

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

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

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

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

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาหลักการวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ ของวัสดุ Rhodamine 6G ที่ผสมกับวัสดุโลหะ AuPd ที่มีโครงสร้างระดับนาโน

1.2.2 ทดสอบสมบัติการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของวัสดุ Rhodamine 6G ที่ผสมกับวัสดุโลหะ AuPd ที่มีโครงสร้างระดับนาโนเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่า ϕ_F

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

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

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

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

รายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนและวิธีดำเนินงานมีดังนี้

ตาราง 1.1 รายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

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

โดยแผนการดำเนินงานแต่ละขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ระยะเวลาและแผนในการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลา											
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
ขั้นตอนที่ 1	←→											
ขั้นตอนที่ 2	←→											
ขั้นตอนที่ 3			←→									
ขั้นตอนที่ 4					←→							
ขั้นตอนที่ 5							←→					
ขั้นตอนที่ 6										←→		

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 Fluorescence quantum yield

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

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

หรือมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าอัตราการคายพลังงานแบบปลดปล่อยแสงและผลรวมของอัตราการคายพลังงานแบบปลดปล่อยแสงและแบบไม่ปลดปล่อยแสงดังสมการที่ (2.2)

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

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

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

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

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

เมื่อ I คือค่าพื้นที่ใต้กราฟการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์

A คือค่าการดูดกลืนแสง

n คือค่าดัชนีหักเหแสงของสารละลาย

ตัวแปรที่ห้อย R หมายถึงค่าตัวแปรของสารละลายอ้างอิง

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

ตารางที่ 2.1 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rhodamine 6G ในตัวทำละลายต่างๆ

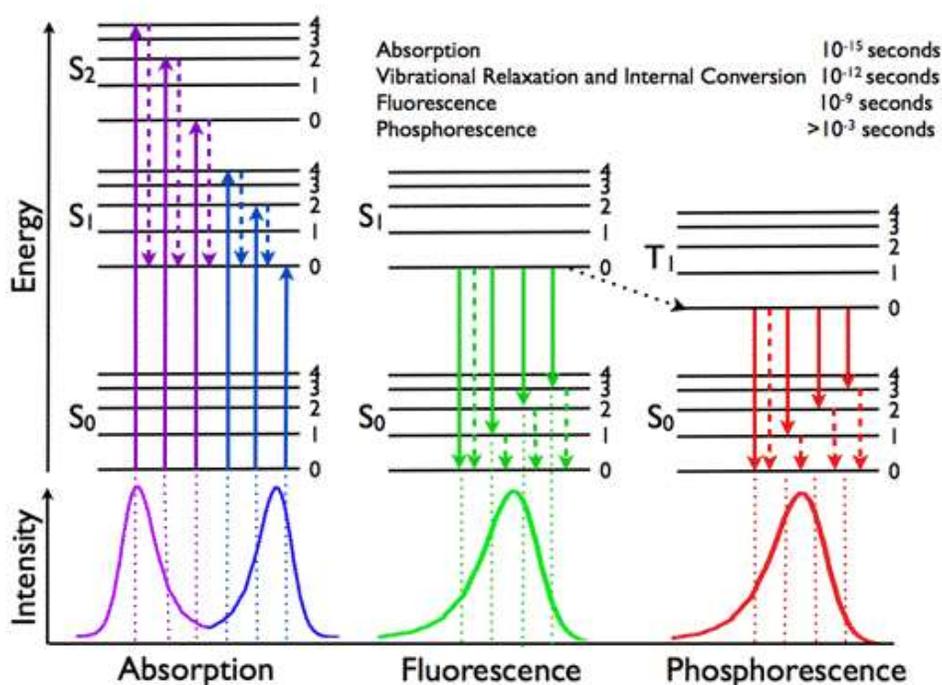
ϕ_F	ตัวกลาง	ความเข้มข้น/ค่าการดูดกลืน	ผู้วิจัย/ปีที่น่าเสนอ	เอกสารอ้างอิง
0.95 (± 0.01)	เอทานอล	ค่าการดูดกลืนในช่วง 0.05-0.20	Markus Grabolle, Monika Spieles, Vladimir Lesnyak, Nikolai Gaponik, Alexander Eychmu ller, and Ute Resch-Genger /2009	[15]
0.94	เอทานอล	ความเข้มข้น $1 \times 10^{-6} - 1.5 \times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

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rhodamine 6G ในตัวทำละลายต่างๆ

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

2.2 กลไกการเรืองแสง

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



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน Jablonski [20]

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานที่มากพอจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้ไปที่ระดับพลังงานสูงขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปช่วงเวลาหนึ่งอิเล็กตรอนจะตกกลับสู่สถานะพื้น โดยการตกกลับสู่สถานะพื้นด้วยกระบวนการลดระดับพลังงาน โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ กระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เปล่งแสงและการลดระดับพลังงานแบบเปล่งแสง

(1) กระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เปล่งแสง

- การลดระดับพลังงานการสั่นของโมเลกุล (Vibrational relaxation: VR)

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

- การแปลงผันภายใน (Internal conversion: IC)

กระบวนการนี้จะไม่เกิดการคายพลังงานแสงหรือพลังงานความร้อนออกมาแต่จะเกิดการส่งผ่านพลังงานระหว่างโมเลกุลเท่านั้นโดยโมเลกุลที่ส่งผ่านกันจะมีค่าพลังงานที่สถานะกระตุ้นต่างกันไม่มากนักหรือมีช่วงระดับพลังงานซ้อนทับกัน เช่น การส่งผ่านพลังงานในสถานะ S1 ไปยังสถานะ S2

