



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของวัสดุ Rhodamine 6G ร่วมกับ
อนุภาคโลหะนาโนทอง-แพลลาเดียม

Determination of the fluorescence quantum yield of Rhodamine 6G
with gold-palladium core-shell nanoparticles

นางภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์
นายวิฑูรย์ ยินดีสุข

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2560

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของวัสดุ Rhodamine 6G ร่วมกับ
อนุภาคโลหะนาโนทอง-แพลลาเดียม

Determination of the fluorescence quantum yield of Rhodamine 6G
with gold-palladium core-shell nanoparticles

นางภัทริยา ดำรงค์ดี
นายวิฑูรย์ ยินดีสุข

EResearch

เลขที่.....
เลขทะเบียน **148538**
ฉบับเดือนปี **131 ต.ค. 2560**

b. 00265111
i.

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2560

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ	การศึกษาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของวัสดุ Rhodamine 6G ร่วมกับอนุภาค โลหะนาโนทอง-แพลลาเดียม		
แหล่งเงิน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์		
ประจำปีงบประมาณ	2560	จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน	150,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย	1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560		
หัวหน้าโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภทริยา ดำรงค์ศักดิ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		
ผู้ร่วมโครงการวิจัย	ดร. วิฑูรย์ ยินดีสุข ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		

บทคัดย่อ

อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคนาโนโลหะและวัสดุฟลูออโรฟอร์ได้รับถูกศึกษาอย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานในหลายด้าน เช่น เซนเซอร์ชีวภาพ การสร้างภาพตรวจวัดเซลล์ และด้านเซลล์แสงอาทิตย์ การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเมื่อวัสดุฟลูออโรฟอร์ถูกแวดล้อมด้วยอนุภาคนาโนโลหะ ความเข้มแสงที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ขึ้นกับระยะห่างระหว่างอนุภาคโลหะและวัสดุฟลูออโรฟอร์ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติการดูดกลืนและการเปล่งแสงของวัสดุ Rhodamine 6G ในรูปของสารละลายเมื่อถูกแวดล้อมด้วยอนุภาคนาโนโลหะทอง-แพลลาเดียม นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทดลองวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rhodamine 6G ในกรณีที่มีและไม่มี การเจืออนุภาคนาโนโลหะทอง-แพลลาเดียมโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบ ความเข้มข้นของสาร Rhodamine 6G ที่ศึกษาอยู่ในช่วง 3.53×10^{-7} ถึง 1.70×10^{-6} โมลาร์ และค่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโนโลหะทอง-แพลลาเดียมมีค่าอยู่ในช่วง 7.06×10^{-6} ถึง 1.36×10^{-4} โมลาร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์จะมีค่าขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่ผสมกัน ความสัมพันธ์ของค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์และความเข้มข้นของสารจะถูกวิเคราะห์ผ่านวิธีการพื้นผิวตอบสนอง ผลการทดลองและการคำนวณมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่า 2 %

คำสำคัญ : ฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ อนุภาคนาโนโลหะทอง-แพลลาเดียม วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Determination of the fluorescence quantum yield of Rhodamine 6G with gold-palladium core-shell nanoparticles

Researchers: Asst.Prof. Pattareeya Damrongsak (Principle investigator)

Dr. Witoon Yindeesuk (Co-investigator)

Physics Department Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

Interactions between metal nanoparticles and fluorophores have been extensively studied because they offer the diverse applications for biosensors, cell imaging, and photovoltaics. It has been reported that when fluorophores are located near the metal nanoparticles, emission intensity can be enhanced or quenched depending on the distance between the metal nanoparticles and fluorophores. In this research, we studied how the absorption and emission behavior of Rhodamine 6G dye in solution form is tailored using AuPd core-shell nanorods. In addition, the fluorescent quantum yield of Rhodamine6G solution in the absence and presence of AuPd core-shell nanorods was measured using a comparative method. The fluorescent quantum yields were investigated when the concentrations of Rhodamine6G were varied from 3.53×10^{-7} to 1.70×10^{-6} Molar, whilst the concentrations of AuPd core-shell nanorods were varied from 7.06×10^{-6} to 1.36×10^{-4} Molar. Experimental results have been shown that the measured fluorescent quantum yield was dependent on the proportions between Rhodamine6G and AuPd core-shell nanorods. Relationship between these fluorescent quantum yields and concentrations of the samples were also analyzed by the response surface methodology. It was found that the deviation between experiment and calculation were less than 2%.

Keywords : fluorescent quantum yield, AuPd core-shell nanorods, response surface methodology.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภาภรณ์ สกุลการะเวก อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ที่ให้คำชี้แนะเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์โปรแกรมในการทดลอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษกร โล้เจริญรัตน์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับวิธีการจัดเตรียมอนุภาคนาโนโลหะ และช่วยผลักดันให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงและสามารถตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติได้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทริยา ดำรงค์ดี
ดร. วิฑูรย์ ยินดีสุข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 Fluorescence quantum yield	5
2.2 กลไกการเรืองแสง	7
2.3 ปฏิกิริยาการถ่ายโอนพลังงานเรโซแนนซ์	9
2.4 Plasmon resonance energy transfer	9
2.5 Fluorescence resonance energy transfer	10
2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	14
3.1 เครื่องมือและระบบการวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	14
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	14
3.3 ระบบวัด	16
3.3.1 ระบบวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลายสารเรืองแสง	16
3.3.2 ระบบวัดสมบัติการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์	17
3.4 การเตรียมวัสดุและการวัดค่า ϕ_f ของสารละลาย	17
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยี่ลต์ของสารละลาย Rhodamine 6G	20
4.2 ผลการศึกษาสเปกตรัมแสงของสารละลาย Rhodamine 6G และ สารละลาย Rhodamine 6G ที่ผสมกับอนุภาค AuPd	28
4.3 ผลการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยี่ลต์ของสารละลาย Rhodamine 6G ผสม AuPd โดยการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert 9.0.3	33
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	42
5.1 สรุปผลการวิจัย	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	42
บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย	43
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	47
ภาคผนวก ข	56



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 รายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	3
1.2 ระยะเวลาและแผนในการดำเนินงาน	4
2.1 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rhodamine 6G ในตัวทำละลายต่างๆ	6
3.1 สมบัติพื้นฐานของสารเรืองแสง Rh6G และ RhB	15
3.2 ค่าความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G	18
3.3 การเตรียมสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาค AuPd	18
3.4 ความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G และอนุภาค AuPd	19
4.1 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G จากการทดลองครั้งที่ 1	26
4.2 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G จากการทดลองครั้งที่ 2	27
4.3 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G จากการทดลองครั้งที่ 3	27
4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย	39
4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับแบบจำลอง	41
4.6 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G ผสมอนุภาค AuPd ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณด้วยสมการ	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน Jablonski	7
2.2 กลไกการเกิดกระบวนการ Plasmonic resonance energy transfer	9
2.3 แผนภาพแสดงระดับพลังงานอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ FRET	10
2.4 แผนภาพ Jablonski พื้นฐานและแบบประยุกต์กรณีโมเลกุลถูก แวดล้อมด้วยอนุภาคโลหะ	12
2.5 กระบวนการออกแบบการทดลอง	13
3.1 โครงสร้างของสาร (ก) Rhodamine 6G และ (ข) Rhodamine B	15
3.2 โครงสร้างของ AuPd แบบแท่ง	16
3.3 ระบบวัดการดูดกลืนแสง	16
3.4 ระบบวัดการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์	17
4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G และ RhB	20
4.2 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G และ RhB	24
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพีคการเปล่งแสงและความเข้มข้นของสารละลาย	25
4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาค AuPd	28
4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G	29
4.6 ค่าพีคสูงสุดของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G	29
4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G กับสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd	30
4.8 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน Au/Pd เทียบกับ สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G	32
4.9 อัตราส่วนแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ AuPd + Rh6G : Rh6G	33
4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G และสารละลาย Rh6G ที่ผสม กับอนุภาค AuPd	34
4.11 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ Rh6G และสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาค AuPd	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.12 (ก) ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการ
คำนวณ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ ค่าความเข้มข้น
ของสาร Rh6G และ อนุภาค AuPd

40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อนุภาคนาโนโลหะจัดเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางแสงที่น่าสนใจ เพราะเป็นวัสดุที่สามารถทำให้เกิดการดูดกลืนและการกระเจิงแสงแบบเรโซแนนซ์ซึ่งไม่พบในวัสดุโลหะที่มีขนาดใหญ่ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดเนื่องจากการสั่นแบบพร้อมเพรียงกันของกลุ่มอิเล็กตรอนในชั้นแถบความนำภายใต้สนามไฟฟ้า ส่งผลให้ปริมาณสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้พื้นผิวของอนุภาคมีความเข้มข้น หรือถูกเรียกกันว่าเกิดปรากฏการณ์ เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance :SPR) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มกลไกทางแสงในหลายๆด้าน เช่น การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) การเพิ่มการดูดกลืนแสงและความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของวัสดุฟลูออเรสเซนซ์ เป็นต้น [1-3]

ในปัจจุบันการนำอนุภาคนาโนโลหะมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวัสดุฟลูออเรสเซนซ์ได้รับความสนใจอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากสามารถส่งผลให้ปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ตรวจวัดได้มีความเข้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ Plasmon Resonance Energy Transfer (PRET) [4] ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแสงฟลูออเรสเซนซ์นี้จะช่วยเพิ่มขีดจำกัดของการตรวจวัดทางด้านเคมี ฟิสิกส์ และชีวการแพทย์ได้ [5-8] ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มขึ้นของแสงจะช่วยเพิ่มความคมชัดของภาพถ่ายเซลล์มะเร็งที่ถูกย้อมสี การใช้วัสดุฟลูออเรสเซนซ์ในการตรวจวัดปริมาณไอออนโลหะที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำโดยอาศัยการวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ จะสามารถใช้สารที่ตรวจวัดในปริมาณความเข้มข้นที่ลดลง เป็นต้น จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอนุภาคนาโนของทองและเงินได้ถูกศึกษาอย่างมาก ซึ่งอนุภาคทั้งสองจะแสดงสมบัติ พลาสมอนเรโซแนนซ์ในย่านวิสิเบิล (visible) และอินฟราเรดย่านใกล้ (near-infrared) อย่างไรก็ตามอนุภาคทั้งสองก็ยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับงานบางด้าน ยกตัวอย่างเช่น การนำมาใช้ในกลไกการเร่งปฏิกิริยาเคมี (เพราะจะไม่ตอบสนองต่อกลไกดังกล่าว) เป็นต้น ดังนั้นการนำอนุภาคนาโนดังกล่าวมาทำโครงสร้างใหม่ร่วมกับวัสดุโลหะประเภทอื่นจึงได้รับความสนใจ ทั้งนี้เนื่องจากจะสามารถทำให้ได้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่โดดเด่นขึ้น จากการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การนำวัสดุโลหะในกลุ่มทรานซิชัน เช่น Pd, Pt มาสร้างโครงสร้างอนุภาคนาโนโลหะร่วมกับทองหรือเงิน โดยออกแบบให้มีวัสดุดังกล่าวหุ้มอนุภาคนาโนโลหะทองหรือเงิน (โครงสร้างแบบ core-shell) เช่น AuPd, AuPt จะสามารถเพิ่มคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาได้ (improve catalytic properties) [9] และจากผลการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ผู้วิจัยพบว่า การใช้วัสดุ AuPd กับวัสดุสีย้อม Rhodamine6G จะช่วยเพิ่มปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ของวัสดุ Rhodamine 6G ได้เมื่อทำการผสม AuPd กับวัสดุสีย้อม Rhodamine6G ในสัดส่วนที่เหมาะสม [10] ซึ่งผู้วิจัยคาดว่า การปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อสารสีย้อมถูกนำมาผสมกับอนุภาคนาโนโลหะน่าจะมีข้องเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่า ฟลูออ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ (fluorescence quantum yield: ϕ_F) ของวัสดุ ดังนั้นเพื่อทดสอบสมมติฐานดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาค่า ϕ_F โดยผู้วิจัยจะทำการวัดหาค่า ϕ_F ของวัสดุ Rhodamine 6G เมื่ออยู่ในแวดล้อมของอนุภาคนาโนโลหะ AuPd ผลการศึกษานี้จะสามารถบอกถึงประสิทธิภาพในการคายพลังงานในรูปของแสงของวัสดุ Rhodamine 6G เมื่ออยู่ในแวดล้อมของอนุภาคนาโนโลหะ AuPd ในเชิงปริมาณ และสามารถนำไปใช้สำหรับการจัดเตรียมวัสดุให้มีเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆที่เกี่ยวข้องต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาหลักการวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ ของวัสดุ Rhodamine 6G ที่ผสมกับวัสดุโลหะ AuPd ที่มีโครงสร้างระดับนาโน

1.2.2 ทดสอบสมบัติการดูดกลืนแสงและการแปลงแสงของวัสดุ Rhodamine 6G ที่ผสมกับวัสดุโลหะ AuPd ที่มีโครงสร้างระดับนาโนเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่า ϕ_F

1.2.3 ศึกษาเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความเข้มข้นของสารผสม Rhodamine 6G : Au-Pd ที่ทำให้ได้ค่า ϕ_F เพิ่มขึ้นสูงสุด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาหลักการวัดค่า ϕ_F และจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์เพื่อทดลองวัดและวิเคราะห์หาค่า ϕ_F ของวัสดุ Rhodamine 6G เมื่ออยู่ในแวดล้อมของอนุภาคนาโนโลหะ AuPd ที่มีโครงสร้างระดับนาโนในรูปของสารละลาย โดยตัวทำละลายที่จะทำการศึกษาวิจัยจะมีอยู่ 2 ชนิดคือ เอทานอล และน้ำ โดยในเบื้องต้นผู้วิจัย จะทำการศึกษาและประเมินความแม่นยำของเทคนิคที่จะใช้วัดค่า ϕ_F โดยการเตรียมสารละลาย R6G ให้ตรงตามเงื่อนไขที่ปรากฏในเอกสารงานวิจัยที่สืบค้นได้ และทำการวัดค่า ϕ_F โดยอาศัยการเปรียบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐาน ทั้งนี้เพื่อประเมินความถูกต้อง แม่นยำของเทคนิค จากนั้นจะทำการศึกษาค่า ϕ_F ของสาร Rhodamine 6G ที่ผสมกับวัสดุโลหะ AuPd ที่มีโครงสร้างระดับนาโน โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของความเข้มข้นของสารผสม Rhodamine 6G : Au-Pd เพื่อศึกษาและหาเงื่อนไขที่ทำให้ได้ค่า ϕ_F เพิ่มขึ้นสูงสุด

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

รายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนและวิธีดำเนินงานมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 1.1 รายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

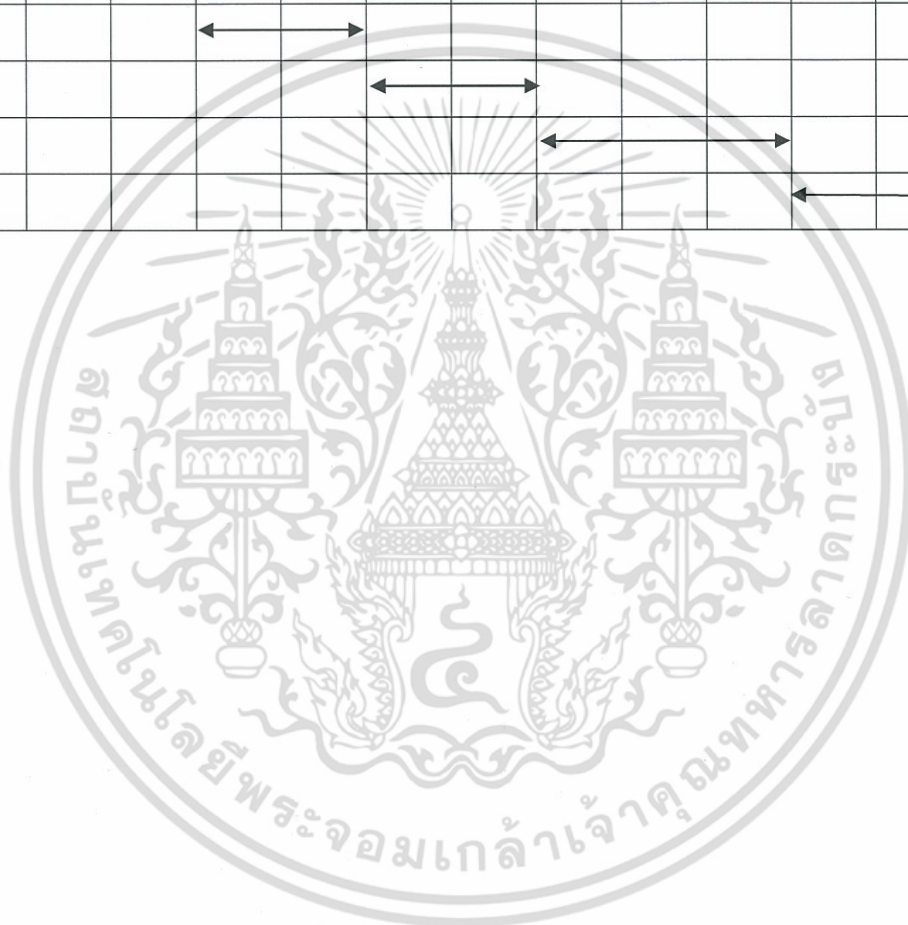
ขั้นตอน	วิธีการดำเนินงาน
<u>ขั้นตอนที่ 1</u> ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคและวิธีการวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของวัสดุ	สืบค้นเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากห้องสมุดและฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์
<u>ขั้นตอนที่ 2</u> ค้นคว้าและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของวัสดุ Rh6G และวัสดุอนุภาคโลหะที่มีขนาดนาโน	สืบค้นเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากห้องสมุดและฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์
<u>ขั้นตอนที่ 3</u> จัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย	ติดต่อสั่งซื้อวัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการทำวิจัยจากบริษัทผู้จำหน่ายสินค้าหรือตัวแทนจำหน่าย
<u>ขั้นตอนที่ 4</u> ทดลองวัดสเปกตรัมแสงและวิเคราะห์ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของวัสดุ Rh6G เบื้องต้น	จัดเตรียมสารตัวอย่างมาตรฐานและสารที่ต้องการทดสอบคือ Rh6G ในรูปของสารละลายตามเงื่อนไขที่สอดคล้องกับค่าที่สืบค้นได้จากเอกสารอ้างอิง และทำการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของวัสดุ และนำผลการวัดมาคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ด้วยวิธี relative
<u>ขั้นตอนที่ 5</u> ทดลองวัดสเปกตรัมแสงและวิเคราะห์หาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของวัสดุ Rh6G ในแวดล้อมของวัสดุนาโนโลหะ AuPd	จัดเตรียมสารตัวอย่างมาตรฐานและสารที่ต้องการทดสอบคือ Rh6G ในแวดล้อมของวัสดุนาโนโลหะที่ทำให้เกิดกลไก MEF และทำการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของวัสดุ และนำผลการวัดมาคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ด้วยวิธี relative
<u>ขั้นตอนที่ 6</u> เขียนผลการวิจัยเพื่อเผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์	นำผลการวิจัยมาวิเคราะห์และเขียนสรุปเพื่อเผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแผนการดำเนินงานแต่ละขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ระยะเวลาและแผนในการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลา											
	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										←→	→	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 Fluorescence quantum yield

