



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาวัสดุควอนตัมคอตและสารเรืองแสงเพื่อประยุกต์ใช้กับแผ่นรวมแสง

Study of Quantum Dot and Luminescent Materials for
Concentrator Applications

นายวิฑูรย์ ยินดีสุข

นางภัทริยา ดำรงค์ดี

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาวัสดุควอนตัมคอตและสารเรืองแสงเพื่อประยุกต์ใช้กับแผ่นรวมแสง

Study of Quantum Dot and Luminescent Materials for
Concentrator Applications

นายวิฑูรย์ ยินดีสุข
นางภัทรียา คำรงค์ดี

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149114
วันเดือนปี 4 ต.ค. 2561

b.0026582
i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การศึกษาวัสดุควอนตัมคอตและสารเรืองแสงเพื่อประยุกต์ใช้กับแผ่นรวมแสง
แหล่งเงินทุน งบประมาณเงินรายได้ (ส่งเสริมนักวิจัย)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาที่ทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ เดือนตุลาคม พ.ศ. 2558 ถึง เดือนกันยายน พ.ศ.2559

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายวิฑูรย์ ยินดีสุข ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ,E-mail: kywitoon@kmitl.ac.th

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

นางภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์ สุข ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ,E-mail: kkpattar@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอกระบวนการสังเคราะห์สารควอนตัมคอตเพื่อนำมาสร้างเป็นแผ่นรวมแสง
โดยผู้วิจัยได้เลือกกระบวนการสังเคราะห์ควอนตัมคอตด้วยวิธีการฉีดร้อน วิธีการนี้จะอาศัยการให้
ความร้อนของสารกำมะถันและสารเลข (II) ซัลไฟด์ โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
ต่างๆของเลข (II) ซัลไฟด์ โดยผู้วิจัยเลือกศึกษาอุณหภูมิ 75 และ 100 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาขนาด
ของควอนตัมคอตที่ได้ จากนั้นนำสารควอนตัมคอตที่สังเคราะห์ได้มาวัดคุณสมบัติการดูดกลืนแสงด้วย
เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ สารควอนตัมคอตที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำไปสร้างแผ่นรวมแสง

คำสำคัญ : ควอนตัมคอต , วิธีการฉีดร้อน , แผ่นรวมแสง

Research Title: Study of Quantum Dot and Luminescent Materials for Concentrator Applications

Researcher: Mr.Witoon Yindeesuk and Mrs.Pattareeya Damrongsak

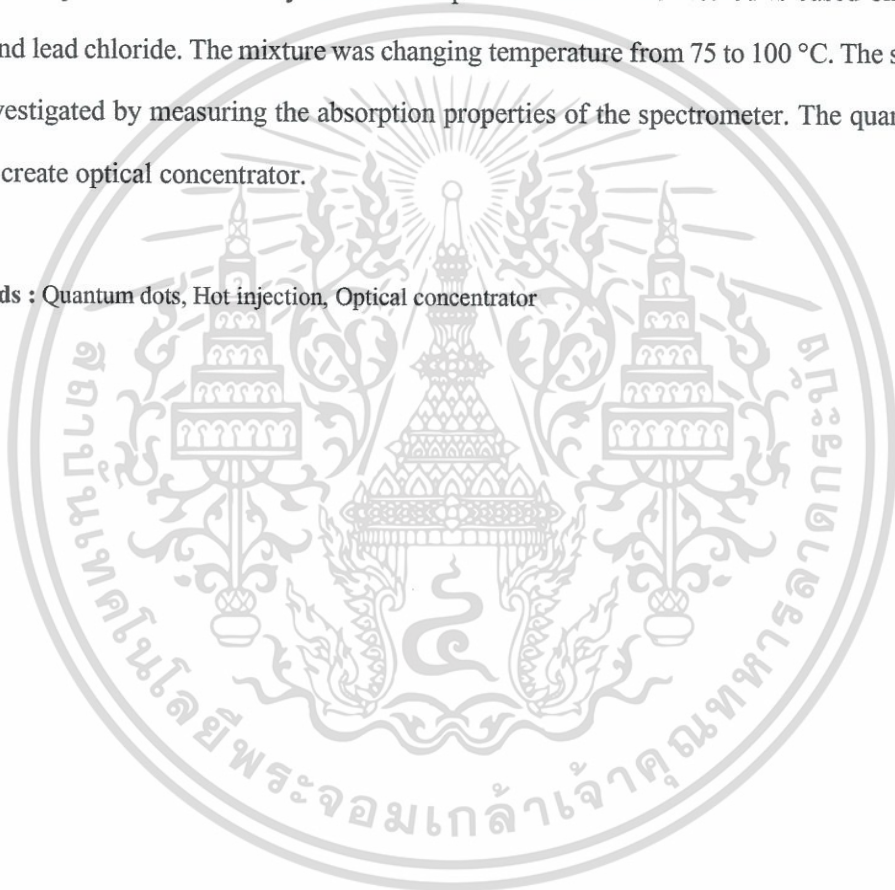
Faculty: Science

Department: Physics

ABSTRACT

This research presented a synthesizing process of quantum dots for an optical concentrator. We used a hot injection method to synthesize the quantum dots. This method is based on the heating of sulfur and lead chloride. The mixture was changing temperature from 75 to 100 °C. The size of quantum dots investigated by measuring the absorption properties of the spectrometer. The quantum dots were used to create optical concentrator.

Keywords : Quantum dots, Hot injection, Optical concentrator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินการทำงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือจากคณาจารย์ในภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังดังนี้

ขอขอบคุณ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ ที่คอยสนับสนุนและให้ใช้ก๊าซไนโตรเจน รวมทั้งให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือตลอดจนแนวทางการแก้ปัญหา

ขอขอบคุณ ดร.พิชชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ ที่ให้ใช้ห้องปฏิบัติการในการทำวิจัย รวมทั้งอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆตลอดจนการแนะนำการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ประชาน บูรณศิริ ที่ให้ใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงตลอดจนให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่างๆ

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ในการวัดการดูดกลืนแสง

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

วิฑูรย์ ยินดีสุข
ภัทริยา คำรงค์ศักดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุควอนตัมคอต.....	4
2.2 โครงสร้างควอนตัมคอต.....	5
2.3 แผ่นรวมแสงดูมิเนสเซนส์.....	6
2.4 ส่วนประกอบของแผ่นรวมแสง.....	6
2.5 การทบทวนวรรณกรรม.....	9
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	11
3.1 การสังเคราะห์สาร PbS.....	11
3.2 การสร้างแผ่นรวมแสง.....	14
3.3 การจัดเตรียมระบบสำหรับวัดคุณสมบัติทางแสงของแผ่นรวมแสง.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	22
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของแผ่นรวมแสง R6G.....	22
4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของควอนตัมดอท PbS.....	23
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	26
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	26
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	26
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย.....	27
เอกสารอ้างอิง.....	28
ภาคผนวก.....	29
ประวัตินักวิจัย.....	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	1
3.1 คุณสมบัติของกำมะถัน.....	11
3.2 คุณสมบัติของเมทานอล.....	11
3.3 คุณสมบัติของบูทานอล.....	12
3.4 คุณสมบัติของ OLA.....	12
3.5 คุณสมบัติของ PbCl ₂	12
3.6 คุณสมบัติของ โทลูอิน.....	12
3.7 คุณสมบัติของ Rhodamine 6G (R6G).....	16
3.8 คุณสมบัติของ DCM.....	16
3.9 คุณสมบัติของ PMMA.....	16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 กลไกการทำงานของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์.....	1
2.1 ขนาดของควอนตัมดอทที่เล็กลงมีช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้น.....	4
2.2 ส่วนประกอบควอนตัมดอท.....	6
2.3 การเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิค spin coating.....	10
3.1 แผนภาพวิธีการสังเคราะห์สารควอนตัมดอท PbS ด้วยวิธีการฉีดร้อน.....	13
3.2 การสังเคราะห์สารควอนตัมดอท PbS ด้วยวิธีการฉีดร้อน.....	14
3.3 ส่วนประกอบเครื่องมือเหวี่ยง.....	15
3.4 โครงสร้างทางเคมีของสาร Rodamine6G (R6G).....	15
3.5 ระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์.....	17
3.6 เครื่องฉายแสงจากหลอดไฟทั้งสแตนด์.....	18
3.7 สเปกตรัมแสงของหลอดไฟทั้งสแตนด์.....	18
3.8 สายใยแก้วนำแสงสำหรับนำส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังแผ่นรวมแสง.....	19
3.9 (ก) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (ข) สายใยแก้วนำแสง.....	19
3.10 อุปกรณ์จับยึดสายใยแก้วนำแสง.....	20
3.11 ระบบการวัดความเข้มแสงลูมิเนสเซนซ์ของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์.....	20
3.12 ไดโอดเปล่งแสงกับอุปกรณ์ระบายความร้อน.....	21
3.13 เครื่อง UV-VIS Spectrometer.....	21
4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง R6G.....	22
4.2 สเปกตรัมการเปล่งแสงของฟิล์มบาง R6G.....	22
4.3 ตัวอย่างสารควอนตัมดอท PbS ที่สังเคราะห์ได้.....	23
4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของควอนตัมดอท PbS เส้นใยที่ 1 ที่ถูกวัดโดย เครื่อง (UV-Vis spectrometer Avantesavaspec-EDU).....	23
4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของควอนตัมดอท PbS เส้นใยที่ 2 ที่ถูกวัดโดย เครื่อง (UV-Vis spectrometer Avantesavaspec-EDU).....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารควอนตัมดอท PbS เงื่อนไขที่ 1 ที่วัด โดยเครื่อง UV-VIS Spectrometer.....	25
4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารควอนตัมดอท PbS เงื่อนไขที่ 2 ที่วัด โดยเครื่อง UV-VIS Spectrometer.....	25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

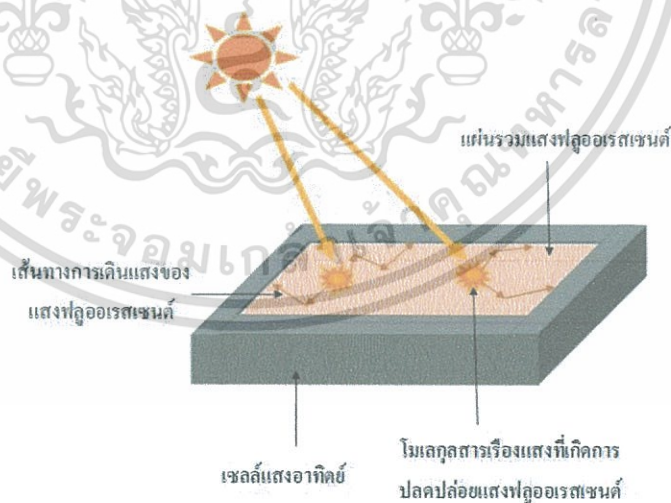
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาแผ่นรวมแสงเพื่อใช้รวมแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลายกลุ่ม เนื่องจากสิ่งประดิษฐ์นี้มีข้อได้เปรียบกว่าการใช้เลนส์หรือกระจกในการรวมแสงหลายประการคือ สามารถใช้ประโยชน์จากแสงที่ตกกระทบได้ทั้งแสงตรง (Direct light) และแสงที่เกิดการกระเจิง (Diffuse light) ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีระบบติดตามดวงอาทิตย์และยังสามารถทำงานได้ดีแม้ในสภาวะที่มีเมฆมาก นอกจากนี้คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ยังน้อยกว่าการใช้เลนส์รวมแสงทำให้ไม่ต้องอาศัยระบบหล่อเย็นในการลดอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์[1-4]

