

ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารผสมโรดามีน 6จี และ
อนุภาคทองแพลเลเดียมที่มีขนาดนาโน
FLUORESCENCE QUANTUM YIELD OF RHODAMINE 6G
AND AuPd NANOPARTICLE COMPOSITE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารผสมโรดามีน 6จี และ
อนุภาคทองแพลเลเดียมที่มีขนาดนาโน
FLUORESCENCE QUANTUM YIELD OF RHODAMINE 6G
AND AuPd NANOPARTICLE COMPOSITE



T149329

ณัฐพร อัครภูมิ
วิมลมาศ ยศปราณี

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **149329**
รับ เดือน ปี **12 03 2561**

b. 12881855
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FLUORESCENCE QUANTUM YIELD OF RHODAMINE 6G
AND AuPd NANOPARTICLE COMPOSITE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ คำฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารผสมโรดามีน 6จี และอนุภาคทองแพลเลเดียมที่มีขนาดนาโน
Fluorescence Quantum Yield of Rhodamine 6G and AuPd Nanopartical Composite

ชื่อนักศึกษา นางสาวณัฐพร อัครภูมิ รหัสนักศึกษา 56051136
นางสาววิมลมาศ ยศปราณี รหัสนักศึกษา 56051212

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กฤษกร ไส้เจริญรัตน์ ประธานกรรมการ	
รศ.สาทร่าย เล็กชะอุ่ม กรรมการ	
ดร.พิชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ กรรมการ	
ผศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารผสม Rhodamine 6G และอนุภาคทองแพลเลเดียมที่มีขนาดนาโน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐพร อัครภูมิ รหัสนักศึกษา 56051136 นางสาววิมลมาศ ยศปราณี รหัสนักศึกษา 56051212
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์

บทคัดย่อ

โครงสร้างระดับนาโนมีความสำคัญมากในการนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้าน เช่น ด้านการแพทย์ อิเล็กทรอนิกส์ และพลังงานทางเลือก ฯลฯ โครงการพิเศษนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rhodamine 6G ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd และใช้เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ ความเข้มข้นของสารละลาย Rhodamine 6G และอนุภาคนาโน AuPd ซึ่งในงานวิจัยนี้เมื่อมีการผสมอนุภาคนาโนเข้ากับสารละลาย Rhodamine 6G พบว่าค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์เพิ่มขึ้นและลดลงขึ้นอยู่กับอัตราความเข้มข้นของ Rhodamine 6G และ AuPd

คำสำคัญ : ฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์, โรดามีน 6จี, อนุภาคนาโนทองแพลเลเดียม, วิธีแสดงผลตอบสนองพื้นผิว

Title	Fluorescence Quantum Yield of Rhodamine 6G And AuPd Nanopartical Composite
Students	Miss Nathaporn Asavapum Student ID 56051136 Miss Wimonmas Yospranee Student ID 56051212
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Asst. Prof. Dr. Pattareeya Damrongsak

Abstract

Nano structured noble metals have very important applications in diverse fields such as biomedical, electronics and renewable energy, etc. Here, we report the application of relative technique for the determination of AuPd core-shell nanorods on the absolute fluorescence quantum yield. Response Surface Methodology (RSM) was used to study relationship between fluorescence quantum yield and concentrations of Rhodamine 6G and AuPd core-shell nanorods. It has been observed that the presence of AuPd core-shell nanorods enhances and decreases the fluorescence quantum yield depending on concentrations of Rhodamine 6G : AuPd

Keywords : Fluorescence quantum yield, Rhodamine 6G, AuPd Core-shell nanorods, Response surface methodology

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้ค้นคว้าและทำวิจัยในครั้งนี้ได้รับความเมตตากรุณาและคำแนะนำรวมทั้งความช่วยเหลือทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ อีกทั้งยังให้การสนับสนุนและชี้แนะแนวทางในการทำงานร่วมกับผู้อื่นอย่างมีประสิทธิภาพจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภทริยา ดำรงค์ศักดิ์ ที่ปรึกษาโครงการนี้ ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจในการศึกษาและนำมาต่อยอดในการทำโครงการพิเศษนี้ทำให้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือเกี่ยวกับโปรแกรม Design Expert 9.0.3 ที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณเอกชัย รัมมะรัตน์ นักศึกษาปริญญาเอก ที่ให้คำปรึกษาและสอนการใช้อุปกรณ์ตลอดจนการทำวิจัยในครั้งนี้



ณัฐพร อัสวภูมิ
วิมลมาศ ยศปรางณี

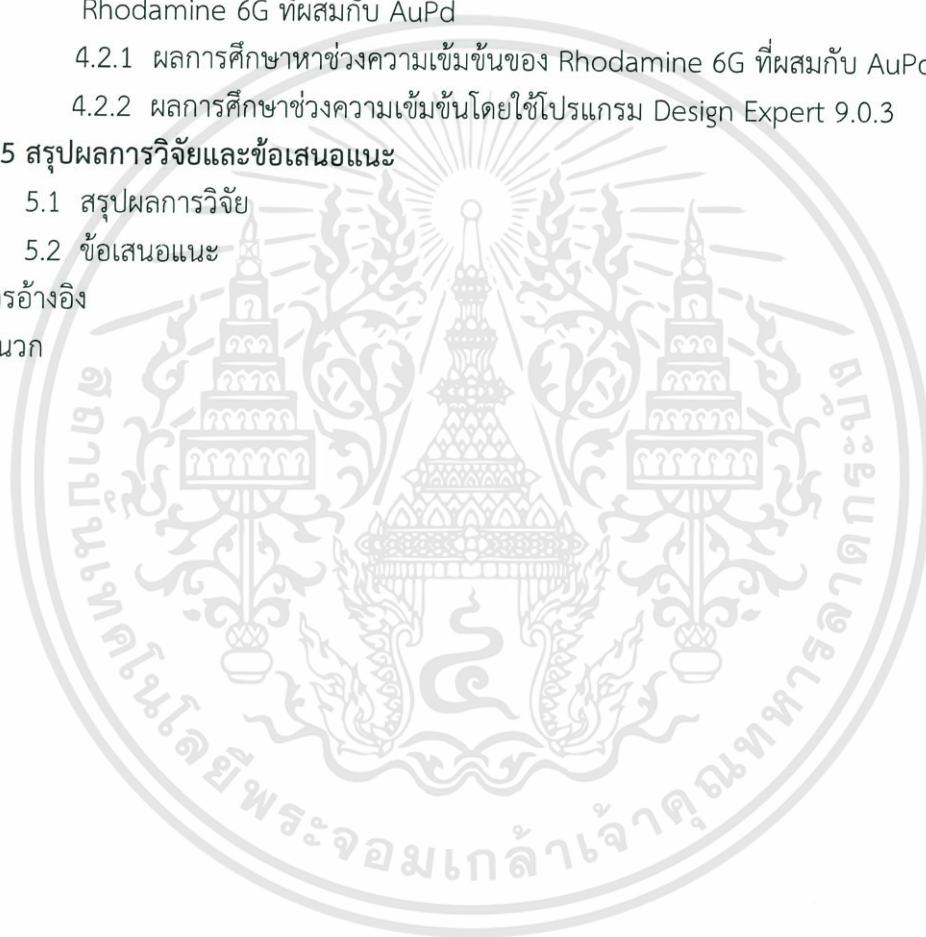
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 fluorescence quantum yield (Q)	3
2.2 กฎการดูดกลืนแสงของเบียร์แลมเบิร์ต	3
2.3 เทคนิคการวัดค่า fluorescence quantum yield	5
2.4 การเรืองแสง (Fluorescence)	5
2.4.1 ชนิดของการเปล่งแสง (Type of luminescence)	5
2.4.2 หลักการของ Photo luminescence	6
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟลูออเรสเซนซ์	9
2.5 อนุภาคนาโน	10
2.6 Plasmon resonance energy transfer และ Fluorescence resonance energy transfer	11
2.6.1 Plasmon resonance energy transfer	11
2.6.2 Fluorescence resonance energy transfer	12
2.7 Response surface methodology	13
2.7.1 Central Composite Design	14
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	19
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	19
3.2 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	21
3.2.1 หาค่า Q ของ Rh6G และ RhB	21
3.2.2 หาค่า Q ของ Rh6G และ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd	21
3.3 เทคนิคการวัด	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 ระบบวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลาย	23
3.3.2 ระบบวัดสมบัติการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารละลาย	26
3.4 การวิเคราะห์หาค่า Q	27
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	28
4.1 ผลการหาค่า fluorescence quantum yield ของ Rhodamine 6G และ Rhodamine B	28
4.2 ผลการหาค่า fluorescence quantum yield ของ Rhodamine 6G และ Rhodamine 6G ที่ผสมกับ AuPd	34
4.2.1 ผลการศึกษาหาช่วงความเข้มข้นของ Rhodamine 6G ที่ผสมกับ AuPd	34
4.2.2 ผลการศึกษาช่วงความเข้มข้นโดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผลการวิจัย	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
เอกสารอ้างอิง	46
ภาคผนวก	48



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สมบัติพื้นฐานของสารเรืองแสง Rh6G และ RhB	19
3.2 สมบัติพื้นฐานของ AuPd	20
3.3 สมบัติพื้นฐานของเอทานอลกับน้ำ DI	20
3.4 ค่าความเข้มข้นต่างๆที่นำมาใช้ในงานวิจัย	21
3.5 ค่าความเข้มข้นของ Rh6G และ AuPd ที่ผสมกัน	22
3.6 ค่าความเข้มข้นของ Rh6G และ AuPd ที่ผสมกันที่ได้จากโปรแกรม Design Expert 9.0.3	23
4.1 แสดงผลค่า fluorescence quantum yield ของสารละลาย Rhodamine 6G ครั้งที่ 1	32
4.2 แสดงผลค่า fluorescence quantum yield ของสารละลาย Rhodamine 6G ครั้งที่ 2	32
4.3 แสดงผลค่า fluorescence quantum yield ของสารละลาย Rhodamine 6G ครั้งที่ 3	33
4.4 ตารางแสดงค่า fluorescence quantum yield	33
4.5 ค่าความเข้มข้นของ Rh6G และ AuPd ที่ผสมกันที่ได้จากโปรแกรม Design Expert	37
4.6 แสดงค่า fluorescence quantum yield ของ Rhodamine 6G และ Rhodamine 6G ผสม AuPd	42
4.7 แสดงค่าการวิเคราะห์โมเดล	43
4.8 แสดงค่า fluorescence quantum yield ของสารละลาย Rh6G ผสมกับ AuPd และความคลาดเคลื่อนเปอร์เซ็นต์ของโมเดลและการทดลอง	44

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน ;krs คือ การปลดปล่อยโฟตอนในระดับพลังงาน S1 – S0 หรือเรียกว่าปล่อยปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์ ,kics คือ การแปลงผันภายในระดับพลังงาน S1 – S0 และไม่ปลดปล่อยโฟตอน ,kisc คือ การลดระดับพลังงานข้ามสถานะและไม่มีการปลดปล่อยโฟตอน ,krT คือ การปลดปล่อยโฟตอนในระดับพลังงาน T1 – S0 หรือเรียกว่าฟอสฟอรัสเซนซ์ ,knrT คือ การแปลงผันภายในระดับพลังงาน T1 – S0 และไม่ปลดปล่อยโฟตอน	3
2.2 กฎการดูดกลืนของเบียร์แลมเบิร์ต	4
2.3 แผนภาพแสดงโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นไปที่ระดับพลังงานสูงขึ้น	7
2.4 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน Jablonski	7
2.5 การเลื่อนสเปกตรัม	9
2.6 Plasmon resonance	12
2.7 แผนภาพแสดงระดับพลังงานอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ Fluorescence Resonance Energy Transfer	12
2.8 ภาพ 3 มิติของผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว	14
2.9 Central composite design สำหรับ 2 ตัวแปร	15
2.10 แสดงพีคการดูดกลืนแสงของ Rhodamine 6G (Rh6G) และ Rhodamine B (RhB) (A) และ พีคการเปล่งแสงของ Rhodamine 6G (Rh6G) และ Rhodamine B (RhB) (B)	15
2.11 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rhodamine 6G (a), สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Ag ที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-4} M กับ Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} M (b), สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Ag ที่ความเข้มข้น 5×10^{-4} M กับ Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} M (c), สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Ag ที่ความเข้มข้น 10×10^{-4} M กับ Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} M	16
2.12 กราฟแสดงประสิทธิภาพการ quenching ของระยะห่างของโมเดลของ R ⁻⁴ และ R ⁻⁶	17
2.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G เทียบกับสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd	17
2.14 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G เทียบกับสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd	18
3.1 โครงสร้างของ Rhodamine 6G (ก) และ Rhodamine B (ข)	19
3.2 โครงสร้างของ AuPd แบบแท่ง	20
3.3 โครงสร้างทางเคมีของเอทานอล (ก) และน้ำ DI (ข)	20
3.4 แผนภาพแสดงการเจือจางของ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd	22
3.5 แผนภาพระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลาย	24
3.6 เครื่องกำเนิดแสงทั้งสแตน (ก) และสเปกตรัมแสงของทั้งสแตน (ข)	24
3.7 สายใยแก้วนำแสง (ก) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm (ข) เส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร	24
3.8 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 อุปกรณ์ยึดจับควิวเวทและต่อสายใยแก้วนำแสง	25
3.10 ควิวเวทบรรจุสารละลาย	25
3.11 ระบบการวัดสมบัติการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารละลาย	26
3.12 ไดโอดเปล่งแสง (ก) และสเปกตรัมที่ได้จาก LED (ข)	26
4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Rhodamine 6G (ก) และ Rhodamine B (ข)	28
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลาย Rhodamine 6G	29
4.3 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ Rhodamine 6G (ก) และ Rhodamine B (ข)	30
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลาย Rhodamine 6G	31
4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Rhodamine 6G และ Rhodamine 6G ที่ผสมกับ AuPd	34
4.6 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rhodamine 6G เทียบกับสารละลาย Rhodamine 6G ที่ผสมกับ AuPd	36
4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} M (สารอ้างอิง)	37
4.8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Rhodamine 6G และ Rhodamine 6G ผสม AuPd	39
4.9 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} M (สารอ้างอิง)	40
4.10 สเปกตรัมเปล่งแสงของ Rhodamine 6G และ Rhodamine 6G ผสม AuPd	41
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Rh6G กับ AuPd ที่มีผลต่อค่า fluorescence quantum yield	44

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
Q	fluorescence quantum yield
PRET	Plasmon resonance energy transfer
FRET	Fluorescence resonance energy transfer
SPR	Surface plasmon resonance
LSPR	Localized surface plasmon resonance
Photon _{em}	จำนวนโฟตอนที่ถูกปลดปล่อย
Photon _{abs}	จำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืน
k _r	การปลดปล่อยโฟตอน
k _{nr}	การไม่ปลดปล่อยโฟตอน
AuPd	Gold-Palladium
Rh6G	Rhodamine 6G
RhB	Rhodamine B
น้ำ DI	น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
V _R	Vibration relaxation
IC	Internal conversion
ISC	Intersystem crossing
Ab	การดูดกลืนแสงของสาร (Absorption)
Flu	การเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence)
I _f	ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์
I ₀	ความเข้มแสงเริ่มต้น
I	ความเข้มแสงที่ผ่านออกมา
S ₀	Ground state
S ₁	Excitation state
T ₂	Triplet excited state
M	โมลาร์ (Molar)
nm	นาโนเมตร
LED	Light emitting diode
CCD	Central composite design
DOE	Design of experiments
RSM	Response surface methodology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการนำอนุภาคนาโนของโลหะมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวัสดุฟลูออเรสเซนต์ได้รับความสนใจที่จะศึกษาอย่างกว้างขวางเนื่องจากการประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายทั้งทางด้านการวินิจฉัยทางแพทย์ [1] ทางด้านชีวภาพ [2] และพลังงานแสงอาทิตย์ [3] ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคนาโนโลหะที่ผสมกับโมเลกุลของวัสดุฟลูออเรสเซนต์ส่งผลให้ปริมาณความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์เกิดการเปลี่ยนแปลง อาจทำให้โมเลกุลของวัสดุฟลูออเรสเซนต์มีความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์ลดลงเนื่องจากการคายพลังงานแบบไม่เปล่งแสงเพิ่มมากขึ้น [4] และโมเลกุลของวัสดุฟลูออเรสเซนต์มีความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากอัตราการกระตุ้นสลายตัวมากขึ้นและมีการเปล่งแสงเพราะว่าการสร้างสนามพลาสมอนรอบๆอนุภาคนาโน [5] การเปลี่ยนแปลงของแสงฟลูออเรสเซนต์นี้เกี่ยวข้องกับค่า fluorescence quantum yield (Q) ของวัสดุ โดยค่า Q ถูกนิยามคืออัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาทั้งหมด (Photon_{em}) จากสารเรืองแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนโดยสารเรืองแสง (Photon_{abs}) เขียนแสดงดังสมการ 1.1 [6]

$$Q = \frac{\text{Photon}_{em}}{\text{Photon}_{abs}} \quad (1.1)$$

โครงการพิเศษนี้จึงถูกจัดทำขึ้น โดยผู้วิจัยจะทำการวัดหาค่า Q ของสารสีย้อม Rhodamine 6G ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะ AuPd ในรูปแบบของสารละลาย โดยอาศัยเทคนิค Relative เทคนิคที่เลือกใช้นี้จะเป็นการหาค่า Q โดยอาศัยหลักการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ของสารละลายมาตรฐานที่ทราบค่า Q เทียบกับสารละลายที่ต้องการศึกษาและคำนวณหาค่า Q ได้ดังสมการ

$$Q = Q_R \frac{I \text{ OD}_R n^2}{I_R \text{ OD} n_R^2} \quad (1.2)$$

- เมื่อ Q คือ ค่า fluorescence quantum yield ของสารที่ต้องการศึกษา
 Q_R คือ ค่า fluorescence quantum yield ของสารอ้างอิง
I คือ พื้นที่ใต้กราฟความเข้มแสงของการเปล่งแสงของสารที่ต้องการศึกษา
 I_R คือ พื้นที่ใต้กราฟความเข้มแสงของการเปล่งแสงของสารอ้างอิง
OD คือ การดูดกลืนแสงของสารที่ต้องการศึกษา
 OD_R คือ การดูดกลืนแสงของสารอ้างอิง
n คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารที่ต้องการศึกษา
 n_R คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารอ้างอิง

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะใช้วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response surface methodology; RSM) และใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3 ในการออกแบบการทดลองโดยกำหนดให้ความเข้มข้นของ AuPd และสาร Rhodamine 6G เป็นตัวแปรอิสระ แล้วศึกษาวัดค่า Q และนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายค่า Q ของสารสีย้อม Rhodamine 6G ที่ผสมกับ AuPd การวัดปริมาณ Q จะทำให้ทราบค่าประสิทธิภาพในเปล่งแสงของวัสดุสีย้อมและสีย้อมที่ผสมกับอนุภาคโลหะในรูปแบบของสารละลายในเชิงปริมาณ และทำให้เข้าใจผลการเจือ AuPd ที่มีผลต่อความเข้มแสงของสาร Rhodamine 6G

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ทดลองวัดค่า Q ของสารสีย้อม Rhodamine 6G และ Rhodamine 6G ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd ในรูปแบบของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ โดยอาศัยเทคนิค Relative
- 2) ศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความเข้มข้นของ Rhodamine 6G กับ AuPd โดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการวัดค่า Q การใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3 และวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response surface methodology; RSM)
- 2) ทดลองวัดค่า Q ของสารสีย้อม Rhodamine 6G และสารสีย้อม Rhodamine 6G ที่ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd ในรูปแบบของสารละลาย
- 3) หาสมการทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่า Q และความเข้มข้นของสารสีย้อม Rhodamine 6G และอนุภาคนาโน AuPd โดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคการวัดค่า Q
- 2) ได้องค์ความรู้ใหม่ที่บ่งบอกค่าผลของ AuPd ที่มีต่อค่า Q ของวัสดุสีย้อม Rhodamine 6G
- 3) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3 และวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response surface methodology; RSM)
- 4) ได้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายค่า Q ของสารสีย้อม Rhodamine 6G ที่ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

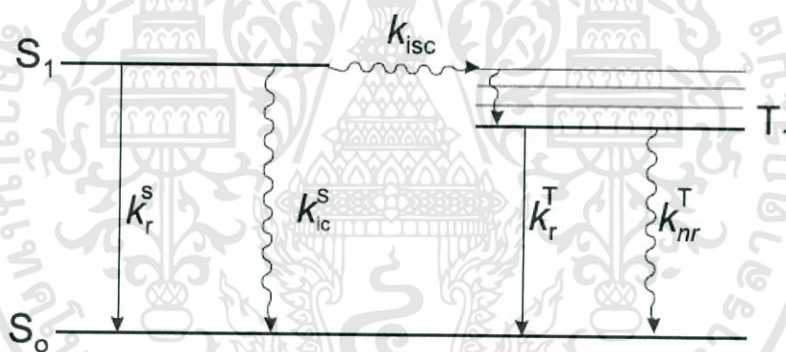
2.1 fluorescence quantum yield (Q)

fluorescence quantum yield (Q) คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาทั้งหมด (Photon_{em}) จากสารเรืองแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนโดยสารเรืองแสง (Photon_{abs}) เป็นการวัดประสิทธิภาพเชิงปริมาณของวัสดุจะเป็นตัวกำหนดความเหมาะสมของวัสดุที่จะนำไปใช้งานด้านต่างๆ เช่น การวิเคราะห์ทางชีวภาพ ทางการแพทย์ เป็นต้น Q สามารถอธิบายด้วยสมการความสัมพันธ์ [7]

$$Q = \frac{k_r}{k_r + \sum k_{nr}} = \frac{\text{Photon}_{em}}{\text{Photon}_{abs}} \quad (2.1)$$

k_r คือ การปลดปล่อยโฟตอน

k_{nr} คือ การไม่ปลดปล่อยโฟตอน



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน ; k_r^S คือ การปลดปล่อยโฟตอนในระดับพลังงาน $S_1 - S_0$ หรือเรียกว่าการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์ , k_{isc}^S คือ การแปลงผันภายในระดับพลังงาน $S_1 - S_0$ และไม่ปลดปล่อยโฟตอน , k_{isc} คือ การลดระดับพลังงานข้ามสถานะและไม่มี การปลดปล่อยโฟตอน , k_r^T คือ การปลดปล่อยโฟตอนในระดับพลังงาน $T_1 - S_0$ หรือเรียกว่า ฟอสฟอริสเซนซ์ , k_{nr}^T คือ การแปลงผันภายในระดับพลังงาน $T_1 - S_0$ และไม่ปลดปล่อย โฟตอน [7]