ค่า Fluorescence Quantum yield (ϕ_F) คือค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพในปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์ของโมเลกุล มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของปริมาณโฟตอนที่โมเลกุลคายออกมาต่อปริมาณโฟตอนที่ถูกดูดกลืน ดังสมการที่ (1) [11]

$$\phi_F = \frac{\text{photon}_{em}}{\text{photon}_{abs}} \quad (2.1)$$

หรือมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าอัตราการคายพลังงานแบบปลดปล่อยแสงและผลรวมของอัตราการคายพลังงานแบบปลดปล่อยแสงและแบบไม่ปลดปล่อยแสงดังสมการที่ (2.2)

$$\phi_F = \frac{k_r}{k_r + k_{nr}} \quad (2.2)$$

เมื่อ k_r คืออัตราการคายพลังงานแบบปลดปล่อยแสง (radiative rate) และ k_{nr} คืออัตราการคายพลังงานแบบไม่ปลดปล่อยแสง (non-radiative rate)

การวัดค่า ϕ_F สามารถทำได้โดยหลายวิธี เช่น การใช้เทคนิคทางแสงร่วมกับ photoacoustic [12] การใช้เทคนิค Thermal lens [13] และ การใช้เทคนิค Relative [14] เป็นต้น 2 เทคนิคแรกจะเป็นการวัดปริมาณแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุที่ต้องการทดสอบเทียบกับปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนโดยตรง หรือเรียกว่าการวัดหาค่า absolute quantum yield ซึ่งจะต้องอาศัยเครื่องมือวัดที่มีความซับซ้อนและแม่นยำสูง สามารถตรวจวัดปริมาณแสงในเชิงปริมาณได้ ส่วนวิธีการสุดท้ายจะเป็นการหาค่า ϕ_F และวัสดุที่ต้องการทดสอบโดยอาศัยการวัดค่าเทียบกับวัสดุมาตรฐานที่ทราบค่า ϕ_{FS}

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิค relative เนื่องจากเทคนิคนี้มีการจัดเตรียมระบบการวัดไม่ซับซ้อน สามารถวัดค่าได้แม่นยำและใช้เวลาในการทดลองน้อย หลักการวัดของวิธีนี้จะอาศัยการวัดค่าการดูดกลืนและปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ของวัสดุที่ต้องการหาค่า ϕ_F และวัสดุมาตรฐานที่ทราบค่า ϕ_{FS} โดยจะต้องควบคุมเงื่อนไขในการวัดให้เหมือนกัน ซึ่งวัดสเปกตรัมแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ปล่อยมาทั้งหมดจากวัสดุทั้งสองและนำมาเปรียบเทียบกัน จะสามารถนำมาคำนวณหาค่า ϕ_F ของวัสดุที่ต้องการทดสอบได้ ดังสมการที่ (2.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi = \phi_R \frac{I}{I_R} \frac{A_R}{A} \left(\frac{n}{n_R} \right)^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ I คือค่าพื้นที่ใต้กราฟการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์

A คือค่าการดูดกลืนแสง

n คือค่าดัชนีหักเหแสงของสารละลาย

ตัวแปรที่ห้อย R หมายถึงค่าตัวแปรของสารละลายอ้างอิง

เนื่องจากค่า ϕ_F จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการรวมแสงของวัสดุและจะมีค่าขึ้นกับตัวกลางและสภาพแวดล้อมของวัสดุ ซึ่งในกรณีของวัสดุ Rhodamine 6G ที่อยู่ในตัวกลางที่แตกต่างกันจะมีค่า ϕ_F ที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งสรุปดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rhodamine 6G ในตัวทำละลายต่างๆ

ϕ_F	ตัวกลาง	ความเข้มข้น/ค่าการดูดกลืน	ผู้วิจัย/ปีที่น่าเสนอ	เอกสารอ้างอิง
0.95 (± 0.01)	เอทานอล	ค่าการดูดกลืนในช่วง 0.05-0.20	Markus Grabolle, Monika Spieles, Madimir Lesnyak, Nikolai Gaponik, Alexander Eychmu ller, and Ute Resch-Genger /2009	[15]
0.94	เอทานอล	ความเข้มข้น $1 \times 10^{-5} - 1.5 \times 10^{-4}$ โมลาร์	M. Fischer, J. Georges /1996	[16]
0.88	เอทานอล	ความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์	John Olmsted /1979	[17]
0.95	เอทานอล	ความเข้มข้น $1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-6}$ โมลาร์	Xian-FuZhang , YakuiZhang , LiminLiu /2014	[18]
0.86	เมทานอล	ความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์	John Olmsted /1979	[17]
0.93 (± 0.005)	เมทานอล	ค่าการดูดกลืนในช่วง 0.4-0.6	Douglas Magde, Roger Wong and Paul G. Seybold /2002	[19]

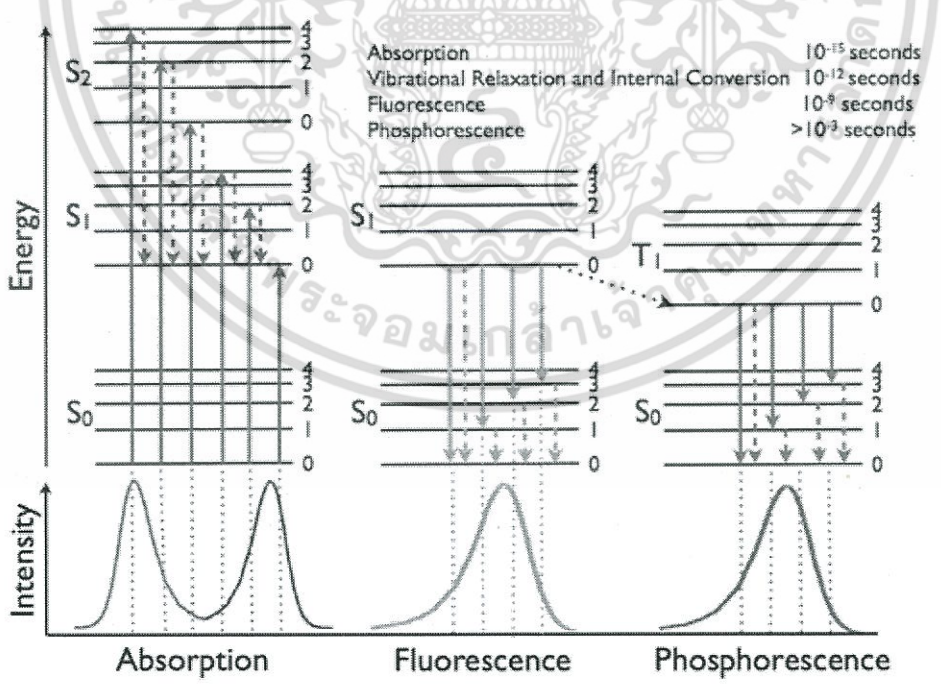
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ค่าพลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rhodamine 6G ในตัวทำละลายต่างๆ

0.90 (± 0.02)	น้ำ	ค่าการดูดกลืนในช่วง 0.4-0.6	Douglas Magde, Roger Wong and Paul G. Seybold /2002	[19]
0.91 (± 0.08)	น้ำ	ความเข้มข้น 1×10^{-6} โมลาร์	Christian Wurth, Martin G. Gonzalez, Reinhard Niessnerb, Ulrich Panne, Christoph Haisch, Ute Resch Genger /2012	[12]

2.2 กลไกการเรืองแสง

แสงที่ดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารเรืองแสงถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนในอะตอมของโมเลกุลสารเรืองแสงให้ย้ายไปยังระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น และเมื่ออิเล็กตรอนในสถานะดังกล่าวตกกลับมายังสถานะพื้น อาจจะมีการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์สามารถจำแนกได้หลายประเภทขึ้นกับแหล่งพลังงานที่กระตุ้นโมเลกุลของสารเรืองแสง ซึ่งการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ของอนุภาคหรือโมเลกุลโดยมีโฟตอนเข้าไปเกี่ยวข้องจะเรียกว่า โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) กระบวนการนี้สามารถอธิบายได้โดยใช้แผนภาพแสดงระดับพลังงาน Jablonski ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน Jablonski [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานที่มากพอจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้ไปที่ระดับพลังงานสูงขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปช่วงเวลาหนึ่งอิเล็กตรอนจะตกกลับสู่สถานะพื้น โดยการตกกลับสู่สถานะพื้นด้วยกระบวนการลดระดับพลังงาน โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ กระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เปล่งแสงและการลดระดับพลังงานแบบเปล่งแสง

(1) กระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เปล่งแสง

- การลดระดับพลังงานการสั่นของโมเลกุล (Vibrational relaxation: VR)

เมื่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลสารเองแสงได้รับพลังงานอิเล็กตรอนจะขึ้นไปสู่สถานะพลังงานกระตุ้น ซึ่งมีระดับพลังงานการสั่นหลายค่า เช่น จากแผนภาพ Jablonski ระดับพลังงาน S1 จะมีระดับพลังงานการสั่น 3 ระดับ เป็นต้น กระบวนการนี้เกิดขึ้นในโมเลกุลที่อยู่ในรูปแบบของสารละลาย อิเล็กตรอนนั้นจะเกิดการสูญเสียพลังงานออกมาในรูปของความร้อนที่เกิดจากการสั่นในการชนกับตัวทำละลายมีผลให้ตัวทำละลายมีพลังงานสูงขึ้น

- การแปลงผันภายใน (Internal conversion: IC)

กระบวนการนี้จะไม่เกิดการคายพลังงานแสงหรือพลังงานความร้อนออกมาแต่จะเกิดการส่งผ่านพลังงานระหว่างโมเลกุลเท่านั้นโดยโมเลกุลที่ส่งผ่านกันจะมีค่าพลังงานที่สถานะกระตุ้นต่างกันไม่มากนักหรือมีช่วงระดับพลังงานซ้อนทับกัน เช่น การส่งผ่านพลังงานในสถานะ S1 ไปยังสถานะ S2

- การลดระดับพลังงานข้ามสถานะ (Intersystem crossing: ISC)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนของโมเลกุลในสถานะกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการหมุน ซึ่งการที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางการหมุนได้ก็ต่อเมื่อระดับพลังงานการสั่นของสถานะเดียวและระดับชั้นพลังงานการสั่นของสถานะสามในสถานะกระตุ้นตรงกัน (ระดับพลังงานเท่ากัน) หรือการทรานซิชั่นจากสถานะเดียวที่มีระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดไปสู่สถานะสามในสถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานการสั่นมากกว่า

(2) กระบวนการลดระดับพลังงานแบบเปล่งแสง

- ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence)

การเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นที่อยู่สถานะเดียวเกิดการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้น ซึ่งการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้นนี้จะเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของแสงและเรียกกระบวนการคายพลังงานแสงนี้ว่าฟลูออเรสเซนซ์

- ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence)

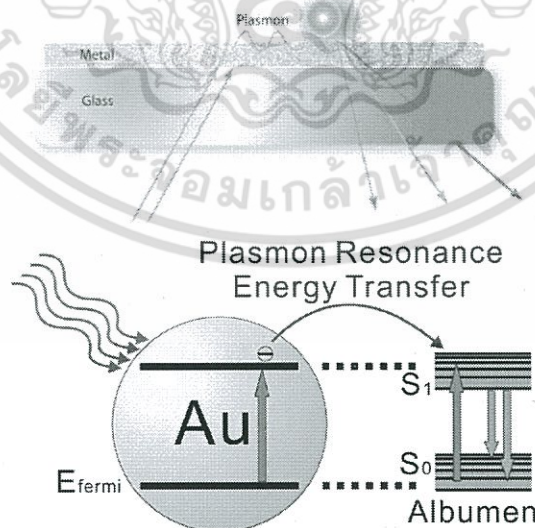
การคายพลังงานในกระบวนการนี้จะแตกต่างจากการคายพลังงานแบบฟลูออเรสเซนซ์เนื่องจากแสงฟอสฟอเรสเซนซ์เป็นการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นที่อยู่สถานะสามเกิดการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้น

2.3 ปรากฏการณ์เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์

ปรากฏการณ์เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance, SPR) ใช้อ้างถึงคลื่นความหนาแน่นของประจุที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระที่มีลักษณะการสั่นพร้อมเพรียงกัน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยผิวต่อของอนุภาคนาโนโลหะกับสารไดอิเล็กทริก เช่น ระหว่างทองคำหรือกับอากาศหรือสารละลาย โดยที่ขนาด ยอดคลื่นและความกว้างของสเปกตรัมพลาสมอนเรโซแนนซ์ของวัสดุต่างๆจะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ประเภทของวัสดุและสภาพแวดล้อมรอบๆวัสดุนั้น

2.4 Plasmon resonance energy transfer

กระบวนการ Plasmon resonance energy transfer (PRET) หรืออาจเรียกอีกแบบว่ากลไก Metal enhance fluorescence (MEF) เกิดจากการที่กลุ่มของอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนโลหะที่เกิดการสั่นภายใต้สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนของวัสดุเรืองแสงย้ายระดับขึ้นไปยังที่ถูกขึ้น และเมื่ออิเล็กตรอนลดระดับพลังงานลงมา จะปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสงฟลูออเรสเซนซ์ ส่งผลให้ปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ของโมเลกุลมีความเข้มเพิ่มขึ้น กลไก MEF นี้จะสามารถเพิ่มขีดจำกัดในด้านการปลดปล่อยแสงของวัสดุฟลูออเรสเซนซ์ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจวัดและการนำวัสดุฟลูออเรสเซนซ์นี้มาใช้งานในด้านต่างๆ

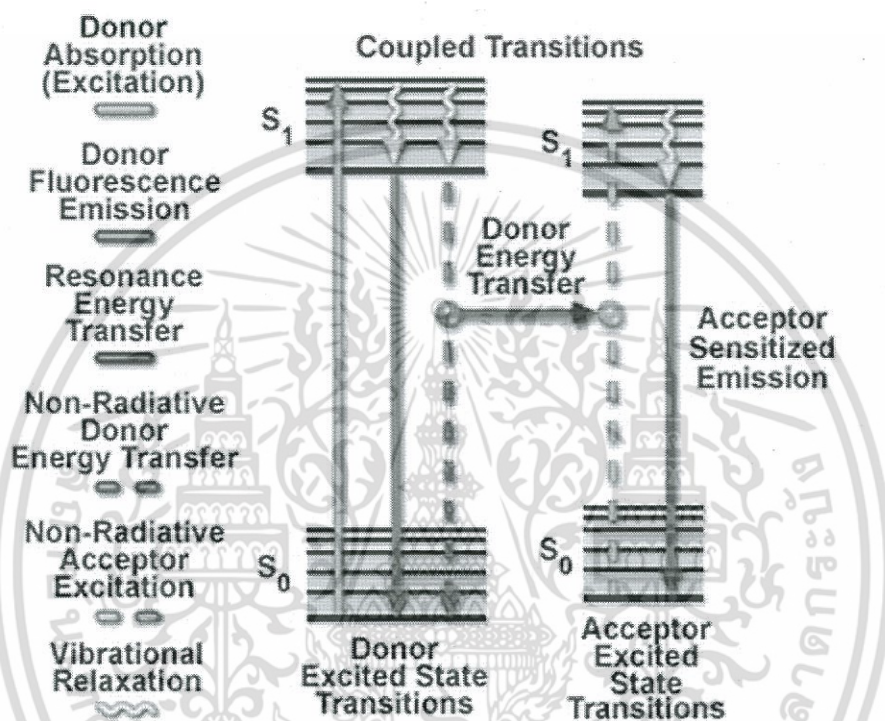


รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดกระบวนการ Plasmonic resonance energy transfer [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 Fluorescence resonance energy transfer

Fluorescence resonance energy transfer (FRET) คือกลไกการถ่ายทอดพลังงานระหว่างโมเลกุลของผู้ให้ (donor) และโมเลกุลของผู้รับ (acceptor) เมื่อระดับชั้นพลังงานและระยะห่างระหว่างโมเลกุลอยู่ในระยะที่เหมาะสม กลไกนี้สามารถแสดงได้ดังแผนภาพ Jablonski



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงระดับพลังงานอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ FRET [22]

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อโมเลกุลที่ทำหน้าที่เป็น donor ดูดกลืนแสงจะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการย้ายระดับจากชั้น S_0 ไปยังระดับชั้น S_1 และขณะที่โมเลกุลกลับสู่สถานะพื้นโดยมีโมเลกุลที่ทำหน้าที่เป็น acceptor อยู่ในระยะที่เหมาะสมจะมีการถ่ายโอนพลังงานจาก donor ไปยัง acceptor ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับชั้น S_0 ของ acceptor ย้ายระดับไปยังระดับชั้นที่สูงขึ้น และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งในกรณีของการถ่ายโอนพลังงานจากโมเลกุลของสีย้อมที่ทำหน้าที่เป็น donor ไปยังอนุภาคนาโนโลหะที่ทำหน้าที่เป็น acceptor จะส่งผลให้แสงฟลูออเรสเซนซ์ของโมเลกุลสีย้อมมีค่าลดลง

การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์สามารถอธิบายได้โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าควอนตัมยิลด์และค่าช่วงอายุพาหะ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1 ค่าควอนตัมยิลด์และช่วงชีวิตของวัสดุฟลูออโรฟอร์

การพิจารณาค่าควอนตัมยิลด์และช่วงชีวิตของวัสดุฟลูออโรฟอร์โดยทั่วไป สามารถพิจารณาได้จากสมการที่

(2.4) และ (2.5) ตามลำดับ

$$\phi_f = \frac{T}{T + k_{nr} + k_q} \quad (2.4)$$

$$t_0 = \frac{1}{T + k_{nr} + k_q} \quad (2.5)$$

เมื่อ	ϕ_f	คือค่าควอนตัมยิลด์ของวัสดุฟลูออโรฟอร์โดยทั่วไป
	T	คืออัตราการรวมตัวของแบบปลดปล่อยแสง
	k_{nr}	คืออัตราการรวมตัวแบบไม่ปลดปล่อยแสง
	k_q	คืออัตราการเกิด quenching
	t_0	คือช่วงชีวิตของวัสดุฟลูออโรฟอร์

กรณีที่ 2 ค่าควอนตัมยิลด์และช่วงชีวิตของวัสดุฟลูออโรฟอร์ที่ถูกแวดล้อมด้วยวัสดุโลหะนาโน

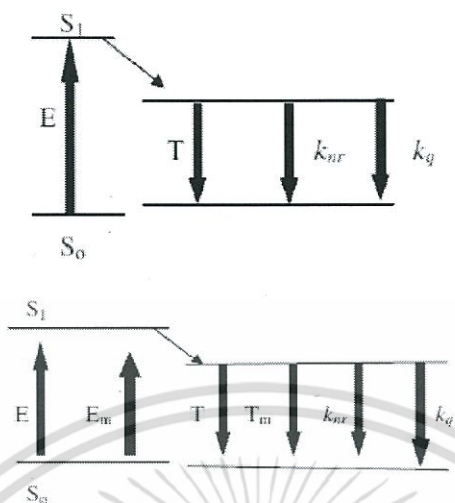
เมื่อวัสดุฟลูออโรฟอร์ถูกแวดล้อมด้วยอนุภาคนาโนในระยะเวลาที่เหมาะสม จะส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์และช่วงชีวิตของวัสดุฟลูออโรฟอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)

$$\phi_m = \frac{T + T_m}{T + k_{nr} + k_q} \quad (2.6)$$

$$t_m = \frac{1}{T + T_m + k_{nr} + k_q} \quad (2.7)$$

เมื่อ	ϕ_m	คือค่าควอนตัมยิลด์ของวัสดุฟลูออโรฟอร์เมื่อถูกแวดล้อมด้วยวัสดุโลหะ
	t_m	คือช่วงชีวิตของวัสดุฟลูออโรฟอร์เมื่อถูกแวดล้อมด้วยวัสดุโลหะ
	T_m	คืออัตราการรวมตัวของแบบปลดปล่อยแสงที่เพิ่มขึ้นจากการที่วัสดุฟลูออโรฟอร์ถูกแวดล้อมด้วยวัสดุโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แผนภาพ Jablonski พื้นฐานและแบบประยุกต์กรณีโมเลกุลถูกแวดล้อมด้วยอนุภาคโลหะ [23]