- การลดระดับพลังงานข้ามสถานะ (Intersystem crossing: ISC)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนของโมเลกุลในสถานะกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการหมุน ซึ่งการที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางการหมุนได้ก็ต่อเมื่อระดับพลังงานการสั่นของสถานะเดียวและระดับชั้นพลังงานการสั่นของสถานะสามในสถานะกระตุ้นตรงกัน (ระดับพลังงานเท่ากัน) หรือการทรานซิชั่นจากสถานะเดียวที่มีระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดไปสู่สถานะสามในสถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานการสั่นมากกว่า

(2) กระบวนการลดระดับพลังงานแบบเปล่งแสง

- ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence)

การเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นที่อยู่สถานะเดียวเกิดการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้น ซึ่งการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้นนี้จะเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของแสงและเรียกระบวนการคายพลังงานแสงนี้ว่าฟลูออเรสเซนซ์

- ฟอสฟอรัสเซนซ์ (Phosphorescence)

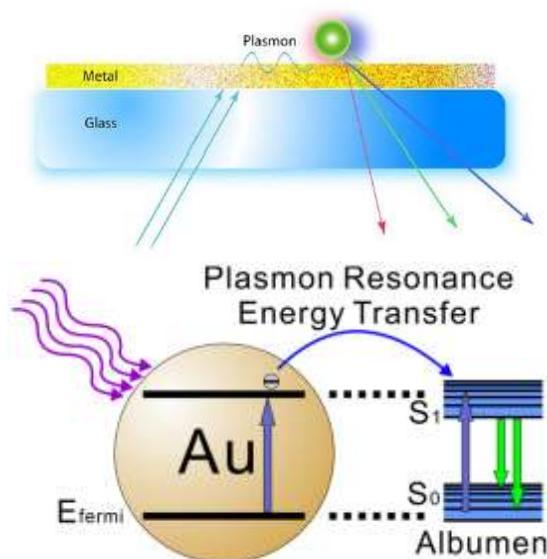
การคายพลังงานในกระบวนการนี้จะแตกต่างจากการคายพลังงานแบบฟลูออเรสเซนซ์เนื่องจาก แสงฟอสฟอเรสเซนซ์เป็นการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นที่อยู่สถานะสามเกิดการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้น

2.3 ปรากฏการณ์เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์

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

2.4 Plasmon resonance energy transfer

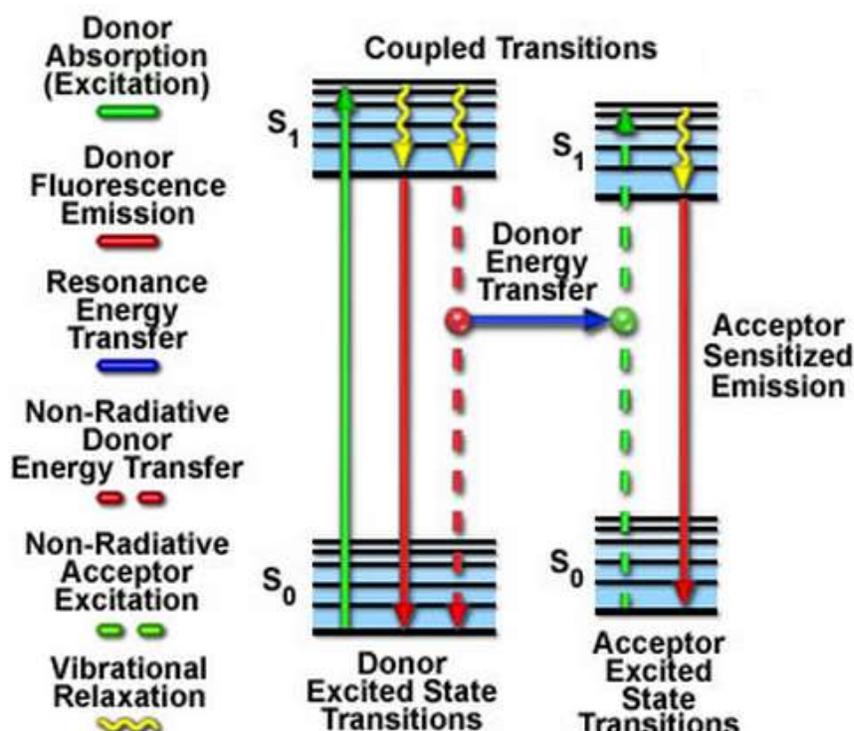
กระบวนการ Plasmon resonance energy transfer (PRET) หรืออาจเรียกอีกแบบว่ากลไก Metal enhance fluorescence (MEF) เกิดจากการที่กลุ่มของอิเล็กตรอนของอนุภาคโลหะที่เกิดการสั่นภายใต้สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนของวัสดุเรืองแสงย้ายระดับขึ้นไปอยู่ที่ถูกขึ้น และเมื่ออิเล็กตรอนลดระดับพลังงานลงมา จะปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสงฟลูออเรสเซนซ์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



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดกระบวนการ Plasmonic resonance energy transfer [21]

2.5 Fluorescence resonance energy transfer

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



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงระดับพลังงานอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ FRET [22]

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

การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์สามารถอธิบายได้โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าควอนตัมยิลด์และค่าช่วงอายุพาหะ ดังนี้