2.2 กฎการดูดกลืนแสงของเบียร์แลมเบิร์ต [7]

กฎของเบียร์กล่าวไว้ว่า “สำหรับรังสีที่เป็นรังสีชนิดลำแสงขนานและความยาวคลื่นเดียวที่ ตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียวที่มีระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่างเท่ากัน ค่าการดูดกลืน (A) จะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (c)”

$$A \propto c$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

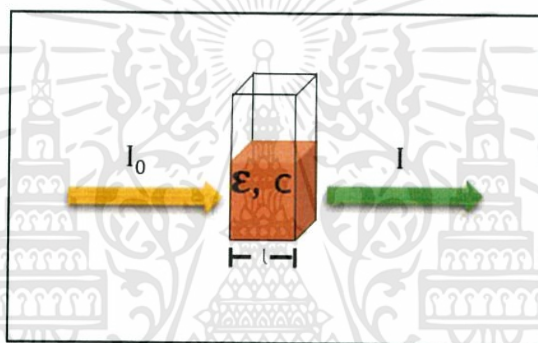
กฎของแลมเบิร์ตกล่าวไว้ว่า “สำหรับรังสีชนิดลำแสงขนานและความยาวคลื่นเดียวที่ผ่านตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียวที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผันตรงกับระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (1)”

$$A \propto l$$

กฎการดูดกลืนของเบียร์แลมเบิร์ตเป็นการรวมกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตเข้าด้วยกัน กล่าวไว้ดังนี้ “สำหรับรังสีที่เป็นชนิดลำแสงขนานและความยาวคลื่นเดียวที่ผ่านตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียว ค่าการดูดกลืนจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของตัวอย่างและระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง”

$$A = \epsilon cl \quad (2.2)$$

a คือ สภาพการดูดกลืน ($L \cdot g^{-1} \cdot cm^{-1}$)



รูปที่ 2.2 กฎการดูดกลืนของเบียร์แลมเบิร์ต

ถ้าความเข้มข้นของตัวอย่างเป็นโมลาริตี (molarity ; $mol \cdot L^{-1}$) เราเรียกสภาพการดูดกลืนว่าค่าคงที่ของการดูดกลืนแสง (molar absorptivity, ϵ) ของสารละลาย

$$A = -\log T = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon cl \quad (2.3)$$

$$A = \log \frac{\%T}{100\%} \quad (2.4)$$

A คือ ค่าการดูดกลืนแสง

T คือ Transmission

I_0 คือ ความเข้มแสงเริ่มต้น

I คือ ความเข้มแสงหลังผ่านตัวกลาง

ϵ คือ molar absorptivity ($L \cdot cm^{-1} \cdot mol^{-1}$)

l คือ ระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (cm)

c คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ($mol \cdot L^{-1}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เทคนิคการวัดค่า fluorescence quantum yield

มีงานวิจัยที่ศึกษาการวัดค่า Q อยู่หลายเทคนิค เช่น เทคนิค Time-correlated single photon counting (TCSPC) [8] เทคนิค Thermal lens [9] และในงานวิจัยนี้จะวัดค่า Q โดยใช้เทคนิค Relative [6] เนื่องจากเทคนิคนี้มีการจัดเตรียมระบบการวัดไม่ซับซ้อน วัดค่าได้แม่นยำและใช้เวลาในการทดลองน้อย

เทคนิค Relative เป็นการศึกษาค่าความสัมพันธ์ของค่า Q ของสารเรืองแสงโดยการเปรียบเทียบกับสารเรืองแสงที่ทราบค่า Q การศึกษาค่าความสัมพันธ์ของค่า Q นั้นมี 2 วิธี คือ วิธี Single-point และวิธีการเปรียบเทียบ (Comparative) จะใช้วิธี Single-point เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์กับความยาวคลื่น และเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับสารอ้างอิงที่มีความเข้มข้นเดียวกัน เทคนิคนี้จะใช้สารอ้างอิงที่มีความเข้มข้นเดียวจึงเป็นวิธีที่วัดค่า Q ง่ายและเร็วแต่ยังไม่น่าเชื่อถือเนื่องจากการดูดกลืนแสงอาจเกิดการคลาดเคลื่อน ส่วนวิธีการเปรียบเทียบนั้นจะกำหนดความเข้มข้นหลายๆค่าความเข้มข้นทั้งสารที่ต้องการวัดและสารที่ใช้อ้างอิงซึ่งจะใช้เวลาในการวัดนานแต่จะมีความถูกต้องแม่นยำสูง วิธีการวัดค่า Q ของเทคนิค Relative มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่างๆ อย่างน้อย 5-6 ตัวอย่าง
2. วัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์
3. คำนวณพื้นที่ใต้กราฟของการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์
4. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟฟลูออเรสเซนซ์กับค่าสูงสุดของการดูดกลืนแสง
5. คำนวณค่า Q จากสมการที่ 1.2

$$Q = Q_R \frac{I \text{ OD}_R n^2}{I_R \text{ OD} n_R^2}$$

เมื่อ Q	คือ ค่า fluorescence quantum yield ของสารที่ต้องการศึกษา
Q_R	คือ ค่า fluorescence quantum yield ของสารอ้างอิง
I	คือ พื้นที่ใต้กราฟความเข้มแสงของการเปล่งแสงของสารที่ต้องการศึกษา
I_R	คือ พื้นที่ใต้กราฟความเข้มแสงของการเปล่งแสงของสารอ้างอิง
OD	คือ การดูดกลืนแสงของสารที่ต้องการศึกษา
OD_R	คือ การดูดกลืนแสงของสารอ้างอิง
n	คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารที่ต้องการศึกษา
n_R	คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารอ้างอิง

2.4 การเรืองแสง (Fluorescence) [10]

2.4.1 ชนิดของการเปล่งแสง (Type of luminescence)

การเปล่งแสงมีด้วยกันหลายชนิด ทั้งนี้แล้วแต่แหล่งของพลังงานที่ทำให้โมเลกุลไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น (Excited state)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Photo luminescence คือ โมเลกุลที่เกิดอันตรกิริยากับโฟตอนของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิด Luminescent molecules เรียกว่า Photo luminescence ซึ่งแบ่งได้เป็นการร้าวแสง (Fluorescence) และการเรืองแสง (Phosphorescence) ทั้งสองกระบวนการนี้แตกต่างกันที่กระบวนการกลับสู่สถานะพื้นใหม่

- Chemical luminescence คือ โมเลกุลของสารนั้นใช้พลังงานที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมี

- Bioluminescence คือการเรืองแสงที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตสร้างขึ้น เช่น หิ่งห้อย

- Crystalloluminescence เป็นการปล่อยแสงระหว่างกระบวนการ crystallization เช่น การเกิดผลึกของ certain salt ในเฟสของของเหลว

- Electroluminescence เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งทางแสงและทางไฟฟ้า เช่น วัสดุสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนและโฮลอาจจะถูกแยกกันในรอยต่อ p-n เมื่อมีการกระตุ้นจากอิเล็กตรอนในกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหรืออยู่ในสนามไฟฟ้าความเข้มสูง จะเปล่งแสงหรือโฟตอนออกมาซึ่งนำมาใช้ทำเป็นหน้าจอต่างๆ (สาร phosphors) หรือ LED

- Cathodoluminescence เกิดขึ้นเมื่อลำแสงอิเล็กตรอนตกกระทบวัสดุเรืองแสง

- Radioluminescence เกิดขึ้นเมื่อวัตถุบางชนิดสัมผัสกับรังสีไอออนิก เช่น รังสีแอลฟา รังสีแกมมา และรังสีเบต้า

2.4.2 หลักการ Photo luminescence

Photo luminescence เป็นกระบวนการไปสู่สถานะกระตุ้นและกลับสู่สถานะพื้น (Excitation-deexcitation process) โดยมีโฟตอนเข้าไปเกี่ยวข้องคือมีการดูดกลืนโฟตอนและมีการปลดปล่อยโฟตอนออกมา

- กระบวนการกระตุ้น (Excitation)

โมเลกุลมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ที่มีสถานะพลังงานที่ต่ำที่สุดซึ่งเรียกว่าสถานะพื้น อิเล็กตรอนต้องอยู่เป็นคู่ ถ้าให้มีลิลพิลิตีซีดี (Multiplicity) ของโมเลกุลเป็น M ซึ่งแสดงถึง Orbital angular momentum ของแต่ละสถานะ (State) และเกี่ยวข้องกับ Spin ดังสมการ

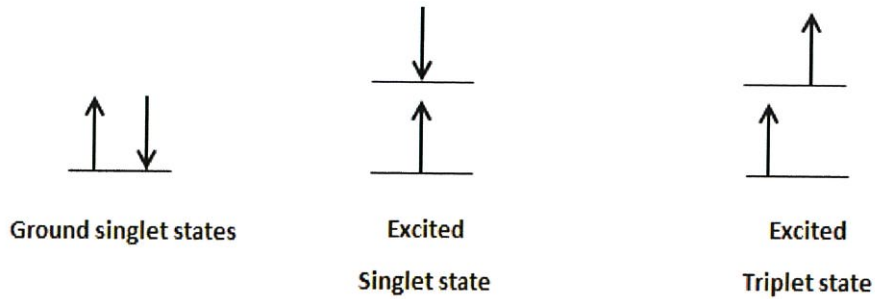
$$M = 2S + 1 \quad (2.7)$$

เมื่อ S คือ spin quantum number ของโมเลกุลและเป็นผลรวมของ spin ของอิเล็กตรอนในโมเลกุล สำหรับโมเลกุลของสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ $S=0$

$$S = \left(+\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) = 0 \quad (2.8)$$

เพราะโมเลกุลมีจำนวนอิเล็กตรอนอิเล็กตรอนเป็นคู่และทิศทางตรงข้ามกัน

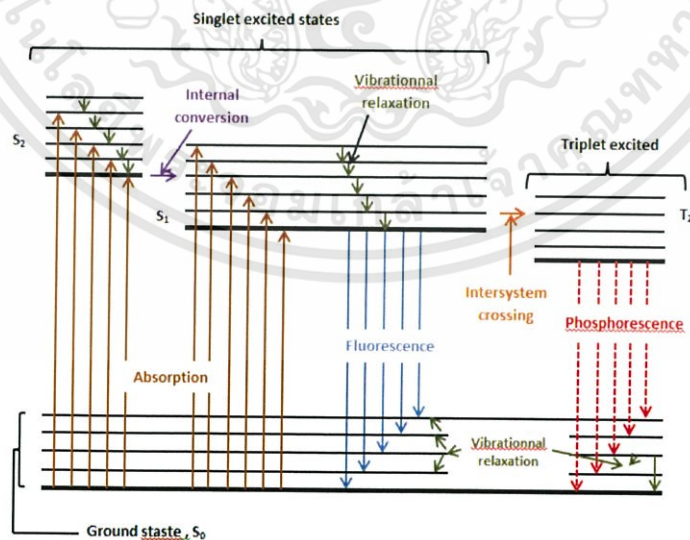
ดังนั้น $M = 1$ เรียกว่า Singlet state และให้ Ground singlet state เป็น S_0 ถ้าเป็น S_1 และ S_2 หมายถึง Singlet state กระตุ้นที่หนึ่งและที่สองตามลำดับ (First and second excited singlet state)



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นไปที่ระดับพลังงานสูงขึ้น [12]

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้ไปที่ระดับพลังงานสูงขึ้นโดยการกระตุ้นนั้นจะมี 2 แบบ คือ การกระตุ้นไปยังสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น (Excitation singlet state) และสถานะที่สามในสถานะกระตุ้น (Triplet singlet state) ดังรูป ซึ่งในกรณีของการกระตุ้นอิเล็กตรอนไปยังสถานะที่สามในสถานะกระตุ้น เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นมีโอกาสในการหมุนกลับทิศทางทำให้ค่า S เปลี่ยนไปเมื่อมีการหมุน $S = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ เพราะฉะนั้นค่า M จะเป็น 3 มีความหมายว่าสถานะที่สาม (Triplet state) ซึ่งสถานะกระตุ้นของสถานะสามหรือสถานะที่มีค่าพลังงานต่ำสุดของสถานะสามจะแทนด้วย T_2 และที่สถานะสามนี้จะไม่พบในสถานะพื้นของโมเลกุลที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นคู่เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นอิเล็กตรอนจะไปอยู่สถานะกระตุ้นในช่วงเวลาหนึ่งและจะตกกลับสู่สถานะพื้นหลังการดูดกลืน (Excitation-De-excitation process) เรียกการตกกลับของอิเล็กตรอนนี้ว่ากระบวนการลดระดับพลังงาน (De-excitation)

เพื่อให้เห็นกระบวนการเกิดการกระตุ้นเนื่องจากการดูดกลืนพลังงานและกระบวนการแผ่รังสีสามารถแสดงได้ง่ายๆโดยใช้แผนภาพแสดงระดับพลังงาน Jablonski ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน Jablonski [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การลดระดับพลังงาน

อิเล็กตรอนของโมเลกุลสารเรืองแสงที่อยู่ในสถานะกระตุ้นต้องเกิดการตกกลับสู่สถานะพื้น ด้วยกระบวนการลดระดับพลังงาน กระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดได้หลายรูปแบบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ กระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เปล่งแสง และการลดระดับพลังงานแบบเปล่งแสง

(1) กระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่ปลดปล่อยโฟตอน

- การลดระดับพลังงานการสั่นของโมเลกุล (Vibrational relaxation: VR)

เมื่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลสารเรืองแสงได้รับพลังงานอิเล็กตรอนจะขึ้นไปสู่สถานะพลังงานกระตุ้น ซึ่งมีระดับพลังงานการสั่นหลายค่า เช่น จากแผนภาพ Jablonski ระดับพลังงาน S_1 จะมีระดับพลังงานการสั่น 3 ระดับ เป็นต้น กระบวนการนี้เกิดขึ้นในโมเลกุลที่อยู่ในรูปแบบของสารละลาย อิเล็กตรอนนั้นจะเกิดการสูญเสียพลังงานออกมาในรูปของความร้อนที่เกิดจากการสั่นในการชนกับตัวทำละลายมีผลให้ตัวทำละลายมีพลังงานสูงขึ้น

- การแปลงผันภายใน (Internal conversion: IC)

กระบวนการนี้จะไม่เกิดการคายพลังงานแสงหรือพลังงานความร้อนออกมาแต่จะเกิดการส่งผ่านพลังงานระหว่างโมเลกุลเท่านั้นโดยโมเลกุลที่ส่งผ่านกันจะมีค่าพลังงานที่สถานะกระตุ้นต่างกัน ไม่มากนักหรือมีช่วงระดับพลังงานซ้อนทับกัน เช่น การส่งผ่านพลังงานในสถานะ S_1 ไปยังสถานะ S_2 ที่ระดับพลังงานเดียวกันดังรูป

- การลดระดับพลังงานข้ามสถานะ (Intersystem crossing: ISC)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนของโมเลกุลในสถานะกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการหมุน ซึ่งการที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางการหมุนได้ก็ต่อเมื่อระดับพลังงานการสั่นของสถานะเดียวและระดับชั้นพลังงานการสั่นของสถานะสามในสถานะกระตุ้นตรงกัน (ระดับพลังงานเท่ากัน) หรือการทรานซิชันจากสถานะเดียวที่มีระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดไปสู่สถานะสามในสถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานการสั่นมากกว่า

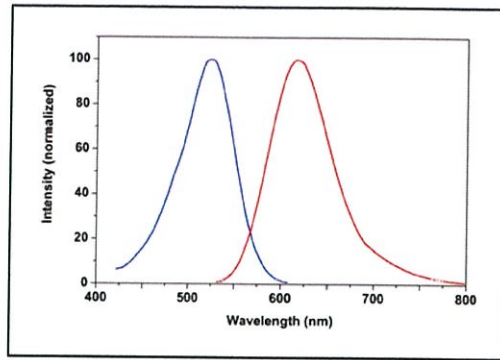
(2) กระบวนการลดระดับพลังงานแบบปลดปล่อยโฟตอน

- ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence)

เมื่ออิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานสูงมากผ่านกระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เปล่งแสงดังที่กล่าวมาแล้ว จนกระทั่งเมื่ออิเล็กตรอนในโมเลกุลลดระดับพลังงานมาถึงระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดของสถานะเดียวในสถานะกระตุ้นจะเกิดการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้น ซึ่งการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้นนี้จะเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของแสงและเรียกกระบวนการคายพลังงานแสงนี้ว่าฟลูออเรสเซนซ์ฟอสฟอรัสเซนซ์ (Phosphorescence)

การคายพลังงานในกระบวนการนี้จะแตกต่างจากการคายพลังงานแบบฟลูออเรสเซนซ์เนื่องจากฟอสฟอรัสเซนซ์เป็นการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานการสั่นต่ำที่สุดของสถานะสามในสถานะกระตุ้น ซึ่งถ้าเป็นฟลูออเรสเซนซ์จะเป็นการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดของสถานะเดียวในสถานะกระตุ้น การปลดปล่อยพลังงานแสงแบบนี้ถูกเรียกว่าฟอสฟอรัสเซนซ์

กระบวนการคายพลังงานแบบที่เกิดแสงทั้งสองชนิดจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในย่านความยาวคลื่นที่ยาวกว่าความยาวคลื่นที่มากกระตุ้นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเลื่อนสเปกตรัม [13]

โดยการเลื่อนสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนซ์ถูกเรียกว่า Stoke shifted ซึ่งมีนิยามว่า ระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนซ์ในการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ ระยะห่างจากจุดสูงสุดของทั้งสองสเปกตรัมจะมากกว่าการเกิดฟลูออเรสเซนซ์เพราะว่าชั้นพลังงานของสถานะสามในสถานะการกระตุ้นจะสูงกว่าสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟลูออเรสเซนซ์

- ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ (Temperature effect)

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ทั้งที่อยู่สถานะพื้นและสถานะกระตุ้น การที่โมเลกุลมีความเร็วเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการชนมากขึ้นด้วย ดังนั้นโมเลกุลที่อยู่สถานะกระตุ้นจะชนกับโมเลกุลที่อยู่สถานะพื้น ทำให้เกิด internal conversion (IC) เพิ่มขึ้นเป็นเหตุให้ความเข้มของฟลูออเรสเซนซ์ลดลง นอกจากนี้อุณหภูมิทำให้ค่า quantum efficiency ลดลงด้วย

- ผลจากการเกิดพันธะไฮโดรเจน (Effect of hydrogen bonding)

การเกิดพันธะไฮโดรเจนของฟังก์ชันนัลกรุปในโมเลกุลนั้นกับตัวทำละลายหรือกับสารอื่นที่ปนอยู่จะมีผลอย่างมากต่อการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ เพราะไปทำให้ค่า quantum efficiency เปลี่ยนแปลงซึ่งมักจะทำให้ลดลง โดยทั่วไปโมเลกุลที่ละลายในตัวทำละลายที่เกิดพันธะไฮโดรเจนโดยเป็นพวกกรดแก่ เมื่ออยู่ที่สถานะกระตุ้นมากกว่าที่สถานะพื้น จะมีผลทำให้เกิดฟลูออเรสเซนซ์มีความยาวคลื่นสั้นลงมากกว่าโมเลกุลที่เป็นเบสแก่เมื่ออยู่ที่สถานะกระตุ้น ในบางกรณีพันธะไฮโดรเจนสามารถลดความเข้มของฟลูออเรสเซนซ์ได้เนื่องจากไปเพิ่มการเกิด internal conversion ให้กับโมเลกุลที่เกิดพันธะไฮโดรเจน

- ผลจากออกซิเจนที่ละลายอยู่ (Effect of dissolved oxygen)

ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายนั้นมักจะไปลดความเข้มของฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดออกซิเดชันกับสารที่ทำให้ฟลูออเรสเซนซ์ นอกจากนี้ออกซิเจนยังช่วยส่งเสริมให้เกิด intersystem crossing (ISC) และการเปลี่ยนโมเลกุลที่สถานะกระตุ้นไปยัง Triplet state แล้วทำให้ไม่เกิดฟลูออเรสเซนซ์

- ผลจากสารเคมีอื่นๆที่เป็นสารเจือปน (Effect of impurities)

ในกรณีที่มีสารอื่นปนอยู่ด้วยในสารละลายตัวอย่าง สารเหล่านั้นอาจมีผลกระทบต่อการเกิดลูมิเนสเซนซ์กับสารที่จะวิเคราะห์ก็ได้ ถ้าสารเหล่านั้นสามารถดูดกลืนหรือให้แสงออกมาที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นของแสงเพื่อทำให้เกิดการกระตุ้น หรือที่จะให้ออกมาจากสารตัวอย่าง คือถ้าสารเจือปนนั้นดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับของแสงที่ให้ออกมาจากสาร

ตัวอย่างก็จะทำให้ความเข้มของฟลูออเรสเซนซ์ลดลงไปส่วนหนึ่ง การที่สารเจือปนนี้ดูดกลืนแสงที่จะทำให้เกิดการกระตุ้นหรือฟลูออเรสเซนซ์ที่ออกมา เรียกว่าเกิด Inner-Filter Effect

- Quenching

เป็นปรากฏการณ์ในการลดลงของค่าความเข้มข้นฟลูออเรสเซนซ์ใดๆ ที่เกิดจากองค์ประกอบของสารละลายเองหรือสารอื่นที่อยู่ในองค์ประกอบซึ่งรวมตัวทั้งตัวละลายด้วย โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

Self quenching เป็นผลเนื่องจากการชนกันระหว่างโมเลกุลที่สถานะกระตุ้นทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน โดยไม่มีการให้รังสีแกมมาทำลาย ซึ่งจัดว่าเกิด External conversion

Self absorption เกิดขึ้นเมื่อความยาวคลื่นแสงฟลูออเรสเซนซ์มีการซ้อนทับกับแถบการดูดกลืนของสารเอง ทำให้โฟตอนหรือแสงที่เกิดขึ้นถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารเอง ผลแบบนี้เกิดเนื่องจากความเข้มข้นเพิ่มสูงมากขึ้น