หลักการทำงานของแผ่นรวมแสงจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการดังนี้

1. การดูดกลืนแสง คือ กลไกที่แสงตกกระทบแผ่นรวมแสง ถูกดูดกลืนภายในแผ่นรวมแสงด้วยโมเลกุลหรืออนุภาคของวัสดุที่ถูกเจือภายในแผ่น เช่น โมเลกุลของวัสดุสีย้อมฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent dyes) อนุภาคควอนตัมดอท เป็นต้น
2. การเปล่งแสง คือ กลไกที่แสงที่ถูกดูดกลืนจะถูกปลดปล่อยออกมาจากวัสดุที่ดูดกลืนแสง
3. การสะท้อนกลับหมดของแสง คือ กลไกที่แสงที่ถูกปลดปล่อยออกมาเคลื่อนที่อยู่ภายในแผ่นรวมแสง โดยอาศัยหลักการสะท้อนกลับภายใน (total internal reflection) และ
4. การแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้า คือ การแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกติดตั้งอยู่ที่ขอบของแผ่น ดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 กลไกการทำงานของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากประสิทธิภาพของแผ่นรวมแสงจะขึ้นกับความสามารถในการดูดกลืนแสงของวัสดุที่ถูกเจือภายในแผ่น ซึ่งโดยทั่วไปการสร้างแผ่นจากโมเลกุลของวัสดุที่ย้อมฟลูออเรสเซนต์จะได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องวัสดุที่ย้อมที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาในปัจจุบันมีย่านความยาวคลื่นในการดูดและคายพลังงานที่หลากหลายมากขึ้น มีค่าควอนตัมยี่ลด์สูง และมีราคาถูก แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อด้อยในด้านเสถียรภาพของการใช้งานภายใต้แสงที่มีความเข้มสูง ด้วยเหตุผลดังกล่าวการใช้อนุภาคควอนตัมคอตในการจัดเตรียมแผ่นจึงได้ถูกนำเสนอขึ้นเมื่อไม่นานนี้ เนื่องจากอนุภาคควอนตัมคอตมีเสถียรภาพต่อแสงที่คิดว่าวัสดุที่ย้อมฟลูออเรสเซนต์ สามารถดูดกลืนและคายแสงได้ดี อีกทั้งสามารถปรับเปลี่ยนพลังงานของแสงได้ตามขนาดของอนุภาค[5-7] เนื่องจากในปัจจุบันราคาของอนุภาคควอนตัมคอตที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจะมีราคาสูง ดังนั้นการพัฒนาแผ่นรวมแสงจากอนุภาคควอนตัมคอตจึงยังไม่ได้ได้รับความนิยมมากนัก ดังนั้นเป้าหมายของงานวิจัยนี้คือการสังเคราะห์อนุภาคควอนตัมคอตเพื่อใช้ในการจัดเตรียมแผ่น โดยผู้วิจัยจะทำการจัดเตรียมวัสดุควอนตัมคอตโดยอาศัยเทคนิคการฉีดร้อน (Hot injection)[8] ซึ่งใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ วัสดุที่ถูกจัดเตรียมจะถูกนำมาสร้างแผ่นรวมแสงด้วยวิธีหนึ่งการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิค spin coating ผลการดำเนินงานวิจัยนี้จะส่งผลให้เกิดการพัฒนาทางเทคโนโลยีในการผลิตแผ่นรวมแสงจากวัสดุควอนตัมคอตขึ้นในประเทศ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อทดลองหากระบวนการสังเคราะห์วัสดุควอนตัมคอตที่มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการจัดเตรียมแผ่นรวมแสง
2. เพื่อนำวัสดุควอนตัมที่จัดเตรียมได้มาสร้างแผ่นรวมแสง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. พัฒนาการกระบวนการสังเคราะห์วัสดุควอนตัมคอตที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการจัดเตรียมแผ่นรวมแสง
2. สร้างแผ่นรวมแสงจากวัสดุควอนตัมคอตที่จัดเตรียมได้

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีและคุณสมบัติพื้นฐานในการสังเคราะห์ควอนตัมคอตและแผ่นรวมแสง
- ขั้นตอนที่ 2 จัดเตรียมสารเคมีและอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์ควอนตัมคอตและแผ่นรวมแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 ทดลองสังเคราะห์ควอนตัมดอทและสร้างแผ่นรวมแสง

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบคุณสมบัติทางแสงควอนตัมดอทและแผ่นรวมแสง

ขั้นตอนที่ 5 นำควอนตัมดอทมาใช้ในการสร้างแผ่นรวมแสงและตรวจสอบคุณสมบัติทางแสง

ขั้นตอนที่ 6 จัดทำรายงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	พ.ศ. 2558			พ.ศ. 2559								
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
ขั้นตอนที่ 1												
ขั้นตอนที่ 2												
ขั้นตอนที่ 3												
ขั้นตอนที่ 4												
ขั้นตอนที่ 5												
ขั้นตอนที่ 6												

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจในหลักการสังเคราะห์ควอนตัมดอทและการสร้างแผ่นรวมแสง

1.5.2 ได้กระบวนการสังเคราะห์ควอนตัมดอทและการสร้างแผ่นรวมแสง

1.5.3 สามารถสังเคราะห์ควอนตัมดอท PbS และนำไปสร้างเป็นแผ่นรวมแสงได้

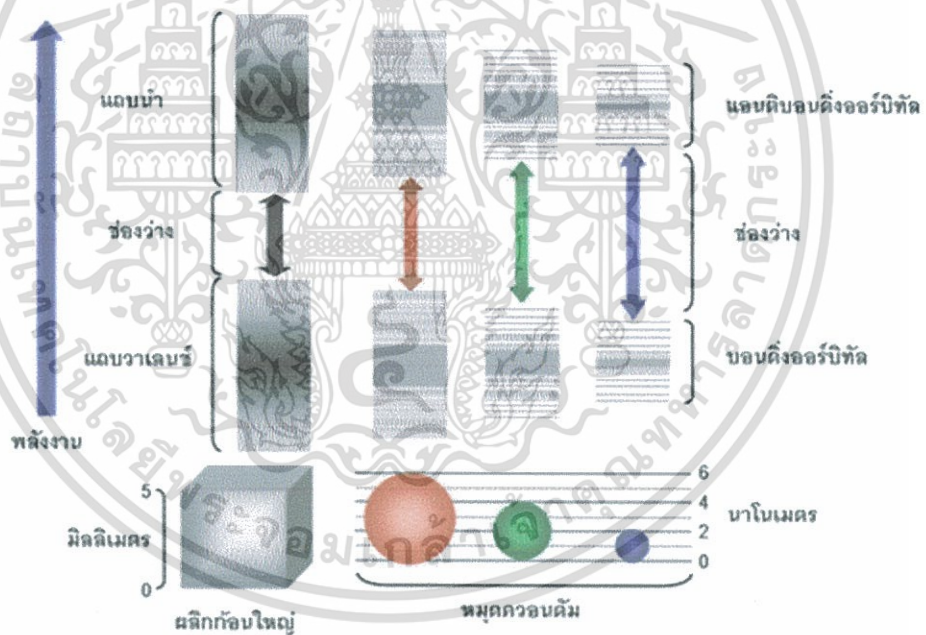
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ควอนตัมดอท[9]

ควอนตัมดอท (quantum dot) หรือ ผลึกนาโน (nanocrystal) เป็นผลึกอนุภาคที่มีขนาดเพียงระดับนาโนเมตร (2 - 10 นาโนเมตร) หรือ 10-50 อะตอม มีคุณสมบัติกึ่งตัวนำ ประกอบขึ้นจากธาตุในตารางธาตุระหว่างหมู่ II-VI, III-V หรือ IV-VI เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) แคดเมียมเซเลไนด์ (CdSe) แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) เมื่อมองโครงสร้างของควอนตัมดอทนี้ผ่านเครื่องมือที่สามารถสำรวจโครงสร้างระดับนาโนได้จะมองเห็นโครงสร้างนี้มีลักษณะเป็นจุด (dot) จุดระดับนาโนนี้จะแสดงพฤติกรรมภายในอะตอมหรือภายในโมเลกุลแบบควอนตัม (quantum) ตามหลักการทางฟิสิกส์ควอนตัม (quantum physics) นอกจากนี้ควอนตัมดอทยังมีคุณสมบัติที่เรืองแสงได้ดีทั้งยังปรับสีของแสงเรืองได้โดยเปลี่ยนขนาดและส่วนประกอบดังภาพที่ 2.1 ความสามารถในการปรับสีได้นี้เป็นสมบัติที่โดดเด่นกว่าสารฟลูออเรสเซนต์อื่น



ภาพที่ 2.1 ขนาดของควอนตัมดอทที่เล็กลงมีช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้น

ที่มา : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/67/index67.htm>

2.2 โครงสร้างควอนตัมดอท

2.2.1 แกนกลาง (core)

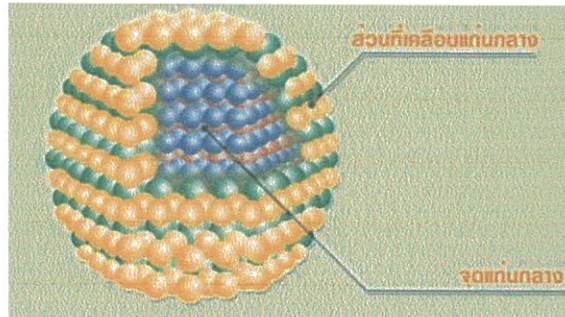
จะเป็นผลึกของธาตุที่อยู่ในหมู่ของตารางธาตุที่ II-VI, III-V หรือ IV-VI โดยปลูกผลึกให้มีขนาดอยู่ในระดับ 2-10 นาโนเมตร และควบคุมให้มีรูปร่างตามต้องการได้ การเลือกชนิดของเนื้อวัสดุที่ใช้เป็นแกนกลางเป็นการกำหนดช่วงแสงเรืองของควอนตัมดอทแบบหยาบ เช่นถ้าเป็นแคดเมียมซัลไฟด์จะเรืองแสงในย่านยูวีสีน้ำเงิน แคดเมียมเซเลไนด์จะเรืองแสงในย่านของวิสิเบิล ส่วนรูปร่างและขนาดของอนุภาคจะเป็นตัวปรับความยาวคลื่นของแสงเรืองอย่างละเอียดอีกชั้นหนึ่ง เช่น แกนกลางเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นาโนเมตรจะใช้เตรียมควอนตัมดอทที่เรืองแสงที่ 655 นาโนเมตร ในขณะที่แกนกลางที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 3 นาโนเมตรจะใช้เตรียมควอนตัมดอทที่เรืองแสงที่ 525 นาโนเมตร เป็นต้น