กรณีที่ 1 ค่าควอนตัมยิลด์และช่วงชีวิตของวัสดุฟลูออโรฟอร์

การพิจารณาค่าควอนตัมยิลด์และช่วงชีวิตของวัสดุฟลูออโรฟอร์โดยทั่วไป สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ

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

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

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

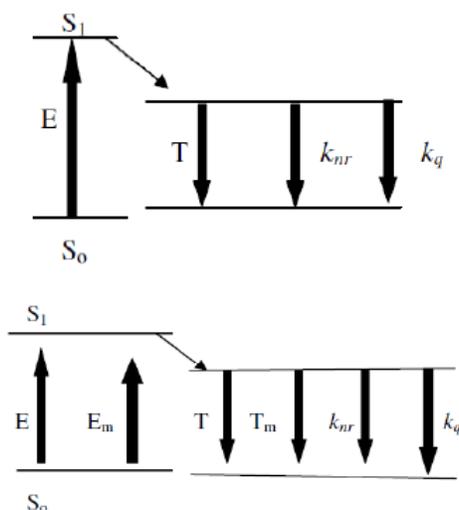
กรณีที่ 2 ค่าควอนตัมยิลด์และช่วงชีวิตของวัสดุฟลูออโรฟอร์ที่ถูกแวดล้อมด้วยวัสดุโลหะนาโน

เมื่อวัสดุฟลูออโรฟอร์ถูกแวดล้อมด้วยอนุภาคนาโนในระยะเวลาที่เหมาะสม จะส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์และช่วงชีวิตของวัสดุฟลูออโรฟอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)

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

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

เมื่อ	ϕ_m	คือค่าควอนตัมยิลด์ของวัสดุฟลูออโรฟอร์เมื่อถูกแวดล้อมด้วยวัสดุโลหะ
	t_m	คือช่วงชีวิตของวัสดุฟลูออโรฟอร์เมื่อถูกแวดล้อมด้วยวัสดุโลหะ
	T_m	คืออัตราการรวมตัวของแบบปลดปล่อยแสงที่เพิ่มขึ้นจากการที่วัสดุฟลูออโรฟอร์ถูกแวดล้อมด้วยวัสดุโลหะ



รูปที่ 2.4 แผนภาพ Jablonski พื้นฐานและแบบประยุกต์กรณีโมเลกุลถูกแวดล้อมด้วยอนุภาคโลหะ [23]

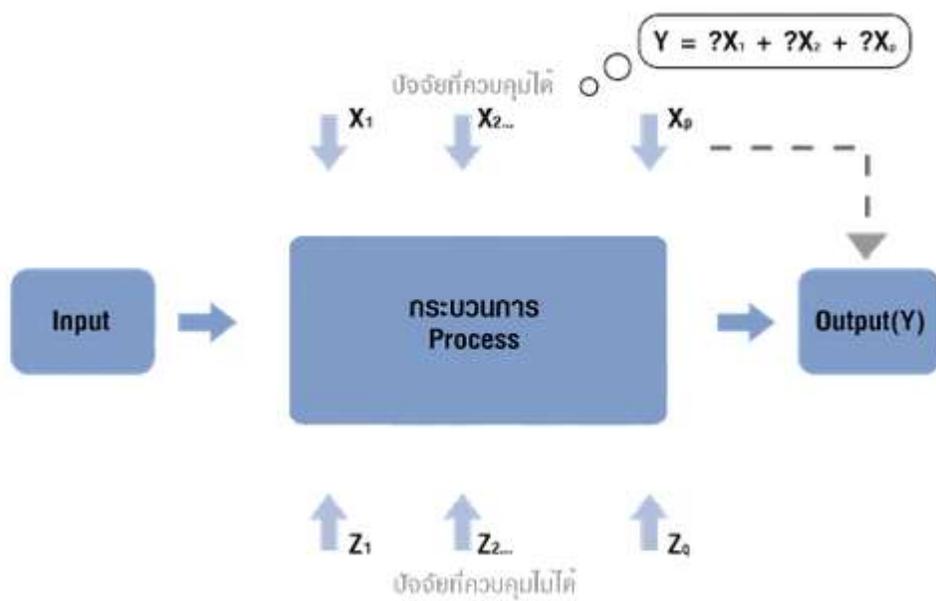
2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

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

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

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

ได้ไปปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการและทดลองเก็บข้อมูลอีกครั้งเพื่อยืนยันผลก่อนนำไปใช้งานจริง โดยแสดงกระบวนการได้ดังแผนภาพ



รูปที่ 2.5 กระบวนการออกแบบการทดลอง [24]

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงเครื่องมือและวัสดุที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมถึงกระบวนการในการเตรียมสารละลายของสารสีย้อมกับอนุภาคนาโนโลหะ กระบวนการทดสอบสเปกตรัมของแสงของสารละลายและการวิเคราะห์หาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ โดยมีเนื้อหาแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อหลักดังนี้

3.1. เครื่องมือและระบบการวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.1.1 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (UV/Vis spectrometer) ที่ใช้ในงานวิจัยคือเครื่อง Avantes avaspec-EDU

3.1.2 เครื่องกำเนิดแสงทั้งสแตนด์ (รุ่น MEGALIGHT 100 จากบริษัท SCHOTT Nippon) ให้แสงขาวในย่านความยาวคลื่น 400 – 900 นาโนเมตร

