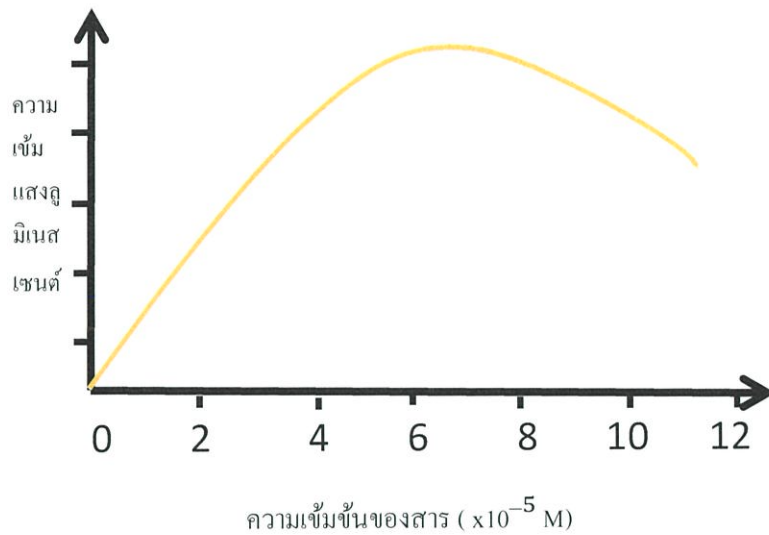
$$I_F = \phi_F I_0 2.303\epsilon lc \quad (2.11)$$

เมื่อเขียนสมการให้ง่ายขึ้นจะได้

$$I_F = Kc \quad (2.12)$$

เมื่อ K คือค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $\phi_F I_0 2.303\epsilon l$ ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า ϕ_F ถ้าค่า K มีค่ามากจะทำให้ค่า ϕ_F มากตามไปด้วย

จากสมการที่ (2.12) ความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนส์เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของสารเรืองแสง เมื่อเขียนกราฟระหว่าง I_F และ C จะได้กราฟเป็นเส้นตรงแต่ถ้าความเข้มข้นของสารเรืองแสงสูงขึ้นจะทำให้ความเข้มของฟลูออเรสเซนส์ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นว่าความไม่เป็นเชิงเส้นนี้เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่เป็นไปตามกฎของ Beer-Lambert ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟลูออเรสเซนซ์กับความเข้มข้นของสาร

- Quenching

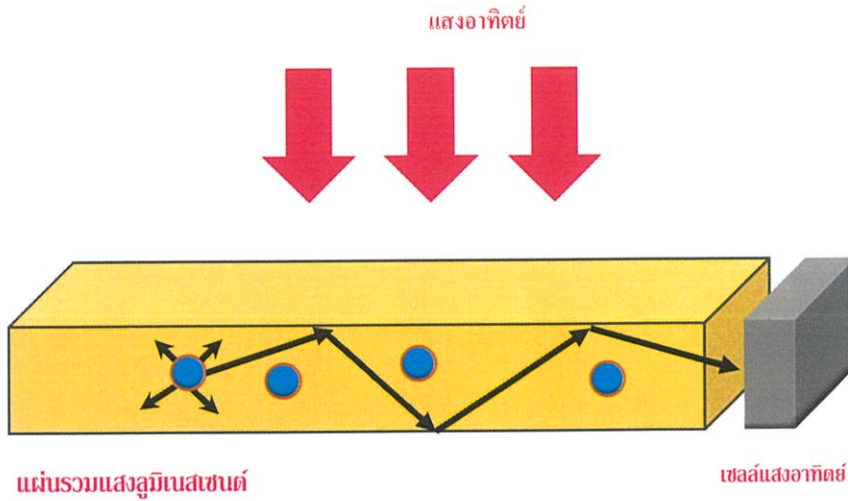
เป็นปรากฏการณ์ในการลดลงของค่าความเข้มของการฟลูออเรสเซนซ์ใดๆ ที่เกิดจากองค์ประกอบของสารละลายเองหรือสารอื่นที่อยู่ในองค์ประกอบซึ่งรวมทั้งตัวสารละลายด้วย โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

- Self-quenching เป็นผลเนื่องจากการชนกันระหว่างโมเลกุลที่สถานะกระตุ้น ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน โดยไม่มีการให้รังสีแก่ตัวทำละลาย ซึ่งจัดว่าเกิด External conversion
- Self-absorption (กลไกการดูดกลืนซ้ำ) เกิดขึ้นเมื่อความยาวคลื่นแสงฟลูออเรสเซนซ์มีการซ้อนทับกับแถบการดูดกลืนของสารเอง ทำให้โฟตอนหรือแสงที่เกิดขึ้นถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารเอง ผลแบบนี้เกิดเนื่องจากความเข้มข้นเพิ่มสูงมากขึ้น

2.1.5 หลักการทำงานของอุปกรณ์รวมแสงลูมิเนสเซนซ์

เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบแผ่นรวมแสง วัสดุลูมิเนสเซนซ์ภายในแผ่นจะดูดกลืนแสงในย่านพลังงานที่เหมาะสมและคายพลังงานออกมาในรูปของแสงลูมิเนสเซนซ์ โดยแสงลูมิเนสเซนซ์จะถูกปลดปล่อยออกมาทุกทิศทาง แสงบางส่วน (ประมาณ 75%) จะเคลื่อนที่ภายในแผ่นรวมแสงโดยอาศัยกลไกการสะท้อนกลับหมด และเคลื่อนที่ไปยังเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกบติดอยู่บริเวณขอบของแผ่นรวมแสง และเซลล์แสงอาทิตย์จะทำการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อไป

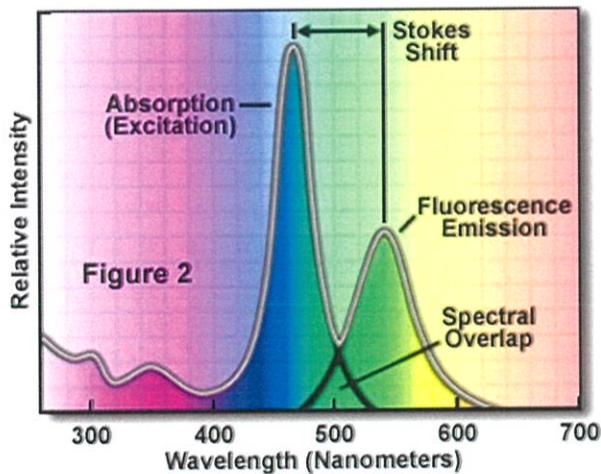
ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของแสงภายในอุปกรณ์รวมแสงลูมิเนสเซนซ์

การเลือกวัสดุลูมิเนสเซนซ์เพื่อเจือในแผ่นนั้นจะต้องเลือกวัสดุที่มีการซ้อนทับกันของสเปกตรัมการดูดกลืนและสเปกตรัมการเรืองแสงน้อยสุด (พื้นที่แรงงาในรูปที่ 2.6) ทั้งนี้เพื่อลดกลไกการดูดกลืนซ้ำที่เกิดขึ้นภายในแผ่น

Excitation and Emission Spectral Profiles



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเรืองแสง[5]

ซึ่งปริมาณ โฟตอนที่สูญเสียไปจากกระบวนการดูดกลืนซ้ำจะแสดงดังสมการ

$$\text{การสูญเสียโฟตอน} = 0.25 \times \phi_F \times N \quad (2.13)$$

เมื่อ ϕ_F quantum yield
 N จำนวนครั้งของการดูดกลืนซ้ำ

ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน คือ อัตราส่วนในการผลิตพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์กับการไหลของพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดของลูมิเนสเซนซ์ โดยการคำนวณหาประสิทธิภาพแสงลูมิเนสเซนซ์ ได้ตามสมการดังนี้

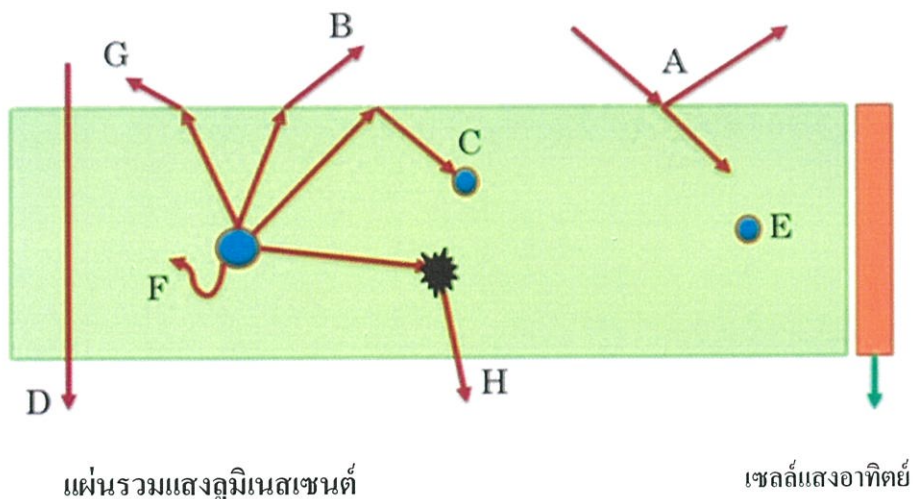
$$\eta_{\text{opt}} = \frac{I_{LSC} \times A_{PV}}{I_{PV} \times A_{LSC}} \quad (2.14)$$

เมื่อ	I_{LSC}	คือ กระแสโฟโตนในแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์
	I_{PV}	คือ กระแสโฟโตนในเซลล์แสงอาทิตย์
	A_{LSC}	คือ พื้นที่ด้านบนแผ่นรวมแสง
	A_{PV}	คือ พื้นที่ที่ติดเซลล์แสงอาทิตย์

$\frac{A_{LSC}}{A_{PV}}$ เป็นค่า geometric factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนของพื้นที่แผ่นรวมแสงเทียบกับพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่ I_{LSC} เพิ่มขึ้นความเข้มแสงก็จะเพิ่มขึ้นด้วย สมการนี้แสดงถึงประสิทธิภาพในการรวมแสงลูมิเนสเซนซ์

2.1.6 กลไกการที่ทำให้เกิดการลดทอนแสงลูมิเนสเซนซ์

ฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่ยังไม่ถูกผลิตเพื่อใช้งานโดยทั่วไป เนื่องจากฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากกลไกการลดทอนแสงลูมิเนสเซนซ์ในรูปแบบต่างๆ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งประกอบไปด้วย 5 กลไกหลัก ดังนี้

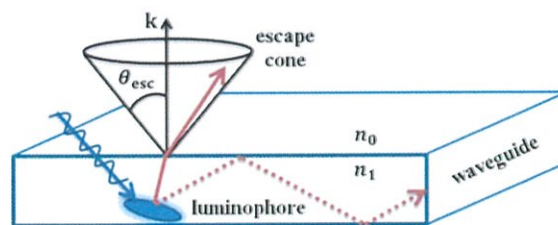


รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมแสดงกลไกต่างๆที่ทำให้เกิดการลดทอนของแสงลูมิเนสเซนซ์

1. การลดทอนแสงลูมิเนสเซนส์บริเวณพื้นผิวของฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์

แสงที่ถูกลดทอนบริเวณพื้นผิวของฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์สามารถจำแนกออกเป็น 2 ส่วน คือแสงที่เกิดการสะท้อนกลับบริเวณผิวหน้ารับแสงของฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์ดัง โคอะแกรมรูปที่ 2.7 (กลไก A) เกิดเนื่องจากแสงตกกระทบทำมุมกับเส้นปกติกับเส้นปกติมากกว่ามุมวิกฤต จากงานวิจัยพบว่าฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์ที่เตรียมขึ้นจากสารพอลิเมอร์ชนิด PMMA จะมีการลดทอนแสงลูมิเนสเซนส์จากเหตุการณ์ดังกล่าวอยู่ประมาณ 4% และส่วนที่สองคือแสงลูมิเนสเซนส์ที่ถูกปลดปล่อยโดยโมเลกุลของสารเรืองแสงหักเหออกภายนอกฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์กระบวนการลดทอนแสงลูมิเนสเซนส์ในรูปแบบนี้เรียกว่า “Escape cone loss” (กลไก B) ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งเกิดจากสาเหตุเดียวกับกรณีแรกคือ แสงลูมิเนสเซนส์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาตกกระทบที่บริเวณรอยต่อระหว่างฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์และอากาศทำมุมกับเส้นปกติน้อยกว่ามุมวิกฤต ส่งผลให้แสงลูมิเนสเซนส์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาเกิดการหักเหออกจากฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์ไป สำหรับฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์ที่ใช้กระจกหรือแก้วเป็นฐานรอง พบว่าความน่าจะเป็นในการลดทอนแสงลูมิเนสเซนส์บริเวณผิวหน้ารับแสงของฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์เป็น 25 % เมื่อเกิดการดูดกลืนและการปลดปล่อยแสงในแต่ละครั้ง

Escape cone loss



รูปที่ 2.8 รูปแสดงปรากฏการณ์ Escape cone loss[6]

2. การลดทอนแสงลูมิเนสเซนส์เนื่องจากการดูดกลืนแสงซ้ำ

การดูดกลืนแสงซ้ำเป็นกลไกหนึ่งที่มีผลทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลูมิเนสเซนส์ลดลง การดูดกลืนแสงลูมิเนสเซนส์ซ้ำเกิดจากการดูดกลืนแสงลูมิเนสเซนส์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากโมเลกุลสารเรืองแสงและถูกดูดกลืนซ้ำโดยโมเลกุลของสารเรืองแสงที่อยู่ข้างเคียง (กลไก C) มีผลทำให้แสงลูมิเนสเซนส์ลดลงปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการดูดกลืนซ้ำคือการซ้อนทับกันของสเปกตรัม

การดูดกลืนแสงและสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนส์เมื่อสเปกตรัมทั้งสองมีการซ้อนทับกันมากขึ้น เป็นการบ่งบอกถึงโอกาสในการที่แสงลูมิเนสเซนส์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะถูกดูดกลืนซ้ำอีกครั้งได้มาก ถ้าแสงลูมิเนสเซนส์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะถูกดูดกลืนซ้ำอีกครั้งได้มาก ถ้าแสงลูมิเนสเซนส์ที่ถูกปลดปล่อยออกมายังคงมีความยาวคลื่นอยู่ในย่านที่สเปกตรัมเกิดการซ้อนทับกัน

3. ข้อจำกัดในการดูดกลืนแสงของสารเรืองแสง

สารเรืองแสงโดยทั่วไปโดยเฉพาะชนิดสารอินทรีย์จะมีย่านการดูดกลืนแสงที่แคบในย่านใดย่านหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นแสงตกกระทบที่มีพลังงานน้อยกว่าพลังงานที่จะสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนในโมเลกุลของสารเรืองแสง ดังกลไก D ในรูป

4. การลดทอนแสงลูมิเนสเซนส์เนื่องจากสารเรืองแสง

สมบัติของสารเรืองแสงมีผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลูมิเนสเซนส์ โดยทั่วไปการลดทอนแสงลูมิเนสเซนส์อันเกิดจากสารเรืองแสงมีสาเหตุหลักอยู่ 2 ประการ ดังนี้

- ความเสื่อมสภาพของสารเรืองแสง นอกจากสารเรืองแสงจะมีข้อจำกัดในการดูดกลืนแสงที่มีพลังงานต่ำกว่าย่านการดูดกลืนแสงของสารแล้ว สำหรับสารเรืองแสงที่ดูดกลืนแสงที่มีพลังงานสูงมากก็ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ด้วยเช่นเดียวกัน โดยการดูดกลืนแสงที่มีพลังงานสูงมากก็ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ด้วยเช่นกัน โดยการดูดกลืนแสงที่มีพลังงานมากจะส่งผลให้สารเรืองแสงมีประสิทธิภาพลดลงเร็วกว่าเดิม (กลไก E)

- ประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ ในการดูดกลืนแสงของโมเลกุลสารเรืองแสงในบางครั้ง อาจไม่ได้ปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของแสงลูมิเนสเซนส์เสมอไป การปลดปล่อยพลังงานหรือการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในโมเลกุลสารเรืองแสงนั้นอาจเกิดขึ้นได้ด้วยการปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบของความร้อนแทน (กลไก F) ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ของสารเรืองแสงขึ้นอยู่กับค่า Φ_F ของแต่ละชนิด

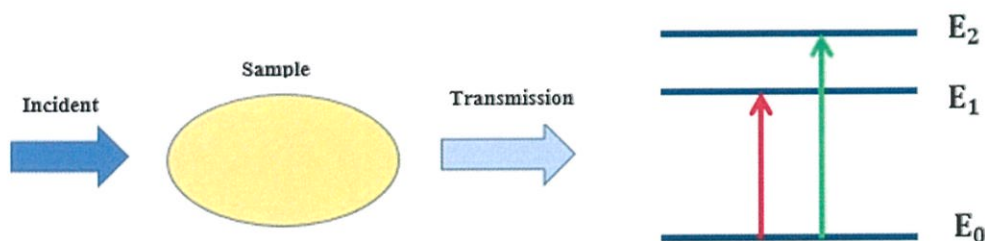
5. การลดทอนแสงลูมิเนสเซนส์เนื่องจากตัวกลางทางเดินทางแสง

ตัวกลางทางเดินแสงสามารถทำให้เกิดการลดทอนแสงลูมิเนสเซนส์ได้ 3 รูปแบบคือ การลดทอนเนื่องจากแสงตกกระทบหรือแสงตกกระทบหรือแสงลูมิเนสเซนส์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาอาจจะถูกดูดกลืนโดยตัวสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางทางแสงเองได้ รูปแบบที่สองคือการลดทอนเนื่องจากความไม่เรียบของผิวหน้าของตัวกลางเดินแสงมีผลทำให้เกิดการหักเหออกไปภายนอก

ฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ แทนที่จะเกิดการสะท้อนกลับหมด (กลไก G) และรูปแบบสุดท้ายคือการลดทอนเนื่องจากความไม่สมบูรณ์แบบของเนื้อวัสดุตัวกลาง เช่น วัสดุมีความโปร่งแสงไม่มากพอ วัสดุมีรูพรุน ซึ่งอาจทำให้แสงลูมิเนสเซนซ์ที่เดินทางอยู่ภายในเกิดการกระเจิงและหักเหออกไปภายนอกฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ได้ (กลไก H) เป็นต้น

2.1.7 กลไกการดูดกลืนแสง

กลไกการดูดกลืนแสง คือ กระบวนการที่พลังงานของแสงที่ถูกถ่ายเทไปยัง อะตอม ไอออน หรือโมเลกุลที่อยู่ในกลาง การดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างใดๆสามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 ลักษณะหลักคือ ดูดกลืนในระดับอะตอมและดูดกลืนใน โมเลกุล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่แสงนั้นทำอันตรกิริยา



รูปที่ 2.9 กลไกการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปลี่ยนแปลงระดับ

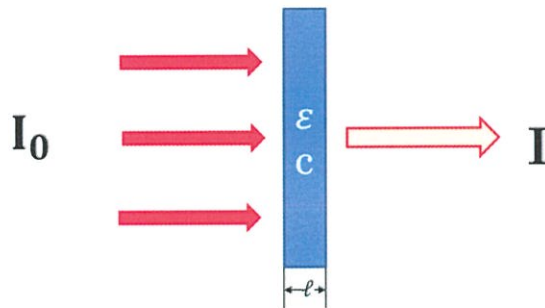
- การดูดกลืนแสงหรือพลังงานที่ทำให้อนุภาคเหล่านี้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะปกติหรือสถานะพื้น(ground state)ไปยังสถานะที่มีระดับพลังงานสูงกว่าหรือสถานะกระตุ้น(excited state) เราเรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า การเปลี่ยนแปลงสถานะหรือการทรานสิชัน(transition)
- การเปลี่ยนระดับพลังงานของอนุภาคนี้อาจต้องอาศัยพลังงานที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าผลต่างของระดับพลังงานระหว่างสถานะพื้นและสถานะกระตุ้น ซึ่งค่าความถี่ (พลังงาน)น้อยสุดของโฟตอนที่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานของอนุภาคที่มีค่าเท่ากับ

$$E_1 - E_0 = h\nu \quad (2.15)$$

การเปลี่ยนระดับพลังงานของอนุภาคจากสถานะพื้นไปยังสถานะที่สูงกว่าจะเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ ย้ายจากชั้น E_0 ไปยัง E_1 (ดูดกลืนแสงความยาวคลื่น λ_2) หรือ จาก E_0 ไปยัง E_2

กฎแห่งการดูดกลืนแสง

เมื่อฉายแสงผ่านตัวกลางใดๆ จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างแสงและอนุภาคตัวกลางที่แสงเคลื่อนที่ผ่าน การวิเคราะห์ว่าแสงถูกดูดกลืนภายในตัวกลางได้มากหรือน้อยเพียงใดนั้น สามารถกระทำได้โดยอาศัยกฎของ เบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's Law) ซึ่งเป็นกฎที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงที่ฉายผ่านมายังสารและปริมาณแสงที่ถูกส่งผ่านออกมา



รูปที่ 2.10 รูปแสดงปริมาณแสงที่ฉายผ่านมายังสารและปริมาณแสงที่ถูกส่งผ่านออกมา

เนื่องจากค่าการดูดกลืนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ดังสมการ

$$A = cl\varepsilon \quad (2.16)$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)

l = ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่างหรือความกว้างของเซลล์

c = ความเข้มข้นของโมเลกุล

ε = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของโมเลกุล

Absorbance (A) นิยามสมการได้เป็น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = -\log T \quad (2.17)$$

ค่าทราสมิตเทนซ์ (Transmittance)

นอกจากการพิจารณาค่าแอมพลิจูดของแสงซึ่งในการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดกลืนแสงของสารใดๆแล้ว ปริมาณสำคัญอีกปริมาณที่มักจะถูกพิจารณาร่วมกันคือ ค่าทราสมิตเทนซ์ (Transmittance) ซึ่งคือค่าที่บอกถึงความสามารถในการยอมให้แสงผ่านของสาร

$$T = \frac{I}{I_0} \times 100 \% \quad (2.18)$$

เมื่อ T = ค่าทราสมิตเทนซ์ (Transmittance)

I_0 = ปริมาณแสงที่ฉายผ่านมายังสาร

I = ปริมาณแสงที่ถูกส่งผ่านออกมา

2.1.9 สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer)

สเปกโตรมิเตอร์ คือเครื่องมือวัดเชิงแสงชนิดหนึ่งที่ใช้ในการตรวจวัดคุณสมบัติเฉพาะของแสง ได้แก่ สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมากนำไปใช้ในกระบวนการวิเคราะห์สเปกโตรสโกปีเพื่อระบุชนิดของสาร ผลการวัดที่แตกต่างกันโดยส่วนใหญ่จะเกิดจากความเข้มของแสงที่แตกต่างกัน แต่บางทีก็อาจเกิดจากปรากฏการณ์โพลาไรซ์ก็ได้ ตัวแปรอิสระได้แก่ความยาวคลื่นของแสง มีกระบอกเป็นหน่วยย่อยของเมตร หรือบางครั้งก็ระบุเป็นสัดส่วนของพลังงานโฟตอน เช่น หมายเลขคลื่น หรืออิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งมักจะมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นอยู่แล้ว เราใช้สเปกโตรมิเตอร์ในกระบวนการวิเคราะห์สเปกโตรสโกปี โดยสร้างเส้นสเปกตรัมขึ้น และตรวจวัดความยาวคลื่นกับความเข้ม สามารถวัดได้ตั้งแต่รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ ไปจนถึงรังสีอินฟราเรดย่านไกล ถ้าอ่านความถี่ของคลื่นที่สนใจตกอยู่ในย่านของสเปกตรัมที่ตามองเห็น มักเรียกการศึกษาเช่นนั้นว่า spectrophotometry [8]

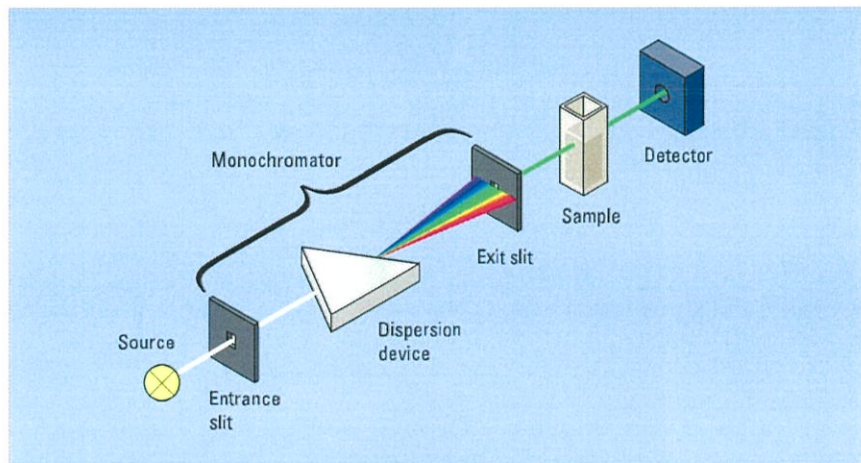
ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ประกอบไปด้วย

1. Light source แหล่งกำเนิดรังสีเป็นส่วนที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่องและคงที่ รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดรังสีมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา เช่น ช่วง UV จะใช้หลอด H₂ and D₂ lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm และช่วง Visible ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm เป็นต้น

2. Monochromator เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสง โมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ปริซึมหรือ เกรตติง

3. Cell sample เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง บางครั้งอาจเรียกว่า Cuvettes ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วจะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะแก้วจะดูดกลืนรังสีในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ ซึ่งใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

4. Detector ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีมีหลายชนิดที่นิยม ได้แก่ Photomultiplier tube และ เครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด Silicon diode detector [9]



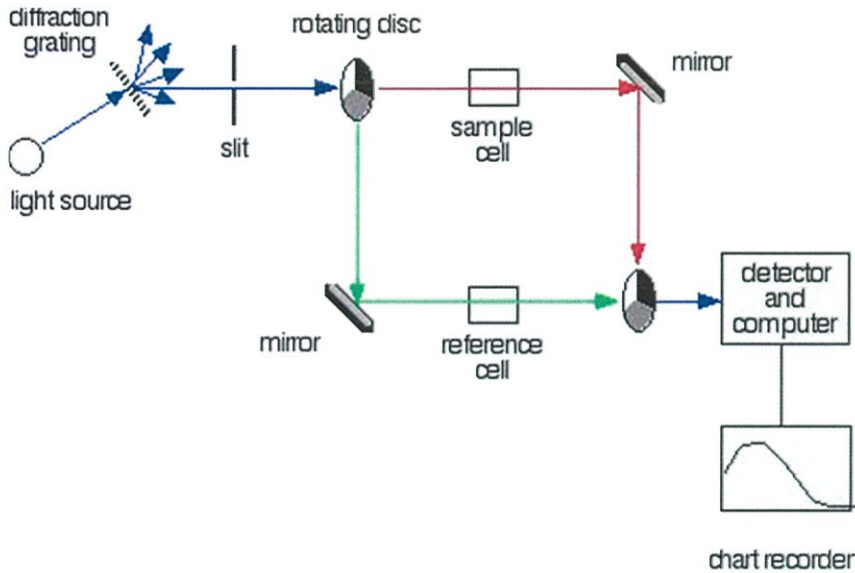
รูปที่ 2.11 รูปแสดงองค์ประกอบของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. Single-Beam spectrophotometer (รูปที่ 12) เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีจะผ่านเลนส์ โมโนโครเมเตอร์ที่เป็น Grating ผ่านสารตัวอย่าง แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ เนื่องจาก สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดลำรังสีนี้จะเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน

2. Double-Beam Spectrophotometer ลำรังสีจะผ่าน โมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวอย่างมีประสิทธิภาพและความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก Exit slit แล้ว ลำรังสีจะเข้าสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (Beam chopper) ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ในขณะที่เดียวกันลำรังสีจะผ่านไปผ่านสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ ลำรังสีลำเดียวที่ผ่าน โมโนโครเมเตอร์

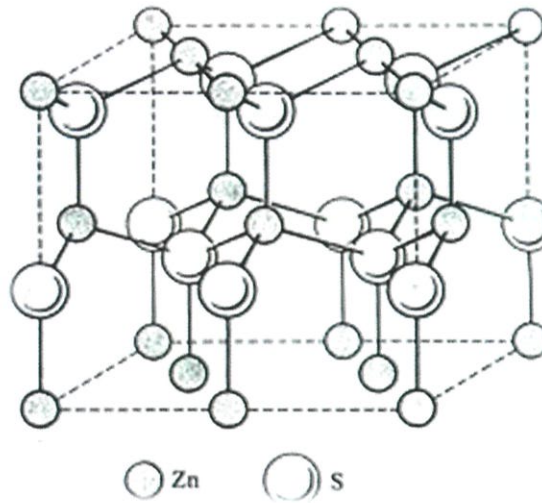
จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบ phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไปในการใช้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่



รูปที่ 2.12 Double beam spectrophotometer [10]

2.2 สมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide: ZnO)

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide: ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap) มีแถบพลังงาน 3.37 eV ที่อุณหภูมิห้องและ 3.44 eV ที่อุณหภูมิ 4 เคลวิน ซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอริไซต์ (Hexagonal wurtzite) หรือคิวบิกซิงค์เบลนด์ (Cubic zinc blende) หรือร็อกซอลต์ (Cubic Rocksalt) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอริไซต์ มีค่าคงที่ผลึก $a=b=3.24 \text{ \AA}$ และ $c=5.20 \text{ \AA}$ มีค่ามวลยังผลพาหะของอิเล็กตรอนกับโฮล คือ $0.24 m_0$ และ $0.24 m_0$ ตามลำดับ มีค่าความเร็วของความเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ผลึกเดี่ยวซิงค์ออกไซด์ ระหว่าง $100\text{-}200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ สมบัติอื่นๆของซิงค์ออกไซด์จึงเป็นที่นิยมที่นำไปสร้างอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวเปล่งแสงย่านสีน้ำเงิน ไดโอดเลเซอร์ และตัวตรวจวัดแสงย่านอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น และเป็นสารประกอบที่สามารถพบเห็นได้ในธรรมชาติ แต่อนุภาคซิงค์ออกไซด์อาจมีรูปร่างเป็นทรงกลมรูปเข็ม หรือ เป็นก้อนกลมๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการในการสังเคราะห์



รูปที่ 2.13 รูปแสดงโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์[11]

2.2.1 การย่อยสลายโดยแสง (Photodegradation) ของ ZnO

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติก หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แดกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่ คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับ รังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยา ต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสถานะแวดล้อมอื่นที่มี ดหรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการด้วยหมึกที่หนาмаกบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัส กับรังสียูวีโดยตรง

เนื่องจาก ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำแถบพลังงานกว้างคือ จะมีค่า พลังงานของแถบพลังงานมากกว่า 3.3 eV ขึ้นไปซึ่งอุปกรณ์ที่ทำจาก สารกึ่งตัวนำช่องว่าง แถบพลังงานกว้าง (Wide band gap semiconductor) นี้จะมีประสิทธิภาพสูงมาก ในงานที่เกี่ยวข้องกับ อุณหภูมิสูงๆ (High - temperature) และกำลังสูงๆ (High - power) เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานที่ กว้างจึงสามารถประยุกต์ใช้ในอุณหภูมิที่สูงๆดีกว่าสารกึ่งตัวนำ ที่ไม่ใช่แถบพลังงานกว้าง (Wide band gap) ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่น (λ) ตาม สมการดังนี้ [11]

$$Eg = \frac{hc}{\lambda} \text{ หรือ } Eg(\text{in eV}) = \frac{1240}{\lambda (\text{in nm})} \quad (2.20)$$

เมื่อ E_g = พลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy)

C = ความเร็วของแสง (Velocity of light)

h = ค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck constant)

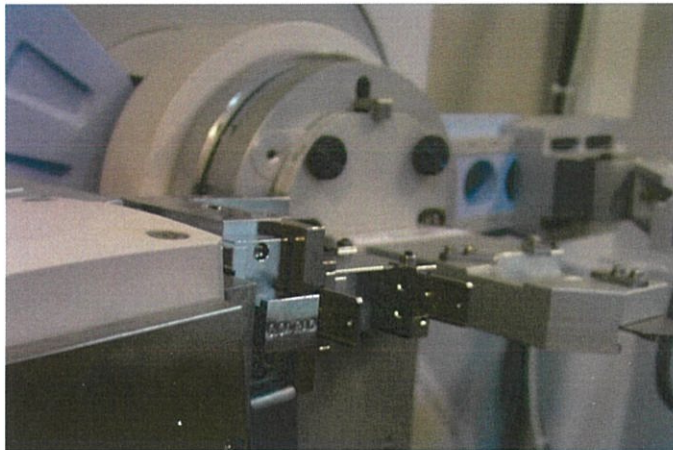
λ = ค่าความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมา (Emitted wavelength)

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสมบัติกายภาพบางประการของสารซิงค์ออกไซด์