2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

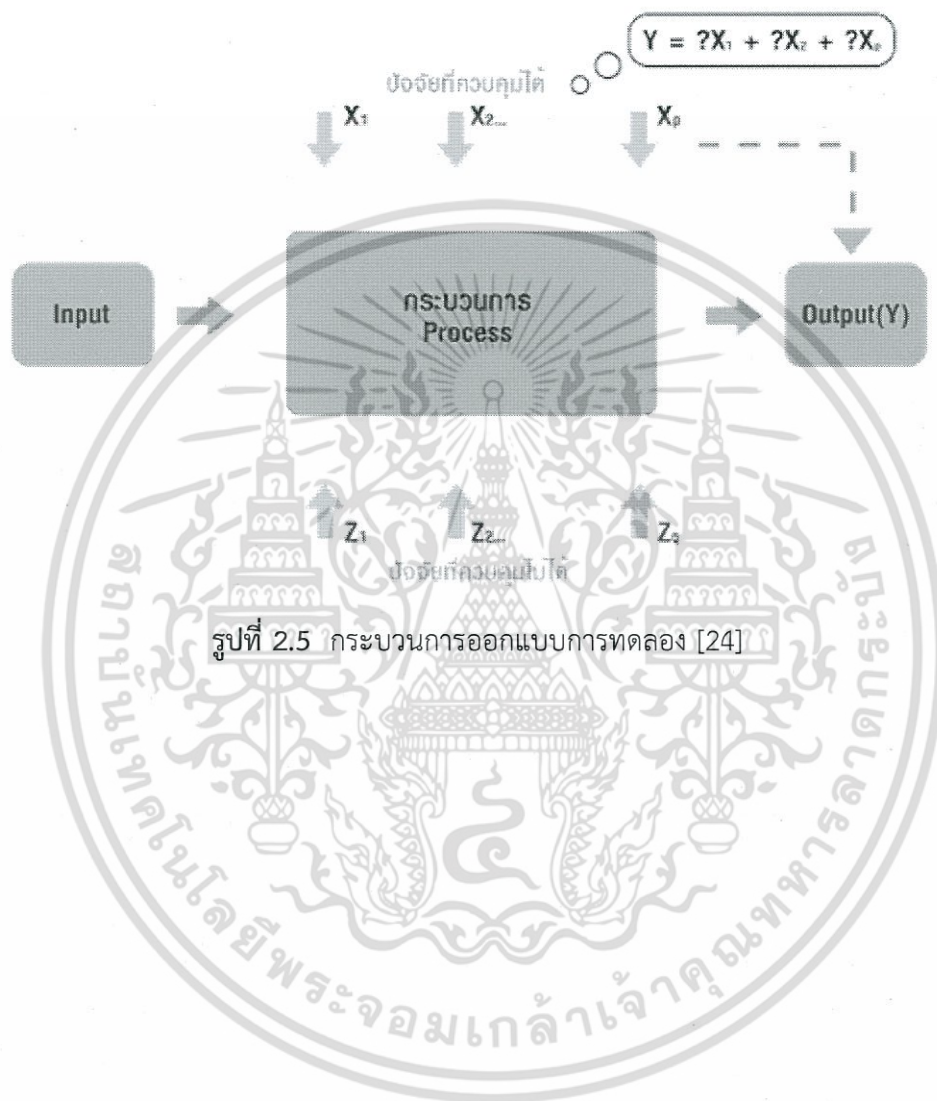
การออกแบบการทดลอง คือ การดำเนินการทดลองอย่างเป็นระบบและมีการควบคุม มีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาว่าตัวแปรอินพุตที่ป้อนเข้าไปในกระบวนการ มีอิทธิพลระหว่างกัน และมีความสัมพันธ์กับผลลัพธ์ที่ได้ ภายหลังจากผ่านกระบวนการแล้วอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ การออกแบบการทดลอง (DOE) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาผลกระทบจากหลายๆปัจจัยที่ส่งผลพร้อมๆกันต่อตัวแปรตอบสนองที่เราสนใจ ซึ่งจะช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองได้ ในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยในการออกแบบการทดลอง เช่น Minitab, Design Expert เป็นต้น โปรแกรมเหล่านี้สามารถสร้างแบบการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง และสร้างกราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สนใจเพื่อช่วยให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผล โดยการออกแบบการทดลองโดยโปรแกรมจะประกอบด้วย

1. เงื่อนไขการทดลองแบบต่างๆ ที่ช่วยในการสร้างชุดทดลอง
2. การสร้างและจัดเก็บการทดลองแบบอัตโนมัติหลังจากกำหนดรูปแบบการทดลองและกำหนดข้อมูลที่เป็นจำเป็น
3. การแสดงผลและเก็บค่าสถิติที่ใช้เพื่อช่วยในการแปรผลการทดลอง
4. การนำเสนอข้อมูลในรูปแบบของกราฟเพื่อช่วยแปรผลการทดลอง

การออกแบบการทดลองที่เกิดประสิทธิผล ผู้ทดลองจะต้องทำตามขั้นตอนโดยทำความเข้าใจปัญหา กำหนดวัตถุประสงค์ให้ชัดเจน เลือกผลลัพธ์ของกระบวนการ (y) กำหนดปัจจัย (x) ที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับผลลัพธ์ (y) ทำการเก็บข้อมูลโดยวิธีการที่เหมาะสม ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ไปปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการและทดลองเก็บข้อมูลอีกครั้งเพื่อยืนยันผลก่อนนำไปใช้งานจริง โดยแสดงกระบวนการได้ดังแผนภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงเครื่องมือและวัสดุที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมถึงกระบวนการในการเตรียมสารละลายของสารสีย้อมกับอนุภาคนาโนโลหะ กระบวนการทดสอบสเปกตรัมของแสงของสารละลายและการวิเคราะห์หาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ โดยมีเนื้อหาแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อหลักดังนี้

3.1. เครื่องมือและระบบการวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

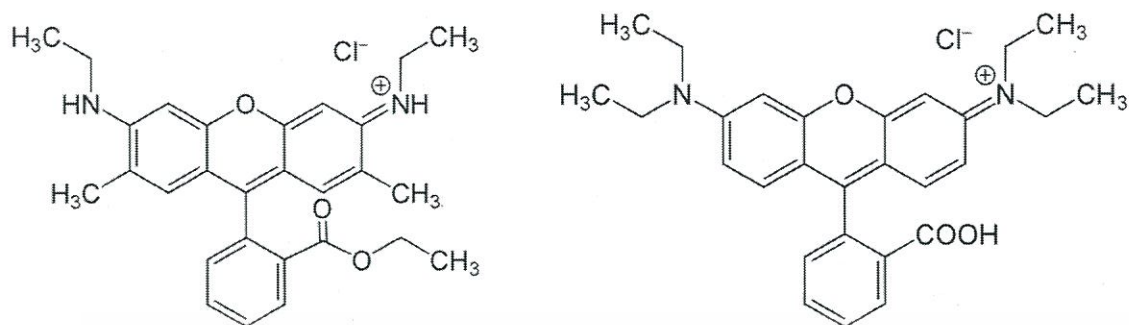
- 3.1.1 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (UV/Vis spectrometer) ที่ใช้ในงานวิจัยคือเครื่อง Avantes avaspec-EDU
- 3.1.2 เครื่องกำเนิดแสงทั้งสแตน (รุ่น MEGALIGHT 100 จากบริษัท SCHOTT Nippon) ให้แสงขาวในย่านความยาวคลื่น 400 – 900 นาโนเมตร
- 3.1.3 ไดโอดเปล่งแสง ในการวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์จากวัสดุที่ต้องการทดลอง ผู้วิจัยเลือกใช้ไดโอดเปล่งแสงชนิดกำลังสูง (ขนาด 1 วัตต์) มีความเข้มแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 524 นาโนเมตร (แสงสีเขียว) เพื่อกระตุ้นวัสดุที่เตรียมจากสารสีย้อม R6G
- 3.1.4 แท่นสำหรับจับยึดคิวเวท ทำหน้าที่จับยึดคิวเวทที่บรรจุสารละลายที่ต้องการทดสอบ
- 3.1.5 เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหแสงของสารละลาย (Atago)

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 สารเรืองแสง

สารเรืองแสงที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นสารเรืองแสงในกลุ่มของสารอินทรีย์ (Organic dyes) เนื่องจากมีราคาถูกและยังมีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่สูง ผู้วิจัยได้จัดเตรียมสารละลายจากสารเรืองแสง 2 ชนิด ได้แก่ สาร Rhodamine 6G (Rh6G) และสาร Rhodamine B (RhB) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.1 ในการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ ผู้วิจัยจะใช้สาร RhB เป็นสารอ้างอิงเพื่อคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสาร Rh6G โดยเทคนิค Relative

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสาร (ก) Rhodamine 6G และ (ข) Rhodamine B [25-26]

ตารางที่ 3.1 สมบัติพื้นฐานของสารเรืองแสง Rh6G และ RhB

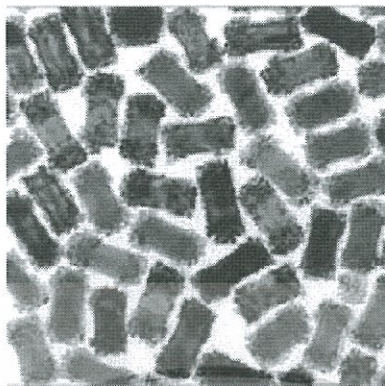
คุณสมบัติ	Rh6G	RhB
สูตรทางเคมี	$C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$	$C_{28}H_{31}ClN_2O_3$
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	479.02	479.02
ค่า ϕ_f	0.95	0.66
พีคการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	527	539
พีคการเปล่งแสง (นาโนเมตร)	552	571

3.2.2 อนุภาคนาโนทองคำเคลือบพลาตีเนียม (อนุภาค AuPd)

ในงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของอนุภาค AuPd ที่มีรูปทรงแบบแท่ง บริเวณปลายมีลักษณะมน มีรูปทรงดังรูปที่ 3.2 มีสมบัติสรุปดังตาราง

สมบัติ	
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง x ความยาว	25 nm x 75 nm
เส้นผ่านศูนย์กลาง	25 nm
ขนาดอนุภาค	75 nm
ความหนาแน่น	1 g/mL at 25 °C
น้ำหนักมวลโมเลกุล	196.97 g/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของ AuPd แบบแท่ง [27]

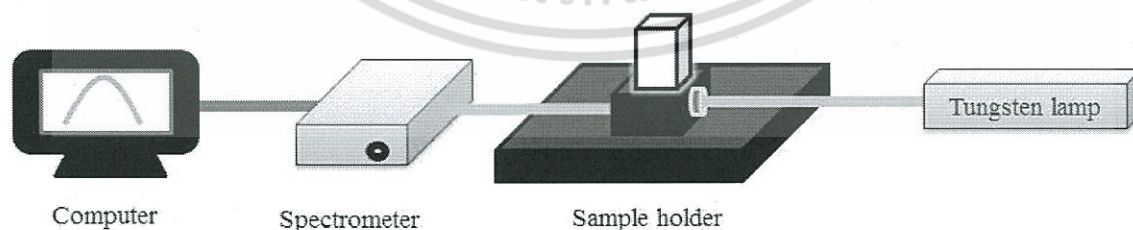
3.3 ระบบวัด

3.3.1 ระบบวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลายสารเรืองแสง

การวัดค่าการดูดกลืนของสารละลาย อาศัยระบบวัดที่จัดเตรียมดังแผนภาพรูปที่ 3.3 ซึ่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนจะถูกส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงตกกระทบกับสารตัวอย่างและสารละลายอ้างอิง และส่งผ่านออกมาเข้าสู่สายใยแก้วนำแสงอีกเส้นหนึ่งที่เชื่อมต่อกับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ แสงที่เข้าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ จะถูกวิเคราะห์ค่าการดูดแสงด้วยโปรแกรม Avasoft 7.4 โดยสมการ

$$A = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3.1)$$

เมื่อ I คือความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากสารตัวอย่างและ
 I_0 คือความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากสารอ้างอิง

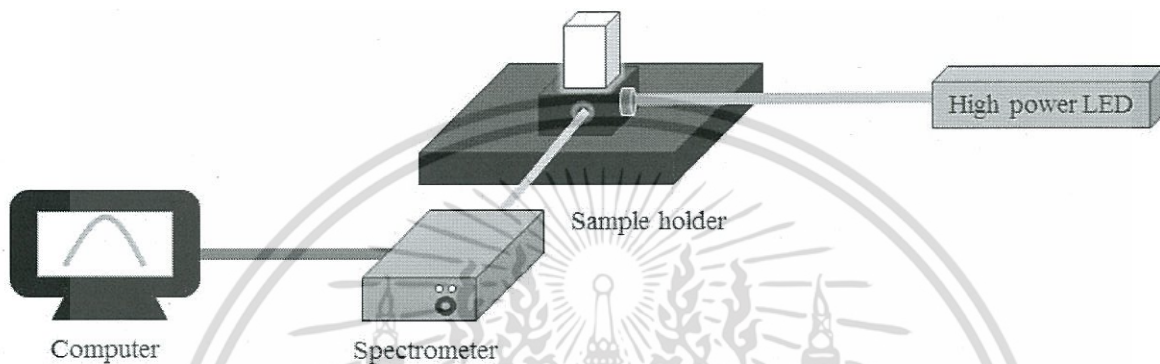


รูปที่ 3.3 ระบบวัดการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ระบบวัดสมบัติการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์

ในการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ผู้วิจัยได้จัดระบบการวัดดังรูปที่ 3.4 ในที่นี้จะใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแอลอีดีเป็นตัวกระตุ้นวัสดุที่ต้องการทดสอบโดยจัดวางให้แสงตกกระทบในทิศทางทำมุม 90 องศากับสายใยแก้วนำแสงที่ทำหน้าที่ตรวจวัดแสงเพื่อเลี่ยงการรบกวนของแสงกระตุ้น



รูปที่ 3.4 ระบบวัดการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์

3.4 การเตรียมวัสดุและการวัดค่า ϕ_f ของสารละลาย

การทดลองที่ 1 การวัดค่า ϕ_f ของสารละลาย Rh6G

วัตถุประสงค์

1. เพื่อทดลองหาค่า ϕ_f ของสารละลาย Rh6G โดยใช้สาร RhB เป็นสารละลายอ้างอิง
2. เพื่อทดสอบวิธีการหาค่า ϕ_f ของสารละลายโดยเทคนิค Relative

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลาย RhB ที่มีความเข้มข้น 5×10^{-7} M กับ Rh6G ที่ความเข้มข้นต่างๆดังตารางที่ 3.2 โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย
2. นำสารละลายที่เตรียมในข้อ 1 มาวัดสเปกตรัมการดูดกลืนและสเปกตรัมการเปล่งแสง
3. คำนวณหาค่า ϕ_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G

ตัวอย่าง	Rh6G (M)
1	3.00×10^{-7}
2	4.00×10^{-7}
3	5.00×10^{-7}
4	6.00×10^{-7}
5	7.00×10^{-7}
6	8.00×10^{-7}
7	9.00×10^{-7}
8	10.00×10^{-7}

การทดลองที่ 2 การศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนและการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับ AuPd
วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของการเติมสาร AuPd ต่อสเปกตรัมการดูดกลืนและการเรืองแสงของ
 สารละลาย Rh6G

วิธีการทดลอง

- เตรียมสารละลาย Rh6G ผสมกับ AuPd ให้มีความเข้มข้นของสารที่ผสมกันดังแสดงในตารางที่ 3.3
- นำสารละลายที่เตรียมในข้อ 1 มาวัดสเปกตรัมการดูดกลืนและสเปกตรัมการเปล่งแสง

ตารางที่ 3.3 การเตรียมสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาค AuPd

สารละลาย ตัวอย่าง	ปริมาตรของ AuPd (ml)	ความเข้มข้นของ AuPd (mM)	ปริมาตรของ Rh6G (ml)	ความเข้มข้นของ Rh6G (uM)	อัตราส่วนปริมาตร $V_{Au/Pd} : V_{Rh6G}$	อัตราส่วนความเข้มข้น $C_{Au/Pd} : C_{Rh6G}$
สาร A	0.5	0.1206	0.5	2.0	1 : 1	60 : 1
สาร B	0.25	0.0516	0.75	3.6	1 : 3	14 : 1
สาร C	0.125	0.0241	0.875	4.6	1 : 7	5 : 1
สาร D	0.0625	0.0117	0.9375	5.29	1 : 15	2 : 1
สาร E	0.03125	0.00574	0.96875	5.63	1 : 31	1 : 1

การทดลองที่ 3 การออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วัตถุประสงค์**
1. เพื่อศึกษาวิธีการนำการออกแบบการทดลอง (DOE) มาใช้ในงานวิจัย โดยอาศัยโปรแกรม Design Expert 9.0.3
 2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G และ AuPd ที่ผสมกันที่มีต่อค่า ϕ_f ของสาร Rh6G

การทดลอง

1. เตรียมสารละลาย Rh6G ผสมกับ AuPd ให้มีความเข้มข้นของสารที่ผสมกันดังแสดงในตารางที่ 3.4 ซึ่งถูกออกแบบผ่านโปรแกรม Design Expert 9.0.3
2. นำสารละลายที่เตรียมในข้อ 1 มาวัดสเปกตรัมการดูดกลืนและสเปกตรัมการเปล่งแสง
3. วิเคราะห์ค่า ϕ_f

ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G และอนุภาค AuPd

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้น (M)	
	Rh6G	AuPd
1	3.53×10^{-7}	7.17×10^{-5}
2	5.50×10^{-7}	2.60×10^{-5}
3	5.50×10^{-7}	1.17×10^{-4}
4	1.03×10^{-6}	7.06×10^{-6}
5	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
6	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
7	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
8	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
9	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
10	1.03×10^{-6}	1.36×10^{-4}
11	1.50×10^{-6}	2.60×10^{-5}
12	1.50×10^{-6}	1.17×10^{-4}
13	1.70×10^{-6}	7.17×10^{-5}

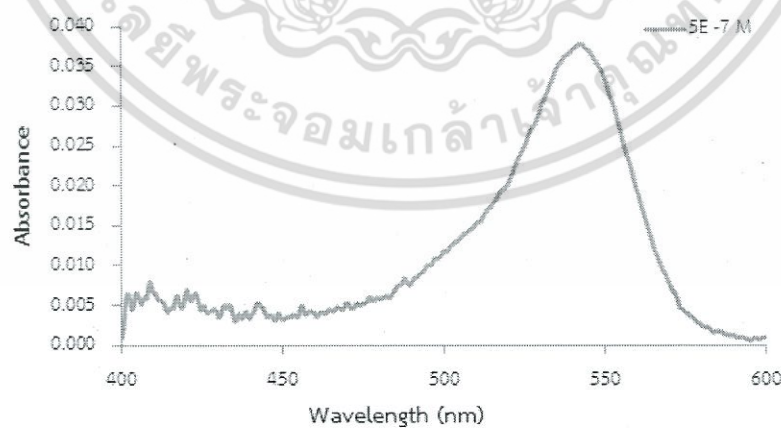
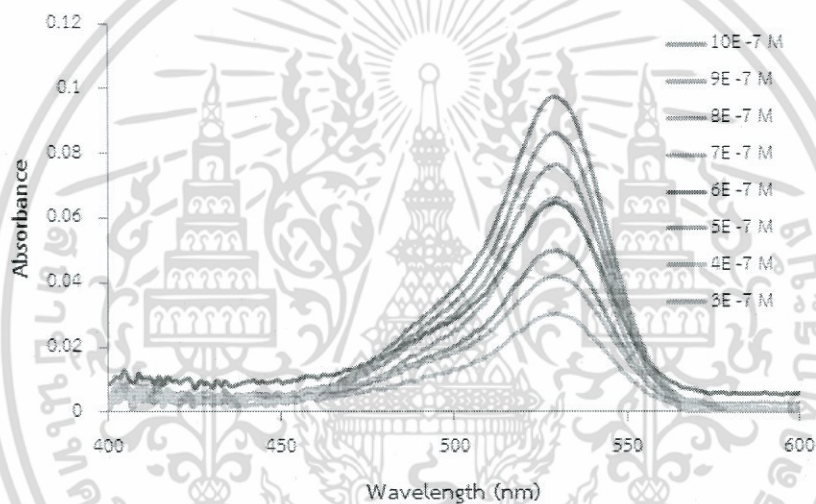
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