3.1.3 ไดโอดเปล่งแสง ในการวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์จากวัสดุที่ต้องการทดลอง ผู้วิจัยเลือกใช้ไดโอดเปล่งแสงชนิดกำลังสูง (ขนาด 1 วัตต์) มีความเข้มแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 524 นาโนเมตร (แสงสีเขียว) เพื่อกระตุ้นวัสดุที่เตรียมจากสารสีย้อม R6G

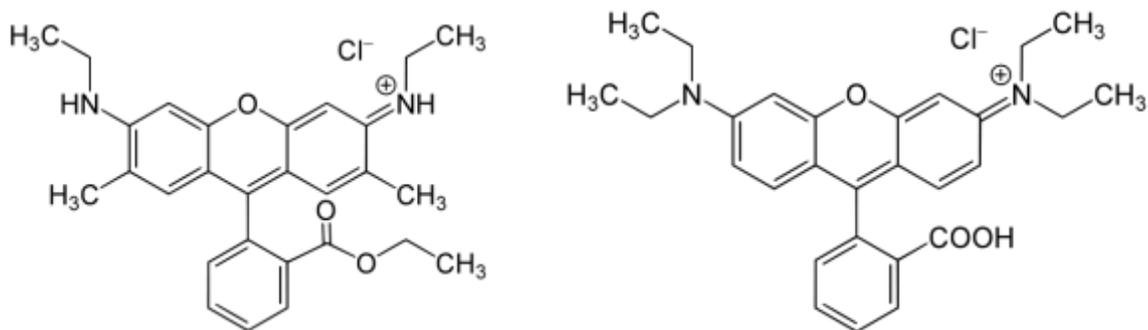
3.1.4 แท่นสำหรับจับยึดคิวเวท ทำหน้าที่จับยึดคิวเวทที่บรรจุสารละลายที่ต้องการทดสอบ

3.1.5 เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหแสงของสารละลาย (Atago)

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 สารเรืองแสง

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



(ก)

(ข)

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

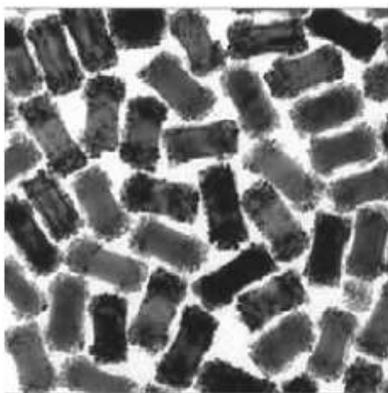
ตารางที่ 3.1 สมบัติพื้นฐานของสารเรืองแสง Rh6G และ RhB

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

3.2.2 อนุภาคนาโนทองคำเคลือบพลาตินั่ม (อนุภาค AuPd)

ในงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของอนุภาค AuPd ที่มีรูปทรงแบบแท่ง บริเวณปลายมีลักษณะมน มีรูปทรงดังรูปที่ 3.2 มีสมบัติสรุปดังตาราง

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



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของ AuPd แบบแท่ง [27]

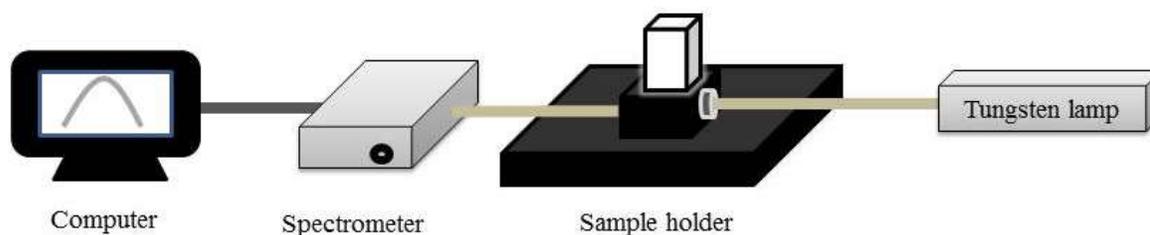
3.3 ระบบวัด

3.3.1 ระบบวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลายสารเรืองแสง

การวัดค่าการดูดกลืนของสารละลาย อาศัยระบบวัดที่จัดเตรียมดังแผนภาพรูปที่ 3.3 ซึ่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนจะถูกส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงตกกระทบกับสารตัวอย่างและสารละลายอ้างอิง และส่งผ่านออกมาเข้าสู่สายใยแก้วนำแสงอีกเส้นหนึ่งที่เชื่อมต่อกับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ แสงที่เข้าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ จะถูกวิเคราะห์ค่าการดูดแสงด้วยโปรแกรม Avasoft 7.4 โดยสมการ

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

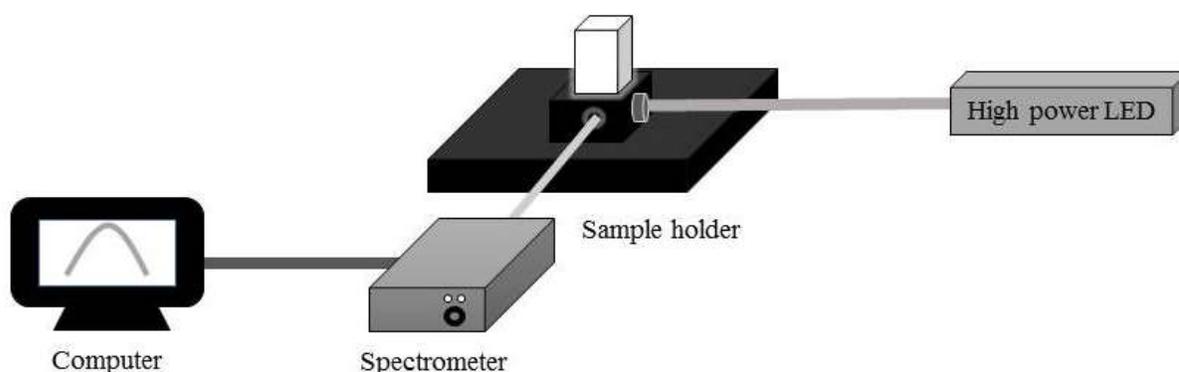
เมื่อ I คือความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากสารตัวอย่างและ
 I_0 คือความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากสารอ้างอิง