Properties of wurtzite ZnO	Value
Lattice parameters at 300 K	a_0 : 0.3249 nm C_0 : 0.52069 nm a_0/C : 1.602 (ideal hexagonal structure shoes 1.633) u : 0.345
Density	5.606 gcm ⁻³
Stable phase at 300 K	Wurtzite
Melting point	1975 °C
Thermal conductivity	0.6,1-1.2
Linear expansion coefficient (/C)	a_0 : 6.5×10^{-6}
Static dielectric constant	8.656
Refractive index	2.008,2.029
Energy gap	3.37 eV, direct
Intrinsic carrier concentration	$<10^6$ cm ⁻³
Excitation binding energy	60 meV
Electron effective mass	0.24
Electron Hall mobility at 300 K for low n-type	200 cm ² V ⁻¹ S ⁻¹
Conductivity	
Hall effective mass	0.59
Hole Hall mobility at 300 K for low p-type	5-50 m ² V ⁻¹ S ⁻¹
Conductivity	

2.3 X-ray Diffractometer XRD

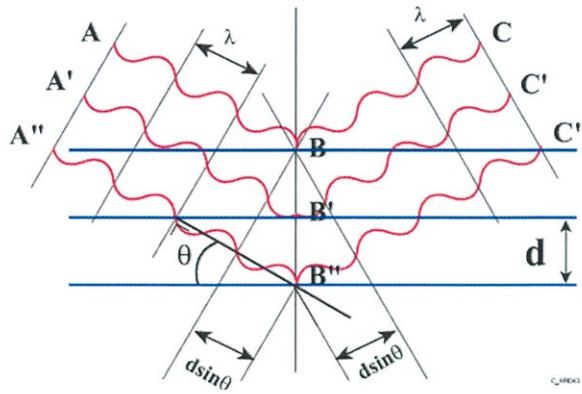
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง



รูปที่ 2.14 รูปเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์[12]

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาลงค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ ยังสามารถทำการวิเคราะห์ องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง ได้อีกด้วย

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d \sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยังผ่านชั้นผลึก ที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ โดยเครื่อง XRD ของ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง เป็นเครื่องที่ติดตั้ง Detector ที่สามารถทำการทดสอบตัวอย่างได้รวดเร็ว และให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่สูง



รูปที่ 2.15 รูปแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์[13]

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือหาองค์ประกอบตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แต่เราอาจสามารถให้ XRD กำหนดหาปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่างว่ามีสัดส่วนกี่เปอร์เซ็นต์ได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2547 ถีและเกา (Zhengwei Li ; &W. Gao. 2004: 1363-1370) ได้ศึกษาฟิล์ม ZnO บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกด้วยเทคนิค อาเอฟและดีซีรี แอคทีฟสปีดเตอริง โดยฟิล์มทั้งหมดมีรูปแบบโครงสร้างนาโน มีการจัดเรียงตัวในระนาบ 002 พบว่าการใช้เทคนิคดีซีรีแอคทีฟสปีดเตอริง ที่ความดันก๊าซออกซิเจนและความดันแรงสูง ทำให้ฟิล์มมีขนาดใหญ่ แต่ให้ค่าฟลูอิเดฮาร์ฟแมกซิมัม (FWHM) ต่ำ และอัตราการเคลือบสูงขณะที่ความดันออกซิเจนต่ำจะทำให้ค่า FWHM สูงและอัตราการเคลือบต่ำ โดยทั่วไป FWHM ของฟิล์ม ZnO ที่เคลือบด้วยเทคนิคอาเอฟรีแอคทีฟสปีดเตอริงจะดีกว่าเทคนิคดีซีรีแอคทีฟสปีดเตอริง ซึ่งได้อธิทธิพลจากการไปแอส การควบคุมเงื่อนไขของระบบที่เหมาะสม เช่น ความดันรวมและความดันของก๊าซออกซิเจน รูปแบบของการกระตุ้นให้เกิดพลาสมา การไปแอสระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ และการเจาะจะให้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างจุลภาคความเป็นผลึกและความเป็นรูปแบบเดียวกันต่างกันในปี พ.ศ. 2549 ยากิโอกูและคณะ (Burag Yaglioglu; et al. 2006: 89-94) ได้ศึกษาฟิล์มบาง In 10 wt % เจือ ZnO ด้วยเทคนิคดีซีรีแอค

ที่ฟอสเฟตเตอริง ให้ได้ความหนาของฟิล์ม 100 nm สปีดเตอริงที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 350 องศา โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซออกซิเจน ที่ใช้ในการสปีดเตอริงด้วยการเป่า In_2O_3 และเป่า ZnO ที่เจือด้วย In 10 wt % และเป่า SnO_2 ที่เจือด้วย In 9.8 wt % พบปริมาณโมลาร์ของฟิล์มบาง IZO ชนิดอะมอร์ฟัสซึ่งอบอ่อนในอากาศที่มีอุณหภูมิ 200 องศา จะไม่ทำให้ฟิล์มพัฒนาเป็นผลึก แต่จะทำให้เฟสการเป็นอะมอร์ฟัสลดลง 0.5% และสัมพันธ์กับความหนาของพาหะที่ลดลง การอบอ่อนในบรรยากาศของ N_2/H_2 พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นของพาหะโดยปริมาณโมลาร์เล็กน้อย การอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 องศา เฟสอะมอร์ฟัสจะพัฒนาเป็นผลึกลูกบาศก์บิกไบท์ [14]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงเครื่องมือและระบบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมถึงกระบวนการในการจัดเตรียมแผ่นฟิล์มบางของ ZnO ที่เจือในวัสดุ PMMA และการทดสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มที่จัดเตรียมขึ้น โดยมีเนื้อหาแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลักดังนี้

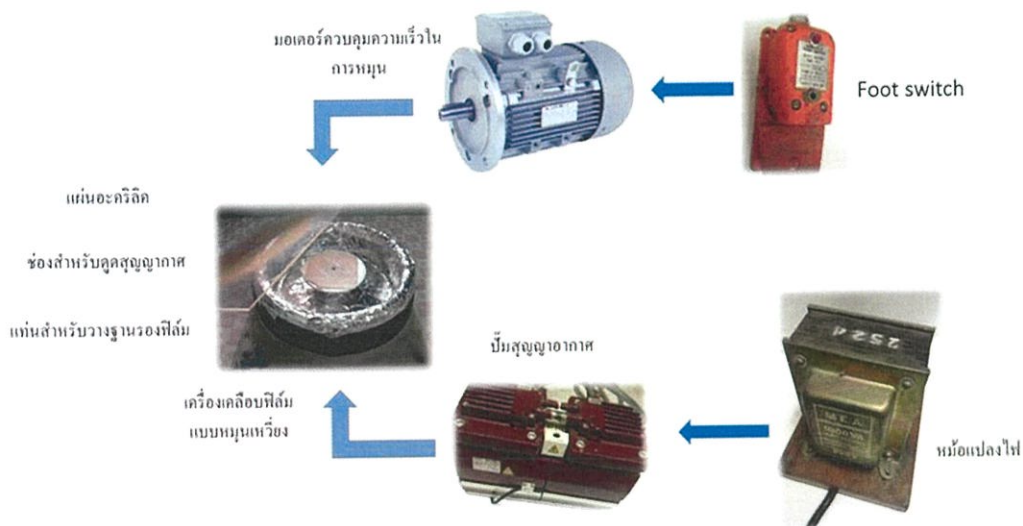
1. เครื่องมือและระบบการวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. การจัดเตรียมฟิล์มบาง ZnO/PMMA
3. การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์ม ZnO/PMMA

3.1 เครื่องมือและระบบการวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.1.1 เครื่องเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง

วิธีการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coat) เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ในการจัดเตรียมฟิล์มบางได้ โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้ (รูปที่ 3.1)

1. แท่นวางสำหรับจับยึดกระจกสไลด์ จะมีรูกลวงขนาดเล็กบริเวณจุดกึ่งกลางของแท่น ใช้สำหรับจับยึดเป็นฐานขณะทำการเคลือบฟิล์ม โดยการต่อรูกลวงนี้เข้ากับเครื่องปั๊มสุญญากาศ
2. ปั๊มสุญญากาศ (ULVAC DAH-60) ใช้ในการดูดกระจกสไลด์ให้ติดกับแท่นวาง โดยปั๊มสุญญากาศมีอัตราการปั๊ม 60 ลิตร/นาที ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้า 100 โวลต์และกระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์
3. มอเตอร์ควบคุมความเร็วใช้สำหรับการปรับความเร็วรอบในการหมุนที่ต้องการ
4. แท่นเหยียบ (Linemaster switch Co., Hercules foot switch) เปรียบเสมือนสวิตช์ที่ใช้ในการสั่งการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้า 125-250 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์
5. หม้อแปลง ทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์เป็นแรงดันไฟฟ้า 110 โวลต์ เพื่อเป็นการแปลงแรงดันไฟฟ้าให้กับปั๊มสุญญากาศ
6. แผ่นอะคริลิก ใช้ในการป้องกันอันตรายจากชิ้นงาน ในกรณีที่ชิ้นงานหลุดออกมาขณะทำการหมุนเคลือบฟิล์ม เนื่องจากแท่นวางจับยึดกับกระจกไม่แน่นพอ



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของระบบเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง

3.1.2 แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟดิวทีเลียม

แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟดิวทีเลียม (DH-2000) ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 85-264 โวลต์ และความถี่ 50/60 เฮิรตซ์ กระแสไฟฟ้า 0.3 แอมแปร์ ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งสเปกตรัมแสงได้จากการวัดเป็นแสงในความยาวคลื่น 215-400 (deuterium bulb) นาโนเมตร



รูปที่ 3.2 เครื่องฉายแสงจากหลอดดิวทีเลียม

3.1.3 เส้นใยแก้วนำแสง

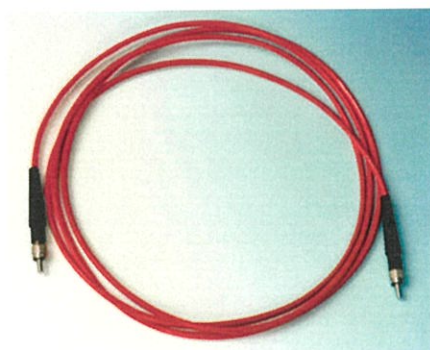
ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการใช้เส้นใยนำแสงจำนวน 2 ขนาดคือ

- สายใยแก้วนำแสงสำหรับนำส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังฟิล์มบาง ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.3 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของสายใยแก้วนำแสงขนาด 600 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.3 สายใยแก้วนำแสงสำหรับนำส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังฟิล์มบาง

- สายใยแก้วนำแสง (Avantaes FC-UV200-2) ลักษณะดังรูปที่ 3.4 สายใยแก้วนำแสงทำหน้าที่ในการนำส่งแสงที่ผ่านฟิล์มบางเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ สายใยแก้วนำแสงมีขนาดความยาว 2 เมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 ไมโครเมตร โดยใช้ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการวัดสมบัติเชิงแสงสายใยแก้วนำแสงเดิมทุก



รูปที่ 3.4 สายใยแก้วนำแสงสำหรับนำส่งจากฟิล์มบางไปยังเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

3.1.4 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (UV/Vis spectrometer Avantesavaspec-EDU) เป็นเครื่องที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ที่อยู่ในช่วง Ultra violet (UV) และ Visible (Vis) ความยาวคลื่นที่วัดได้ประมาณ 200-1100 นาโนเมตร โดยในการทดลองที่เกี่ยวกับการวัดสมบัติเชิงแสง ควรใช้สเปกโตรมิเตอร์เดิมทุกครั้ง ลักษณะดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

3.1.5 อุปกรณ์จับยึด

อุปกรณ์จับยึด ทำหน้าที่ในการจับยึดสายใยแก้วนำแสงทั้งเส้น โดยมี 2 ลักษณะ ดังนี้

- อุปกรณ์จับยึดสายใยแก้วนำแสง มีลักษณะดังรูปที่ 3.6



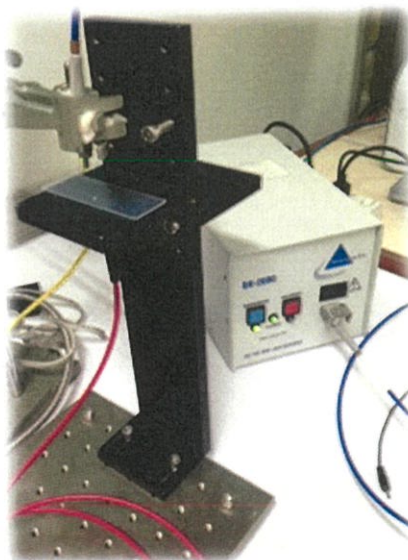
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์จับยึดเส้นใยแก้วนำแสง

- อุปกรณ์จับยึดแผ่นฟิล์ม ZnO/PMMA มีลักษณะดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์จับยึดแผ่นฟิล์ม ZnO/PMMA

ส่วนประกอบทั้ง 5 ส่วนนี้จะถูกนำมาจัดเป็นระบบวัดสมบัติการดูดกลืนแสง มีลักษณะดังรูปที่ 3.8 ซึ่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะเดินทางผ่านสายใยแก้วนำแสง (600 ไมโครเมตร) ตกกระทบกับฟิล์มบางและแสงที่สามารถส่องผ่านฟิล์มบางออกมาได้จะเดินทางเข้าสู่สายใยแก้วนำแสง (200 ไมโครเมตร) เพื่อนำแสงไปยังเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ แสงที่ถูกนำส่งเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์จะถูกวิเคราะห์และส่งผ่านเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ถูกเชื่อมต่อกับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ผ่านสาย USB และทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงโดยโปรแกรม Avasoft รุ่น 7.4



รูปที่ 3.8 ระบบการวัดการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง

3.2 กระบวนการจัดเตรียมฟิล์มบาง ZnO/PMMA

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

1. เครื่องเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง
2. เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer)
3. สาร ZnO
4. สารทำละลาย Dichloromethane (DCM)
5. กระจกใสขนาด 193.5 ตารางเซนติเมตรและหนา 1 มิลลิเมตร
6. สาร Polymethyl methacrylate (PMMA)
7. อะซิโตน
8. เอทานอล
9. เครื่องอัลตราโซนิก
10. แผ่นซิลิโคน

3.2.2 ขั้นตอนในการทดลอง

1. ล้างกระจกโดยใช้น้ำยาล้างจาน เพื่อไม่ให้มีรอยต่างๆ บนกระจก
2. นำกระจกไปแช่ในอะซิโตนแล้วนำไปใส่เครื่องอัลตราโซนิกประมาณ 10 นาที
3. นำกระจกไปแช่ในเอทานอลแล้วนำไปใส่เครื่องอัลตราโซนิกประมาณ 10 นาที แล้วนำมาผึ่งให้แห้ง
4. ตวงสาร ZnO 60 mg.
5. นำสาร ZnO ผสมกับสารทำละลาย DCM 2 ml. และนำไปใส่เครื่องอัลตราโซนิก 5 นาที
6. ตวงสาร PMMA 40 mg. ใส่ขวด
7. นำสาร ZnO ที่ผสมกับสารทำละลาย DCM ใส่ลงในสาร PMMA ในขวดที่เตรียมไว้ และนำไปใส่เครื่องอัลตราโซนิกส์ ประมาณ 20 นาที
8. นำกระจกที่เตรียมใส่เครื่องเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงโดยวางไว้บนแผ่นซิลิโคนบนเครื่องปั่นเพื่อให้ดูดซับกระจก ติดกับเครื่องเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงแล้วปิดกระจกบนตัวเครื่องจากนั้นเหยียบสวิตช์ เปิดเครื่องโดยใช้ความเร็วในการหมุน 4500 รอบ/วินาที
9. ในสารที่เตรียมไว้ในข้อ 7. เทลงในกระจกแล้วทำการเปิดเครื่องประมาณ 40 วินาที

3.3 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

(X – ray Diffractometer XRD)

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยระบบวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นระบบที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนตามกฎของแบรค ซึ่งธาตุหรือสารประกอบแต่ละชนิดมีมุมและลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นกราฟที่ได้จากการตรวจสอบฟิล์มบางจึงสามารถบอกได้ถึงลักษณะของโครงสร้างและชนิดของฟิล์มได้ ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างของฟิล์มบางโดยระบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่อง XRD ซึ่ง Start: 20.000° - End: 50.000° - Step: 0.020° - Step time: 1s – Temp.: 25°C (Room) – Time Started: 0 s – 2-Theta: 20.000° - Theta: 10.000°

3.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์ม

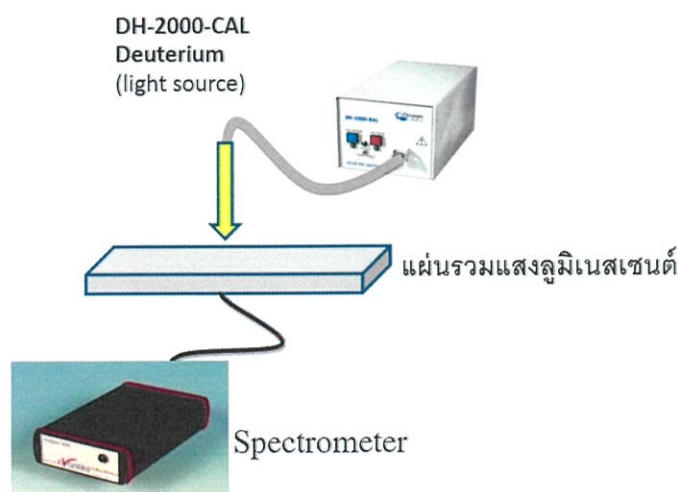
3.4.1 การวัดสเปกตรัมการดูดกลืน

3.4.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

1. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์
2. สายใยแก้วนำแสง(ใช้ทั้ง 600 ไมโครเมตรและ 200 ไมโครเมตร)
3. เครื่องฉายแสงจากหลอดควิเทียรม
4. อุปกรณ์จับยึดเส้นใยแก้วนำแสง
5. อุปกรณ์จับยึดแผ่นฟิล์ม ZnO/PMMA

3.4.1.2 ขั้นตอนในการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 การติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่าการดูดกลืนของฟิล์ม ZnO / PMMA

2. เปิดโปรแกรม Avasoft รุ่น 7.4
3. ทำการวัด background ของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์
4. ทำการวัดค่าการดูดกลืนแผ่น PMMA เพื่อเป็นค่าอ้างอิงในการวัด ZnO จะทำให้ได้เฉพาะค่าการดูดกลืนของ สาร ZnO เพียงอย่างเดียว
5. ทำการวัดค่าการดูดกลืนแผ่น ZnO/PMMA และนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับช่วงของความยาวคลื่นดังสมการ

$$A(\lambda) = \log\left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}\right) = l c \epsilon \quad (3.21)$$

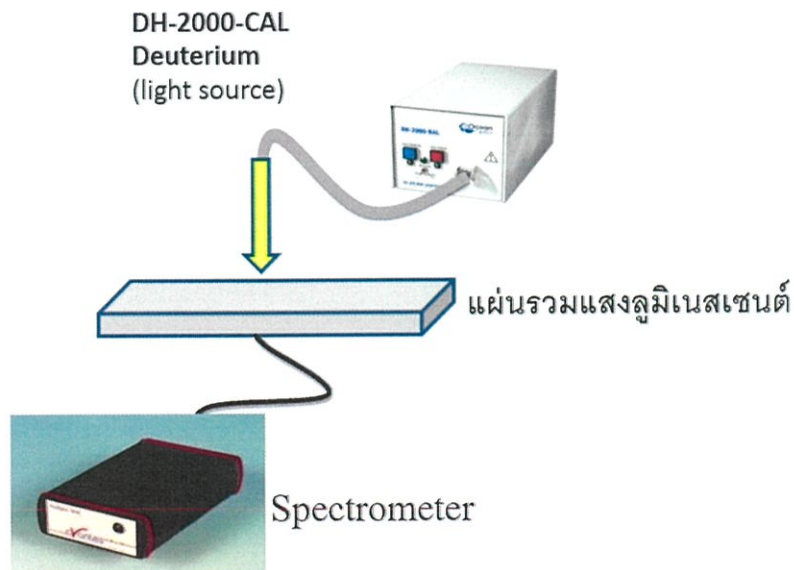
3.4.2 การวัดสเปกตรัมการส่งผ่าน

3.4.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

1. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์
2. สายใยแก้วนำแสง(ใช้ทั้ง 600 ไมโครเมตรและ 200 ไมโครเมตร)
3. เครื่องฉายแสงจากหลอดควิทีเรียม
4. อุปกรณ์จับยึดเส้นใยแก้วนำแสง
5. อุปกรณ์จับยึดแผ่นฟิล์ม ZnO/PMMA

3.4.2.2 ขั้นตอนในการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่าการส่งผ่านของฟิล์ม ZnO/PMMA

2. เปิดโปรแกรม Avasoft รุ่น 7.4

3. ทำการวัด background ของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์
4. ทำการวัดค่าการส่งผ่านแสงของแผ่น PMMA เพื่อเป็นค่าอ้างอิงในการวัด ZnO จะทำให้ได้เฉพาะค่าการดูดกลืนของ สาร ZnO เพียงอย่างเดียว
5. ทำการวัดค่าการส่งผ่านแสงของแผ่น ZnO/PMMA และนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับช่วงของความยาวคลื่น

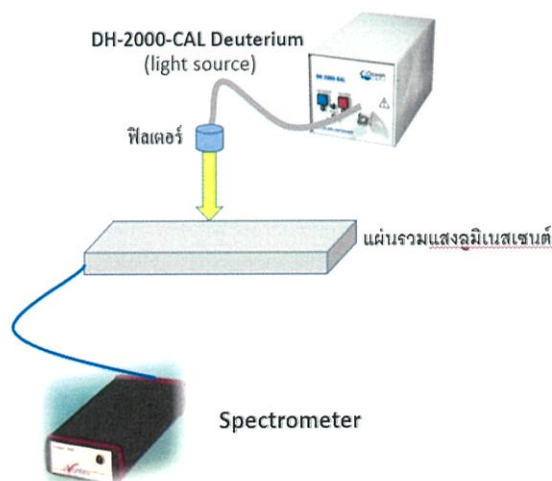
3.4.3 การวัดสเปกตรัมลูมิเนสเซนซ์

3.4.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

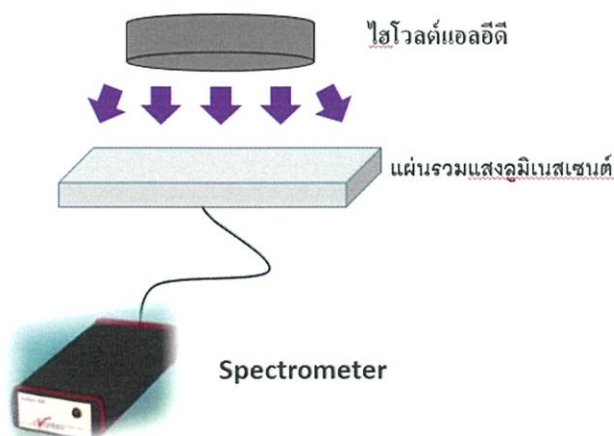
1. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์
2. สายใยแก้วนำแสง(ใช้ทั้ง 600 ไมโครเมตรและ 200 ไมโครเมตร)
3. เครื่องฉายแสงจากหลอดควิทีเรียม+แบนพาส ฟิลเตอร์ หรือ ไฮโวลต์แอลอีดี
4. อุปกรณ์จับยึดเส้นใยแก้วนำแสง
5. อุปกรณ์จับยึดแผ่นฟิล์ม ZnO/PMMA

3.4.3.2 ขั้นตอนในการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.11 หรือ 3.12



รูปที่ 3.11 การติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่าสเปกตรัมลูมิเนสเซนซ์แบบใช้หลอดควิทีเรียม + แบนพาส ฟิเตอร์



รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่าสเปกตรัมลูมิเนสเซนส์แบบใช้ไฮโวลต์แอลอีดี

2. เปิดโปรแกรม Avasoft รุ่น 7.4
3. ทำการวัด background ของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์
4. ทำการวัดค่าสเปกตรัมลูมิเนสเซนส์ของแผ่น PMMA เพื่อเป็นค่าอ้างอิงในการวัด ZnO จะทำให้ได้เฉพาะค่าการดูดกลืนของ สาร ZnO เพียงอย่างเดียว
5. ทำการวัดค่าสเปกตรัมลูมิเนสเซนส์ของแผ่น ZnO/PMMA และนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับช่วงของความยาวคลื่น

3.4.4 การวัดการเสื่อมสภาพของฟิล์มเมื่อได้รับแสง (Photodegradation)

3.4.4.1 วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

1. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์
2. สายใยแก้วนำแสง (ใช้ทั้ง 600 ไมโครเมตร และ 200 ไมโครเมตร)
3. เครื่องฉายแสงจากหลอดดิวทีเรียม
4. อุปกรณ์จับยึดเส้นใยแก้วนำแสง
5. อุปกรณ์จับยึดแผ่นรวมแสง

3.4.4.2 ขั้นตอนในการทดลอง

การทดลองการวัดการเสื่อมสภาพของฟิล์มเมื่อได้รับแสงในที่นี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ตอน ดังนี้

1. การเสื่อมสภาพของฟิล์มเมื่อได้รับแสงเป็นรายชั่วโมง
2. การเสื่อมสภาพของฟิล์มเมื่อได้รับแสงเป็นรายวัน

ตอนที่ 1 การวัดการเสื่อมสภาพเมื่อโดนแสงเป็นรายชั่วโมง

1. นำแผ่นฟิล์ม ZnO/PMMA ไปทำการตากแดด
2. ทำการวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมลูมิเนสเซนส์ เมื่อเวลาผ่านไปทุกๆ ชั่วโมง
3. นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกับเวลา, ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมลูมิเนสเซนส์กับเวลา

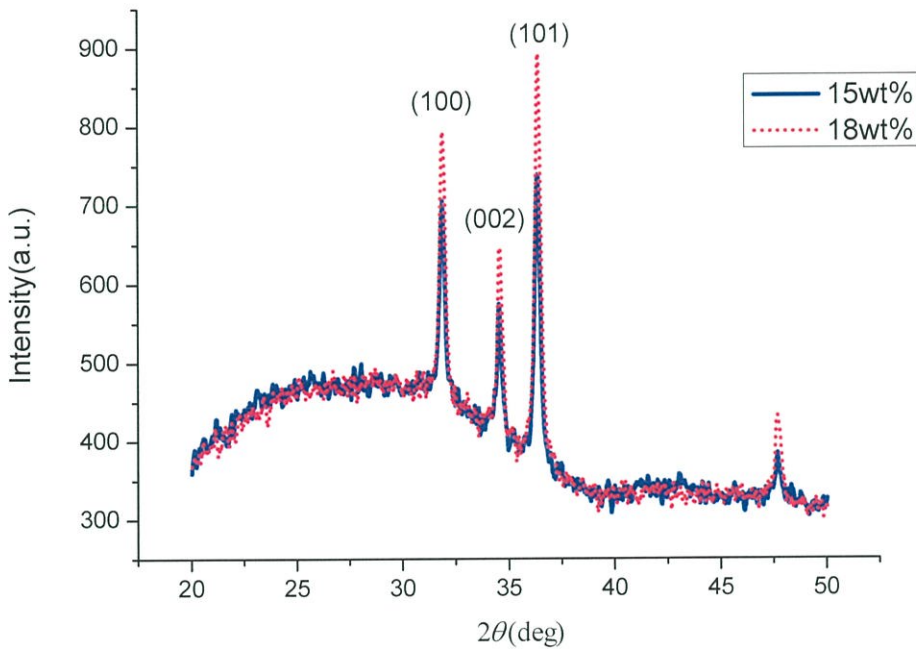
ตอนที่ 2. การวัดการเสื่อมสภาพเมื่อโดนแสงเป็นรายวัน

1. นำแผ่นฟิล์ม ZnO/PMMA ไปตากแดด
2. ทำการวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมลูมิเนสเซนส์ เมื่อเวลาผ่านไปทุกๆ วัน
3. นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกับเวลา, ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมลูมิเนสเซนส์กับเวลา

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer XRD)



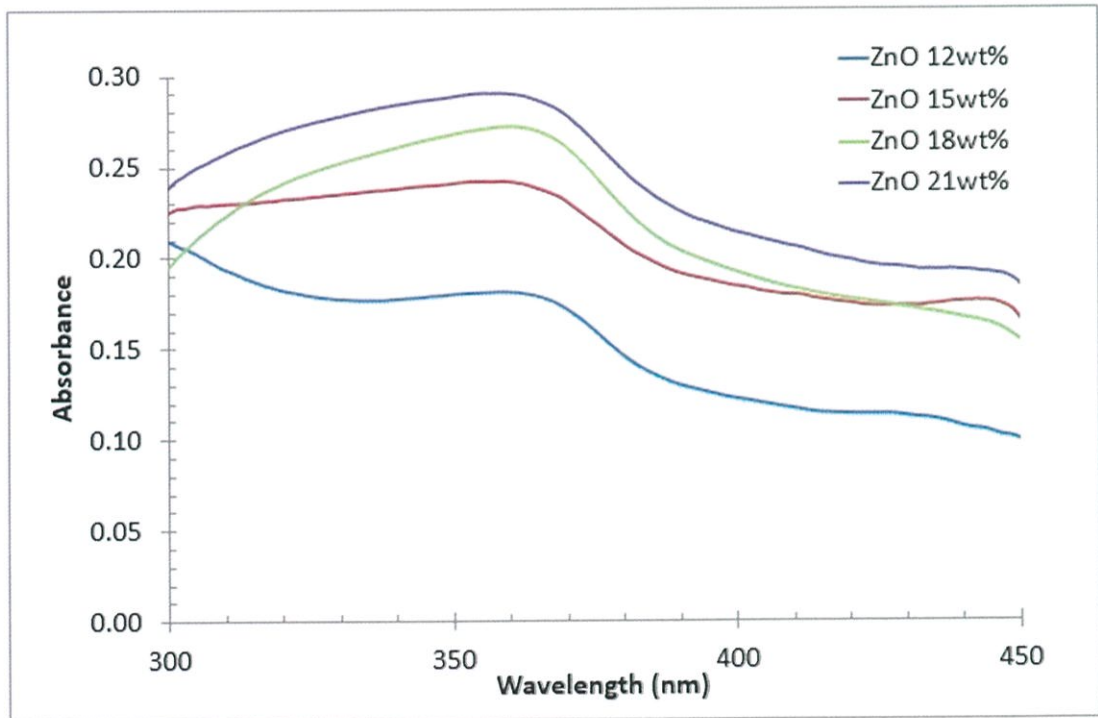
รูปที่ 4.1 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่ปริมาณ 15wt% และ 18wt%

แสดงผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอริไซต์ (Hexagonal wurtzite) ที่ปริมาณ 15wt% และ 18wt% ที่เตรียมด้วยสารละลาย Dichloromethane โดยใช้เทคนิคการหมุนเคลือบบนฐานรองรับบนกระจกโบโรซิลิเกต จากผลการวัดพบว่ารังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบนและให้พีคการเลี้ยวเบนชัดเจนจำนวน 3 พีค คือที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 31.728° 34.400° 37.212° ซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนจากระนาบ (100) (002) (101) ตามลำดับ ฟิล์มบางที่มีความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ 18wt% ผลที่ได้จะเห็นว่ามีความเป็นผลึกมากกว่าที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ 15wt% โดยพีคแต่ละพีคจะมีค่าไม่เท่ากัน

ขึ้นอยู่กับระนาบของความเป็นผลึกและความสูงของพีคจะขึ้นอยู่กับจำนวนของระนาบ พีคที่ได้จากการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่ปริมาณ 15wt% และ 18wt% เป็นการยืนยันว่าในตัวอย่างของเรามีซิงค์ออกไซด์ (ZnO) อยู่จริง โดยจากข้อมูลเบื้องต้นเทียบผลการวิเคราะห์จาก Garcia - Martinez & Calculated from ICSD (PDF#800075)

4.2 ผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงลูมิเนสเซนซ์ในรูปแบบฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์

จากการทดลองในหัวข้อ 3.4.1 การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงลูมิเนสเซนซ์การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ที่ถูกจัดเตรียมขึ้นจากสารซิงค์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน 4 ค่า คือ 12wt% 15wt% 18wt% และ 21wt% ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrometer ได้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 4.1 จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จะดูดกลืนแสงได้มากเมื่อความเข้มข้นของสารมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกฎการดูดกลืนแสงของ Beer-Lambert law ดังสมการที่ 2.16 ฟิล์มบางที่จัดเตรียมสามารถดูดกลืนแสงได้ในย่านความยาวคลื่น 320-390 นาโนเมตรและมีพีคการดูดกลืนแสงสูงสุด ที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร

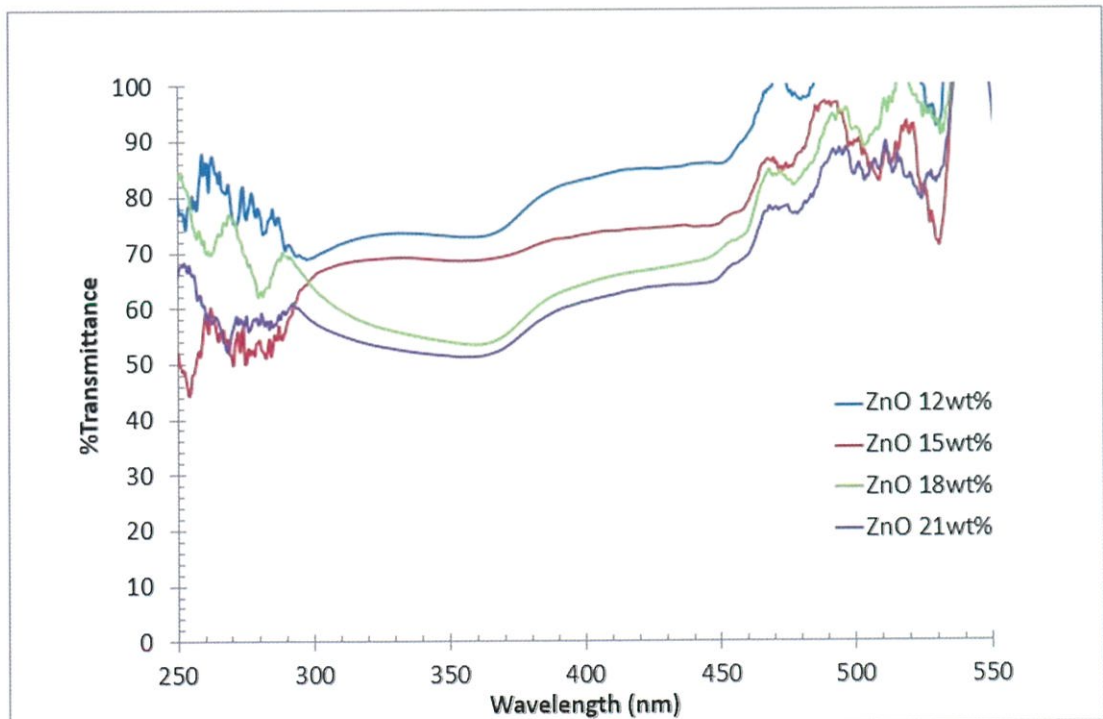


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 12wt% 15wt% 18wt% และ 21wt%

4.3 ผลการศึกษาสมบัติการส่งผ่านในรูปแบบฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์

จากการศึกษาสมบัติการส่งผ่านในรูปแบบฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ที่มีค่าความเข้มข้นต่างๆ กัน โดยอาศัยกระบวนการที่อธิบายในหัวข้อ 3.4.2 จะมีผลการวัดกราฟดังรูปที่ 4.8 ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่จัดเตรียมมีการส่งผ่านแสงช่วง 55%-75% ในย่านความยาวคลื่น 320-390 นาโนเมตร และมีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านสูงสุดเฉลี่ย 75% สำหรับฟิล์มบางที่เจือด้วยสารซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่มีความเข้มข้น 12wt%

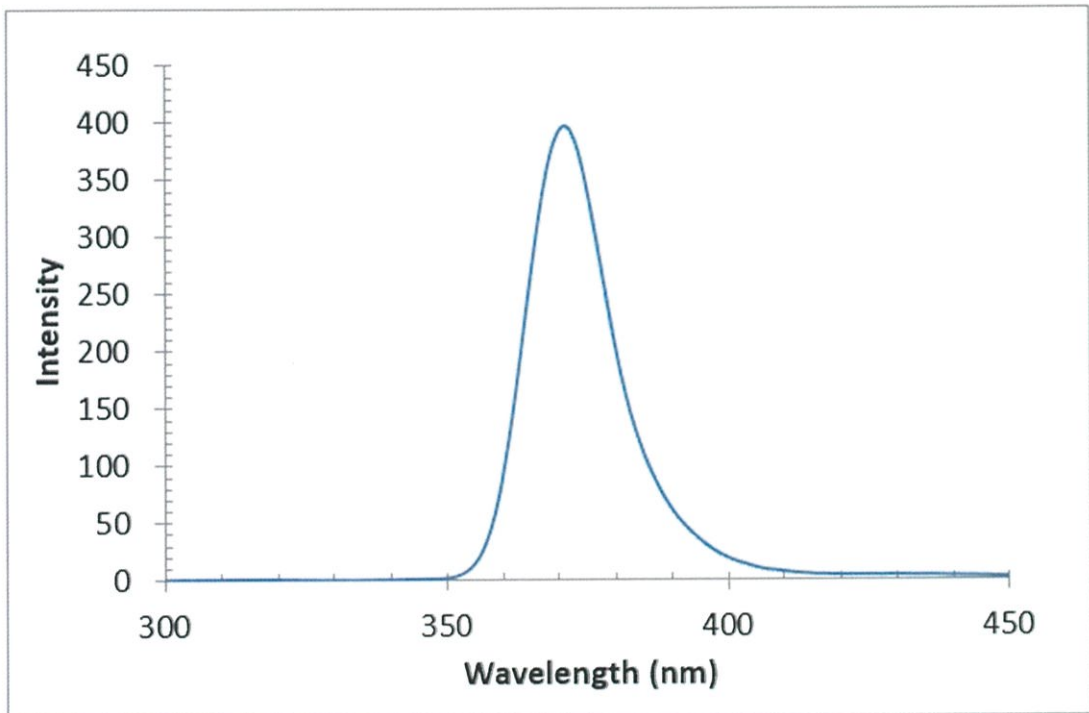
และเมื่อเทียบการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์แต่ละความเข้มข้น ดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นมากขึ้นการส่งผ่านมีค่าลดลงตามลำดับ พบว่าค่าการส่งผ่านช่วงสเปกตรัมที่ไม่มีการดูดกลืนจึงทำให้มีค่าการส่งผ่านสูง และที่ความเข้มข้นมากขึ้นพื้นที่ในการส่งผ่านน้อยลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นที่ 12wt% จะมีค่าการส่งผ่านค่อนข้างสูง ส่วนที่ความเข้มข้น 21wt% มีค่าการส่งผ่านค่อนข้างต่ำ เนื่องจากความเข้มข้นของสารในแผ่นรวมแสงที่มีความเข้มข้นมากขึ้นพื้นที่ในการส่งผ่านมีน้อยจึงทำให้ค่าการส่งผ่านมีน้อย ส่วนแผ่นรวมแสงซิงค์ออกไซด์ที่มีค่าความเข้มข้นน้อยจะมีพื้นที่ในการส่งผ่านมากกว่าจึงทำให้ค่าการส่งผ่านมีค่ามากขึ้นเอง



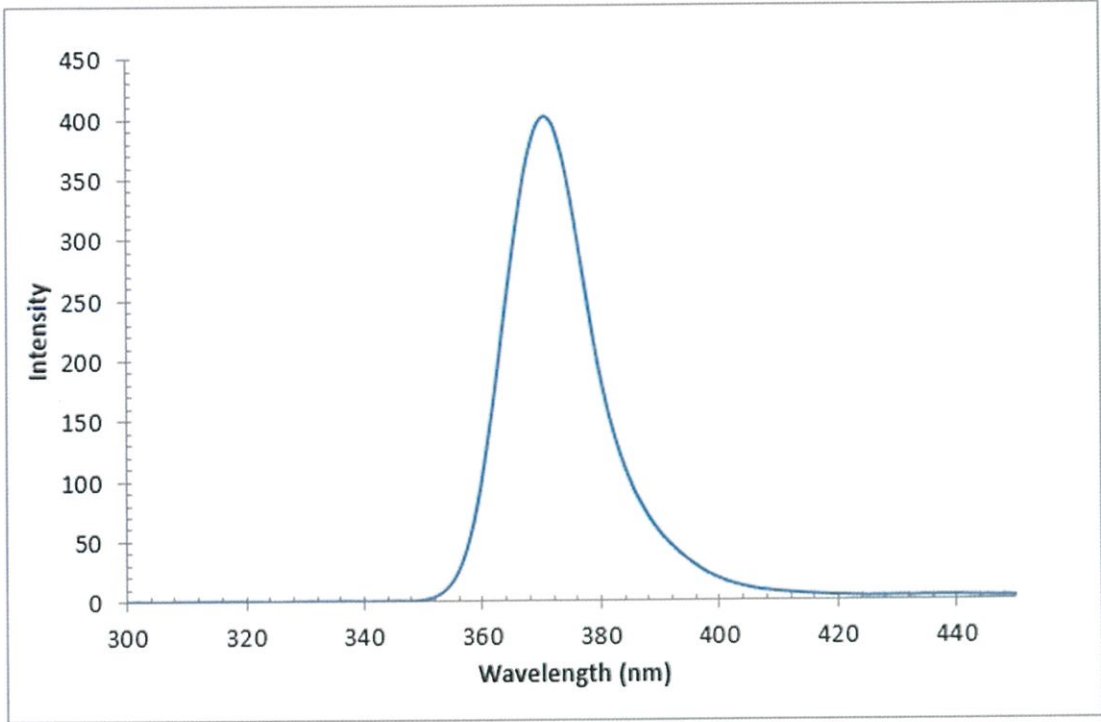
รูปที่ 4.3 การส่งผ่านในรูปแบบแสงลูมิเนสเซนซ์แต่ละความเข้มข้นที่ 12wt% 15wt% 18wt% 21wt%

4.4 ผลการศึกษาสมบัติการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ในรูปแบบฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์

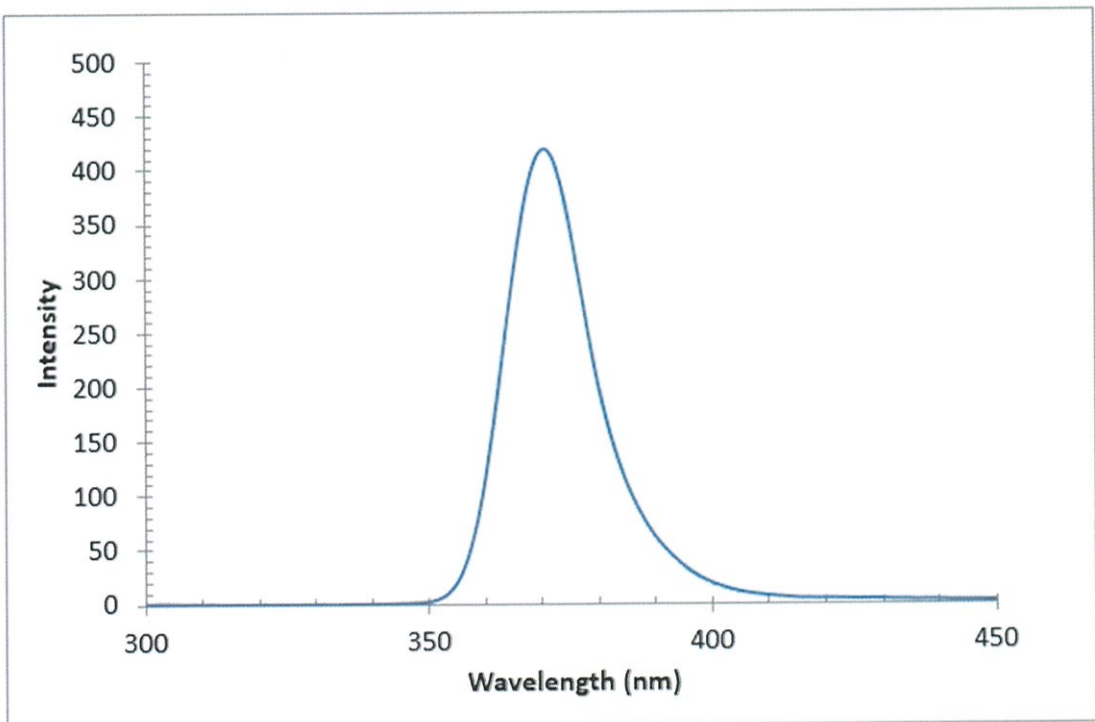
จากการศึกษาสมบัติการปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ โดยอาศัยกระบวนการที่อธิบายในหัวข้อ 3.4.3 จะมีผลการวัดกราฟดังรูปที่ 4.4 – 4.7 ตามลำดับ ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่จัดเตรียมจะเปล่งแสงในย่านความยาวคลื่น 350–400 นาโนเมตร และมีพีคการเปล่งแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 372 นาโนเมตร ซึ่งการวัดนี้มีผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ PP Jeeju [15]



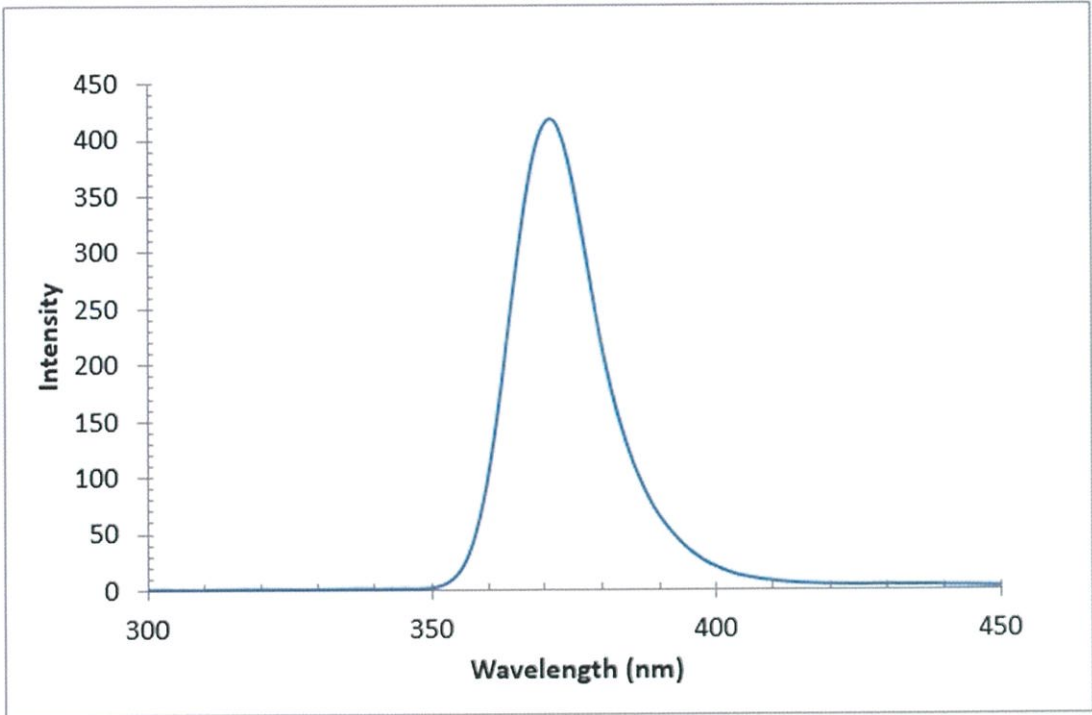
รูปที่ 4.4 การปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ที่ความเข้มข้น 12wt%



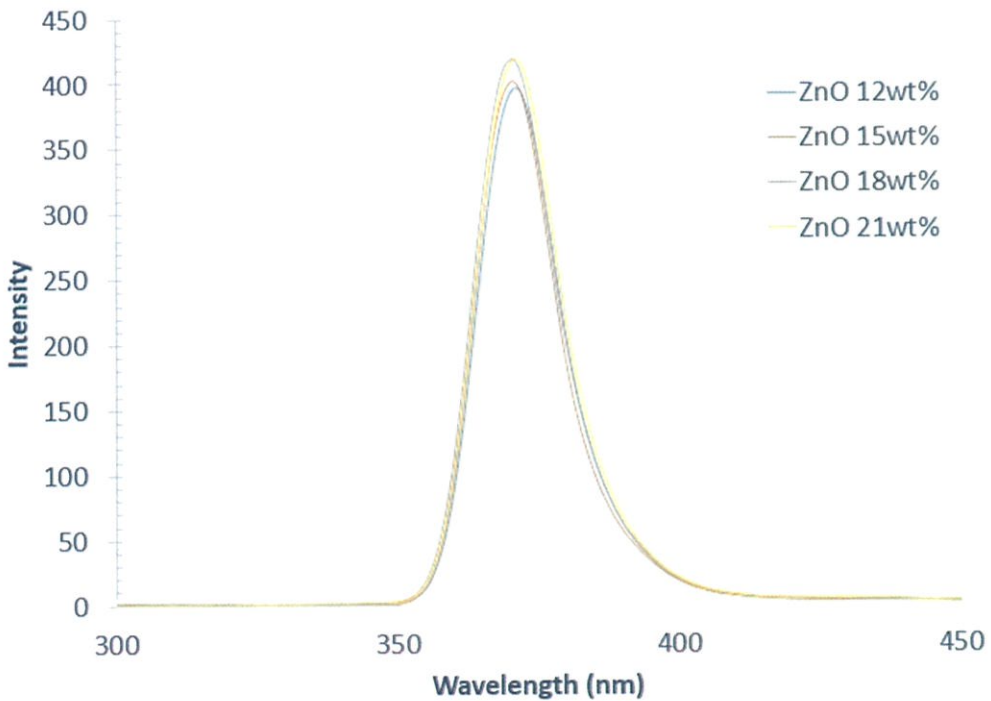
รูปที่ 4.5 การปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ที่ความเข้มข้น 15wt%



รูปที่ 4.6 การปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ที่ความเข้มข้น 18wt%



รูปที่ 4.7 การปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ที่ความเข้มข้น 21wt%



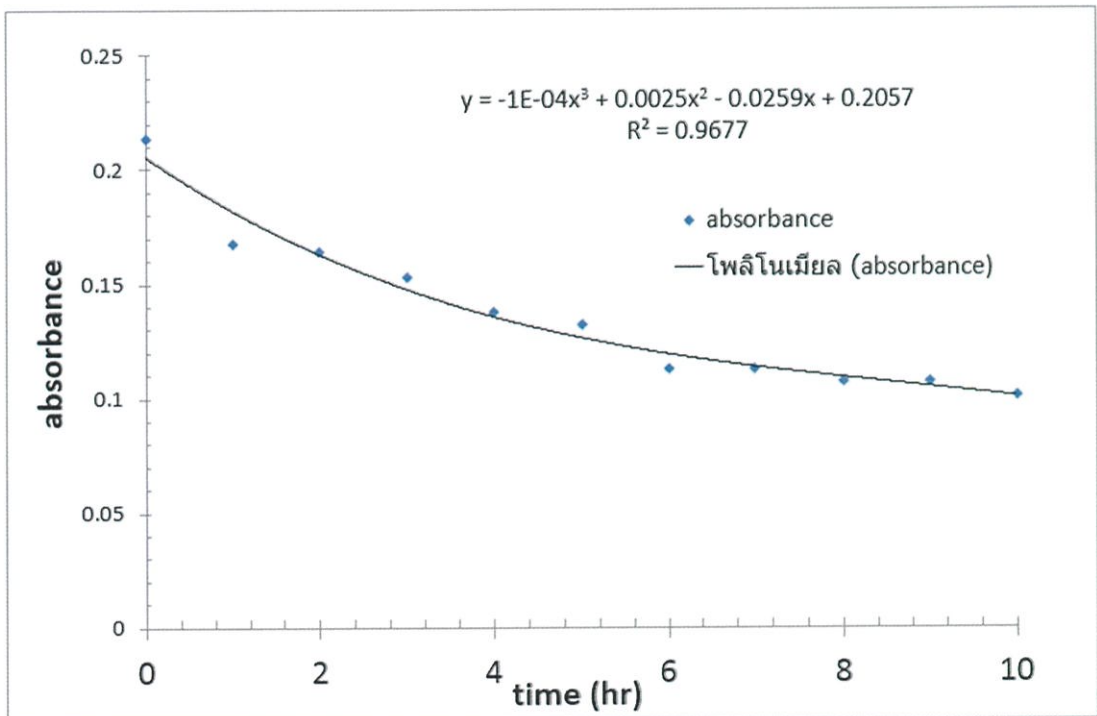
รูปที่ 4.8 การปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์แต่ละความเข้มข้นที่ 12wt% 15wt% 18wt% 21wt%

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบสเปกตรัมการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่มีค่าความเข้มข้นต่างกัน จากรูปจะเห็นว่าแสงลูมิเนสเซนซ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาฟิล์มบางที่มีความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) สูงจะมีความเข้มข้นสูงกว่าฟิล์มบางที่เจือด้วยซิงค์ออกไซด์ (ZnO) น้อย ซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่วัดได้ และเมื่อสังเกตผลการเรืองแสงจะพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมจากสาร ZnO ที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน จะมีผลการเรืองแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากพื้นที่ในการรับแสงอาจไม่เรียบสม่ำเสมอ

4.5 ผลการศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

4.5.1 การศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มเมื่อได้รับแสงเป็นรายชั่วโมง

4.5.1.1 การศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางเมื่อได้รับแสงเป็นรายชั่วโมง โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 4.9 การเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงแดดเป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

จากการทดลองโดยให้แผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ได้รับแสงเป็นเวลารายชั่วโมงในหัวข้อ 3.4.4 และวัดการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางเมื่อได้รับแสง โดยเก็บผลการทดลองเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ได้ผลการวัดดังรูป 4.9 จากกราฟจะเห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ได้พบว่ามีค่าการดูดกลืนมีค่าลดลง

เมื่อได้รับแสงเป็นเวลานานขึ้น ทั้งนี้จะมีสาเหตุจากฟิล์มบางซึ่งค้อออกไซด์เสื่อมสภาพนั้นมาจากแผ่นฟิล์มได้รับความร้อนของแสงที่ได้รับเป็นเวลานาน ทำให้ฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง [16]

ตารางที่ 4.1 ตารางการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งค้อออกไซด์เมื่อได้รับแสง 10 ชั่วโมง เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซึ่งค้อออกไซด์รายชั่วโมง

Times(hours)	Absorbance
0	0.2133
1	0.1674
2	0.1642
3	0.1532
4	0.1376
5	0.1321
6	0.1132
7	0.1127
8	0.1076
9	0.1072
10	0.1009

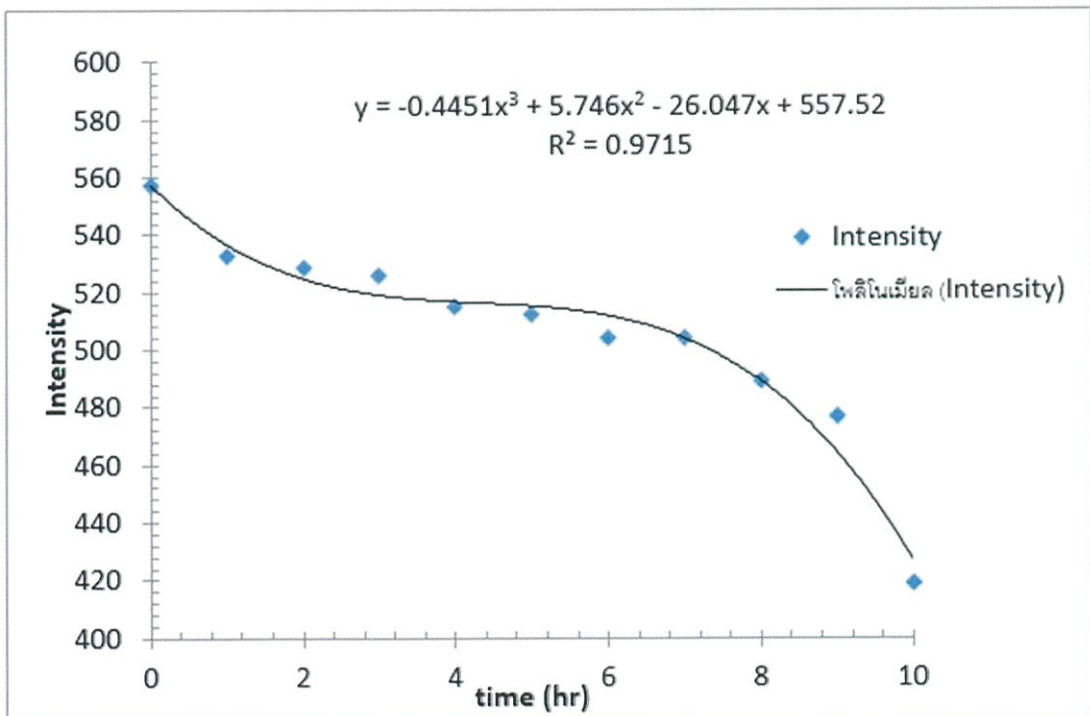
จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าของพีการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่วัดได้ในแต่ละชั่วโมง และรูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงในแต่ละชั่วโมง จากกราฟจะเห็นว่า การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งค้อออกไซด์ในชั่วโมงที่ 1-3 จะมีค่าการดูดกลืนที่ลดลงอย่างรวดเร็ว คือมีค่าลดลงจากค่าสูงสุดประมาณ 28.176% และในชั่วโมงที่ 4-7 จะมีค่าค่อยๆ ลดลง กล่าวคือมีค่าการดูดกลืนเปลี่ยนแปลงประมาณ 18.096% ในช่วงนี้ และมีการดูดกลืนแสงลดลงน้อยมากในชั่วโมงที่ 8-10 เปลี่ยนแปลงประมาณ 6.227%

ซึ่งแนวโน้มจากเส้นกราฟเป็นค่าเฉลี่ยแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของกราฟข้อมูลที่ได้จากการทดลอง หาได้จากสมการ โพลีโนเมียล ออเดอร์ 3 นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ประมาณ $\pm 10\%$ โดยที่ความคลาดเคลื่อนนี้เป็นข้อมูลที่บ่งบอกเปอร์เซ็นต์ความผันผวนของข้อมูล และบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลจากจำนวนเส้นโค้งที่ปรากฏในเส้นกราฟ จากสมการในรูปที่ 4.8 นี้ เป็นการคำนวณค่ากำลังสองน้อยที่สุดในจุดต่างๆ โดยที่ค่า R^2 ในกราฟหากมีค่าใกล้เคียงกับ 1 จะได้เส้น

โพลีโนเมียลที่มีค่าเหมาะสมกับข้อมูลมากที่สุด และค่าที่เหมาะสมข้อมูลมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.9677 จึงได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลื่อนของข้อมูลที่ประมาณ $\pm 10\%$

4.5.1.2 การศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงเป็นราย ชั่วโมง โดยการวัดค่าการปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

จากการได้ทำการทดลอง โดยให้แผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ได้รับแสงเป็นเวลาราย ชั่วโมงในหัวข้อ 3.4.4 และวัดการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางเมื่อได้รับแสง โดยเก็บผลการทดลอง เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ได้ผลการวัดดังรูป 4.10 จากกราฟจะเห็นว่าค่าการปลดปล่อยแสงที่ได้พบว่ามี ค่าความเข้มแสงแต่ละรายชั่วโมงมีค่าลดลงเมื่อได้รับแสงเป็นเวลานานขึ้น ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุจาก การที่ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เสื่อมสภาพนั้นมาจากแผ่นฟิล์มได้รับความร้อนของแสงที่ได้รับเป็น เวลานาน การเสื่อมสภาพของฟิล์มบางนั้น จึงขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์ม พื้นที่ผิวด้วย และเมื่อ ได้รับแสงในอุณหภูมิต่ำ ยิ่งเป็นผลทำให้ฟิล์มเสื่อมสภาพลง และซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับความ ร้อน ความชื้น ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.10 การเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงแดดเป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยการวัด ค่าการปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

ตารางที่ 4.2 ตารางการปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสง 10 ชั่วโมง เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง

Times(hours)	Intensity	Wavelength (nm)
0	557.1	370
1	532.95	370
2	528.92	370
3	525.96	371
4	514.76	371
5	512.63	370
6	504.46	371
7	503.96	371
8	489.35	371
9	476.97	371
10	418.83	371

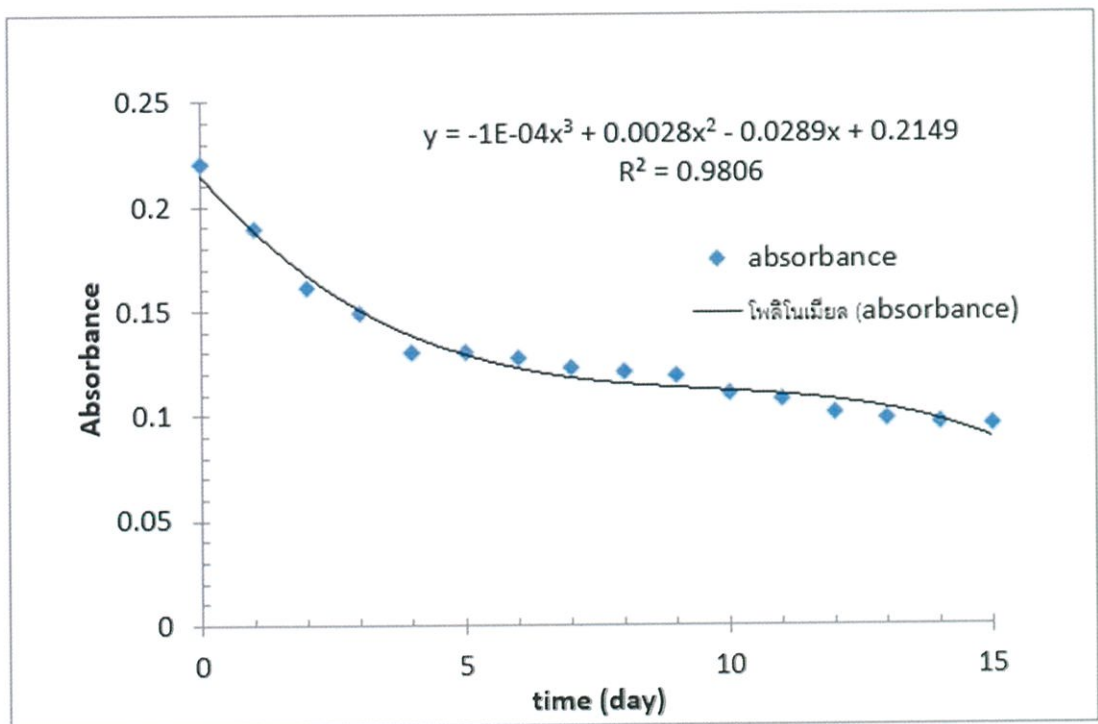
จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าของพีคการปลดปล่อยแสงของฟิล์มที่วัดได้ในแต่ละชั่วโมง และรูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นในแต่ละชั่วโมง จากกราฟจะเห็นว่า ความเข้มแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ในชั่วโมงที่ 1-3 จะมียค่าความเข้มแสงที่ลดลงอย่างรวดเร็ว และในชั่วโมงที่ 4-7 มีการปลดปล่อยแสงคงที่ ส่วนในชั่วโมงที่ 8-10 การปลดปล่อยแสงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้ง

ซึ่งแนวโน้มจากเส้นกราฟเป็นค่าเฉลี่ยแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของกราฟข้อมูลที่ได้จากการทดลอง หาได้จากสมการโพลีโนเมียล ออเดอร์ 3 นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ประมาณ $\pm 3\%$ โดยที่ความคลาดเคลื่อนนี้เป็นข้อมูลที่บ่งบอกเปอร์เซ็นต์ความผันผวนของข้อมูล และบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลจากจำนวนเส้นโค้งที่ปรากฏในเส้นกราฟ จากสมการในรูปที่ 4.9 นี้ เป็นการคำนวณค่ากำลังสองน้อยที่สุดในจุดต่างๆ โดยที่ค่า R^2 ในกราฟหากมีค่าใกล้เคียงกับ 1 จะได้เส้นโพลีโนเมียลที่มีค่าเหมาะสมกับข้อมูลมากที่สุด และค่าที่เหมาะสมข้อมูลมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.9715 จึงได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ประมาณ $\pm 3\%$

4.5.2 การเสื่อมสภาพของฟิล์มเมื่อได้รับแสงเป็นรายวัน

4.5.2.1 การศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงเป็นรายวัน โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

จากการทดลองโดยให้แผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ได้รับแสงเป็นเวลารายวันในหัวข้อ 3.4.4 และวัดการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางเมื่อได้รับแสง โดยเก็บผลการทดลองเป็นเวลา 15 วัน ได้ผลการวัดดังรูป 4.11 จากกราฟจะเห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ได้พบว่ามีค่าการดูดกลืนมีค่าลดลงเมื่อได้รับแสงเป็นเวลานานขึ้น ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุจากการฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เกิดการเสื่อมสภาพนั้นมาจากแผ่นฟิล์มได้รับความร้อนของแสงที่ได้รับเป็นเวลานาน การเสื่อมสภาพของฟิล์มบางนั้น จึงขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์ม พื้นที่ผิวด้วย และเมื่อได้รับแสงในอุณหภูมิที่สูง ยิ่งเป็นผลทำให้ฟิล์มเสื่อมสภาพลง และซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับความร้อน ความชื้น ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.11 การเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงแดดเป็นเวลา 15 วัน โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าของพีคการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่วัดได้ในแต่ละวัน และรูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงในแต่ละวัน จากกราฟจะเห็นว่า การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ในวันที่ 1-5 จะมีค่าการดูดกลืนที่ลดลงอย่างรวดเร็วจากค่าสูงสุด

ประมาณ 40.981% และในวันที่ 6-10 จะมีค่าค่อยๆ ลดลงกล่าวคือมีค่าการดูดกลืนเปลี่ยนแปลงประมาณ 13.5% ในช่วงนี้ก่อนที่จะเริ่มมีการดูดกลืนแสงคงที่ในวันที่ 11-15 เปลี่ยนแปลงประมาณ 11.33%