- ผลของความเข้มข้นที่มีต่อความเข้มของฟลูออเรสเซนซ์ (Effect of concentration on fluorescent intensity)

ปริมาณแสงที่เกิดจากโฟโตลูมิเนสเซนซ์ขึ้นอยู่กับปริมาณแสงที่ดูดกลืน เพื่อทำให้เกิดการกระตุ้นจะได้ว่า

$$I_f \pm (I_0 - I) \quad (2.9)$$

$$I_f \pm \Phi_f (I_0 - I) \quad (2.10)$$

เมื่อ I_f คือ ความเข้มของฟลูออเรสเซนซ์

I_0 คือ ความเข้มแสงเริ่มต้น

I คือ ความเข้มแสงที่ผ่านออกมา

Φ_f คือ quantum efficiency ของกระบวนการเกิดฟลูออเรสเซนซ์

2.5 อนุภาคนาโน

อนุภาคนาโนคืออนุภาคที่มีขนาด 1-100 นาโนเมตร วัสดุนาโนมีคุณสมบัติแตกต่างจากวัสดุธรรมดา ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคนาโนจะมีพื้นที่ผิวมากขึ้นต่อปริมาณน้ำหนักรวมเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ จึงเป็นสาเหตุที่อนุภาคนาโนจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ มากขึ้น ปัจจุบันมีการนำอนุภาคนาโนไปประยุกต์ใช้ดังจะยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

(1) การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนทางการแพทย์ มีการนำอนุภาคนาโนพอลิเมอร์ไมเซลส์ในการส่งยาเพื่อรักษาเนื้องอก [11] และยังมีการใช้อนุภาคนาโนพอลิเมอร์เคลือบเหล็กออกไซด์ทำลายกลุ่มของเชื้อแบคทีเรียและช่วยในการรักษาการติดเชื้อแบคทีเรียเรื้อรังให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น [12]

(2) การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนด้านการผลิตและวัสดุ เช่น อนุภาคนาโนของสังกะสีออกไซด์ที่สามารถกระจายตัวในอุตสาหกรรมเคลือบเพื่อปกป้องไม้ พลาสติก และสิ่งทอจากการตกกระทบของรังสียูวีและมีการนำเอาอนุภาคนาโนซิลเวอร์ใช้ในเนื้อผ้าที่เพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ให้เสื้อผ้ามีกลิ่นเหม็นอับ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) การประยุกต์ใช้นาโนด้านสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันมีนักวิจัยใช้นาโนของทองคำฝังในรูพรุนของแมงกานีสออกไซด์เพื่อเร่งปฏิกิริยาสลายสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในอากาศที่อุณหภูมิห้อง [14] และใช้นาโนของเหล็กทำความสะอาดสารมลพิษคาร์บอนเตตระคลอไรด์ในน้ำใต้ดิน [15] และยังมีนาโนของเหล็กออกไซด์ในการทำมาสะอาดสารหนูในบ่อน้ำ [16]

(4) การประยุกต์ใช้นาโนด้านพลังงานและอิเล็กทรอนิกส์ นักวิจัยได้แสดงให้เห็นถึงแสงแดดที่ตกกระทบกับอนุภาคนาโนสามารถผลิตไอน้ำได้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง เรียกว่า “อุปกรณ์ผลิตไอน้ำพลังงานแสงอาทิตย์” มีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้ในพื้นที่ประเทศกำลังพัฒนาที่ไม่มีไฟฟ้าสำหรับการใช้งาน [17]

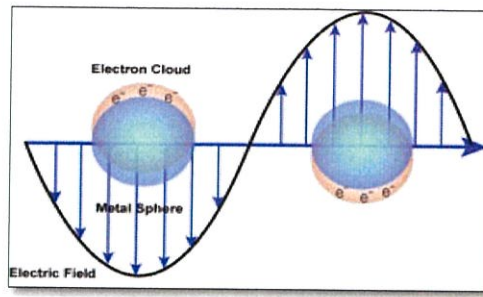
ปัจจุบันอนุภาคนาโนของทองได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีคุณสมบัติเซอร์เฟซพลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance, SPR) ซึ่ง SPR ก็คือ ปรากฏการณ์เชิงแสง ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอิเล็กตรอนที่อยู่ในโลหะระดับนาโน กล่าวคือเมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมาตกกระทบโลหะ กลุ่มอิเล็กตรอนที่ถูกจำกัดอยู่ในอนุภาคนาโนจะเกิดการสั่นรวม (Collective oscillation) และเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมีความยาวคลื่นเดียวกับกับความยาวคลื่นที่อิเล็กตรอนสั่นในอนุภาคนาโน จะทำให้เกิดการกำทอนขึ้น ซึ่งอันตรกิริยาที่แสงกระทำต่อโลหะจะเกิดได้สองแบบคือ แสงจะตกกระทบและสะท้อนออกไปด้วยความยาวคลื่นเท่าเดิมทุกทิศทาง เรียกว่าการกระเจิง (Scattering) และในขณะเดียวกัน บางโฟตอนก็จะถูกดูดกลืนและถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการสั่น ซึ่งเรียกว่าการดูดกลืนแสง (Absorption) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างระดับนาโนของทองจะเกิดทั้งกระบวนการกระเจิงแสงและการดูดกลืนแสงซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน [5]

การปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของอนุภาคนาโนโลหะบริสุทธิ์ เช่น อนุภาคนาโนของทองมาเป็นอนุภาคนาโนโลหะผสม เช่น AuPd core-shell ทำให้อนุภาคนาโนโลหะผสมมีคุณสมบัติช่วงการดูดกลืนกว้างขึ้นตั้งแต่ย่านแสงขาวจนถึงย่านอินฟราเรดและสามารถปรับช่วงการดูดกลืนแสงได้ซึ่งต่างกับอนุภาคนาโนโลหะแบบบริสุทธิ์ที่สามารถวัดช่วงการดูดกลืนได้แค่ช่วงอัลตราไวโอเล็ตถึงแสงขาว [18]

2.6 Plasmon resonance energy transfer และ Fluorescence resonance energy transfer

2.6.1 Plasmon resonance energy transfer [5]

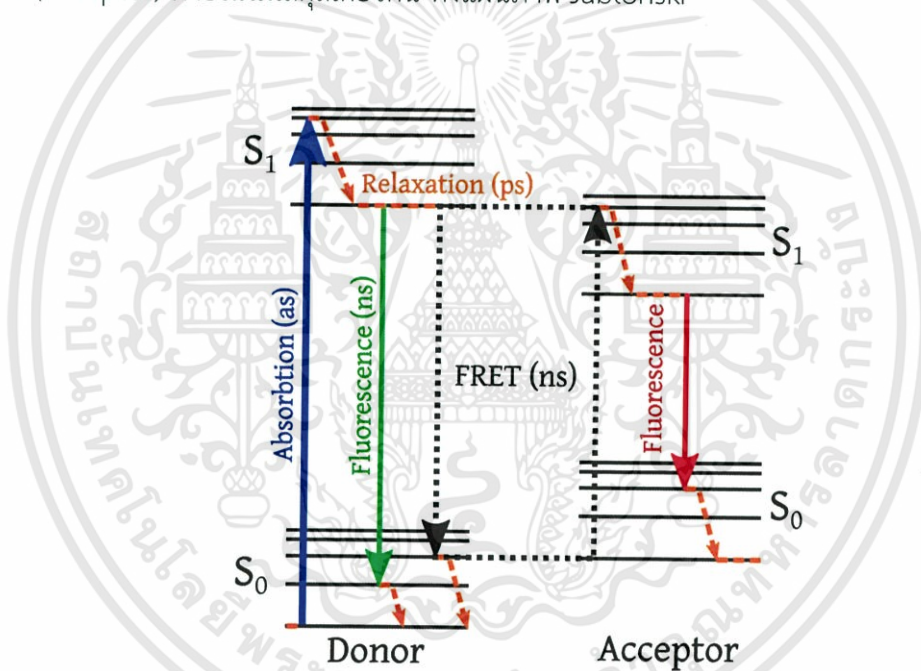
เมื่อแสงตกกระทบที่โครงสร้างระดับนาโนของทองอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปยังแถบเหนี่ยวนำ และจะเกิดการสั่นพ้องกับแสงที่มาตกกระทบ ซึ่งจะทำให้เกิดพลาสมอนโพลาไรตรอน (รูปที่ 2.6) ซึ่งจะสามารถถ่ายทอดระหว่างรอยต่อของโลหะและไดอิเล็กทริก ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดอยู่บริเวณเปลือกชั้นนอกของโลหะนาโน เพราะแสงจากภายนอกไม่สามารถส่องทะลุผ่านเข้าไปภายในวัสดุได้ โดยทั่วไปจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า localized surface plasmon resonance, LSPR แสงที่ตกกระทบที่พื้นผิวของวัสดุจะทำอันตรกิริยากับวัสดุสองแบบคือการดูดกลืนและการกระเจิง โดยแสงที่ถูกดูดกลืนจะทำให้เกิดการสั่นภายในผลึกของวัสดุนาโนและจะก่อให้เกิดความร้อนขึ้นซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการฆ่าเซลล์มะเร็งด้วยความร้อนได้ ขณะที่แสงที่เกิดการกระเจิงซึ่งจะมีความยาวคลื่นเท่ากับแสงที่ตกกระทบจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างภาพถ่ายได้



รูปที่ 2.6 Plasmon resonance [5]

2.6.2 Fluorescence resonance energy transfer [19]

Fluorescence resonance energy transfer (FRET) ค้นพบโดย Förster ซึ่งเป็นการถ่ายทอดพลังงานระหว่างหมู่ที่ดูดกลืนแสงและถ่ายทอดพลังงาน (donor) และหมู่ที่รับพลังงานและเรืองแสง (acceptor) ภายในโมเลกุลเดียวกัน ดังแผนภาพ Jablonski



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงระดับพลังงานอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ fluorescence resonance energy Transfer [19]

จากแผนภาพ Jablonski แสดงตัวที่สามารถดูดกลืนแสงได้และเป็นตัวที่ถ่ายทอดพลังงาน เรียกว่า donor สำหรับตัวที่สามารถรับพลังงานและเรืองแสงหลังจากได้รับพลังงานจาก donor เรียกว่า acceptor แต่ถ้า acceptor ไกลจาก donor เราจะเห็นการเรืองแสงจาก donor เท่านั้น เนื่องจากเป็นตัวที่สามารถดูดกลืนแสงได้แต่ acceptor ไม่สามารถถูกกระตุ้นด้วยแสง ถ้าระยะห่างระหว่างสองตัวใกล้กันขึ้นจะมีการถ่ายโอนพลังงานจาก donor ไปยัง acceptor หลังจาก donor ถูกกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งความเข้มของการเรืองแสงจะเป็นตัวบ่งบอกระยะทางระหว่างทั้งสองนี้ จึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการติดตามระยะทางระหว่างสองจุดในโมเลกุลที่สนใจขณะเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเกิด FRET จะเกี่ยวข้องกับ fluorescence quantum yield และเรายังสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเอา FRET มาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้หลายอย่าง เช่น การตรวจจับจับจิ้งหะการเต้นหัวใจของโมเลกุล การรักษาโรคมะเร็ง การสังเคราะห์อนุพันธ์ทริปทามีนสำหรับยับยั้งเอนไซม์เบต้าซีครีเทส และอื่นๆอีกมากมาย

2.7 Response surface methodology [20]

วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวหรือ RSM เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น (Montgomery, 1991)

หลักการที่สำคัญของการทำพื้นผิวตอบสนองเพื่อนำเสนอผลการวิจัย คือ การที่จะนำเสนอแบบพื้นผิวตอบสนอง ต้องมีต้องมีแผนการทดลองที่เหมาะสมและปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ 2 ตัวขึ้นไปและต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ โดยมีตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัวแปร ดังนั้นแผนการทดลองที่จะสามารถสร้างพื้นผิวตอบสนองได้คือ Factorial Design, Mixture Design, Central Composite Design (CCD) และ Plackett & Burman Design ระดับของตัวแปรอิสระที่ต้องผันแปรไปนั้นจำเป็นต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา จากนั้นนำข้อมูลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (X_i) มีสัมพันธ์กับข้อมูลของตัวแปรตาม (Y_i) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) ซึ่งอาจจะมีทั้งความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง (Linear Model) ความสัมพันธ์ในเชิง Interaction (Interaction model) ความสัมพันธ์กันในเชิง Quadratic (Quadratic Model) แล้วเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปสร้างเป็นภาพสามมิติ หรือที่เรียกว่าสร้างพื้นผิวผลตอบสนองเอง ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสามารถอธิบายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า สมการถดถอย (Regression equation) พิจารณา ดังสมการที่ 2.11

$$Y = f(x_1, x_2) + \mu \quad (2.11)$$

ϵ คือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในค่าสังเกต Y และหากแสดงค่าคาดหวังของการตอบสนองเป็น $E(Y) = f(x_1, x_2) = \cdot$ แล้วพื้นผิว (Surface) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\cdot = f(x_1, x_2) \quad (2.12)$$

ซึ่งเรียกว่าผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response surface) (Montgomery, 1991) การนำค่า η มาพล็อตกับระดับของตัวแปร x_1 และ x_2 แสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวดังรูปที่ 2.8 อย่างไรก็ตามในการศึกษาโดยใช้วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวนั้นจำเป็นต้องค้นหาฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตามหรือค่าตอบสนองต่อตัวแปรอิสระต่างๆเป็นลำดับแรก การค้นหาฟังก์ชันต่างเหล่านี้มักใช้ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล (Polynomial) ลำดับต้นๆ ระดับของตัวแปรอิสระที่ต้องผันแปรไปนั้น จำเป็นต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา จากนั้นนำข้อมูลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (X_i) มีสัมพันธ์กับข้อมูลของตัวแปรตาม (Y_i) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) ซึ่งอาจจะมีทั้งความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง (Linear Model) ความสัมพันธ์ในเชิง

Interaction (Interactin model) ความสัมพันธ์กันในเชิง Quadratic (Quadratic Model) และเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปสร้างเป็นภาพสามมิติ หรือที่เรียกว่าสร้างพื้นผิวผลตอบนั้นเอง

$$\text{Linear effect: } Y = a_0 + a_1x_1 + \mu \quad (2.13)$$

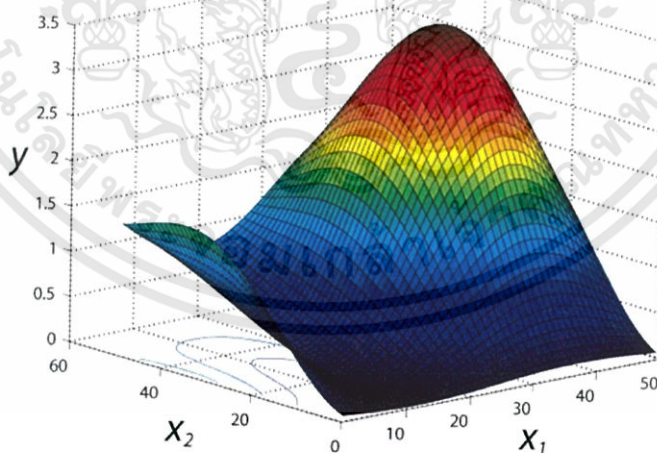
$$\text{Quadratic effect: } Y = a_0 + a_1x_1 + a_{11}x_1^2 + \mu \quad (2.14)$$

$$\text{Interaction effect: } Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + \mu \quad (2.15)$$

สำหรับระบบมีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ต้องใช้โพลีโนเมียลที่มีลำดับสูงขึ้น เช่น ลำดับสองหรือกำลังสองซึ่งมีแบบจำลองดังนี้ (Motgomery, 1991) ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์พจน์ทั่วไปจึงเขียนได้ดังนี้

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} x_i x_j + \mu \quad (2.16)$$

เมื่อ Y คือค่าคาดการณ์ค่า Q , a_i คือค่าคงที่ตัวแปรเชิงเส้น, a_{ii} คือค่าคงที่ Quadratic, a_{ij} คือค่าคงที่ Interaction, x_i และ x_j คือตัวแปรอิสระ



รูปที่ 2.8 ภาพ 3 มิติของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว [21]

2.7.1 Central Composite Design [20]

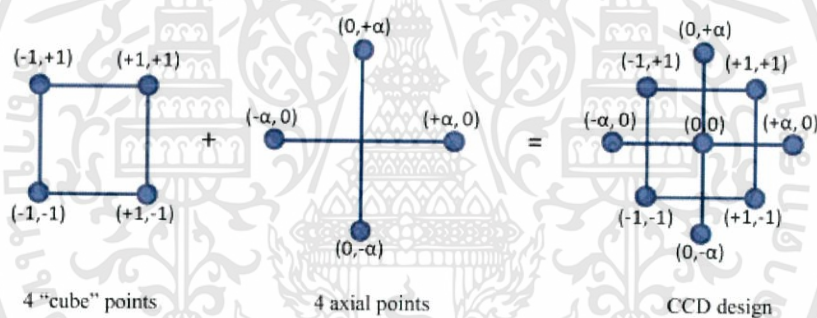
การออกแบบพื้นผิวตอบสนองมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง ซึ่งมีหลายวิธี เช่น วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least square) การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง (First-order model) และการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สอง (Second-order model) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

model) ซึ่งการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลอง Quadratic ของผลตอบสนองโดยมีวิธีการ 2 วิธีการ คือ Central Composite Design และ Box-Behnken Design) แต่ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการ Central Composite Design มาใช้ในสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Central Composite Design (CCD) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวตอบสนองที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย

1. ตำแหน่งการทดลอง ของ 2^n Factorial Design ถ้า n ในที่นี้คือตัวแปรอิสระ 2 ตัว ดังนั้น 2^2 จะมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 4 การทดลองคือ $(-1,-1)$ $(+1,-1)$ $(+1,+1)$ $(-1,+1)$
2. ตำแหน่งการทดลองที่เพิ่มขึ้นมาอีก 4 การทดลองคือตำแหน่งที่เป็น แนว $+ \pm$ หรือ $- \pm$ ในแนวแกน $(+ \pm, 0)$ $(- \pm, 0)$ $(0, + \pm)$ $(0, - \pm)$
3. ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่การทดลองอีก 1 การทดลองคือ Central Point (ตำแหน่ง $0,0$)

เพราะฉะนั้นการทดลองแบบ CCD ในกรณีที่มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว จะมีตำแหน่งทดลองที่ตำแหน่ง $(0,0)$ เพิ่มอีก 4 การทดลองรวมทั้งทั้งหมดเป็น 13 การทดลองสำหรับจำนวนตัวแปรอิสระ 3 ตัว ($n=3$) จะทำให้การออกแบบ 2^n Factorial Design + $(2n+1)$ มี 15 การทดลอง แสดงดังรูปที่ 2.9 ทำให้การทดลองแบบนี้จึงสามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษาได้มากกว่า 2^2 Fractorial Design

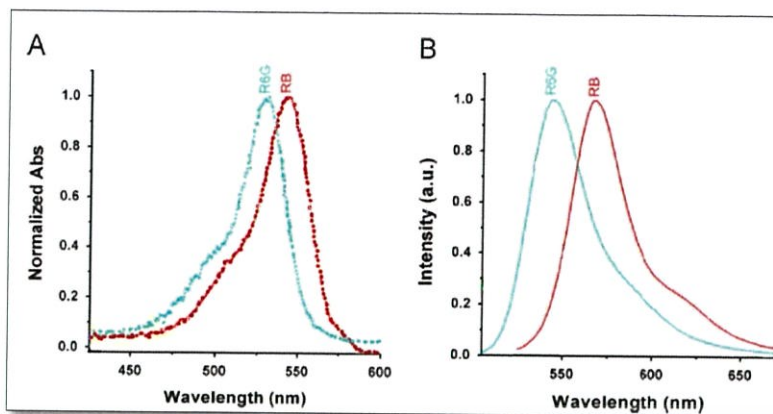


รูปที่ 2.9 Central composite design สำหรับ 2 ตัวแปร

การเก็บรวบรวมข้อมูลและนำข้อมูลมาวิเคราะห์ Regression ที่ดีที่สุดโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ เช่น SAS, SPSS, Statistix และ Design Expert เป็นต้น

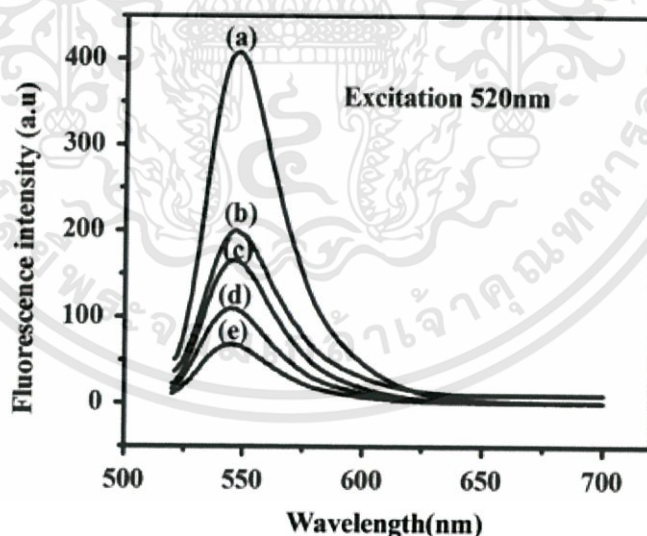
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2013 Xian-Fu Zhang และคณะได้ศึกษาค่า Fluorescence quantum yield ของวัสดุฟลูออเรสเซนต์ Rhodamine 6G และ Rhodamine B ในตัวทำละลายเอทานอล ด้วยเทคนิค Time-correlated single photon counting (TCSPC) จากการทดลองพบว่า Rhodamine 6G มีพิคการดูดกลืน 527 นาโนเมตร พิคการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ 552 นาโนเมตร (แสดงดังรูปที่ 2.10) และค่า fluorescence quantum yield เท่ากับ 0.95 Rhodamine B พิคการดูดกลืน 539 นาโนเมตร พิคการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ 571 นาโนเมตร (แสดงดังรูปที่ 2.10) และค่า fluorescence quantum yield เท่ากับ 0.66 [8]