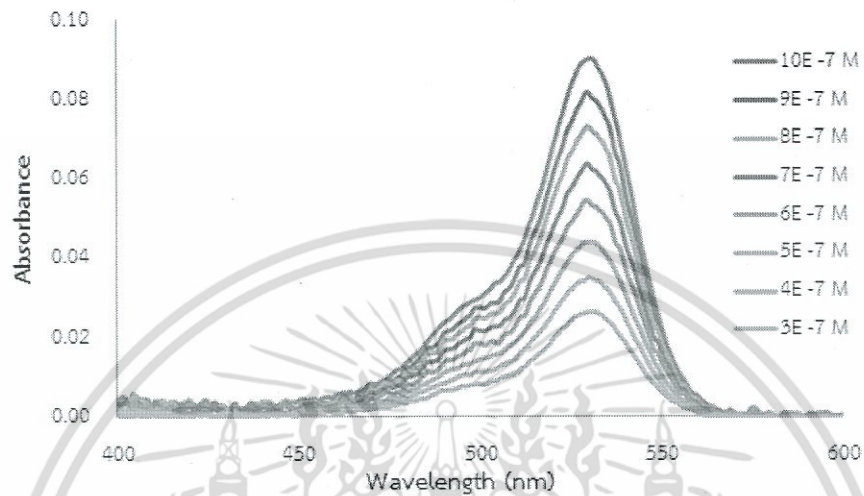
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rhodamine 6G

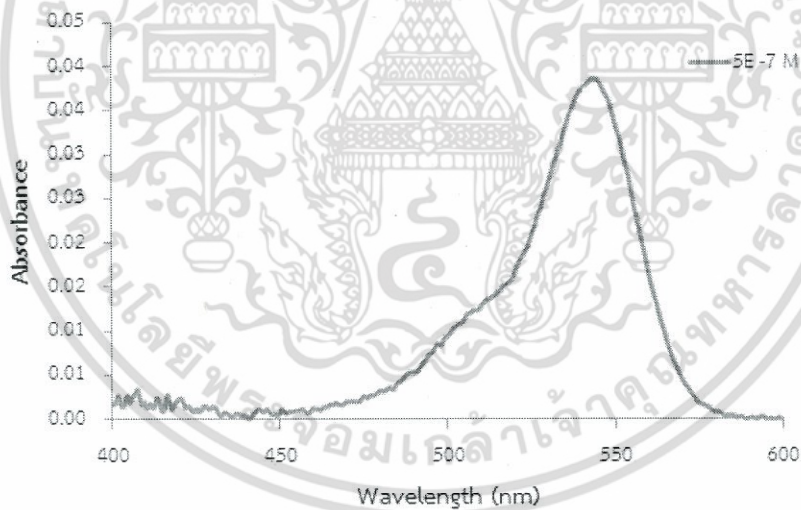
จากการนำสารที่เตรียมในหัวข้อที่ 3.4 การทดลองที่ 1 มาวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ด้วยเทคนิค Relative โดยใช้สารละลาย Rhodamine B ที่มีความเข้มข้น 5×10^{-7} M เป็นสารอ้างอิง ซึ่งในการทดลองจะทำการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสงซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อนำผลมาวิเคราะห์หาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ได้ผลดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

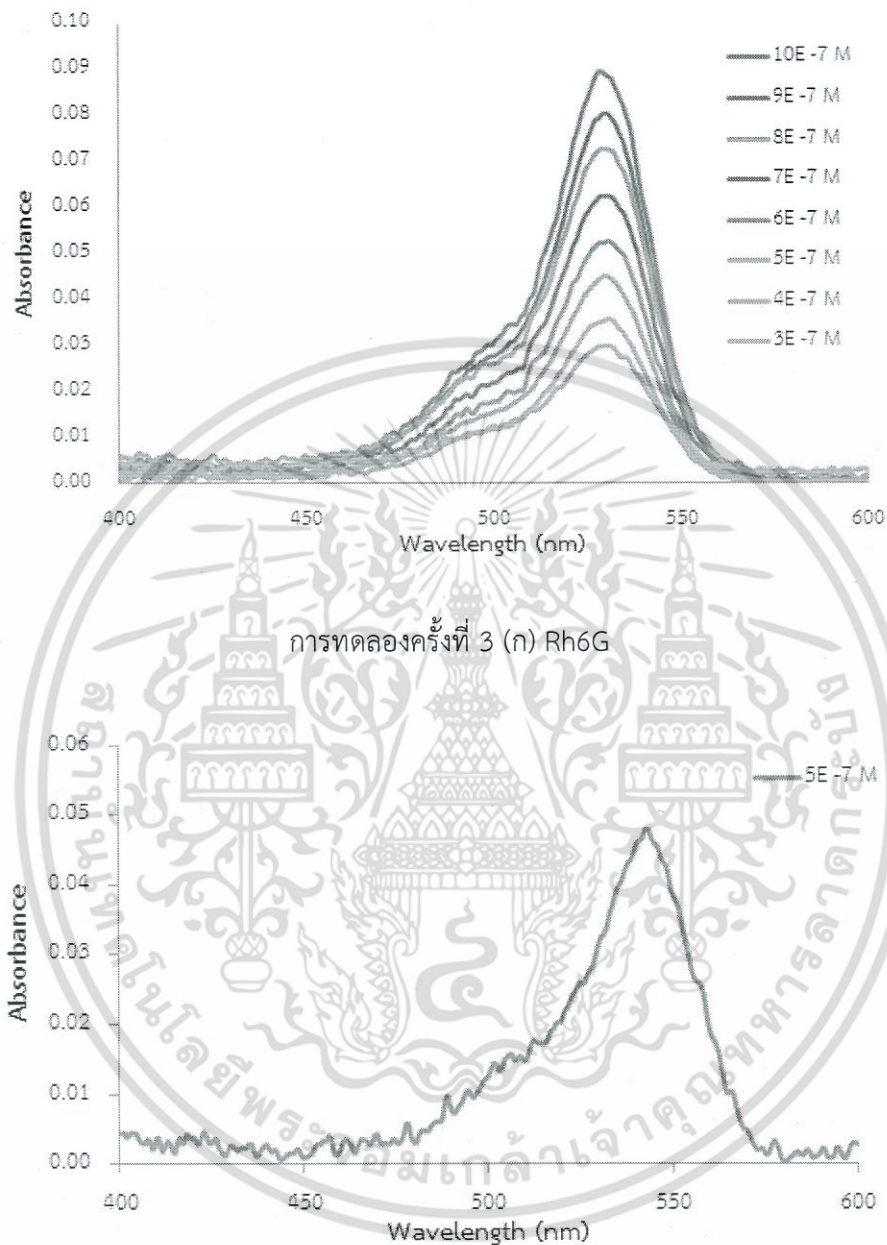


การทดลองครั้งที่ 2 (ก) Rh6G



การทดลองครั้งที่ 2 (ข) RhB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G และ RhB

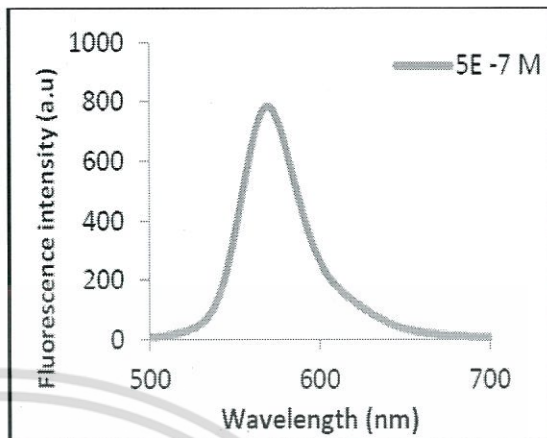
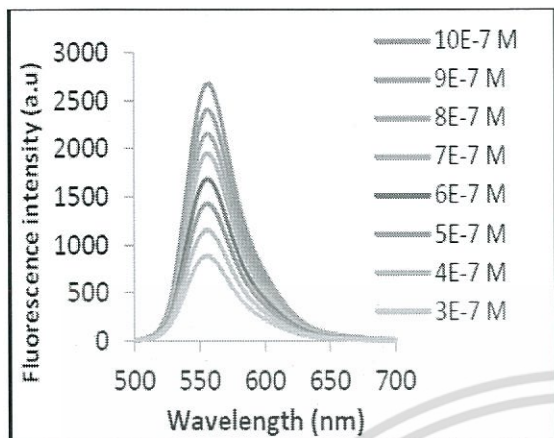
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ที่มีค่าความเข้มข้น 3×10^{-7} M ถึง 10×10^{-7} M พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงของสาร Rh6G ในช่วง 0.02 - 0.09 และดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 450 - 600 นาโนเมตร มีพีคของการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 528 นาโนเมตร และเมื่อความเข้มข้นของสารน้อยลงค่าการดูดกลืนแสงก็จะน้อยลงด้วยซึ่งเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)

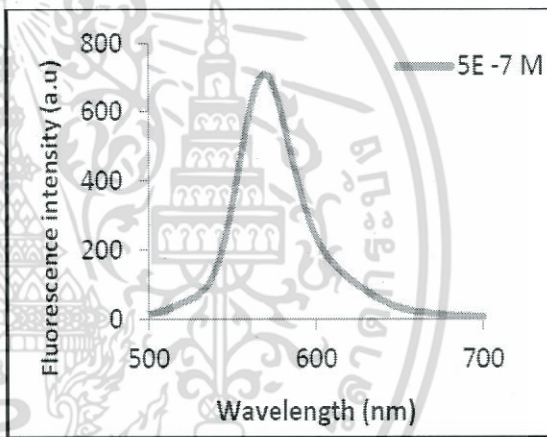
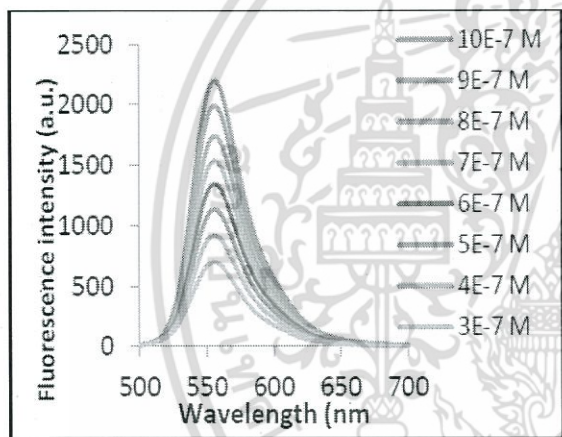
ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ที่มีค่าความเข้มข้น 3×10^{-7} M ถึง 10×10^{-7} M แสดงดังรูป 4.2 จากผลการทดลองพบว่าสารละลาย Rh6G มีการเปล่งแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 500 - 700 นาโนเมตร โดยมีพีคของการเปล่งแสงสูงสุดเท่ากับ 557 นาโนเมตร และเมื่อนำค่าพีคการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์กับความเข้มข้นจะแสดงดังรูปที่ 4.3



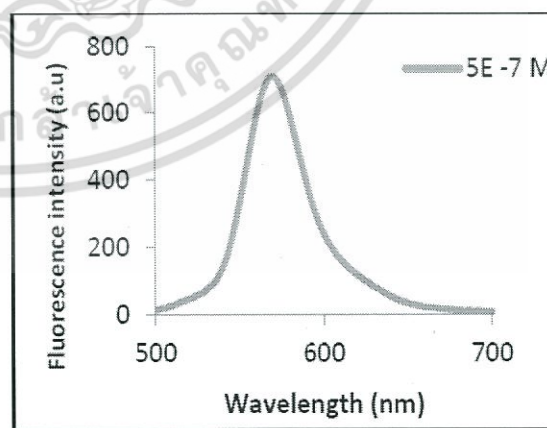
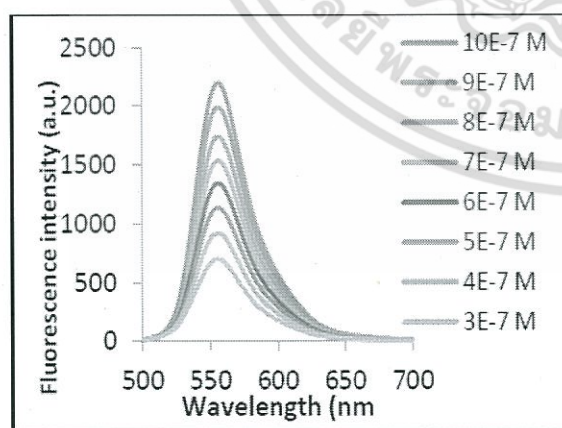
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การทดลองครั้งที่ 1



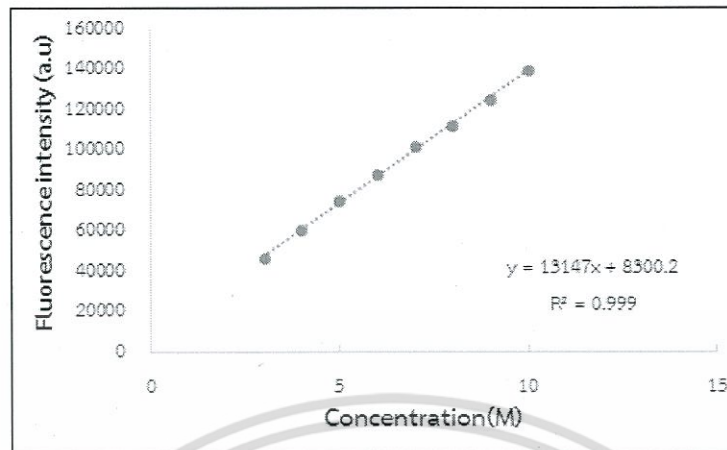
การทดลองครั้งที่ 2



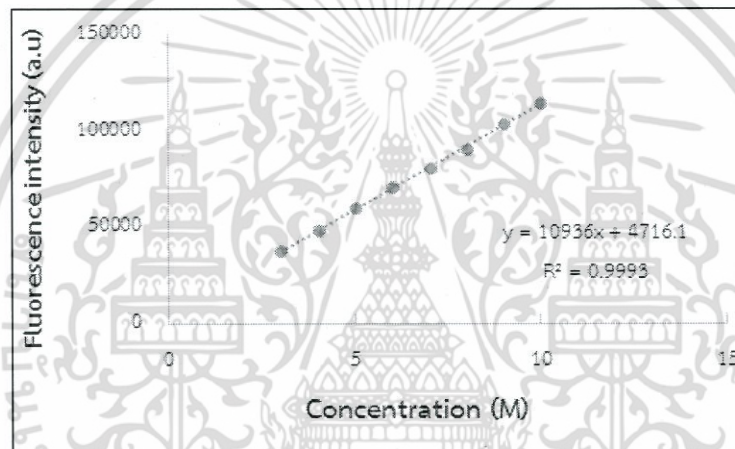
การทดลองครั้งที่ 3

รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G และ RhB

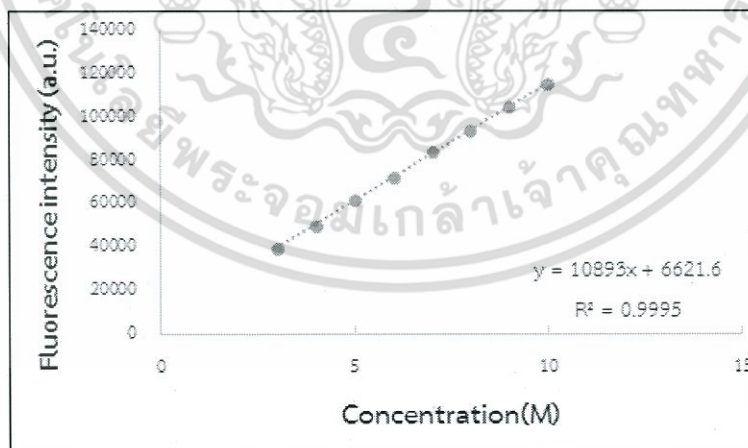
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ครั้งที่ 1



ครั้งที่ 2



ครั้งที่ 3

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพีคการเปล่งปสงปละความเข้มข้นของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับพีการเปล่งแสงของ Rh6G จะเห็นว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟความสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ 1 ทั้ง 3 การทดลอง

เมื่อนำผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสง มาวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้กราฟของการเปล่งแสงและค่าการดูดกลืนแสง เพื่อนำมาคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G ได้ค่าดังตาราง 4.1 - 4.3

ตารางที่ 4.1 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G จากการทดลองครั้งที่ 1

ความเข้มข้น (M)	OD	Integrated Fluorescence	Q
10×10^{-7}	3.09	139,804.52	0.93
9×10^{-7}	2.74	125,610.45	0.94
8×10^{-7}	2.43	112,510.76	0.94
7×10^{-7}	2.08	101,997.42	1.00
6×10^{-7}	2.12	88,058.59	0.85
5×10^{-7}	1.60	74,846.79	0.96
4×10^{-7}	1.36	60,548.29	0.91
3×10^{-7}	0.98	46,650.59	0.97
		เฉลี่ย	0.94

หมายเหตุ OD ค่าค่าที่ Integrated การดูดกลืนในช่วง 510-552 nm เท่ากับ 1.22 และ Integrated fluorescence สารอ้างอิงเท่ากับ 39,137.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G จากการทดลองครั้งที่ 2

ความเข้มข้น (M)	OD	Integrated Fluorescence	Q
10×10^{-7}	2.63	114,547.56	0.90
9×10^{-7}	2.35	103,809.22	0.92
8×10^{-7}	2.11	90,910.64	0.89
7×10^{-7}	1.83	80,534.26	0.91
6×10^{-7}	1.56	70,633.51	0.93
5×10^{-7}	1.27	59,886.38	0.97
4×10^{-7}	1.01	48,709.98	1.00
3×10^{-7}	0.76	37,380.20	1.02
	เฉลี่ย		0.94

หมายเหตุ OD ค่าค่าที่ Integrated การดูดกลืนในช่วง 510-552 nm เท่ากับ 1.14 และ Integrated fluorescence สารอ้างอิงเท่ากับ 36,410.96

ตารางที่ 4.3 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G จากการทดลองครั้งที่ 3

ความเข้มข้น (M)	OD	Integrated Fluorescence	Q
10×10^{-7}	2.60	114,982.33	0.96
9×10^{-7}	2.34	104,412.52	0.97
8×10^{-7}	2.16	93,853.149	0.94
7×10^{-7}	1.86	84,008.513	0.98
6×10^{-7}	1.57	72,099.026	1.01
5×10^{-7}	1.30	61,500.724	1.03
4×10^{-7}	1.03	49,490.607	1.04
3×10^{-7}	0.91	39,062.799	0.93
	เฉลี่ย		0.98

หมายเหตุ OD ค่าค่าที่ Integrated การดูดกลืนในช่วง 510-552 nm เท่ากับ 1.37 และ Integrated fluorescence สารอ้างอิงเท่ากับ 41,599.78