2.2.2 เปลือกหุ้มแกนกลาง (shell)

เหตุผลที่ต้องมีเปลือกหุ้มแกนกลางก็คือเพื่อให้ควอนตัมดอทสามารถเรืองแสงได้อย่างคงที่ การเลือกวัสดุที่จะใช้เป็นเปลือกหุ้มมีข้อบังคับน้อยกว่าการเลือกวัสดุที่ใช้เป็นแกนกลาง เพราะเปลือกหุ้มจะทำหน้าที่ป้องกันและไม่ยุ่งเกี่ยวกับการเรืองแสง ZnS เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นเปลือกหุ้มเพราะสามารถปกป้องแกนกลางได้เกือบสมบูรณ์ที่สุด

2.2.3 ผิวเคลือบ (coating)

ผิวเคลือบเป็นองค์ประกอบที่อาจมีเพิ่มเติมได้ถ้าองค์ประกอบสองส่วนแรกมีความเข้ากันไม่ได้กับเงื่อนไขของสิ่งแวดล้อมที่ถูกใช้งาน เช่น ทางชีววิทยา โดยผิวเคลือบจะมีลักษณะเป็น 2 ชั้น ชั้นในเป็นชั้นของลิแกนด์อินทรีย์ที่จับกับเปลือกหุ้มด้วยพันธะ โควาเลนต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นกาวกับชั้นเคลือบนอก ส่วนชั้นนอกจะเป็นสารพอลิเมอร์ผสมที่มีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ส่วนของโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำจะมีปฏิกิริยากับชั้นเคลือบด้านใน ส่วนของโมเลกุลที่ชอบน้ำจะมีปฏิกิริยากับตัวทำละลายข้างนอกอนุภาคทำให้มันสามารถละลายได้ในบัฟเฟอร์ วิธีการนี้ทำให้ควอนตัมดอทที่ได้มีความคงตัวในเกือบทุกสภาพแวดล้อมที่ใช้ในทางชีววิทยา นอกจากนี้แล้ว ผิวเคลือบดังกล่าวยังมีหมู่คาร์บอกซิลิกเหลืออยู่บนพื้นผิวทำให้มันสามารถทำอนุพันธ์กับสารแอนติบอดีต่างๆ เช่น สเตรบตาวิดิน เลคติน กรดนิวคลีอิก รวมทั้งโมเลกุลอื่นๆ ได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบควอนตัมดอท

ที่มา : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit3-9.html>

2.3 แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์

แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ (Fluorescent collector) คือแผ่นวัสดุโปร่งแสงที่ถูกเจือด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเรืองแสงได้ เช่น โมเลกุลสีย้อมไวแสง (dye molecules) ควอนตัมดอท เป็นต้น สิ่งประดิษฐ์นี้ถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อทำหน้าที่รวมแสงอาทิตย์ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงปี ค.ศ. 1976 โดย Weber และ Lambe [10]

2.4 ส่วนประกอบของแผ่นรวมแสง

2.4.1 สารเรืองแสง[11]

สารเรืองแสงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ในการเกิดกลไกการเรืองแสง หรืออีกนัยหนึ่งคือเป็นวัสดุสำคัญในการแปลงความยาวคลื่นหรือพลังงานของแสง สมบัติของสารเรืองแสงที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานในรูปแบบของอุปกรณ์ทั้งสองชนิดมีดังนี้

- มีความเสถียรเชิงแสง
- มีค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนสูงเพื่อให้เกิดการดูดกลืนแสงได้ดี
- มีย่านการดูดกลืนแสงที่กว้างและสามารถปลดปล่อยแสงในย่านที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์
- มีค่าควอนตัมยิลด์ (Quantum yield: ϕ_f) สูงซึ่งในทางอุดมคติสารเรืองแสงจะต้องมีค่า ϕ_f เข้าใกล้ 1 มากที่สุด โดยที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
- มีสเปกตรัมการดูดกลืนและสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนซ์ที่เกิดการซ้อนทับกันระหว่าง 2 สเปกตรัมน้อยที่สุดหรือไม่ซ้อนทับกันเลยเพื่อไม่ให้เกิดปรากฏการณ์การดูดกลืนซ้ำ
- ราคาถูกและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันนี้ยังไม่มีสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ชนิดใดที่มีสมบัติได้ครบถ้วนดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น แต่ในสารแต่ละชนิดจะมีข้อได้เปรียบและข้อบกพร่องที่แตกต่างกันออกไป ตามแต่ละชนิดของสาร ซึ่งจะขอยกตัวอย่างสาร 3 ชนิด ซึ่งมีข้อได้เปรียบและข้อบกพร่องที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

2.4.1.1 สารเรืองแสงชนิดอนินทรีย์ (Inorganic dyes)

ในสารเรืองแสงชนิดอนินทรีย์มีข้อได้เปรียบกว่าสารเรืองแสงชนิดอื่นคือมีความทนทานต่อความร้อนได้สูง และในสารอนินทรีย์จำพวกสารจากธาตุ rare earth จะมีการเกิดปรากฏการณ์การดูดกลืนซ้ำขึ้นน้อย นอกจากนั้นสารอนินทรีย์ยังมีความเสถียรเชิงแสงสูง แต่มีข้อบกพร่องในเรื่องของประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ได้ค่อนข้างต่ำ และมีความสามารถในการดูดกลืนแสงได้ไม่ดีนัก ซึ่งแนวทางในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้คือการใช้ความเข้มข้นของสารที่มากขึ้น แต่การแก้ไขปัญหาด้วยวิธีนี้จะทำให้โอกาสในการเกิดปัญหาการดูดกลืนซ้ำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ตัวอย่างสารอนินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นสารสีย้อมในอุปกรณ์ เช่น Pr^{3+} , Nd^{3+} , Sm^{3+} , Er^{3+} เป็นต้น

2.4.1.2 สารเรืองแสงชนิดอินทรีย์ (Organic dyes)

สารอินทรีย์มีข้อได้เปรียบกว่าสารชนิดอื่น คือมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนส์อยู่ในย่านความยาวคลื่นที่หลากหลาย และมีสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงที่สูง อีกทั้งในสารอินทรีย์หลายชนิดมีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์สูงเข้าใกล้หนึ่ง^[23] และในปัจจุบันยังได้มีการสังเคราะห์สารอินทรีย์ชนิดใหม่ขึ้นอย่างแพร่หลายเพื่อให้เกิดการดูดกลืนแสงที่ครอบคลุมหลายความยาวคลื่นและปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ได้สูง แต่สารอินทรีย์มีข้อบกพร่องในแง่ของความเสถียรเชิงแสงที่ค่อนข้างต่ำ นอกจากนั้นสารอินทรีย์หลายชนิดที่มีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์สูงจะปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงของแสงสีเขียว-เหลือง ซึ่งถ้าพิจารณาเพื่อการนำมาใช้ประโยชน์กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแล้วย่านแสงดังกล่าวไกลจากแถบพลังงาน E_g ของสารซิลิคอนอยู่มาก ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่นำมาใช้ในอุปกรณ์ เช่น สารRhodamine 6G, Coumarin6, Oxazine 9, DCM, Kition red 620 เป็นต้น

2.4.1.3 สารเรืองแสงชนิดควอนตัมดอท(Quantum dots)

เทคนิคควอนตัมดอทนี้แรกเริ่มได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย L.E. Brus ในสารควอนตัมดอทนี้ได้ทำการปรับจุดหรือดอทเพื่อให้เกิดการปลดปล่อยสารลูมิเนสเซนส์ และในสารชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์ด้วยหลายเหตุผลคือ มีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ที่สูง ยกตัวอย่างเช่น สาร CdSe/CdS มีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์สูงถึง

80% เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีความสามารถในการทนทานต่อแสงได้ยาวนานและยังสามารถลดการเกิดการดูดกลืนซ้ำได้ด้วยการปรับจุดให้แยกกันของควอนตัมดอทในวัสดุตัวกลาง[12]

2.4.2 วัสดุตัวกลาง

วัสดุตัวกลางในแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ทำหน้าที่เป็นตัวกลางทางเดินแสงให้กับโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยจากกลไกการเรืองแสง ลักษณะสมบัติของวัสดุตัวกลางที่ดี มีดังนี้

- มีความโปร่งแสง
- มีความเสถียรในเชิงเคมี
- สามารถขึ้นรูปได้ง่าย
- มีแรงเชิงกลสูง
- ทนทานต่อสภาพอากาศในฤดูต่างๆ ได้ดี
- มีความหนาแน่นต่ำ
- ราคาถูก
- ไม่มีความเป็นพิษ
- มีค่าดัชนีหักเหสูง

จากสมบัติที่แสดงข้างต้น พบว่ามีสารหลายชนิดที่มีสมบัติเหมาะสม เช่น สารพอลิเมอร์ โปร่งแสงจำพวกพอลิเมทิลเมตาไครเลต (Polymethyl Methacrylate: PMMA) เมทิลเมตาไครเลต (Methyl Methacrylate: MMA) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride: PVC) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA) เป็นต้น

2.4.3 กลไกการเรืองแสงของสารเรืองแสง

กลไกหลักในการแปลงพลังงานแสงของสารเรืองแสงประกอบด้วย 2 กระบวนการ คือ กระบวนการดูดกลืนแสงและกระบวนการในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ของสารเรืองแสง

2.4.3.1 กระบวนการดูดกลืนแสง

เมื่อแสงที่มีพลังงานเหมาะสมตกกระทบผิวหน้าของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ แสงเหล่านั้นจะถูกดูดกลืนโดย โมเลกุลของสารเรืองแสง ปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนเข้าไปจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับระยะทางที่แสงเดินทางผ่านวัสดุและความเข้มข้นของสารเรืองแสง ดังสมการความสัมพันธ์ของ Beer-Lambert คือ

$$A(\lambda) = \log \left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \right) = \xi(\lambda)IC \quad (2.2)$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืน (Absorbance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ξ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสาร ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)
 l คือ ระยะทางที่แสงเดินทางผ่าน ซึ่งในที่นี้คือความหนาของฟิล์มบาง
 C คือ ความเข้มข้นของสารเรืองแสง (M)
 I_0 และ I คือ ความเข้มของแสงก่อนเดินทางและหลังเดินทางผ่านฟิล์มบาง ตามลำดับ

