

รายงานการวิจัย

การพัฒนาแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์สำหรับแปลงพลังงานแสงอาทิตย์

Development of planar fluorescent collectors for solar energy conversion



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 120223  
วัน, เดือน, ปี...๑.๐.๖๖...๒๕๕๕

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๒

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

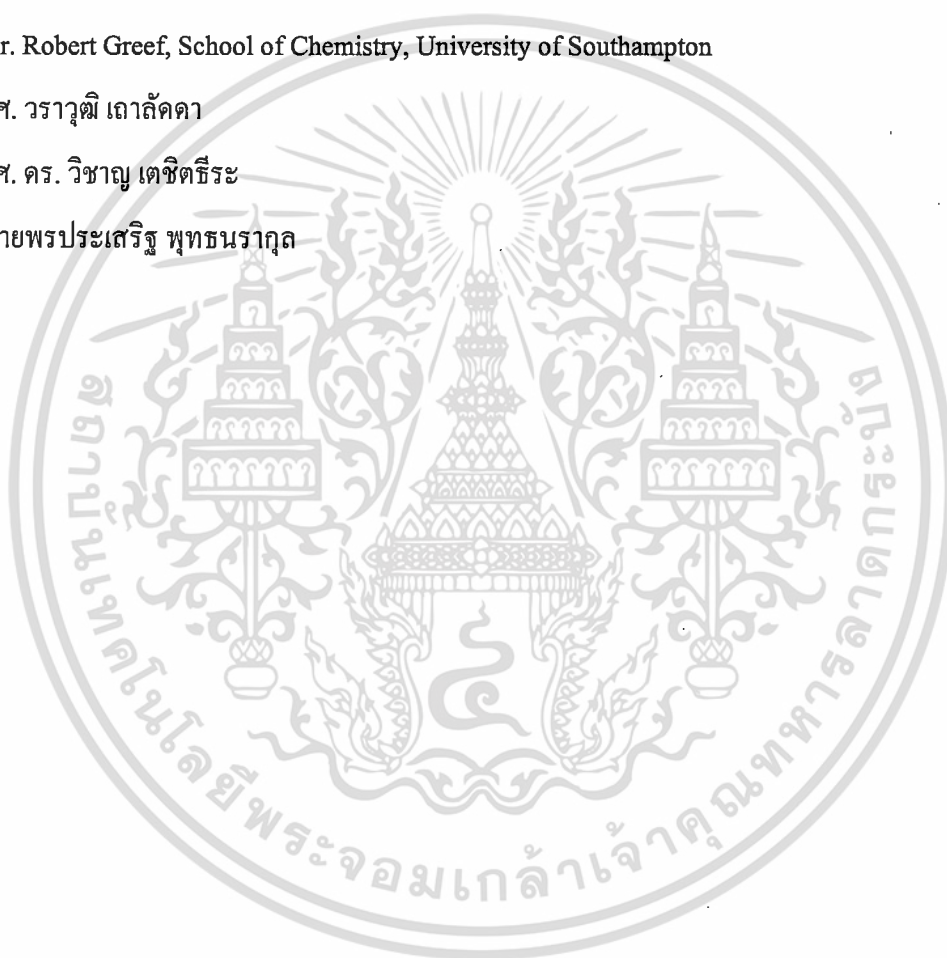
b. 12๓๓๘๐๖๐  
i. ....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปี 2552 และได้รับความร่วมมือและความอนุเคราะห์จากบุคลากรหลายท่านดังนี้

1. Prof. Tom Markvart, School of Engineering Sciences, University of Southampton
2. Dr. Lefteris Danos, School of Engineering Sciences, University of Southampton
3. Dr. Robert Greef, School of Chemistry, University of Southampton
4. รศ. วราวุฒิ เถลัดดา
5. รศ. ดร. วิชาญ เตชิตธีระ
6. นายพรประเสริฐ พุทธนรากุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการ

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์สำหรับแปลงพลังงานแสงอาทิตย์  
(ภาษาอังกฤษ) Development of planar fluorescent collectors for solar energy conversion

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์

ประจำปี 2552 จำนวนเงิน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2551 ถึง 30 กันยายน 2552

หน่วยงานและผู้ดำเนินการวิจัยพร้อมหน่วยงานที่สังกัดและเลขหมายโทรศัพท์

ดร. ภทรียา กิตติเดชาชาญ

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-7373000 ต่อ 6207 โทรสาร 02-3264413

ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ kkpattar@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ถูกจัดทำขึ้น โดยมีเป้าหมายในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนโดยใช้แผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ แผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ประกอบไปด้วยวัสดุตัวกลางโปร่งแสงที่ถูกเจือด้วยวัสดุฟลูออเรสเซนต์ เมื่อแสงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ จะถูกวัสดุฟลูออเรสเซนต์ซึ่งถูกเจืออยู่ในแผ่นรวมแสงดูดกลืน ภายหลังจากกระบวนการดูดกลืน วัสดุฟลูออเรสเซนต์ จะปลดปล่อยแสงออกมาทุกทิศทาง แสงส่วนใหญ่ที่ถูกปลดปล่อยจะถูกกักอยู่ในแผ่นด้วยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดและเคลื่อนผ่านมายังบริเวณขอบแผ่น และถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้เราได้จัดเตรียมแผ่นรวมแสงจากวัสดุโพลีเอสเตอร์เรซิน สาร Rhodamine 6G (Rh6G) และสาร Coumarin 153 (C153) โดยกระบวนการ casting วัสดุโพลีเอสเตอร์เรซินทำหน้าที่เป็นวัสดุตัวกลางและสาร Rh6G และ C153 ทำหน้าที่ดูดกลืนและปลดปล่อยแสง แผ่นรวมแสงจะถูกจัดเตรียมให้มีขนาดและความเข้มข้นของสารเรืองแสงที่แตกต่างกัน เราได้ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนและการเรืองแสงของแผ่นวัสดุ และความสามารถในการเพิ่มค่ากระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ภายหลังจากนำมาประกอบที่บริเวณขอบของแผ่น เราพบว่าแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์สามารถช่วยเพิ่มกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยมีกำลังขยายประมาณ 2.4 เท่า

## ABSTRACT

The goal of this project was to investigate the concept of using fluorescent collectors to increase the efficiency of silicon photovoltaic cells. Fluorescent collectors consist of transparent sheets doped with organic dyes, sunlight is absorbed by the dye and then re-radiated isotropically ideally with high quantum efficiency, and trapped in the sheet by internal reflection. The trapped light is converted to electricity at the edge of the sheet by a solar cell. In our experiment work, we attempted to prepare fluorescent collectors from Polyester Resin, Rhodamine 6G (Rh6G) and Coumarin 153 (C153) by casting method. The polyester resin performed its function as a matrix material and the Rh6G and C153 performed their functions as absorber and fluorescent materials. The samples with different sizes and concentrations were prepared and tested for their absorbance and fluorescence spectra. The electrical performances of the silicon solar cell coupled to an edge of the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

fluorescent collectors were also characterized. It was found that the fluorescent collectors can make a great impact on the short current of the solar cells. The maximum relative current gain was found to be about 2.4. We suggest that this concept is worthy of further study.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
รายละเอียดเกี่ยวกับ โครงการ	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ก
สารบัญเรื่อง	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผลของ โครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของ โครงการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของ โครงการวิจัย	2
1.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	2
1.5.1 หลักการเบื้องต้น	2
1.5.2 การดูดกลืนแสง	3
1.5.3 การเปล่งแสงชนิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์	4
1.5.4 การเคลื่อนที่ของแสงภายในแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์	7
1.5.5 การแปลงพลังงานทางแสงเป็นพลังงานทางไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์	9
1.5.6 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์	11
บทที่ 2 วิธีการดำเนินการวิจัย	12
2.1 การพัฒนากระบวนการเตรียมแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์	12
2.2 การพัฒนาความเข้มข้นที่เหมาะสมให้แก่แผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์	15
2.3 การศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนและการเรืองแสงของแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G	15
2.4 การศึกษาผลการวัดเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อใช้ร่วมกับแผ่นรวมแสง	16
2.5 การพัฒนาแผ่นรวมแสง โดยการเจือสาร Coumarin 153	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ผลการวิจัยและอภิปราย	19
3.1 การศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนของแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G	19
3.1.1 การจัดวางอุปกรณ์และขั้นตอนการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง	19
3.1.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้นต่างกัน	20
3.1.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ความหนาต่างกัน	21
3.2 การศึกษาสเปกตรัมการเรืองแสงของแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G	21
3.2.1 การจัดวางอุปกรณ์และขั้นตอนการวัดสเปกตรัมการเรืองแสง	21
3.2.2 สเปกตรัมการเรืองแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้นต่างกัน	22
3.2.3 สเปกตรัมการเรืองแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ความหนาต่างกัน	23
3.3 การทดสอบแผ่นรวมแสงกับเซลล์แสงอาทิตย์	24
3.3.1 สภาพตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์	24
3.3.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของแผ่นรวมแสงต่อกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์	25
3.3.3 การศึกษาผลของความหนาของแผ่นรวมแสงต่อกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์	27
3.4 ผลการพัฒนาแผ่นรวมแสงโดยการเจือสาร Coumarin 153	29
3.4.1 กระบวนการเตรียมสารละลาย	29
3.4.2 กระบวนการสร้างแผ่นรวมแสง	29
3.4.3 กระบวนการวัดคุณสมบัติของแผ่นรวมแสง	29
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	31
บรรณานุกรม	33
ภาคผนวก	34

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาชีวิตของกระบวนการโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ โมเลกุล	7
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของสาร Rhodamine 6G	14
ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของสาร Coumarin 153	14
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสภาพตอบสนองของโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์	24
ตารางที่ 3.2 แสดงผลการวัดกระแสลัดวงจรของแผ่นรวมแสงที่ความเข้มข้นต่างกัน	26
ตารางที่ 3.3 แสดงผลการวัดกระแสลัดวงจรของแผ่นรวมแสงที่ความหนาต่างกัน	27
ตารางที่ 3.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ของกระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นของแผ่นรวมแสงที่เจือสาร	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์	2
รูปที่ 1.2 การประยุกต์ใช้แผ่นรวมแสงกับเซลล์แสงอาทิตย์	3
รูปที่ 1.3 แผนภาพแสดงการหมุนของอิเล็กตรอนในสถานะต่างๆ	4
รูปที่ 1.4 แผนภาพแสดงการดูดกลืนและการปลดปล่อยแสงรูปแบบต่างๆ	5
รูปที่ 1.5 แผนภาพแสดงการหักเหและการสะท้อนกลับหมดตามมุมที่ตกกระทบ	8
รูปที่ 1.6 แสดงสเปกตรัมของการดูดกลืนและการปลดปล่อยของแสง	9
รูปที่ 1.7 แผนภาพแสดงลักษณะของรอยต่อพี – เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสง	10
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์	12
รูปที่ 2.2 สเปกตรัมการดูดกลืนและการเรืองแสงของสาร Rhodamine 6G	13
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของสาร Rhodamine 6G	14
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสาร Coumarin 153	14
รูปที่ 2.5 แสดงการจัดระบบวัดของการวัดแผ่นรวมแสงด้วยเซลล์แสงอาทิตย์	17
รูปที่ 3.1 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการวัดสเปกตรัมการดูดกลืน	19
รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและความยาวคลื่นของแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G ขนาด 2x2 เซนติเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร ด้วยความเข้มข้นที่ต่างกัน	20
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นของแผ่นรวมแสง ขนาด 3x3 เซนติเมตร ความเข้มข้น 10-3 โมลาร์ ที่ความหนาต่างกัน	21
รูปที่ 3.4 แสดงระบบของการวัดสเปกตรัมการเรืองแสง	22
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนซ์และความยาวคลื่นของแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G ขนาด 2x2 เซนติเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร ด้วยความเข้มข้นที่ต่างกัน	22
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่าการเรืองแสงและความยาวคลื่นของแผ่นรวมแสงขนาด 3x3 เซนติเมตร ความเข้มข้น 10-3 M ที่ความหนาต่างกัน	23
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสภาพตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่ามาตรฐานของสเปกตรัมการดูดกลืนและการเรืองแสงของแผ่นรวมแสงและสภาพการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์	27
รูปที่ 3.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแผ่นรวมแสงและกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์	28
รูปที่ 3.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นรวมแสงและกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์	29
รูปที่ 3.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนของแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Courmarin 153	31
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงสเปกตรัมการดูดกลืน, สเปกตรัมการเรืองแสงและสเปกตรัม AM 1.5	33

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย

การพัฒนาแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent collector) สำหรับใช้แปลงพลังงานแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์เป็นงานวิจัยหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจจากนักวิจัยหลายกลุ่ม ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์สามารถเพิ่มโอกาสในการลดต้นทุนการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนได้ [2-6]

ถึงแม้ว่าผลคำนวณเชิงทฤษฎีจะชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์สามารถมีค่าสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ แต่ประสิทธิภาพของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ที่พัฒนาได้ในเชิงปฏิบัติ นั้นยังมีค่าค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากด้วยสาเหตุหลายประการ อาทิเช่น การดูดกลืนแสงที่ปลดปล่อยออกมาซ้ำๆ ภายในแผ่น (self-absorption) การสูญเสียแสงผ่านบริเวณผิวหน้าของแผ่นรวมแสง (escape cone losses) เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์อย่างจริงจังรวมถึงศึกษาหาวิธีและกระบวนการเพื่อลดการสูญเสียดังกล่าว

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนากระบวนการจัดสร้างแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์และศึกษาคุณสมบัติทางแสงของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ที่จัดเตรียมขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้จะส่งผลให้เกิดการพัฒนาทางเทคโนโลยีในการผลิตแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์เพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ และการประยุกต์ใช้แผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์กับเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะสามารถส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ลดต่ำลงได้

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการในการจัดสร้างแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์
2. เพื่อจัดสร้างแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์จากวัสดุเรืองแสงที่มีอยู่ในปัจจุบัน
3. เพื่อพัฒนาระบบในการวัดหาคุณสมบัติเชิงแสงของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ที่จัดเตรียมขึ้น

#### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. จัดเตรียมแผ่นวัสดุรวมแสงฟลูออเรสเซนต์จากวัสดุเรืองแสงจากวัสดุเรืองแสงที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยจะเน้นการจัดสร้างจากวัสดุใน 2 กลุ่มหลักคือ Rhodamine และ Coumarin
2. วัดหาคุณสมบัติเชิงแสงของชิ้นงานที่จัดเตรียมขึ้นดังนี้ สเปกตรัมการดูดกลืนและการปลดปล่อยแสงของวัสดุ

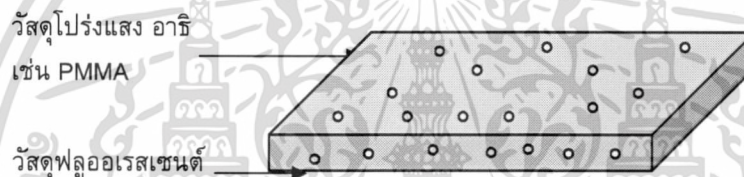
#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

โครงการนี้มุ่งเน้นพัฒนาและศึกษาคุณสมบัติของแผ่นวัสดุรวมแสงฟลูออเรสเซนต์เพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ การศึกษาวิจัยนี้สามารถส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ลดต่ำลงได้ ดังนั้นโอกาสที่แหล่งพลังงานทางเลือกชนิดนี้จะถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางจึงมีสูงขึ้น

#### 1.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

##### 1.5.1 หลักการเบื้องต้น

แผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์จัดว่าเป็นอุปกรณ์ทางแสงชนิดหนึ่งที่ใช้รวมแสงเพื่อให้แสงที่ตกกระทบบริเวณผิวหน้าของแผ่นมีความเข้มแสงสูงขึ้น ลักษณะโดยทั่วไปของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์จะประกอบไปด้วยวัสดุที่โปร่งแสงซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุในการยึดเกาะวัสดุฟลูออเรสเซนต์ไว้ (ดูรูปที่ 1)



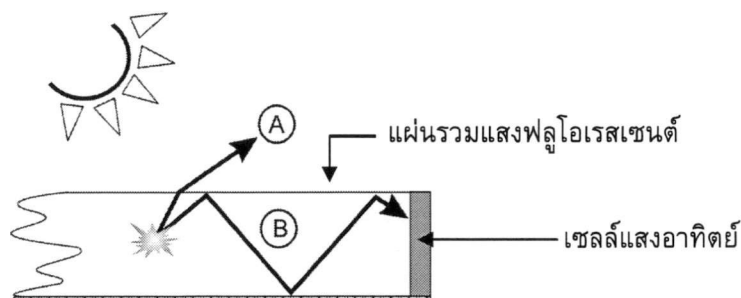
รูปที่ 1.1 โครงสร้างแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์

เมื่อแสงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ จะถูกวัสดุฟลูออเรสเซนต์ซึ่งถูกเจืออยู่ภายในแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ดูดกลืน โดยขณะที่แสงถูกดูดกลืนนั้นจะขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้ในการจัดสร้างแผ่นรวมแสง ภายหลังจากกระบวนการดูดกลืน วัสดุฟลูออเรสเซนต์จะปลดปล่อยแสงออกมาทุกทิศทาง (isotropic) แสงส่วนใหญ่ที่ถูกปลดปล่อยจะถูกกักอยู่ในแผ่นด้วยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมด (total internal reflection) และเคลื่อนผ่านมายังบริเวณขอบแผ่น แสงที่บริเวณขอบนี้จะมีความเข้มแสงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแสงที่ตกกระทบบริเวณผิวหน้าแผ่น โดยระดับของความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น ( $C$ ) จะสัมพันธ์กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของแผ่น ( $A_p$ ) และพื้นที่บริเวณขอบแผ่น ( $A_e$ )

$$C = \frac{A_f}{A_e} \quad (1)$$

สำหรับการประยุกต์ใช้แผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์กับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดต้นทุนการผลิตนั้น สามารถกระทำได้โดยการนำแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์มาประกบกับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 การประยุกต์ใช้แผ่นรวมแสงกับเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปจะเห็นว่าแสงที่เดินทางมาถึงบริเวณขอบแผ่น (แสง B) นั้นจะถูกส่งผ่านมายังเซลล์แสงอาทิตย์ และเนื่องจากความเข้มของแสงบริเวณขอบนั้นมีค่าสูงจึงสามารถเพิ่มการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ในย่านความยาวคลื่นดังกล่าวนั่นเอง

### 1.5.2 การดูดกลืนแสง

เมื่อมีแสงมากตกกระทบที่ผิวหน้าของแผ่นรวมแสง แสงบางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ บางส่วนจะเกิดการทะลุผ่านแผ่นรวมแสงออกไปและบางส่วนจะถูกดูดกลืนด้วยโมเลกุลของสารเรืองแสง พิจารณากรณีฉายแสงความเข้ม  $I_0$  บนแผ่นรวมแสงซึ่งมีความหนา  $x$  ปริมาณของแสงที่ถูกส่งผ่านออกมา ( $I$ ) จะแปรผันกับระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในเนื้อวัสดุดังสมการ

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (2)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

$x$  คือความหนาของวัสดุ

จากสมการที่ (2) จะเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ซึ่งปริมาณของแสงที่โมเลกุลสารเรืองแสงดูดกลืนเข้าไปจะใช้เป็นแหล่งพลังงานในการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในอะตอมของโมเลกุลสารเรืองแสงไปอยู่ที่ระดับชั้นพลังงานสูงขึ้น ซึ่งก็คือกระตุ้นไปยังสถานะกระตุ้นอิเล็กตรอนในสถานะดังกล่าวจะตกกลับลงมายังสถานะพื้นเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล การตกกลับลงมายังอิเล็กตรอนจากสถานะกระตุ้นไปยังสถานะพื้นจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งสิ่งที่เราสนใจคืออิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาในรูปของพลังงานแสง เราเรียกการปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบนี้ว่า ลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence) หรือการเปล่งแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5.3 การเปล่งแสงชนิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

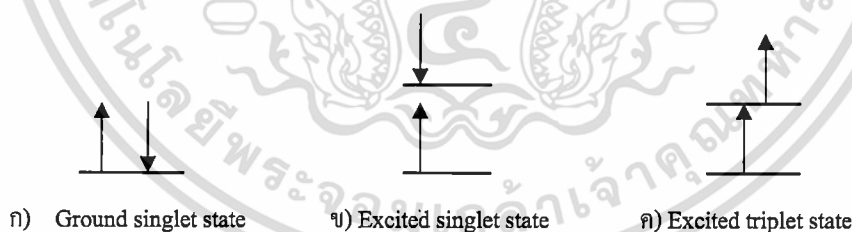
ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณากลไกการเปล่งแสงชนิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญของการแปลงพลังงานแสงของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์ การเปล่งแสงชนิดนี้จะมีแสงหรือโฟตอนเป็นแหล่งพลังงานในการกระตุ้นโมเลกุล การเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ยังสามารถแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ชนิด คือการวาวแสงหรือฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) และการเรืองแสงหรือฟอสฟอรัสเซนซ์ (Phosphorescence)

#### 1.5.3.1 กระบวนการกระตุ้น (Excitation)

โมเลกุลทั่วไปจะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ ที่สถานะพลังงานต่ำสุดหรือสถานะพื้นอิเล็กตรอนจะอยู่เป็นคู่ในออร์บิทัลและมีทิศทางการหมุนตรงกันข้ามกัน ดังรูปที่ 1.3 ถ้า  $M$  คือ Molecular multiplicity ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึง Orbital angular momentum ของแต่ละสถานะมีค่า

$$M = 2S + 1 \quad (3)$$

เมื่อ  $S$  คือ Spin Quantum number ของโมเลกุลและเป็นผลรวมของการหมุนสุทธิของอิเล็กตรอนในโมเลกุล ซึ่งสารอินทรีย์ส่วนมากจะมีค่า  $S = 0$  เพราะมีจำนวนเป็นคู่และทิศทางตรงกันข้ามกันเพราะฉะนั้นค่า  $M = 1$  มีความหมายว่าเป็นสถานะเดี่ยว (Singlet state) สถานะเดี่ยวที่สถานะพื้นหรือมีพลังงานต่ำสุดจะแทนด้วย  $S_0$  ถ้าเป็นสถานะเดี่ยวที่หนึ่งและที่สองจะเป็น  $S_1$  และ  $S_2$  ตามลำดับ

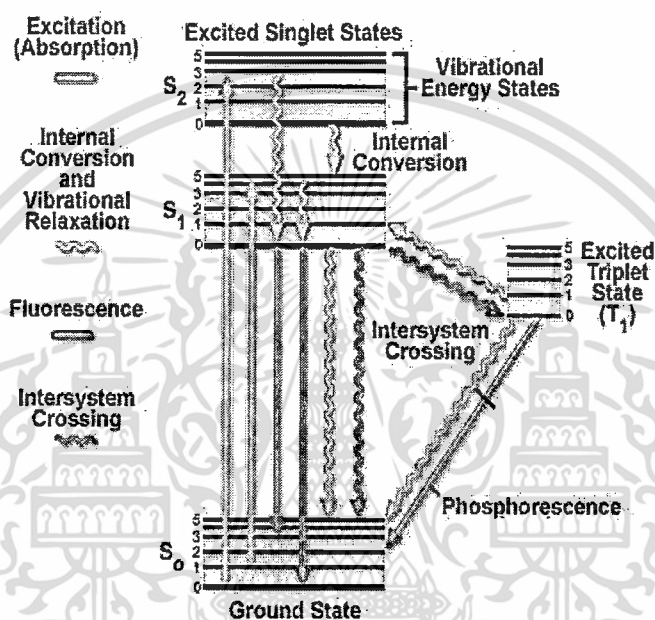


รูปที่ 1.3 แผนภาพแสดงการหมุนของอิเล็กตรอนในสถานะต่างๆ

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นจะทำให้ย้ายจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้ไปที่ระดับพลังงานสูงขึ้น โดยการกระตุ้นนั้นจะมี 2 แบบ คือกระตุ้นไปสถานะเดี่ยวในสถานะพื้น (Excitation singlet state) และสถานะสามในสถานะกระตุ้น (Triplet singlet state) ดังรูปที่ 1.3 (ข) และ 1.3 (ค) ซึ่งในกรณีที่หลังนั้นเกิดจากการการที่อิเล็กตรอนเมื่อถูกกระตุ้นจะมีโอกาสที่จะหมุนกลับทิศทางทำให้ค่า  $S$  เปลี่ยนไปเมื่อมีการหมุนคือ  $S = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$  เพราะฉะนั้นค่า  $M$  จะเป็น 3 มีความหมายว่าสถานะสาม

(Triplet state) ซึ่งสถานะพื้นของสถานะสามหรือสถานะที่มีค่าพลังงานต่ำสุดของสถานะสามจะแทนด้วย  $T_1$  และที่สถานะสามนี้จะไม่พบในสถานะพื้นของโมเลกุลที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นคู่

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นอิเล็กตรอนจะไปอยู่ในสถานะกระตุ้นในช่วงเวลาหนึ่งและจะตกกลับสู่สถานะพื้นหลังการดูดกลืน (Excitation-deexcitation process) เรียกการตกกลับของอิเล็กตรอนนี้ว่า กระบวนการลดระดับพลังงาน (Deexcitation) ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แผนภาพแสดงการดูดกลืนและการปลดปล่อยแสงรูปแบบต่างๆ [7]

### 1.5.3.2 กระบวนการลดระดับพลังงาน (Deexcitation)

โมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะต้องเกิดการตกกลับสู่สถานะพื้นด้วยกระบวนการต่างๆ ได้หลายแบบ ซึ่งหลักๆแล้วสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

- กระบวนการที่ไม่เกิดแสง

#### Vibrational relaxation

เมื่อโมเลกุลได้รับพลังงาน โมเลกุลจะขึ้นไปสู่สถานะพลังงานกระตุ้น ซึ่งมีระดับพลังงานการสั่นหลายค่า เช่น จากรูปที่ 2.3 ชั้นพลังงาน  $S_1$  จะมีระดับพลังงานการสั่น 5 ระดับ เป็นต้น กระบวนการนี้เกิดขึ้นในโมเลกุลที่อยู่ในสารละลาย โมเลกุลนั้นจะเกิดการสูญเสียพลังงานออกมาในรูปของความร้อนที่เกิดจากการสั่นในการชนกับตัวทำละลาย มีผลทำให้ตัวทำละลายมีพลังงานสูงขึ้น

### Internal conversion

กระบวนการนี้จะไม่เกิดการคายพลังงานเพียงแต่จะเกิดการส่งผ่านพลังงานระหว่างโมเลกุล โดยโมเลกุลที่ส่งผ่านกันจะมีค่าพลังงานต่างกันไม่มากนักหรือมีช่วงระดับพลังงานซ้อนทับกัน เช่นการส่งผ่านพลังงานในสถานะ  $S_2$  ไปยังสถานะ  $S_1$  ที่ระดับพลังงานเดียวกัน

### External conversion

กระบวนการนี้เกิดจากการถ่ายเทพลังงานกันระหว่างโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นด้วยตัวเองหรืออาจจะเป็นโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นกับตัวทำละลาย เป็นการลดระดับพลังงานที่มีผลต่อการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ เนื่องจากกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นที่ระดับพลังงานใกล้เคียงกับการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ ถ้ามีการถ่ายเทพลังงานมาก พลังงานที่จะเกิดฟลูออเรสเซนซ์ก็จะเหลือน้อยทำให้เกิดฟลูออเรสเซนซ์น้อย

### Intersystem crossing

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนของโมเลกุลในสถานะกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนทิศทางทางหมุน ซึ่งการที่อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนทิศทางทางหมุนได้ก็คือเมื่อระดับพลังงานการสั่นของสถานะเดี่ยวและระดับชั้นพลังงานการสั่นของสถานะสามในสถานะกระตุ้นตรงกัน (พลังงานเท่ากัน) หรือการแทรกชั้นจันจากสถานะเดี่ยวที่มีระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดไปสู่สถานะสามในสถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานการสั่นมากกว่า

### - กระบวนการที่เกิดแสง

#### ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence)

เมื่อโมเลกุลที่มีพลังงานสูงมากจะผ่านกระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เกิดแสงดังที่กล่าวมาแล้ว จนกระทั่งเมื่ออิเล็กตรอนในโมเลกุลลดระดับพลังงานมาถึงระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดของสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้นจะเกิดการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้น ซึ่งการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้นนี้จะเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของแสงด้วย เรียกว่าการวาวแสงหรือฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งแสงฟลูออเรสเซนซ์นี้เป็นหลักการปลดปล่อยแสงที่นำมาประยุกต์กับแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์

#### ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence)

การคายพลังงานในกระบวนการนี้จะแตกต่างจากการคายพลังงานแบบฟลูออเรสเซนซ์ เนื่องจากฟอสฟอเรสเซนซ์จะเป็นการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานการสั่นต่ำที่สุดของสถานะสามในสถานะกระตุ้น ซึ่งถ้าเป็นฟลูออเรสเซนซ์จะเป็นการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดของสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น

กระบวนการคายพลังงานแบบที่เกิดแสงทั้งสองชนิดจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในย่านความยาวคลื่นที่ยาวกว่าความยาวคลื่นที่มากกระตุ้นโมเลกุล และความยาวคลื่นในการวาวแสงจะสั้นกว่าความ

ยาวคลื่นของการเรืองแสงเพราะว่าชั้นพลังงานของสถานะสามในสถานะกระตุ้นจะต่ำกว่าสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น

อิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นหลังถูกกระตุ้นจะต้องตกกลับมายังสถานะพื้น โดยผ่านกระบวนการการลดระดับพลังงานซึ่งระยะเวลาชีวิต (Lifetime) ของกระบวนการต่างๆ จะต่างกันออกไปดังตารางที่ 1.1 ระยะเวลาชีวิตของฟลูออเรสเซนซ์จะน้อยกว่าฟอสฟอเรสเซนซ์เนื่องจากฟอสฟอเรสเซนซ์จะต้องมีการลดระดับพลังงานแบบ Intersystem crossing เพื่อไปยังสถานะสามได้

ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาชีวิตของกระบวนการโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโมเลกุล

กระบวนการ	ระยะเวลาชีวิต (วินาที)
Absorption	$10^{-15}$
Internal conversion	$10^{-14}$ - $10^{-11}$
Intersystem crossing	$10^{-8}$
External conversion (S→S)	$10^{-7}$ - $10^{-5}$
Fluorescence	$10^{-9}$ - $10^{-7}$
External conversion (T→S)	$10^{-3}$ - $10$
Phosphorescence	$10^{-5}$ - $10$
Vibrational relaxation	$10^{-12}$

#### 1.5.4 การเคลื่อนที่ของแสงภายในแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์

คุณสมบัติพื้นฐานของแสงที่ใช้เป็นหลักการทำงานของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์คือ การสะท้อน (Reflection) และหักเห (Refraction) ของแสงตามกฎของสเนลล์

เมื่อแสงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางหนึ่งตกกระทบกับพื้นผิวของอีกตัวกลางหนึ่งจะเกิดสะท้อนกลับในบางส่วนและบางส่วนจะเกิดการหักเห การสะท้อนของแสงจะแตกต่างกันไปตามมุมและสภาพพื้นผิวที่ตกกระทบ ในกรณีที่แสงที่ตกกระทบในพื้นผิวเรียบจะมีมุมที่ตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนที่อ้างอิงจากเส้นปกติที่เป็นเส้นที่ตั้งฉากกับระนาบของตัวกลาง

$$\theta_i = \theta_r \quad (4)$$

แสงที่เดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหค่าหนึ่งมาตกกระทบพื้นผิวของอีกตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหอีกค่าหนึ่งด้วยมุมตกกระทบ  $\theta_1$  และหักเหออกไปด้วยมุม  $\theta_2$  จะมีความสัมพันธ์ในการหักเหของแสงดังสมการตามกฎของสเนลล์ (Snell's law)

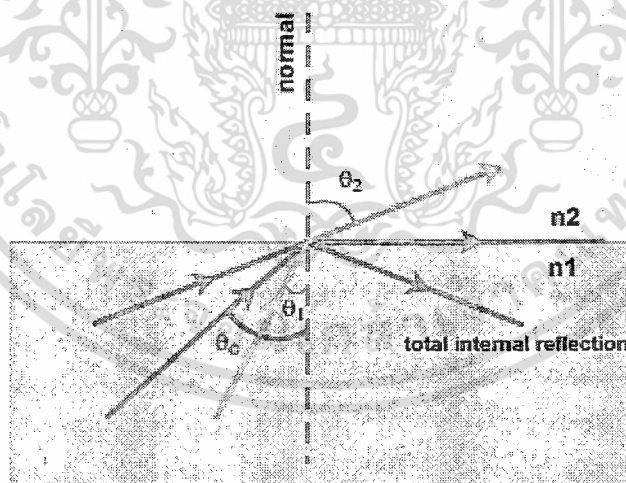
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (5)$$

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่า (อากาศ) ไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหสูงกว่า (น้ำ) มุมหักเหจะมีค่าน้อยกว่ามุมตกกระทบ ดังนั้นแสงจะเบนเข้าหาเส้นปกติ ในทำนองเดียวกันถ้าแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหสูงกว่าไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าจะทำให้มุมหักเหมากกว่ามุมสะท้อน ดังนั้นแสงจะเบนออกจากเส้นปกติ ดังนั้นแสงที่มากกระทบแผ่นรวมแสงจะเกิดได้สองกรณีคือเกิดการสะท้อนกลับที่ผิวหน้าของแผ่นรวมแสงและเกิดการหักเหเข้าไปในแผ่นรวมแสง หลังจากหักเหแล้วก็จะถูกโมเลกุลของสารเรืองแสงดูดกลืนและปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนต์ออกมา แสงที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะเดินทางไปยังขอบของแผ่นรวมแสงโดยอาศัยการสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection)

การสะท้อนกลับหมดของแสงจะอาศัยหลักการหักเหของแสง เมื่อแสงที่มากกระทบพื้นผิวทำมุมค่าหนึ่งแล้วทำให้มุมหักเหเป็น 90 องศา กับเส้นปกติ เรียกมุมนั้นว่ามุมวิกฤต (Critical angle:  $\theta_c$ ) และค่ามุมที่มากกระทบพื้นผิวที่มีค่ามากกว่ามุมวิกฤตจะทำให้แสงนั้นไม่เกิดการหักเหแต่จะเกิดการสะท้อนกลับหมด ดังรูปที่ 1.5 ซึ่งสามารถหาค่ามุมวิกฤตได้จากสมการ

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (6)$$

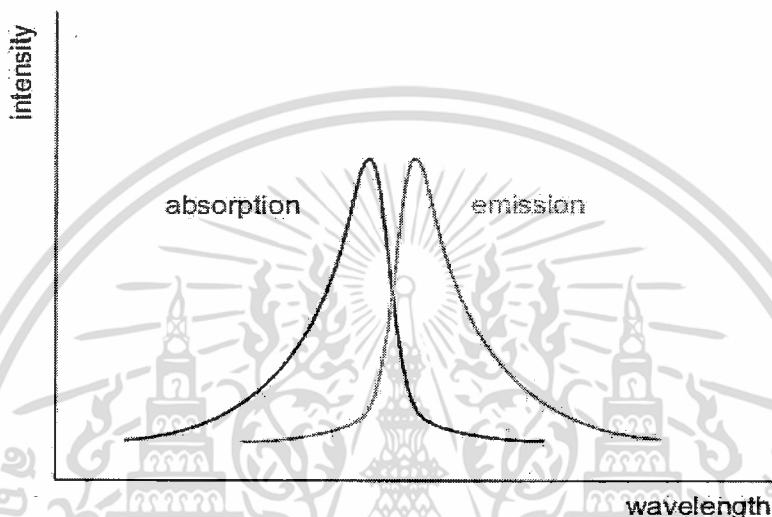


รูปที่ 1.5 แผนภาพแสดงการหักเหและการสะท้อนกลับหมดตามมุมที่ตกกระทบ

การสะท้อนกลับหมดของแสงในตัวกลางที่ต่างกันจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางของแสงตกกระทบจะต้องมากกว่าในตัวกลางของแสงที่ผ่านออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ของแสงภายในแผ่นรวมแสงหลังจากที่โมเลกุลของสารเรืองแสงได้ปลดปล่อยฟลูออเรสเซนซ์แล้ว นอกจากแสงจะเกิดการหักเหออกนอกแผ่นรวมแสงไปและสะท้อนกลับหมดภายในแผ่นรวมแสงแล้วอาจเกิดการดูดกลืนแสงที่ปลดปล่อยออกมาด้วยโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงกันได้ ซึ่งเรียกรการดูดกลืนนี้ว่า Re-absorption การดูดกลืนดังกล่าวสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 1.6 ว่าสเปกตรัมการดูดกลืนและการปลดปล่อยของแสงจะมีส่วนที่ซ้อนทับกันอยู่ บริเวณนั้นคือการ Re-absorption



รูปที่ 1.6 แสดงสเปกตรัมของการดูดกลืนและการปลดปล่อยของแสง

### 1.5.5 การแปลงพลังงานทางแสงเป็นพลังงานทางไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์

หลังจากแสงเคลื่อนที่ภายในแผ่นรวมแสงโดยอาศัยหลักการสะท้อนและหักเหของแสงไปยังขอบของแผ่นรวมแสงที่มีเซลล์แสงอาทิตย์ยึดติดอยู่ การแปลงพลังงานแสงที่ถูกปลดปล่อยจากโมเลกุลให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้าจะใช้หลักการของ Photovoltaic ในการแปลงพลังงาน

- คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะที่ได้รับแสง (Illumination)

ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง เราจะพิจารณาว่าลำแสงประกอบไปด้วยกลุ่มของโฟตอน (Photon) ซึ่งมีพลังงานค่าหนึ่งดังแสดงในสมการ

$$E_{\text{photon}} = h\nu \tag{7}$$

เมื่อ  $E_{\text{photon}}$  คือ พลังงานโฟตอน

$h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ =  $6.624 \times 10^{-34}$  joule-sec

$\nu$  คือ ค่าความถี่ของคลื่นแสง

เมื่อแสงตกกระทบบเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีเนื้อวัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำ โฟตอนที่มาตกกระทบบจะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ (Valence band) ให้สามารถหลุดออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ในแถบนำกระแส (conduction band) ได้และหลังจากที่อิเล็กตรอนหลุดออกไปก็จะเกิดโฮล (hole) ขึ้นแทนที่อิเล็กตรอน โฮลที่เกิดขึ้นจะมีค่าทางไฟฟ้าเป็นบวก ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระ (electron-hole pair) ที่เกิดขึ้นใหม่นี้ เป็นผลจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้กับรอยต่อสารกึ่งตัวนำภายในเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายในทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จากการเคลื่อนที่ของประจุพาหะจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งกระแสจะไหลในทิศตรงกันข้ามกับกระแสคู่อิเล็กตรอน ในขณะที่รอยต่อได้รับการไบอัสตรง กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้เรียกว่า “กระแสแสง (Photo current)” หรือเขียนย่อว่า  $I_p$  หรือ  $I_L$  ดังนั้นความสัมพันธ์ของกระแสในกรณีนี้ที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง(Illumination) อาจเขียนได้ว่า

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) - I_p \tag{8}$$

เมื่อ  $I_p$  คือ กระแสเนื่องจากแสง(Photo current) สามารถแสดงได้โดยสมการ

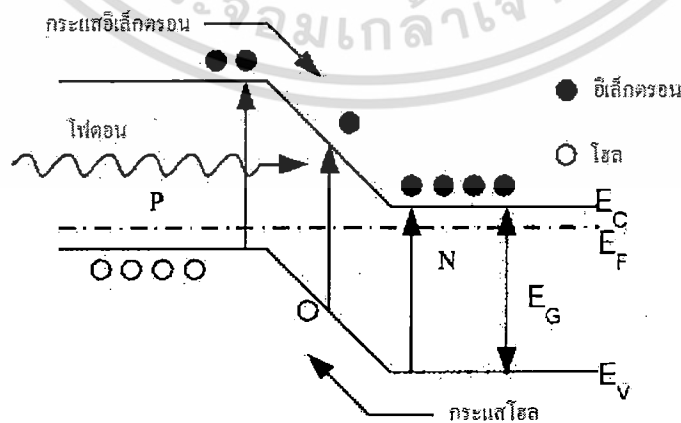
$$I_p = qAg_{op}(L_p + L_n) \tag{9}$$

เมื่อ  $q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน

$A$  คือ พื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกแสง

$g_{op}$  คือ อัตราการเกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากแสง (Optical generation rate)

$L_p, L_n$  คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ



รูปที่ 1.7 แผนภาพแสดงลักษณะของรอยต่อพี - เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5.6 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

#### กระแสลัดวงจร (Short circuit current)

ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกลัดวงจร (short circuit) เมื่อเซลล์ได้รับแสงจะทำให้เกิดกระแสเนื่องจากแสงไหลออกมาจากเซลล์ผ่านวงจร ในภาวะนี้กระแสจะมีค่าสูงสุด และถูกเรียกว่า  $I_{SC}$  ค่าของกระแสลัดวงจรนี้ พิจารณาค่าได้จากสมการที่ (8) เมื่อกำหนดให้ ขณะลัดวงจร  $V_A = 0$  ดังนั้นสมการนี้จะเขียนใหม่ได้

$$I = -I_P = I_{SC} \quad (10)$$

#### แรงดันเปิดวงจร (Open circuit current)

ในขณะที่เซลล์ถูกเปิดวงจรออก (open circuit) และที่รอยต่อได้รับแสง จะพบว่า กระแสที่ไหลในวงจรจะเป็นศูนย์ เนื่องจากวงจรถูกเปิด แรงดันที่ปรากฏคร่อมรอยต่อพี-เอ็นขณะนี้ถูกเรียกว่า แรงดันเปิดวงจร (open circuit voltage:  $V_{oc}$ ) ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าเมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจรกระแสจะมีค่าเป็นศูนย์ สมการที่ (8) จึงเขียนใหม่ได้ว่า

$$0 = I_0 \left( e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) - I_P \quad (11)$$

ดังนั้นค่าแรงดันวงจรเปิดจะมีค่าดังสมการ

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right) \quad (12)$$

กระแสไฟฟ้าที่เกิดเนื่องจากแสงจะมีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ขนาดของพื้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแสง, สัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงเพื่อให้เกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล, ระยะเวลาพักของรอยต่อพี-เอ็น, ขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ, ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความเร็วในการรวมตัวของประจุพาหะที่พื้นผิว, และค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ โดยทั่วไป กระแสลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิกอน จะมีค่าประมาณ 35-40 mA/cm<sup>2</sup> โดยวัดที่ค่า Air mass zero (AM0)