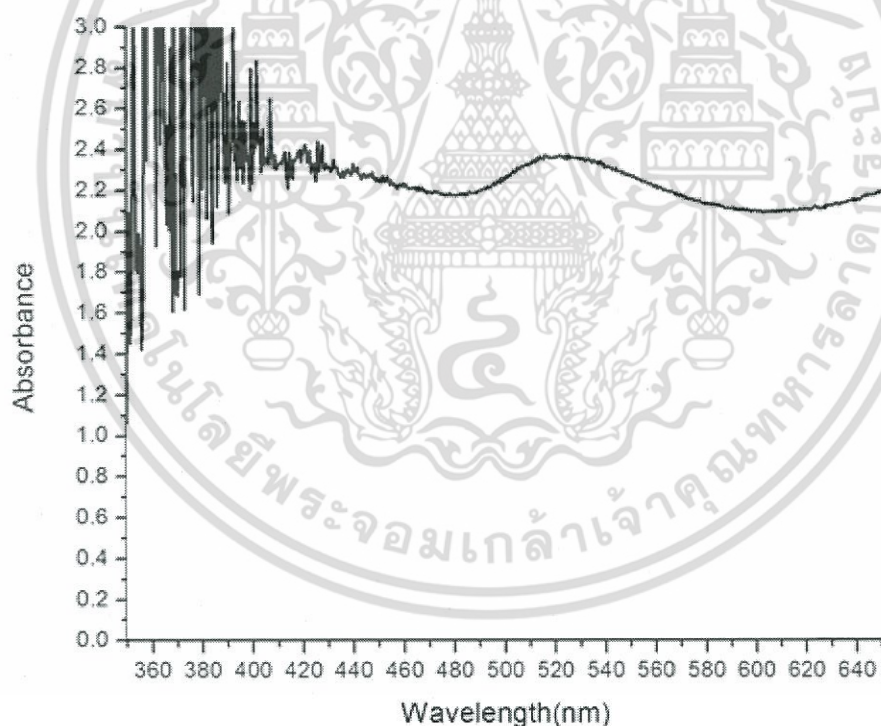
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองวัดและคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G ด้วยเทคนิค Relative มีค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี (คือ 0.95) ประมาณ 0.59 % ผลการวิเคราะห์ทำให้ผู้วิจัยยอมรับในเทคนิคนี้ และเลือกวิธีการนี้ในการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารผสมในการทดลองถัดไป

4.2 ผลการศึกษาสเปกตรัมแสงของสารละลาย Rhodamine 6G และ สารละลาย Rhodamine 6G ที่ผสมกับอนุภาค AuPd

4.2.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง

จากการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารนาโนพลาเดียมเคลือบทองคำ (AuPd) ที่มีค่าความเข้มข้น 3.6×10^{-4} M พบว่าได้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 4.4 ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าสารอนุภาค AuPd มีค่าการดูดกลืนแสงสูงถึง 2.36 ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร

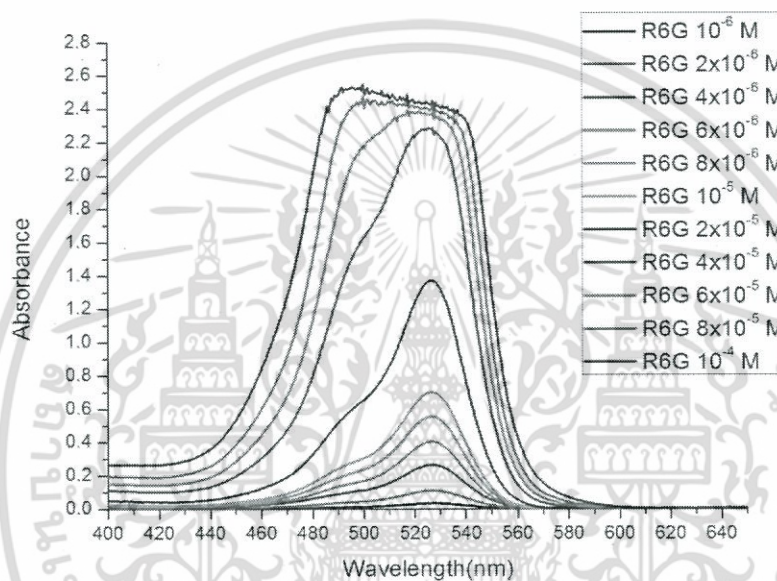


รูปที่ 4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาค AuPd

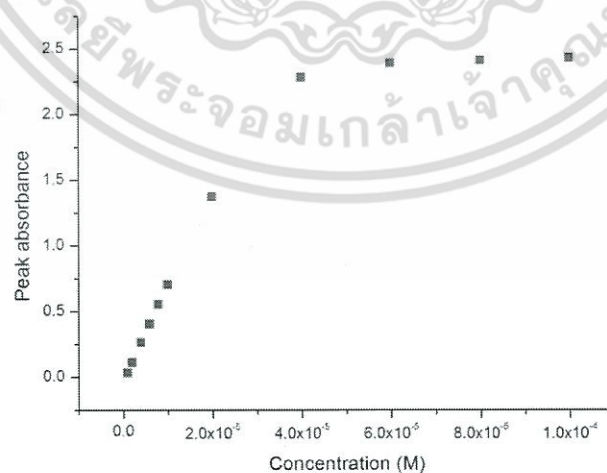
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ที่มีค่าความเข้มข้น 10^{-6} M- 10^{-4} M แสดงดังรูปที่ 4.5 จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าสารละลาย Rh6G ดูดกลืนแสงได้มากเมื่อมีค่าความเข้มข้นของสารมีค่าสูงขึ้น และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่น 460 – 575 นาโนเมตร มีพีคการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 527 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้นซึ่งสอดคล้องกับกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ในย่านความเข้มข้น 10^{-6} M- 4×10^{-5} M (ดูกราฟในรูป 4.6) และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งนี้มีสาเหตุจากแสงที่ผ่านเข้ามาไม่สามารถเดินทางผ่านออกมาจากสารละลายได้ เนื่องจากถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลที่มีความหนาแน่นสูง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า inner filter effect



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G

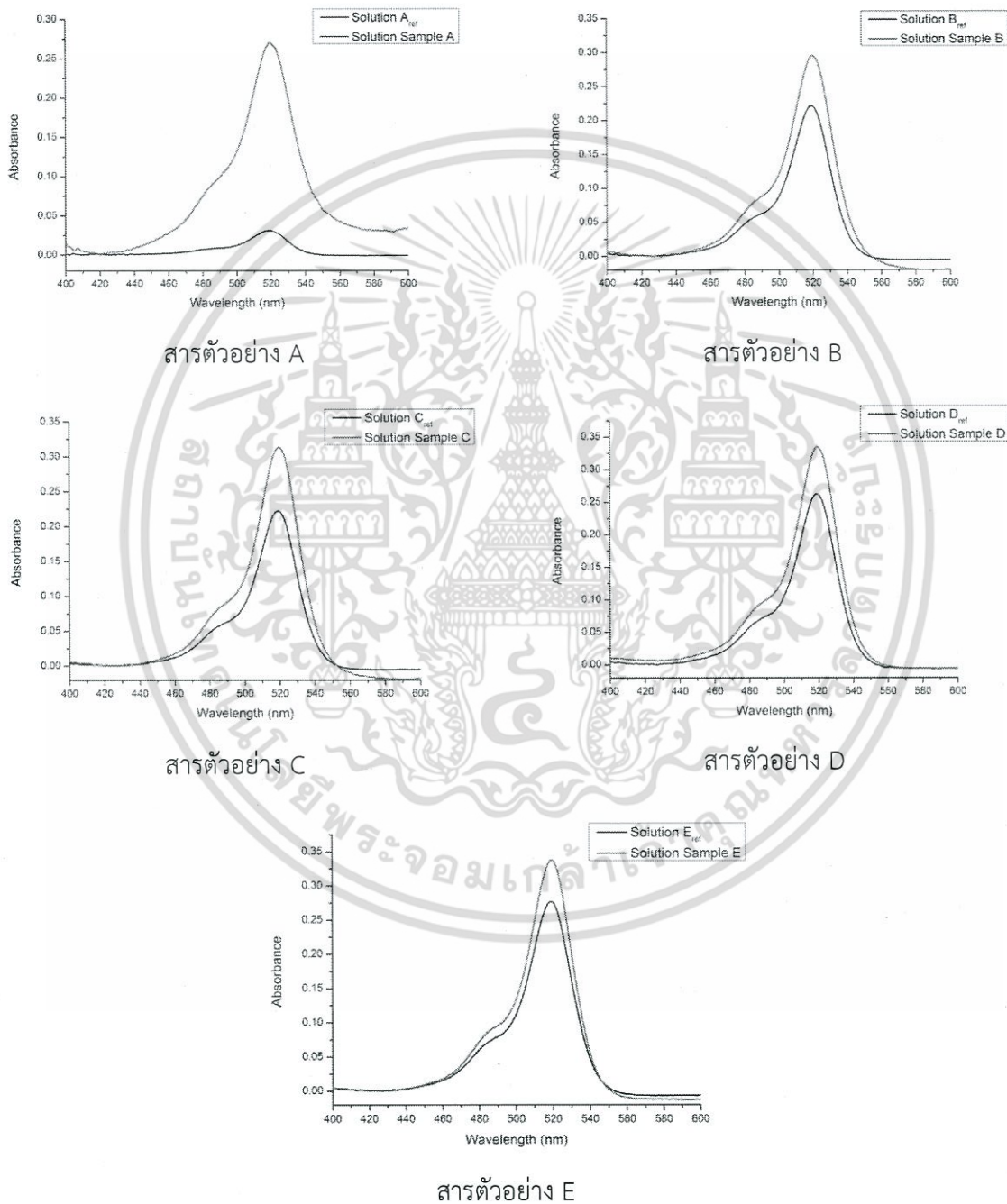


รูปที่ 4.6 ค่าพีคสูงสุดของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการศึกษาสเปกตรัมของแสงของสารละลายของสารละลายสีส้มผสมกับสารละลายของอนุภาคโลหะนาโน

จากการศึกษาสเปกตรัมของแสงของสารละลายของสารละลายสีส้มผสมกับสารละลายของอนุภาคโลหะนาโนที่ถูกจัดเตรียมขึ้น 5 เรียงไข ตามรายละเอียดในการทดลองที่ 2 หัวข้อ 3.4 ได้ผลดังนี้

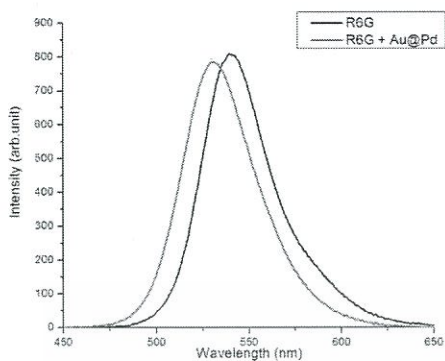


รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G กับสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd

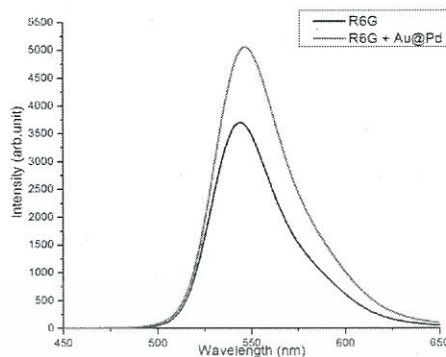
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับสารอนุภาคนาโน AuPd มีค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่ได้เติมสารอนุภาคนาโน AuPd ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาค AuPd มีการดูดกลืนแสงในย่านที่ใกล้เคียงกันกับสารละลาย Rh6G จึงส่งผลให้ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และสารตัวอย่าง A มีค่าการดูดกลืนแสงเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากที่สุดถึง 2.8 เท่า ซึ่งเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้เติมอนุภาคนาโน Au/Pd

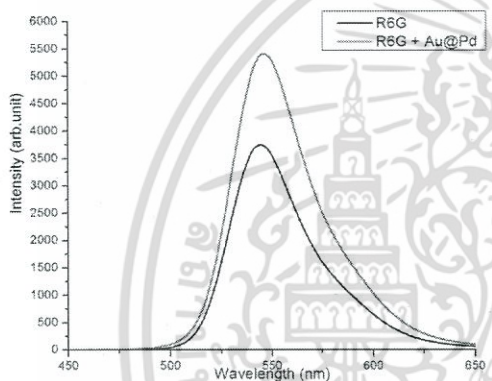
สเปกตรัมการเปล่งของสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน Au/Pd แสดงดังรูป 4.8 จากกราฟจะเห็นว่าสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd มีการเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่น 450 – 650 นาโนเมตร สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารผสม A มีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ต่ำกว่าสารละลาย Aref (Rh6G) และกรณีสารตัวอย่าง B-E จะมีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารผสมสูงกว่ากรณีไม่ผสม โดยค่าความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นจะสูงกว่าเดิมถึง 1.6 เท่า (รูปที่ 4.9) การเพิ่มขึ้นของความเข้มแสงนี้น่าจะมีสาเหตุจากการที่อนุภาค AuPd และโมเลกุล Rh6G อยู่ห่างกันในระยะที่เหมาะสม ทำให้พลังงานที่สะสมในกลุ่มอิเล็กตรอนอิสระของอนุภาคโลหะที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ surface Plasmon ถูกส่งผ่านไปยังโมเลกุล Rh6G หรือเรียกว่าเกิดกลไก Plasmonic resonance energy transfer (PRET) ขึ้น ปรากฏการณ์นี้ส่งผลอิเล็กตรอนของสาร Rh6G ถูกกระตุ้นไปยังสถานะกระตุ้นเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ปลดปล่อยออกมาเพิ่มขึ้นด้วย



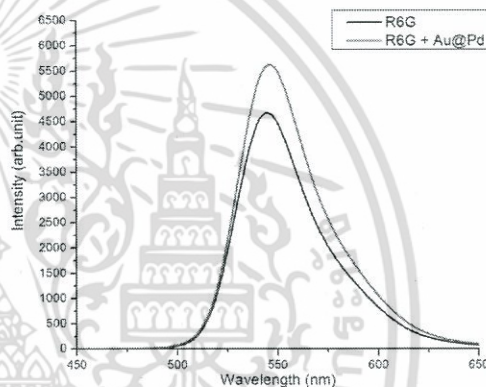
สารตัวอย่าง A



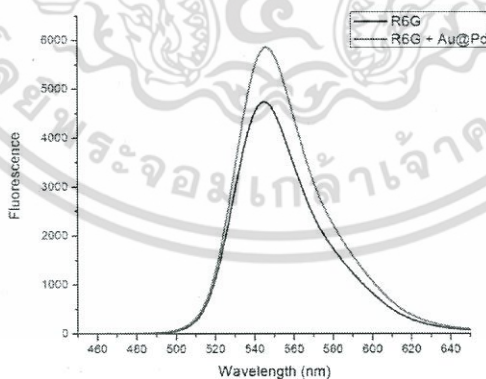
สารตัวอย่าง B



สารตัวอย่าง C



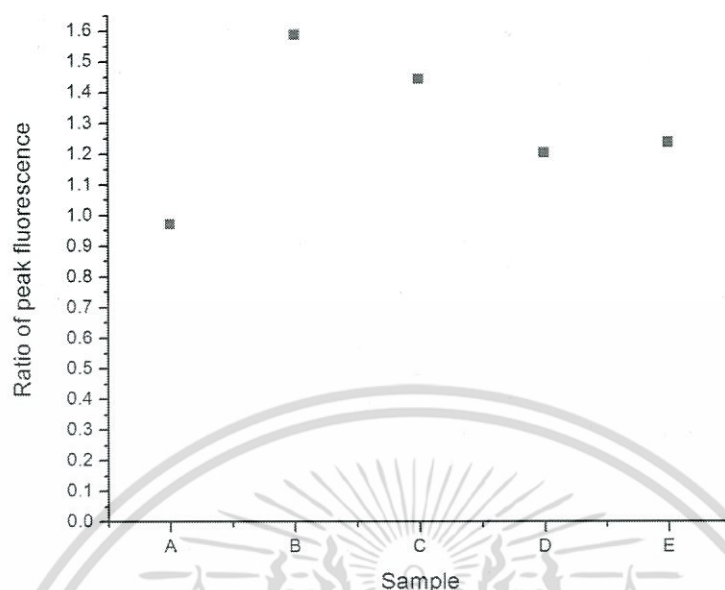
สารตัวอย่าง D



สารตัวอย่าง E

รูปที่ 4.8 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน Au/Pd เทียบกับ สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

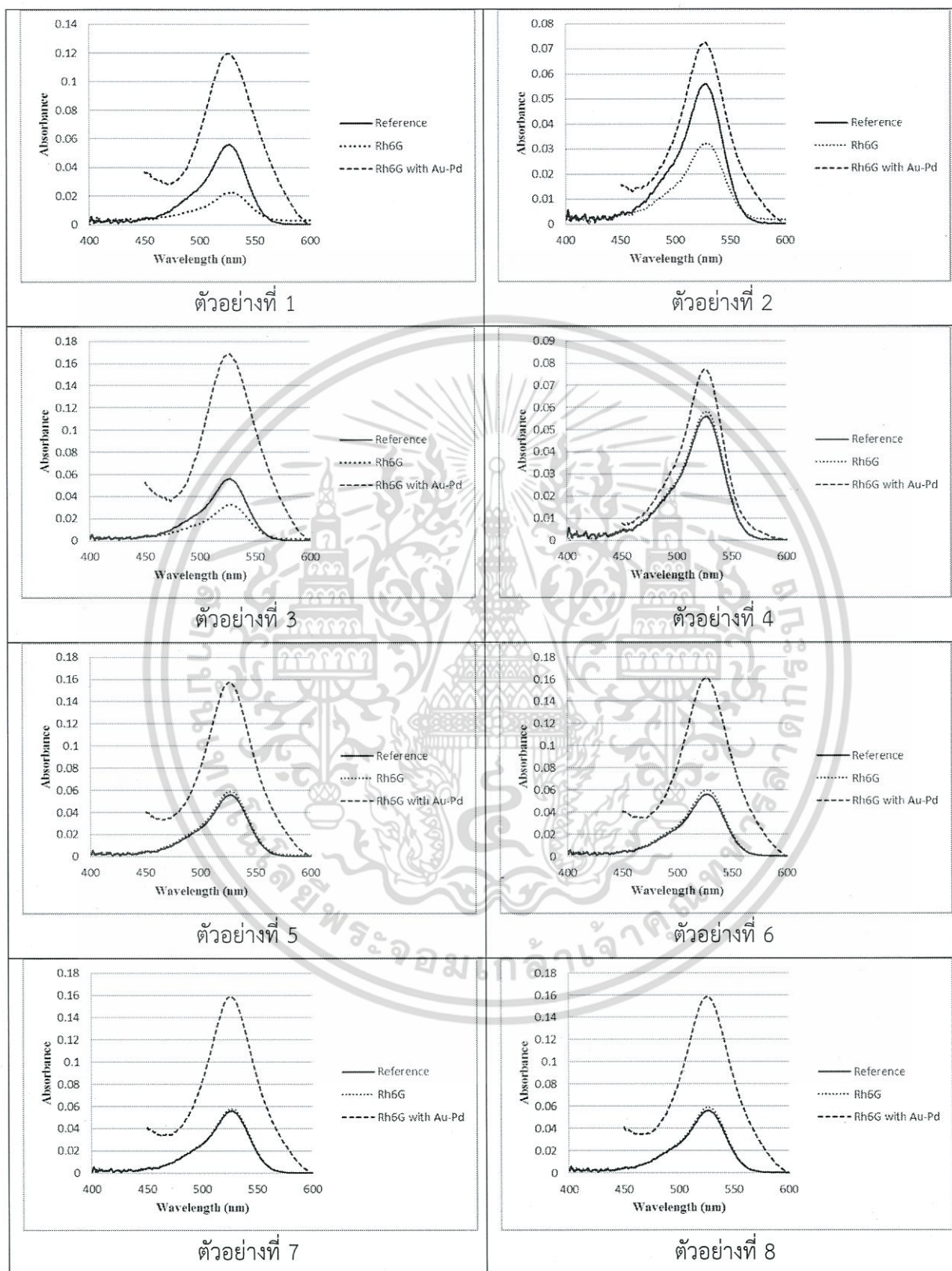


รูปที่ 4.9 อัตราส่วนแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ AuPd + Rh6G : Rh6G