รูปที่ 2.10 แสดงพีคการดูดกลืนแสงของ Rhodamine 6G (Rh6G) และ Rhodamine B (RhB) (A) และ พีคการเปล่งแสงของ Rhodamine 6G (Rh6G) และ Rhodamine B (RhB) (B)

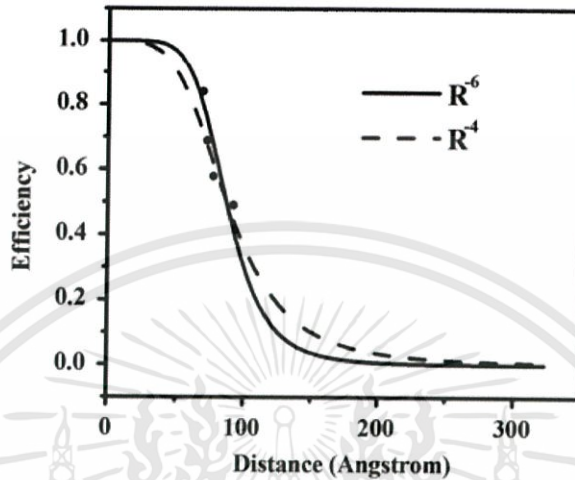
ในปี ค.ศ 2013 N.Shemeena Basheer และคณะ ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาคนาโนเงิน (Ag) และโมเลกุลสีย้อม Rhodamine 6G ซึ่งศึกษาโดยใช้เทคนิค Thermal lene ซึ่งจะเตรียมอนุภาคนาโนเงินด้วยวิธีรีดักชันทางเคมีของสารละลายเงินและผสมกับความเข้มข้นคงที่ของ Rhodamine 6G จากการทดลองพบว่า fluorescence ของ Rhodamine 6G (1×10^{-6} M) จะเกิด quenching ในบริเวณใกล้เคียงกับอนุภาคนาโนเงิน และประสิทธิภาพในการ quenching จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเงิน (2.5×10^{-4} - 10×10^{-4} M) และจะได้สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rhodamine 6G (a), สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Ag ที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-4} M กับ Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} M (b), สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Ag ที่ความเข้มข้น 5×10^{-4} M กับ Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} M (c), สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Ag ที่ความเข้มข้น 10×10^{-4} M กับ Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} M

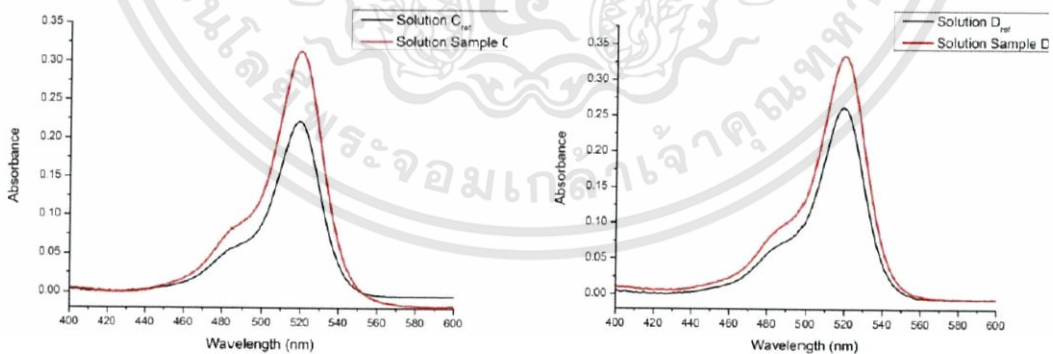
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งระยะห่างโมเลกุลสีย้อม-อนุภาคนาโนจะถูกวัดผลโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนเงิน ทำให้พบว่าจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ในส่วนผสมจาก 92-69 Å (1 Å=10⁻¹⁰m) ประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานจากระยะไกลแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมของโมเลกุลสีย้อม-อนุภาคนาโนขึ้นอยู่กับ R⁻⁴ โดยที่ R คือระยะห่าง สีย้อม-อนุภาคนาโน แสดงดังรูปที่ 2.12 ประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ผสมกับสีย้อม [22]



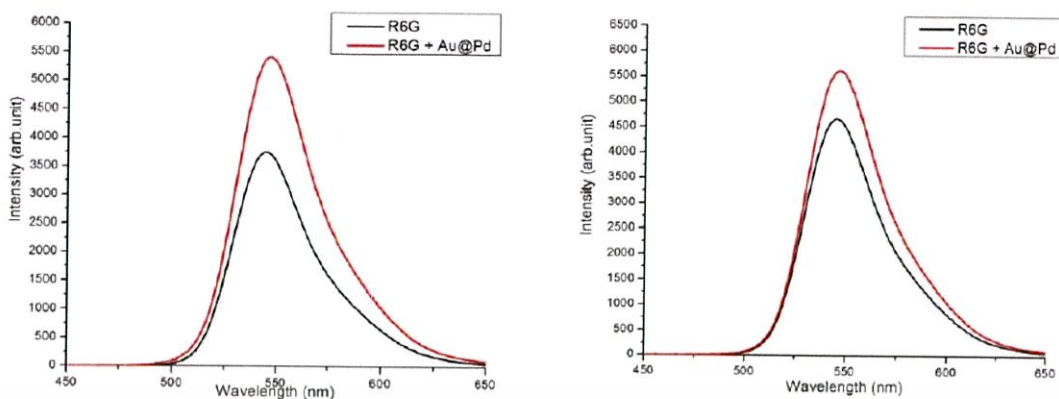
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงประสิทธิภาพการ quenching ของระยะห่างของโมเดลของ R⁴ และ R⁶

ในปีค.ศ.2017 นิชากร บุลพิภพอนันต์ [23] ได้ศึกษาผลการผสมอนุภาคนาโน AuPd กับสารละลาย Rhodamine 6G และพบว่าเมื่อมีการนำอนุภาคนาโน AuPd ผสมกับสารละลาย Rhodamine 6G ในอัตราส่วนความเข้มข้นต่างกันจะส่งผลต่อปริมาณแสงที่ดูดกลืนและปลดปล่อยแสงออกมาจากวัสดุ



รูปที่ 2.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G เทียบกับสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd

จากกราฟจะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับสารอนุภาคนาโน AuPd มีค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่เติมสารอนุภาคนาโน AuPd



รูปที่ 2.14 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G เทียบกับ
สารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd

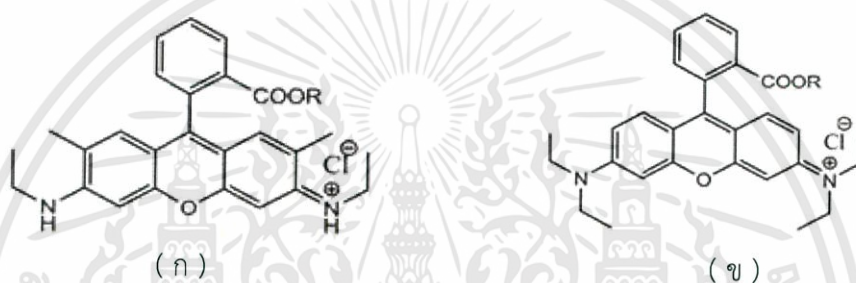
จากกราฟจะพบว่าค่าการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับสารอนุภาคนาโน AuPd มีค่าการเปล่งแสงเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่เติมสารอนุภาคนาโน AuPd การเพิ่มขึ้นของความเข้มแสงนี้น่าจะมีสาเหตุจากการที่วัสดุฟลูออเรสเซนต์ถูกแวดล้อมด้วยอนุภาคโลหะนาโน อาจส่งผลให้เกิดกลไก MEF (Metal enhanced fluorescence) ที่เกิดจากอันตรกิริยาของสาร AuPd กับ Rh6G

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

สารเรืองแสงที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นสารเรืองแสงในกลุ่มของสารอินทรีย์ (Organic dyes) เนื่องจากมีราคาถูกและยังมีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่สูง ผู้วิจัยได้จัดเตรียมสารละลายจากสารเรืองแสง 2 ชนิด ได้แก่ สาร Rhodamine 6G (Rh6G) และสาร Rhodamine B (RhB) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.1 ในการหาค่า fluorescence quantum yields (Q) ผู้วิจัยจะใช้สาร RhB เป็นสารอ้างอิงเพื่อคำนวณหาค่า fluorescence quantum yield ของสาร Rh6G โดยเทคนิค Relative



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของ Rhodamine 6G (ก) และ Rhodamine B (ข)

ตารางที่ 3.1 สมบัติพื้นฐานของสารเรืองแสง Rh6G และ RhB [22-23]

คุณสมบัติ	Rh6G	RhB
สูตรทางเคมี	$C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$	$C_{28}H_{31}Cl N_2O_3$
มวลโมเลกุล (กรัม / โมล)	479.02	479.02
ค่า Q	0.95	0.66
ความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน (นาโนเมตร)	527	539
ความยาวคลื่นที่เกิดการเปล่งแสง (นาโนเมตร)	552	571

ผู้วิจัยได้ศึกษาค่า Q ของสารสีย้อมเรืองแสงผสมกับอนุภาคนาโนโลหะซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาสารเรืองแสง Rh6G ผสมกับ AuPd โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.2 และคุณสมบัติ แสดงดังตารางที่ 3.2

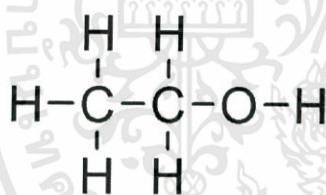


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของ AuPd แบบแท่ง

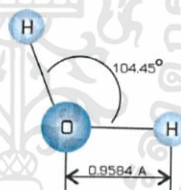
ตารางที่ 3.2 สมบัติพื้นฐานของ AuPd [24]

คุณสมบัติ	AuPd
เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อน (นาโนเมตร)	40 ± 3
ความยาวของท่อน (นาโนเมตร)	96 ± 6
ขนาดของอนุภาคแพลเลเดียม (นาโนเมตร)	3
Mass concentration AuPd ($\mu\text{g/L}$)	250

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการวัดค่า Q ในรูปแบบของสารละลายโดยได้เลือกตัวทำละลายเป็นเอทานอลกับน้ำ DI ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 3.3 และมีคุณสมบัติพื้นฐานดังตารางที่ 3.3



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของเอทานอล (ก) และน้ำ DI (ข)

ตารางที่ 3.3 สมบัติพื้นฐานของเอทานอลกับน้ำ DI [25-26]

คุณสมบัติ	เอทานอล	น้ำ DI
สูตรทางเคมี	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	H_2O
มวลโมเลกุล	46.07 g/cm^3	18.015 g/cm^3
ความหนาแน่น	0.789 g/cm^3	1 g/cm^3
จุดหลอมเหลว	$-114.3 \text{ }^\circ\text{C}$	$0 \text{ }^\circ\text{C}$
จุดเดือด	$78.4 \text{ }^\circ\text{C}$	$100 \text{ }^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 หาค่า Q ของ Rh6G และ RhB

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของสารละลายของ Rh6G และ RhB เพื่อที่จะนำสเปกตรัมที่ได้มาคำนวณหาค่า Q ด้วยเทคนิค Relative ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.2.3 โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลาย RhB ที่มีความเข้มข้น 5×10^{-7} M กับ Rh6G ที่ความเข้มข้นดังตารางที่ 3.4 โดยทำละลายในเอทานอล

2. นำสารละลายที่เตรียมในข้อ 1) มาวัดสเปกตรัมการดูดกลืนและสเปกตรัมการเปล่งแสง โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (UV-Vis spectrometer Avantesavaspec-EDU)

3. คำนวณหาค่า Q จากสมการ 1.2

$$Q = Q_R \frac{I}{I_R} \frac{OD_R}{OD} \frac{n^2}{n_R^2}$$

เมื่อ Q คือ ค่า fluorescence quantum yield ของสารที่ต้องการศึกษา

Q_R คือ ค่า fluorescence quantum yield ของสารอ้างอิง

I คือ พื้นที่ใต้กราฟความเข้มแสงของการเปล่งแสงของสารที่ต้องการศึกษา

I_R คือ พื้นที่ใต้กราฟความเข้มแสงของการเปล่งแสงของสารอ้างอิง

OD คือ การดูดกลืนแสงของสารที่ต้องการศึกษา

OD_R คือ การดูดกลืนแสงของสารอ้างอิง

n คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารที่ต้องการศึกษา

n_R คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารอ้างอิง

ตารางที่ 3.4 ค่าความเข้มข้นต่างๆที่นำมาใช้ในงานวิจัย

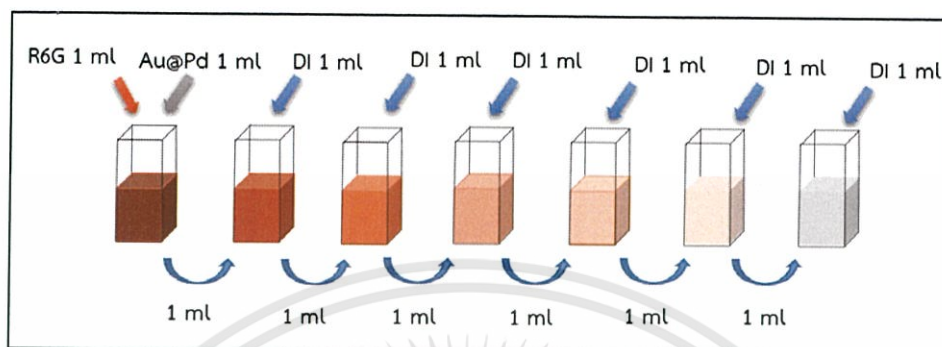
ตัวอย่างที่	Rh6G (M)
1	3.00×10^{-7}
2	4.00×10^{-7}
3	5.00×10^{-7}
4	6.00×10^{-7}
5	7.00×10^{-7}
6	8.00×10^{-7}
7	9.00×10^{-7}
8	10.00×10^{-7}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 หาค่า Q ของ Rh6G และ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd

3.2.2.1 การศึกษาสเปกตรัมของ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd

ผู้วิจัยได้ศึกษาวิธีการเตรียมสารละลาย Rh6G ผสมกับ AuPd จากงานวิจัยของนิซากร [23] และได้ทดลองจัดเตรียมสารละลายตามเงื่อนไขที่รายงานในงานวิจัยดังกล่าว 3.5



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการเจือจางของ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd

จากรูปที่ 3.4 ทำให้ผู้วิจัยมีสารตัวอย่างซึ่งนำมาคำนวณค่าความเข้มข้นของ Rh6G และ AuPd ที่ผสมกันมีความเข้มข้นดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าความเข้มข้นของ Rh6G และ AuPd ที่ผสมกัน

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น Rh6G ผสม AuPd (M)	
	Rh6G (M)	Rh6G	AuPd
1	6.00×10^{-6}	3.00×10^{-6}	2.34×10^{-4}
2	3.00×10^{-6}	1.50×10^{-6}	1.17×10^{-4}
3	1.50×10^{-6}	7.50×10^{-7}	5.87×10^{-5}
4	7.50×10^{-7}	3.75×10^{-7}	2.93×10^{-5}
5	3.75×10^{-7}	1.87×10^{-7}	1.46×10^{-5}
6	1.87×10^{-7}	9.37×10^{-8}	7.34×10^{-6}
7	9.37×10^{-8}	4.68×10^{-8}	3.67×10^{-6}

3.2.2.2 การออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3

ผู้วิจัยได้นำความเข้มข้นย่านที่ทดลองเพื่อศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนและการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์จากข้อ 3.2.2.1 มาหาเงื่อนไขความเข้มข้นของ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd มาใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าความเข้มข้นของ Rh6G และ AuPd ที่ผสมกันที่ได้จากโปรแกรม Design Expert 9.0.3

Run order	ความเข้มข้น Rh6G	ความเข้มข้น Rh6G ผสม AuPd (M)	
		Rh6G	AuPd
1	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	1.36×10^{-4}
2	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.06×10^{-6}
3	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.17×10^{-5}
4	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.17×10^{-5}
5	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.17×10^{-5}
6	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.17×10^{-5}
7	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.17×10^{-5}
8	1.50×10^{-6}	1.50×10^{-6}	1.17×10^{-4}
9	1.50×10^{-6}	1.50×10^{-6}	2.60×10^{-5}
10	1.69×10^{-6}	1.69×10^{-6}	7.17×10^{-5}
11	3.53×10^{-7}	3.53×10^{-7}	7.17×10^{-5}
12	5.50×10^{-7}	5.50×10^{-7}	1.17×10^{-4}
13	5.50×10^{-7}	5.50×10^{-7}	2.60×10^{-5}

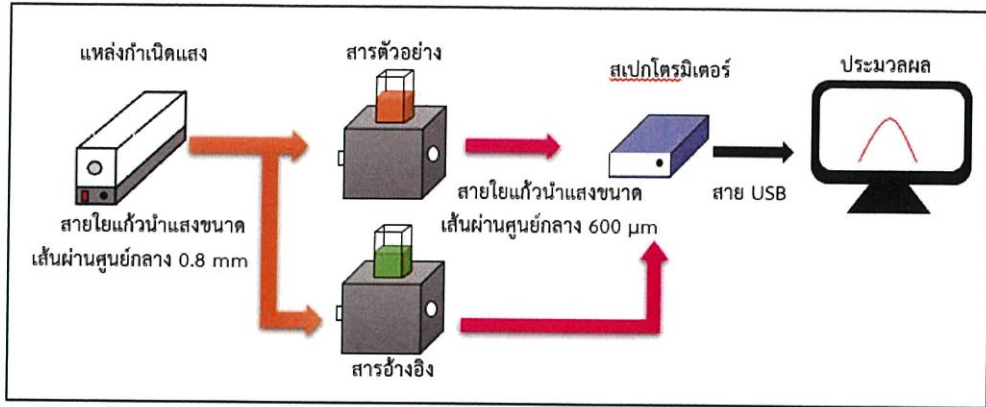
3.3 เทคนิคการวัด

สมบัติทางแสงของสารละลายสารเรืองแสงที่ได้ทำการศึกษาคือสมบัติการดูดกลืนและการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์

3.3.1 ระบบวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลายสารเรืองแสง

เพื่อที่จะศึกษาการดูดกลืนของสารละลายสารเรืองแสงเตรียมการทดลองดังแผนภาพรูปที่ 3.5 ซึ่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะเดินทางผ่านสายใยแก้วนำแสงตกกระทบกับสารตัวอย่างและแสงสามารถส่องผ่านออกมาเข้าสู่สายใยแก้วนำแสงอีกเส้นหนึ่งเพื่อนำแสงไปยังเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ แสงที่เข้าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์จะถูกวิเคราะห์ส่งเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ถูกเชื่อมต่อกับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ผ่านสาย USB แล้วทำการวิเคราะห์ค่าการดูดแสงด้วยโปรแกรม Avasoft 7.4 โดยสมการ

$$A = -\log \frac{I}{I_0} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.5 แผนภาพระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลาย

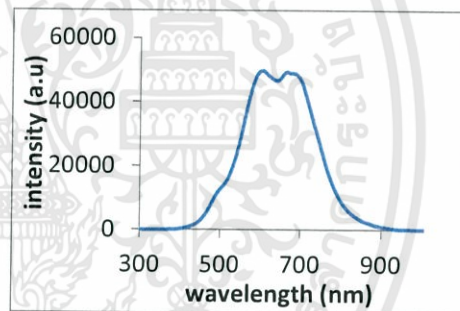
ซึ่งอุปกรณ์การวัดประกอบด้วยดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือแหล่งกำเนิดแสงทังสเตน (Schott Mega light 100) ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 0.19 แอมแปร์ ซึ่งสเปกตรัมแสงที่ได้จากการวัดดังรูปที่ 3.6 ให้แสงในย่านความยาวคลื่น 400-900 นาโนเมตร



(ก)



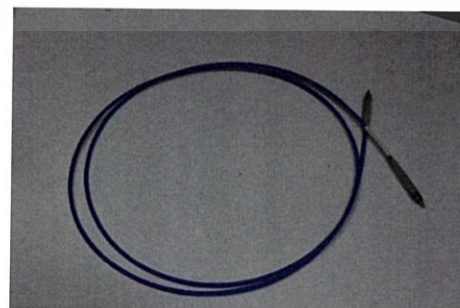
(ข)

รูปที่ 3.6 เครื่องกำเนิดแสงทังสเตน (ก) และสเปกตรัมแสงของทังสเตน (ข)

2. สายใยแก้วนำแสงที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ขนาดได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm ใช้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงมายังสารตัวอย่างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตรใช้ส่งแสงจากสารตัวอย่างในคิวเวทมายังเครื่องสเปกโตรมิเตอร์มีลักษณะดังรูปที่ 3.7



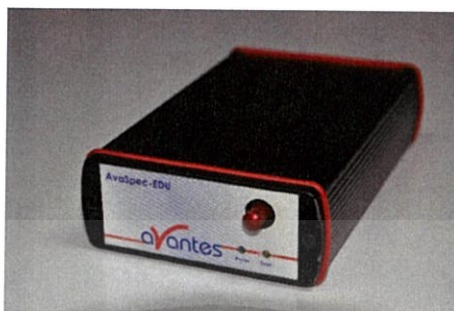
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 สายใยแก้วนำแสง (ก) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm (ข) เส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (UV-Vis spectrometer Avantesavspec-EDU) ดังรูป 3.8 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ทำหน้าที่ในการวัดแสง ซึ่งสามารถวัดแสงได้ในย่านความยาวคลื่น 200 – 1100 นาโนเมตร



รูปที่ 3.8 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

4. อุปกรณ์ยึดจับควิเวทและต่อสายใยแก้วนำแสงโดยมีลักษณะดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ยึดจับควิเวทและต่อสายใยแก้วนำแสง