ส่วนค่าแรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage:  $V_{oc}$ ) จะมีค่ามากน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap:  $E_g$ ) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็นเซลล์ อย่างไรก็ดี ค่า  $V_{oc}$  นี้จะมีขนาดจำกัด คือ สูงสุดไม่เกินค่าของความกว้างของช่องว่างพลังงาน และปกติค่าของ  $V_{oc}$  ในเซลล์แบบซิลิกอนมีค่าประมาณ 0.5-0.6 โวลต์

## บทที่ 2

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การพัฒนาแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของการเรืองแสงที่ดีจำเป็นต้องมีปัจจัยหลักๆ ดังนี้

1. พื้นผิวของแผ่นรวมแสงจะต้องมีความเรียบและใส เพื่อให้แสงที่ตกกระทบมีการส่องผ่านได้ดีและเกิดการสะท้อนที่บริเวณผิวน้าน้อยที่สุด ความเข้มข้นของสารเรืองแสงจะต้องมีความเหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของสารเรืองแสงนั้นเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดฟลูออเรสเซนซ์
2. ขนาดของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์จะต้องมีขนาดที่เหมาะสม เนื่องจากปริมาณของการเรืองแสงที่ขอบของแผ่นรวมแสงจะขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นรวมแสง
3. สารเรืองแสงที่ใช้จะต้องมีการดูดกลืนและการปลดปล่อยที่เหมาะสมเนื่องจากช่วงการดูดกลืนจะต้องอยู่ในช่วงพลังงานของแสงที่มาจากกระทบและช่วงของการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารเรืองแสงจะต้องใกล้เคียงกับระดับพลังงานต้องห้ามของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

วิธีการพัฒนาแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีตามปัจจัยดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะมีการศึกษาเพื่อพัฒนาเป็นขั้นตอน ดังนี้

#### 2.1 การพัฒนากระบวนการเตรียมแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์

แผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์ประกอบด้วยวัสดุเรืองแสงและวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลาง (matrix material) ให้แสงส่งผ่านมายังเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์

#### วัสดุตัวกลาง

ในการวิจัยนี้เราเลือกใช้สาร CPS124 เพื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุตัวกลาง เนื่องจากสารนี้มีคุณสมบัติเป็นของเหลวใส แสงสามารถส่องผ่านได้ดี มีราคาถูกลงและหาได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วัสดุเรืองแสง

สารเรืองแสงที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้คือสาร Rhodamine 6G และสาร Coumarin 153

#### Rhodamine 6G

Rhodamine 6G คือสารประกอบทางเคมีและเป็นสารสีย้อม ซึ่งมีความเสถียรภาพทางแสงสูง มีค่า Quantum yield สูง ประมาณ 0.95 มีราคาถูก และมีค่าการดูดกลืนอยู่ในช่วง 500-550 นาโนเมตร มีการดูดกลืนสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 530 นาโนเมตร และการปลดปล่อยแสงอยู่ในช่วง 555-585 นาโนเมตร โดยมีค่าการปลดปล่อยสูงที่สุดคือ 566 นาโนเมตร

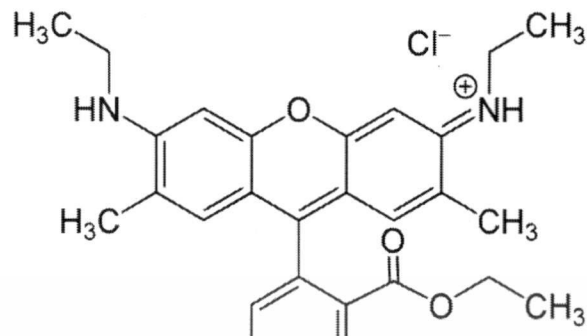


รูปที่ 2.2 สเปกตรัมการดูดกลืนและการเรืองแสงของสาร Rhodamine 6G

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของสาร Rhodamine 6G

คุณสมบัติ	
สูตรทางเคมี	$C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$
มวลโมเลกุล	479.02 g/mol
ลักษณะของสาร	Dark reddish purple, brown or black crystalline solid
ความหนาแน่น	1.26 g/cm <sup>3</sup>
การละลายในน้ำ	20 g/l (25°C)
การละลายในเมทานอล	400 g/l

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



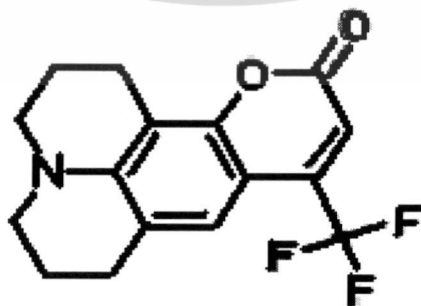
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของสาร Rhodamine 6G

### Coumarin 153

Coumarin 153 คือวัสดุเรืองแสงที่มีความสามารถในการเรืองแสงสูง สามารถดูดกลืนแสงได้ในย่าน UV ( $\lambda_{\max}$  422 nm) และเรืองแสงในย่าน 521 - 605 nm ในตัวกลาง methanol โดยมีฟลูออโรเรโงแงที่ความยาวคลื่น 550 nm คุณสมบัติของสารเรืองแสงชนิดนี้แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของสาร Coumarin 153

คุณสมบัติ	
สูตรทางเคมี	$C_{16}H_{14}F_3NO_2$
มวลโมเลกุล	309.28 g/mol
ลักษณะของสาร	yellow crystalline powder
จุดหลอมละลาย	167 - 168 °C



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสาร Coumarin 153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การพัฒนาความเข้มข้นที่เหมาะสมให้แก่แผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์

การพัฒนาเพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารเรืองแสงที่เหมาะสมสำหรับแผ่นรวมแสงมีความสำคัญ เนื่องจากความเข้มข้นที่ต่างกันจะให้ความเข้มของฟลูออเรสเซนซ์ไม่เท่ากัน ในขั้นตอนหนึ่งของการวิจัยจึงได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเรืองแสงที่เจือลงในสาร CPS124 โดยวัสดุเรืองแสงที่ใช้ในการจัดเตรียมแผ่นคือ Rhodamine 6G ในการวิจัยนี้จะมีการศึกษาความเข้มข้นของสารเรืองแสงทั้งหมด 4 ความเข้มข้น คือ  $10^{-3}$  โมลาร์,  $10^{-4}$  โมลาร์,  $10^{-5}$  โมลาร์ และ  $10^{-6}$  โมลาร์ และจะพิจารณาผลโดยวัดกระแสจากโฟโตไดโอด เพื่อนำมาหาค่าการดูดกลืนของแสงจากกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต โดยการทดลองจะมีขั้นตอนการเตรียมสาร Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ดังนี้

ขั้นตอน	รายละเอียด
1	เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้น $10^{-3}$ โมลาร์ โดยเอทานอล 25 มิลลิลิตร ละลายกับสาร Rhodamine 6G ปริมาณ 0.011975 กรัม
2	ละลายสารละลายด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 3 นาที
3	นำสารละลาย Rhodamine 6G ความเข้มข้น $10^{-3}$ โมลาร์ มาเป็นสารตั้งต้นเพื่อผสมกับตัวทำละลายเอทานอลปริมาณ 10 มิลลิลิตร โดยความเข้มข้น $10^{-4}$ โมลาร์, $10^{-5}$ โมลาร์ และ $10^{-6}$ โมลาร์ จะเจือด้วยสารตั้งต้นปริมาณ 1, 0.1 และ 0.01 มิลลิลิตร ตามลำดับ
4	ผสมสาร CPS124 ปริมาณ 5 กรัมกับสารละลาย Rhodamine 6G ความเข้มข้น $10^{-3}$ โมลาร์ ปริมาณ 1.5 มิลลิลิตรและสารตัวเร่งปริมาณ 0.2 กรัม
5	คนสารทั้งหมดให้เข้ากันด้วยเทคนิคจากการทดลองที่ผ่านมาเป็นเวลา 2 นาที
6	เทสารที่คนเรียบร้อยแล้วลงในแม่พิมพ์เทฟลอนชนิดมีฐานรองที่ทาน้ำยาหล่อลื่นแล้ว
7	ผสมสารด้วยวิธีการเดียวกันโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเป็น $10^{-4}$ โมลาร์ $10^{-5}$ โมลาร์และ $10^{-6}$ โมลาร์ ตามลำดับแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน
8	นำแผ่นตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์และนำไปขัดให้มีความเรียบและใสด้วยเทคนิคจากการทดลองที่ผ่านมาให้ได้ขนาด $2 \times 2$ เซนติเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร

## 2.3 การศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนและการเรืองแสงของแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G

การพัฒนาแผ่นรวมแสงในสองหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการศึกษาเพื่อพัฒนากระบวนการสร้างแผ่นรวมแสงให้มีคุณสมบัติที่ดี ในหัวข้อนี้จะนำแผ่นรวมแสงที่สร้างขึ้นมาวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเรืองแสง โดยในการทดลองจะใช้แผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G ซึ่งแผ่นที่สร้างขึ้นเพื่อทำการศึกษาออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

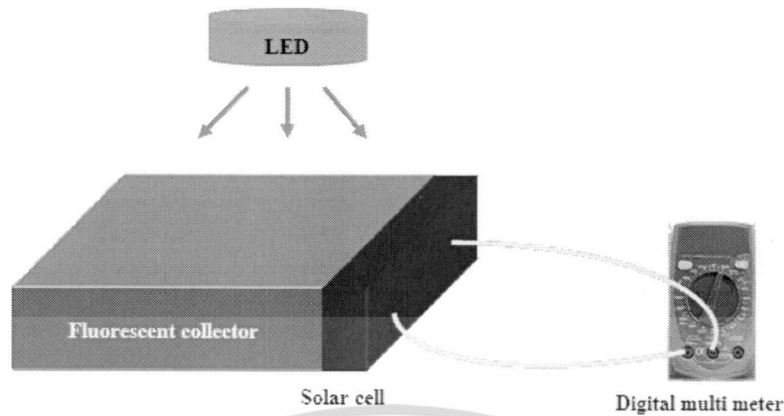
1. ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเรืองแสง ซึ่งมีความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์,  $10^{-4}$  โมลาร์,  $10^{-5}$  โมลาร์ และ  $10^{-6}$  โมลาร์ ขนาด  $2 \times 2$  เซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร
2. ศึกษาผลของความหนาของแผ่นรวมแสงที่มีความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์ ขนาด  $3 \times 3$  เซนติเมตร ความหนาต่างกันคือ 1.5, 2, 2.5 และ 3 เซนติเมตร

ในการทดลองนี้จะสร้างแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G ที่มีความเข้มข้นต่างกัน มีความหนา 1 มิลลิเมตรขึ้นมาใหม่ โดยในกระบวนการสร้างแผ่นรวมแสงจะทำเหมือนการสร้างแผ่นรวมแสงที่มีความเข้มข้นต่างกัน มีความหนา 2 มิลลิเมตรทุกประการ เว้นแต่ในกระบวนการขัดที่จะขัดให้ความหนาเหลือเพียง 1 มิลลิเมตรเท่านั้น ส่วนการสร้างแผ่นรวมแสงที่มีความหนาต่างกันมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอน	รายละเอียด
1	ผสมสาร CPS124 ปริมาณ 10 กรัมกับสารละลาย Rhodamine 6G ความเข้มข้น $10^{-3}$ โมลาร์ ปริมาณ 3 มิลลิตรและสารตัวเร่งปริมาณ 0.2 กรัม
2	คนสารทั้งหมดให้เข้ากันด้วยเทคนิคจากการทดลองที่ผ่านมาเป็นเวลา 2 นาที
3	ทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 ซ้ำเพื่อให้ได้สารที่ผสมแล้วทั้งหมด 4 ส่วน แล้วทิ้งไว้ในภาชนะบรรจุเป็นเวลา 1 วัน
4	นำแผ่นรวมแสงออกจากแม่พิมพ์และนำไปขัดให้มีความเรียบและใสด้วยเทคนิคจากการทดลองที่ผ่านมาให้ได้ขนาด $3 \times 3$ เซนติเมตร ความหนา 1.5, 2, 2.5, 3 มิลลิเมตรตามลำดับ

#### 2.4 การศึกษาผลการวัดเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อใช้ร่วมกับแผ่นรวมแสง

การทำงานของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนซ์จะสมบูรณ์ได้ต้องมีการนำแผ่นรวมแสงมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำมาประกอบอยู่ที่บริเวณขอบด้านหนึ่งของแผ่นรวมแสง ในการทดลองเราจะทำการวัดกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบกับแผ่นรวมแสง โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลองคือไดโอดเปล่งแสงกำลังสูงขนาด 1 วัตต์ มีความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งฟิสิกส์ 520 นาโนเมตร และมีค่าแบนด์วิดท์เท่ากับ 25 นาโนเมตร ซึ่งมีการจัดระบบวัดดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการจัดระบบวัดของการวัดแผ่นรวมแสงด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

ซึ่งคุณสมบัติต่างๆของแผ่นรวมแสง ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

1. ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเรืองแสง ซึ่งมีความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์,  $10^{-4}$  โมลาร์,  $10^{-5}$  โมลาร์ และ  $10^{-6}$  โมลาร์ ขนาด  $2 \times 2$  เซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร
2. ผลของความหนาของแผ่นรวมแสงที่มีความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์ ขนาด  $3 \times 3$  เซนติเมตร ความหนาต่างกันคือ 1.5, 2, 2.5 และ 3 มิลลิเมตร

ในการวัดจำเป็นต้องใช้แผ่นรวมแสงที่ไม่ได้เจือสารด้วยเพื่อให้เป็นแผ่นมาตรฐานในการวัด ซึ่งมีความหนาเท่ากับแผ่นรวมแสงที่เจือสาร ในการวัดแต่ละแผ่นจะทำการวัดสามครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยและนำมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแสที่ตรวจวัดกับคุณสมบัติต่างๆของแผ่นรวมแสง