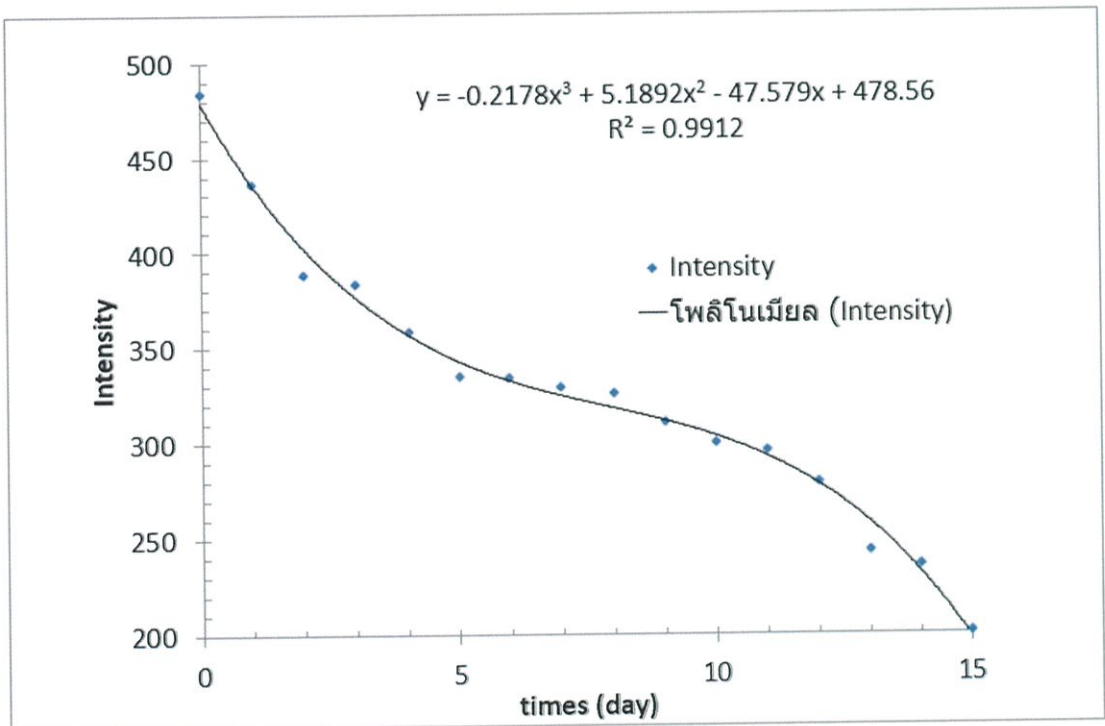
ซึ่งแนวโน้มจากเส้นกราฟเป็นค่าเฉลี่ยแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของกราฟข้อมูลที่ได้จากการทดลอง หาได้จากสมการ โพลีโนเมียล ออเดอร์ 3 นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ประมาณ $\pm 7\%$ โดยที่ความคลาดเคลื่อนนี้เป็นข้อมูลที่บ่งบอกเปอร์เซ็นต์ความผันผวนของข้อมูล และบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลจากจำนวนเส้นโค้งที่ปรากฏในเส้นกราฟ จากสมการในรูปที่ 4.11 นี้ เป็นการคำนวณค่ากำลังสองน้อยที่สุดในจุดต่างๆ โดยที่ค่า R^2 ในกราฟหากมีค่าใกล้เคียงกับ 1 จะได้เส้นโพลีโนเมียลที่มีค่าเหมาะสมกับข้อมูลมากที่สุด และค่าที่เหมาะสมข้อมูลมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.9806 จึงได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ประมาณ $\pm 7\%$

ตารางที่ 4.3 ตารางการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสง 15 วัน เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน

Times(day)	Absorbance
0	0.2201
1	0.1892
2	0.1617
3	0.1493
4	0.1301
5	0.1299
6	0.1274
7	0.1227
8	0.1206
9	0.1187
10	0.1102
11	0.1077
12	0.1015
13	0.0903
14	0.0963
15	0.0955

4.5.2.3 การศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงเป็นรายวัน โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

จากการได้ทำการทดลองโดยให้แผ่นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ได้รับแสงเป็นเวลา รายวันในหัวข้อ 3.4.4 และวัดการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางเมื่อได้รับแสง โดยเก็บผลการทดลองเป็น เวลา 15 วัน ได้ผลการวัดดังรูป 4.12 จากกราฟจะเห็นว่าค่าการปลดปล่อยแสงที่ได้พบว่ามีค่าความ เข้มแสงแต่ละวันมีค่าลดลงเมื่อได้รับแสงเป็นเวลานานขึ้น ทั้งนี้จะมีสาเหตุจากการที่ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เสื่อมสภาพนั้นมาจากแผ่นฟิล์มได้รับความร้อนของแสงที่ได้รับเป็นเวลานาน การ เสื่อมสภาพของฟิล์มบางนั้น จึงขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์ม พื้นที่ผิวด้วย และเมื่อได้รับแสงใน อุณหภูมิที่สูง ยิ่งเป็นผลทำให้ฟิล์มเสื่อมสภาพลง และซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับความร้อน ความชื้น ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.12 การเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงแดดเป็นเวลา 15 วัน โดยการวัดค่า การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าของพีการปลดปล่อยแสงของฟิล์มที่วัดได้ในแต่ละชั่วโมง และ รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นในแต่ละวัน จากกราฟจะเห็นว่า ความเข้ม แสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ในชั่วโมงที่ 1-5 จะมีค่าความเข้มแสงที่ลดลงอย่างรวดเร็ว และใน ชั่วโมงที่ 6-10 จะมีการปลดปล่อยแสงคงที่ ส่วนในชั่วโมงที่ 11-15 การปลดปล่อยแสงมีค่าลดลง อย่างรวดเร็วอีกครั้ง

ซึ่งแนวโน้มจากเส้นกราฟเป็นค่าเฉลี่ยแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของกราฟข้อมูลที่ได้จากการทดลอง หาได้จากสมการโพลีโนเมียล ออเดอร์ 3 นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ประมาณ $\pm 7\%$ โดยที่ความคลาดเคลื่อนนี้เป็นข้อมูลที่บ่งบอกเปอร์เซ็นต์ความผันผวนของข้อมูล และบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลจากจำนวนเส้นโค้งที่ปรากฏในเส้นกราฟ จากสมการในรูปที่ 4.12 นี้เป็นการคำนวณค่ากำลังสองน้อยที่สุดในจุดต่างๆ โดยที่ค่า R^2 ในกราฟหากมีค่าใกล้เคียงกับ 1 จะได้เส้นโพลีโนเมียลที่มีค่าเหมาะสมกับข้อมูลมากที่สุด และค่าที่เหมาะสมข้อมูลมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.9912 จึงได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ประมาณ $\pm 7\%$

ตารางที่ 4.4 ตารางการปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสง 15 วัน เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน

Times(days)	Intensity	Wavelength (nm)
0	483.85	351
1	436.23	351
2	388.44	351
3	383.65	348
4	358.76	349
5	335.63	351
6	334.34	351
7	329.61	349
8	326.51	349
9	311.30	349
10	300.00	351
11	296.40	350
12	279.98	350
13	243.58	351
14	236.22	350
15	201.27	350

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการพัฒนาแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ โดยจัดเตรียมแผ่นจากวัสดุ ZnO และ PMMA ทั้งนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุ ZnO มาประยุกต์ใช้ในการสร้างแผ่นรวมแสง โดยผู้วิจัยจะได้ทำการศึกษากระบวนการในการจัดเตรียมแผ่นรวมแสง รวมถึงทำการศึกษาสมบัติทางแสงของแผ่นรวมแสงที่จัดเตรียมได้คือ การดูดกลืนแสง การส่งผ่านแสง การคายพลังงานในรูปของแสงลูมิเนสเซนซ์ การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสงของแผ่นเมื่อได้รับแสงเป็นระยะเวลานานๆ และการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยการศึกษาทั้งหมดในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้เป็นหัวข้อดังนี้

5.1.1 ในการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่ปริมาณ 15wt% และ 18wt% พบว่าที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ 18wt% ผลที่ได้จะเห็นว่ามีความเป็นผลึกมากกว่าที่ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ 15wt% โดยพีกแต่ละพีกจะมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับระนาบของความเป็นผลึกและความสูงของพีกจะขึ้นอยู่กับจำนวนของระนาบ พีกที่ได้จากการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่ปริมาณ 15wt% และ 18wt% เป็นการยืนยันว่าในตัวอย่างของเรามีซิงค์ออกไซด์ (ZnO) อยู่จริง

5.1.2 ในการศึกษากระบวนการจัดเตรียมฟิล์มบางเพื่อให้ผิวหน้าของฟิล์มบางมีความสม่ำเสมอ ได้พบว่าฟิล์มบางที่จัดเตรียมจากสาร PMMA ที่ความเข้มข้น 20% (w/v) ทำละลายด้วยสาร Dichloromethane (DCM) และถูกเหวี่ยงในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยความเร็วรอบ 5,500 รอบต่อนาที จะได้ผิวหน้าฟิล์มบางเรียบสม่ำเสมอ ที่สอดคล้องกับเรื่องงานวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสารเรืองแสง ของวิษญาพร สุญพานิช [17]

5.1.3 ในการศึกษาสมบัติการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ สามารถสรุปได้ว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่จัดเตรียมจะเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่น 350–340 นาโนเมตร และมีพีกการเปล่งแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 372 นาโนเมตร สำหรับฟิล์มบางที่มีความเข้มข้น 21wt%

5.1.4 ในการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ สามารถสรุปได้ว่าฟิล์มบางมีพีคการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร และฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จะดูดกลืนแสงได้มากเมื่อความเข้มข้นของสารมีค่าสูงขึ้น

5.1.5 ในการศึกษาสมบัติการส่งผ่านของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ สามารถสรุปได้ว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่จัดเตรียมมีการส่งผ่านที่เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านช่วง 55%-75% และมีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านสูงสุดเฉลี่ยประมาณ 75% ที่ความเข้มข้น 12wt% โดยความเข้มข้นที่ 12wt% จะมีค่าการส่งผ่านค่อนข้างสูง ส่วนที่ความเข้มข้น 21wt% มีค่าการส่งผ่านค่อนข้างต่ำ

5.1.6 ในการศึกษาสมบัติการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.5.1 การศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จากการดูดกลืนแสงทั้งรายวันและรายชั่วโมง พบว่ามีค่าการดูดกลืนมีค่าลดลงเมื่อได้รับแสงเป็นเวลานานขึ้น

5.1.5.2 การศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จากการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ทั้งรายวันและรายชั่วโมง พบว่าการปลดปล่อยแสงมีค่าความเข้มแสงลดลงเมื่อได้รับแสงเป็นเวลานานขึ้น

นั่นมาจากแผ่นฟิล์มได้รับความร้อนของแสงที่ได้รับเป็นเวลานาน การเสื่อมสภาพของฟิล์มบางนั้น จึงขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์ม พื้นที่ผิวด้วย และเมื่อได้รับแสงในอุณหภูมิที่สูง ยังเป็นผลทำให้ฟิล์มเสื่อมสภาพลง และซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับความร้อน ความชื้น ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างด้วยเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยที่ศึกษาสมบัติทางแสงของซิงค์ออกไซด์ซึ่งเมื่อผู้ทำวิจัยได้พบกับปัญหาในงานวิจัยในด้านต่างๆ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของตัวซิงค์ออกไซด์เอง เช่น การควบคุมความชื้นของสารซิงค์ออกไซด์ที่ต้องเก็บในสุญญากาศเพื่อป้องกันสารซิงค์ออกไซด์ เกาะกันเป็นก้อน ข้อจำกัดเกี่ยวกับการวัดสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ซึ่งระบบการวัดสมบัติทางแสงในรูปแบบต่างๆ นั้นเป็นการสร้างระบบการวัดขึ้นมาเอง จึงทำให้มีมาตรฐานในการวัดน้อย ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลวิจัยได้

สำหรับงานวิจัยที่จะดำเนินต่อไปในอนาคตคือ อาจจะต้องสร้างระบบการวัดที่ได้มาตรฐานมากขึ้น และทำการศึกษารเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการเตรียมฟิล์มบางแบบอื่นๆ หรืออาจทำการสร้างฟิล์มบางหลายชั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฟิล์ม

เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://lib.ku.ac.th/blog/?p=4723>
- [2] <http://www.cps-plastic.com/forum.php?mod=viewthread&tid=173>
- [3] <http://www.photobiology.info/Visser-Rolinski.html>
- [4] <http://www.piercenet.com/method/fluorescent-probes>
- [5] <http://www.olympusmicro.com/primer/lightandcolor/fluoroexcitation.html>
- [6] <http://www.opticsinfobase.org/ao/fulltext.cfm?uri=ao-52-6-1230&id=249253>
- [7] http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_files/ceramic/u1-7.htm
- [8] <http://th.wikipedia.org/wiki/>
- [9] <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/component/k2/item/140-uv-visible-spectrophotometer.html>
- [10] <http://www.chemguide.co.uk/analysis/uvvisible/spectrometer.html>
- [11] เขียวพา สุวัตติ.พลาสติกชีวภาพ. R&D NEWSLETTER. ปีที่ 18, ฉบับที่ 4, (ตุลาคม-ธันวาคม), 2554, หน้า 3.
- [12] [13] <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87-xrd.html>
- [14] http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/Pattana_Thepchalotorn/Fulltext.pdf
- [15] http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/7979/14/14_chapter%206.pdf
- [16] <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42792.pdf>
- [17] วิทยานิพนธ์เรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสารเรืองแสง ของ นางสาว วิชาญพร สุญพานิช

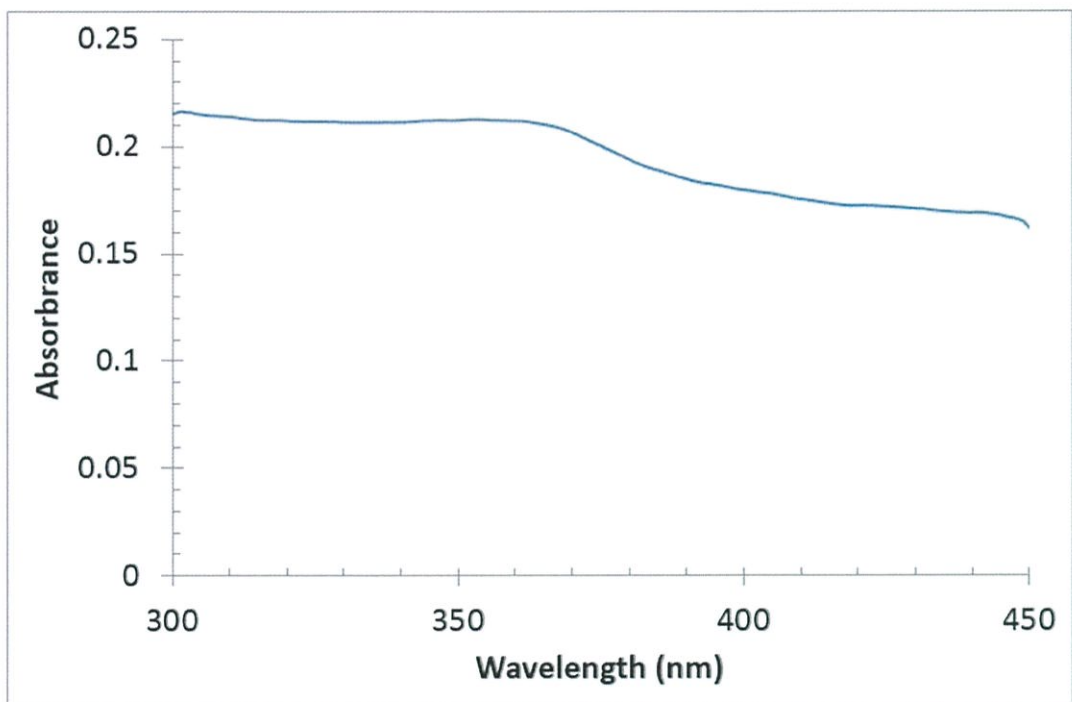
- [18] โครงการพิเศษเรื่องการเตรียมและศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของสารละลายเรืองแสงอินทรีย์ของ นางสาวชัชชนก วิลัยพงษ์ และ นางสาวสุภารัตน์ รุจิหาญ
- [19] โครงการพิเศษการเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง (ZnO : Cu) โดยเตรียมด้วยกระบวนการโซลเจล ของ นางสาว ศิริวัฒนา อุ๋นผาง
- [20] โครงการพิเศษการพัฒนาแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์สำหรับแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ ของ นางสาววิชญาพร สุญพานิช และนายสุกฤต สมุทรระกพงศ์

ภาคผนวก

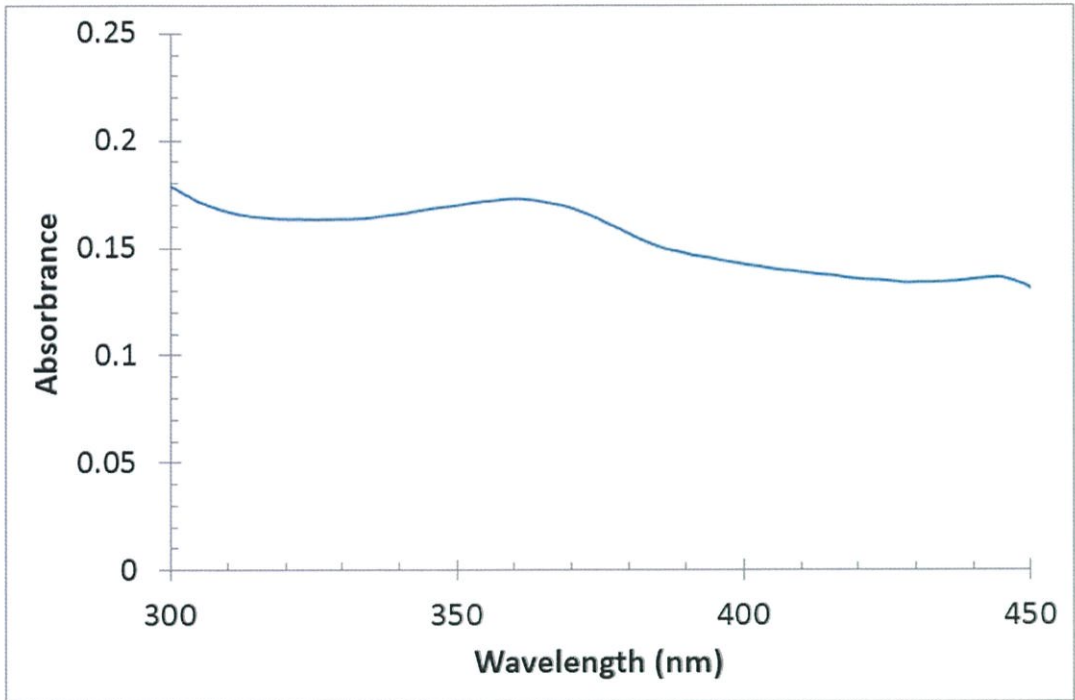
ภาคผนวก

1. การศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มเมื่อได้รับแสงเป็นรายชั่วโมง

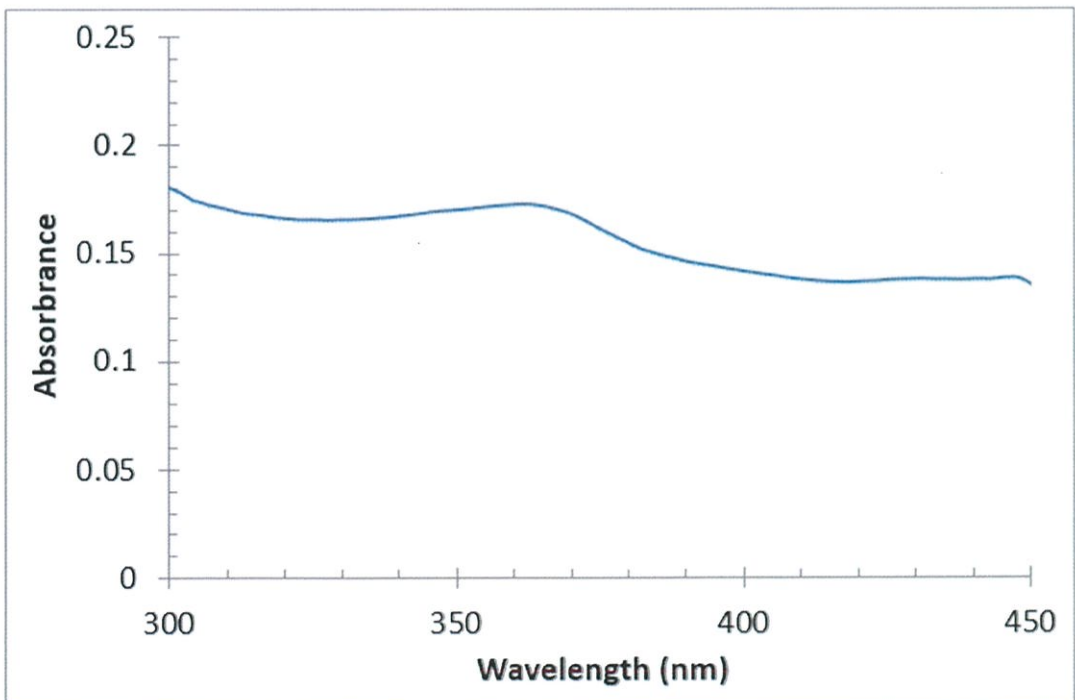
1.1 การศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางเมื่อได้รับแสงเป็นรายชั่วโมง โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งคือออกไซด์



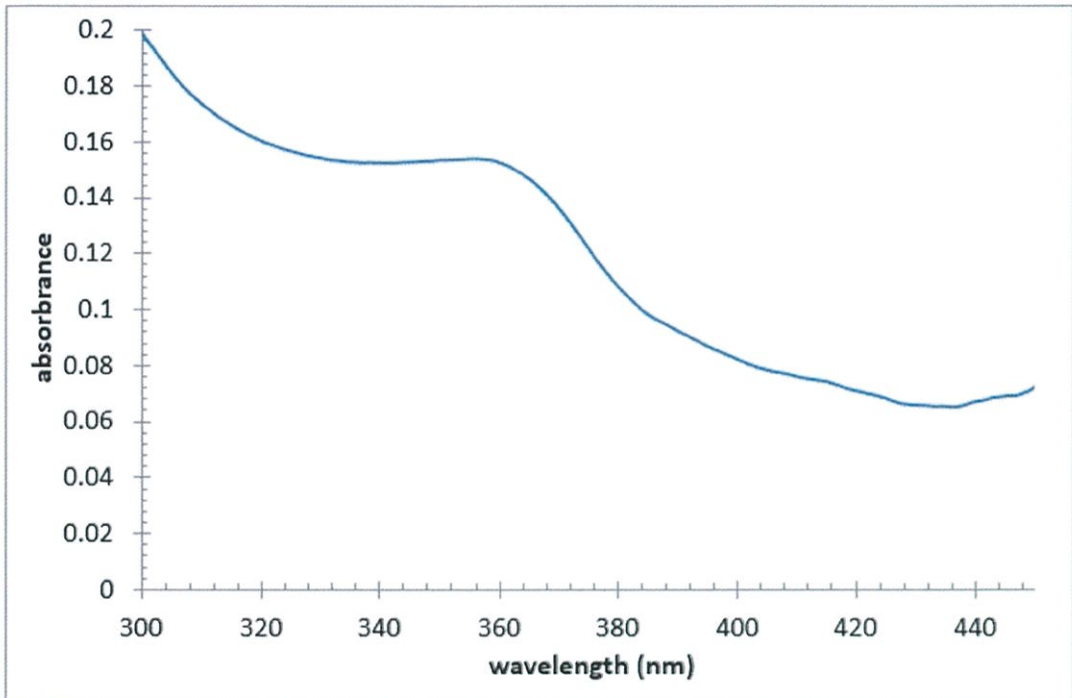
รูปที่ 1 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งคือออกไซด์ก่อนการรับแสง เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซึ่งคือออกไซด์รายชั่วโมง



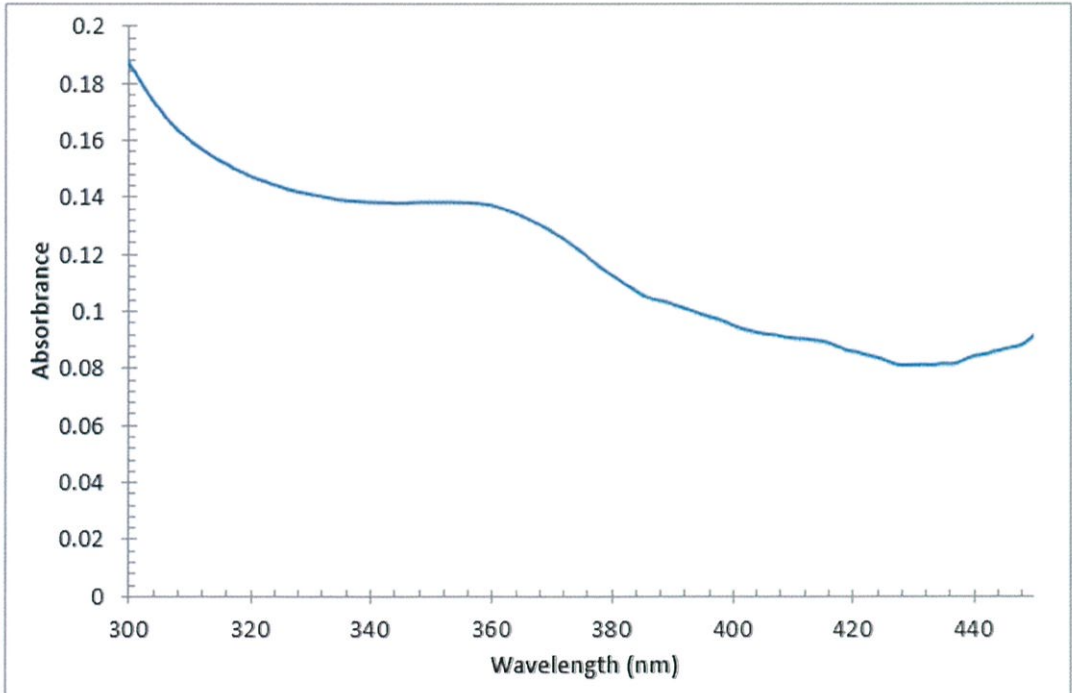
รูปที่ 2 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วง 1 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



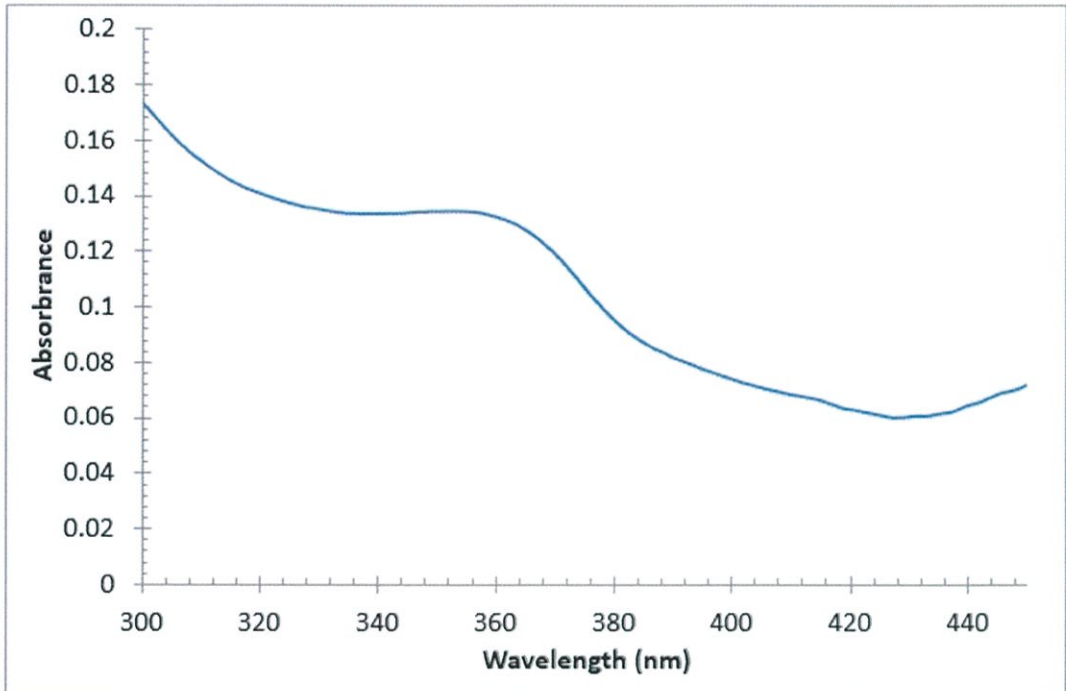
รูปที่ 3 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วง 2 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



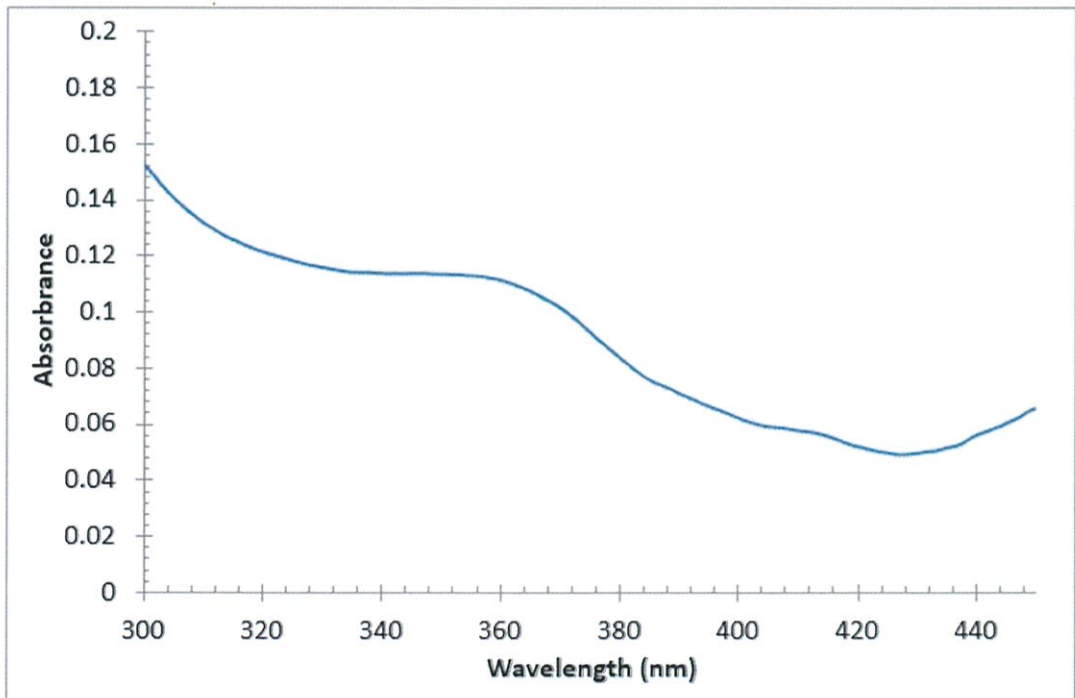
รูปที่ 4 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วง 3 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



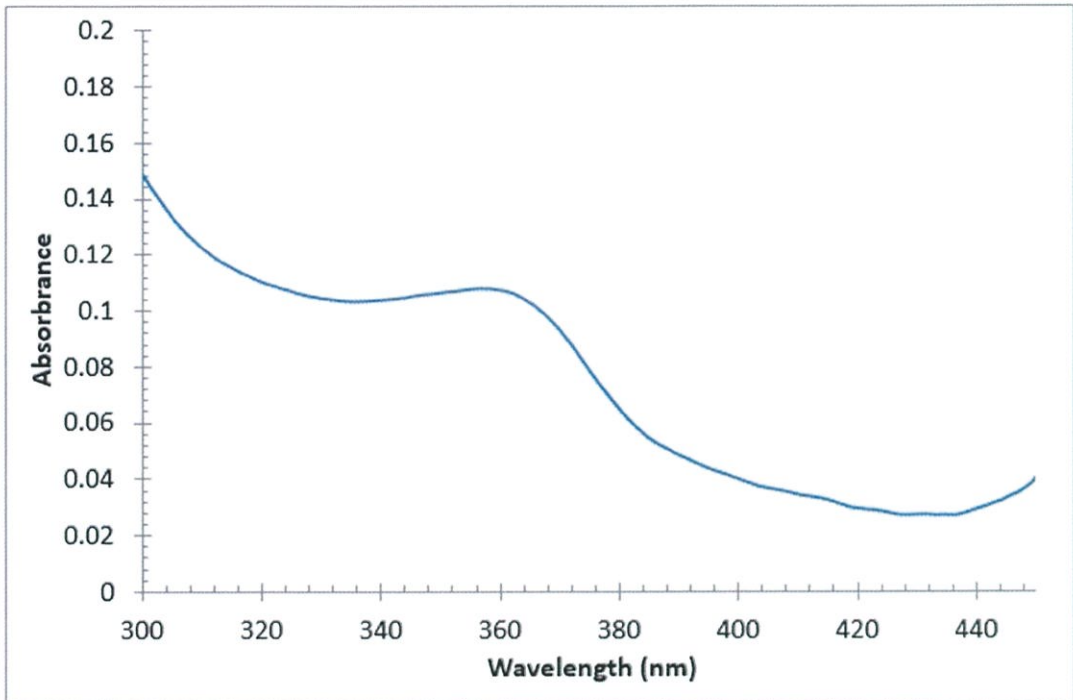
รูปที่ 5 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วง 4 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