จากกฎของ Beer-Lambert ดังสมการ (2.2) สามารถหาประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง (η_{abs}) ของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งเป็นสัดส่วนของแสงที่ถูกดูดกลืน โดยสารเรืองแสงต่อแสงที่ตกกระทบพื้นผิวของแผ่นรวมแสงจากสมการ

$$\eta_{\text{abs}} = \frac{\int_0^\infty I_0(\lambda)[1-e^{-A(\lambda)}]d\lambda}{\int_0^\infty I_0(\lambda)d\lambda} \times 100 \quad (2.3)$$

2.4.3.2 กระบวนการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ของสารเรืองแสง

แสงที่ถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารเรืองแสงที่อยู่ภายในแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ถูกใช้ป็นแหล่งพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนในอะตอมของโมเลกุลสารเรืองแสงอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้นหรืออยู่ในสถานะกระตุ้นและเพื่อให้เข้าสู่ความเสถียรของระบบอิเล็กตรอนในสถานะดังกล่าวจะต้องตกกลับลงมายังสถานะพื้น กระบวนการตกกลับลงมายังสถานะพื้นของอิเล็กตรอนจากสถานะกระตุ้นมายังสถานะพื้นจะมีการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence) ออกมา

2.5 การทบทวนวรรณกรรม

2.5.1 วัสดุควอนตัมดอท

ควอนตัมดอทคือวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรซึ่งมีขนาดเล็กเพียงพอที่ เกิดสมบัติทางกลศาสตร์ควมดัม ระดับพลังงานอิเล็กตรอนของวัสดุนี้อยู่ระหว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่และระดับพลังงานของ โมเลกุล โดยระดับพลังงานของควอนตัมดอทสัมพันธ์กับขนาดและรูปร่าง ตัวอย่างเช่นแถบพลังงานต้องห้ามของควอนตัมดอทหาได้จากความถี่ของแสงที่ปลดปล่อยออกมาแปรผกผันกับขนาดของควอนตัมดอท ในการประยุกต์ใช้การเปล่งแสงของควอนตัมดอทความถี่ของแสงที่เปล่งออกมาเพิ่มขึ้นตามขนาดของควอนตัมดอทที่ลดลง ผลที่ได้คือสีของแสงที่เปล่งออกมาเลื่อนจากสีแดงไปเป็นสีน้ำเงินเมื่อขนาดของควอนตัมดอทเล็กลง สิ่งทำให้ควอนตัมดอทสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ของแสงที่เปล่งออกมาได้ ดังนั้นการปรับขนาดของควอนตัมดอทอย่างเหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นรวมแสงได้

หลักการทำงานของแผ่นรวมแสงแผ่นรวมแสงคือสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นหรือฟิล์มบาง โพลีเมอร์ โปร่งแสง ซึ่งภายในแผ่นหรือฟิล์มบางมีโมเลกุลของวัสดุสีย้อมฟลูออเรสเซนซ์

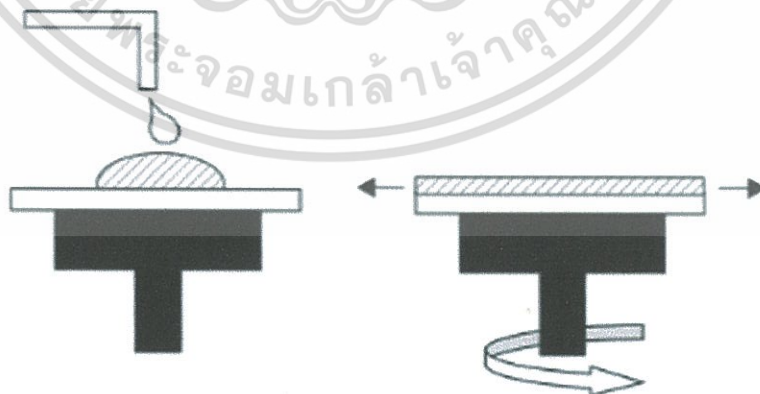
หรือวัสดุควอนตัมคอต ดังรูป เมื่อแสงตกกระทบบนผิวหน้าของแผ่นรวมแสง แสงส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับและอีกส่วนหนึ่งจะหักเหเข้าไปภายในฟิล์มบางฟลูออเรสเซนต์ แสงที่เกิดการหักเหเข้าไปบางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยวัสดุสีย้อมฟลูออเรสเซนต์ หรือวัสดุควอนตัมคอตที่ถูกเจือภายในฟิล์มบาง และบางส่วนอาจเกิดการส่องผ่านออกไปจากฟิล์มบาง หลังจากที่วัสดุสีย้อมฟลูออเรสเซนต์ หรือวัสดุควอนตัมคอต ดูดกลืนแสงที่หักเหเข้ามาภายในแผ่นแล้ว จะปลดปล่อยพลังงานบางส่วนออกมา ซึ่งแสงที่ถูกปลดปล่อยนั้นบางส่วนจะเคลื่อนที่อยู่ภายในแผ่นรวมแสงด้วยหลักการสะท้อนกลับหมดของแสง (Total Internal Reflection: TIR) ซึ่งเมื่อแสงเคลื่อนที่ถึงบริเวณขอบของแผ่นจะถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพในการรวมแสงของของแผ่นรวมแสง (η) จะขึ้นกับปัจจัยหลัก 3 ประการ คือ ประสิทธิภาพการดูดกลืนแสง (Q_A) ประสิทธิภาพการเปล่งแสง (Q_c) และประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของวัสดุสีย้อม หรือควอนตัมคอต (ϕ_f) ดังสมการ

$$\eta = Q_A Q_c \phi_f \quad (1)$$

2.5.2 เทคนิคการจัดเตรียมแผ่นรวมแสง

ในงานวิจัยนี้จะเตรียมแผ่นรวมแสงโดยการเคลือบฟิล์มบางโพลิเมอร์ที่เจือวัสดุควอนตัมคอตบนกระจก โดยใช้เทคนิคเคลือบฟิล์มบางด้วยการหมุนเหวี่ยง (spin coating) ทั้งนี้เนื่องจากสามารถจัดเตรียมได้ง่าย ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถทำได้ภายในบรรยากาศหลักการพื้นฐานของเทคนิคนี้คือการเคลือบวัสดุที่ต้องการซึ่งอยู่ในรูปของเหลวบนแผ่นวัสดุฐานรองที่ถูกประกอบอยู่บนแท่นวางชิ้นงานที่สามารถหมุนด้วยความเร็วสูง ซึ่งเมื่อแท่นถูกหมุนเหวี่ยงจะทำให้ของเหลวเกิดการกระจายตัว และเคลือบทั่วผิวหน้าวัสดุฐานรอง โดยความหนาของฟิล์มบางจะสามารถควบคุมได้จากความเร็วรอบของการหมุนเหวี่ยงและความหนืดของสารละลายที่ใช้ในการจัดเตรียมฟิล์ม



ภาพที่ 2.3 การเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิค spin coating

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการทำวิจัยครั้งนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ การสังเคราะห์ควอนตัมดอท PbS ด้วยวิธีการฉีดร้อน (Hot injection) และการสร้างแผ่นรวมแสงด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มบางแบบหมุนเหวี่ยง (Spin Coating)

3.1 การสังเคราะห์สาร PbS

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้

- 1) เตาให้ความร้อน (Hot plate)
- 2) Three-neck flask
- 3) เข็มฉีดยา
- 4) เครื่องปั่นเหวี่ยง
- 5) บีกเกอร์
- 6) เทอร์โมมิเตอร์
- 7) หลอด centrifuge

3.1.2 สารเคมี

- 1) กำมะถัน (sulfur) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กำมะถันของบริษัท Sigma Aldrich ที่มี
ความบริสุทธิ์ 98 %

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของกำมะถัน

สถานะ	ของแข็ง (ผง) มีสีเหลือง
มวลอะตอม	32.07 g/mol
จุดหลอมเหลว	115.21 °C
จุดเดือด	444.6 °C

- 2) เมทานอล (Methanol) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เมทานอลของบริษัท VWR We
Enable Science ที่มีคามบริสุทธิ์ 99%

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเมทานอล

สูตรทางเคมี	CH ₃ OH
มวลโมเลกุล	32.05 g/mol.
จุดหลอมเหลว	-97 °C
จุดเดือด	64.7 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) บิวทานอล (Butanol) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Butanol ของบริษัท Sigma Aldrich ที่มี
ความบริสุทธิ์ 99.8 %

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของบิวทานอล

สูตรทางเคมี	$C_4H_{10}O$
มวลโมเลกุล	74.12 g/mol.
จุดหลอมเหลว	-89.8 °C
จุดเดือด	117.7 °C

4) Oleylamine (OLA) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ OLA ของบริษัท Sigma Aldrich ที่มี
ความบริสุทธิ์ 98 %

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของ OLA

สูตรทางเคมี	$C_{18}H_{37}N$
มวลโมเลกุล	267.49 g/mol.
จุดหลอมเหลว	21 °C
จุดเดือด	364 °C

5) เลทคลอไรด์ ($PbCl_2$) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ $PbCl_2$ ของบริษัท Sigma Aldrich ที่มี
ความบริสุทธิ์ 98 %

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของ $PbCl_2$

สูตรทางเคมี	$PbCl_2$
มวลโมเลกุล	278.11 g/mol.
จุดหลอมเหลว	501 °C
จุดเดือด	950 °C

6) โทลูอิน (Toluene) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กัมมะถันของบริษัท Merck KGaA

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของโทลูอิน

สูตรทางเคมี	$C_6H_5CH_3$
มวลโมเลกุล	92.14 g/mol.
จุดหลอมเหลว	-95 °C
จุดเดือด	111 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ควอนตัมดอท PbS

ขั้นตอนที่ 1 ใน Three-neck flask ใบแรกนำซัลเฟอร์หนัก 0.16 กรัม มาผสมกับ OLA ที่ ปริมาตร 15 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิถึง 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ใน Three-neck flask ใบที่สองให้นำ $PbCl_2$ 0.56 กรัม มาผสมกับ OLA ที่ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 75-150 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิจะเป็นตัวแปรของขนาดควอนตัมดอท PbS)

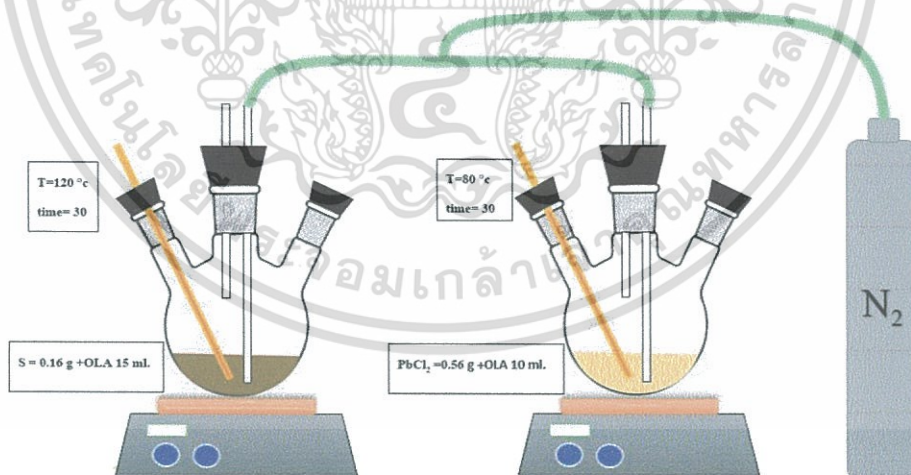
ขั้นตอนที่ 3 นำสารละลายซัลเฟอร์ใน Three-neck flask ใบแรก ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ผสมกับ OLA 3 มิลลิลิตรแล้วฉีดเข้าไปใน Three-neck flask ใบที่สอง ทิ้งไว้ประมาณ 0-20 นาที (เวลาจะเป็นตัวแปรของขนาด PbS)