## 2.5 การพัฒนาแผ่นรวมแสงโดยการเจือสาร Courmarin 153

แผ่นรวมแสงที่มีประสิทธิภาพที่ดีจะต้องมีการดูดกลืนได้ในย่านความยาวคลื่นกว้างๆ และเปล่งแสงในย่านความยาวคลื่นที่เซลล์สามารถตอบสนองได้ดี ผู้วิจัยจึงได้ทดลองสารเรืองแสงชนิดอื่นนอกจาก Rhodamine 6G เพื่อหาว่าสารเรืองแสงชนิดใดที่เหมาะสมแก่การนำมาพัฒนาต่อไป หัวข้อนี้จะกล่าวถึงสาร Courmarin 153 เป็นสารเจือที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างแผ่นรวมแสง โดยจะศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเรืองแสงที่เจือด้วยสาร Coumarin 153 ต่อสเปกตรัมการดูดกลืนและสเปกตรัมการเรืองแสง ซึ่งมีความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์,  $10^{-4}$  โมลาร์,  $10^{-5}$  โมลาร์ และ  $10^{-6}$  โมลาร์ ขนาด  $3 \times 3$  เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร

การสร้างแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Courmarin 153 จะต้องมีการเตรียมสารเพื่อให้สารอยู่ในรูปของสารละลาย ในการเตรียมสารละลายชนิดนี้จะใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายปริมาณ 30 มิลลิลิตร และผสมกับสาร Courmarin 153 ให้มีความเข้มข้นค่าต่างๆ คือ  $10^{-3}$  โมลาร์,  $10^{-4}$  โมลาร์,  $10^{-5}$  โมลาร์ และ  $10^{-6}$  โมลาร์ โดยให้ความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์ เป็นสารละลายตั้งต้น ซึ่งขั้นตอนการเตรียมสารมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอน	รายละเอียด
1	เตรียมสารละลายที่ความเข้มข้น $10^{-3}$ โมลาร์ โดยใช้เอทานอล 25 มิลลิลิตร ละลายกับสาร Coumarin 153 ปริมาณ 0.0077322 กรัม (น้ำหนักโมเลกุลของสาร Coumarin 153 คือ 309.29 g/mol)
2	ละลายสารด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 3 นาที
3	เตรียมสารละลายความเข้มข้นประมาณ $10^{-4}$ โมลาร์, $10^{-5}$ โมลาร์ และ $10^{-6}$ โมลาร์ โดยการเจือสารละลายความเข้มข้น $10^{-3}$ โมลาร์ ปริมาณ 0.8, 1 และ 1 มิลลิลิตร ตามลำดับ ผสมกับตัวทำละลายเอทานอลปริมาณ 10 มิลลิลิตร
4	ละลายสารด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 3 นาที

หลังจากที่ได้สารละลาย Coumarin 153 ที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ตามต้องการแล้ว ก็จะนำสารละลายที่ได้มาสร้างแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Coumarin 153 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอน	รายละเอียด
1	ผสมสาร CPS124 ปริมาณ 5 กรัมกับสารละลาย Coumarin 153 ความเข้มข้น $10^{-3}$ โมลาร์ ปริมาณ 1.5 มิลลิลิตรและสารตัวเร่งปริมาณ 0.1 กรัม
2	คนสารทั้งหมดให้เข้ากันด้วยเทคนิคจากการทดลองที่ผ่านมาเป็นเวลา 2 นาที
3	ผสมสารด้วยวิธีการเดียวกันโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเป็น $10^{-4}$ โมลาร์, $10^{-5}$ โมลาร์และ $10^{-6}$ โมลาร์ ตามลำดับแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน
4	นำแผ่นรวมแสงออกจากภาชนะบรรจุและนำไปขัดให้มีความเรียบและใสด้วยเทคนิคจากการทดลองที่ผ่านมาให้ได้ขนาด 3x3 เซนติเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### ผลการวิจัยและอภิปราย

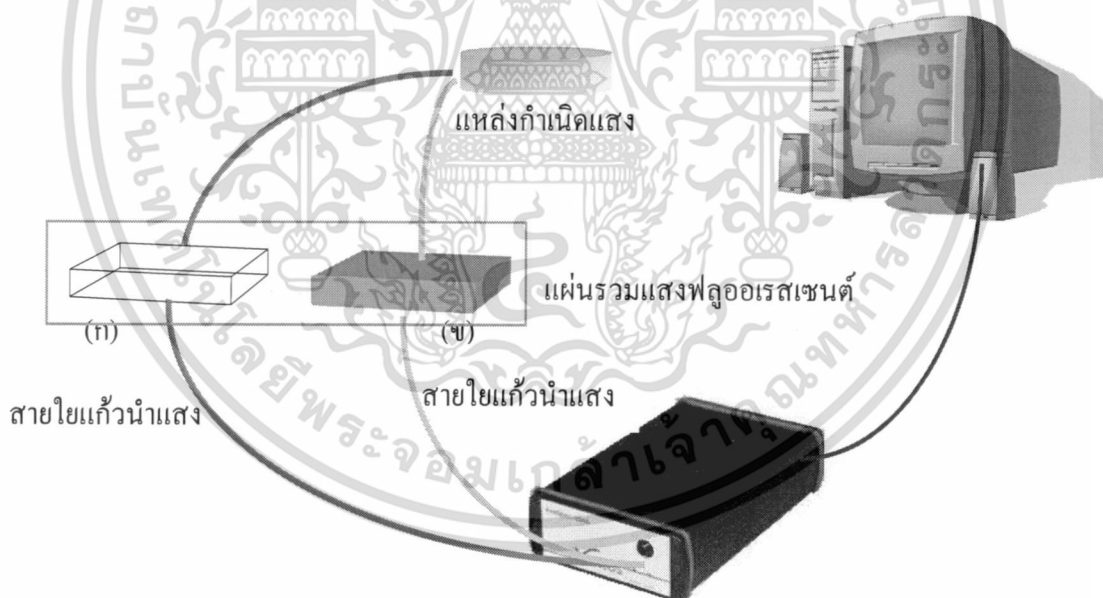
ในการศึกษาสเปกตรัมของแผ่นรวมแสงจะแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

1. สเปกตรัมการดูดกลืนของแผ่นรวมแสง
2. สเปกตรัมการเรืองแสงของแผ่นรวมแสง

#### 3.1 การศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนของแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G

##### 3.1.1 การจัดวางอุปกรณ์และขั้นตอนการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง

ในการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจำเป็นต้องใช้แผ่นรวมแสงที่ไม่เจือสารซึ่งมีความหนาเท่ากับแผ่นรวมแสงที่เจือสารที่ต้องการวัดด้วย เนื่องจากในกระบวนการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะต้องมีปริมาณแสงอ้างอิง ซึ่งก็คือแสงที่ผ่านแผ่นรวมแสงที่ไม่เจือสารนั่นเอง การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนจะเป็นดังรูปที่ 3.1



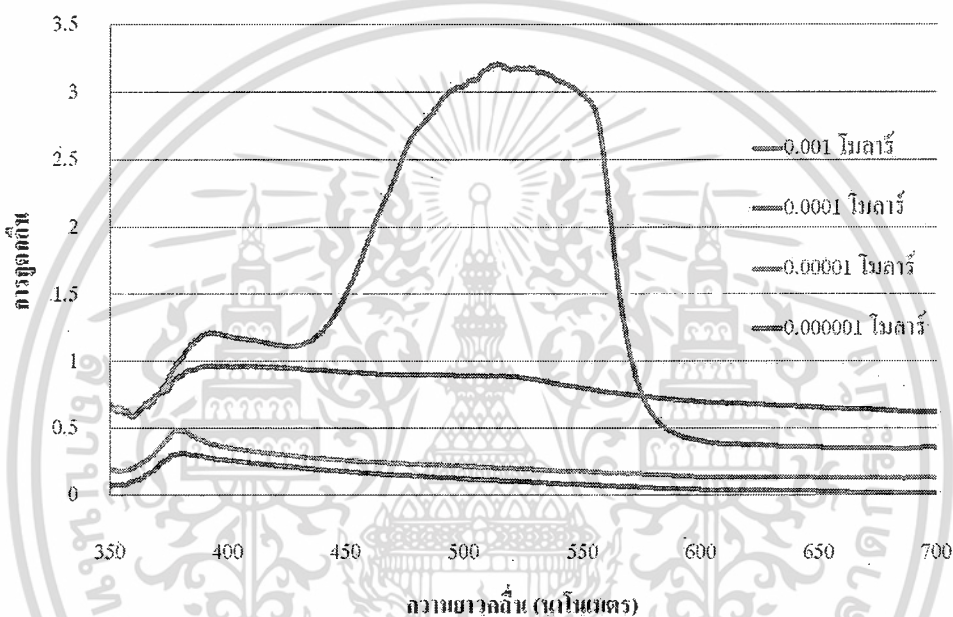
รูปที่ 3.1 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการวัดสเปกตรัมการดูดกลืน (ก) แผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ชนิดไม่เจือสาร (ข) แผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ชนิดเจือสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ส่องมายังแผ่นรวมแสงจะถูกรวมแสงด้วยสายใยแก้วนำแสงและแสงที่ผ่านออกมาจากแผ่นรวมแสงจะถูกวัดด้วยเครื่อง Spectrometer ผ่านทางสายใยแก้วนำแสง ข้อมูลจะถูกส่งมาทางสายเชื่อมต่อกอมพิวเตอร์และถูกวิเคราะห์ผลการดูดกลืนด้วยโปรแกรม Avasoft

ในการวัดเพื่อหาสเปกตรัมการดูดกลืนจะแบ่งการพิจารณาตามคุณสมบัติของแผ่นรวมแสงที่แตกต่างกันออกไป เป็นดังนี้

### 3.1.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้นต่างกัน

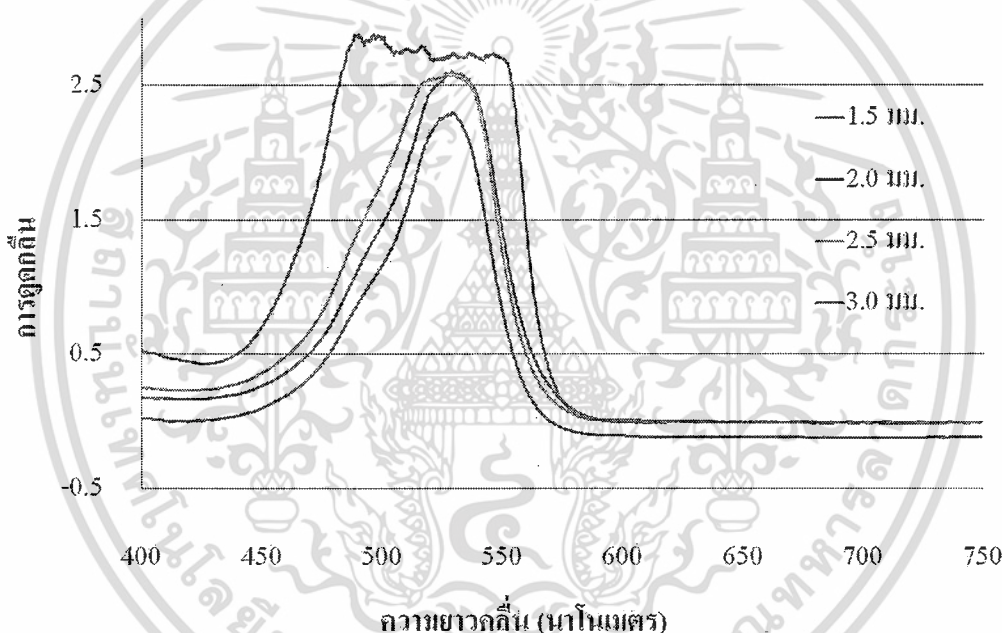


รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนและความยาวคลื่นของแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G ขนาด 2x2 เซนติเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร ด้วยความเข้มข้นที่ต่างกัน

จากกราฟรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าที่ความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์ จะมีการดูดกลืนมากที่สุด ส่วนที่ความเข้มข้น  $10^{-4}$  โมลาร์ เกิดการดูดกลืนน้อยมากจนไม่เห็นเส้นกราฟเป็นลักษณะของพีการดูดกลืน และที่ความเข้มข้น  $10^{-5}$  และ  $10^{-6}$  โมลาร์ อาจจะไม่เกิดการดูดกลืนเกิดขึ้นเลยก็เป็นได้ สาเหตุอาจเนื่องมาจากที่ความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์ จะมีโมเลกุลของสารเรืองแสงอยู่ในแผ่นรวมแสงมากกว่าที่ความเข้มข้นอื่นๆ เมื่อมีโมเลกุลมากกว่าจึงสามารถดูดกลืนได้มากกว่า และอาจมีอีกหนึ่งสาเหตุคือเกิดการ Re-absorption ขึ้นภายในแผ่นรวมแสง เมื่อ โมเลกุลสารเรืองแสงมีมากภายในแผ่นรวมแสงจะทำให้โอกาสเกิดปรากฏการณ์นี้มีมากขึ้น แสงที่ผ่านออกมายังด้านล่างของแผ่นจึงมีค่าน้อย สำหรับความเข้มข้นที่ต่ำลงมาอาจมีโมเลกุลของสารเรืองแสงเจือจางมากเกินไปจึงไม่เกิดการดูดกลืนภายในแผ่นรวมแสง

### 3.1.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ความหนาต่างกัน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแผ่นรวมแสงที่มีความหนาต่างกัน โดยผู้วิจัยได้เตรียมแผ่นรวมแสงจากสาร Rhodamine ขนาด 3x3 เซนติเมตร ความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์ มีความหนาต่างกันได้คือ 1.5, 2, 2.5, 3 มิลลิเมตร ซึ่งสเปกตรัมที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 3.3 พิจารณาที่ความหนา 3 มิลลิเมตรจะพบว่ามีค่าการดูดกลืนสูงสุดแต่เส้นสเปกตรัมจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมไม่เป็นรูปพีคเหมือนกับ ความหนาอื่นๆ สาเหตุอาจเนื่องมาจากการดูดกลืนมากจนผลการวัดออกมาเป็นค่าที่อิ่มตัว และที่ความหนา ลดลงการดูดกลืนจะมีค่าน้อยลงตามลำดับ แต่ที่ความหนา 2 และ 2.5 มิลลิเมตรจะมีความหนาใกล้เคียง กันมาก จากผลของสเปกตรัมแสดงให้เห็นว่าเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต คือเมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้นจะเกิดการดูดกลืนเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นของแผ่นรวมแสง ขนาด 3x3 เซนติเมตร ความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์ ที่ความหนาต่างกัน