รูปที่ 3.3 ระบบวัดการดูดกลืนแสง

3.3.2 ระบบวัดสมบัติการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์

ในการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ผู้วิจัยได้จัดระบบการวัดดังรูปที่ 3.4 ในที่นี้จะใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแอลอีดีเป็นตัวกระตุ้นวัสดุที่ต้องการทดสอบโดยจัดวางให้แสงตกกระทบในทิศทางทำมุม 90 องศากับสายใยแก้วนำแสงที่ทำหน้าที่ตรวจวัดแสงเพื่อเลี่ยงการรบกวนของแสงกระตุ้น



รูปที่ 3.4 ระบบวัดการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์

3.4 การเตรียมวัสดุและการวัดค่า ϕ_f ของสารละลาย

การทดลองที่ 1 การวัดค่า ϕ_f ของสารละลาย Rh6G

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

วิธีการทดลอง

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

ตารางที่ 3.2 ค่าความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G

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

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

วิธีการทดลอง

- เตรียมสารละลาย Rh6G ผสมกับ AuPd ให้มีความเข้มข้นของสารที่ผสมกันดังแสดงในตารางที่ 3.3
- นำสารละลายที่เตรียมในข้อ 1 มาวัดสเปกตรัมการดูดกลืนและสเปกตรัมการเปล่งแสง

ตารางที่ 3.3 การเตรียมสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาค AuPd

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

การทดลองที่ 3 การออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3

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

การทดลอง

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

ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G และอนุภาค AuPd

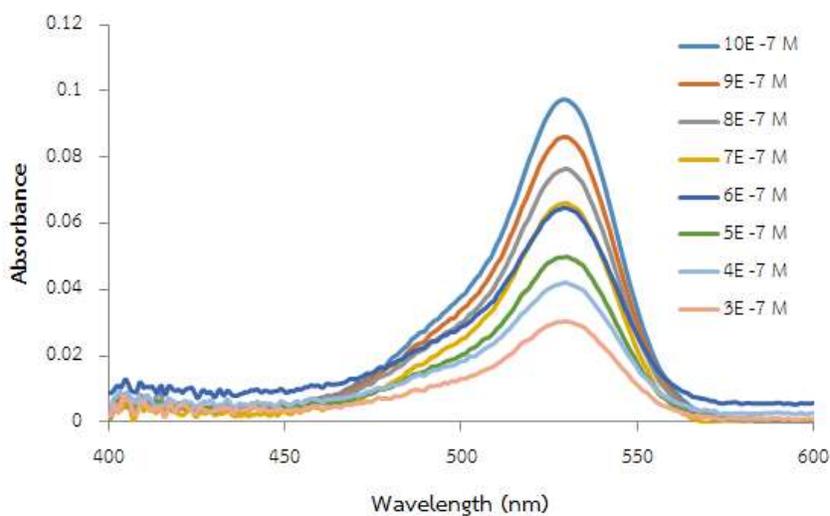
สารตัวอย่าง	ความเข้มข้น (M)	
	Rh6G	AuPd
1	3.53×10^{-7}	7.17×10^{-5}
2	5.50×10^{-7}	2.60×10^{-5}
3	5.50×10^{-7}	1.17×10^{-4}
4	1.03×10^{-6}	7.06×10^{-6}
5	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
6	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
7	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
8	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
9	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
10	1.03×10^{-6}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

บทที่ 4

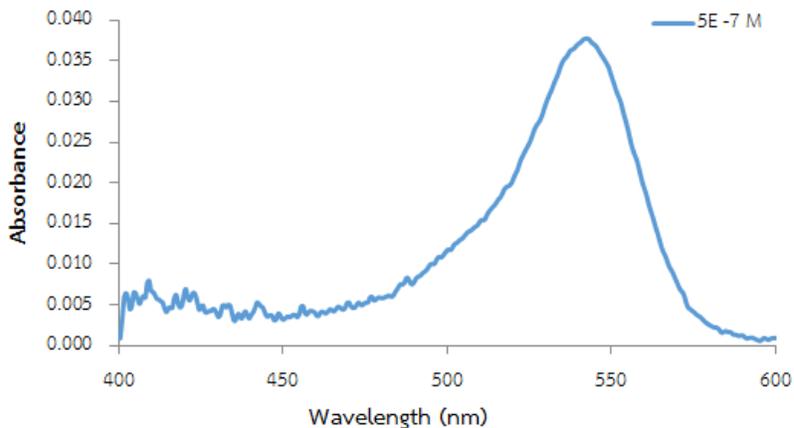
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rhodamine 6G