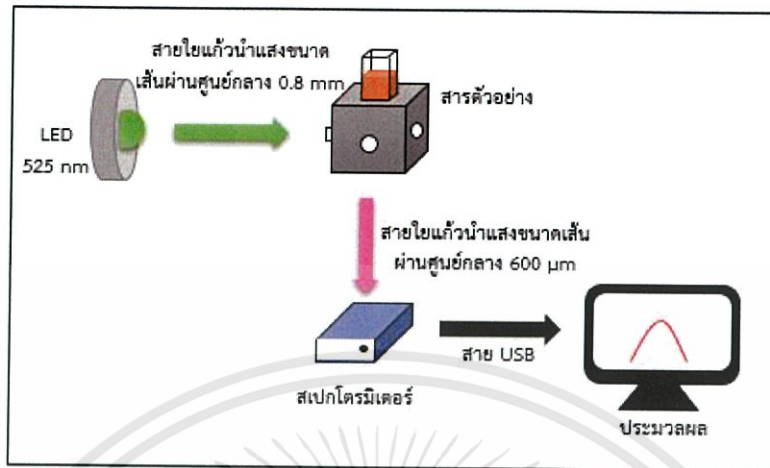
5. ควิเวทสำหรับบรรจุสารละลายทำมาจากวัสดุที่เป็นพลาสติกมีขนาด 1 ซม.x1 ซม. และสูง 4.5 ซม. ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ควิเวทบรรจุสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ระบบวัดสมบัติการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารละลายสารเรืองแสง ในการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ผู้วิจัยได้จัดระบบการวัดดังรูปที่ 3.11

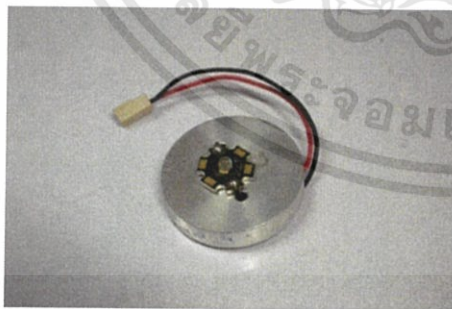


รูปที่ 3.11 ระบบการวัดสมบัติการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารละลาย

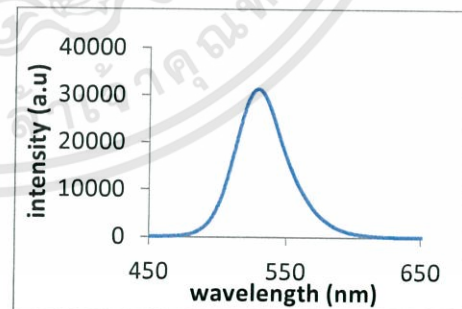
ส่วนประกอบของระบบวัดมีดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode: LED) เป็นตัวกระตุ้นสารเรืองแสงและไดโอดเปล่งแสงนั้นจะถูกยึดติดไว้กับอุปกรณ์ระบายความร้อนดังรูปที่ 3.12 ใช้กำลังไฟฟ้า 1.4 วัตต์ โดยให้ความเข้มแสงสูงที่สุดที่ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร (แสงสีเขียว)

2. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์
3. สายใยแก้วนำแสง
4. แท่นบรรจุคิวเวท
5. คิวเวท



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.12 ไดโอดเปล่งแสง (ก) และสเปกตรัมที่ได้จาก LED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์หาค่า Q

ในการวิเคราะห์หาค่า Q ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกเทคนิค Relative ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2.3 โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค่า Q ของสาร Rh6G โดยใช้สาร RhB เป็นสารอ้างอิงและศึกษาค่า Q ของสารผสม Rh6G ที่ผสมกับ AuPd โดยใช้ Rh6G เป็นตัวอ้างอิงซึ่งเงื่อนไขในการศึกษาค่า Q ของสาร Rh6G และสาร Rh6G ที่ผสม AuPd โดยมีค่าความเข้มข้นดังตารางที่ 3.3 และ 3.5 ตามลำดับและคำนวณหาค่า Q จากสมการที่ 1.2

$$Q = Q_R \frac{I}{I_R} \frac{OD_R}{OD} \frac{n^2}{n_R^2}$$

- เมื่อ Q คือ ค่า fluorescence quantum yield ของสารที่ต้องการศึกษา
 Q_R คือ ค่า fluorescence quantum yield ของสารอ้างอิง
 I คือ พื้นที่ใต้กราฟความเข้มแสงของการเปล่งแสงของสารที่ต้องการศึกษา
 I_R คือ พื้นที่ใต้กราฟความเข้มแสงของการเปล่งแสงของสารอ้างอิง
 OD คือ การดูดกลืนแสงของสารที่ต้องการศึกษา
 OD_R คือ การดูดกลืนแสงของสารอ้างอิง
 n คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารที่ต้องการศึกษา
 n_R คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารอ้างอิง

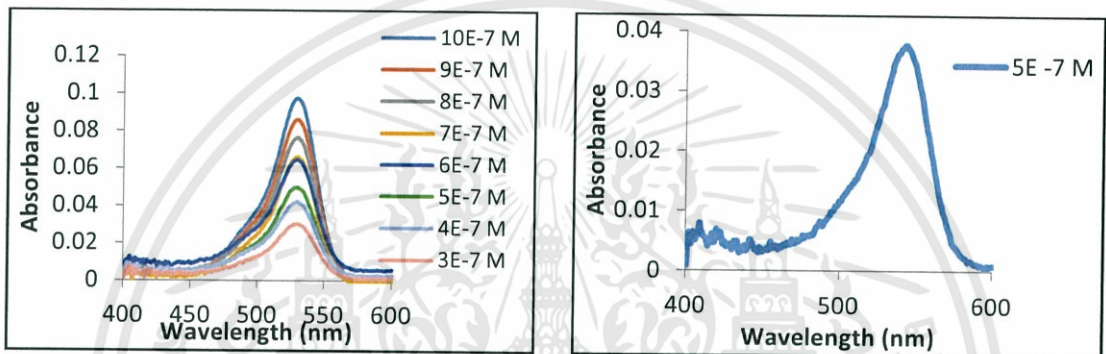
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการหาค่า fluorescence quantum yield ของ Rhodamine 6G

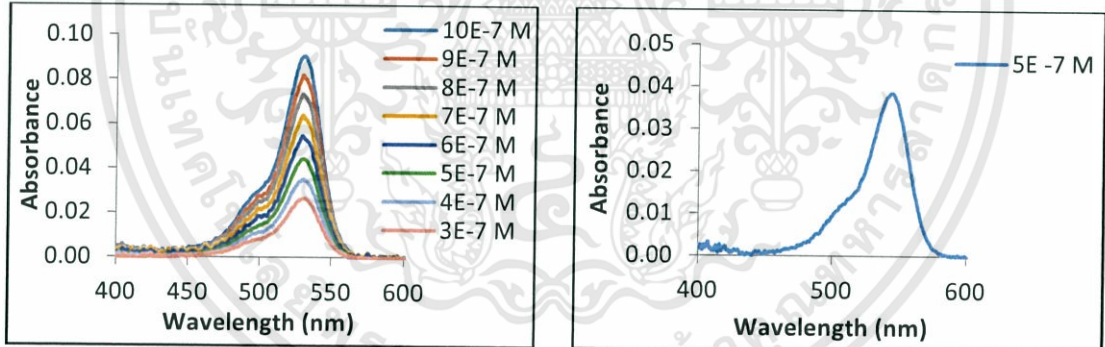
จากการเตรียมสารไว้ในหัวข้อที่ 3.2 (ตารางที่ 3.4) ผลการวัดค่า fluorescence quantum yield ของสารสีย้อม Rhodamine 6G (Rh6G) ด้วยเทคนิค Relative โดยใช้ Rhodamine B ที่ความเข้มข้น 5×10^{-7} M เป็นสารอ้างอิง ซึ่งจะวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (แสดงดังรูปที่ 4.1) และสเปกตรัมการเปล่งแสง (แสดงดังรูปที่ 4.3) โดยระบบการวัดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3

(1) ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Rhodamine 6G และ Rhodamine B (สารอ้างอิง)



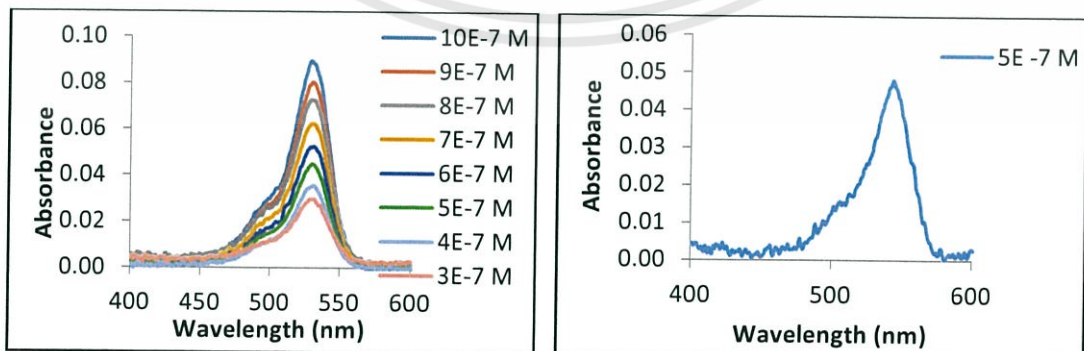
ครั้งที่ 1 (ก)

ครั้งที่ 1 (ข)



ครั้งที่ 2 (ก)

ครั้งที่ 2 (ข)



ครั้งที่ 3 (ก)

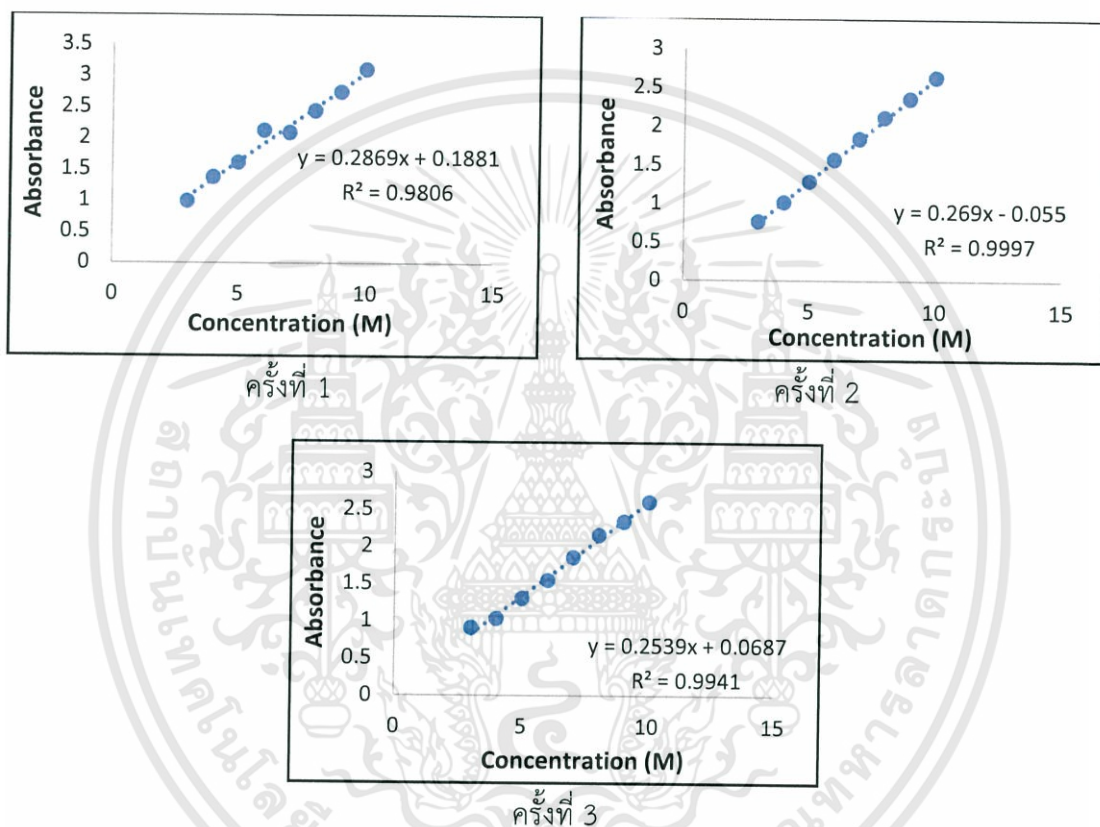
ครั้งที่ 3 (ข)

รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Rhodamine 6G (ก) และ Rhodamine B (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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) ที่กล่าวไว้ว่าค่าการดูดกลืนจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของตัวอย่าง

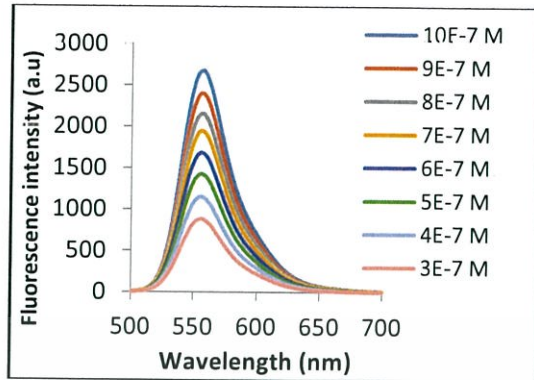
เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงของ Rh6G มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับความเข้มข้นจะแสดงดังรูปที่ 4.2



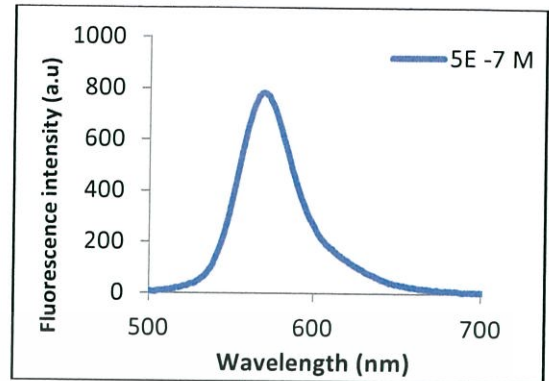
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลาย Rhodamine 6G

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกับการดูดกลืนแสงของ Rh6G จะเห็นว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟของการทดลอง โดยค่า R^2 ของครั้งที่ 1 เท่ากับ 0.9883 ครั้งที่ 2 เท่ากับ 0.9994 และครั้งที่ 3 เท่ากับ 0.9973 ซึ่งสอดคล้องกับกฎของเบียร์-แลมเบิร์ตที่กล่าวไว้ว่าค่าการดูดกลืนจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย ดังนั้นเมื่อเราพล็อตกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนกับความเข้มข้น เมื่อระยะทางที่แสงส่องผ่านคงที่จะได้กราฟเป็นเชิงเส้น

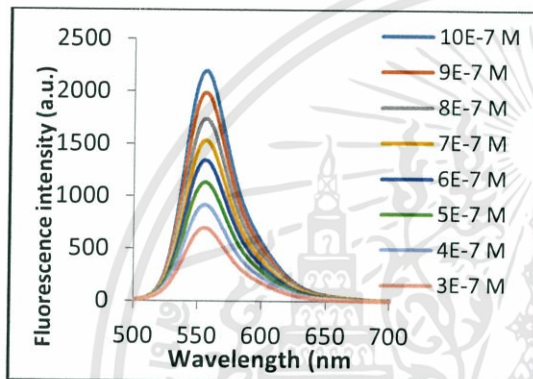
(2) ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของ Rhodamine 6G



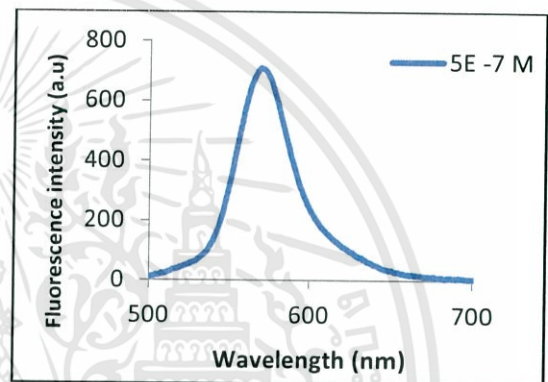
ครั้งที่ 1 (ก)



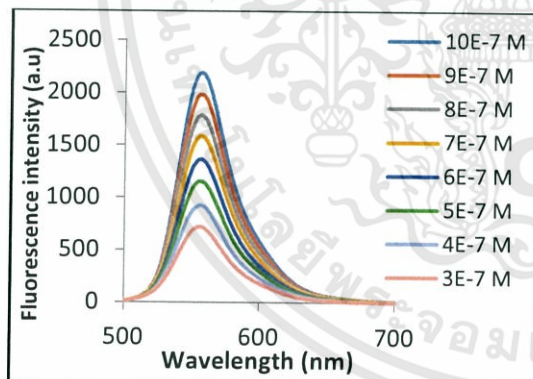
ครั้งที่ 1 (ข)



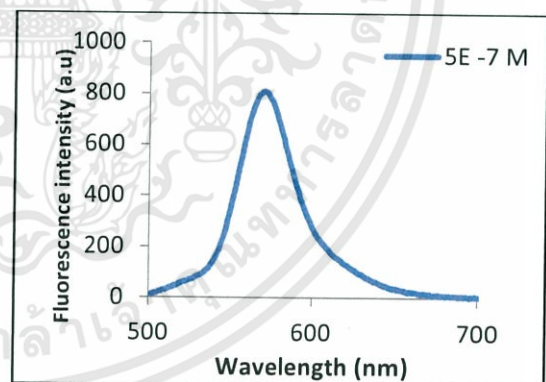
ครั้งที่ 2 (ก)



ครั้งที่ 2 (ข)



ครั้งที่ 3 (ก)



ครั้งที่ 3 (ข)

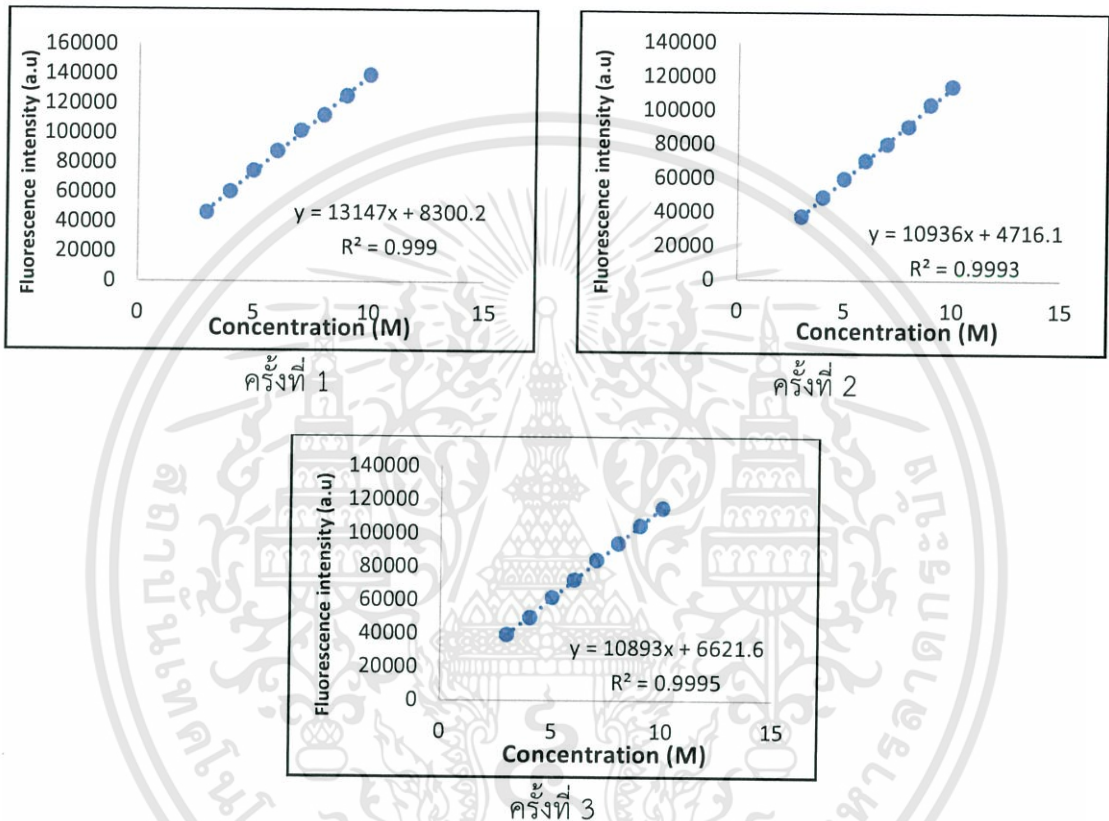
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ Rhodamine 6G (ก) และ Rhodamine B (ข)

จากผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ที่มีค่าความเข้มข้น 3×10^{-7} M ถึง 10×10^{-7} M พบว่า Rh6G มีค่าการเปล่งแสงในช่วง 700 – 2500 a.u. และมีการเปล่งแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 500 - 700 นาโนเมตร โดยมีพีคของการเปล่งแสงสูงสุดเท่ากับ 557 นาโนเมตร จากผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสง รูปที่ 4.3 พบว่าการเปล่งแสงแปรผันตรงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายเนื่องจากเกิดกระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่ปลดปล่อยโฟตอนน้อยลงจึงส่งผลให้การเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์มากขึ้นและการเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมมาทดลอง ผู้วิจัยเลือกในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นต่ำๆคือช่วง 3×10^{-7} M ถึง 10×10^{-7} M เนื่องจากที่ช่วงความเข้มข้นต่ำๆจะเกิดการดูดกลืนซ้ำน้อยทำให้พีคของสเปกตรัมเกิดการ Phase shife น้อย ถ้าความเข้มข้นของสารละลายสูงๆจะเกิดปรากฏการณ์ Quenching ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ลดลงของค่าการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ เกิดขึ้นเมื่อความยาวคลื่นแสงฟลูออเรสเซนซ์มีการซ้อนทับกับแถบการดูดกลืนของสารเอง ทำให้โฟตอนหรือแสงที่เกิดขึ้นถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารเอง [10]

เมื่อนำค่าการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับความเข้มข้นจะแสดงดังรูปที่ 4.10 - 4.12



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปล่งแสงและความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับการเปล่งแสงของ Rh6G จะเห็นว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟของการทดลอง โดยค่า R^2 ของครั้งที่ 1 เท่ากับ 0.9990 ครั้งที่ 2 เท่ากับ 0.9993 และครั้งที่ 3 เท่ากับ 0.9995

จากผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสงแล้วคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของการเปล่งแสงและค่าการดูดกลืนแสง สามารถคำนวณหาค่า fluorescence quantum yield ของสารละลาย Rh6G จากสมการที่ 1.2 จะได้ค่า Q ดังตาราง 4.1 - 4.3