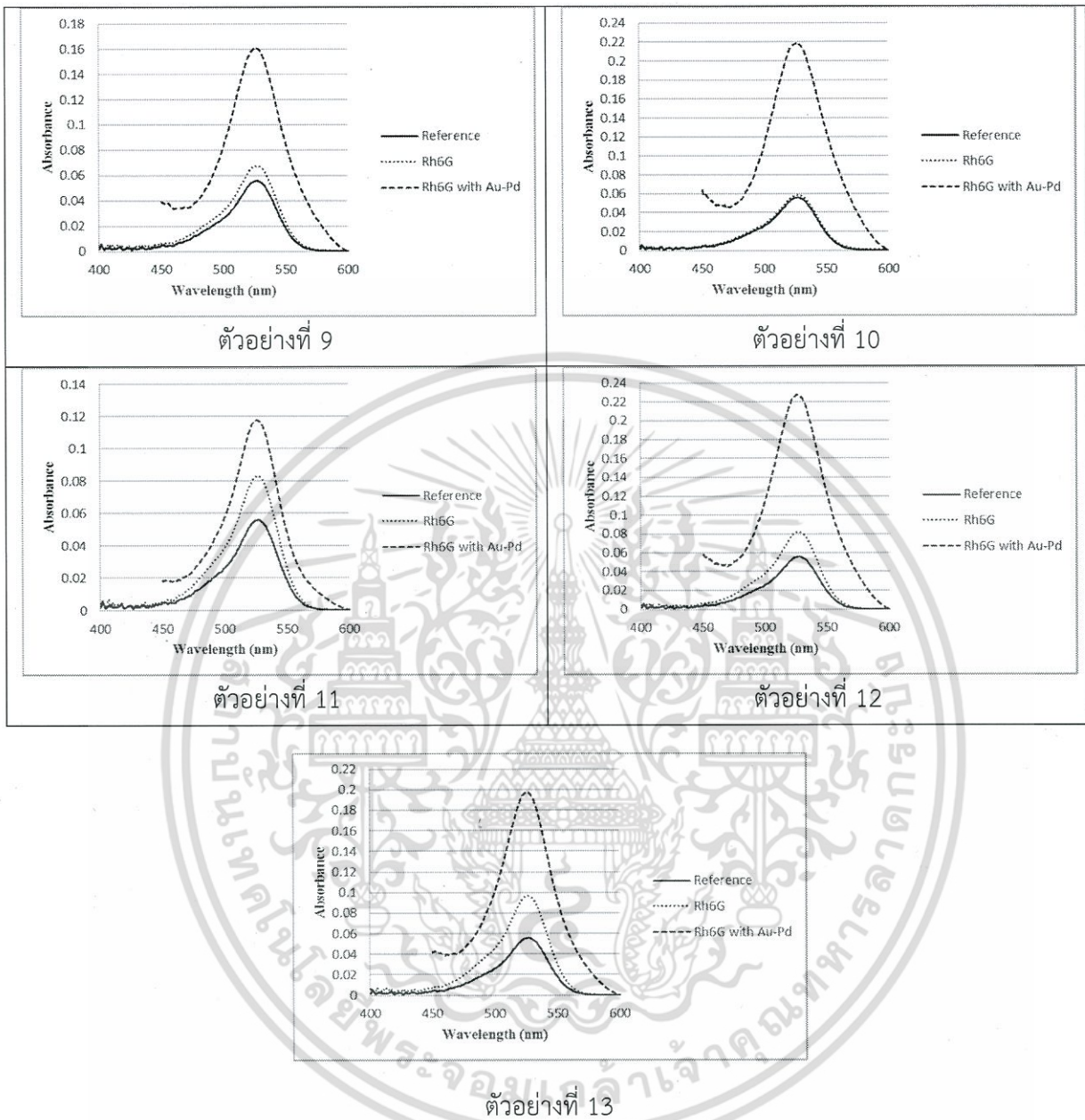
4.3 ผลการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rhodamine 6G ผสม AuPd โดยการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert 9.0.3

จากการนำสารละลาย Rh6G และสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับ AuPd ซึ่งเตรียมในหัวข้อ 3.4 (การทดลองที่ 3) มาวัดสเปกตรัมการดูดกลืนได้ผลดังรูป 4.10 จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาค AuPd มีค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่เติมอนุภาค AuPd ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาค AuPd มีการดูดกลืนแสงในย่านที่ใกล้เคียงกันกับสารละลาย Rh6G จึงส่งผลให้ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นโดยพบว่าตัวอย่างที่ 1 มีค่าพีคการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นสูงถึง 5.2 เท่า เมื่อเทียบกับ Rh6G ที่ไม่ผสม AuPd และตัวอย่างที่ 4 มีค่าพีคการดูดกลืนเพิ่มขึ้นน้อยสุดคือ 1.3 เท่า และเมื่อนำสารตัวอย่างข้างต้นมาวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงพบว่าได้ผลดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

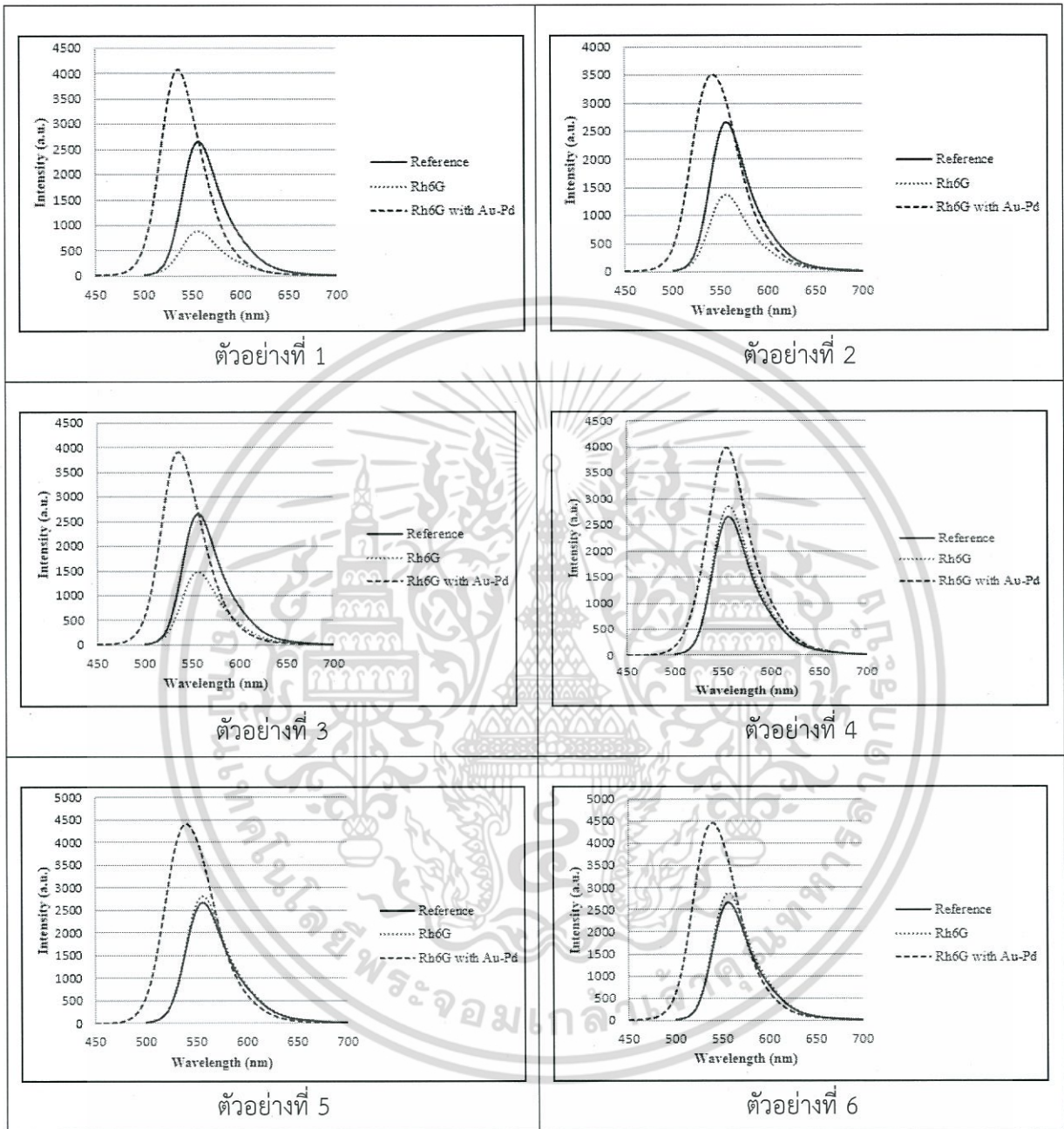


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

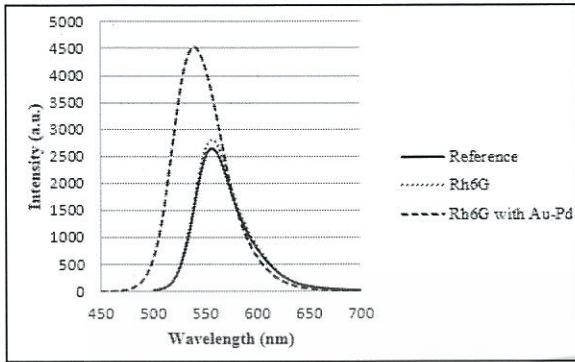


รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G และสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาค AuPd

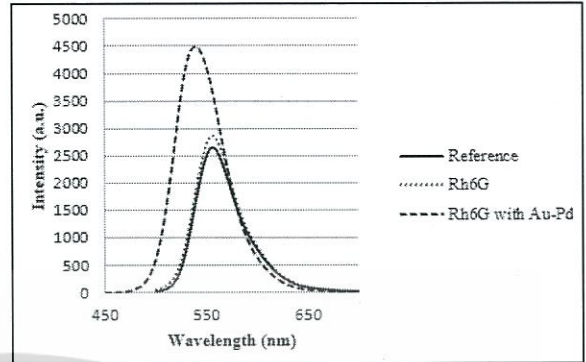
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



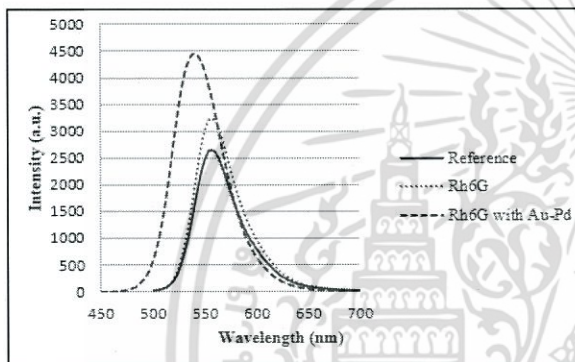
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



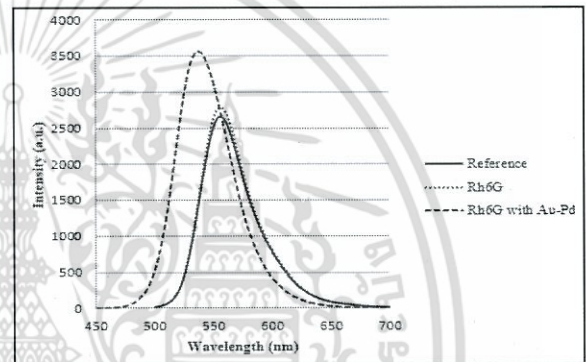
ตัวอย่างที่ 7



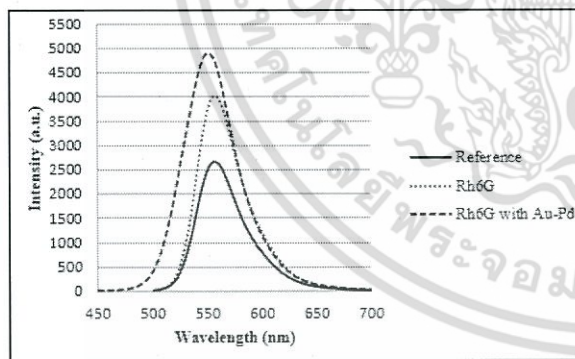
ตัวอย่างที่ 8



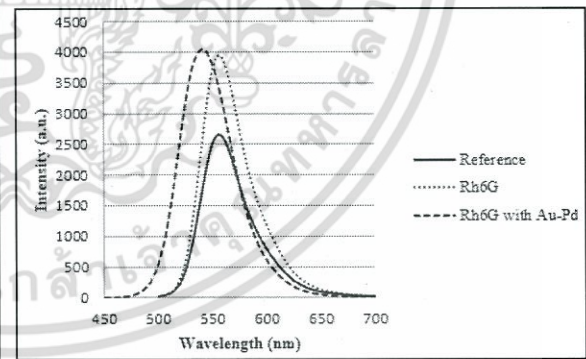
ตัวอย่างที่ 9



ตัวอย่างที่ 10

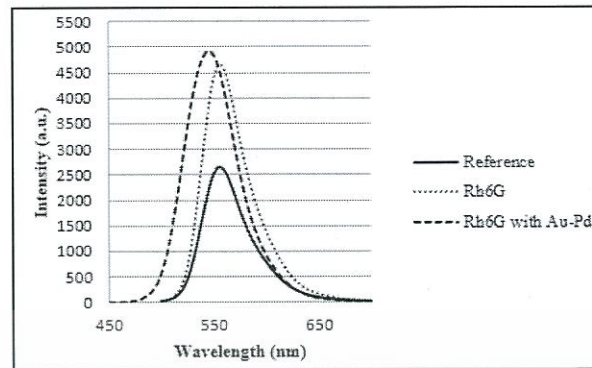


ตัวอย่างที่ 11



ตัวอย่างที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่างที่ 13

รูปที่ 4.11 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ Rh6G และสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาค AuPd

จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าค่าการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาค AuPd มีค่าการเปล่งแสงสูงชันกว่ากรณีที่ไม่เติมอนุภาค AuPd สารละลาย Rh6G มีพีคการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 550 นาโนเมตรและสารละลายผสมมีพีคการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นที่สั้นลงคือประมาณ 530 นาโนเมตร เมื่อนำพื้นที่ใต้กราฟมาวิเคราะห์พบว่าสารละลายผสมของตัวอย่างที่ 1 มีพื้นที่ใต้กราฟสูงเพิ่มขึ้นสูงถึง 4.5 เท่า เมื่อเทียบกับ Rh6G ที่ไม่ผสม AuPd และตัวอย่างที่ 12 มีพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มขึ้นน้อยสุดคือ 1.1 เท่า เมื่อนำกราฟมาวิเคราะห์หาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ได้ผลสรุปดังตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการผสมอนุภาค AuPd ลงในสารละลาย Rh6G ส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์มีค่าลดลงเกือบทุกกรณี ยกเว้นในกรณีตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 4 ซึ่งมีค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารผสมสูงกว่า 1 การที่ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารผสมมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสารละลาย Rh6G ที่ยังไม่ได้ถูกผสมด้วยอนุภาค AuPd น่าจะมีสาเหตุจากการผสม AuPd จะช่วยให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้การเรืองแสงของสารมีค่าเพิ่มขึ้นตาม แต่เนื่องจากปริมาณแสงที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากสารผสมไม่ได้เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของการดูดกลืนแสงจึงส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารผสมมีค่าต่ำกว่าสารละลาย Rh6G สำหรับกรณีที่ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารผสมสูงกว่า 1 นั้นมีสาเหตุจากค่าการดูดกลืนของสารละลายผสมมีค่าต่ำกว่าจึงอาจส่งผลให้ค่าที่นำมาวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไปด้วย

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย

No.	Concentration in Molar		Absorbance (A)		Integrated Fluorescence (I)		Refractive Index (n)		ϕ_f	
	Rh6G	Au-Pd NRs	Rh6G	Mix	Rh6G	Mix	Rh6G	Mix	Rh6G	Mix
1	3.53×10^{-7}	7.17×10^{-5}	0.022	0.119	50302.005	228739.129	1.3312	1.3319	0.78	0.67
2	5.50×10^{-7}	2.60×10^{-5}	0.032	0.071	82603.744	224184.172	1.3322	1.3316	0.90	1.10
3	5.50×10^{-7}	1.17×10^{-4}	0.032	0.166	83819.022	223775.028	1.3319	1.3321	0.90	0.47
4	1.03×10^{-6}	7.06×10^{-6}	0.058	0.075	159959.841	241897.851	1.3324	1.3322	0.97	1.12
5	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.058	0.155	158155.123	275404.869	1.3319	1.3318	0.95	0.62
6	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.059	0.158	161241.487	278442.149	1.3316	1.3319	0.95	0.61
7	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.057	0.157	158536.007	281573.074	1.3319	1.3317	0.97	0.63
8	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.058	0.157	161413.131	279859.644	1.3322	1.3324	0.97	0.63
9	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.067	0.159	180939.336	279066.648	1.3326	1.3316	0.94	0.61
10	1.03×10^{-6}	1.36×10^{-4}	0.058	0.216	156218.158	215292.498	1.3315	1.3318	0.94	0.35
11	1.50×10^{-6}	2.60×10^{-5}	0.082	0.116	224084.840	313036.022	1.3335	1.3326	0.96	0.95
12	1.50×10^{-6}	1.17×10^{-4}	0.081	0.225	221412.541	255871.570	1.3323	1.3339	0.96	0.40
13	1.70×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.096	0.194	260328.150	320301.143	1.3317	1.3321	0.95	0.58

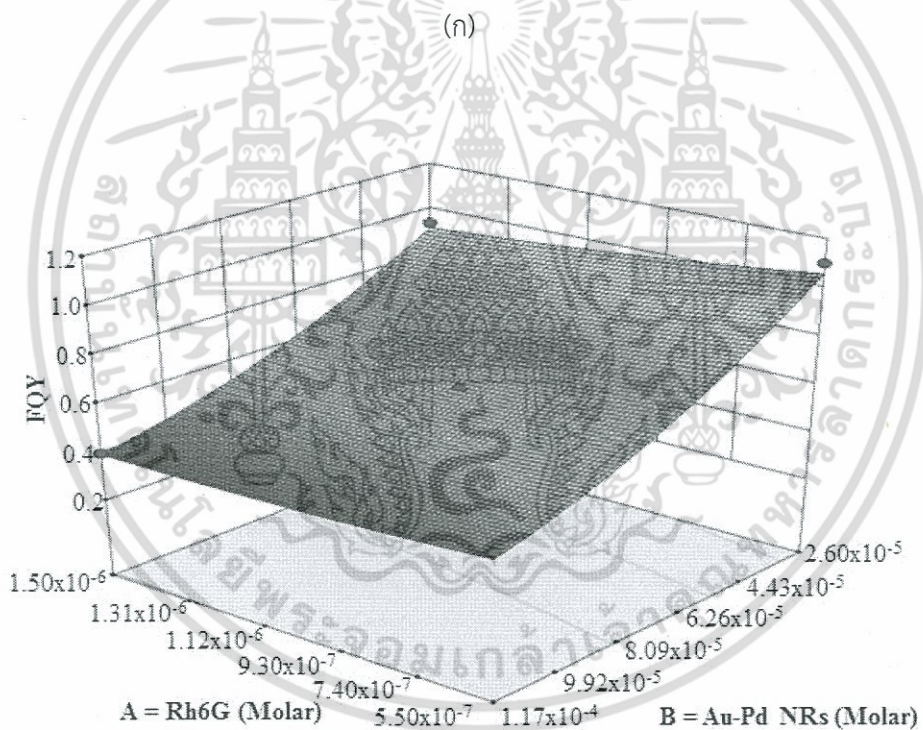
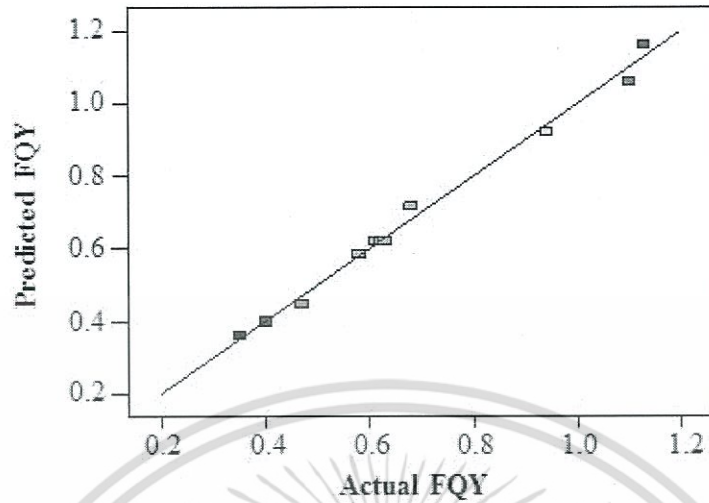
หมายเหตุ ค่าพิคการดูดกลืนแสงของสารอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 0.055 และอินทิเกรตสเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์มีค่าเท่ากับ 149435.761