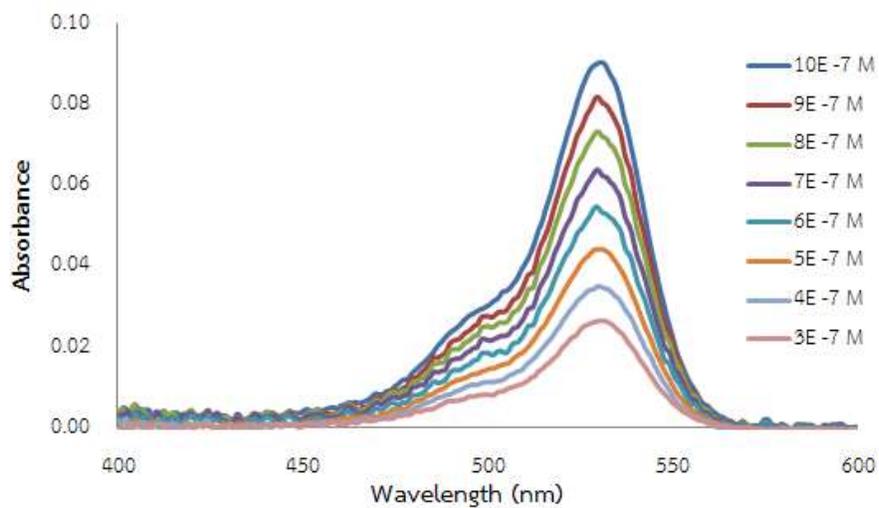
จากการนำสารที่เตรียมในหัวข้อที่ 3.4 การทดลองที่ 1 มาวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ด้วยเทคนิค Relative โดยใช้สารละลาย Rhodamine B ที่มีความเข้มข้น 5×10^{-7} M เป็นสารอ้างอิง ซึ่งในการทดลองจะทำการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสงซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อนำผลมาวิเคราะห์หาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ได้ผลดังนี้