ตารางที่ 4.1 แสดงผลค่า fluorescence quantum yield ของสารละลาย Rhodamine 6G ครั้งที่ 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_R ค่าค่าที่ Integrated การดูดกลืนในช่วง 510-552 nm เท่ากับ 1.22 และ Integrated fluorescence สารอ้างอิงเท่ากับ 39,137.99

ตารางที่ 4.2 แสดงผลค่า fluorescence quantum yield ของสารละลาย Rhodamine 6G ครั้งที่ 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_R ค่าค่าที่ Integrated การดูดกลืนในช่วง 510-552 nm เท่ากับ 1.14 และ Integrated fluorescence สารอ้างอิงเท่ากับ 36,410.96

ตารางที่ 4.3 แสดงผลค่า fluorescence quantum yield ของสารละลาย Rhodamine 6G ครั้งที่ 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_R ค่าค่าที่ Integrated การดูดกลืนในช่วง 510-552 nm เท่ากับ 1.37 และ Integrated fluorescence สารอ้างอิงเท่ากับ 41,599.78

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่า fluorescence quantum yield

ความเข้มข้น (M)	Q		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
10×10^{-7}	0.93	0.90	0.96
9×10^{-7}	0.94	0.92	0.97
8×10^{-7}	0.94	0.89	0.94
7×10^{-7}	1.00	0.91	0.98
6×10^{-7}	0.85	0.93	1.01
5×10^{-7}	0.96	0.97	1.03
4×10^{-7}	0.91	1.00	1.04
3×10^{-7}	0.97	1.02	0.93
เฉลี่ย	0.94	0.94	0.98

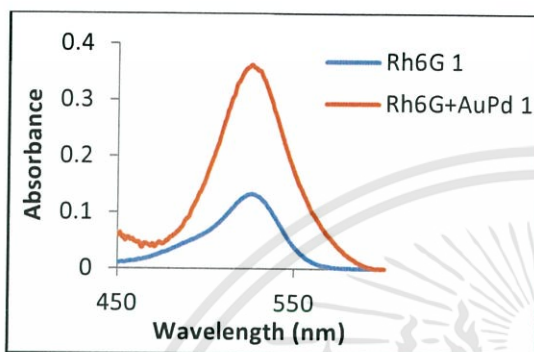
จากการทดลองวัดและคำนวณหาค่า fluorescence quantum yield ของ Rh6G ด้วยเทคนิค Relative มีค่าความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี (คือ 0.95 ได้กล่าวไว้บทที่ 3 ตารางที่ 3.1) ไป 0.59 % ผลการวิเคราะห์ทำให้ผู้ทดลองยอมรับว่า เทคนิค Relative สามารถใช้เพื่อหาค่า Fluorescence quantum yield ได้และได้ผลการทดลองใกล้เคียงกับค่าทฤษฎี

4.2 ผลการหาค่า fluorescence quantum yield ของ Rhodamine 6G และ Rhodamine 6G ที่ผสมกับ AuPd

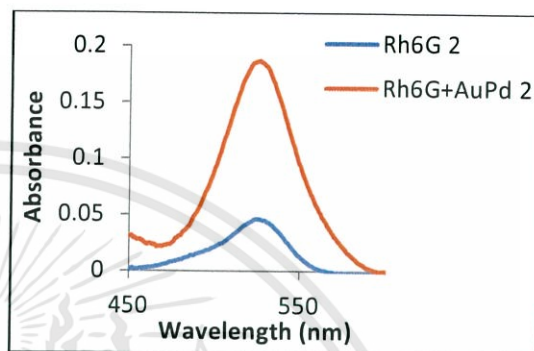
4.2.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมของ Rh6G ที่ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd

จากการนำสารละลาย Rh6G และสารละลาย Rh6G ผสมกับ AuPd ซึ่งเตรียมในหัวข้อ 3.2 (ตารางที่ 3.5) ได้ผลการวัดดังรูปที่ 4.5

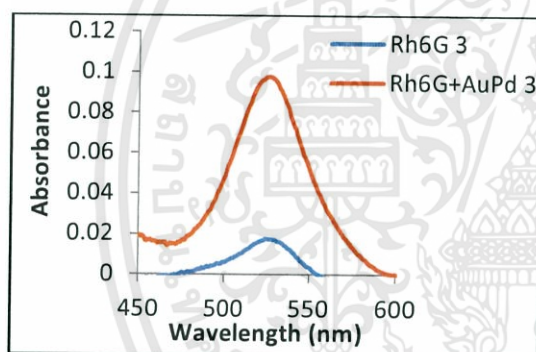
(1) ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Rh6G และ Rh6G ที่ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd



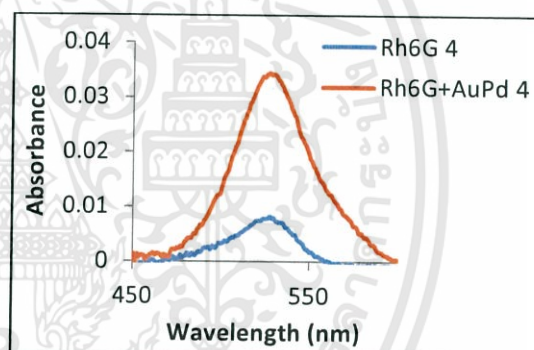
ตัวอย่างที่ 1



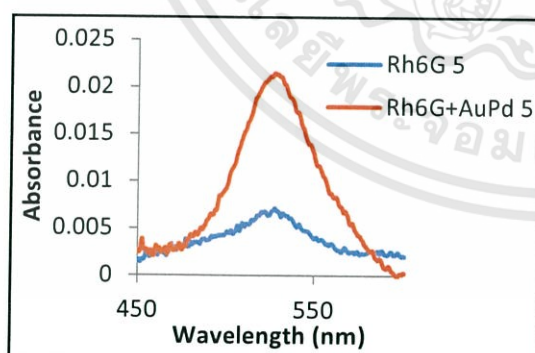
ตัวอย่างที่ 2



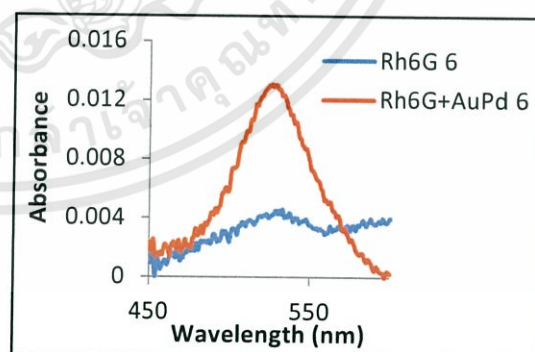
ตัวอย่างที่ 3



ตัวอย่างที่ 4



ตัวอย่างที่ 5



ตัวอย่างที่ 6

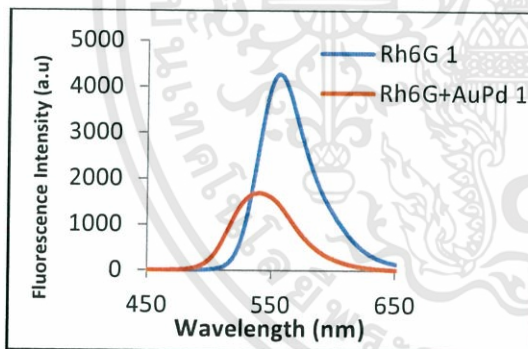
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Rhodamine 6G และ Rhodamine 6G ที่ผสมกับ AuPd

หมายเหตุ ค่าความเข้มข้นของ Rh6G และ AuPd ที่ผสมกัน

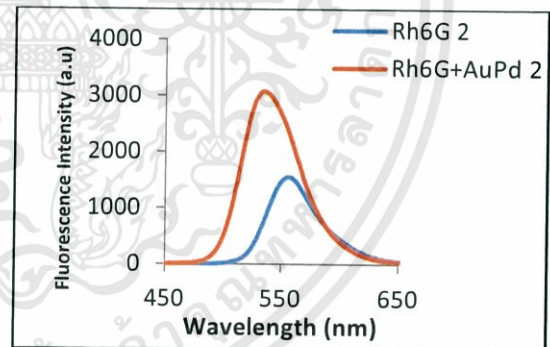
ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (M)	
	Rh6G	AuPd
1	3.00×10^{-6}	2.34×10^{-4}
2	1.50×10^{-6}	1.17×10^{-4}
3	7.50×10^{-7}	5.87×10^{-5}
4	3.75×10^{-7}	2.93×10^{-5}
5	1.87×10^{-7}	1.46×10^{-5}
6	9.37×10^{-8}	7.34×10^{-6}
7	4.68×10^{-8}	3.67×10^{-6}

จากรูปที่ 4.5 ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของ Rh6G ที่มีค่าความเข้มข้น 1.87×10^{-7} M ถึง 6×10^{-6} M พบว่าการดูดกลืนแสงในช่วง 0.01 - 0.014 โดยมีการดูดกลืนอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 450 - 600 นาโนเมตร มีพีคสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 526 นาโนเมตร และผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd ที่มีความเข้มข้นดังตารางที่ 3.5 พบว่าดูดกลืนแสงในช่วง 0.013 - 0.3622 โดยมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 450 - 600 นาโนเมตร และมีพีคที่ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร

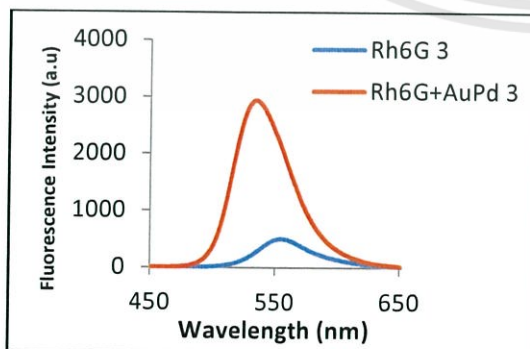
(2) ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของ Rh6G และ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd



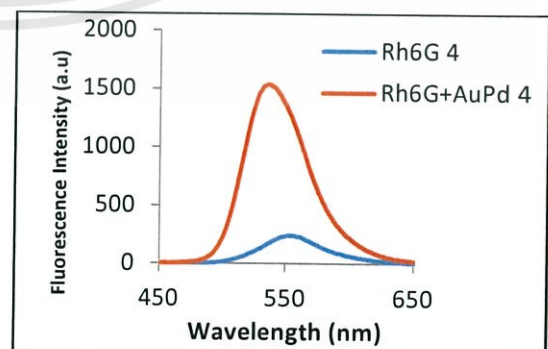
ตัวอย่างที่ 1



ตัวอย่างที่ 2

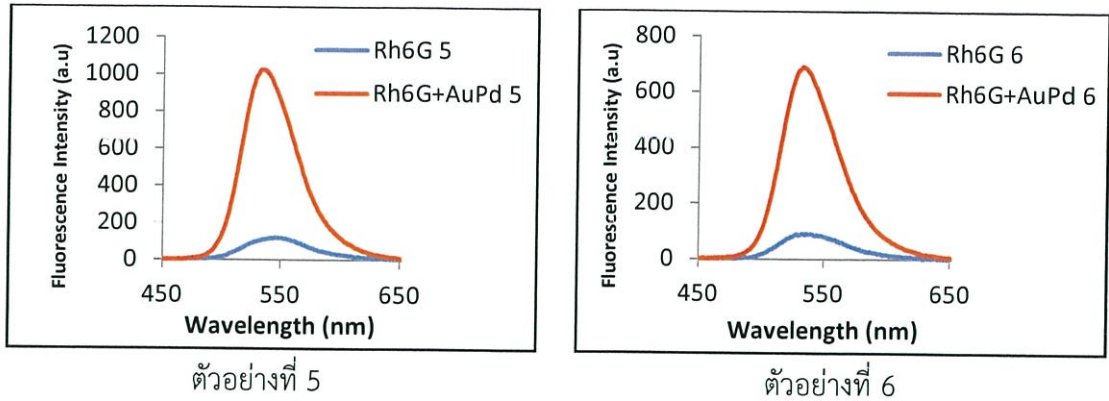


ตัวอย่างที่ 3



ตัวอย่างที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rhodamine 6G เทียบกับสารละลาย Rhodamine 6G ที่ผสมกับ AuPd

จากรูปที่ 4.6 ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของ Rh6G ที่ย่านความเข้มข้น 1.875×10^{-7} M ถึง 6×10^{-6} M พบว่าการเปล่งแสงในช่วง 90 - 4,300 a.u. มีการเปล่งแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 500 - 700 นาโนเมตร มีพีคสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 556 นาโนเมตร และผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd ที่มีความเข้มข้นดังตารางที่ 3.5 พบว่าปลดปล่อยแสงในช่วง 680 - 3,100 a.u. มีการเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่น 500 - 700 นาโนเมตร มีพีคสูงสุดที่ความยาวคลื่น 534 นาโนเมตร

จากผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของทั้ง Rh6G และ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd พบว่าเมื่อนำ AuPd ไปผสมกับสารละลาย Rh6G ส่งผลให้มีการเปล่งแสงเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นตัวอย่างที่ 2 ถึงตัวอย่างที่ 6 โดยตัวอย่างที่ 2 เพิ่มขึ้นจากเดิม 98.03 % ตัวอย่างที่ 3 เพิ่มขึ้นจากเดิม 493.33 % ตัวอย่างที่ 4 เพิ่มขึ้นจากเดิม 637.17 % ตัวอย่างที่ 5 เพิ่มขึ้นจากเดิม 858.95 % ตัวอย่าง 6 เพิ่มขึ้นจากเดิม 747.06 % ดังนั้นผู้ทดลองจึงนำช่วงความเข้มข้นตัวอย่างที่ 2 - 6 ไปกำหนดแพคเตอร์ในโปรแกรม RSM

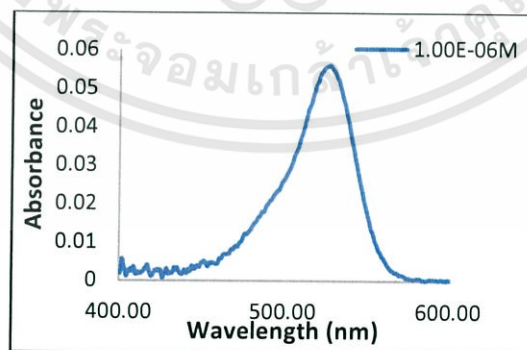
4.2.2 ผลการศึกษาค่า fluorescence quantum yield ออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3

จากผลการศึกษาสเปกตรัมของ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd ผู้วิจัยได้เงื่อนไขการทดลองซึ่งออกแบบโดยโปรแกรม Design Expert 9.0.3 จะได้เงื่อนไขความเข้มข้นดังตารางที่ 4.5 โดยใช้ Rh6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} M เป็นสารอ้างอิง

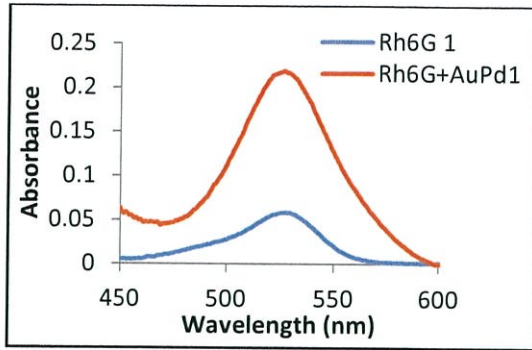
ตารางที่ 4.5 ค่าความเข้มข้นของ Rh6G และ AuPd ที่ผสมกันที่ได้จากโปรแกรม Design Expert

Run order	ความเข้มข้น Rh6G (M)	ความเข้มข้น Rh6G ผสม AuPd (M)	
		Rh6G	AuPd
1	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	1.36×10^{-4}
2	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.06×10^{-6}
3	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.17×10^{-5}
4	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.17×10^{-5}
5	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.17×10^{-5}
6	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.17×10^{-5}
7	1.02×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.17×10^{-5}
8	1.50×10^{-6}	1.50×10^{-6}	1.17×10^{-4}
9	1.50×10^{-6}	1.50×10^{-6}	2.60×10^{-5}
10	1.69×10^{-6}	1.69×10^{-6}	7.17×10^{-5}
11	3.53×10^{-7}	3.53×10^{-7}	7.17×10^{-5}
12	5.50×10^{-7}	5.50×10^{-7}	1.17×10^{-4}
13	5.50×10^{-7}	5.50×10^{-7}	2.60×10^{-5}

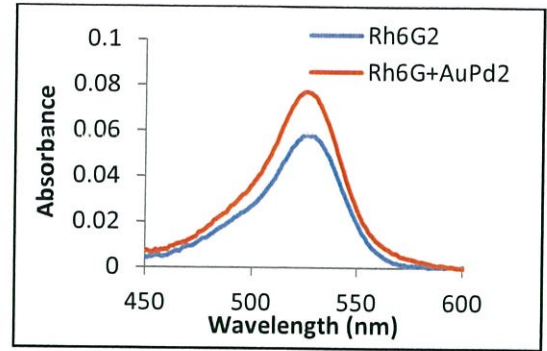
(1) ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Rh6G และ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd



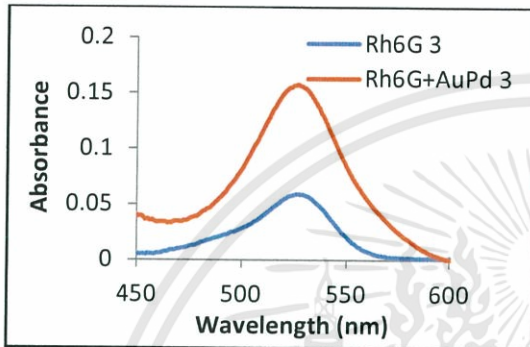
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} M (สารอ้างอิง)



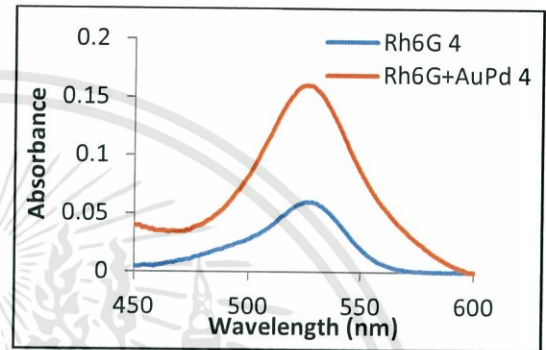
ตัวอย่างที่ 1



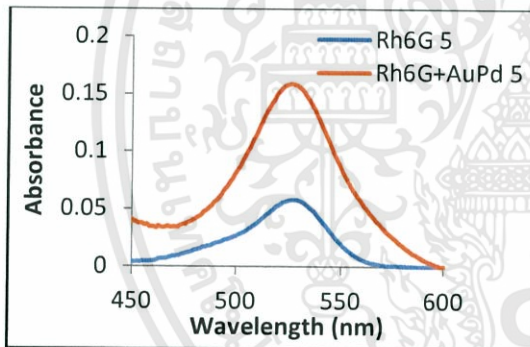
ตัวอย่างที่ 2



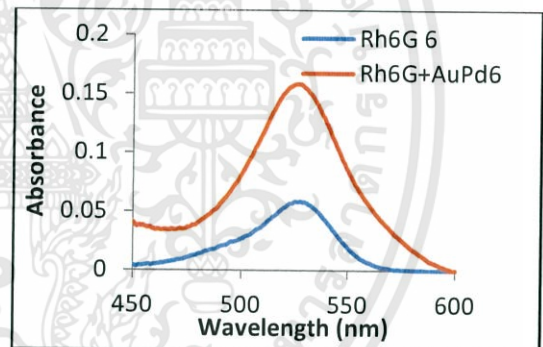
ตัวอย่างที่ 3



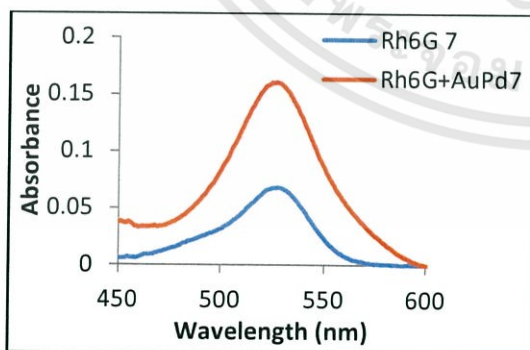
ตัวอย่างที่ 4



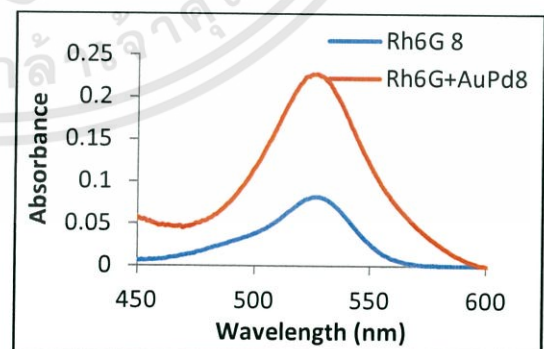
ตัวอย่างที่ 5



ตัวอย่างที่ 6

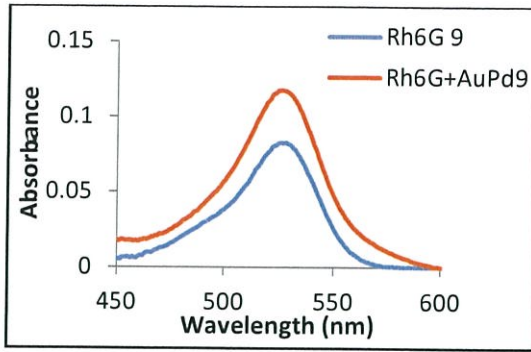


ตัวอย่างที่ 7

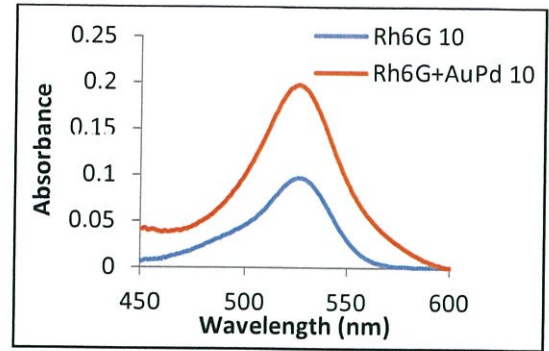


ตัวอย่างที่ 8

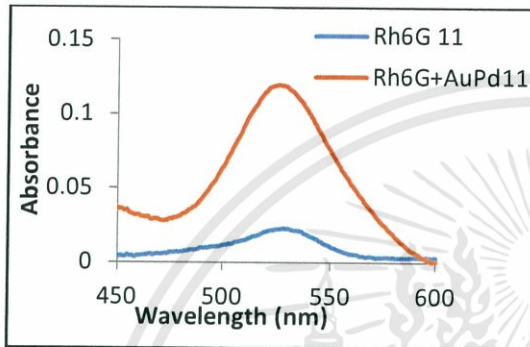
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