เมื่อนำค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ได้จากการทดลอง (Actual) กับค่าที่คาดการณ์ได้ (Predict) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) มาพลอตกราฟความสัมพันธ์ได้ผลดังรูปที่ 4.12 และสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์กับความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G (ตัวแปร A) และอนุภาค AuPd (ตัวแปร B) แสดงดังนี้

$$\phi_f = 1.48345 - (2.93524 \times 10^5 \times A) - (11949.31203 \times B) + (9.20837 \times A \times B) + (6.64820 \times 10^{10} \times A^2) + (3.34804 \times 10^7 \times B^2) \quad (4.1)$$

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของอนุภาค AuPd จะส่งผลต่อค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์มากกว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 (ก) ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ ค่าความเข้มข้นของสาร Rh6G และอนุภาค AuPd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับแบบจำลอง

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value
Model	0.69	5	0.14	129.45	< 0.0001
A = Rh6G	0.015	1	0.015	14.05	0.0072
B = Au-Pd	0.64	1	0.64	599.73	< 0.0001
AB	1.600E-003	1	1.600E-003	1.49	0.2616
A ²	1.565E-003	1	1.565E-003	1.46	0.2664
B ²	0.034	1	0.034	31.77	0.0008
Residual	7.511E-003	7	1.073E-003		
Lack of Fit	7.111E-003	3	2.370E-003	23.70	0.0052
Pure Error	4.000E-004	4	1.000E-004		
Cor Total	0.70	12			

เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสมการที่ (4.1) ผู้วิจัยได้ทดลองเตรียมสารตัวอย่างเพิ่มเติมอีกจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยมีค่าความเข้มข้นของสารแตกต่างกันไปจากเงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 4.4 และทำการทดลองเพื่อหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G ผสมอนุภาค AuPd ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณด้วยสมการ

Sample number	Concentration in Molar		FQY of (Rh6G +Au-Pd)		Error (%)
	Rh6G	Au-Pd	Model	Measured	
14	6.0×10^{-7}	3.0×10^{-5}	1.00	1.02	-1.98
15	9.0×10^{-7}	6.0×10^{-5}	0.71	0.70	1.89
16	1.2×10^{-6}	8.0×10^{-5}	0.55	0.56	-0.16

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ได้จากการทดลองและจากสมการมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า 2% ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสมการที่จำลองได้มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ได้จริง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G โดยใช้เทคนิค Relative พบว่าได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.95 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีทำให้ผู้วิจัยยอมรับการนำเทคนิค Relative มาใช้ในงานวิจัย และเมื่อทำการทดลองวัดเพื่อหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะ AuPd ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3 ในการออกแบบการทดลอง พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G กับ AuPd จะทำให้ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์มีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาค AuPd จะส่งผลต่อค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์สูงกว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร Rh6G และการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3 จะได้สมการที่ใช้ทำนายค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์เมื่อทราบค่าความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G กับ AuPd ซึ่งสมการที่ได้ให้ผลใกล้เคียงกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองโดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากน้อยกว่า 2%

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาและทดลองวัดหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะ AuPd ที่ความเข้มข้นต่างๆนั้นสามารถเป็นประโยชน์ต่อกับผู้วิจัยที่จะวิเคราะห์และพัฒนาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ต่อไป ดังนี้

1. ในการทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนและสเปกตรัมการเปล่งแสงควรจะควบคุมระบบให้ใกล้เคียงกัน เช่น อุณหภูมิ ฯลฯ
2. เทคนิค Relative สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารอื่นๆได้

บทที่ 6

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ในชื่อเรื่อง Studies of concentration dependence of the fluorescent quantum yield from rhodamine 6G and Au-Pd core-shell nanorods, using a response surface methodology วารสาร Ukrainian Journal of Physical Optics (Number 3, Volume 18, 2017) อยู่ในฐานข้อมูล ISI มี impact factor ปี 2016 เท่ากับ 1.071 ดังมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Noginov M A, Zhu G, Belgrave A M, Bakker R, Shalaev V M, Narimanov E E, Stout S, Herz E, Suteewong T and Wiesner U, 2009. Demonstration of a spaser-based nanolaser. *Nature*. 460: 1110–1112.
2. MacLaughlin C M, Mullaithilaga N, Yang G, Ip S Y, Wang C and Walker G C, 2013. Surface-enhanced Raman scattering dye-labeled Au nanoparticles for triplexed detection of Leukemia and Lymphoma cells and SERS flow cytometry. *Langmuir*. 29: 1908–1919.
3. Lim D K, Jeon K S, Hwang J H, Kim H, Kwon S, Suh Y D and Nam J M, 2011. Highly uniform and reproducible surface-enhanced Raman scattering from DNA-tailorable nanoparticles with 1-nm interior gap. *Nature Nanotechnol.* 6: 452–460.
4. Iosin M, Baldeck P and Astilean S, 2009. Plasmon-enhanced fluorescence of dye molecules. *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. B*. 267: 403–405
5. So H S, Rao B A, Hwang J, Yesudas K and Son Y A, 2014. Synthesis of novel squaraine-bis(rhodamine-6G): A fluorescent chemosensor for the selective detection of Hg²⁺. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 202: 779–787.
6. Zhang L, Wang J, Fan J, Guo K and Peng X, 2011. A highly selective, fluorescent chemosensor for bioimaging of Fe³⁺. *Bioorganic and Medicinal Chem. Lett.* 21: 5413–5416.
7. Wagner B D, 2009. The use of Coumarins as environmentally-sensitive fluorescent probes of heterogeneous inclusion systems. *Molecules*. 14: 210–237.
8. Sasiwimon Kraithong, Pattareeya Damrongsak, Kullatit Suwatpipat, Jitnapa Sirirak, Pattanawit Swanglap and Nantanit Wanichacheva, 2016. Highly Hg²⁺-sensitive and selective fluorescent sensors in aqueous solution and sensors-encapsulated polymeric membrane. *RSC Adv.*, 6, 10401-10411.
9. Xiangwen Liu, Dingsheng Wang, Yadong Li, 2012. Synthesis and catalytic properties of bimetallic nanomaterials with various architectures, *Nano Today*.7, 448—466.
10. Kitsakorn Locharoenrat and Pattareeya Damrongsak, 2016. Enhancement of fluorescence in inorganic dyes by metallic nanostructured surfaces. *Ukr. J. Phys. Opt.* 17, 21-26.
11. Michael W. Allen, Measurement of Fluorescence Quantum Yields, Technical Note: 52019, Thermo Fisher Scientific.
12. Christian Wurth, Martin G. Gonzalez, Reinhard Niessnerb, Ulrich Panne, Christoph Haisch,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ute Resch Genger, 2012. Determination of the absolute fluorescence quantum yield of rhodamine 6G with optical and photoacoustic methods – Providing the basis for fluorescence quantum yield standards. *Talanta*.90:30– 37.

13. Bindhu C.V., Harilal S.S, Geetha K Varier, Riju C Issac, Nampoori V.P.N. and Vallabhan C.P.G., 1996. Measurement of the absolute fluorescence quantum yield of rhodamine B solution using a dual-beam thermal lens technique. *J. of Physics D: Applied Physics*, v. 29(4): 1074.

14. Christian Würth, Markus Grabolle, Jutta Pauli, Monika Spieles & Ute Resch-Genger, 2013. Relative and absolute determination of fluorescence quantum yields of transparent samples, *Nature Protocols*. 8,1535–1550.

15. Markus Grabolle, Monika Spieles, Vladimir Lesnyak, Nikolai Gaponik, Alexander Eychmüller, and Ute Resch-Genger, 2009. Determination of the Fluorescence Quantum Yield of Quantum Dots: Suitable Procedures and Achievable Uncertainties. *Anal. Chem.* 81: 6285–6294.

16. M. Fischer, J. Georges, 1996. Fluorescence quantum yield of rhodamine 6G in ethanol as a function of concentration using thermal lens spectrometry. *Chemical Physics Letters*. 260 :115-118.

17. John Olmsted, 1979. Calorimetric Determinations of Absolute Fluorescence Quantum Yields. *The Journal of Physical Chemistry*. 83. No.20:2581-2584.

18. Xian-FuZhang, YakuiZhang, LiminLiu,2014. Fluorescence lifetimes and quantum yields of ten Rhodamine derivatives: Structural effect on emission mechanism in different solvents. *Journal of Luminescence*. 145:448–453.

19. Douglas Magde, Roger Wong and Paul G. Seybold, 2002. Fluorescence Quantum Yields and Their Relation to Lifetimes of Rhodamine 6G and Fluorescein in Nine Solvents: Improved Absolute Standards for Quantum Yields. *Photochemistry and Photobiology*. 75(4): 327–334.

20. Antonie J.W.G. Visser and Olaf J. Rolinski, *Basic Photophysics*,
<http://photobiology.info/Visser-Rolinski.html>

21. <https://www.dailyvedas.com/solar-paints-over-solar-panels/>

22. Fluorescence Resonance Energy Transfer (FRET) Microscopy,
<http://www.olympusmicro.com/primer/techniques/fluorescence/fret/fretintro.html>

23. Geddes C.D., Lakowicz, 2002, Metal-Enhanced Fluorescence. *J. of Fluorescence*, v. 12(2): 122-129.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE), <http://piu.ftpi.or.th/productivity-tools/doe/>
25. Rhodamine 6G, https://en.wikipedia.org/wiki/Rhodamine_6G
26. RhodamineB, https://en.wikipedia.org/wiki/Rhodamine_B
27. http://www.nanoseedz.com/Gold_Nanorods_en.html



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Studies of concentration dependence of the fluorescent quantum yield from rhodamine 6G and Au–Pd core–shell nanorods, using a response surface methodology

Ekkachai Rammarat, Kitsakorn Locharoenrat, Witoon Yindeesuk and Pattareeya Damrongsak

Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, No. 1 Chalongkrung Road, Ladkrabang District, Bangkok 10520, Thailand, kitsakorn.lo@kmitl.ac.th

Received: 13.07.2017

Abstract. We have applied a response surface approach to study the fluorescence quantum yield (FQY) of rhodamine 6G (Rh6G) mixed with Au–Pd core–shell nanorods (Au–Pd NRs). The FQYs have been measured for the Rh6G concentrations varying from 3.53×10^{-7} to 1.70×10^{-6} mol/L and the concentrations of Au–Pd NRs from 7.06×10^{-6} to 1.36×10^{-4} mol/L. Our experimental results testify that the FQY depends notably on the proportions of Rh6G and Au–Pd NRs. A specific relationship between the FQY and the concentrations has also been confirmed by a response surface plot. It is found that the discrepancy between the experiment and the calculations is less than 2%.

Keywords: fluorescence, response surface methodology, nanorods

PACS: 33.50.Dq, 06.20.Dk, 78.67.Qa.

UDC: 535.37

1. Introduction

Interactions between metal nanoparticles and fluorophores have been extensively studied because they offer diverse applications in the fields of biosensors [1], cell imaging [2] and photovoltaics [3]. It has been reported that the emission intensity of fluorophores can be either enhanced or quenched when they are located near metal nanoparticles. This depends on the distance between the metal nanoparticles and the particles of fluorophores. Enhancement of fluorescent signals due to the presence of metal nanoparticles, which is referred to as a metal-enhanced fluorescence, is commonly attributed to excitation of surface plasmons on the metal surfaces [4]. Then the nanoparticles act as fluorescence amplifiers. On the other hand, another phenomenon known as a fluorescence resonance energy transfer can become dominant, whenever the fluorophores are in a close (less than 10 nm) proximity to the metal nanoparticles [5]. This effect leads to reduction, or even quenching, of the fluorescent signal.

A number of studies have been reported on the fluorescence enhancement and quenching caused by different metal nanoparticles. Suslov et al. [6] have shown that the fluorescence of rhodamine B is enhanced by monodispersed silver nanoparticles. Chen et al. [7] have found that silver nanoparticles can either enhance or quench the fluorescence of organic LEDs. Finally, Boonpi-phobanun et al. [8] have presented some results concerned with enhancement and quenching that occurs in the emission spectra of Au–Pd core–shell nanorods (Au–Pd NRs). Nevertheless, there are only few studies on the effect of metal nanoparticles upon one of the main fluorescence parameters, a fluorescent quantum yield (FQY). This parameter, which is given by the ratio of

number of the emitted photons to that of the absorbed photons, is very important for determining the efficiency of fluorophores. In particular, the influence of different concentrations of the metal nanoparticles on the FQY remains unknown. We intend to fill this gap in the present work. We are going to focus on the Au–Pd NRs mentioned above and rhodamine 6G (Rh6G) clusters in liquid solution, instead of solid matrices. We have restricted our analysis to Rh6G dye, since it offers a high FQY.

The FQY is usually derived using a relative method [9, 10]. The latter relies on measuring the signals obtained from an unknown sample and a reference sample, of which FQY is known under the same conditions. By comparing the fluorescence intensities detected from the sample with that from the reference, one can determine the FQY of the sample under test as

$$FQY = FQY_R \frac{I}{I_R} \frac{A_R}{A} \left(\frac{n}{n_R} \right)^2, \quad (1)$$

where I is the integrated fluorescence intensity, A the absorbance, n the refractive index of a solvent, and the subscript R refers to the reference fluorophore in all cases.

To examine possible relationships between the FQY and the proportions of Au–Pd NRs and Rh6G, a response surface methodology with a central composite design has been employed. The response surface methodology is a combination of statistical and mathematical techniques for improving and optimizing different processes [11]. The method has attracted a lot of attention because it is capable of determining both the individual and interactive effects of many factors of interest. Moreover, it requires a smaller number of experiments, if compared to conventional methods. For example, the response surface methodology has been used to study the effect of temperature on the thermoelectric properties [12] and to optimize production of biodiesel from the waste cooking oil [13]. In our study, we use the response surface methodology to create analytical model for the dependences of FQY on the Rh6G and Au–Pd NR concentrations. Then the accuracy of the model can easily be validated with the experimental data. Besides, such a model would be very useful when determining proper concentrations of mixture-sample solutions that enhance the FQY.

2. Experimental

An Rh6G dye powder was purchased from Sigma Aldrich, USA. No further purification was performed. An Rh6G stock solution (6×10^{-6} mol/L) was prepared by dissolving a desired quantity of the dye in deionised water. Au–Pd NRs were purchased from NonoSeedz Limited, Hong Kong. They had the diameters 40 ± 3 nm and the lengths 96 ± 6 nm.

As already mentioned, the influence of the concentration of Au–Pd NRs on the FQY of Rh6G was investigated using the response surface methodology based on the central composite design. A Design Expert Software 9.0.3 was employed for this aim. Since there were two input factors, Rh6G and Au–Pd NR concentrations ($k = 2$), the total number of samples needed for our experiments was equal to $2^k + 2k + n = 13$, with n being the number of replicated runs ($n = 5$) [14]. The dye stock solutions were prepared to obtain the test solutions with the concentrations ranging from 3.53×10^{-7} to 1.70×10^{-6} mol/L (see Table 1). To minimize the interactions between the molecules, these concentrations were chosen so as to produce the absorbance less than 0.1 at the excitation wavelength. The concentrations of Au–Pd NRs varied between 7.06×10^{-6} and 1.36×10^{-4} mol/L. As seen from Table 1, we prepared thirteen different solution samples in total.

The optical absorbance and the fluorescence of our solutions were measured, using optical apparatus shown respectively in Fig. 1 and Fig. 2. A tungsten lamp ‘Mega Light100’ and a high-

Table 1. Conditions of our response surface measurements and the corresponding experimental results. Replicated runs correspond to sample numbers from #5 to #9.

Sample #	Molar concentration, mol/L			Absorbance			Integrated fluorescence, 10^5 a.u.			Refractive index n			Experimental FQY	
	Rh6G	Au-Pd NRS	Rh6G	Rh6G	Mixed solution	Mixed solution	Rh6G	Mixed solution	Mixed solution	Rh6G	Mixed solution	Rh6G	Mixed solution	Rh6G
1	3.53×10^{-7}	7.17×10^{-5}	0.022	0.119	0.50	2.29	1.3312	1.3319	0.78	0.67				
2	5.50×10^{-7}	2.60×10^{-5}	0.032	0.071	0.83	2.24	1.3322	1.3316	0.90	1.10				
3	5.50×10^{-7}	1.17×10^{-4}	0.032	0.166	0.84	2.24	1.3319	1.3321	0.90	0.47				
4	1.03×10^{-6}	7.06×10^{-6}	0.058	0.075	1.60	2.42	1.3324	1.3322	0.97	1.12				
5	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.058	0.155	1.58	2.75	1.3319	1.3318	0.95	0.62				
6	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.059	0.158	1.61	2.78	1.3316	1.3319	0.95	0.61				
7	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.057	0.157	1.59	2.82	1.3319	1.3317	0.97	0.63				
8	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.058	0.157	1.61	2.80	1.3322	1.3324	0.97	0.63				
9	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.067	0.159	1.81	2.79	1.3326	1.3316	0.94	0.61				
10	1.03×10^{-6}	1.36×10^{-4}	0.058	0.216	1.56	2.15	1.3315	1.3318	0.94	0.35				
11	1.50×10^{-6}	2.60×10^{-5}	0.082	0.116	2.24	3.13	1.3335	1.3326	0.96	0.95				
12	1.50×10^{-6}	1.17×10^{-4}	0.081	0.225	2.21	2.56	1.3323	1.3339	0.96	0.40				
13	1.70×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.096	0.194	2.60	3.20	1.3317	1.3321	0.95	0.58				

power LED (the wavelength 525 nm and the optical power 1.4 mW) were used as excitation sources for the absorbance and fluorescence measurements, respectively. The spectra were recorded with an optical spectrometer 'Avantes'. The Rh6G solution with the concentration 1.0×10^{-6} mol/L was taken as a reference. Its absorbance was equal to 0.055, the integrated relative fluorescence intensity was 1.49×10^5 and the FQY amounted to 0.95 [15]. Finally, the refractive index of the reference measured with a refractometer 'ATAGA' was equal to 1.3320.

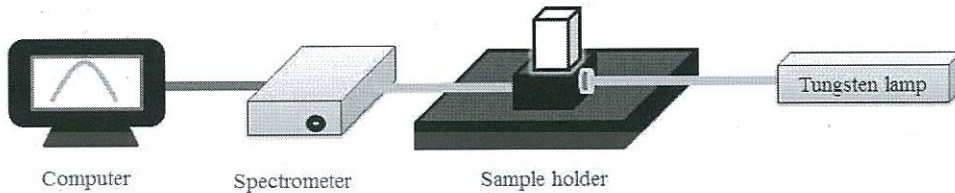


Fig. 1. Block diagram of our absorption measurement system.