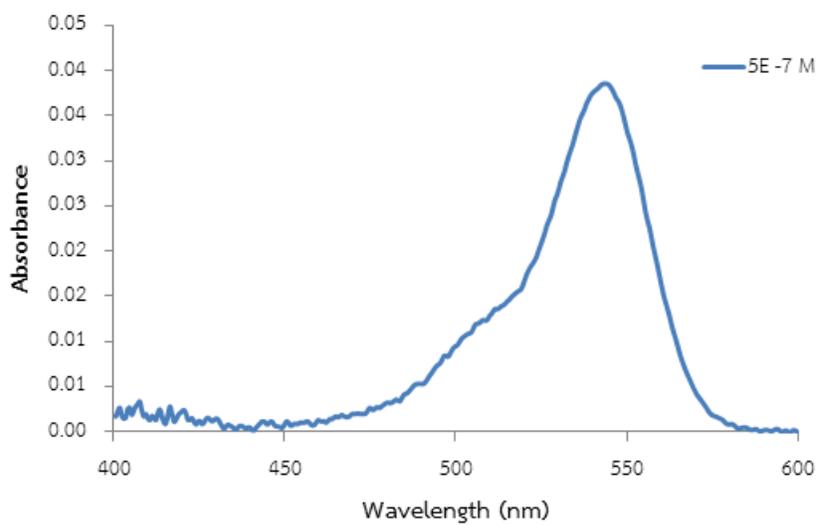
การทดลองครั้งที่ 1 (ก) Rh6G



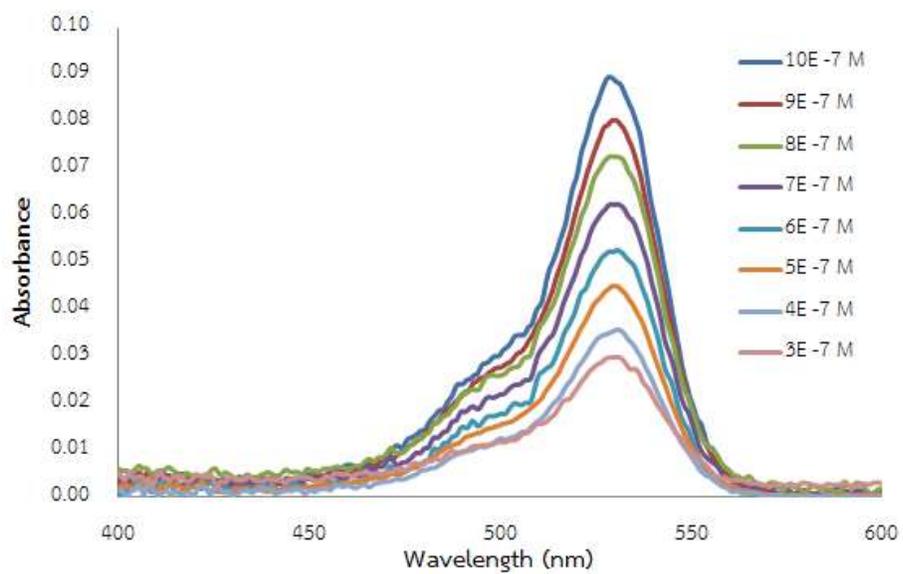
การทดลองครั้งที่ 1 (ข) RhB



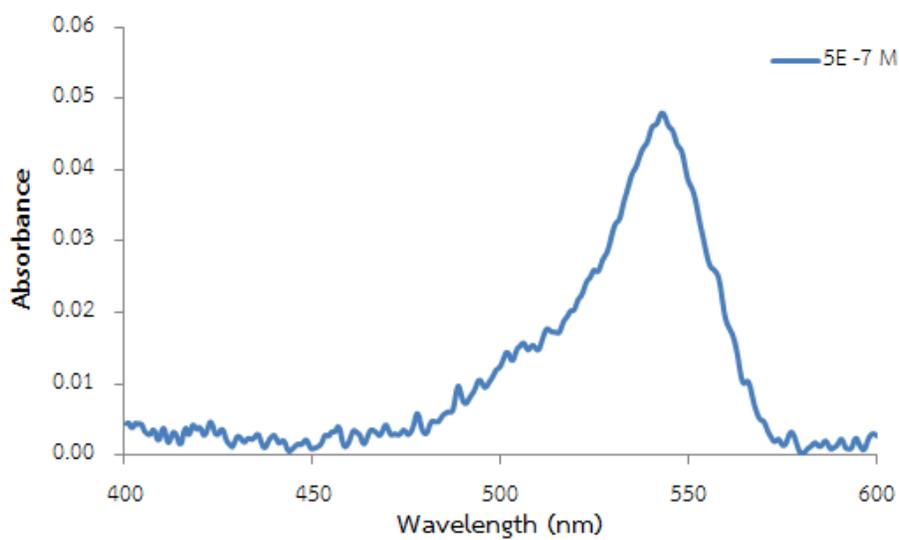
การทดลองครั้งที่ 2 (ก) Rh6G



การทดลองครั้งที่ 2 (ข) RhB



การทดลองครั้งที่ 3 (ก) Rh6G

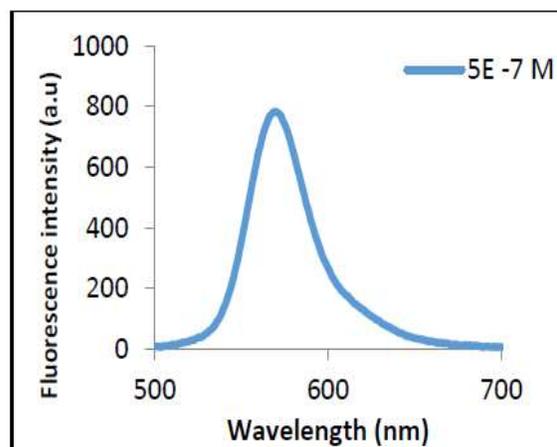
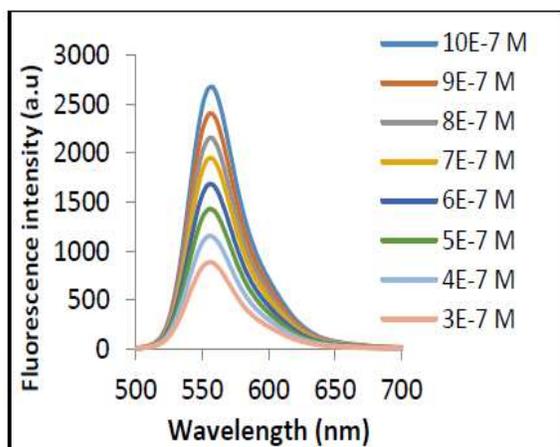


การทดลองครั้งที่ 3 (ข) RhB

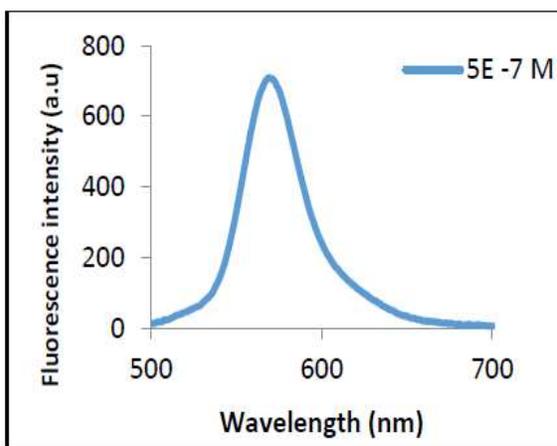
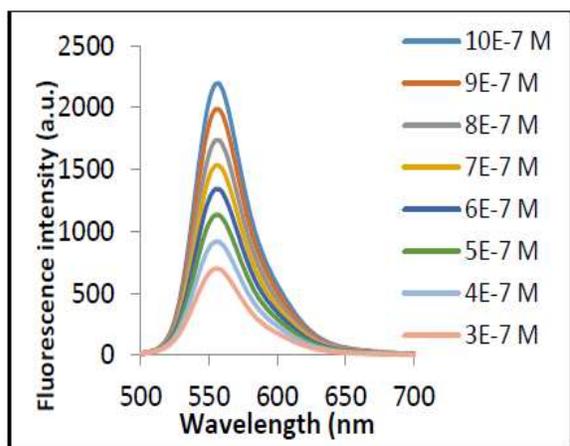
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G และ RhB