ขั้นตอนที่ 4 เติมนิวทรานอล 20 มิลลิลิตร และ เมทานอลอีก 10 มิลลิลิตรเพื่อหยุดปฏิกิริยา รอให้ตกตะกอน

ขั้นตอนที่ 5 เทของเหลวออกแล้วใส่เทลูรีนไปให้เหนือตะกอน นำไปเทใส่หลอด centrifuge จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแล้วรอให้ตกตะกอน

ขั้นตอนที่ 6 เทของเหลวออกอีกครั้งแล้วก็นำเทลูรีนใส่ให้เหนือตะกอน

ขั้นตอนที่ 7 เทของเหลวออกแล้วใส่โทลูอีนลง ไปให้เหนือตะกอนจากนั้นเก็บในขวด



ภาพที่ 3.1 แผนภาพวิธีการสังเคราะห์สารควอนตัมดอท PbS ด้วยวิธีการฉีดร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 การสังเคราะห์สารควอนตัมดอท PbS ด้วยวิธีการฉีดร้อน

3.2 การสร้างแผ่นรวมแสง

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเตรียมแผ่นรวมแสง

3.2.1.1 กระจกสไลด์

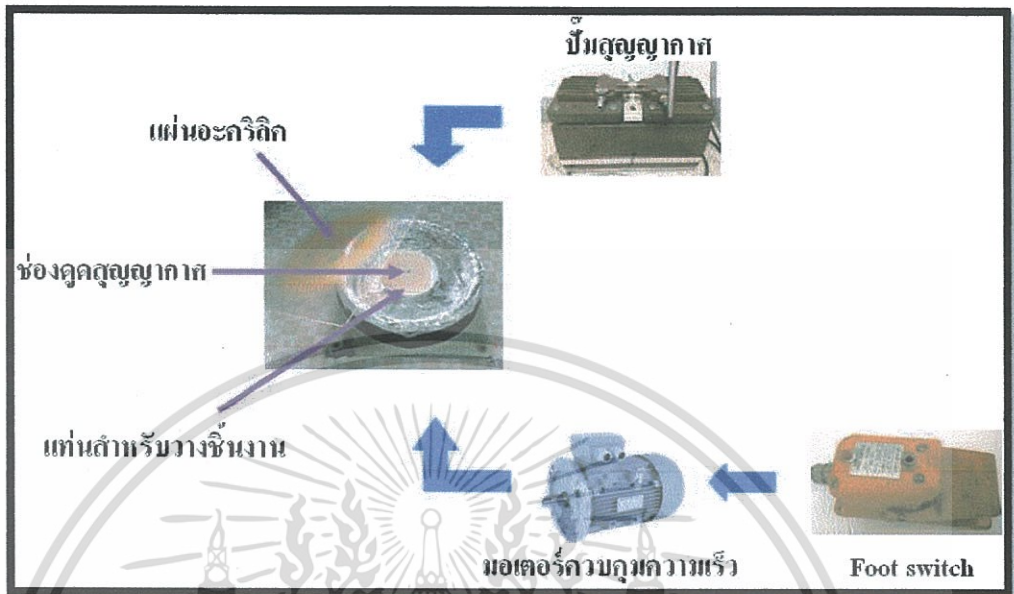
ในการเตรียมแผ่นรวมแสงแบบฟิล์มบางรวมแสงผู้วิจัยได้ทำการเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยงโดยใช้กระจกสไลด์ของบริษัท SAIL BRAND ขนาดกว้าง 2.54 mm. ยาว 7.62 mm. หนา 1 mm.

3.2.1.2 เครื่องเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coat) ในการเคลือบลงบนแม่พิมพ์เพื่อให้เกิดความโค้ง โดยใช้เครื่องเคลือบผิวซึ่งส่วนประกอบของเครื่องแสดงดังภาพที่ 3.3หน้าที่ของแต่ละส่วนมีดังนี้

- 1) แท่นสำหรับวางฐานรอง ซึ่งจุดกึ่งกลางของแท่นจะมีรูกลวงขนาดเล็กเพื่อเป็นรูสำหรับดูดอากาศต่อกับเครื่องปั๊มสุญญากาศ เพื่อยึดฐานรองแผ่นทองแดงขณะทำการเคลือบ
- 2) แผ่นอะคริลิก ใช้ปิดบังเพื่อความปลอดภัย กล่าวคือป้องกันชิ้นงานและสารละลายถูกเหวี่ยงออกมาถูกผู้ทดลองขณะเครื่องกำลังหมุน
- 3) ปั๊มสุญญากาศ (ULVAC DAH-60) ใช้แรงดันไฟฟ้า 100 โวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ อัตราการปั๊ม 60 ลิตร/นาที ใช้เพื่อดูดฐานรองแผ่นทองแดงให้ยึดแน่นอยู่กับแท่นวางฐานรอง
- 4) มอเตอร์ควบคุมความเร็วสามารถปรับความเร็วรอบในการหมุนได้ตามต้องการ

5) แทนเหยียบบังคับ (Linemaster switch Co., Hercules foot switch ใช้แรงดันไฟฟ้า 125-250 โวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เพื่อสั่งการทำงานของมอเตอร์ควบคุมการหมุน

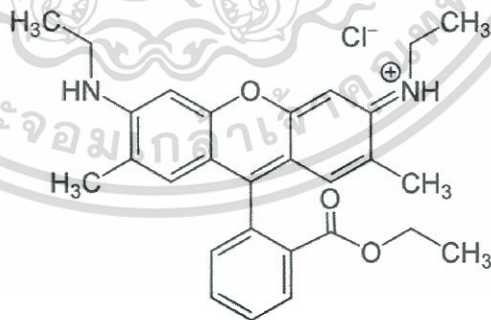


ภาพที่ 3.3 ส่วนประกอบเครื่องหมุนเหวี่ยง

3.2.2 สารเคมี

3.2.2.1 สาร Rhodamine 6 G (R6G)

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทดลองสร้างแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร R6G ที่มีความเข้มข้นต่างๆ เพื่อทดลองสร้างแผ่นรวมแสงก่อนที่จะนำสารควอนตัมดอท PbS มาใช้ โดยสาร R6G มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 3 และมีคุณสมบัติทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 3



ภาพที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีของสาร Rodamine6G (R6G)

ที่มา : http://en.wikipedia.org/wiki/Rhodamine_6G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของ Rhodamine 6G (R6G)[13]

สูตรทางเคมี	$C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$
มวลโมเลกุล	479.02 g/mol
ความหนาแน่น	1.26 g/cm ³
ความสามารถในการละลายน้ำ	20g/l (25°C)
ความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงสูงสุด	525 นาโนเมตร
ความยาวคลื่นที่เกิดการเปล่งแสงน้อยสุด	555 นาโนเมตร

3.2.2.2 Dichloromethane (DCM)

DCM หรือ เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) ถูกใช้เป็นตัวทำละลายวัสดุ PMMA คุณสมบัติโดยทั่วไปของ DCM แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติของ DCM[14]

สูตรทางเคมี	CH_2Cl_2
ความหนาแน่น	1.3266 g/cm ³ , liquid
จุดหลอมเหลว	-96.7 °C (175.7 K)
จุดเดือด	40°C (312.8 K)

3.2.2.3 Polymethyl-methacrylate (PMMA)

PMMA คือวัสดุพอลิเมอร์โปร่งแสงที่ใสไม่มีสีสามารถให้แสงส่องผ่านได้ถึง 92%[15]และมีความแข็งแรง ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ ทำให้ PMMA เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนของหน้าต่างโดย PMMA ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นวัสดุตัวกลางในการสร้างแผ่นรวมแสงโดยการใช้เทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง โดยคุณสมบัติของ PMMA แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.9 คุณสมบัติของ PMMA[16]

สูตรทางเคมี	$(C_5O_2H_8)_n$
มวลโมเลกุล	varies
ความหนาแน่น	1.18 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	160 °C (320 °F)
ดัชนีหักเห	1.4914 ที่ความยาวคลื่น 587.6 nm.

3.2.3 การเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์

การเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ มีขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1 นำกระจกใสที่เตรียมไว้ทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดที่โพลีเพื่อขจัดคราบมันจากนั้นนำไปล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ชั่งสาร PMMA 0.4 กรัม และนำมาผสมสารละลาย R6G ปริมาตร 2.0 ml. และนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อละลายวัสดุ PMMA

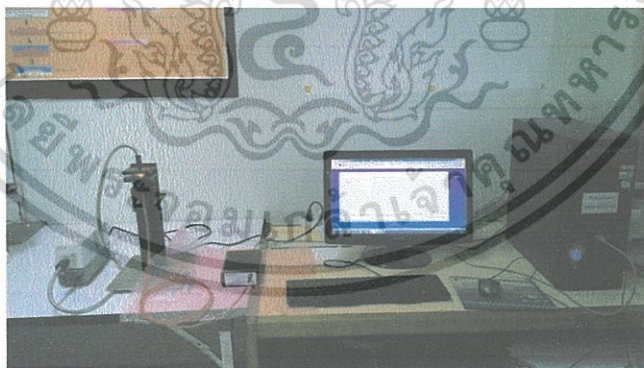
ขั้นตอนที่ 3 นำกระจกใสที่ทำความสะอาดไปเคลือบ PMMA ที่ทำละลายแล้วด้วยวิธีการแบบหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5500 rpm เป็นเวลา 40 วินาที

ขั้นตอนที่ 4 ใช้อะซิโตนเช็ดทำความสะอาดบริเวณขอบกระจก

3.3 การจัดเตรียมระบบสำหรับวัดคุณสมบัติทางแสงของแผ่นรวมแสง

3.3.1 ระบบวัดสมบัติการดูดกลืนแสง

แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ที่ถูกเตรียมขึ้นจะถูกนำมาวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงโดยอาศัยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Avantes รุ่น 2048 การจัดระบบเพื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะใช้ระบบมาตรฐานที่แสดงดังภาพที่ 3.5 โดยแหล่งกำเนิดแสงในระบบคือแสงจากหลอดทั้งสแตน แสงจากหลอดทั้งสแตนจะเดินทางผ่านสายใยแก้วนำแสงไปยังแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ แสงบางส่วนจะถูกดูดกลืนไว้ภายในแผ่นรวมแสงและแสงในบางส่วนที่สามารถส่องผ่านออกมาได้จะผ่านไปยังสายใยแก้วนำแสงอีกเส้นหนึ่งที่อยู่ทางด้านล่างของแผ่นรวมแสง ซึ่งสายใยแก้วนำแสงนี้จะถูกต่อกับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์และถูกวิเคราะห์หาสเปกตรัมการดูดกลืน โดยโปรแกรม Avasoft version 7.4 ในที่นี้ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นรวมแสงจะถูกคำนวณโดยอาศัยสมการของเบียร์-แลมเบิร์ต ดังสมการที่ 2.2