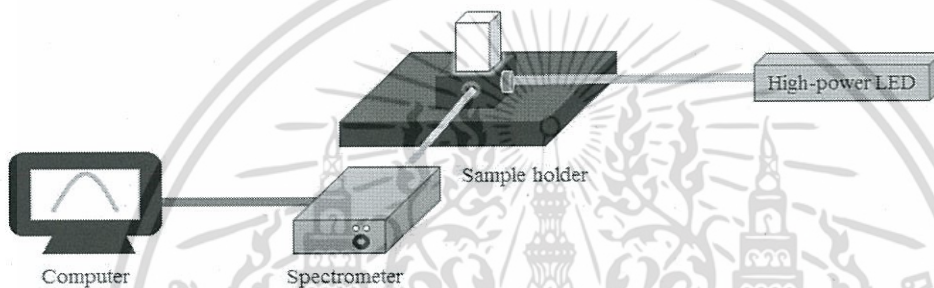


Fig. 2. Block diagram of our fluorescence measurement system.

Once the optical experiments were completed, we performed the ANOVA variance analysis to produce a prediction model. ANOVA was conducted to find out whether the model obtained from the response surface methodology was significantly reliable, or not. The modified model for estimating the response surface methodology was a quadratic polynomial given by the relation [16, 17]

$$FQY = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j . \quad (2)$$

Here FQY is the predicted FQY, X_i and X_j denote the independent variables, and β are constants. Namely, β_0 stands for the intercept, β_i the linear coefficient, β_{ii} the quadratic coefficient, and β_{ij} the interaction coefficient.

3. Results and discussion

As an example, Fig. 3a and Fig. 3b show respectively the absorption and fluorescence spectra obtained for the sample #4, both with the pure Rh6G and the Rh6G and Au-Pd NR mixture. Note that the absorption reveals a peak at about 526 nm, which is typical for all of our samples. The fluorescence peak observed at about 556 nm (see Fig. 3b) also refers to all of the samples. These peaks are therefore used to calculate the FQY according to Eq. (1).

The FQY values calculated for all of our samples are summarized in Table 1. One can see that adding of Au-Pd NRs affects efficiently both the absorbance and the fluorescence. Eventually, the first fact is evident since any scattering particles increase the light path through a cuvette, resulting in a relevant FQY change.

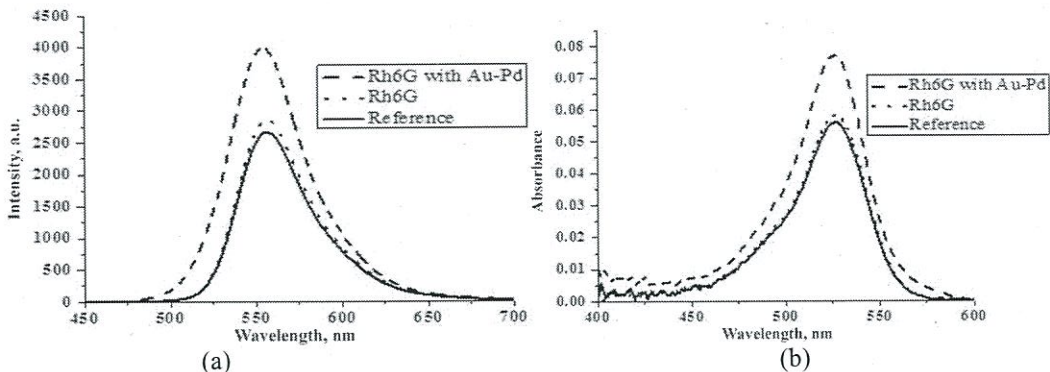


Fig. 3. Absorption spectra (a) obtained for the reference, the pure Rh6G and the mixed solution of Rh6G with Au-Pd NRs, and fluorescence spectra (b) obtained for the reference, the pure Rh6G and the same mixed solution. All of the spectra correspond to sample #4.

Now we apply the response surface approach to fit the concentration dependence. Fig. 4a shows the relationship between the empirical FQY and the FQY value predicted by the analysis of variance. The FQY dependence on the concentrations of Rh6G and Au-Pd NRs can be written as

$$FQY = 1.48345 - (2.93524 \times 10^5 \times A) - (11949.31203 \times B) + (9.20837 \times 10^8 \times A \times B) + (6.64820 \times 10^{10} \times A^2) + (3.34804 \times 10^7 \times B^2) \quad (3)$$

where A and B represent the concentrations of Rh6G and Au-Pd NRs in mol/L, respectively. The analysis of this model has given the R^2 parameters and the p -values (see Ref. [16]), which are displayed in Table 2. When compared with the experimental data, the mathematical model given by Eq. (3) should be deemed acceptable. Indeed, the R^2 parameter is equal to 0.9923, thus confirming that the model is statistically reliable.

Table 2. ANOVA variance analysis for our quadratic response surface model: df denotes the number of degrees of freedom, F -value is the random variable from the F -distribution, and p -value the probability.

Source	Sum of squares	df	Mean square	F -value	p -value
Model	0.690	5	0.140	129.45	< 0.0001
$A = \text{Rh6G}$	0.015	1	0.015	14.05	0.0072
$B = \text{Au-Pd NRs}$	0.640	1	0.640	599.73	< 0.0001
AB	1.60×10^{-3}	1	1.60×10^{-3}	1.49	0.2616
A^2	1.56×10^{-3}	1	1.56×10^{-3}	1.46	0.2664
B^2	0.034	1	0.034	31.77	0.0008
*Residual sum of squares	7.51×10^{-3}	7	1.07×10^{-3}	—	—
Lack of fit sum	7.11×10^{-3}	3	2.37×10^{-3}	23.70	0.0052
Pure error sum	4.00×10^{-4}	4	1.00×10^{-4}	—	—
Corrected total	0.700	12	—	—	—

*Residual sum of squares is a combination of pure error sum of squares and lack of fit sum of squares

The ANOVA yields in a response surface plot shown in Fig. 4b. The FQY decreases with increasing concentration of Au-Pd NRs. In other words, addition of Au-Pd NRs into Rh6G results in reduced FQY, as compared with the pure Rh6G for which we have a typical value of 0.95 [15]. This is understood as a result of nonradiative energy transfer between the Rh6G dye and the Au-Pd NRs. In simple terms, the Au-Pd NRs act as a fluorescence quencher. One can notice the FQY values larger than unity for the samples #2 and #4. In fact, these data points remain within the

limits of experimental errors, which are typically equal to 10%. The two following factors contribute mainly to the FQY uncertainty. The first of them is fluctuations of spectral radiance of exciting light and changes in ambient temperature. The second is Rayleigh scattering at our metal nanoparticles, of which sizes are smaller than the light wavelength. The incoming light is therefore elastically scattered by the Au–Pd NRs, and the scattered light does not easily reach a photodetector. Hence, the light scattering at relatively short wavelengths can result in the absorbance tails.

As evidenced by the ANOVA (see Table 2), our model appears to be reliable for expressing the relationship between the FQY and the proportions of Rh6G and Au–Pd NRs. In particular, the *p*-value is less than 0.0001 and the *F*-value amounts to 129.45 [18].

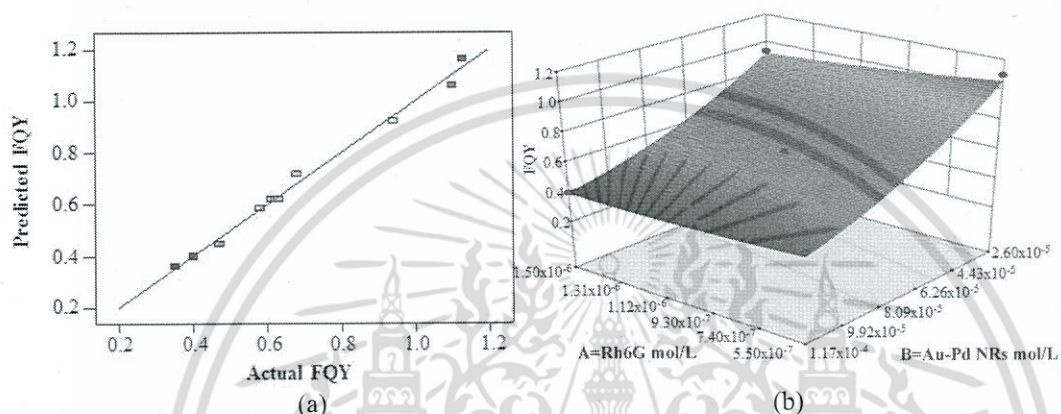


Fig. 4 (a) Correlation of actual and predicted FQY values, and (b) response surface plot obtained for the dependence of FQY on the Rh6G (A) and Au–Pd NR (B) concentrations.

To check reliability of Eq. (3), we have additionally studied the FQY from different samples that deviate from the conditions provided by the model in Table 1. The information on these samples is gathered in Table 3. We find that the discrepancies of the predicted and measured FQYs are less than 2%. This implies that the equation derived from this model is accurate and reliable enough to predict the relationship between the FQY and the concentrations of Rh6G and Au–Pd NRs in the solution.

Table 3. Comparison of empirical and theoretical FQY values obtained for our Rh6G and Au–Pd NR solutions.

Sample #	Molar concentration, mol/L		FQY for the system of Rh6G and Au–Pd NRs		Error, %
	Rh6G	Au–Pd	Model	Measured	
	14	6.00×10^{-7}	3.00×10^{-5}	1.00	
15	9.00×10^{-7}	6.00×10^{-5}	0.71	0.70	1.41
16	1.20×10^{-6}	8.00×10^{-5}	0.55	0.56	–1.82

4. Conclusion

In this work we report the studies of the influence of Rh6G and Au–Pd NR concentrations on the FQY, which are performed using the response surface methodology. Our experiments have demonstrated that the FQY is sensitive to the concentrations of Rh6G and Au–Pd NRs. The dependence of FQY on the Rh6G and Au–Pd NR concentrations is derived using a general

quadratic-polynomial model. A comparison of the empirical and theoretical FQYs testifies that the errors of the model are less than 2%.

Acknowledgements

This work has been supported by the Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, under the Grant Number 2560-01-05-054.

References

1. Menendez-Miranda M, Costa-Fernandez J M, Encinar J R, Parak W J and Carrillo-Carrion C, 2016. Determination of the ratio of fluorophore/nanoparticle for fluorescence-labeled nanoparticles. *Analyst*. **141**: 1266–1272.
2. Mingcong Rong, Zhixiong Cai, Lei Xie, Chunshui Lin, Xinhong Song, Feng Luo, Yiru Wang and Xi Chen, 2016. Study on the ultrahigh quantum yield of fluorescent P,O-g-C3N4 nanodots and its application in cell imaging. *Chem. - A Europ. Journ.* **22**: 9387–9395.
3. El-Bashir S M, Barakat F M and AlSalhi M S, 2013. Metal-enhanced fluorescence of mixed coumarin dyes by silver and gold nanoparticles: towards plasmonic thin-film luminescent solar concentrator. *J. Lumin.* **143**: 43–49.
4. Lee J, Lee S, Jen M and Pang Y, 2015. Metal-enhanced fluorescence: wavelength-dependent ultrafast energy transfer. *J. Phys. Chem. C*. **119**: 23285–23291.
5. Acuna G P, Bucher M, Stein I H, Steinhauer C, Kuzyk A, Holzmeister P, Schreiber R, Moroz A, Stefani F D, Liedl T, Simmel F C and Tinnefeld P, 2012. Distance dependence of single-fluorophore quenching by gold nanoparticles studied on DNA origami. *ACS Nano*. **6**: 3189–3195.
6. Suslov A, Lama P T and Dorsinville R, 2015. Fluorescence enhancement of rhodamine B by monodispersed silver nanoparticles. *Opt. Commun.* **345**: 116–119.
7. Chen Y-C, Gao C-Y, Chen K-L, Meen T-H and Huang C-J, 2013. Enhancement and quenching of fluorescence by silver nanoparticles in organic light-emitting diodes. *J. Nanomater.* **2013**: 84136.
8. Boonpipobanun N, Damrongsak P and Locharoenrat K, 2016. Comparison of fluorescence behaviors of rhodamine 6G with palladium-coated gold nanorods in formations of solutions and thin films. *Appl. Mech. Mater.* **851**: 14–18.
9. Nagaraja D, Melavanki R M, Patil N R and Kusanur R A, 2014. Solvent effect on the relative quantum yield and fluorescence quenching of 2DAM. *Spectrochem. Acta. A*. **130**: 122–128.
10. Wurtha C, Gonzalez M G, Niessner R, Panne U, Haisch C and Genger U R, 2012. Determination of the absolute fluorescence quantum yield of rhodamine6G with optical and photoacoustic methods – providing the basis for fluorescence quantum yield standards. *Talanta*. **90**: 30–37.
11. Omolola A O, Jideani A I O, Kapila P F and Jideani V I, 2015. Optimization of microwave drying conditions of two banana varieties using response surface methodology. *Food Sci. Technol.* **35**: 438–444.
12. Khumtong T, Sakulkalavek A, Sakdanuphab R, 2017. Empirical modeling and optimization of pre-heat temperature and Ar flow rate using response surface methodology for stoichiometric Sb₂Te₃ thin films prepared by RF magnetron sputtering. *J. Alloy. Compd.* **715**: 65–72.
13. Babaki M, Yousefi M, Habibi Z and Mohammadi M, 2017. Process optimization for biodiesel production from waste cooking oil using multi-enzyme systems through response surface methodology. *Renew. Energ.* **105**: 465–472.

14. Chaisongkroh N, Chungsiriporn J and Bunyakan C, 2012. Modeling and optimization of ammonia treatment by acidic biochar using response surface methodology. Songklanakarin J. Sci. Technol. **34**: 423–432.
15. Zang X-F, Zhang Y and Liu L, 2014. Fluorescence life times and quantum yields of ten rhodamine derivatives: Structural effect on emission mechanism in different solvents. J. Lumin. **145**: 448–453.
16. Noshadi I, Amin N A S and Richard S P, 2012. Continuous production of biodiesel from waste cooking oil in a reactive distillation column catalyzed by solid heteropolyacid: Optimization using response surface methodology (RSM). Fuel. **94**: 156–164.
17. Mandala D K, Bhunia H, Bajpai P K, Kushwaha J P, Chaudhari C V, Dubey K A and Varshney L, 2017. Optimization of acrylic acid grafting onto polypropylene using response surface methodology and its biodegradability. Radiat. Phys. Chem. **132**: 71–81.
18. Danmaliki G I, Saleh T A and Shamsuddeen A A, 2017. Response surface methodology optimization of adsorptive desulfurization on nickel/activated carbon. Chem. Eng. J. **313**: 993–1003.

Ekkachai Rammarat, Kitsakorn Locharoenrat, Witoon Yindeesuk and Pattareeya Damrongsak. 2017. Studies of concentration dependence of the fluorescent quantum yield from rhodamine 6G and Au–Pd core–shell nanorods, using a response surface methodology. Ukr.J.Phys.Opt. **18**: 179–186.

Анотація. У цій праці застосовано підхід поверхні відгуку до вивчення квантового виходу флуоресценції (КВЛ) родаміну 6G (P6G), змішаного з нанопаличками Au–Pd типу серцевина-оболонка (Au–Pd НП). КВЛ було виміряно для концентрацій P6G у діапазоні від $3,53 \times 10^{-7}$ до $1,70 \times 10^{-6}$ моль/л і концентрацій Au–Pd НП від $7,06 \times 10^{-6}$ до $1,36 \times 10^{-4}$ моль/л. Експериментальні результати засвідчили, що КВЛ істотно залежить від пропорцій P6G і Au–Pd НП. Конкретний взаємозв'язок між КВЛ і концентраціями також підтверджено графіком поверхні відгуку. Виявлено, що розбіжність між експериментом та розрахунком складає менше 2%.



ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์ (หัวหน้าโครงการ)

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
Ph.D.	Engineering materials	University of Southampton, UK	2550
วท.ม.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2545
วท.บ.	ฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2540

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ Fluorescence spectroscopy, Fluorescent solar concentrator

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2556	Best poster presentation	The 8 th Siam Physics Congress, Chiang Mai

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2545- 2548	ทุนการศึกษาระดับปริญญาเอก	ทุนทบวงมหาวิทยาลัย
2553- 2560	ทุนส่งเสริมนักวิจัย	คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

- [1] S. Kraithong, P. Damrongsak, K. Suwatpipat, J. Sirirak, P. Swanglap and N. Wanichacheva, Highly Hg²⁺ sensitive and selective fluorescent sensors in aqueous solution and sensors encapsulated polymeric membrane, RSC Adv., 2016, 6, 10401
- [2] K. Locharoenrat and P. Damrongsak, Enhancement of fluorescence in inorganic dyes by metallic nanostructured surfaces, Ukr. J. Phys. Opt. 2016, Volume 17, Issue 1.
- [3] K. Locharoenrat and P. Damrongsak, Plasmonic properties of gold-palladium core-shell nanorods, Ukr. J. Phys. Opt. 2015, Volume 16, Issue 3.
- [4] ภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์ วิภารัตน์ ทองสุชา และวิศรุต บุญยั้ง อิทธิพลของอนุภาคนาโนที่มีต่อสมบัติทางแสงของหลอดแอลอีดีชนิดให้ความสว่างสูง, Proceeding of the 11th Conference on Energy Network of Thailand, 556-560, 17-19 มิถุนายน 2558
- [5] Pattareeya Kittidachachan, Wichayaporn Soonpanich, Badin Damrongsak, Improved Light Harvesting in N719 Sensitized Nanocrystalline TiO₂ Solar Cells with Coumarin 6 Dye, Energy Procedia, 152-156, 2014.
- [6] S. Rujihan, P. Kittidachachan, and B. Damrongsak, Prototype Microfluidic System for Fluorescence-based Chemical Sensing, Chiang Mai University Journal of Natural Sciences, v. 13, 625-633, 2014. (Selected paper from the Proceeding of Siam Physics Congress 2013)
- [7] B. Damrongsak, S. Rujihan, and P. Kittidachachan, Poly(dimethylsiloxane) microlens array integrated with microfluidic channel for fluorescence spectroscopy detection, Proceeding of International Conference on Photonics Solutions, May 26-28, 2013.
- [8] 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.
- [9] ชลชาย อังวณิชสกุล บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ และ ภัทรียา กิตติเดชาชาญ การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของแอลอีดีสีขาวยชนิดให้ความสว่างสูงภายใต้อุณหภูมิต่ำ, Proceeding of the 9th Conference on Energy Network of Thailand, 809-813, 8-10 พฤษภาคม 2556
- [10] S. Rujihan, P. Kittidachachan, and B. Damrongsak, Low-cost Fabrication of Masters for Plastic-Based Microfluidic Devices, Thai Journal of Physics, Series 8, 2012.
- [11] W. Soonpanich, U. Asawapirom, A. Keawprajak, and P. Kittidachachan, Spectral Down-Conversion for Dye Sensitized Solar Cells using Coumarin 6, Presented at Siam Physics Congress, 9-12 May 2012.
- [12] 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, Presented at Siam Physics Congress, 9-12 May 2012.
- [13] วิชญาพร สุธูปานิช, ภัทรียา กิตติเดชาชาญ, อุดม อัครวภิรมย์ การศึกษาผลการใช้ฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์ต่อการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์, Proceeding of the 7th Conference on Energy Network of Thailand, 557-561, 3-5 พฤษภาคม 2554.
- [14] W. Soonpanich, U. Asawapirom, and P. Kittidachachan, Development of luminescence multilayer films for photovoltaic application, to be published in Thai Journal of Physics, Series 7, 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] วิชาพร สุญพานิช, สุกฤต สมุทธะภพวงศ์, ภัทริยา กิตติเดชาชาญ การศึกษาการรวมแสงของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ นำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, 5-7 พฤษภาคม 2553
- [16] P. Kittidachachan, B. Damrongsak, Low cost spectral response measurement system using high power LEDs, Thai Journal of Physics, Series 6, 2010.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้