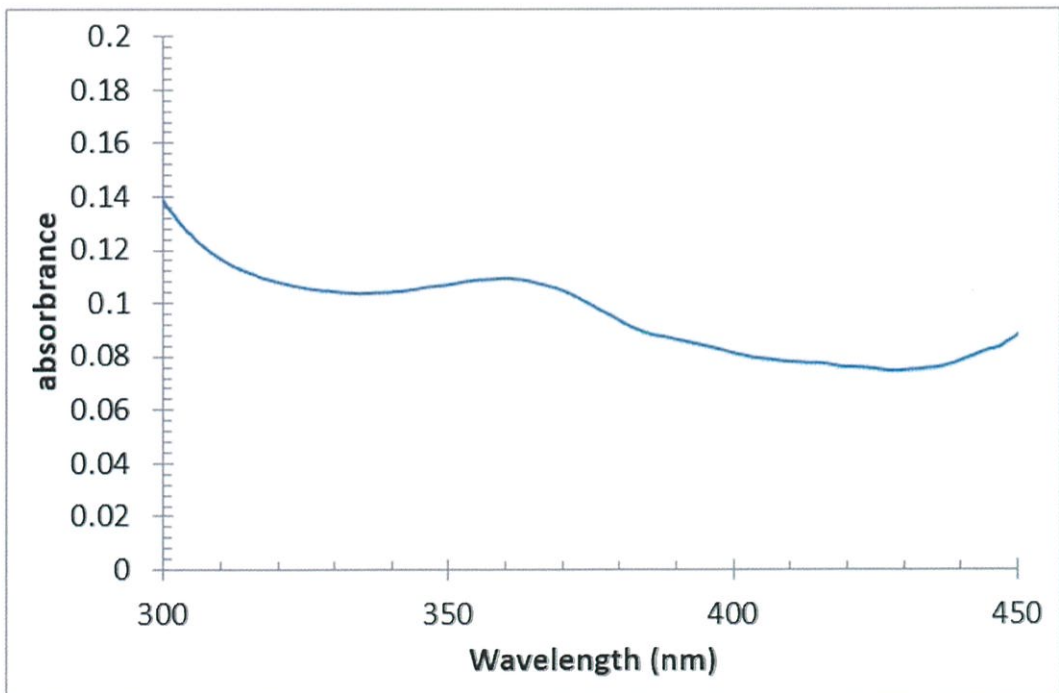
รูปที่ 6 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงชั่วโมงที่ 5 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



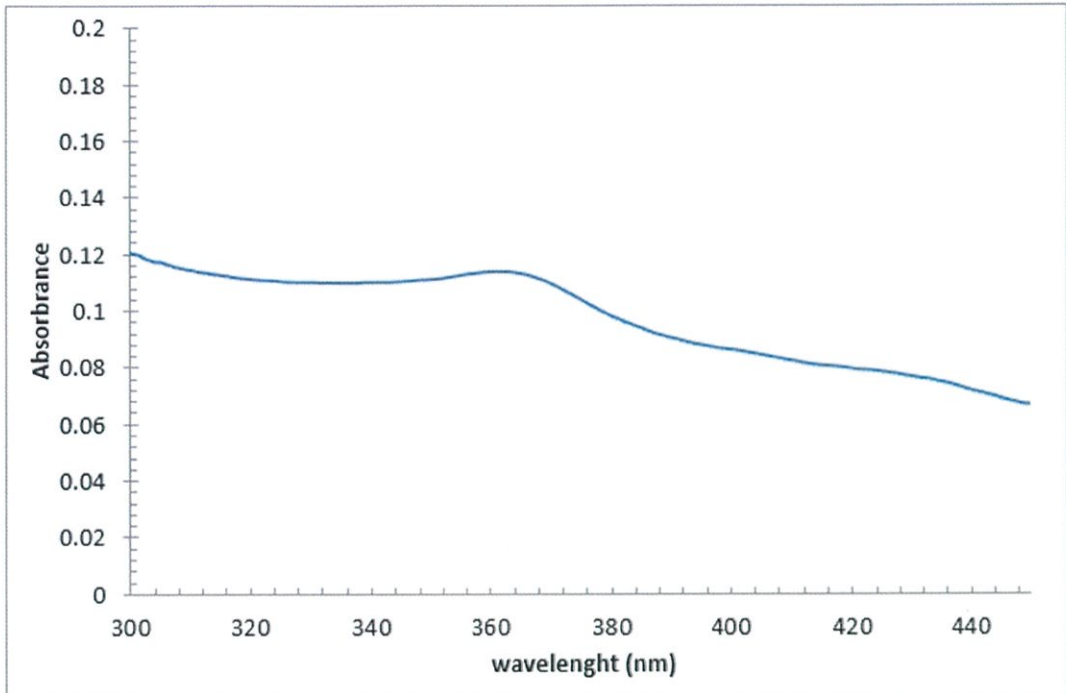
รูปที่ 7 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงชั่วโมงที่ 6 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



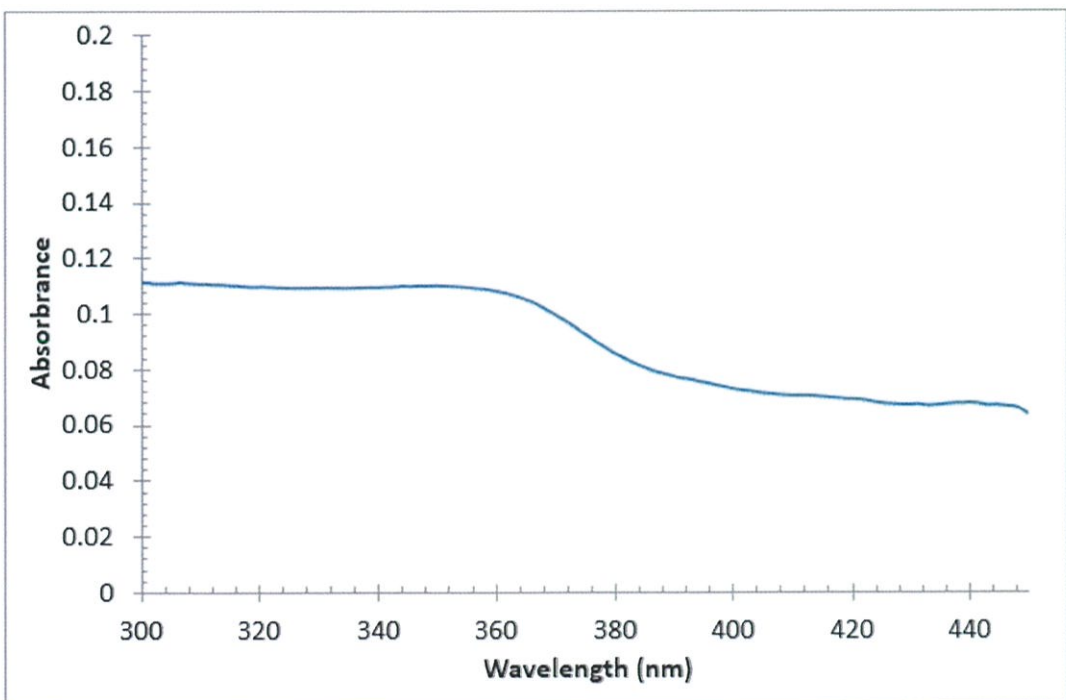
รูปที่ 8 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วงที่ 7 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



รูปที่ 9 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วงที่ 8 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง

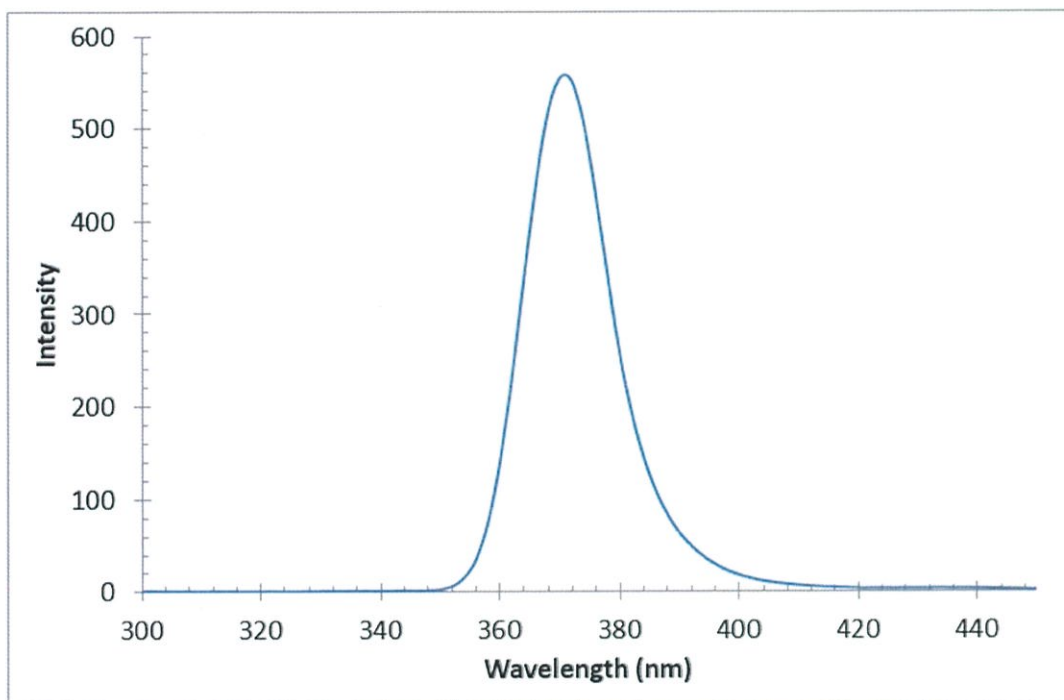


รูปที่ 10 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วง 9 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง

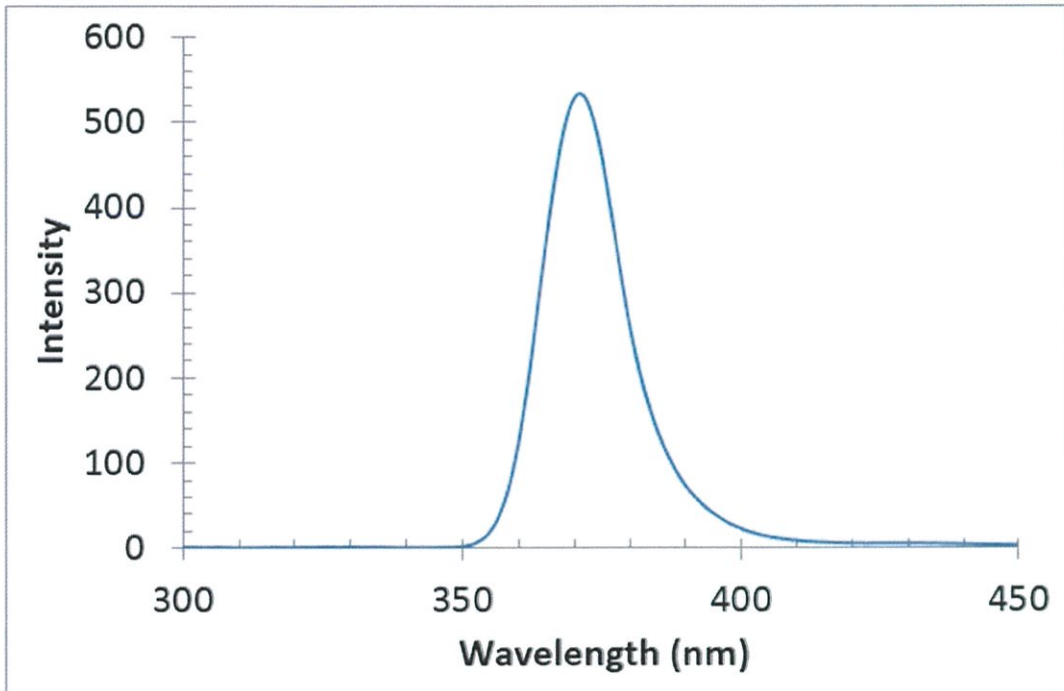


รูปที่ 11 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วง 10 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง

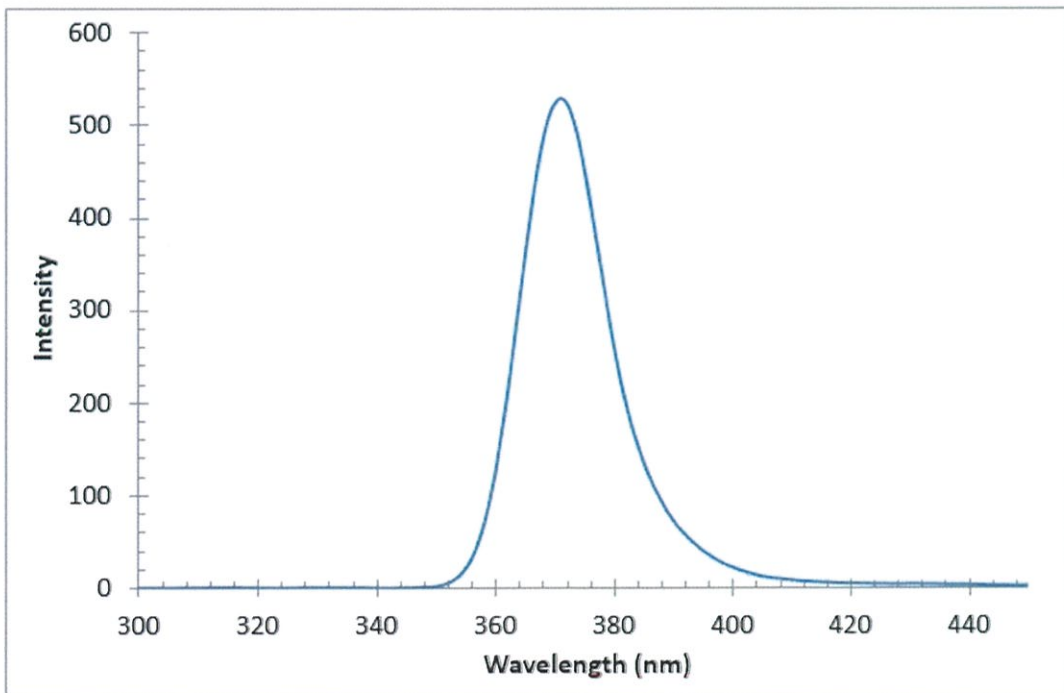
1.2 การศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงเป็นรายชั่วโมง โดยการวัดค่าการปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์



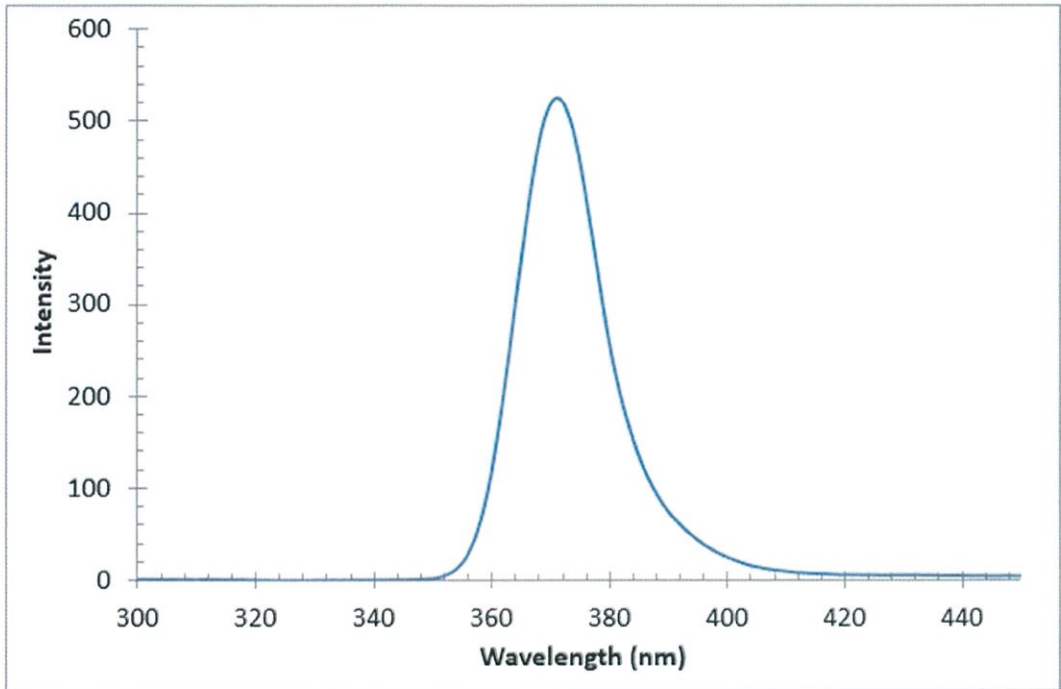
รูปที่ 12 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ก่อนรับแสงรายชั่วโมง เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



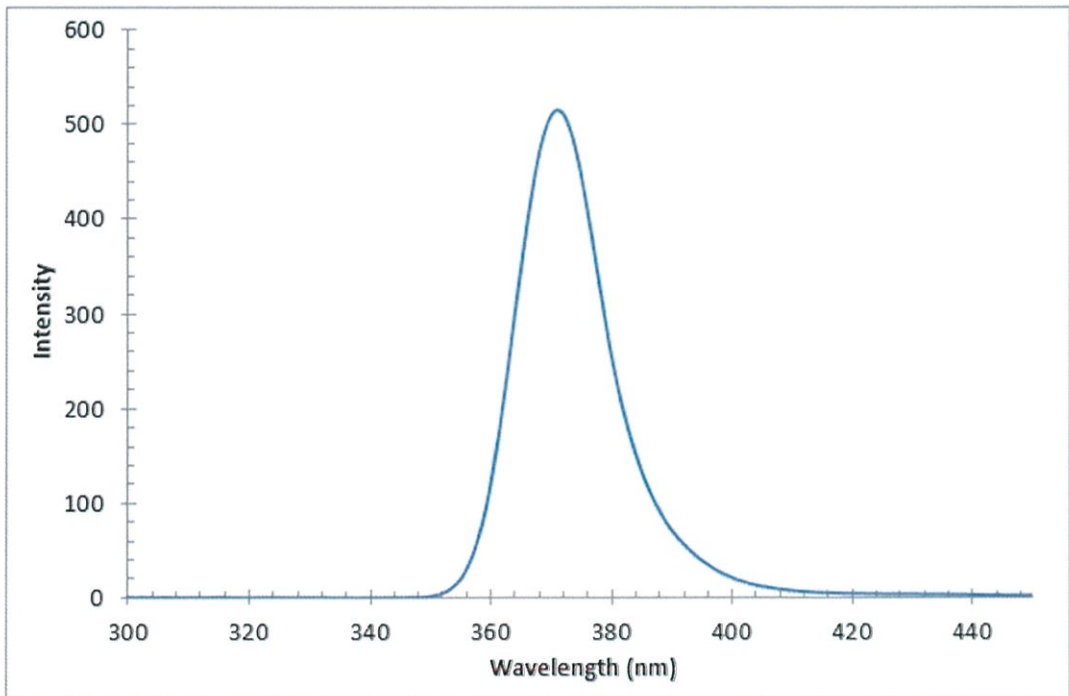
รูปที่ 13 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วง 1 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



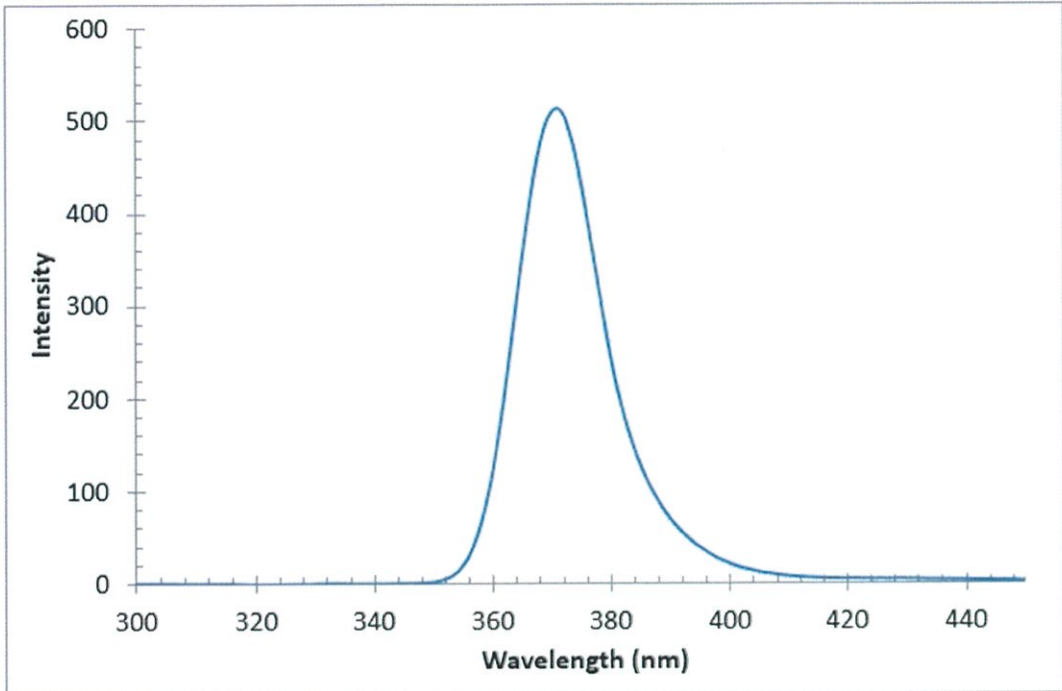
รูปที่ 14 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วง 2 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



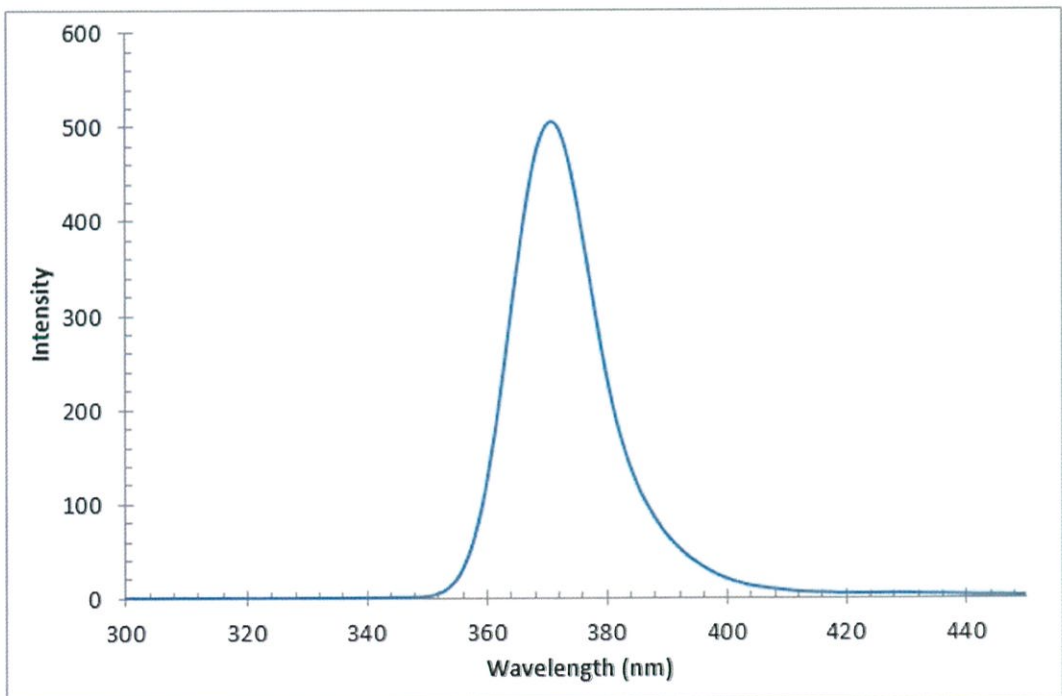
รูปที่ 15 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงชั่วโมงที่ 3 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



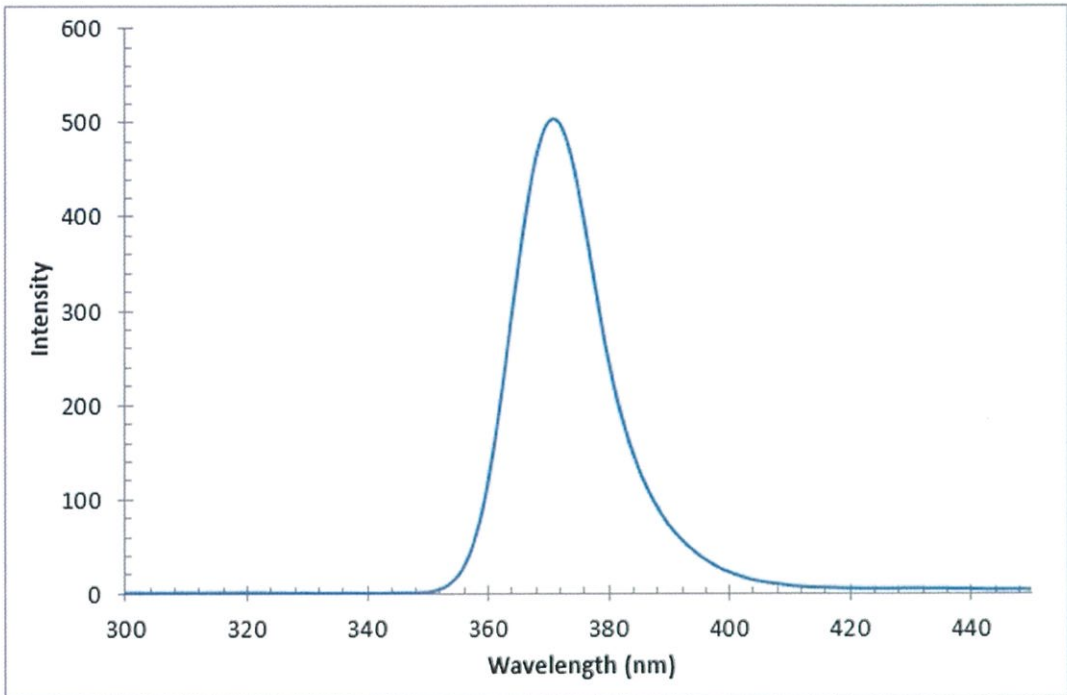
รูปที่ 16 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงชั่วโมงที่ 4 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



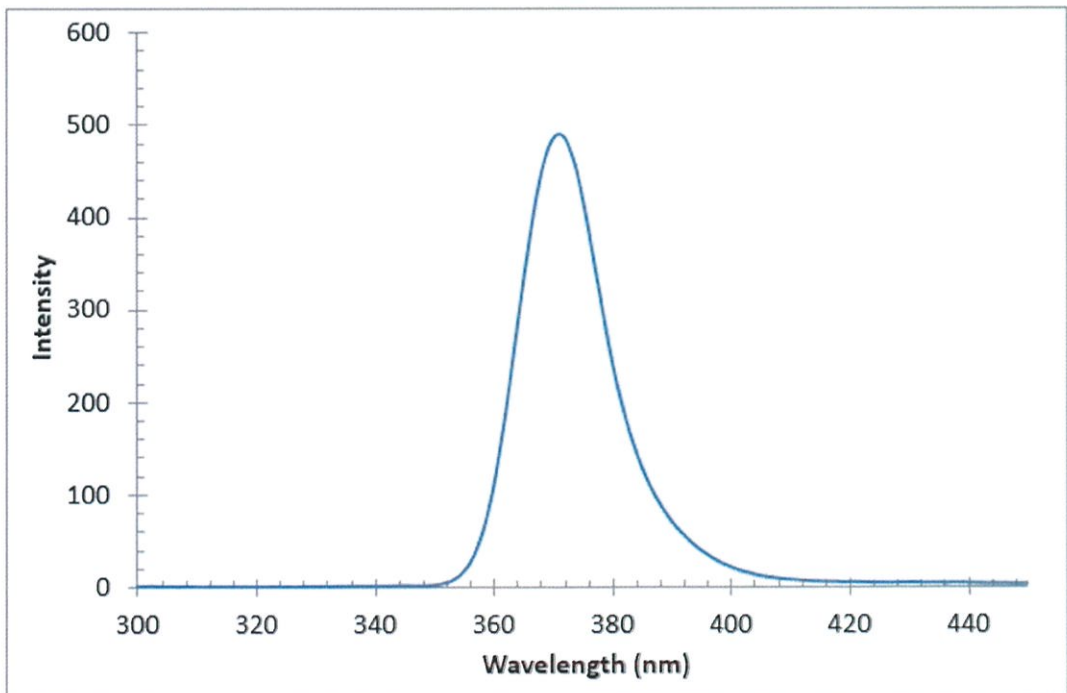
รูปที่ 17 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วง โมมที่ 5 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



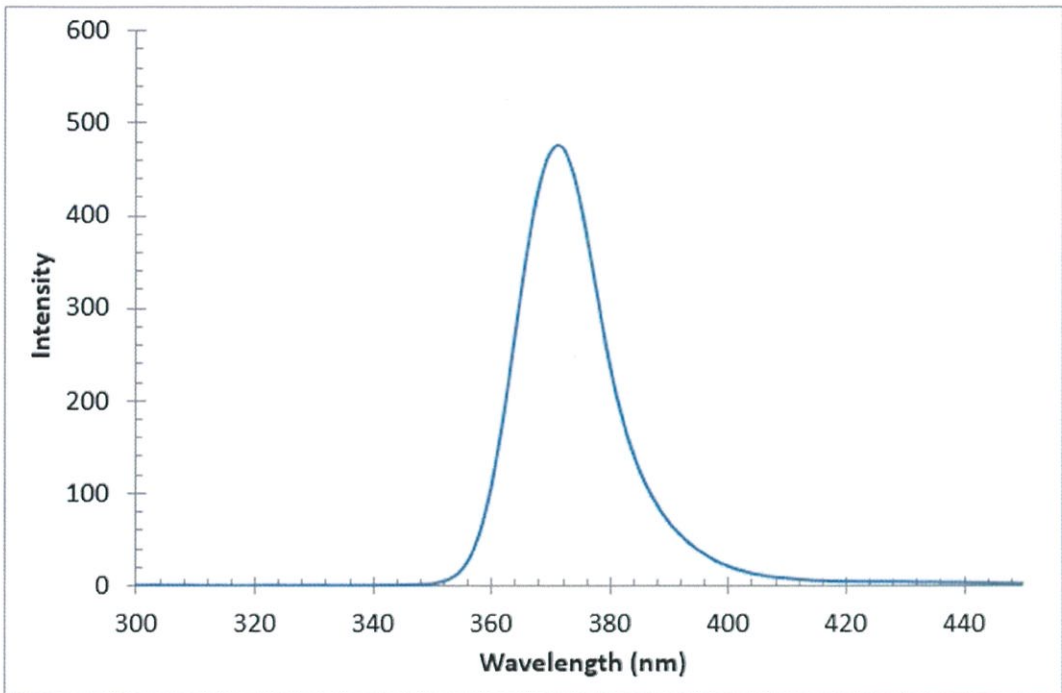
รูปที่ 18 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วง โมมที่ 6 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



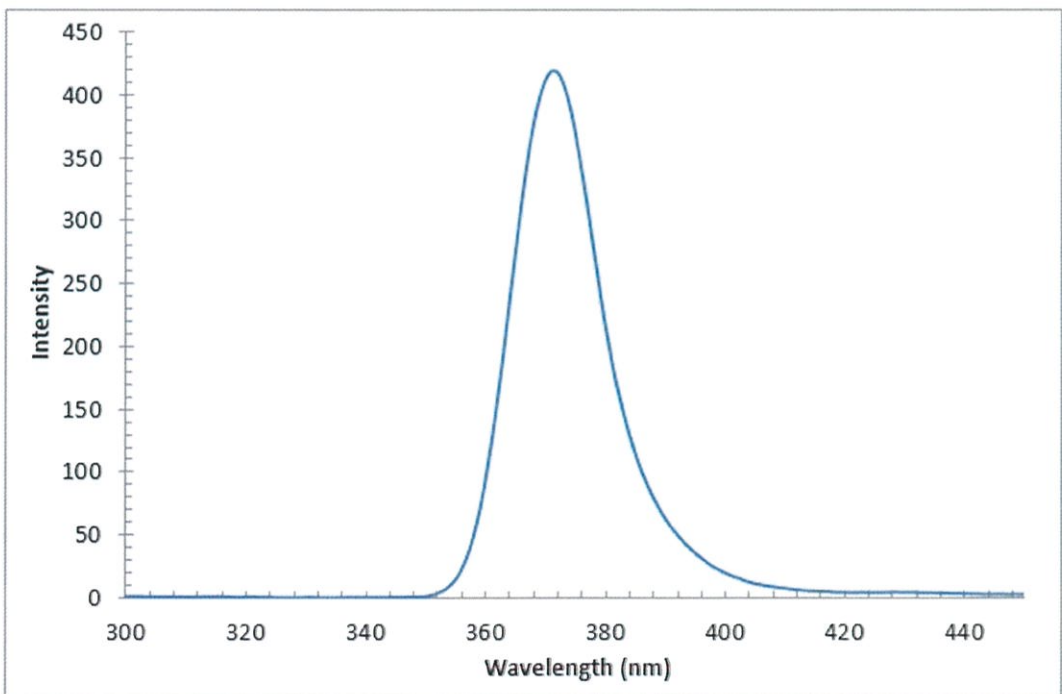
รูปที่ 19 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงชั่วโมงที่ 7 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



รูปที่ 20 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงชั่วโมงที่ 8 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