## 3.2 การศึกษาสเปกตรัมการเรืองแสงของแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G

### 3.2.1 การจัดวางอุปกรณ์และขั้นตอนการวัดสเปกตรัมการเรืองแสง

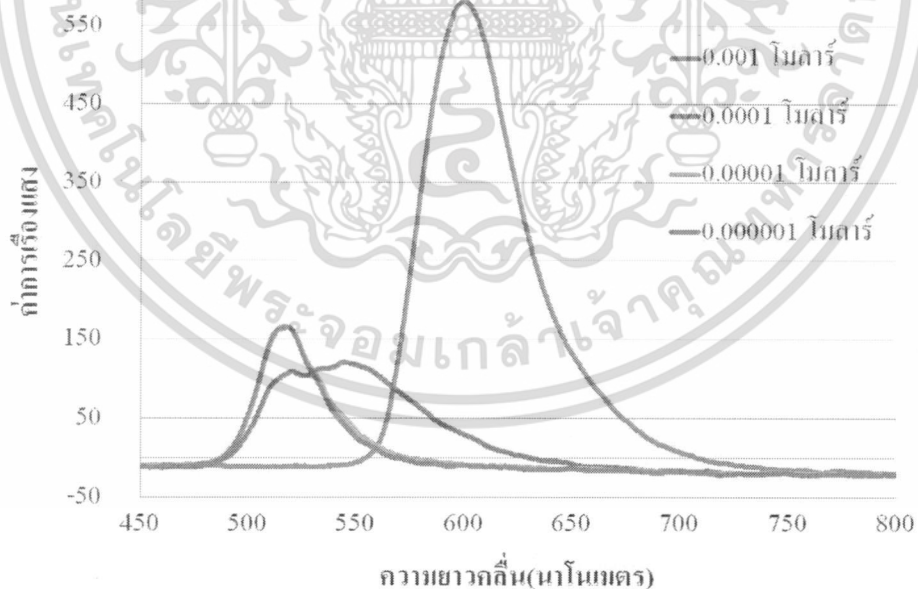
ในการวัดสเปกตรัมการเรืองแสงจะวัดที่ส่วนขอบของแผ่นรวมแสงดังรูปที่ 3.4 สายใยแก้วนำแสง จะถูกจัดให้รับแสงบริเวณขอบของแผ่นเนื่องจากโฟตอนที่ถูกคายออกมาจากโมเลกุลของสารเรืองแสงจะ เดินทางมายังขอบของแผ่นรวมแสงด้วยการสะท้อนกลับหมดภายในแผ่นรวมแสง



รูปที่ 3.4 แสดงระบบของการวัดสเปกตรัมการเรืองแสง

### 3.2.2 สเปกตรัมการเรืองแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้นต่างกัน

แผ่นรวมแสงที่ทำการวัดจะแบ่งเป็น 2 ชุด คือ ความหนา 1 มิลลิเมตร มีความเข้มข้น 4 ความเข้มข้น คือ  $10^{-3}$  โมลาร์,  $10^{-4}$  โมลาร์,  $10^{-5}$  โมลาร์ และ  $10^{-6}$  โมลาร์ สเปกตรัมการเรืองแสงของแผ่นรวมแสงจะเป็นดังรูปที่ 3.5



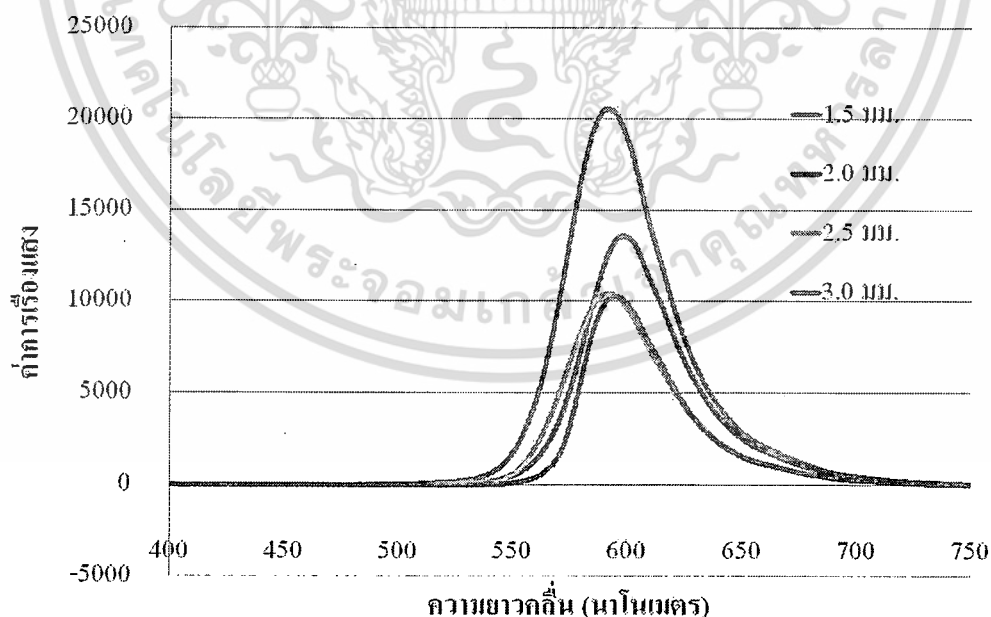
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนซ์และความยาวคลื่นของแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G ขนาด 2x2 เซนติเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร ด้วยความเข้มข้นที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 ในสเปกตรัมการดูดกลืนพบว่าเมื่อความเข้มข้นน้อยลงทำให้ค่าการดูดกลืนน้อยลงด้วย นั่นแสดงว่าแสงที่โมเลกุลของสารเรืองแสงเรืองออกมาจะต้องแปรผันตามความเข้มข้นเหมือนกับการดูดกลืน ซึ่งในรูปที่ 3.5 พบว่าที่ความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์ มีการเรืองแสงมากที่สุดซึ่งแปรผันกับการดูดกลืน และที่ความเข้มข้น  $10^{-4}$  โมลาร์ มีการเรืองแสงน้อยกว่าที่ความเข้มข้น  $10^{-5}$  โมลาร์ และ  $10^{-6}$  โมลาร์ ซึ่งที่จริงแล้วต้องมีการคายแสงมากกว่า สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจมีผลมาจากลักษณะทางกายภาพของแผ่นรวมแสงที่ความเข้มข้น  $10^{-4}$  โมลาร์ ซึ่งมีความเรียบและความใสน้อยจึงเป็นผลให้แสงไม่สามารถเคลื่อนที่มายังขอบของแผ่นรวมแสงได้

### 3.2.3 สเปกตรัมการเรืองแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ความหนาต่างกัน

จากสเปกตรัมในรูปที่ 3.6 พบว่าที่ความหนา 1.5 มิลลิเมตร วัดแสงฟลูออเรสเซนซ์ได้มากที่สุดและจะน้อยลงเมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งขัดแย้งกับผลจากสเปกตรัมการดูดกลืนในรูปที่ 3.3 ที่แสดงผลว่าเมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้นค่าการดูดกลืนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากการเกิดฟลูออเรสเซนซ์เมื่อมีการดูดกลืนเกิดขึ้นมากทำให้ผลการวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์น่าจะมีมากตามด้วย แต่ในกรณีนี้ผลที่ออกมาขัดแย้งกับการดูดกลืนอาจเนื่องมาจากธรรมชาติของสเปกตรัมการดูดกลืนและการเรืองแสงที่สเปกตรัมของการดูดกลืนและสเปกตรัมของการเรืองแสงจะมีพื้นที่ส่วนหนึ่งซ้อนทับกันอยู่ ซึ่งพื้นที่ที่ซ้อนทับนี้จะเรียกว่าเป็นปรากฏการณ์ Re-absorption ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 แสดงว่าที่ความหนาหนึ่งเกิดการดูดกลืนมากย่อมทำให้พื้นที่ที่ซ้อนทับกันมีมากตามไปด้วย เป็นผลให้แสงฟลูออเรสเซนซ์ที่วัดได้นั้นมีค่าน้อยลง



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่าการเรืองแสงและความยาวคลื่นของแผ่นรวมแสงขนาด 3x3

เซนติเมตร ความเข้มข้น  $10^{-3}$  M ที่ความหนาต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดสอบแผ่นรวมแสงกับเซลล์แสงอาทิตย์

#### 3.3.1 สภาพตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการวัดเพื่อทดสอบคุณสมบัติของแผ่นรวมแสงคู่กับเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องทราบสเปกตรัมการตอบสนองของเซลล์ก่อน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือจะต้องรู้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีการตอบสนองต่อแสงในแต่ละย่านพลังงานเป็นอย่างไร ซึ่งการวัดสเปกตรัมการตอบสนอง (Spectral response) ของอุปกรณ์แสงใดๆ สามารถกระทำได้โดยอาศัยการเปรียบเทียบกระแสเอาท์พุทของอุปกรณ์แสงที่ต้องการทดสอบกับค่ากระแสของอุปกรณ์แสงมาตรฐาน โดยจะทำการวัดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ โดยการวัดนี้จะต้องทำภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกล่าวคือภายใต้อุณหภูมิและความเข้มแสงคงที่ เทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการวัดสเปกตรัมการตอบสนองคือการฉายแสงเอกรงค์บนเซลล์ที่ต้องการทดสอบและเซลล์มาตรฐาน ในขณะที่เดียวกันจะทำการวัดค่ากระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ต้องการทดสอบและเซลล์มาตรฐาน ณ ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ค่ากระแสที่วัดได้จะถูกนำมาคำนวณเพื่อหาค่าสภาพตอบสนองของเซลล์ที่ต้องการทดสอบได้

โดยในการทดสอบจะใช้โฟโตไดโอดเป็นตัวมาตรฐานในการวัด และใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็น LED ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ทั้งหมด 7 ความยาวคลื่น และคำนวณค่าสภาพตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ (SR<sub>t</sub>) โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$SR_t = \frac{SR_r \times J_t}{J_r} \quad (1)$$

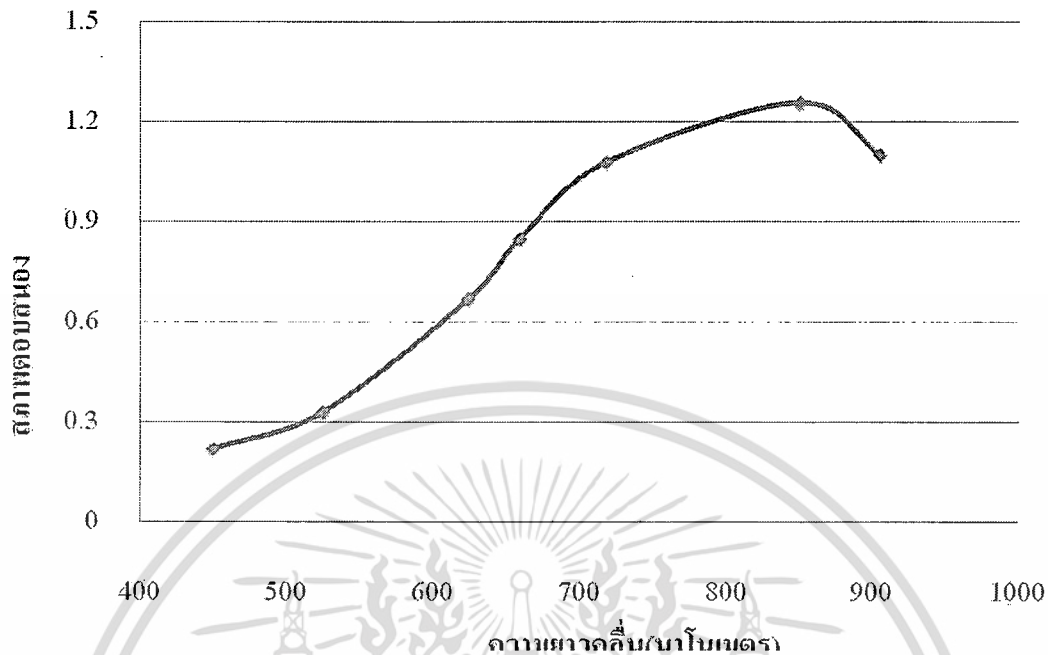
เมื่อ SR<sub>r</sub> และ J<sub>r</sub> คือค่า SR และค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรของโฟโตไดโอด  
J<sub>t</sub> คือค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

#### ผลการวัด

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสภาพตอบสนองของโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์

ความยาวคลื่น (nm)	สภาพตอบสนอง	
	โฟโตไดโอด	เซลล์แสงอาทิตย์
450.1	0.17	0.22
524.6	0.35	0.33
624.3	0.65	0.67
659.2	0.75	0.85
718.3	0.95	1.08
850.6	1.00	1.26
904.8	0.95	1.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสภาพตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการวัดสภาพการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 3.7 พบว่าเซลล์มีการตอบสนองดีที่สุดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 800-900 นาโนเมตร แต่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต่ำจะมีการตอบสนองต่ำ ในช่วงความยาวคลื่น 450-700 นาโนเมตร การตอบสนองของเซลล์แทบจะเป็นเชิงเส้น เมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้นการตอบสนองของเซลล์จะดีขึ้นด้วย เมื่อนำกราฟในรูปที่ 3.7 มาเทียบกับฟลูออเรสเซนซ์สเปกตรัมของแผ่นรวมแสง จะได้ตัวอย่างดังรูปที่ 3.8 ที่เป็นการแสดงได้อย่างชัดเจนว่าแผ่นรวมแสงสามารถดูดกลืนความยาวคลื่นต่ำเพื่อคายในความยาวคลื่นที่สูงกว่าแล้วสามารถจะเพิ่มให้เซลล์มีการตอบสนองได้ดีขึ้น

### 3.3.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของแผ่นรวมแสงต่อกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