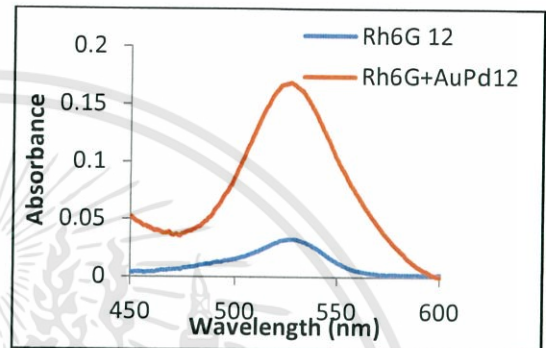
ตัวอย่างที่ 9



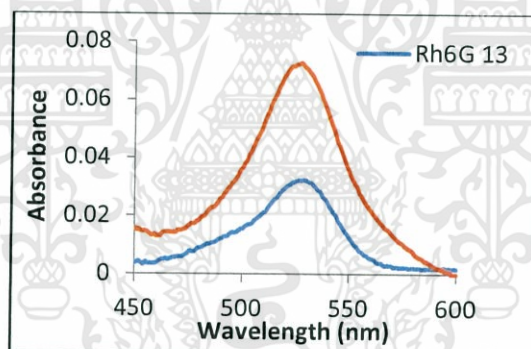
ตัวอย่างที่ 10



ตัวอย่างที่ 11



ตัวอย่างที่ 12

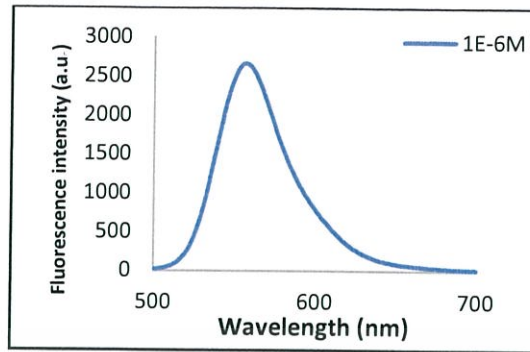


ตัวอย่างที่ 13

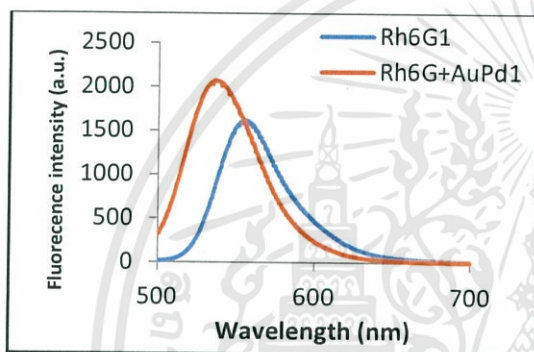
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Rhodamine 6G และ Rhodamine 6G ผสม AuPd

จากรูปที่ 4.8 จะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd มีค่าการดูดกลืนสูงกว่าเมื่อเทียบกับสารละลาย Rh6G โดยมีการดูดกลืนแสงในช่วงประมาณ 0.01 - 0.25 ดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น 450 - 600 นาโนเมตร และมีการดูดกลืนสูงสุดอยู่ที่ตัวอย่างที่ 10 ค่าการดูดกลืนเท่ากับ 0.2239 ที่ความยาวคลื่น 521 นาโนเมตร มีความเข้มข้นของ Rh6G เท่ากับ 1.5×10^{-6} M และ AuPd เท่ากับ 1.17×10^{-4} M และมีการดูดกลืนที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ตัวอย่างที่ 13 ค่าการดูดกลืนเท่ากับ 0.0748 ที่ความยาวคลื่น 522 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นของ Rh6G เท่ากับ 1.02×10^{-6} M และ AuPd เท่ากับ 7.06×10^{-6} M

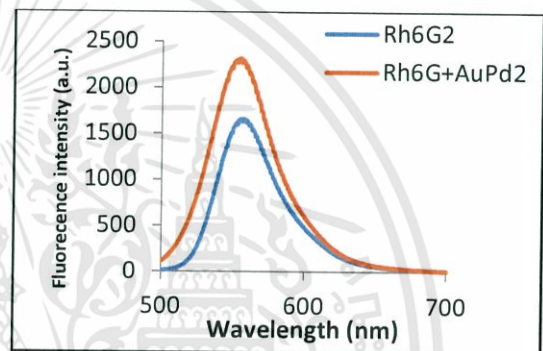
2) ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของ Rh6G และ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd



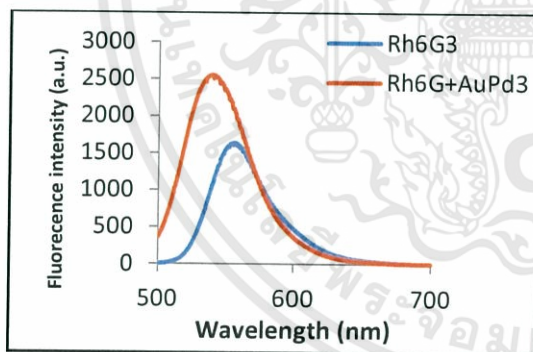
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ Rhodamine 6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} M (सारอ้างอิง)



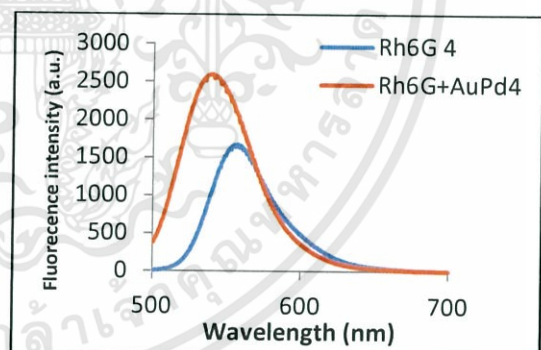
ตัวอย่างที่ 1



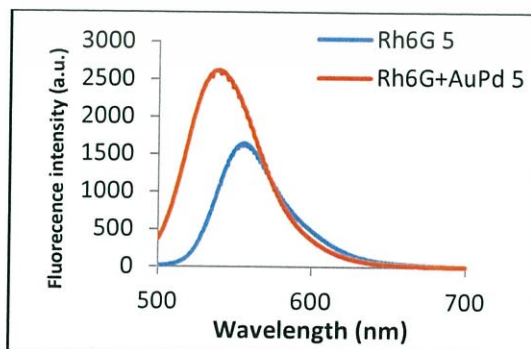
ตัวอย่างที่ 2



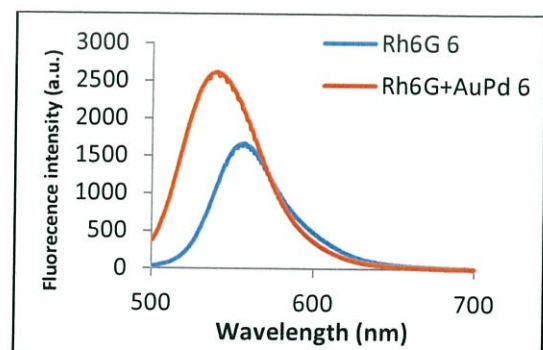
ตัวอย่างที่ 3



ตัวอย่างที่ 4

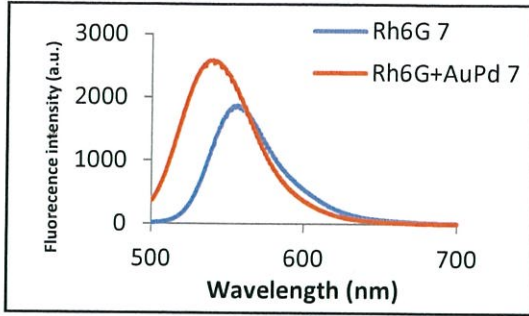


ตัวอย่างที่ 5

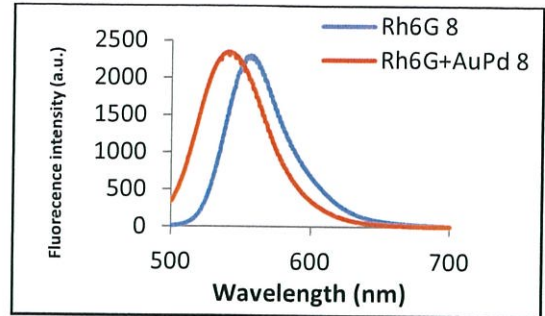


ตัวอย่างที่ 6

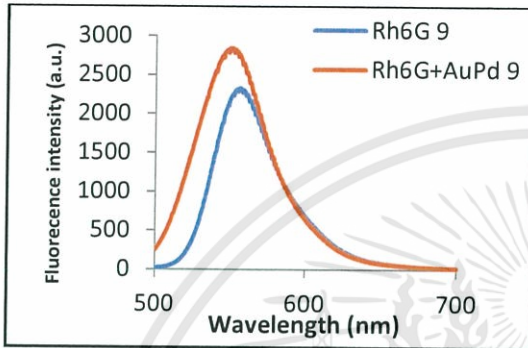
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



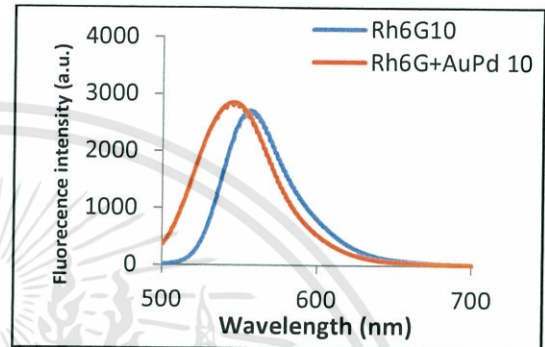
ตัวอย่างที่ 7



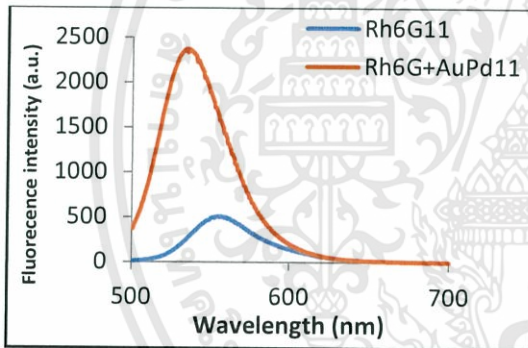
ตัวอย่างที่ 8



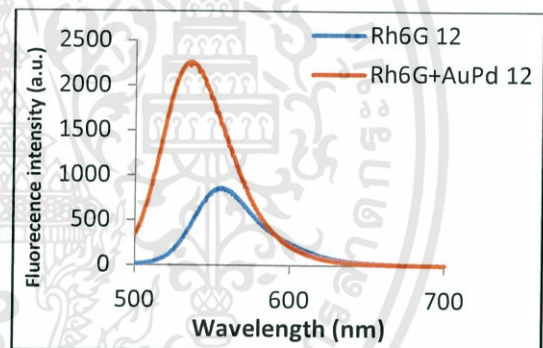
ตัวอย่างที่ 9



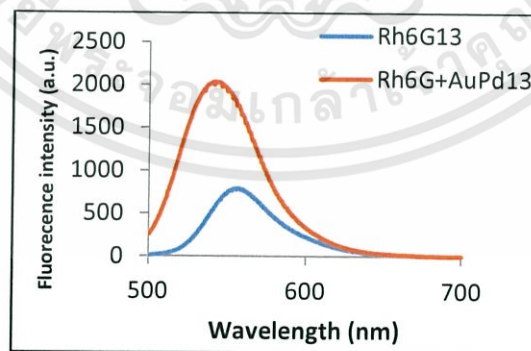
ตัวอย่างที่ 10



ตัวอย่างที่ 11



ตัวอย่างที่ 12



ตัวอย่างที่ 13

รูปที่ 4.10 สเปกตรัมเปล่งแสงของ Rhodamine 6G และ Rhodamine 6G ผสม AuPd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสง Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd พบว่าการเปล่งแสงในช่วง 90 - 5,000 a.u. มีการเปล่งแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 450 - 700 นาโนเมตร และมีพีคการเปล่งแสงสูงที่สุดเท่ากับ 4762.9 a.u. อยู่ที่ตัวอย่างที่ 6 ความยาวคลื่น 545 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นของ Rh6G เท่ากับ 1.69×10^{-6} M และ AuPd เท่ากับ 7.17×10^{-5} M และมีพีคการเปล่งแสงที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 3419.9 a.u. อยู่ที่ตัวอย่างที่ 8 ความยาวคลื่น 538 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นของ Rh6G เท่ากับ 5.5×10^{-7} M และ AuPd เท่ากับ 2.6×10^{-5} M

จากการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสงแล้วคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของการเปล่งแสงและค่าการดูดกลืนแสง สามารถคำนวณหาค่า Fluorescence quantum yield จากสมการที่ 1.2 จะได้ค่า fluorescence quantum yield ดังตาราง 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า fluorescence quantum yield ของ Rhodamine 6G และ Rhodamine 6G ผสม AuPd

Run Order	OD		Integrated Fluorescence		Q		% การเปลี่ยนแปลงค่า Q
	Rh6G	MIX	Rh6G	MIX	Rh6G	MIX	
1	0.058	0.216	156,218.16	215,292.498	0.94	0.35	-62.76 %
2	0.058	0.075	159,959.84	241,897.851	0.96	1.13	+17.70 %
3	0.058	0.155	158,155.12	275,404.869	0.95	0.62	-34.73 %
4	0.059	0.158	161,241.49	278,442.149	0.95	0.62	-34.73 %
5	0.057	0.157	158,536.01	281,573.074	0.97	0.63	-35.05 %
6	0.058	0.156	163,413.23	279,859.644	0.99	0.63	-36.36 %
7	0.067	0.159	180,939.34	279,066.648	0.95	0.61	-35.78 %
8	0.081	0.225	221,412.54	255,871.570	0.96	0.4	-58.76 %
9	0.081	0.116	224,084.84	313,036.022	0.97	0.94	-3.09 %
10	0.096	0.194	260,328.15	320,301.143	0.95	0.58	-38.94 %
11	0.022	0.118	50,302.01	228,739.129	0.80	0.68	-15.00 %
12	0.032	0.166	83,819.02	223,775.028	0.92	0.47	-48.91 %
13	0.032	0.071	77,803.50	224,184.172	0.85	1.10	+29.41 %

หมายเหตุ ค่า n ของ R6G เท่ากับ 1.332 เครื่องมือวัด : Pocket reflectrometer
 OD_R ค่าค่าที่ Integrated การดูดกลืนในช่วง 510-552 nm เท่ากับ 0.055
 และ Integrated fluorescence สารอ้างอิงเท่ากับ 149,435.80

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการวัดค่า fluorescence quantum yield ของสารละลาย Rh6G และ Rh6G ผสมกับ AuPd พบว่าค่า fluorescence quantum yield จะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง จากการทบทวนงานวิจัยทำให้ทราบว่าเมื่อค่า fluorescence quantum yield มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลจากปรากฏการณ์ FRET [1] และเมื่อค่า fluorescence quantum yield มีค่าลดลงเนื่องจากปรากฏการณ์ FRET [2]

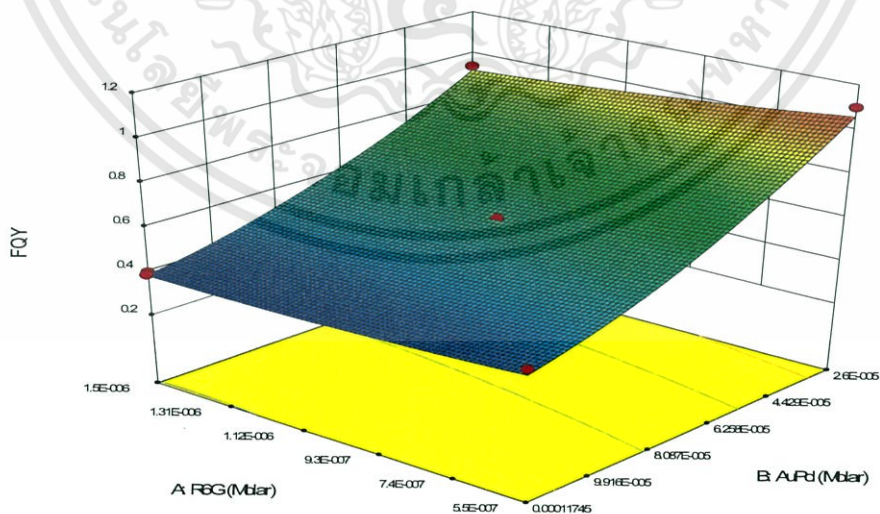
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองหาค่า fluorescence quantum yield จากความเข้มข้นที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3 จะได้ค่า fluorescence quantum yield ดังตารางที่ 4.6 และเมื่อนำค่าการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาสมการในโปรแกรม Design Expert 9.0.3 จะได้สมการแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการวิเคราะห์โมเดล

ANOVA for Response Surface Quadratic model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	0.70	5	0.14	180.14	< 0.0001	significant
A-Rh6G	0.017	1	0.017	22.22	0.0022	
B-AuPd	0.65	1	0.65	832.16	< 0.0001	
AB	2.025E-003	1	2.025E-003	2.61	0.1503	
A ²	1.488E-003	1	1.488E-003	1.92	0.2087	
B ²	0.034	1	0.034	43.45	0.0003	
Residual	5.433E-003	7	7.761E-004			
Lack of Fit	5.153E-003	3	1.718E-003	24.54	0.0049	significant
Pure Error	2.800E-003	4	7.000E005			
Cor Total	0.70	12				

$R^2 = 0.9923$, Adjusted $R^2 = 0.9868$



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Rh6G กับ AuPd ที่มีผลต่อค่า fluorescence quantum yield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.7 ค่าการวิเคราะห์โมเดลโดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3 โดยมีส่วนของ RSM ในการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของ Rh6G กับ AuPd ที่มีผลต่อค่า Q ที่ได้จากตารางที่ 4.5 จากการวิเคราะห์ว่าโมเดลเป็น significant โดยถูกกำหนดจากตัวแปร P value , R² จากการวิเคราะห์ ANOVA (ตารางที่ 4.7) แสดงให้เห็นว่าโมเดลมีความเหมาะสมที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของ Rh6G กับ AuPd ซึ่งเป็นโมเดล significant เนื่องจากค่า P-value มีค่า <0.0001 ซึ่งโดยทั่วไปในการตรวจสอบโมเดลนั้นค่า P-value <0.05 และที่ A คือความเข้มข้นของ Rh6G และ B คือความเข้มข้นของ AuPd ซึ่งส่วนของ A,B,B² เป็น significant โมเดลที่ทำนายมานั้นมีค่าการเปลี่ยนแปลงรวมน้อยมาก (0.0006%) เนื่องจากการวิเคราะห์พบว่าค่า R² =0.9923 (determination coefficient) และค่า Adjust R²=0.9868 โดยโมเดลที่ดีควรมีค่า R²>0.90 [30] ซึ่งค่า fluorescence quantum yield ของสาร Rh6G ที่ผสมกับ AuPd จะหาได้จากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความเข้มข้นของ Rh6G กับ AuPd ดังนี้

$$Y (\text{Predicted of } Q) = 1.48346 - (3.04926 \times 10^5 \times \text{Rh6G}) - (12,052.88865 \times \text{AuPd}) \\ + (1.03594 \times 10^9 \times \text{Rh6G} \times \text{AuPd}) + (6.48199 \times 10^{10} \times \text{Rh6G}^2) \\ + (3.3301 \times 10^7 \times \text{AuPd}^2)$$

จากรูปที่ 4.11 กราฟแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Rh6G กับ AuPd ที่มีผลต่อค่า fluorescence quantum yield ซึ่งจากกราฟจะพบว่าความเข้มข้นของ AuPd เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่า fluorescence quantum yield ลดลง

เพื่อความน่าเชื่อถือของสมการที่ได้จากโมเดลนั้น ผู้วิจัยจึงมีการตรวจสอบความถูกต้องของสมการ โดยได้ทดลองที่ความเข้มข้นของ Rh6G และ AuPd ที่ความเข้มข้นแตกต่างออกไปจาก 13 เงื่อนไข เพื่อหาค่า fluorescence quantum yield โดยผู้วิจัยได้เลือกความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G และ AuPd ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า fluorescence quantum yield ของสารละลาย Rh6G ผสมกับ AuPd และความคลาดเคลื่อนเปอร์เซ็นต์ของโมเดลและการทดลอง

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (M)		Q ของ Rh6G ผสมกับ AuPd		Error (%)
	Rh6G	AuPd	Model	Experiment	
1	6×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁵	0.99	1.03	4.04
2	9×10 ⁻⁷	6×10 ⁻⁵	0.69	0.70	1.45
3	1.2×10 ⁻⁶	8×10 ⁻⁵	0.54	0.56	3.70

จากตารางที่ 4.8 เป็นการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของค่า fluorescence quantum yield ของ Rh6G ที่ผสมกับ AuPd จากสมการที่ได้จากโมเดล พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยกว่า ±5% เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยมากจึงแสดงได้ว่าสมการที่ได้จากโมเดลนั้นมีความถูกต้องแม่นยำสูง สามารถนำไปใช้ได้จริงกับการทดลองในอนาคต ซึ่งจะสามารถใช้ในการคาดการณ์ล่วงหน้าว่าต้องการค่า fluorescence quantum yield มากน้อยเพียงใด ซึ่งผู้วิจัยแต่ละคนอาจต้องการค่า fluorescence quantum yield ในการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองวัดเพื่อหาค่า fluorescence quantum yield (Q) ของสารละลาย Rh6G โดยใช้เทคนิค Relative ซึ่งคำนวณวัดค่า Q โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.95 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีทำให้ผู้วิจัยยอมรับการนำเทคนิค Relative มาใช้ในงานวิจัย