ภาพที่ 3.5 ระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์

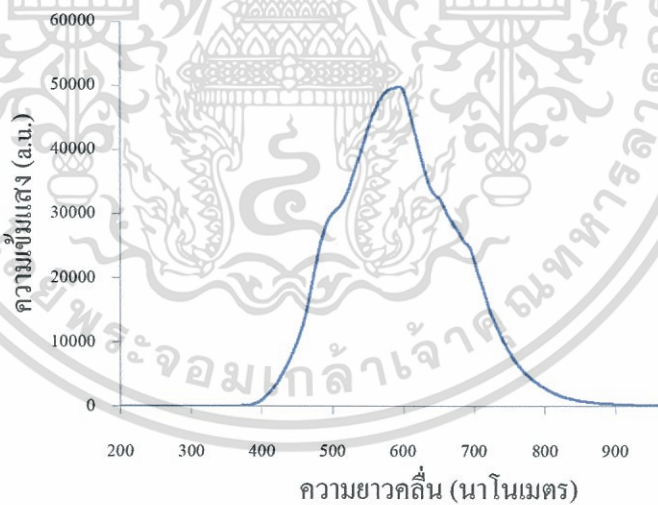
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์จะมีส่วนประกอบของระบบดังนี้

1) แหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน (Schott Megalight 100) ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 0.19 แอมแปร์ ดังภาพที่ 3.6 ซึ่งสเปกตรัมแสงที่ได้จากการวัดเป็นดังภาพที่ 3.7 ให้แสงในย่านความยาวคลื่น 400-900 นาโนเมตร



ภาพที่ 3.6 เครื่องฉายแสงจากหลอดไฟทั้งสแตน



ภาพที่ 3.7 สเปกตรัมแสงของหลอดไฟทั้งสแตน

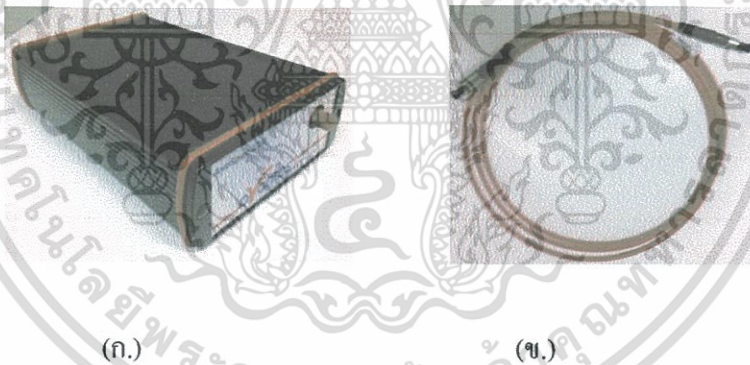
2) สายใยแก้วนำแสงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรสำหรับนำส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ ดังภาพที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



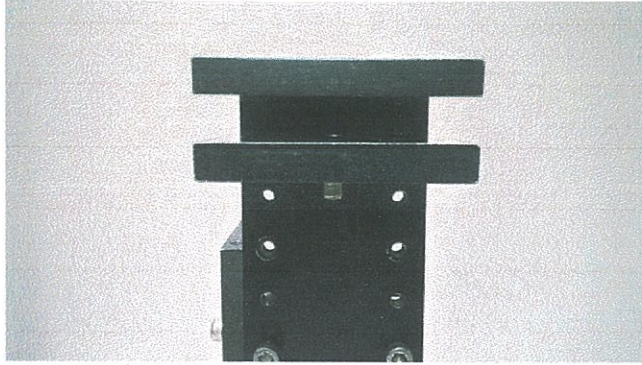
ภาพที่ 3.8 สายใยแก้วนำแสงสำหรับนำส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังแผ่นรวมแสง

3) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (UV-Vis spectrometer Avantesvaspec-EDU) พร้อมสายใยแก้วนำแสง (Avantes FC-UV200-2) ลักษณะดังภาพที่ 3.9 (ก) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ทำหน้าที่ในการวัดแสง ซึ่งสามารถวัดแสงได้ในย่านความยาวคลื่น 200 – 1100 นาโนเมตรและสายใยแก้วนำแสงทำหน้าที่ในการนำส่งแสงที่ผ่านแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนส์เข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ สายใยแก้วนำแสงมีขนาดความยาว 2 เมตรและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 3.9 (ข)



ภาพที่ 3.9 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (ก.) และสายใยแก้วนำแสง (ข.)

4) อุปกรณ์จับยึด ทำหน้าที่ในการจับยึดสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 เส้น โดยมีลักษณะดังภาพที่ 3.10 ซึ่งอุปกรณ์จับยึดจะมีช่องว่างอยู่กึ่งกลางระหว่างตัวยึดสายใยแก้วนำแสงสำหรับเป็นช่องใส่แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนส์



ภาพที่ 3.10 อุปกรณ์จับยึดสายใยแก้วนำแสง

3.3.2 ระบบการตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์สำหรับแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์

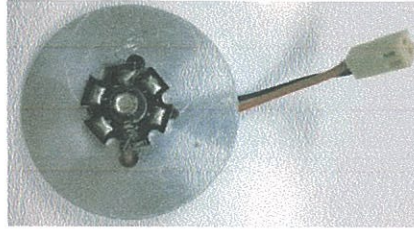
การวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงจะสามารถทำได้โดยอาศัยระบบวัดดังภาพที่ 3.11 โดยผู้วิจัยจะทำการฉายแสงในย่านที่แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์มีการดูดกลืนแสงได้สูงให้กับแผ่นรวมแสงและวัดปริมาณแสงที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากบริเวณขอบของแผ่น



ภาพที่ 3.11 ระบบการวัดความเข้มแสงลูมิเนสเซนซ์ของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์

ระบบการตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์สำหรับแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์จะมี ส่วนประกอบของระบบดังนี้

- 1) แหล่งกำเนิดแสงสำหรับใช้ในการกระตุ้นสารเรืองแสง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode: LED) เป็นตัวกระตุ้นและไดโอดเปล่งแสงจะถูกยึดติดกับ อุปกรณ์ระบายความร้อนลักษณะดังภาพที่ 3.12 เป็นแสงสีเทียวความยาวคลื่นสูงสุด 525 นาโนเมตร

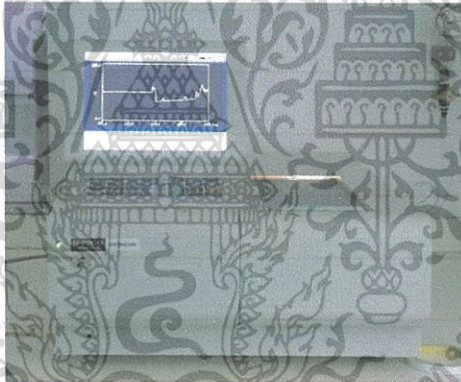


ภาพที่ 3.12 ไดโอดเปล่งแสงกับอุปกรณ์ระบายความร้อน

- 2) สเปกโตรมิเตอร์และสายใยแก้วนำแสง
- 3) แท่นสำหรับวางฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์

3.3.3 ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของควอนตัมดอท PbS

ในการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารควอนตัมดอท PbS นั้น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงเบื้องต้นคือคุณสมบัติการดูดกลืนแสง โดยผู้วิจัยได้ใช้เครื่อง UV-VIS Spectrometer ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

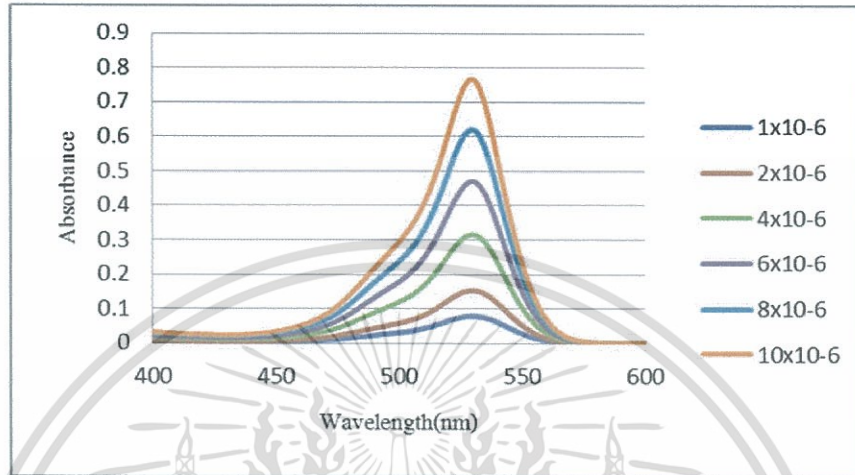


ภาพที่ 3.13 เครื่อง UV-VIS Spectrometer

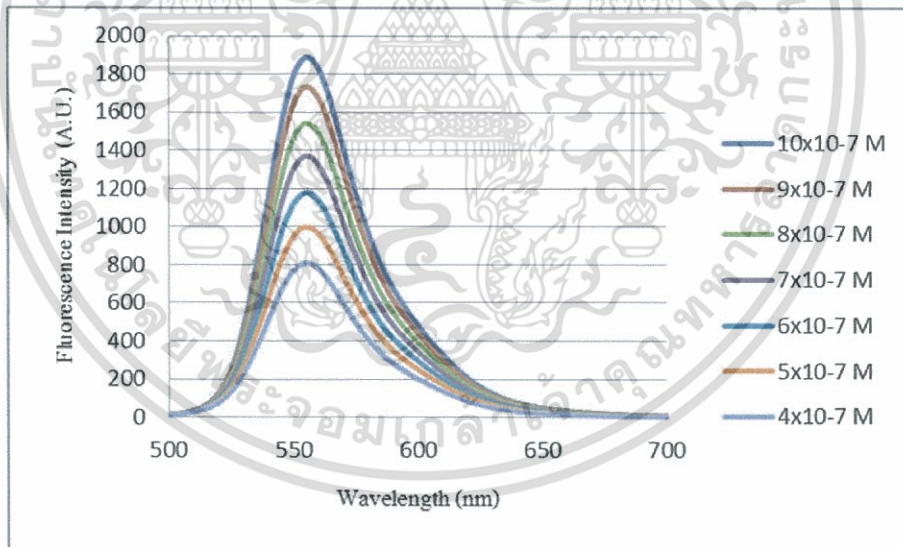
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของแผ่นรวมแสง R6G