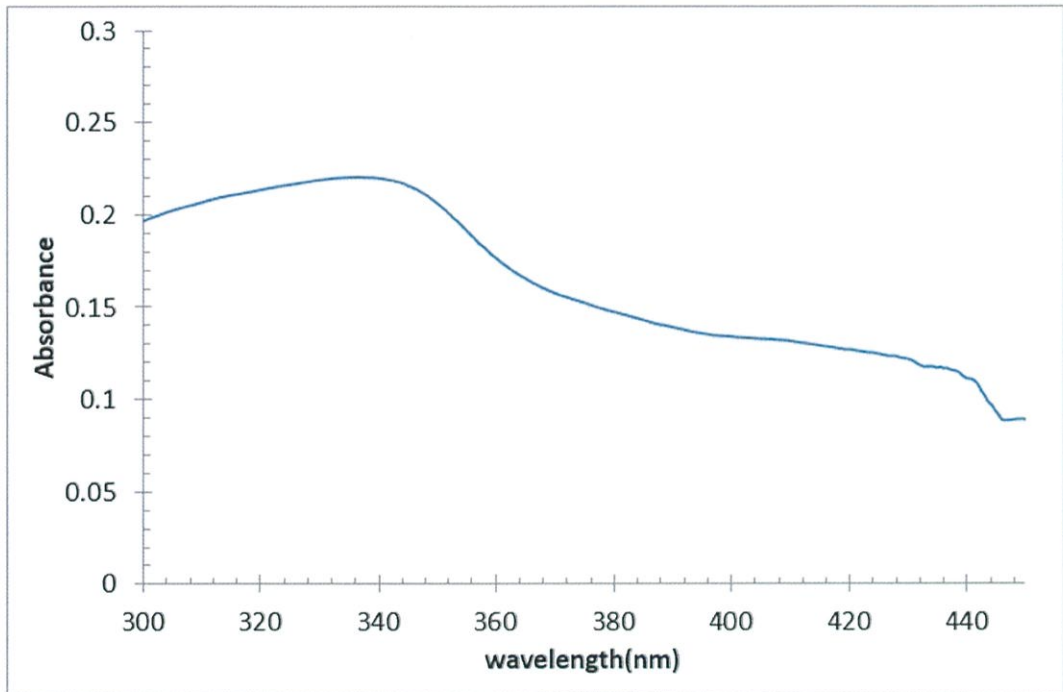
รูปที่ 21 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วงที่ 9 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง



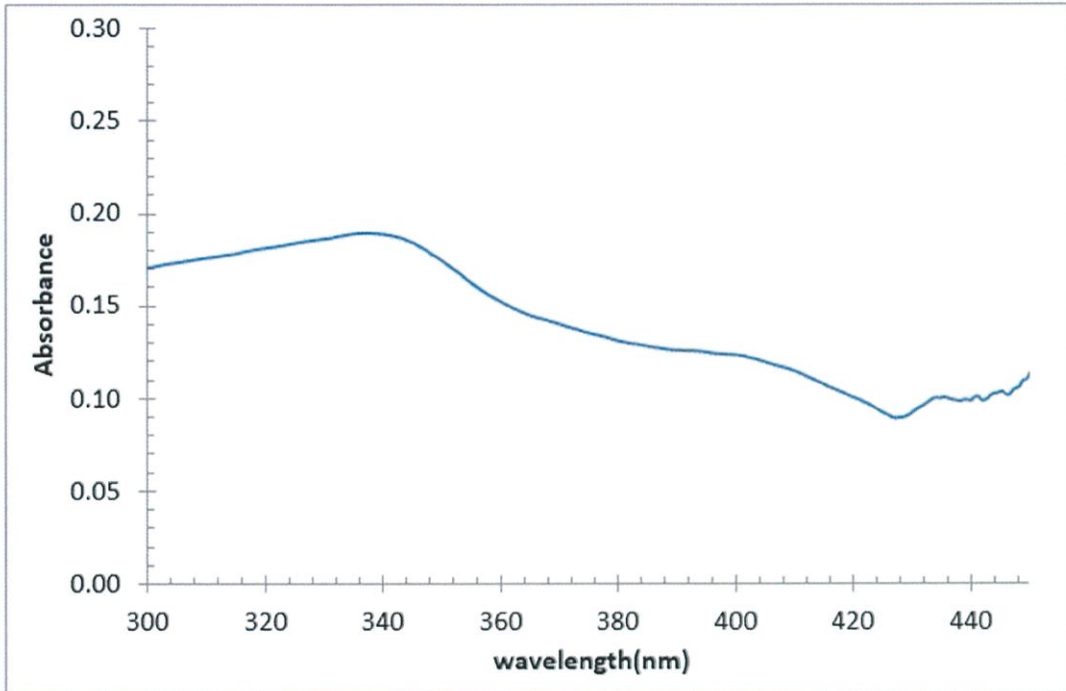
รูปที่ 22 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงช่วงที่ 10 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายชั่วโมง

2 การเสื่อมสภาพของฟิล์มเมื่อได้รับแสงเป็นรายวัน

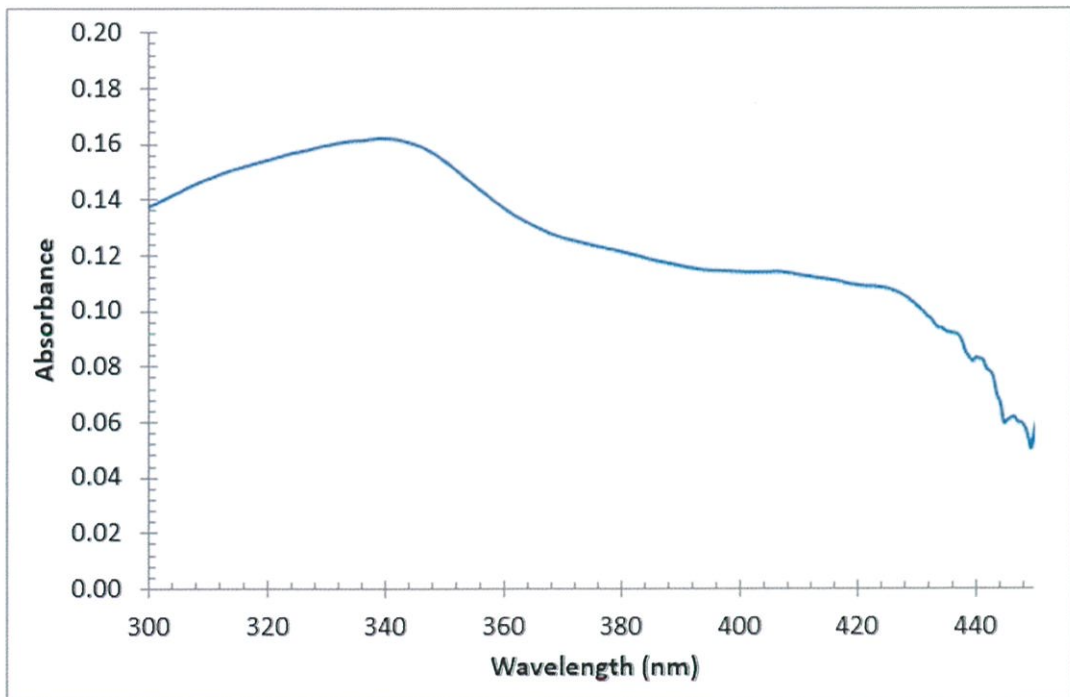
2.1 การศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงเป็นรายวัน โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์



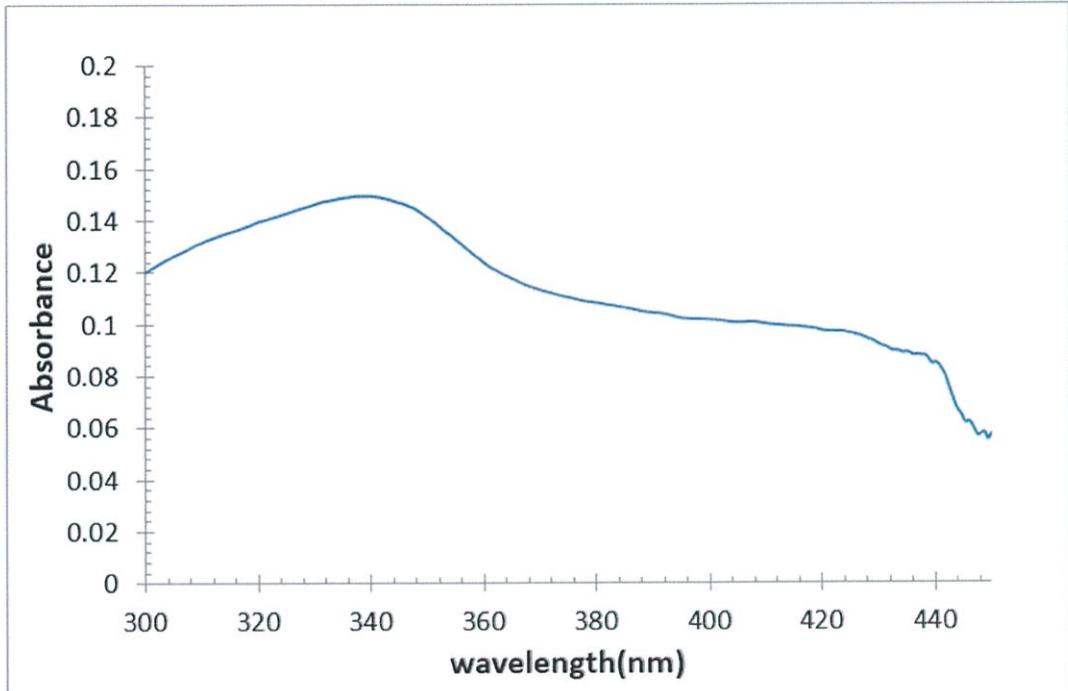
รูปที่ 23 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อก่อนได้รับแสง เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



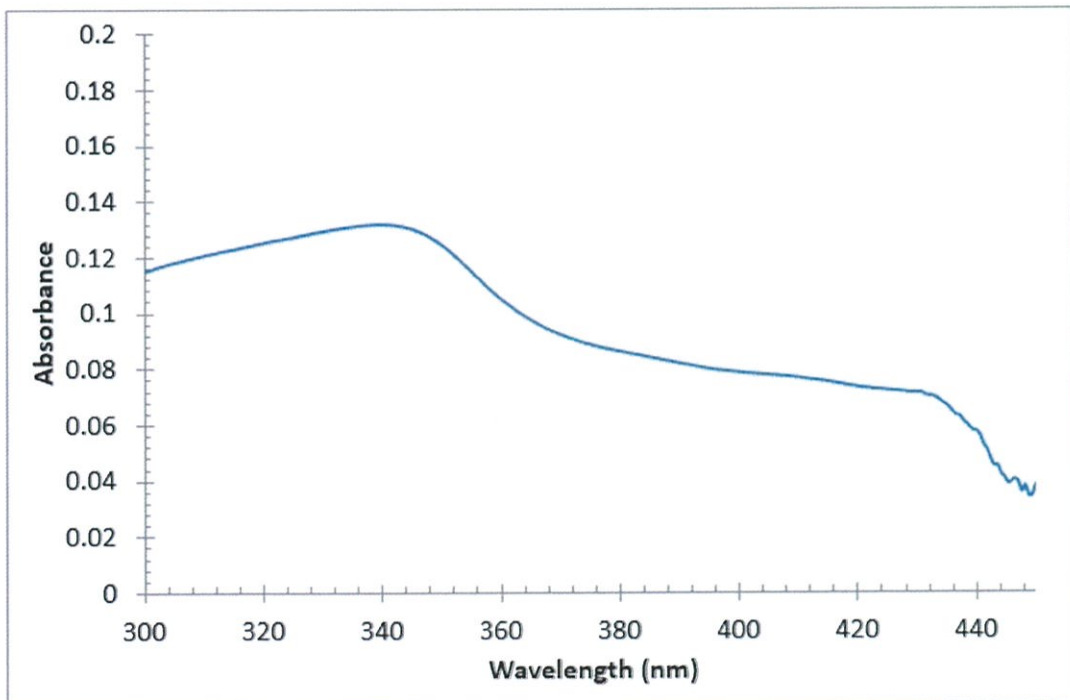
รูปที่ 24 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 1 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



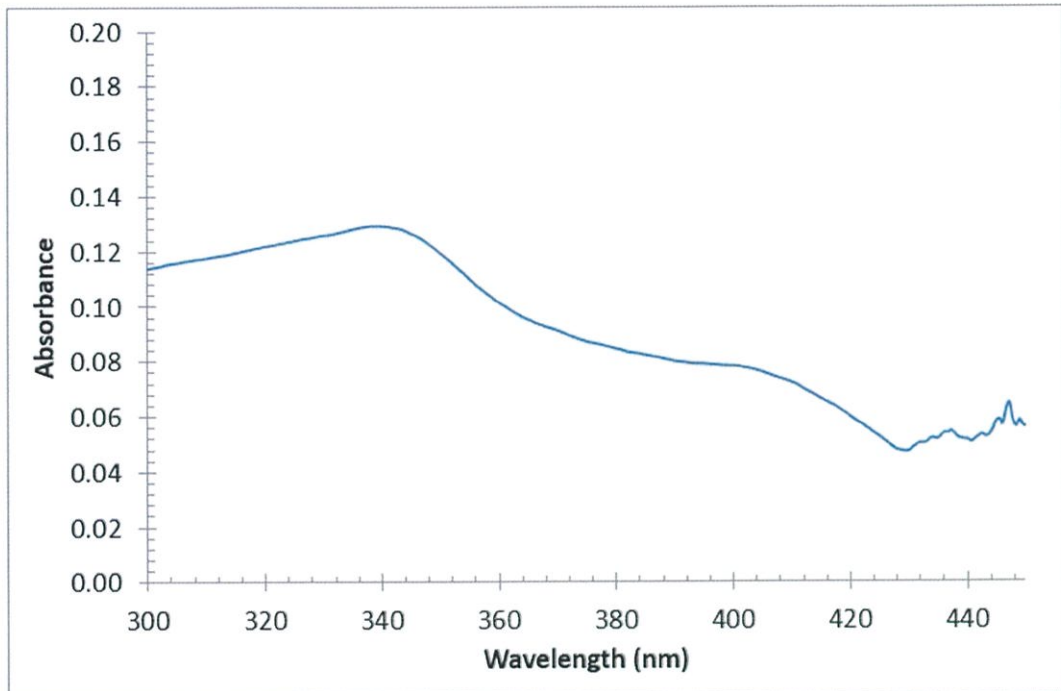
รูปที่ 25 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 2 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



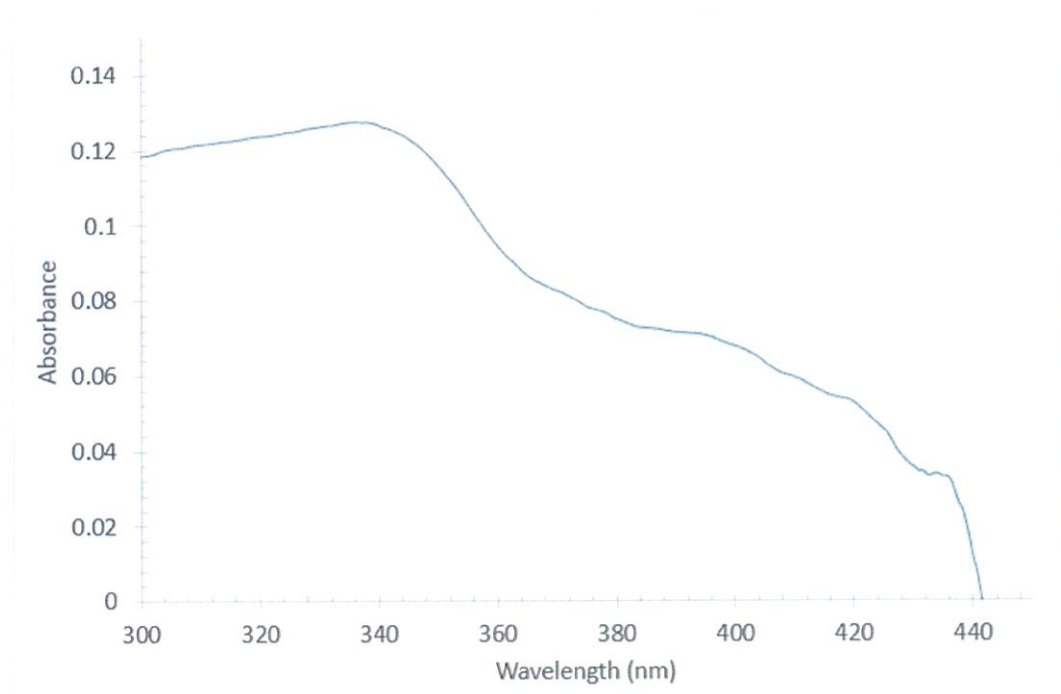
รูปที่ 26 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 3 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



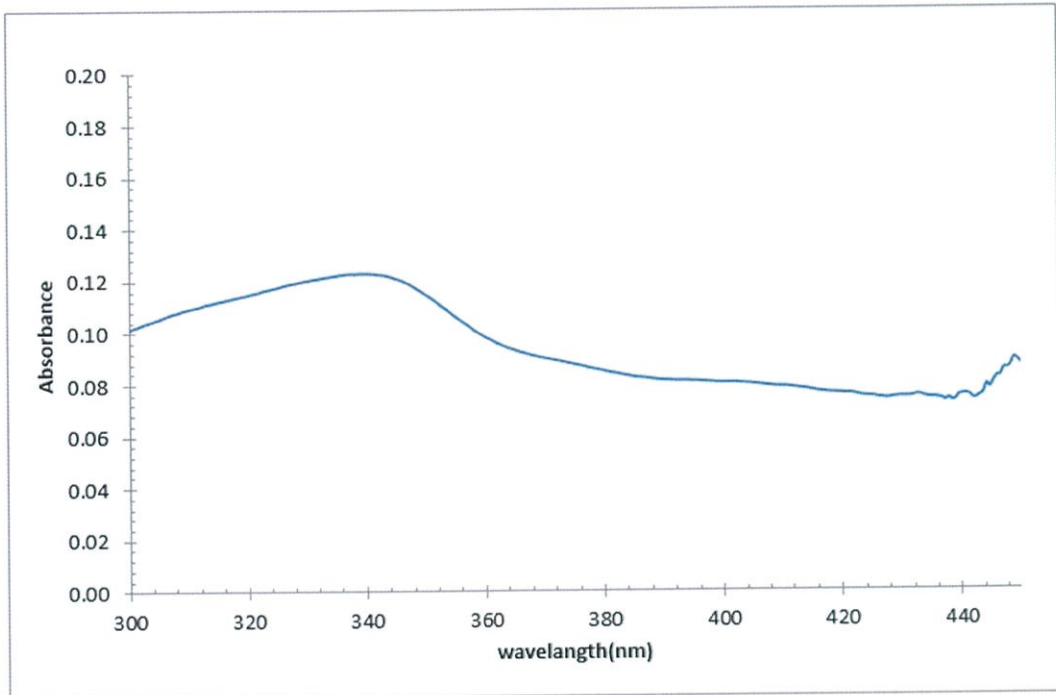
รูปที่ 27 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 4 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



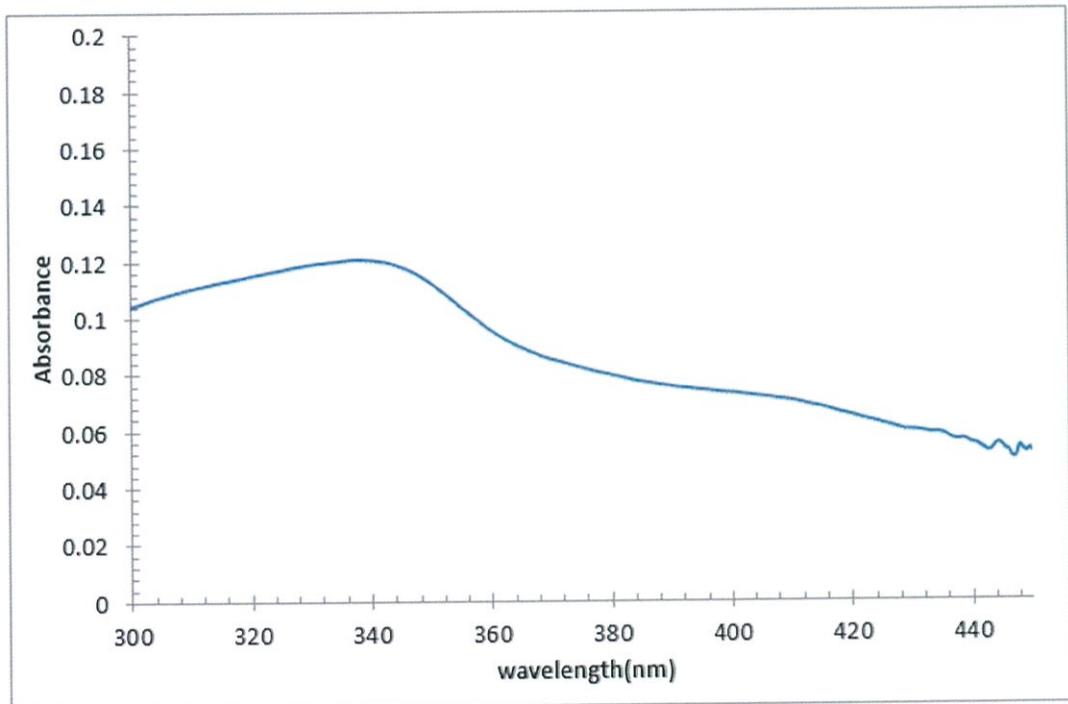
รูปที่ 28 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 5 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



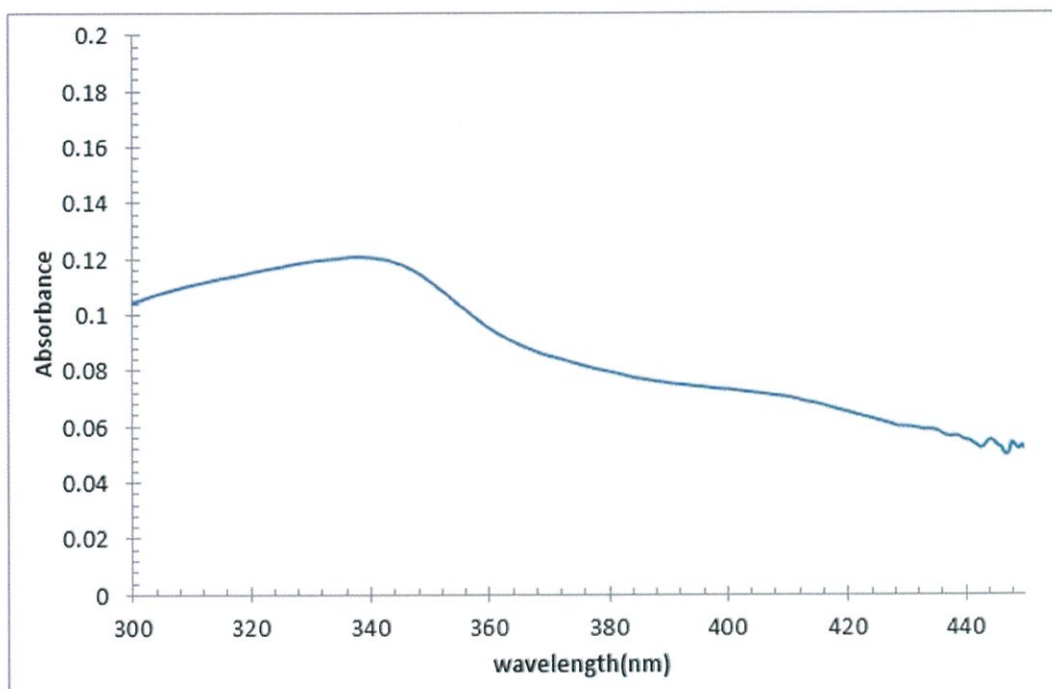
รูปที่ 29 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 6 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



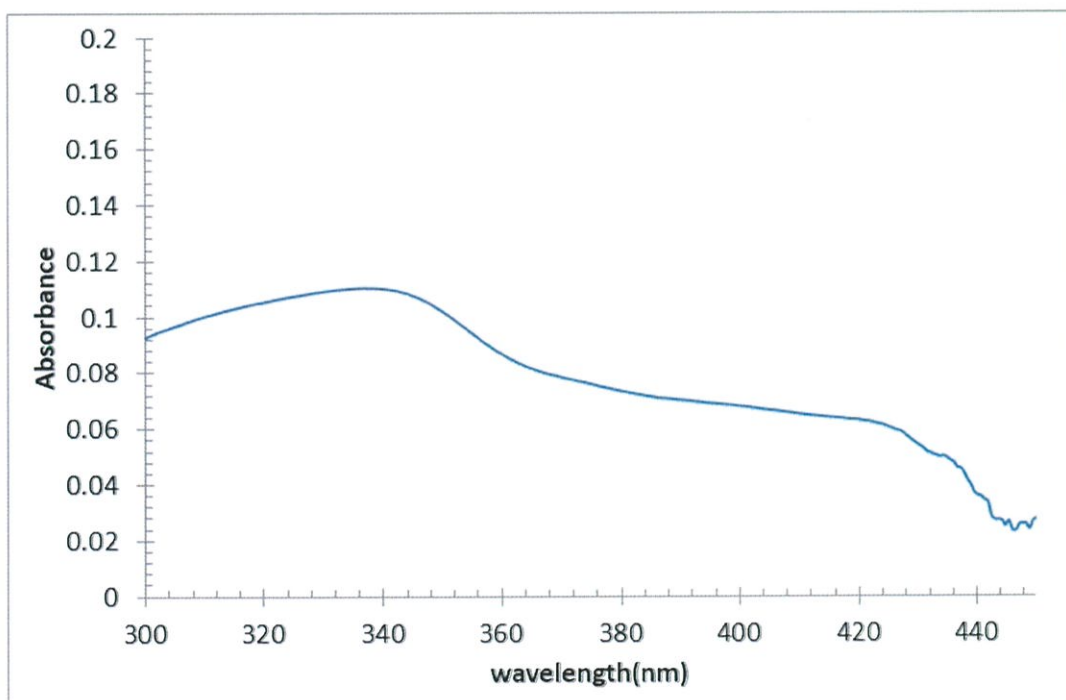
รูปที่ 30 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 7 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



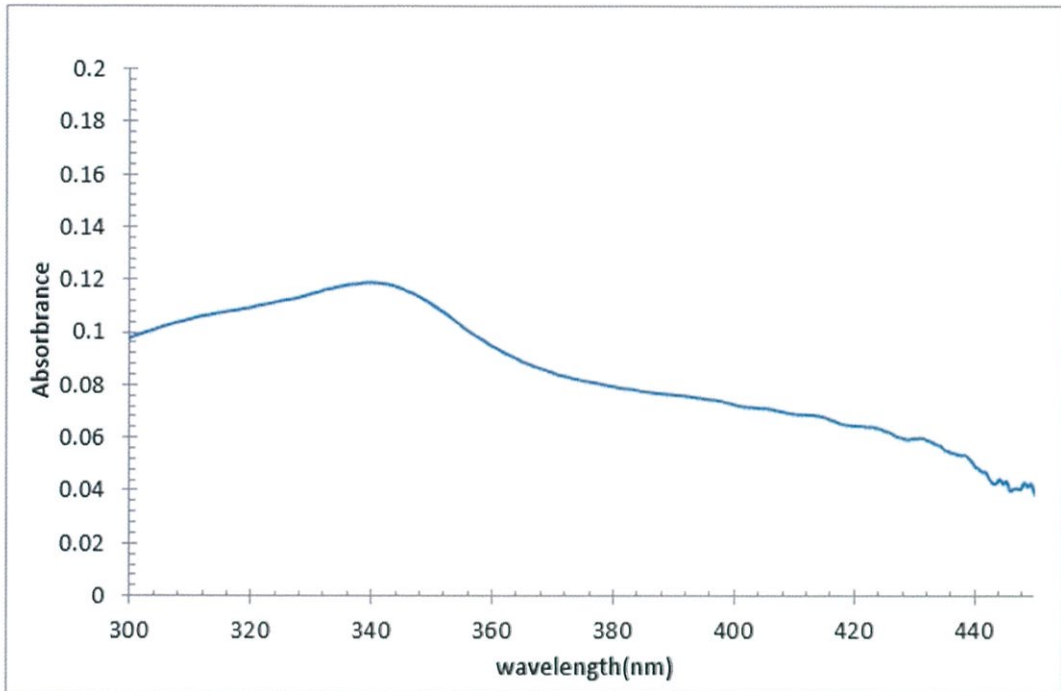
รูปที่ 31 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 8 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



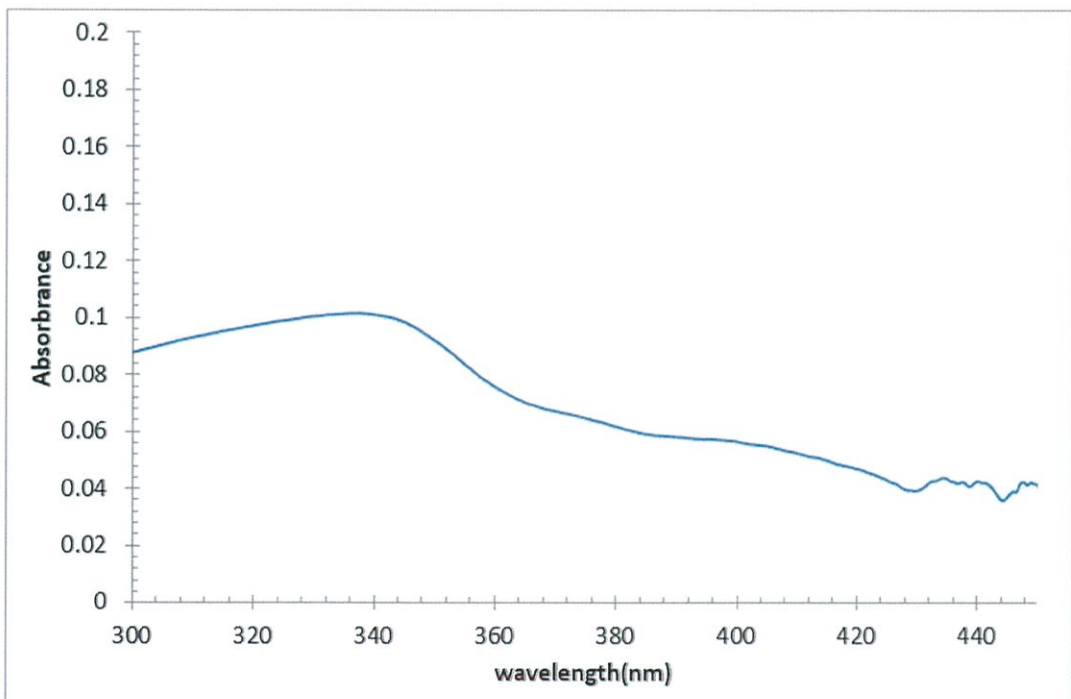
รูปที่ 32 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 9 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



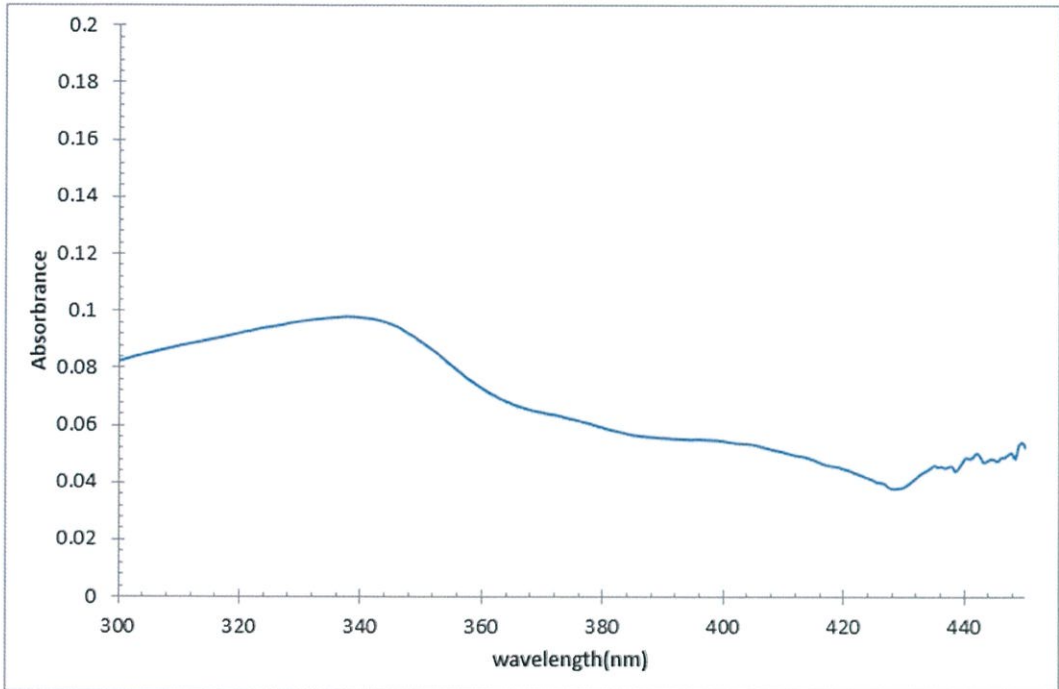
รูปที่ 33 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 10 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