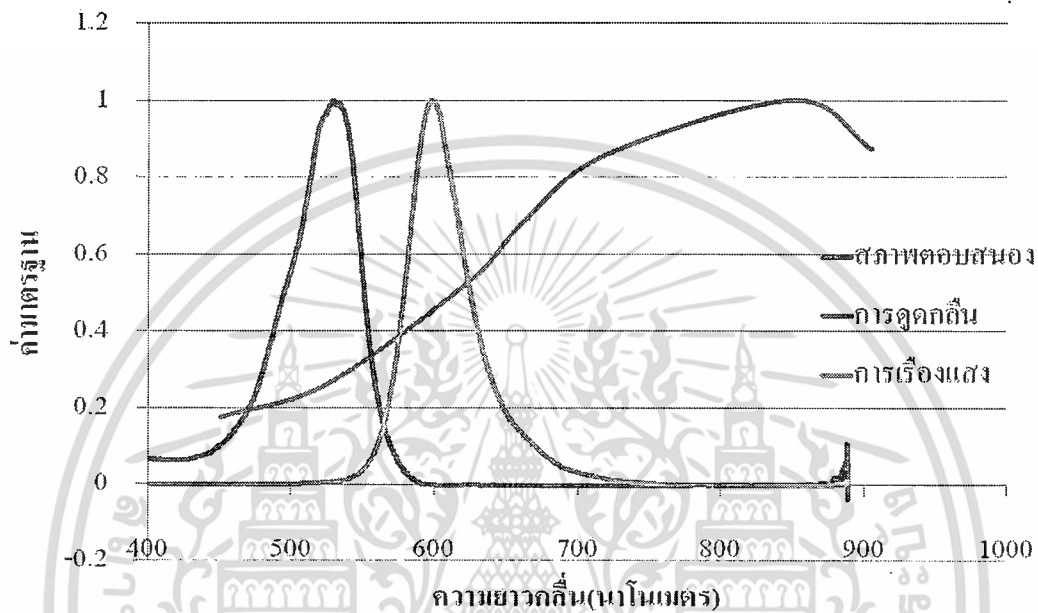
จากการทดลองที่ในหัวข้อต่างๆ ที่ผ่านมาพบว่าแผ่นรวมแสงที่ทำการพัฒนาจะมีการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงประมาณ 510-530 นาโนเมตร ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ LED ที่มีความยาวคลื่น 519 นาโนเมตร มาเป็นแหล่งกำเนิดแสงในการทดลองนี้ ผลการวัดจะแสดงดังตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.9

#### ผลการวัด

จากผลการวัดกระแสลัดวงจรที่ได้จากตารางที่ 3.2 พบว่าผลนั้นตรงกับที่การวัดสเปกตรัมการเรืองแสงในหัวข้อที่ผ่านมา โดยในสเปกตรัมการเรืองแสงที่ได้นั้นมีการเรืองแสงมากที่สุดที่ความเข้มข้น  $10^{-4}$  โม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลาร์ ซึ่งตรงกับกระแสคหวจรที่ได้จากการทดลองนี้ นอกจากนั้นกระแสคหวจรที่วัดได้จากแผ่นรวมแสงที่ไม่มีการเจือสารเรืองแสงลงไปกับแผ่นรวมแสงที่มีการเจือสารลงไปที่มีความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์ และ  $10^{-4}$  โมลาร์ นั้นมีความต่างกันประมาณหนึ่งเท่า เพราะฉะนั้นเป็นการแสดงให้เห็นได้ว่าแผ่นรวมแสงที่สร้างขึ้นสามารถรวมแสงได้

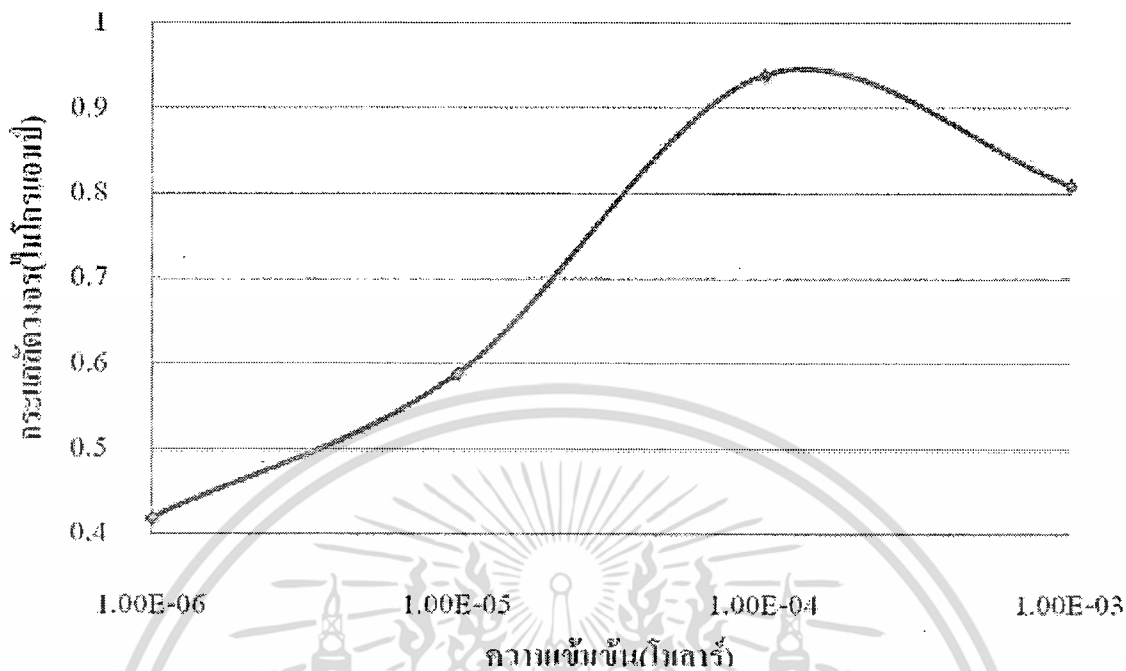


รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่ามาตรฐานของสเปกตรัมการดูดกลืนและการเรืองแสงของแผ่นรวมแสงและสภาพการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการวัดกระแสคหวจรของแผ่นรวมแสงที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 519 นาโนเมตร

ความเข้มข้น (M)	กระแสคหวจร ( $\mu\text{A}$ )			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
Blank	0.45	0.52	0.47	0.48
$10^{-3}$	0.87	0.81	0.77	0.81
$10^{-4}$	0.94	0.97	0.91	0.94
$10^{-5}$	0.59	0.61	0.57	0.59
$10^{-6}$	0.48	0.37	0.43	0.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแผ่นรวมแสงและกระแสตัววงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

### 3.3.3 การศึกษาผลของความหนาของแผ่นรวมแสงต่อกระแสตัววงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

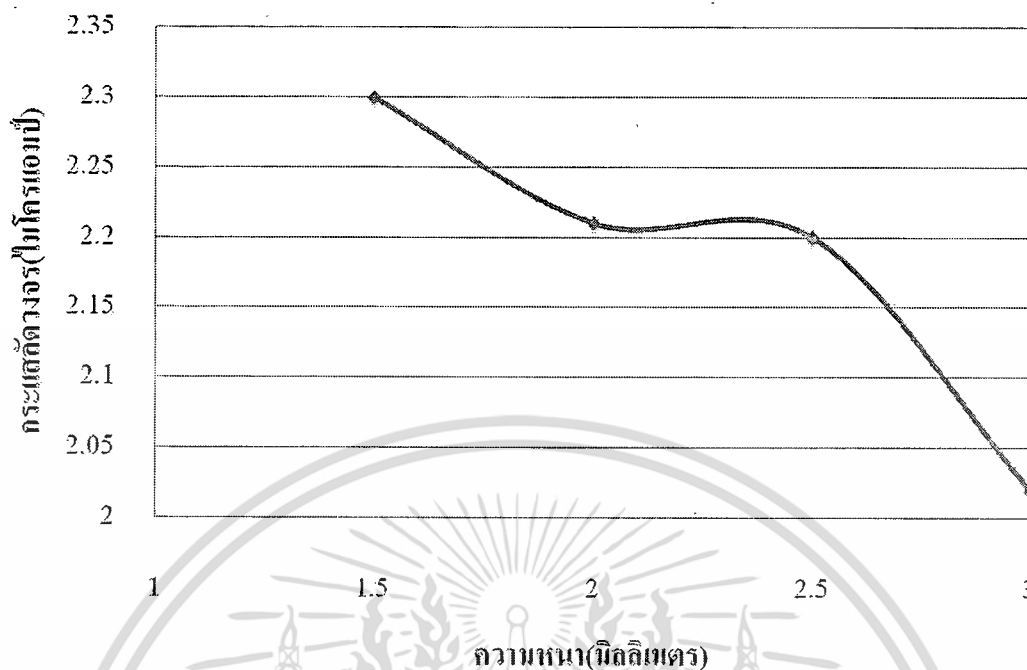
ในการศึกษาหัวข้อนี้จะทำการวัดเช่นเดียวกับการศึกษาผลของความเข้มข้นต่อกระแสตัววงจรทั้งชุดอุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง ผลการวัดเป็นดังตารางที่ 3.3, 3.4 และรูปที่ 3.10

#### ผลการวัด

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการวัดกระแสตัววงจรของแผ่นรวมแสงที่ความหนาต่างกัน โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 519 นาโนเมตร

ความหนา (mm)	กระแสตัววงจร (μA)							
	แผ่นรวมแสงที่ไม่เจือสารเรืองแสง				แผ่นรวมแสงที่เจือสารเรืองแสง			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1.5	0.68	0.72	0.61	0.67	2.22	2.34	2.36	2.30
2.0	0.82	0.77	0.81	0.80	2.22	2.18	2.25	2.21
2.5	0.77	0.76	0.85	0.79	2.18	2.22	2.20	2.20
3.0	0.73	0.68	0.70	0.70	2.07	2.01	1.99	2.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นรวมแสง และกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการวัดในตารางที่ 3.3 พบว่าเมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้นกระแสที่ได้มีค่าน้อยลง ซึ่งตรงกับผลของสเปกตรัมการเรืองแสงที่วัดได้ นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบกระแสระหว่างแผ่นรวมแสงที่ไม่เจือสารและแผ่นรวมแสงที่เจือสารพบว่ากระแสของแผ่นที่เจือสารมีค่ามากกว่าแผ่นที่ไม่เจือสารถึงหนึ่งถึงสองเท่า เพื่อความชัดเจนในความแตกต่างระหว่างกระแสที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจือสาร จะนำค่ากระแสที่ทำการวัดได้มาหาเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงระหว่างแผ่นรวมแสงที่เจือสารและไม่เจือสาร โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_{sc}(\%) = \frac{\Delta I \times 100}{I_b} \quad (2)$$

เมื่อ  $I_b$  คือ กระแสลัดวงจรของแผ่นรวมแสงที่เจือสาร

$\Delta I$  คือ ผลต่างระหว่างกระแสลัดวงจรของแผ่นรวมแสงที่เจือสารและไม่เจือสาร

จากผลการคำนวณในตาราง 3.4 จะเห็นว่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าเพิ่มสูงสุดที่ความหนา 1.5 มิลลิเมตร และมีค่าลดลงเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุจากแสงแผ่นรวมแสงที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร จะสามารถรวมแสงได้สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ของกระแสตัวจอร์ที่เพิ่มขึ้นของแผ่นรวมแสงที่เจือสาร

ความหนา (mm)	กระแสตัวจอร์ (%)
1.5	243.28
2.0	176.25
2.5	178.48
3.0	188.57

### 3.4 ผลการพัฒนาแผ่นรวมแสงโดยการเจือสาร Courmarin 153

#### 3.4.1 กระบวนการเตรียมสารละลาย

ผู้วิจัยได้จัดเตรียมสารละลาย Comarin 153 ในเอทานอลที่มีความเข้มข้น  $1.3708 \times 10^{-3}$  โมลาร์,  $1.0966 \times 10^{-4}$  โมลาร์,  $1.0966 \times 10^{-5}$  โมลาร์ และ  $1.0966 \times 10^{-6}$  โมลาร์ตามลำดับ

#### 3.4.2 กระบวนการสร้างแผ่นรวมแสง

แผ่นรวมแสงที่สร้างขึ้นมีสีเหลืองจางมาก การมองด้วยตาเปล่าไม่สามารถแยกออกได้ว่าสีต่างกันและแผ่นมีความบางมากเกินไปจึงมีการผสมสารใหม่โดยเปลี่ยนปริมาณสาร CPS 124 เป็น 10 กรัม และสารละลาย Courmarin 153 เป็น 4 มิลลิลิตรและสารตัวเร่งยังคงปริมาณเดิมคือ 2%

หลังจากทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วันก็จะได้แผ่นรวมแสงที่แห้ง แต่แผ่นรวมแสงมีความอ่อนและยืดหยุ่นซึ่งสาเหตุอาจมาจากสารเอทานอลที่ทำละลายมีผลต่อสาร CPS 124 จากความอ่อนของแผ่นรวมแสงนี้ทำให้กระบวนการขัดแผ่นรวมแสงประสิทธิภาพน้อยลง ยากต่อการขัด ผลที่ได้ทำให้แผ่นรวมแสงมีความเรียบไม่สม่ำเสมอทั้งหมดทั้งแผ่นจึงได้แผ่นรวมแสงเพียงความเข้มข้นเดียวคือ  $10^{-3}$  โมลาร์ เท่านั้น

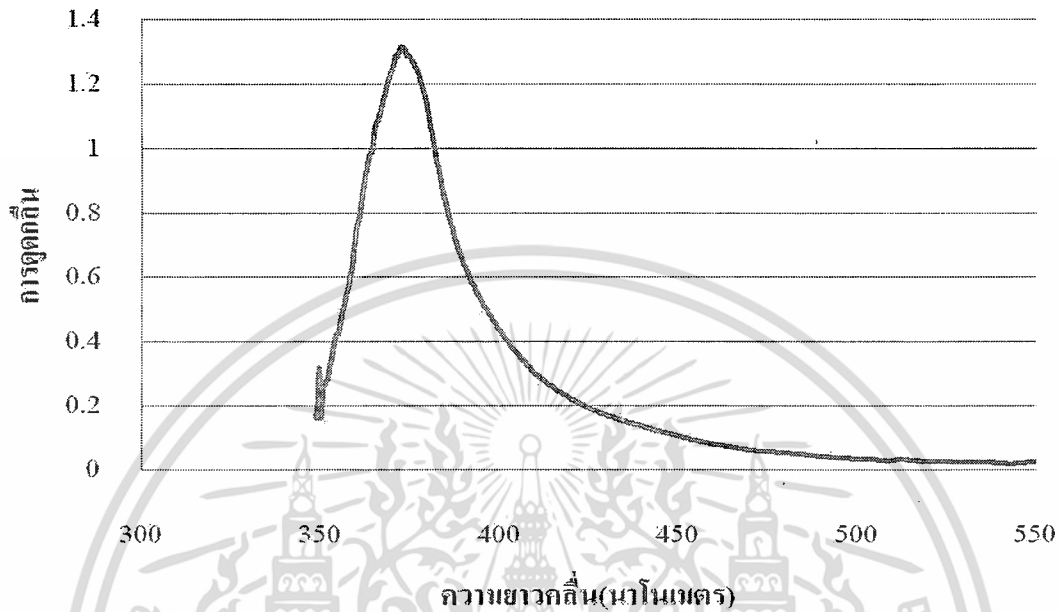
#### 3.4.3 กระบวนการวัดคุณสมบัติของแผ่นรวมแสง