ภาพที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง R6G



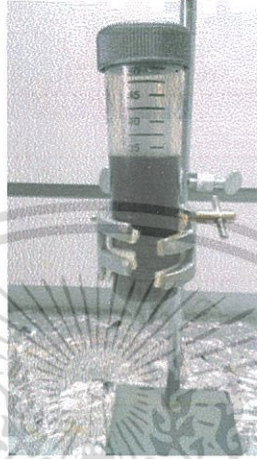
ภาพที่ 4.2 สเปกตรัมการเปล่งแสงของฟิล์มบาง R6G

การศึกษาคูสมบัติทางแสงของแผ่นรวมแสง R6G โดยการศึกษาการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสง จากการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารที่เจือในแผ่นรวมแสงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นดังภาพที่ 4.1 และค่าการเปล่งแสงก็มีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

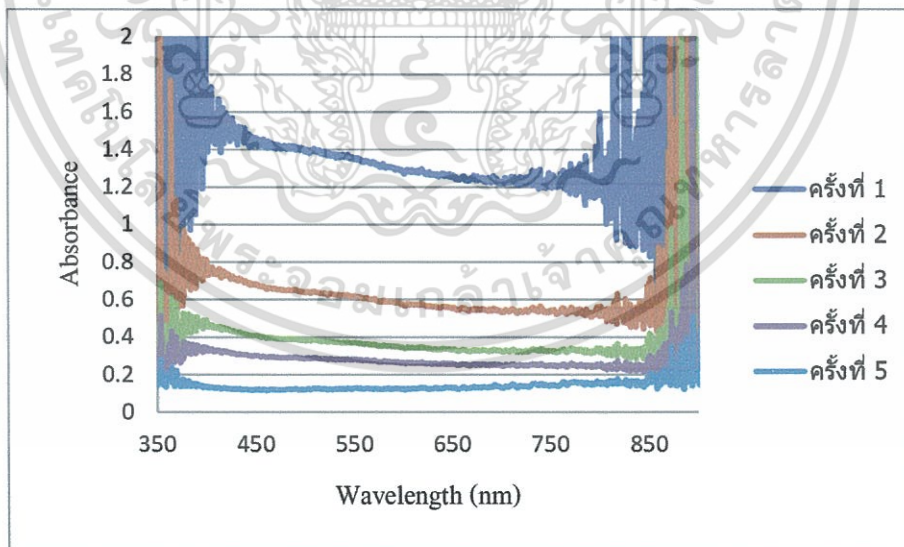
ภาพที่ 4.2 ทำให้เห็นการสร้างแผ่นรวมแสงด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยงสามารถสร้างได้จริงผู้วิจัยจึงได้ทำการสังเคราะห์สารควอนตัมดอทเพื่อมาใช้ทดลองสร้างแผ่นรวมแสงด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของควอนตัมดอท PbS



ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างสารควอนตัมดอท PbS ที่สังเคราะห์ได้

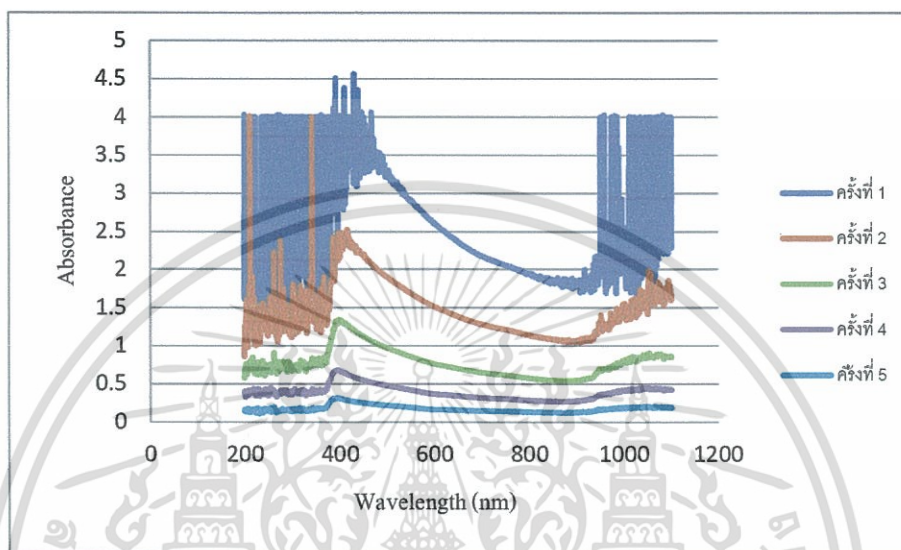
จากการทดลองสังเคราะห์ควอนตัมดอท PbS ด้วยวิธีการนี้ครุ่นพบว่าสารที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น มีสีน้ำตาลเข้ม



ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของควอนตัมดอท PbS เส้นข้อที่ 1 ที่ถูกวัดโดยเครื่อง (UV-Vis spectrometer Avantesavaspec-EDU)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.4 เป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของควอนตัมดอท PbS ที่ถูกวัดโดยเครื่อง (UV-Vis spectrometer Avantesavaspec-EDU) โดยผู้วิจัยเลือกเงื่อนไขในการทดลองคืออุณหภูมิของ $PbCl_2$ มีอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และเมื่อนำไปฉีดรวมกับกำมะถันทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 20 นาที จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะพบว่ายังไม่เห็นค่าการดูดกลืนที่ชัดเจนทำให้ไม่สามารถไปคำนวณหาขนาดของดอทที่เกิดขึ้นได้ แล้วยังส่งผลให้ยังไม่สามารถนำไปสร้างเป็นแผ่นรวมแสงได้

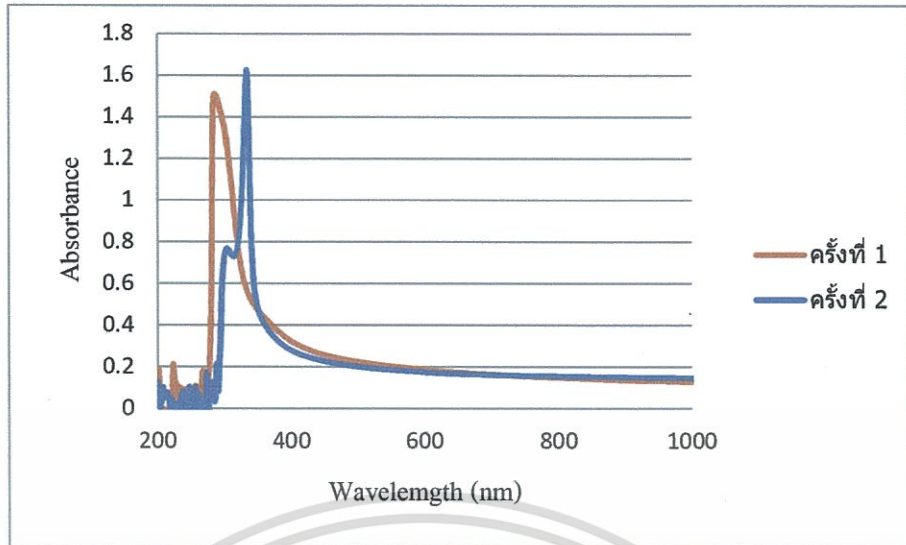


ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของควอนตัมดอท PbS เงื่อนไขที่ 2 ที่ถูกวัดโดยเครื่อง (UV-Vis spectrometer Avantesavaspec-EDU)

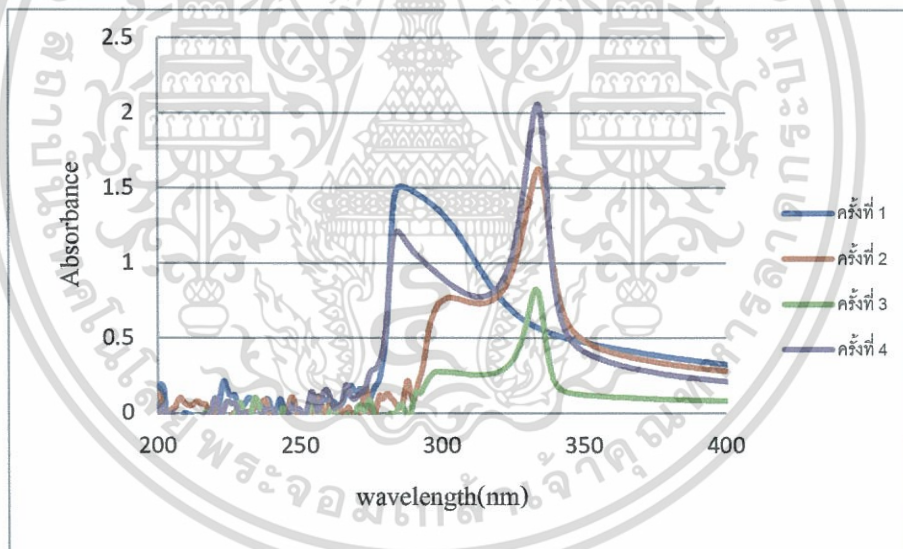
จากภาพที่ 4.5 เป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของควอนตัมดอท PbS ที่ถูกวัดโดยเครื่อง (UV-Vis spectrometer Avantesavaspec-EDU) โดยผู้วิจัยเลือกเงื่อนไขในการทดลองคืออุณหภูมิของ $PbCl_2$ มีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และเมื่อนำไปฉีดรวมกับกำมะถันทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 20 นาที จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะพบว่ายังไม่เห็นค่าการดูดกลืนจะอยู่ประมาณ 400 นาโนเมตร แต่เมื่อเทียบกับทฤษฎีหรืองานวิจัยที่ผู้วิจัยได้เลือกมาใช้นั้นพบว่ายังไม่ใช่ค่าการดูดกลืนที่ถูกต้องจึงทำให้ไม่สามารถนำสารที่สังเคราะห์ได้นั้นไปสร้างเป็นแผ่นรวมแสง

เนื่องจากสารที่สังเคราะห์มาได้นั้นยังไม่ใช่ควอนตัมดอท PbS ที่ผู้วิจัยต้องการผู้วิจัยจึงเปลี่ยนเงื่อนไขในการทดลองโดยเลือกอุณหภูมิของ $PbCl_2$ ให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเลือกเป็น 120 และ 150 องศาเซลเซียส โดยใช้เป็นเงื่อนไขที่ 1 และเงื่อนไขที่ 2 ตามลำดับและใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในการวัดค่าการดูดกลืนแสง เนื่องจากสามารถวัดได้ในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างตั้งแต่ 200-1000 นาโนเมตร โดยผลการทดลองเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารควอนตัมดอท PbS เส้นใยที่ 1
ที่วัดโดยเครื่อง UV-VIS Spectrometer



ภาพที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารควอนตัมดอท PbS เส้นใยที่ 2
ที่วัดโดยเครื่อง UV-VIS Spectrometer