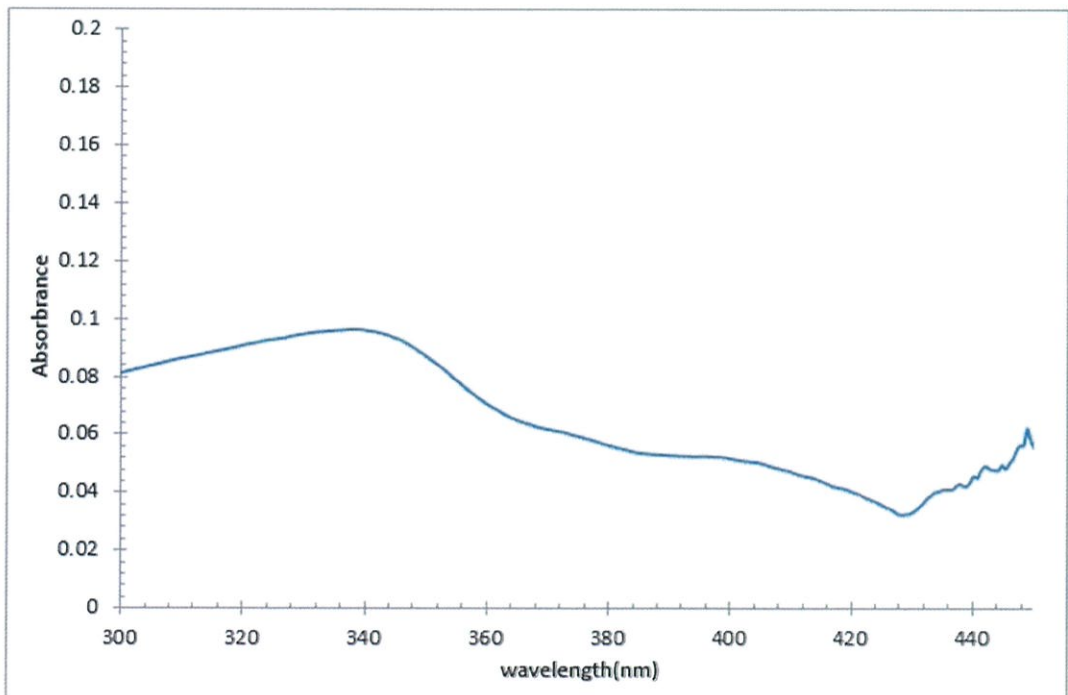
รูปที่ 34 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 11 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



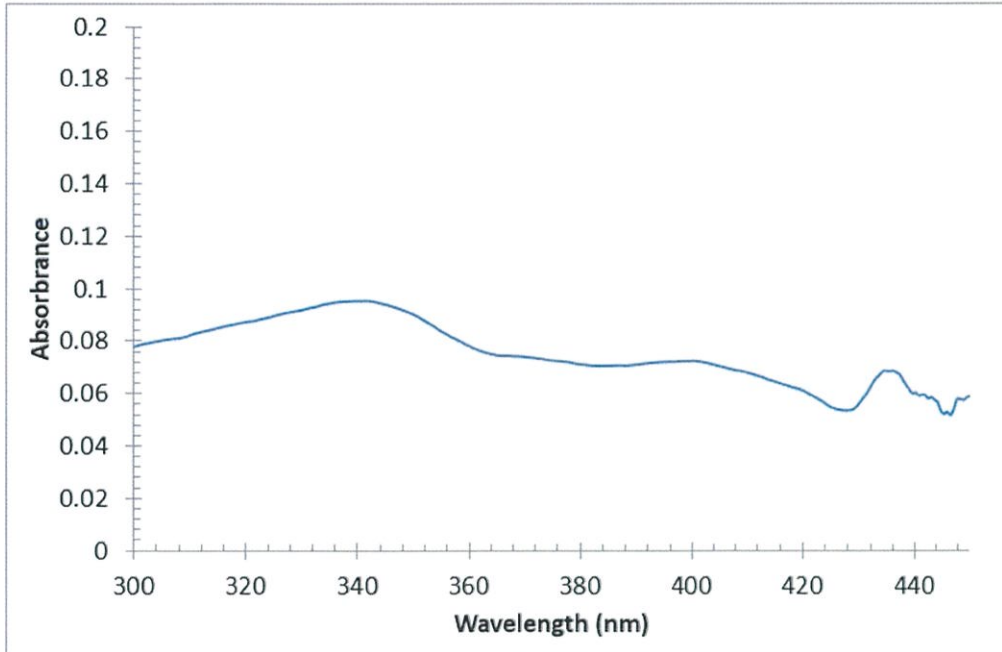
รูปที่ 35 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 12 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



รูปที่ 36 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 13 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน

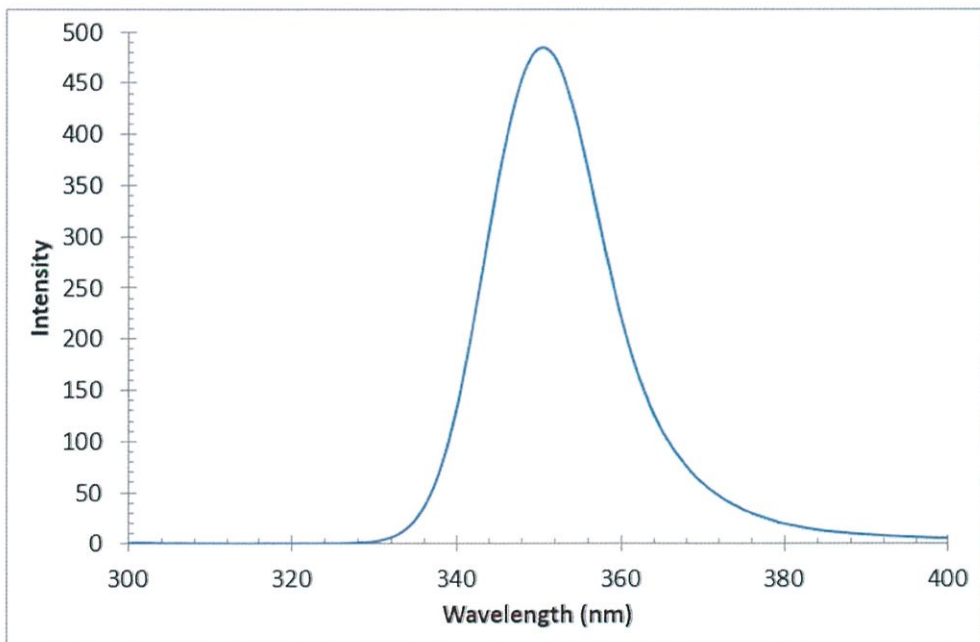


รูปที่ 37 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 14 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน

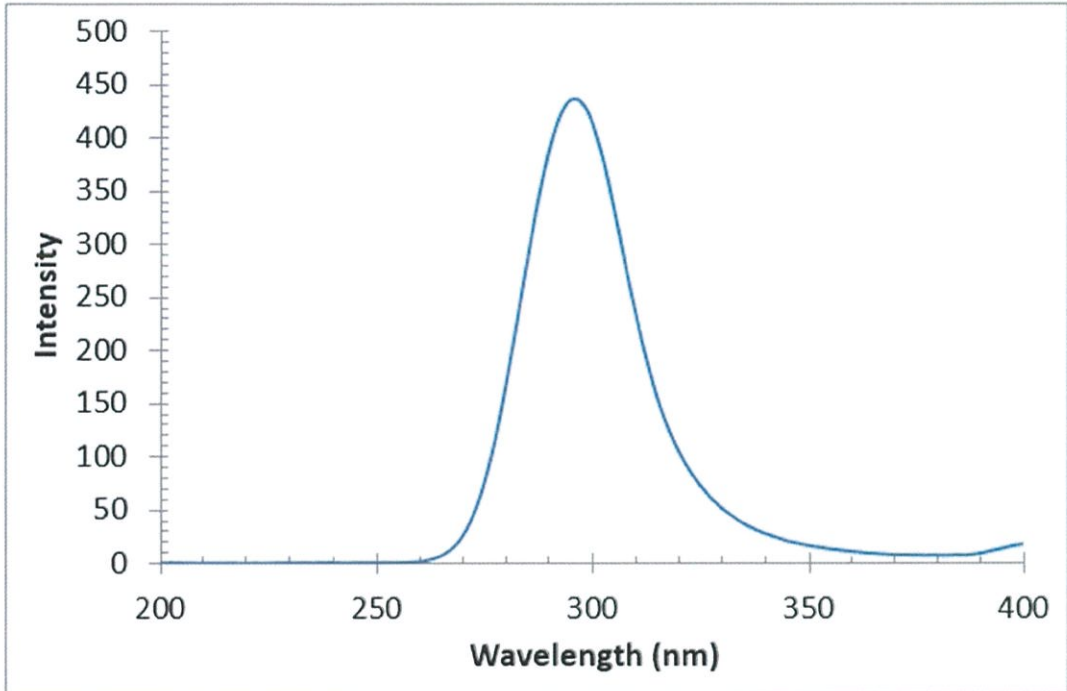


รูปที่ 38 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงวันที่ 15 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน

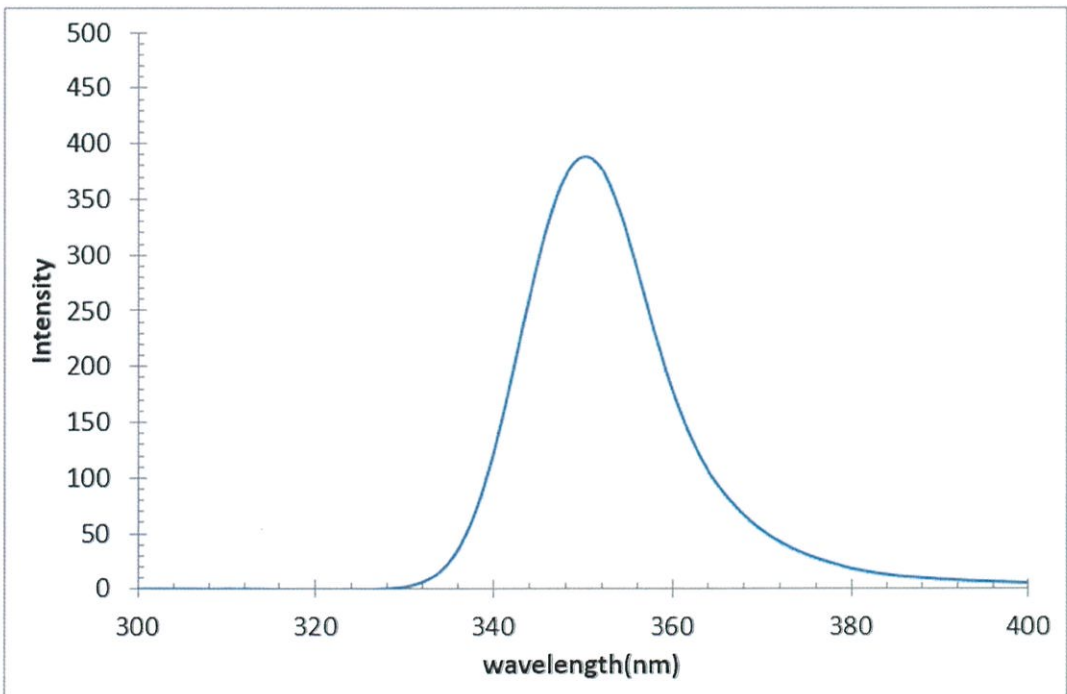
2.1 การศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อได้รับแสงเป็นรายวัน โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์



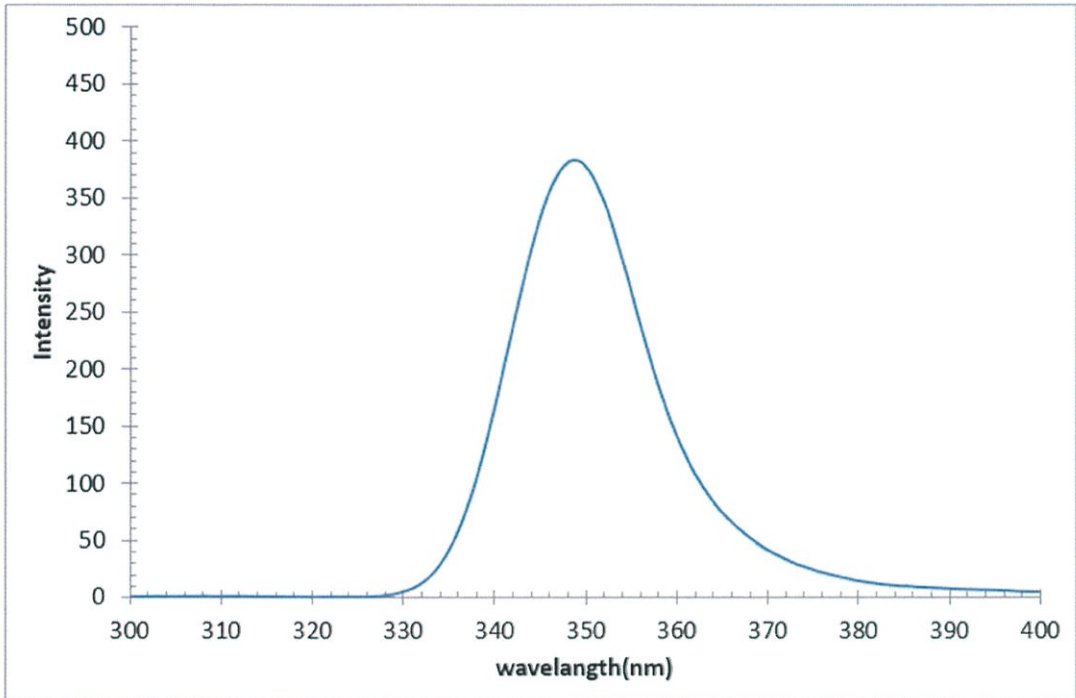
รูปที่ 39 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ก่อนได้รับแสงรายวัน เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



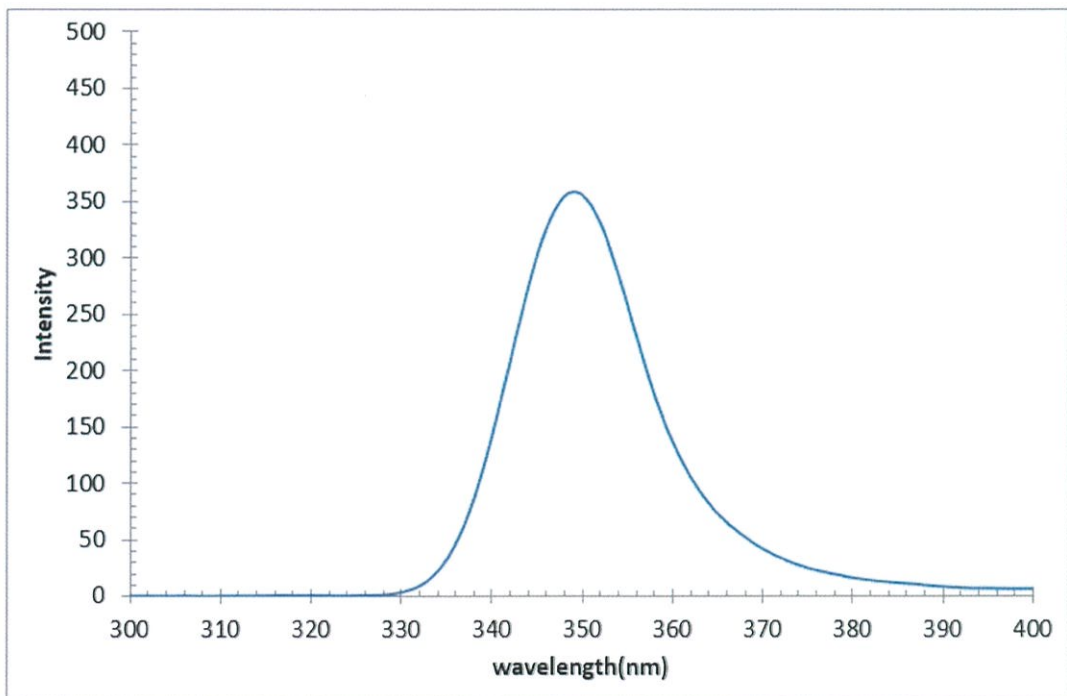
รูปที่ 40 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 1 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



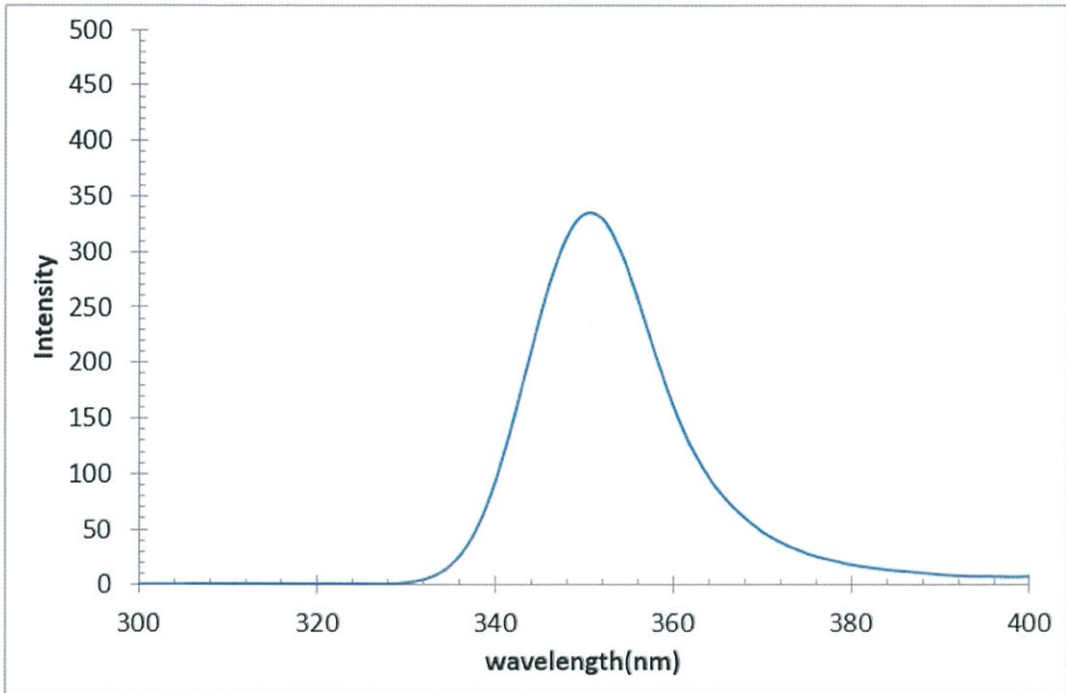
รูปที่ 41 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 2 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



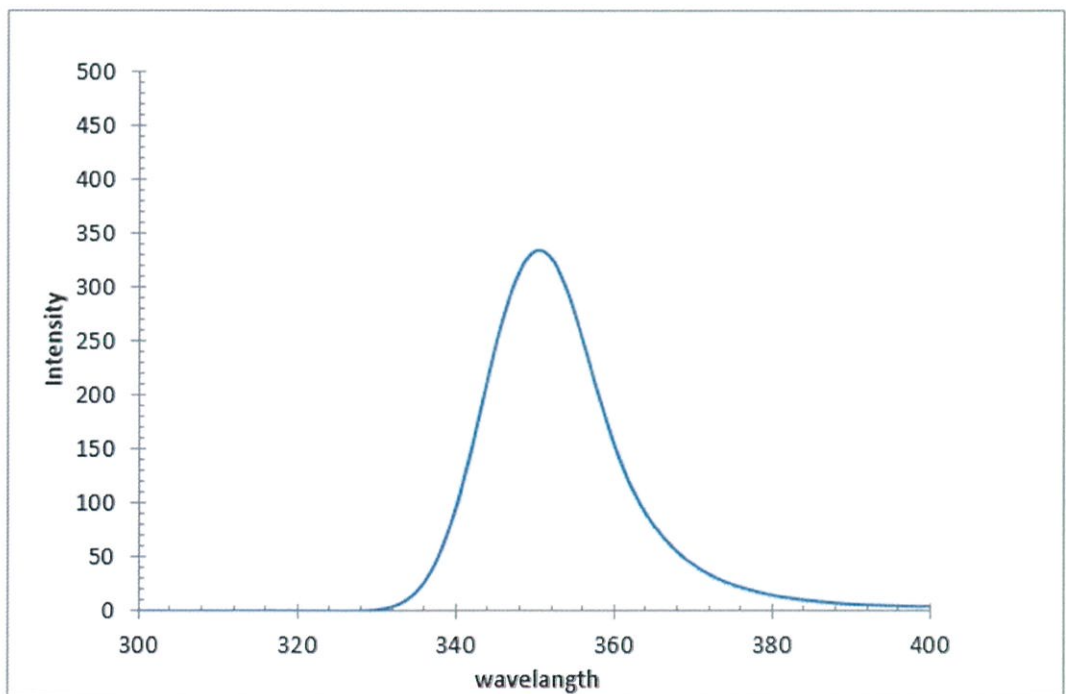
รูปที่ 42 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 3 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



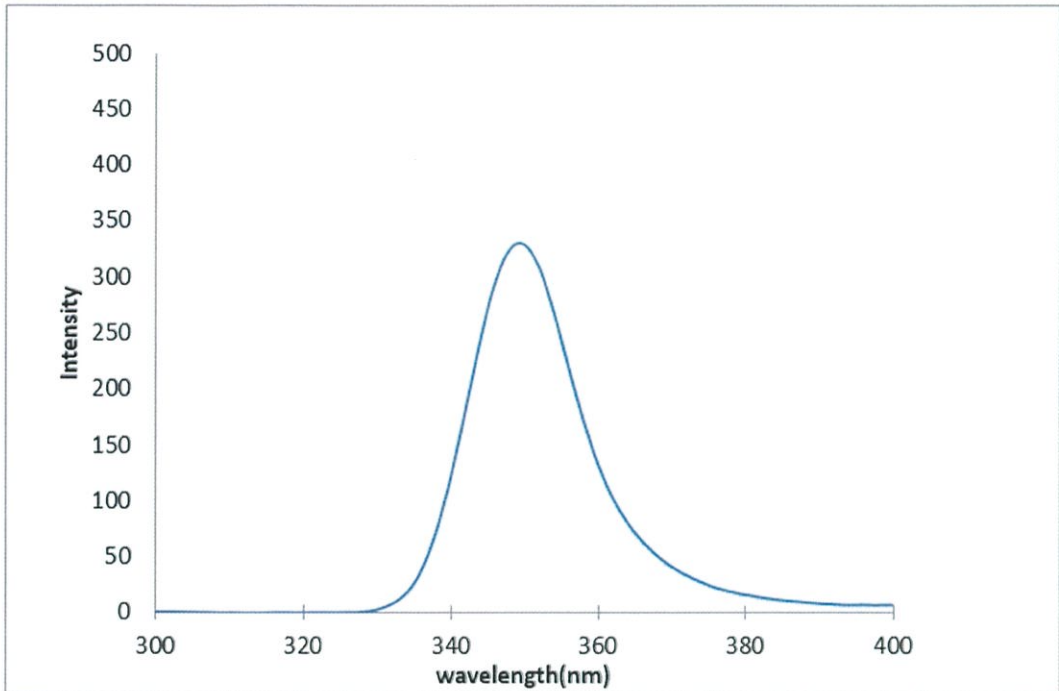
รูปที่ 43 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 4 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



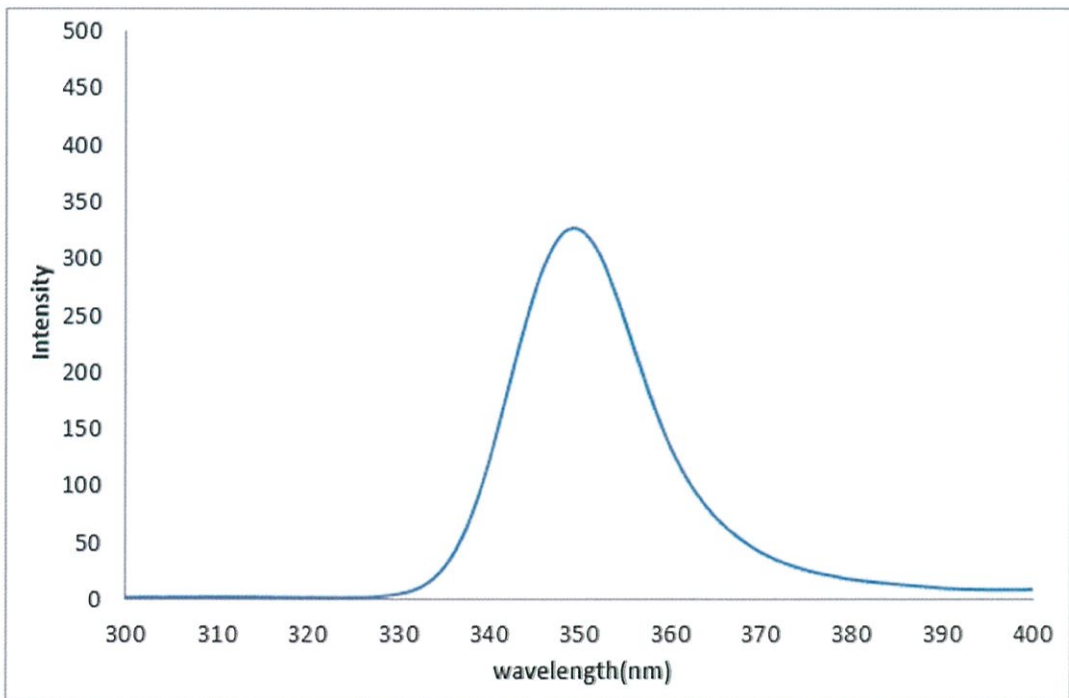
รูปที่ 44 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 5 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



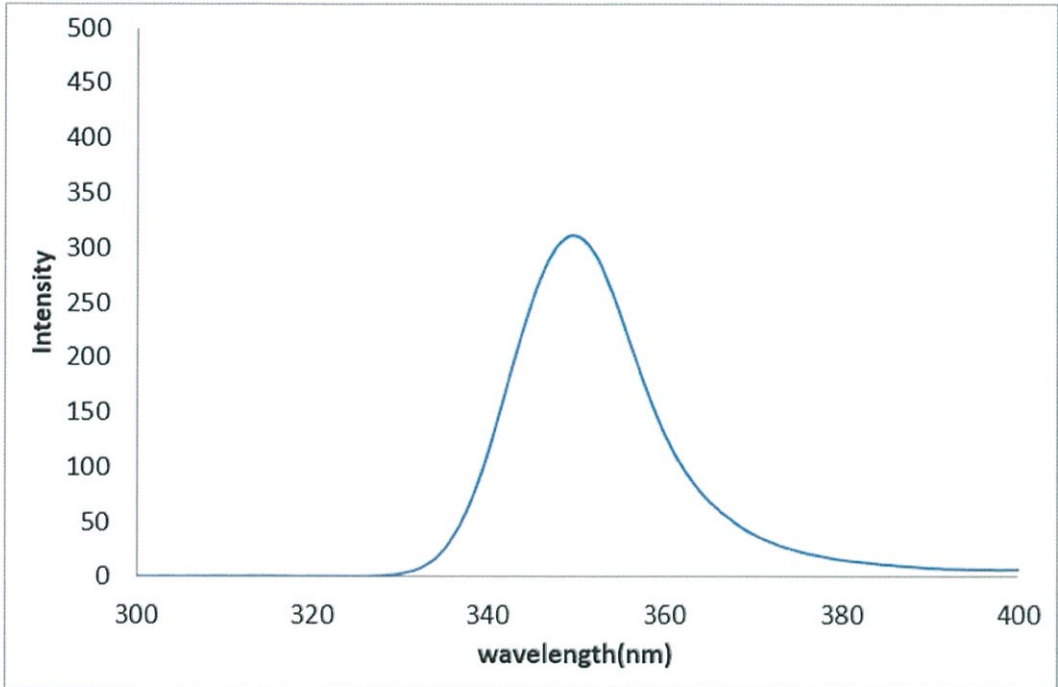
รูปที่ 45 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 6 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



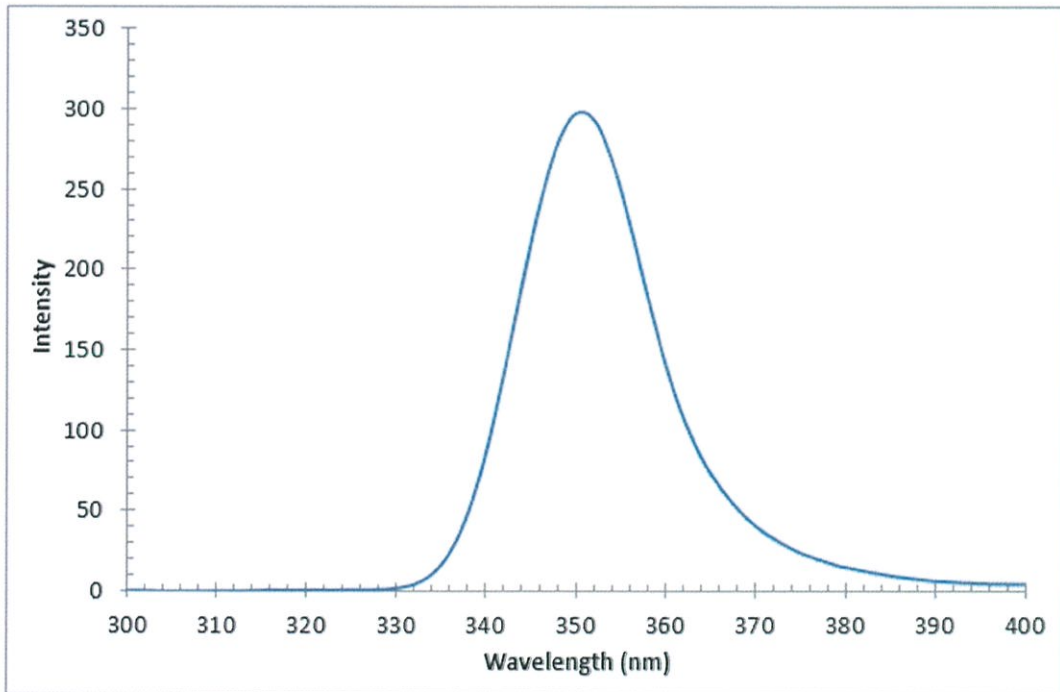
รูปที่ 46 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 7 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



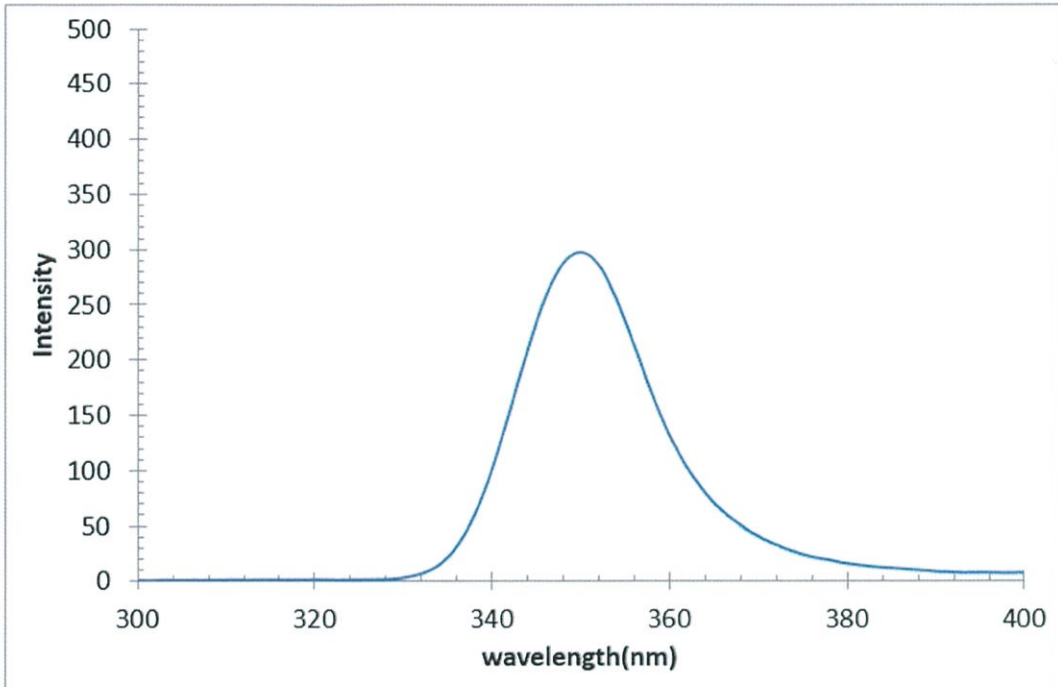
รูปที่ 47 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 8 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