คุณสมบัติของแผ่นรวมแสงที่ต้องการพิจารณาในหัวข้อนี้คือการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนและการเรืองแสง ซึ่งวิธีการและขั้นตอนการวัดจะทำเช่นเดียวกับการวัดแผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G ซึ่งการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดไฟทั้งสแตนด์ ผลปรากฏว่าไม่แสดงสเปกตรัมขึ้น อาจเนื่องมาจากหลอดไฟทั้งสแตนด์มีย่านความยาวคลื่นสั้น (400-900 นาโนเมตร) ทำให้ไม่เกิดการดูดกลืนขึ้น จึงเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟทั้งสแตนด์เป็นหลอดไฟซีนอนที่มีย่านความยาวคลื่นกว้างกว่า ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 3.11 ซึ่งเกิดการดูดกลืนที่ประมาณ 375 นาโนเมตร

การวัดสเปกตรัมการเรืองแสงจะต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีย่านความยาวคลื่นที่สามารถกระตุ้นแผ่นรวมแสงให้เกิดการเรืองแสงได้ คือต้องเกิดการดูดกลืนแสงขึ้น ในที่นี้ก็คือความยาวคลื่น 375 นาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตร แต่เป็นย่านความยาวคลื่นที่ไม่สามารถหาได้ในขณะทำการวิจัยจึงไม่ได้ทำการวัดสเปกตรัมการเรืองแสง แต่สามารถบอกได้ว่าเกิดการเรืองแสงเนื่องจากเกิดการดูดกลืนแสงไป



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนของแผ่นรวมแสง  
ที่เจือด้วยสาร Courmarin 153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

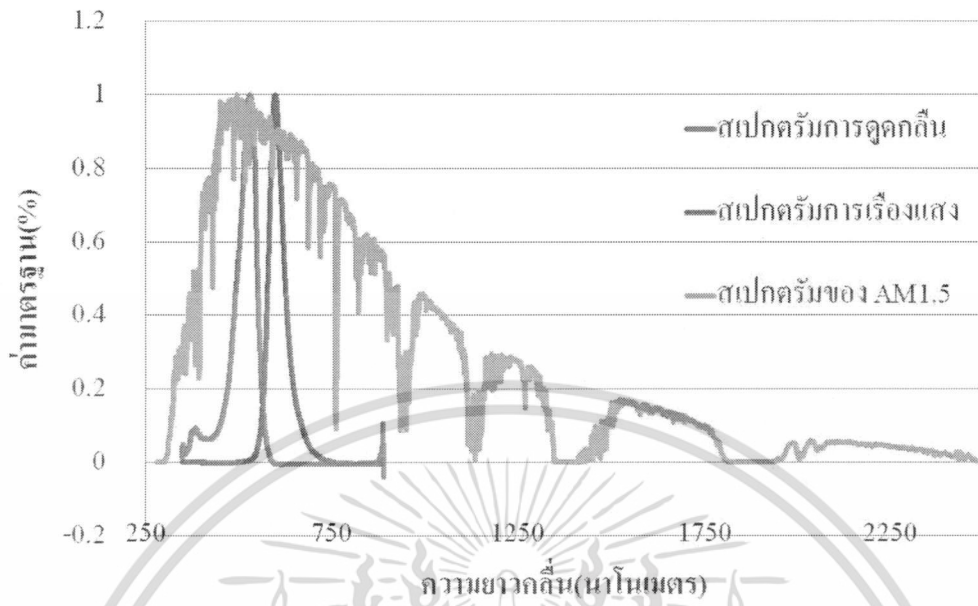
## บทที่ 4

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยแผ่นรวมแสงที่ทำการพัฒนาขึ้นมาทั้งหมด สามารถสรุปคุณสมบัติของแผ่นรวมแสงที่ได้ทำการวิจัย ได้ดังนี้

1. สารตัวเร่งที่ใช้ในการผสมเพื่อสร้างแผ่นรวมแสงควรมีปริมาณ 2%
2. การเตรียมแผ่นรวมแสงที่เจือสารละลายลงไป สารเอทานอลมีผลอย่างมากต่อการแข็งตัวของแผ่นรวมแสง แผ่นรวมแสงที่ได้ส่วนใหญ่เกิดความอ่อนตัวและยืดหยุ่น
3. แผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้น  $10^{-3}$  โมลาร์ เกิดการดูดกลืนมากที่สุด
4. แผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้น  $10^{-4}$  โมลาร์ เกิดการเรืองแสงมากที่สุด
5. แผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G ที่ความหนา 3 มิลลิเมตร เกิดการดูดกลืนมากที่สุด
6. แผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G ที่ความหนา 1.5 มิลลิเมตร เกิดการเรืองแสงมากที่สุด
7. แผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G จะเกิดการดูดกลืนย่านความยาวคลื่น 530-560 นาโนเมตร
8. แผ่นรวมแสงที่เจือด้วยสาร Rhodamine 6G จะเกิดการเรืองแสงย่านความยาวคลื่น 550-580 นาโนเมตร

จากการสรุปผลข้างต้นสามารถบอกได้ว่าแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ที่ทำการพัฒนาขึ้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากการเกิดการเรืองแสงที่ความยาวคลื่นที่สูงกว่า ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.1 ที่เปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนและการเรืองแสงของสาร Rhodamine 6G กับสเปกตรัมของ Air Mass 1.5 ซึ่งเป็นสเปกตรัมที่แสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิวโลกที่มุมประมาณ 48 องศา จากรูปแผ่นรวมแสงสามารถดูดกลืนแสงในย่านที่มีแสงอาทิตย์มาตกกระทบพื้นโลกมากที่สุดได้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงสเปกตรัมการดูดกลืน, สเปกตรัมการเรืองแสงและสเปกตรัมของ AM 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

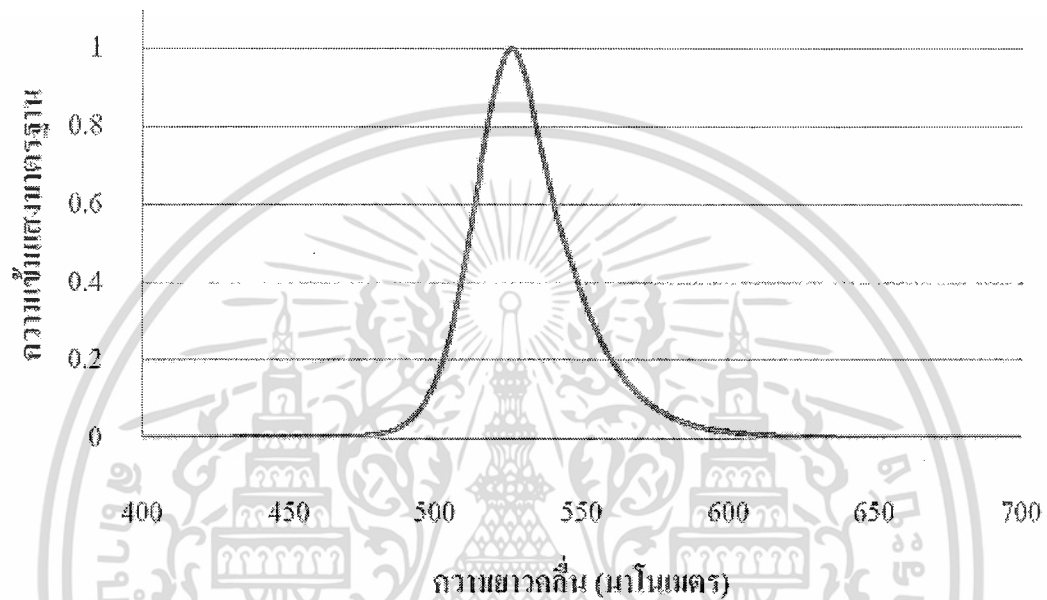
### บรรณานุกรม

- (1) รศ. แม้น อมรสิทธิ์และคณะ , หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ, สำนักพิมพ์บริษัท ชวนพิมพ์ 50 จำกัด, 2552
- (2) L. Danos, P. Kittidachachan, T.J.J. Meyer, R. Greef, and T. Markvart, Characterisation of fluorescent collectors based on solid, liquid, and Langmuir blotter films. In 21<sup>st</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 443-446, 2006.
- (3) B.S. Richards, Enhancing the performance of silicon solar cells via the application of passive luminescence conversion layers, Solar energy materials and solar cells, 90, 2329-2337, 2006.
- (4) M. G. Debije, R. H. L. Van der Blom, D. J. Broer, and C. W. Bastiaansen, "Using selectively-reflecting organic mirrors to improve light output from a luminescent solar concentrator," in Proceedings of World Renewable Energy Congress IX, 2006.
- (5) T. Markvart, D. L., P. Kittidachachan, and R. Greef, "Detailed balance efficiency of ideal single-stage fluorescent collectors," in Proceedings of Twentieth European Photovoltaic Solar Energy Conference, W. Hoffmann, J.-L. Bal, H. Ossenbrink, W. Palz, and P. Helm, Eds. (WIP, Munich, Germany, 171-174, 2005.
- (6) A. J. Chatten, K. W. J. Barnham, B. F. Buxton, N. J. Ekins-Daukes, and M. A. Malik, "Quantum Dot Solar Concentrators," Semiconductors 38, 609-617, 2004.
- (7) <http://www.olympusmicro.com/primer/java/jablonski/jabintro/index.html> (last access March 18, 2010)

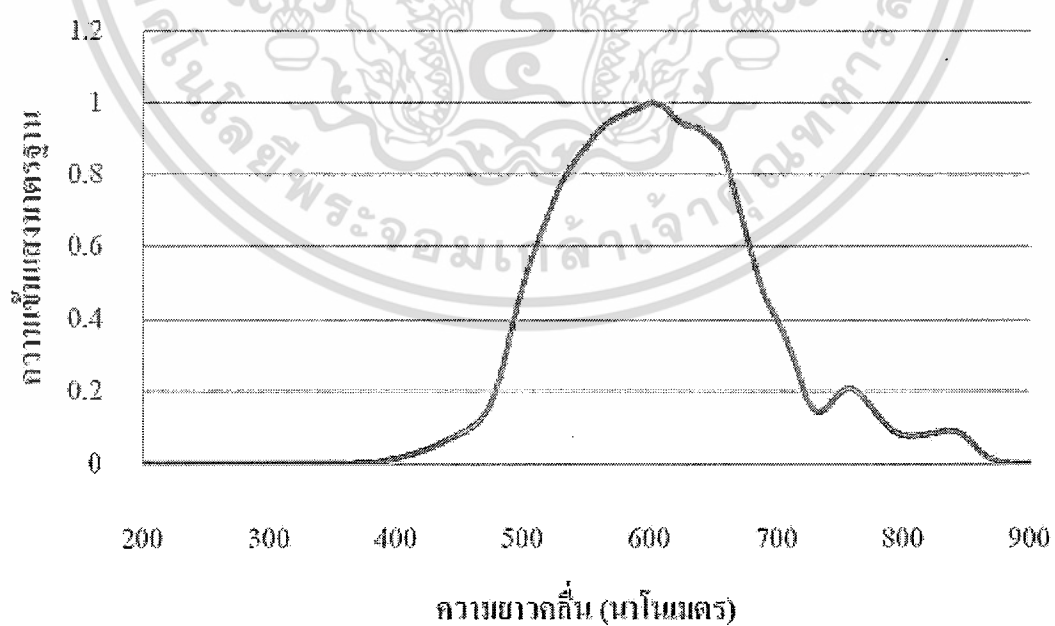
## ภาคผนวก

สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในงานวิจัย

### แหล่งกำเนิดแสง LED

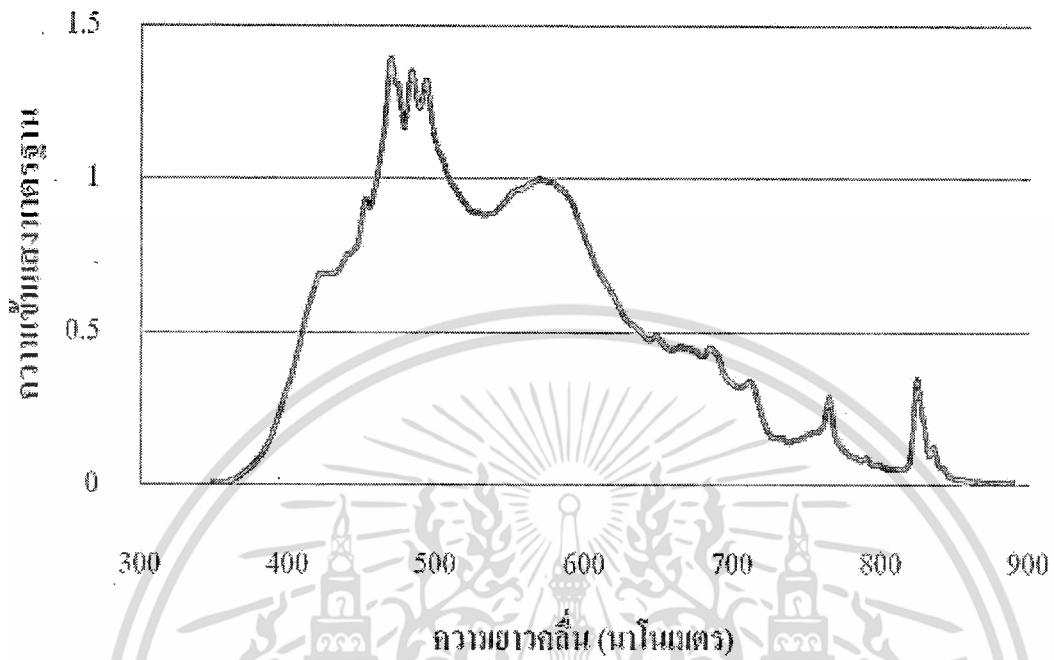


### แหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แหล่งกำเนิดแสงซินคอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้