จากการทดลองวัดเพื่อหาค่า Q ของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะ AuPd ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้เทคนิค Relative วัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของสารละลายแล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า Q และใช้วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว (Response surface methodology ;RSM) ของโปรแกรม Design Expert 9.0.3 ในการออกแบบการทดลอง ทำให้พบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G กับ AuPd จะทำให้ค่า Q มีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน ทั้งทำให้ค่า Q เพิ่มขึ้นและทำให้ค่า Q ลดลงด้วย จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3 ความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G กับ AuPd จะมีผลกระทบต่อค่า Q ดังสมการ

$$Y (\text{Predicted of } Q) = 1.48346 - (3.04926 \times 10^5 \times \text{Rh6G}) - (12,052.88865 \times \text{AuPd}) + (1.03594 \times 10^9 \times \text{Rh6G} \times \text{AuPd}) + (6.48199 \times 10^{10} \times \text{Rh6G}^2) + (3.3301 \times 10^7 \times \text{AuPd}^2) \quad (5.1)$$

และเราได้มีการทดลองตรวจสอบความถูกต้องของสมการพบว่าสมการมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากซึ่งได้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า $\pm 5\%$

เมื่อทดลองศึกษาหาค่า Q ตามทั้งหมดที่กล่าวมานั้น ทำให้สามารถหาค่า Q ได้ง่ายมากขึ้นเนื่องจากสามารถทำนายค่า Q ได้จากสมการ 5.1 ซึ่งจะช่วยในการประหยัดเวลาในการหาค่า Q มากขึ้น และยังสามารถนำไปใช้เป็นทางเลือกใหม่ในการหาค่า Q ได้อีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาและทดลองวัดหาค่า Q ของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะ AuPd ที่ความเข้มข้นต่างๆนั้นสามารถเป็นประโยชน์ต่อกับผู้วิจัยที่จะวิเคราะห์และพัฒนาค่า Q ต่อไป ดังนี้

1. ในการทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนและสเปกตรัมการเปล่งแสงควรจะควบคุมระบบให้ใกล้เคียงกัน เช่น อุณหภูมิ ฯลฯ
2. ผู้วิจัยได้ศึกษาค่า Q ในช่วง wave length เดียว ดังนั้นจึงเหมาะแก่นักวิจัยคนอื่นๆที่จะวิเคราะห์พัฒนาต่อไปในการศึกษาค่า Q ใน wave length ช่วงอื่นๆ
3. เทคนิค Relative สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่า Q ของสารอื่นๆได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mingcong Rong, Zhixiong Cai, Lei Xie, Chunshong Lin, Xinhong Song, Feng Luo, Yiru Wang, and Xi Chen. 2016. *Chemistry a European Journal*. 22 : 9387-9395
- [2] Takashi Jin and Yukio Imamura. 2016. *ECS Journal of solid state science and technology*. 5(1) : R3138-R3145
- [3] Brenda C. Rowan, Lindsay R. Wilson, and Bryce S. Richards. 2008. *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*. 14(5) : 1312-1322
- [4] Vamsi K. Kandimalla. 2010. *Influence of Metal Nanoparticles on Fluorescence Properties*. MSc. Thesis of Eastern Michigan University
- [5] อภิวัดน์ ชมพูสอ. 2556. “โครงสร้างระดับนาโนของทอง : การสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง”. ว.วิทย.มช. 41(4) : 859-872.
- [6] Michael W. Allen, Thermo Fisher Scientific, Madison, WI, USA
- [7] Bernard Valeur. 2001. **Molecular Fluorescence: Principles and Applications**. Federal Republic of Germany : betz-druck gmbh, Darm-stadt.
- [8] Xian-Fu Zhang, Yakui Zhang, Limin Liu. 2014. *journal of luminescence*. 145 : 448-453.
- [9] Bini Pathrose, H. Sahira, V.P.N. Nampoori, P. Radhakrishnan, A. Mujeeb. 2014. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 128 : 522–526
- [10] แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. 2552. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ**. กรุงเทพฯ : บริษัท ชวนพิมพ์ 50 จำกัด.
- [11] Maastricht. 2015. **Cristal Therapeutics starts clinical phase I trial with nanomedicine CriPec® docetaxel in patients with solid tumours**. [Online]. Available : <http://www.understandingnano.com/targeted-drug-delivery-docetaxel.html>
- [12] Thuy-Khanh Nguyen and Ramona Selvanayagam. 2015. **Nanotech weapon against chronic bacterial infections**. [Online]. Available : <http://www.understandingnano.com/iron-oxide-nanoparticles-bacteria.html>
- [13] Nanoparticle Companies. 2016. **Nanoparticle Applications and Uses**. [Online]. Available : <http://www.understandingnano.com>
- [14] Angewandte Chemie Press Release. 2016. **Gold Nanoparticles in Manganese Oxide Cleans VOCs from Air**. [Online]. Available : <http://www.understandingnano.com/nanoparticles-gold-voc-air-pollution.html>

- [15] Oregon Health and Science University News Release. 2005. **OHSU-Led Study Finds Advantages to Iron Nanoparticles for Environmental Cleanup.** [Online]. Available : <http://www.understandingnano.com/nanoparticles-iron-water-pollution-cleanup.html>
- [16] Rice University Press Release. 2009. **First 'nanorust' field test slated in Mexico Guanajuato will be first to try Rice's arsenic-cleansing 'nanorust'.** [Online]. Available : <http://www.understandingnano.com/nanoparticle-water-pollution-iron-oxide-arsenic.html>
- [17] Angewandte Chemie. 2012. **Highly efficient electrocatalyst for the reduction of oxygen in fuel cells and batteries.** [Online]. Available : <http://www.understandingnano.com/electrode-carbon-black-nanoparticle.html>
- [18] Boote BW, Byun H, Kim JH, J Nanosci Nanotechnol. (2014) 1563-77
- [19] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2016. **การทดลองเชิงโมเลกุลเดี่ยว.** [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/การทดลองเชิงโมเลกุลเดี่ยว>
- [20] กัลยาณี เต็งพงศธร. 2554. “**พื้นที่ผิวผลตอบ (Response Surface).**” กรุงเทพฯ : คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.
- [21] Tony Butterfield. **Method of Steepest Ascent.** [Online]. Available : <https://www.che.utah.edu/~tony>
- [22] N. SHEMEENA BASHEER, B.RAJESH KUMAR, ACHAMMA KURIAN, SAJAN D. GEORGE. 2013. *Journal of Luminescence.* 137 : 225-229
- [23] นิชากร บูลพิภพอนันต์. 2560. “**การศึกษาออปติคอลสเปกโทรสโคปีจากสีย้อมไวแสงร่วมกับโลหะในระดับอนุภาคนาโน**”วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [22] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2016. [Online]. **Rhodamine 6G.** Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Rhodamine6G>
- [23] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2016. [Online]. **Rhodamine B.** Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/RhodamineB>
- [24] nanoseedz. 2016. **Au@Pd,Au@Pt Nanorods.** http://www.nanoseedz.com/Gold_Nanorods_PtPd_Coated.html
- [25] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2016. **เอทานอล.** [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/เอทานอล>
- [26] สันทวุฒิ ฤทธิ์เลื่อน. 2016. **น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water).** [Online]. Available : <http://linjah.exteen.com/20080829/deionized-water>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.วิธีการคำนวณ

1.1 การเตรียมสารละลายสี่ย้อม Rh6G

1.1.1 วิธีการคำนวณปริมาณสาร Rh6G เพื่อเตรียมสารละลายสี่ย้อม Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-3} M ปริมาตร 20 ml เมื่อ Rh6G มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 479.01 g/mol

$$\text{คำนวณได้จากสูตร } \frac{g}{MW} = \frac{N_1 V_1}{1000}$$

เมื่อ V_1 คือ ปริมาตร (หน่วยเป็น ml)
 N_1 คือ ความเข้มข้น (10^{-3} M)
 MW คือ มวลโมเลกุลของ Rh6G (10^{-3})
 g คือ ปริมาณสารของ Rh6G

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ต้องชั่งปริมาณ Rh6G (g)} &= \frac{10^{-3} \times 20 \times 479.01}{1000} \\ &= 0.0098 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถเตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-3} M ปริมาตร 20 ml ได้โดยการชั่งสาร Rh6G มา 0.095 g ละลายด้วยน้ำ DI 20 ml

1.1.2 วิธีการเตรียมสารละลายสี่ย้อม Rh6G ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยทำการเจือจาง

$$\text{โดยคำนวณได้จากสูตร } C_1 V_1 = C_2 V_2$$

เมื่อ C_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G ตั้งต้น
 C_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G ที่เราต้องการ
 V_1 คือ ปริมาตรของสารละลาย Rh6G ตั้งต้น ที่ต้องแบ่งมา
 V_2 คือ ปริมาตรของสารละลาย Rh6G ที่เราต้องการ

1) เตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-4} M ที่ปริมาตร 10 ml

$$\text{โดยคำนวณได้จากสูตร } C_1 V_1 = C_2 V_2$$

$$\text{ดังนั้น } (10^{-3})(V_1) = (10^{-4})(10)$$

$$V_1 = \frac{(10^{-4})(10)}{(10^{-3})}$$

$$V_1 = 1 \text{ ml}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น นำสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-3} M นำมา 1 ml ผสมกับเอทานอล 9 ml จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 10^{-4} M ที่ปริมาตร 10 ml

2) เตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-5} M ที่ปริมาตร 10 ml

โดยคำนวณได้จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

ดังนั้น $(10^{-4})(V_1) = (10^{-5})(10)$

$$V_1 = \frac{(10^{-5})(10)}{(10^{-4})}$$

$$V_1 = 1 \text{ ml}$$

ดังนั้น นำสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-4} M นำมา 1 ml ผสมกับเอทานอล 9 ml จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 10^{-5} M ที่ปริมาตร 10 ml

3) เตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10×10^{-7} M ที่ปริมาตร 30 ml

โดยคำนวณได้จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

ดังนั้น $(10^{-5})(V_1) = (10^{-7})(30)$

$$V_1 = \frac{(10 \times 10^{-7})(30)}{(10^{-5})}$$

$$V_1 = 3 \text{ ml}$$

ดังนั้น นำสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-5} M นำมา 3 ml ผสมกับเอทานอล 27 ml จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 10×10^{-7} M ที่ปริมาตร 30 ml

4) เตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 9×10^{-7} M ที่ปริมาตร 5 ml

โดยคำนวณได้จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

ดังนั้น $(10^{-6})(V_1) = (9 \times 10^{-7})(10)$

$$V_1 = \frac{(9 \times 10^{-7})(5)}{(10^{-6})}$$

$$V_1 = 4.5 \text{ ml}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น นำสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-6} M นำมา 4.5 ml ผสมกับเอทานอล 0.5 ml จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 9×10^{-7} M ที่ปริมาตร 5 ml

5) เตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 8×10^{-7} M ที่ปริมาตร 5 ml

โดยคำนวณได้จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

ดังนั้น $(10^{-6})(V_1) = (8 \times 10^{-7})(5)$

$$V_1 = \frac{(8 \times 10^{-7})(5)}{(10^{-6})}$$

$$V_1 = 4 \text{ ml}$$

ดังนั้น นำสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-6} M นำมา 4 ml ผสมกับเอทานอล 1 ml จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 8×10^{-7} M ที่ปริมาตร 10 ml

6) เตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 7×10^{-7} M ที่ปริมาตร 5 ml

โดยคำนวณได้จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

ดังนั้น $(10^{-6})(V_1) = (7 \times 10^{-7})(5)$

$$V_1 = \frac{(7 \times 10^{-7})(5)}{(10^{-6})}$$

$$V_1 = 3.5 \text{ ml}$$

ดังนั้น นำสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-6} M นำมา 3.5 ml ผสมกับเอทานอล 1.5 ml จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 7×10^{-7} M ที่ปริมาตร 10 ml

7) เตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 6×10^{-7} M ที่ปริมาตร 5 ml

โดยคำนวณได้จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

ดังนั้น $(10^{-6})(V_1) = (6 \times 10^{-7})(5)$

$$V_1 = \frac{(6 \times 10^{-7})(5)}{(10^{-6})}$$

$$V_1 = 3 \text{ ml}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น นำสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-6} M นำมา 3 ml ผสมกับเอทานอล 2 ml จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 6×10^{-7} M ที่ปริมาตร 5 ml

8) เตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 5×10^{-7} M ที่ปริมาตร 5 ml

โดยคำนวณได้จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

$$\text{ดังนั้น} \quad (10^{-6})(V_1) = (5 \times 10^{-7})(5)$$

$$V_1 = \frac{(5 \times 10^{-7})(5)}{(10^{-6})}$$

$$V_1 = 2.5 \text{ ml}$$

ดังนั้น นำสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-6} M นำมา 2.5 ml ผสมกับเอทานอล 2.5 ml จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 5×10^{-7} M ที่ปริมาตร 5 ml

9) เตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 4×10^{-7} M ที่ปริมาตร 5 ml

โดยคำนวณได้จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

$$\text{ดังนั้น} \quad (10^{-6})(V_1) = (4 \times 10^{-7})(5)$$

$$V_1 = \frac{(4 \times 10^{-7})(5)}{(10^{-6})}$$

$$V_1 = 2 \text{ ml}$$

ดังนั้น นำสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-6} M นำมา 2 ml ผสมกับเอทานอล 3 ml จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 4×10^{-7} M ที่ปริมาตร 5 ml

10) เตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 3×10^{-7} M ที่ปริมาตร 5 ml

โดยคำนวณได้จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

$$\text{ดังนั้น} \quad (10^{-6})(V_1) = (3 \times 10^{-7})(5)$$

$$V_1 = \frac{(3 \times 10^{-7})(5)}{(10^{-6})}$$

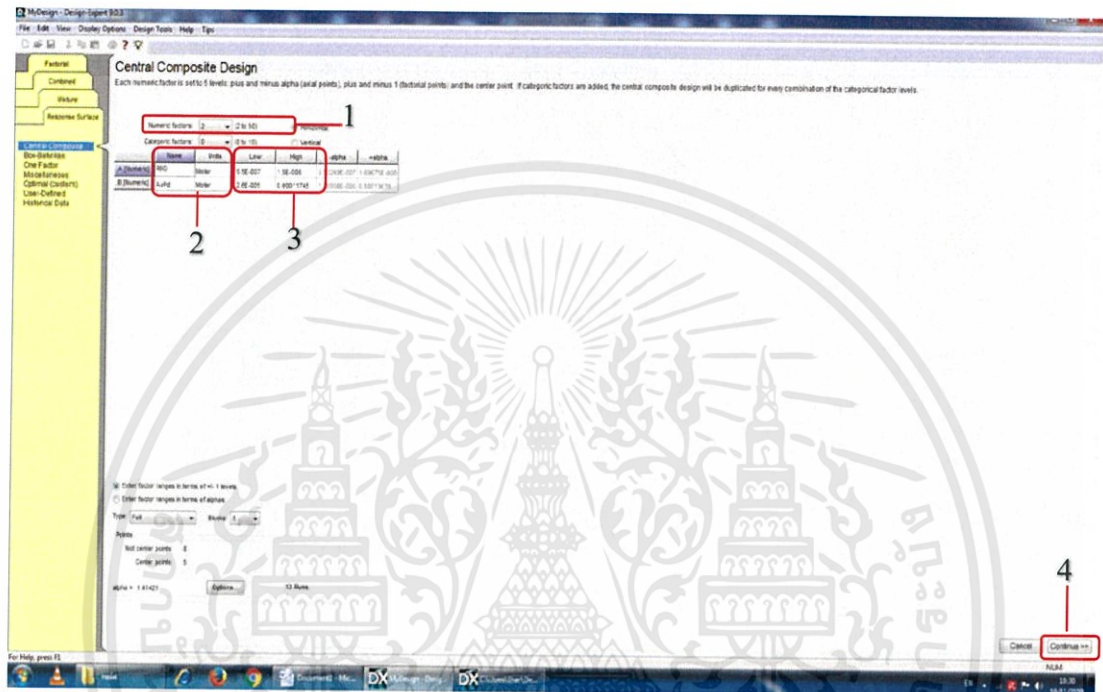
$$V_1 = 1.5 \text{ ml}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น นำสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้น 10^{-6} M นำมา 1.5 ml ผสมกับเอทานอล 3.5 ml จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 4×10^{-7} M ที่ปริมาตร 5 ml

2. การออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3

1. เลือกเมนู Response Surface เลือกการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design จากนั้นกำหนดข้อมูลที่ต้องการศึกษาลงไป



หมายเลข 1 : กำหนดจำนวนตัวแปรที่ต้องการศึกษามี 2 ตัวแปร

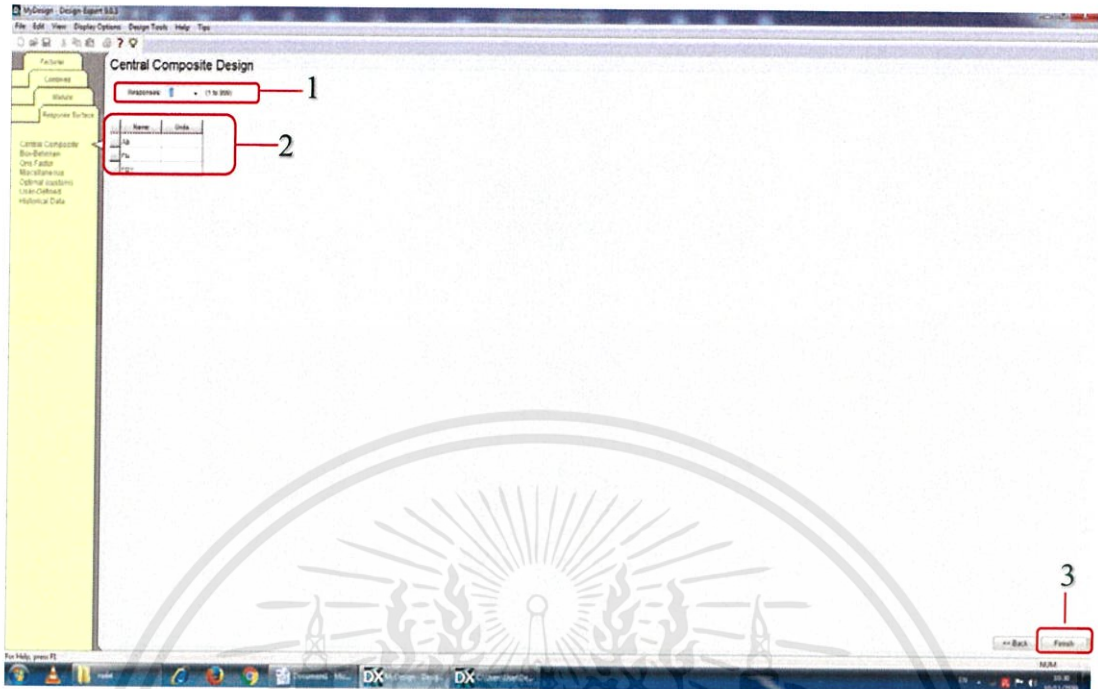
หมายเลข 2 : ชื่อตัวแปร A ที่ใช้กับ Rhodamine 6G (R6G) และ B คือ AuPd หน่วยของตัวแปร A และ B คือ โมลาร์

หมายเลข 3 : ช่วงความเข้มข้นของ R6G ที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 5×10^{-7} ถึง 1.5×10^{-6} และความเข้มข้นของ AuPd อยู่ระหว่าง 2.6×10^{-5} ถึง 1.1745×10^{-4}

หมายเลข 4 : ดำเนินการต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำหนดจำนวนคุณสมบัติต่างๆและชื่อคุณสมบัติที่ต้องการศึกษา



หมายเลข 1 : กำหนดคุณสมบัติที่ต้องการศึกษาจำนวน 3 ค่า

หมายเลข 2 : ชื่อของคุณสมบัติที่ต้องการศึกษาได้แก่ การดูดกลืนแสง (Ab) , การแปลงแสงฟลูออเรสเซนซ์ (Fu) และค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ (FQY)

หมายเลข 3 : เสร็จสมบูรณ์

3. เมื่อใส่ข้อมูลครบตามกำหนดแล้ว โปรแกรมจะออกแบบการทดลองที่ความเข้มข้นต่างๆดังนี้

The screenshot shows the experimental design table in MDO software. Red boxes and numbers 1, 2, 3, and 4 highlight specific columns in the table:

- 1: A red box around the 'Run' column.
- 2: A red box around the 'Factor 1 A: 500: 500' column.
- 3: A red box around the 'Factor 2 B: 400: 400' column.
- 4: A red box around the 'Response 1 Ab' column.

Run	Factor 1 A: 500: 500	Factor 2 B: 400: 400	Response 1 Ab	Response 2 Fu	Response 3 FQY
1	1.0E-007	2.0E-001			
2	1.00E-006	7.072E-016			
3	1.00E-007	0.00013619			
4	1.0E-007	0.00011745			
7	1.000E-006	7.0000E-016			
5	0.333246E-007	7.172E-010			
12	1.000E-006	7.172E-010			
8	1.000E-006	7.172E-010			
6	1.000E-006	7.172E-010			
10	1.000E-006	7.172E-010			
13	1.000E-006	7.172E-010			
11	1.000E-006	7.172E-010			
2	1.0E-006	2.0E-001			
4	1.0E-006	0.00011745			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 1 : เงื่อนไขที่ทดลองตามลำดับ

หมายเลข 2 : จำนวนเงื่อนไขที่ต้องการศึกษา

หมายเลข 3 : ตัวแปรที่ 1 คือความเข้มข้นของ Rhodamine 6G หน่วยเป็นโมลาร์

หมายเลข 4 : ตัวแปรที่ 2 คือความเข้มข้นของ AuPd หน่วยเป็นโมลาร์

3. การหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูล เราใช้สัญลักษณ์แทนคำว่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ S.D. (Standard Deviation)

$$\text{สูตรในการหาค่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ } S.D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Q Rhodamine 6G แสดงดังตาราง

ความเข้มข้น (M)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Q Rhodamine 6G		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
3×10^{-7} ถึง 10×10^{-7}	0.0444	0.0162	0.0571

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Q ของ Rhodamine 6G และ Rhodamine 6G ที่ผสมกับ AuPd แสดงดังตาราง

ความเข้มข้น (M) 13 เงื่อนไข จากตารางที่ 3.6	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Q	
	Rhodamine 6G	Rhodamine 6G + AuPd
	0.0542	0.2196