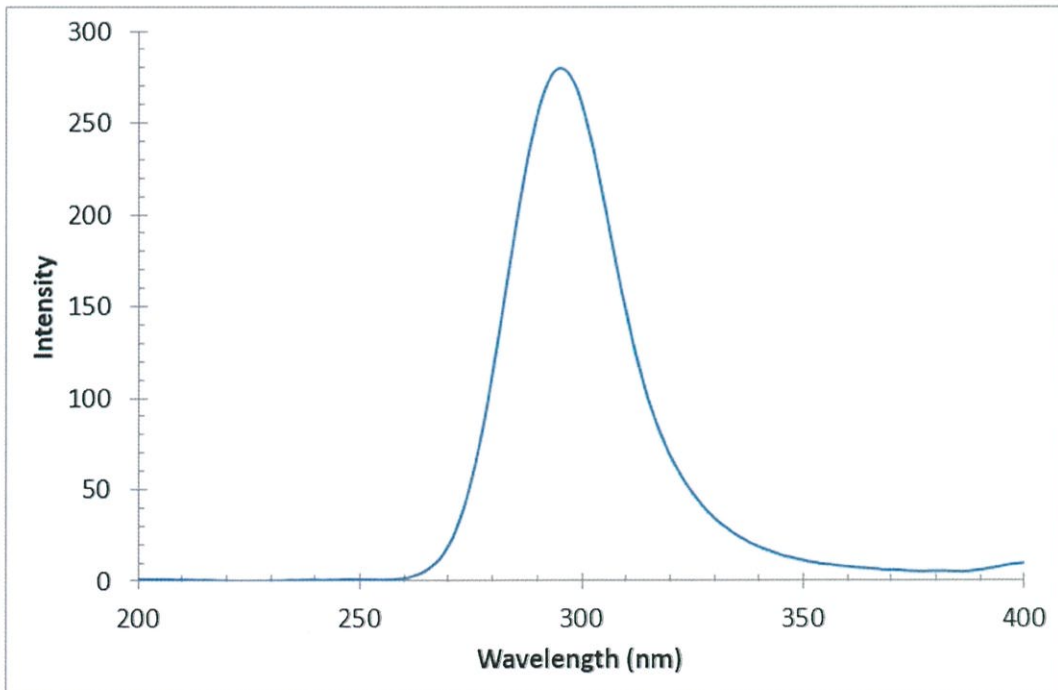
รูปที่ 48 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 9 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



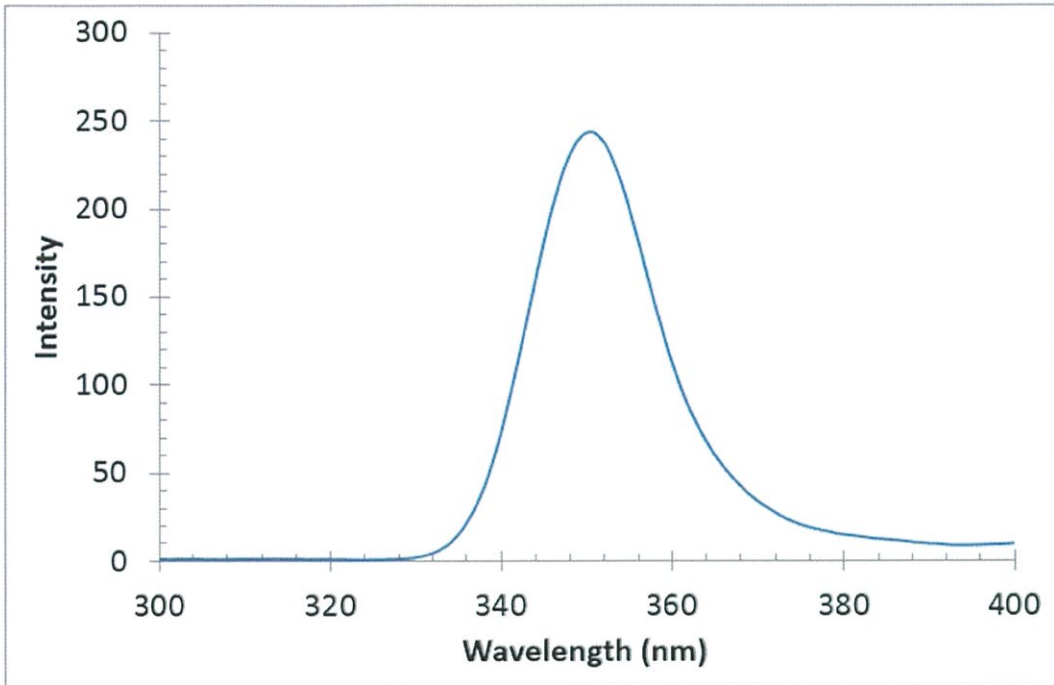
รูปที่ 49 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 10 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



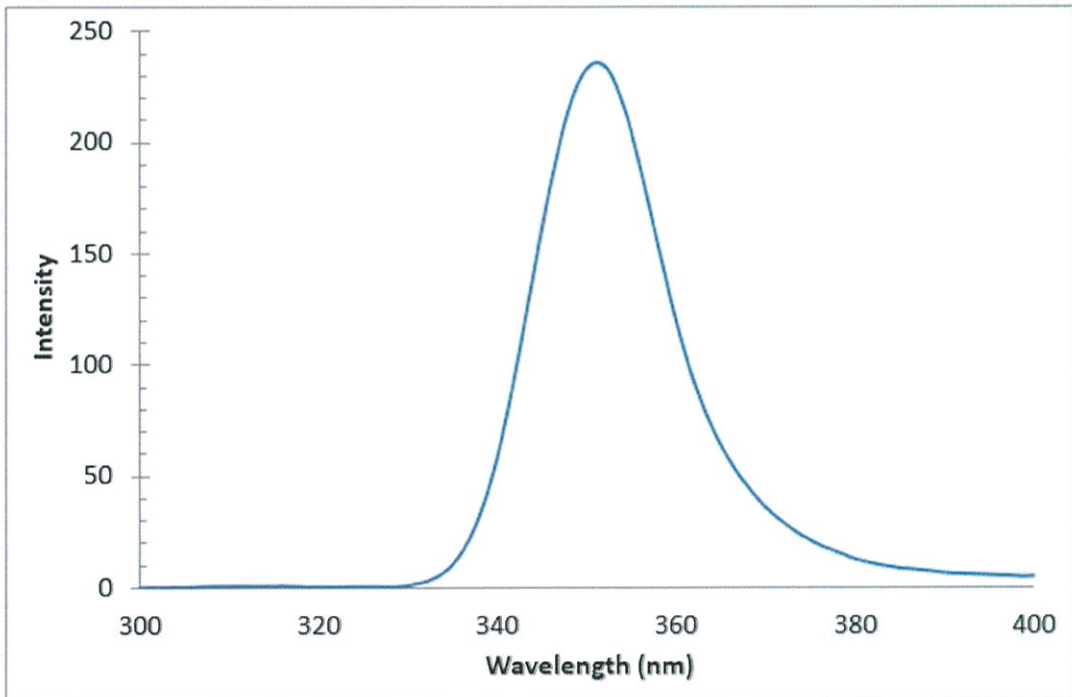
รูปที่ 50 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 11 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



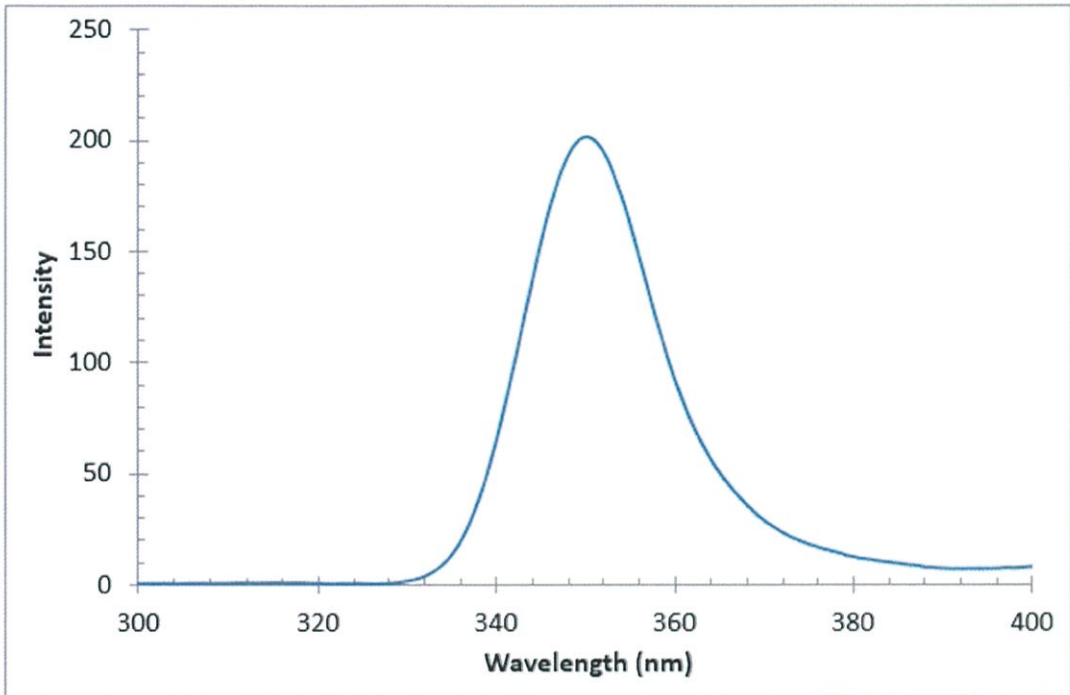
รูปที่ 51 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 12 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



รูปที่ 52 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 13 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



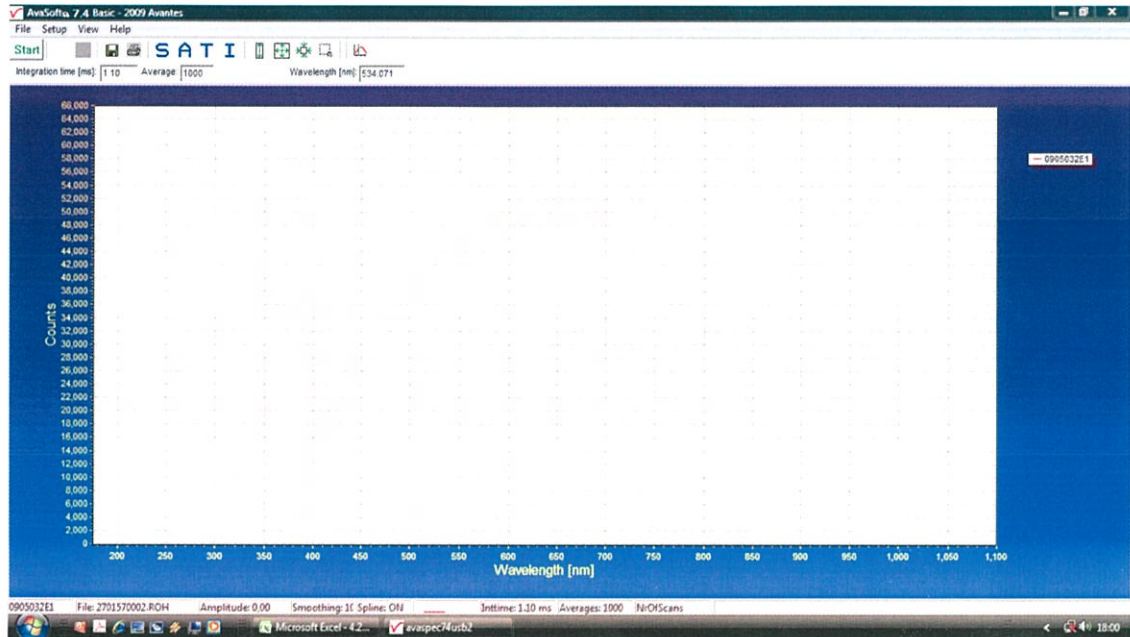
รูปที่ 53 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 14 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน



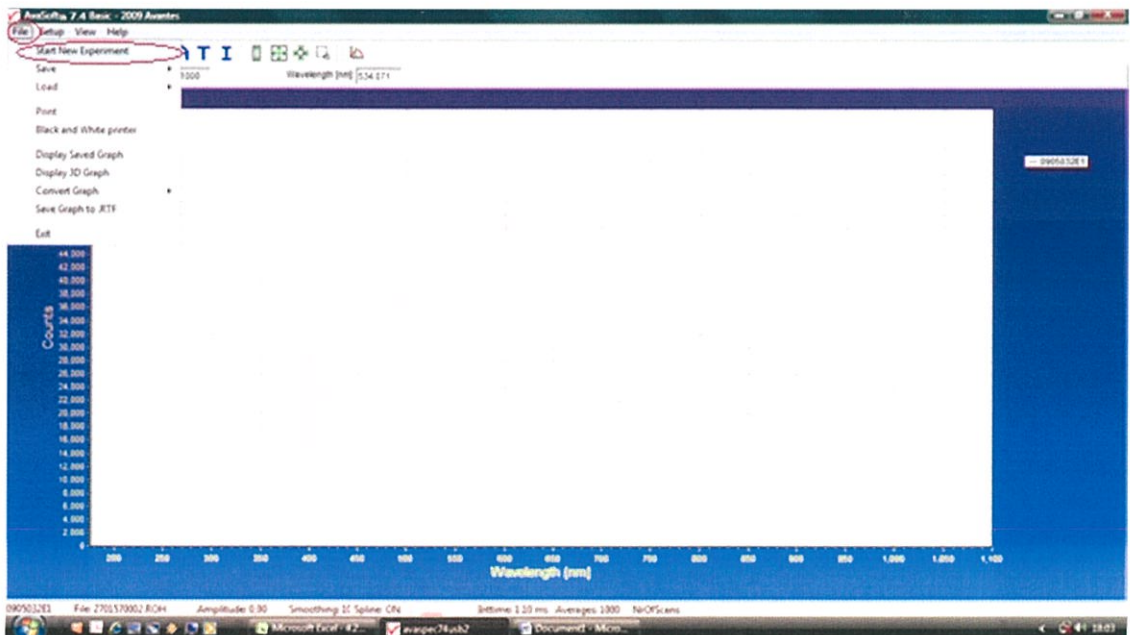
รูปที่ 54 การปลดปล่อยแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อรับแสงรายวันในวันที่ 15 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์รายวัน

การใช้โปรแกรม Avasoft

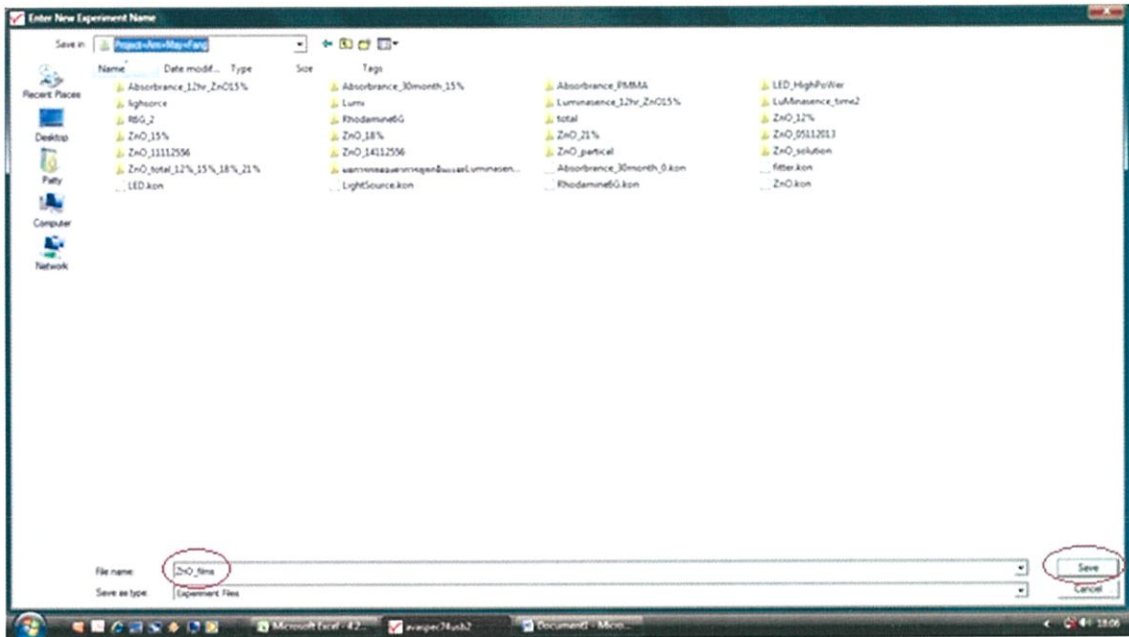
1. เปิดหน้าจอโปรแกรม Avasoft



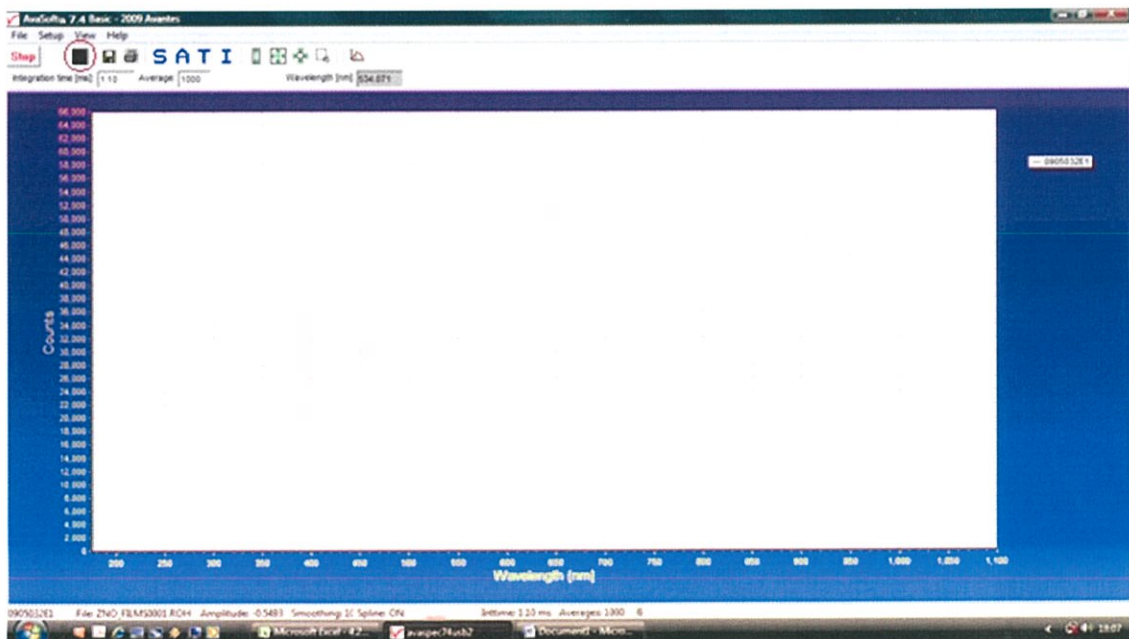
2. คลิกที่ file เลือก Start New Experiment เพื่อทำการตั้งชื่อไฟล์งาน



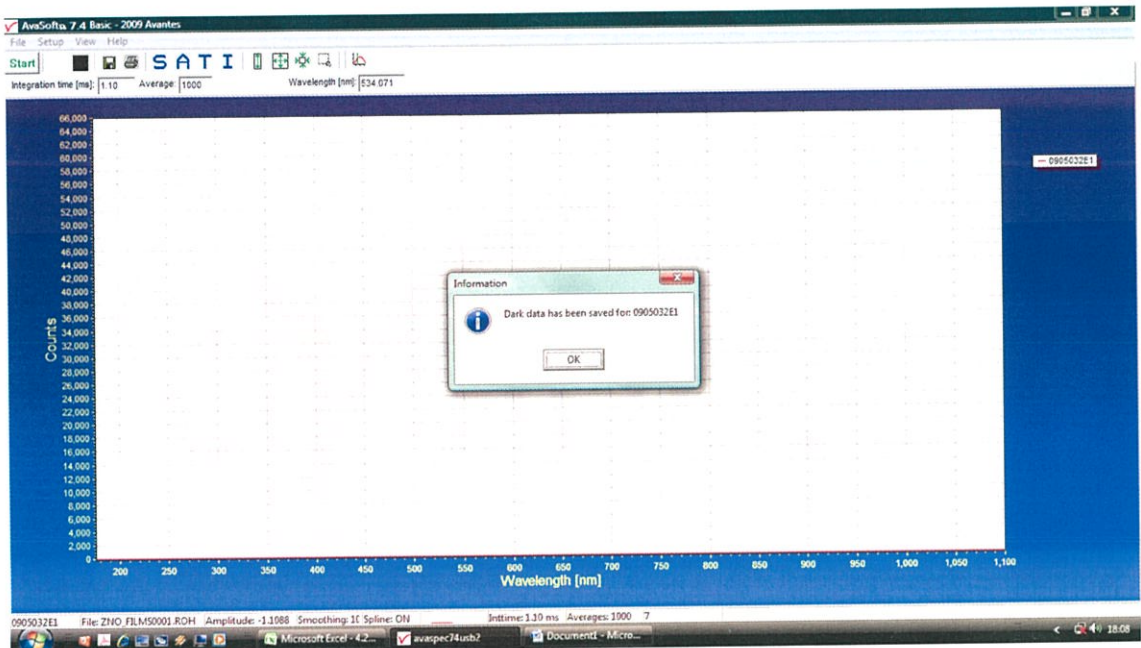
3. ใส่ชื่อไฟล์งานที่เราต้องการ กด **Save** เพื่อทำการบันทึก



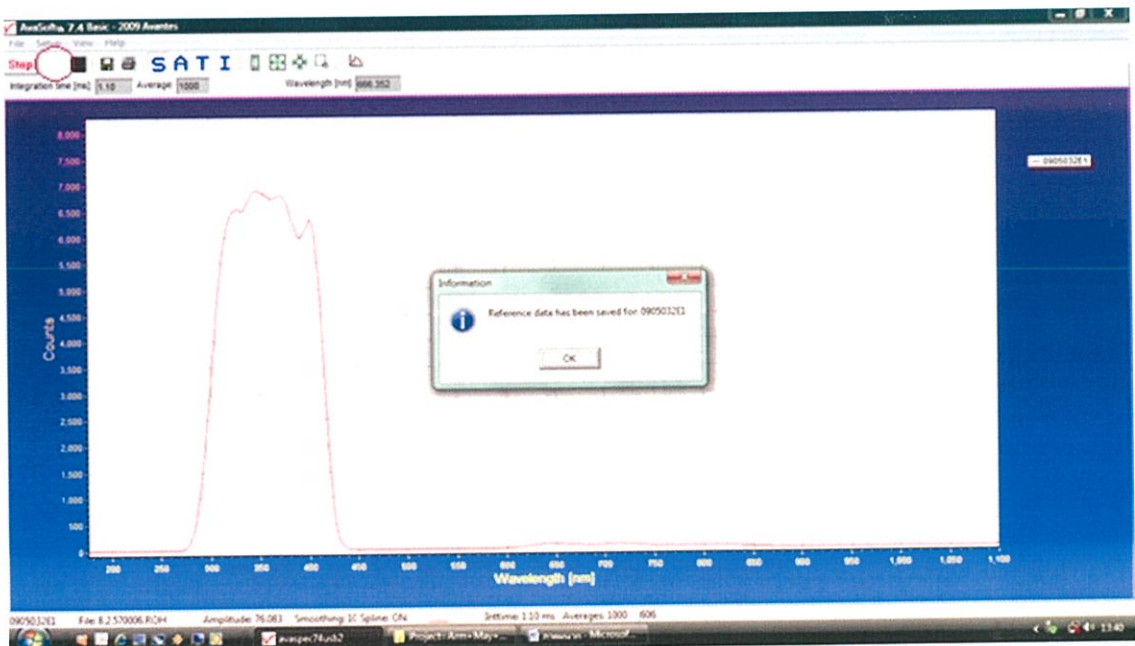
4. คลิกที่ start แล้วคลิก **■** เพื่อทำการวัดค่า dark



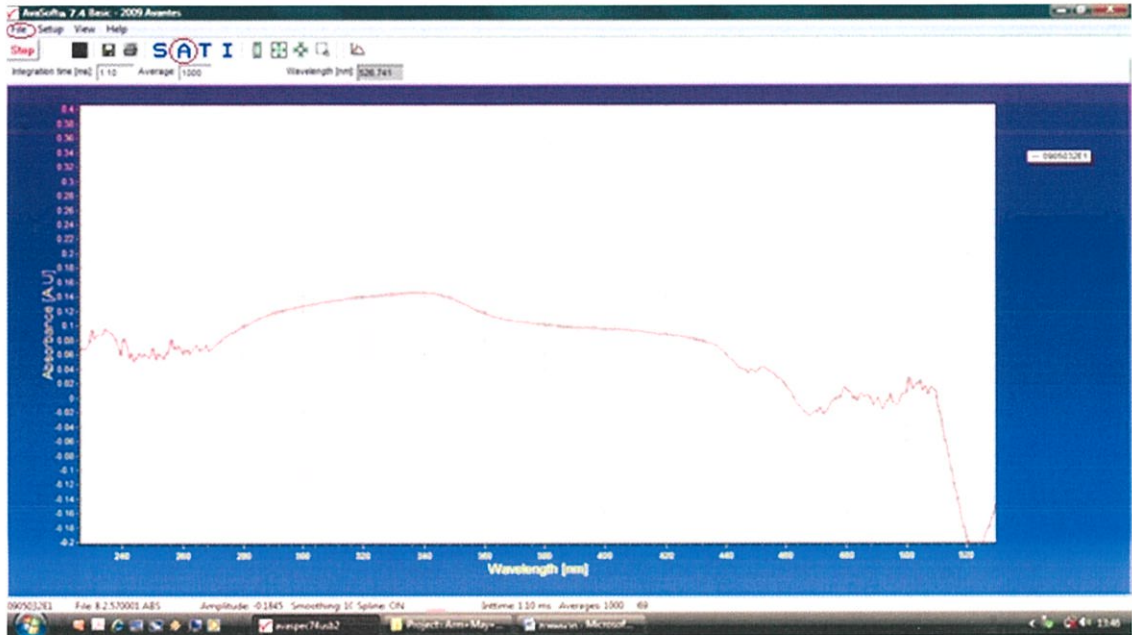
5. คลิก ok เพื่อทำการบันทึกการวัดค่า dark



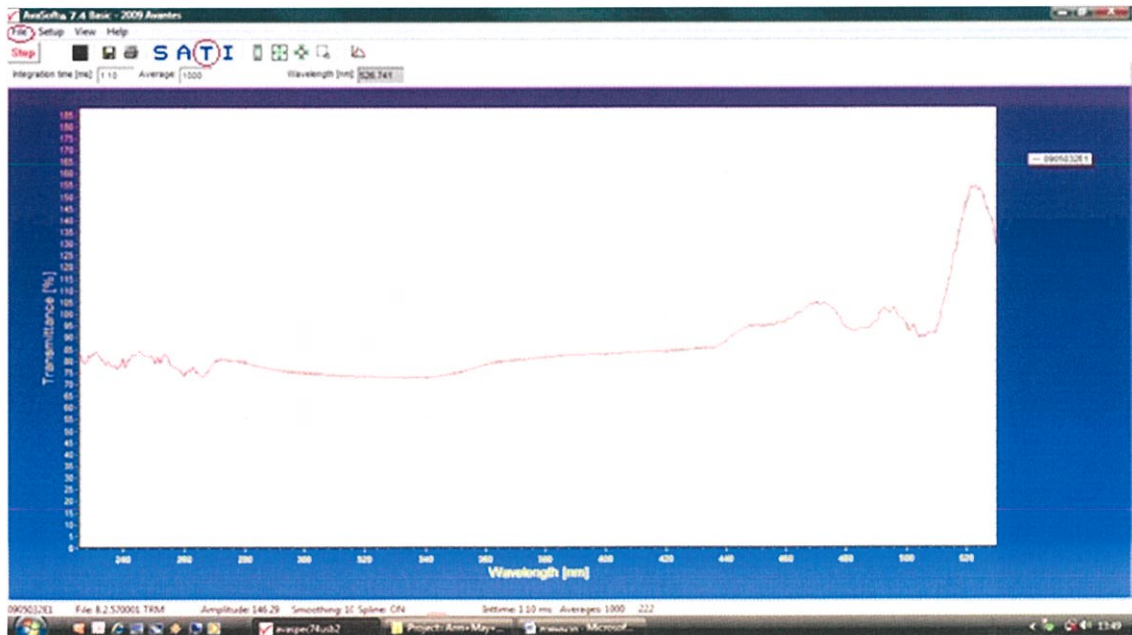
6. คลิกที่ เพื่อทำการวัดค่า Reference จากนั้นคลิก OK เพื่อทำการบันทึกข้อมูลการวัดค่า Reference



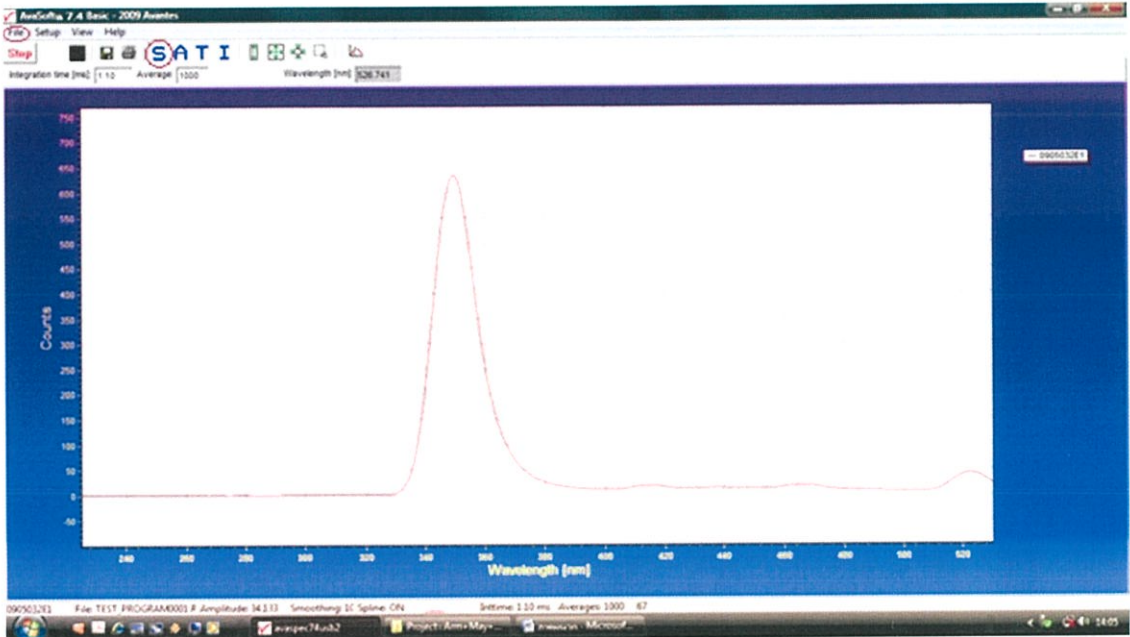
7. คลิกที่ **A** เพื่อทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นคลิกที่ File>Save>Experiment เพื่อทำการบันทึกข้อมูลการวัดค่าการดูดกลืนแสง



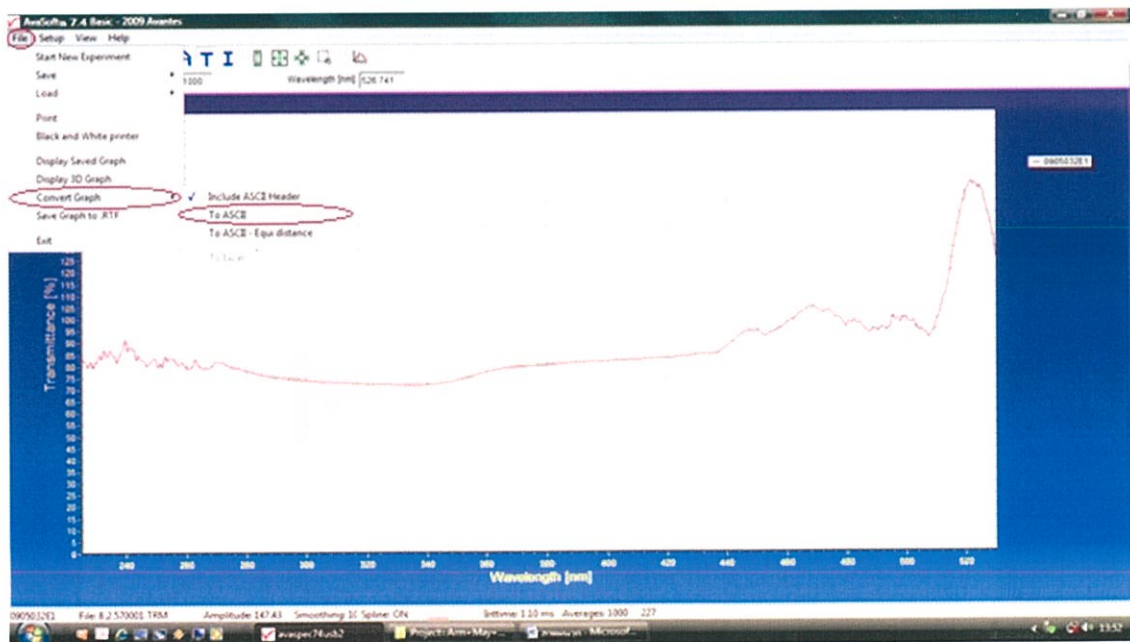
8. คลิกที่ **T** เพื่อทำการวัดการส่องผ่าน จากนั้นคลิกที่ File>Save>Experiment เพื่อทำการบันทึกข้อมูลการวัดการปลดปล่อยแสง



9. คลิก **S** เพื่อทำการวัดการปลดปล่อยแสง จากนั้นคลิกที่ File>Save>Experiment เพื่อทำการบันทึกข้อมูลการวัดการปลดปล่อยแสง



10. คลิกที่ file เลือก convert Graph เพื่อทำการแปลงให้เป็นหน่วย ASCII



13. หลังจากนั้นหน้าจอ ก็จะแสดงไฟล์ที่ได้รับการแปลงมาแล้ว