จากภาพที่ 4.6 และภาพที่ 4.7 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารควอนตัมดอทที่สังเคราะห์ได้นั้นยังมีค่าการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 200 -400 นาโนเมตร ซึ่งค่าการดูดกลืนที่ได้
นั้นยังไม่ตรงกับงานวิจัยที่ใช้อ้างอิงหรือใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษากระบวนการสังเคราะห์ควอนตัมดอทที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการจัดเตรียมแผ่นรวมแสงด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง โดยผู้วิจัยได้เลือกการสังเคราะห์สารควอนตัมดอท PbS ด้วยวิธีการฉีดร้อน (Hot injection) และทำการศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสงในงานวิจัยนี้พบว่าสารที่สังเคราะห์ได้นั้นยังไม่ใช่ควอนตัมดอท PbS ที่ต้องการเนื่องจากค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าที่แตกต่างไปมากจากงานวิจัยอ้างอิง การที่สารที่สังเคราะห์มาได้นั้นไม่ใช่ควอนตัมดอท PbS ที่ต้องการอาจเนื่องมาจากในขณะทำการทดลองนั้นมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและควบคุมยากอีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองบางอย่างไม่เหมาะสมกับการทดลอง ดังนั้นการสังเคราะห์ควอนตัมดอท PbS ด้วยวิธีการฉีดร้อนนั้นจึงยังไม่เหมาะสมส่งผลทำให้ไม่สามารถนำสารที่ได้ไปสร้างเป็นแผ่นรวมแสงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้พบข้อจำกัดในการทดลองหลายประการเช่นการควบคุมระบบให้ไม่มีก๊าซออกซิเจนพบว่าควบคุมค่อนข้างยากมากเนื่องจากการปล่อยก๊าซในโครเจนเพื่อไล่ออกซิเจนออกจากระบบต้องทำให้เกิดความต่อเนื่องสม่ำเสมอโดยผู้วิจัยใช้ในโครเจนถึงเดียวควนใช้สองถังเพื่อไล่ออกซิเจนได้ดี อีกทั้งขั้นตอนการฉีดสาร PbCl₂ ลงในกัมมะถันนั้นต้องรีบฉีดและใช้เข็มฉีดยามีคุณภาพมากพอ และในการทดลองพบว่าสารที่ใช้ในการทดลองมีกลิ่นเหม็นทำให้ต้องเปิดสตูดควันเมื่อเปิดแล้วทำให้ควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการนั้นเป็นไปได้ยากเนื่องจากอุณหภูมิจะแกว่งขึ้นลงไม่คงที่

บทที่ 6

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

จากการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ควอนตัมดอท PbS ด้วยวิธีการฉีดร้อน (Hot injection) เพื่อนำสารควอนตัมดอทที่ได้ไปสร้างแผ่นรวมแสง จากการศึกษาพบว่าสารที่ได้นั้นยังไม่ใช่ควอนตัมดอท PbS จึงยังไม่สามารถนำไปสร้างแผ่นรวมแสงได้ ทั้งนี้ผู้วิจัยก็ยังหาข้อผิดพลาดและแนวทางการแก้ไขในการทดลองเพื่อทำการสังเคราะห์ควอนตัมดอทให้ได้ตามที่ต้องการรวมทั้งหาเทคนิคในการสังเคราะห์ควอนตัมดอทที่สอดคล้องกับวัสดุและอุปกรณ์ที่ยังพอมือเหลืออยู่ ในอนาคตถ้าผู้วิจัยสามารถสังเคราะห์ควอนตัมดอท PbS ได้ก็จะสามารถนำไปสร้างเป็นแผ่นรวมแสงเพื่อนำไปใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R.L. Garwin, Rev. Sci. Instrum. 31 (1960) 1010–1011.
- [2] W.H. Weber, J. Lambe, Appl. Opt. 15 (1976) 2299–2300.
- [3] A. Goetzberger, W. Greubel, Appl. Phys. 14 (1977) 123–139.
- [4] C.F. Rapp, N.L. Boling, in: Proceedings of the 13th Photovoltaic Specialists Conference, IEEE, Washington, DC, 1978, pp. 690–693.
- [5] A.P. Alivisatos, J. Phys. Chem. 100 (1996) 13226–13239.
- [6] S.V. Gaponenko, Optical Properties of Semiconductor Nanocrystals, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998.
- [7] M. Bruchez Jr., M. Moronne, P. Gin, S. Weiss, A.P. Alivisatos, Science 281 (1998) 2013–2016.
- [8] Iwan M, Karel L, Dries S, David D M, Tom N, Jose' C. M., Frank V, Andre' V, Christophe D, Guy A, Zeger H. ACSNANO .10 (2009) 3023–3030.
- [9] 2016. **ควอนตัมดอท**[online]. Available. <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit3-9.html>
- [10] W.H. Weber and J. Lambe. Applied Optics. 15 (1976), 2299-2300.
- [11] Wichayaporn S. “Enhancing the performance of solar cells with luminescent materials”
- [12] A.J.Chatten et. al. “The quantum dot concentrator theory and results” 3rd World conference on photovoltaic energy conversion 2003 May
- [13] 2016. **Rhodamine_6G** [online]. Available http://en.wikipedia.org/wiki/Rhodamine_6G
- [14] 2016. **Dichloromethane** [online]. Available. <http://en.wikipedia.org/wiki/Dichloromethane>
- [15] 2016. กลุ่มบริษัท ศรีเทพไทย 2557. เม็ดพลาสติก[online]. Available: [http:// www.srithepthai.com/](http://www.srithepthai.com/)
- [16] 2014. **Poly(methyl methacrylate)**[online]. Available http://en.wikipedia.org/wiki/Poly%28methyl_methacrylate%29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

รายการ ใช้จ่ายเงิน	จำนวนเงิน (บาท)
ซื้อวัสดุอุปกรณ์ครั้งที่ 1	14,395.78
ซื้อวัสดุอุปกรณ์ครั้งที่ 2	145
ซื้อวัสดุอุปกรณ์ครั้งที่ 3	550
ซื้อวัสดุอุปกรณ์ครั้งที่ 4	13,939
ซื้อวัสดุอุปกรณ์ครั้งที่ 5	6,013.40
ซื้อวัสดุอุปกรณ์ครั้งที่ 6	14,000
ค่าจ้างเก็บข้อมูล	800
ค่าทำรายงาน	200
รวม	50,043.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายวิฑูรย์ ยืนดีสุข

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2545
วท.ม.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2548
Ph.D.	Engineering Science	The University of Electro-communications	2556

ผลงานวิจัย

J. Nukeaw, K. Upprakhot, S. Rahong, B. Tonhoo and W. Yindeesuk, Physica E 21(2004), p. 1070.

W. Pecharapa, A. Keawprajak, N. Kayunkid, S. Rahong, W. Yindeesuk and J. Nukeaw, Mater. Sci. & Eng. B 123 (2005), p. 163.

W. Pecharapa, A. Keawprajak, N. Kayunkid, S. Rahong, W. Yindeesuk and J. Nukeaw, ScienceAsia. 32 (2006), p. 223.

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นางภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2540
วท.ม.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2545
Ph.D.	Engineering Materials	University of Southampton	2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย

Pattareeya Kittidachachan, Wichayaporn Soonpanich, Badin Damrongsak, Improved Light Harvesting in N719 Sensitized Nanocrystalline TiO₂Solar Cells with Coumarin 6 Dye, *Energy Procedia*, 152–156, 2014.

S. Rujihan, P. Kittidachachan, and B. Damrongsak, Prototype Microfluidic System for Fluorescence-based Chemical Sensing, *Proceeding of Siam Physics Congress 2013*, March 21-23, 2013.

S. Rujihan, P. Kittidachachan, and B. Damrongsak, Low-cost Fabrication of Masters for Plastic-Based Microfluidic Devices, *Thai Journal of Physics, Series 8*, 2012.

W. Soonpanich, U. Asawapirom, A. Keawprajak, and P. Kittidachachan, Spectral Down-Conversion for Dye Sensitized Solar Cells using Coumarin 6, *Thai Journal of Physics, Series 8*, 2012.

T. Kaewon, A. Chomna, P. Saowaros, P. Khunrungrueng, P. Kittidachachan, T. Taoladda, and B. Damrongsak, Development of Optical Beam Deflection Detection System for Microcantilever-Based Sensors, *Thai Journal of Physics, Series 8*, 2012.

วิชาพร สุญพานิช, ภัทรียา กิตติเดชาชาญ, อุคม อัสวาภิรมย์ การศึกษาผลการใช้ฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์ต่อการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์, *Proceeding of the 7th Conference on Energy Network of Thailand*, 557-561, 3-5 พฤษภาคม 2554.

P.Kittidachachan, T. Markvart and L. Danos, Solar Cell Assembly, *International PCT Patent*, Patent number WO2011/042708, April 2011.

W. Soonpanich, U. Asawapirom, and P. Kittidachachan, Development of luminescence multilayer films for photovoltaic application, *Thai Journal of Physics, Series 7*, 2011.

วิชาพร สุญพานิช, สุกฤต สมุทรระกพงษ์, ภัทรียา กิตติเดชาชาญ การศึกษาการรวมแสงของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนส์ นำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, 5-7 พฤษภาคม 2553

P. Kittidachachan, B. Damrongsak, Low cost spectral response measurement system using high power LEDs, *Thai Journal of Physics, Series 6*, 2010.

P. Kittidachachan and W. Thowladda. Use of organic dyes to modify solar spectrum, Proceeding of the 6th International conference on advanced materials, 138-143, 2009.

P. Kittidachachan, T. Markvart, D.M. Bagnall, R. Greef, and G.J. Ensell. A detailed study of pn junction solar cells by means of collection efficiency. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2007; 91: 160–166. JIF impact factor 2.321

P. Kittidachachan, L. Danos, T.J.J. Meyer, N. Alderman, and T. Markvart. Photon collection efficiency of fluorescent solar collectors. *CHIMIA* 2007; 61: 780-786. JIF impact factor 0.517

P. Kittidachachan, T. Markvart, G.J. Ensell, R. Greef, and D.M. Bagnall. An analysis of a 'dead layer' in the emitter of $n^+/p/p^+$ solar cells. In Conference Record of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pages 1103–1106, Orlando, Florida, USA, 2005.

T. Markvart, L. Danos, P. Kittidachachan, and R. Greef. Detailed balance efficiency of ideal single-stage fluorescent collectors. In 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pages 171–174, Barcelona, Spain, 2005.

P. Kittidachachan, L. Danos, R. Greef, T.J.J. Meyer, N. Alderman, and T. Markvart. Characterisation of fluorescent collectors in terms of spectral photon collection efficiency. In 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, 2007.

P. Kittidachachan, N. Sangkeaw, A. Wichianchai. Barrier Height of Metal-Semiconductor Contacts Measurement System. In 27th Congress on Sciences and Technology of Thailand, Prince of Songkla University, 16-18 October 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้