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

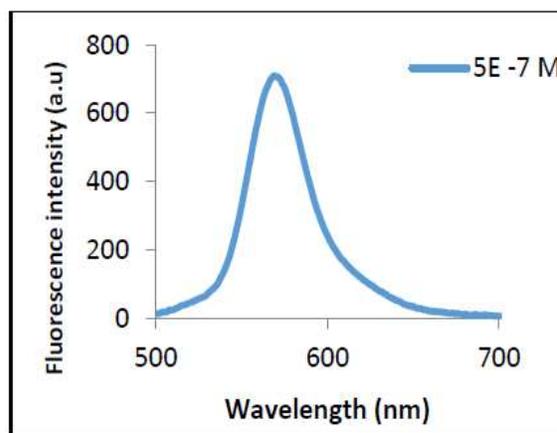
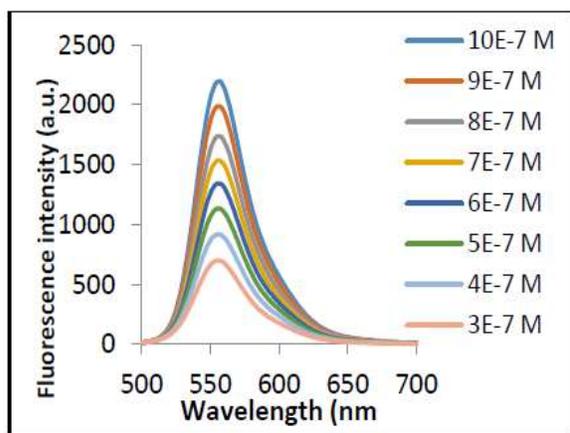
ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ที่มีค่าความเข้มข้น 3×10^{-7} M ถึง 10×10^{-7} M แสดงดังรูป 4.2 จากผลการทดลองพบว่าสารละลาย Rh6G มีการเปล่งแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 500 - 700 นาโนเมตร โดยมีพีคของการเปล่งแสงสูงสุดเท่ากับ 557 นาโนเมตร และเมื่อนำค่าพีคการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์กับความเข้มข้นจะแสดงดังรูปที่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



การทดลองครั้งที่ 1

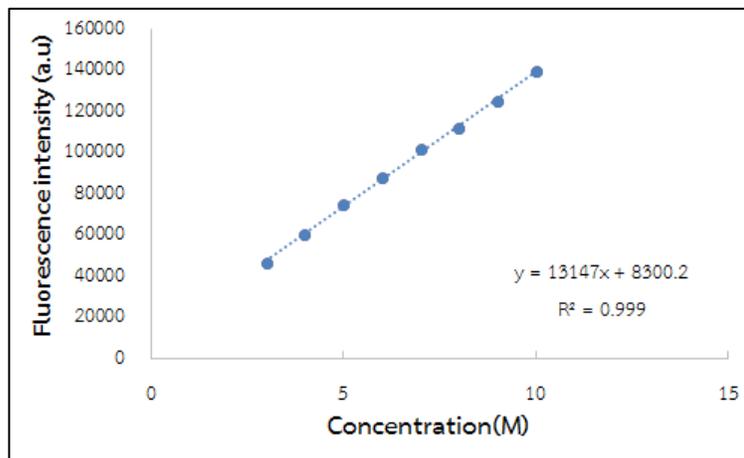


การทดลองครั้งที่ 2

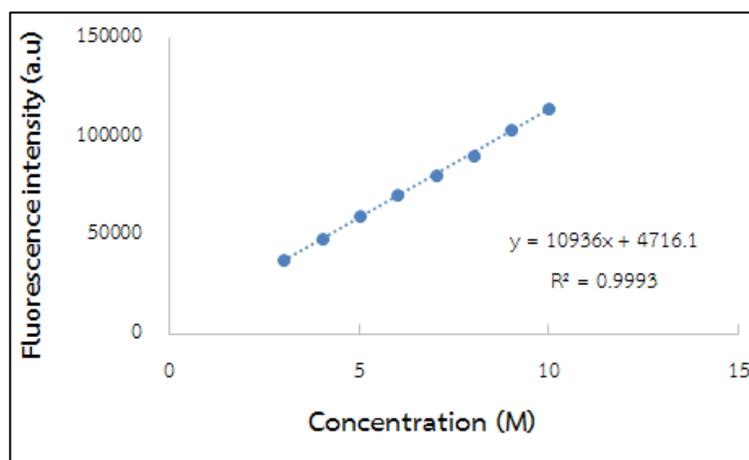


การทดลองครั้งที่ 3

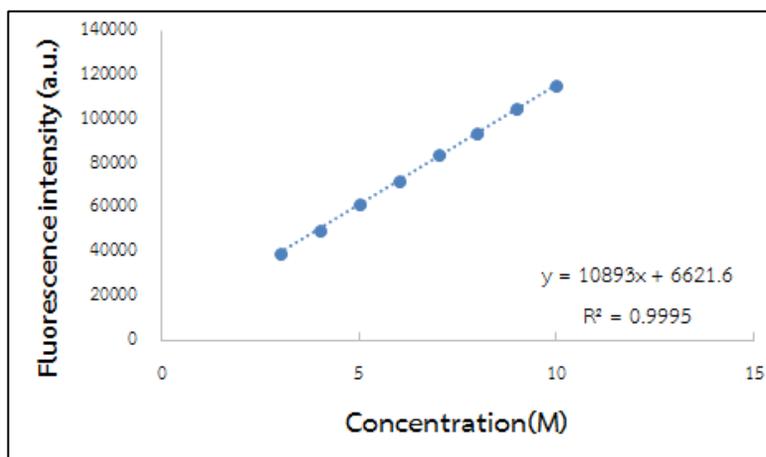
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G และ RhB



ครั้งที่ 1



ครั้งที่ 2



ครั้งที่ 3

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพีการเปล่งปสงปละความเข้มข้นของสารละลาย

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

เมื่อนำผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสง มาวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้กราฟของการเปล่งแสงและค่าการดูดกลืนแสง เพื่อนำมาคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G ได้ค่าดังตาราง 4.1 - 4.3

ตารางที่ 4.1 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G จากการทดลองครั้งที่ 1

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

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

ตารางที่ 4.2 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G จากการทดลองครั้งที่ 2

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

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

ตารางที่ 4.3 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G จากการทดลองครั้งที่ 3

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

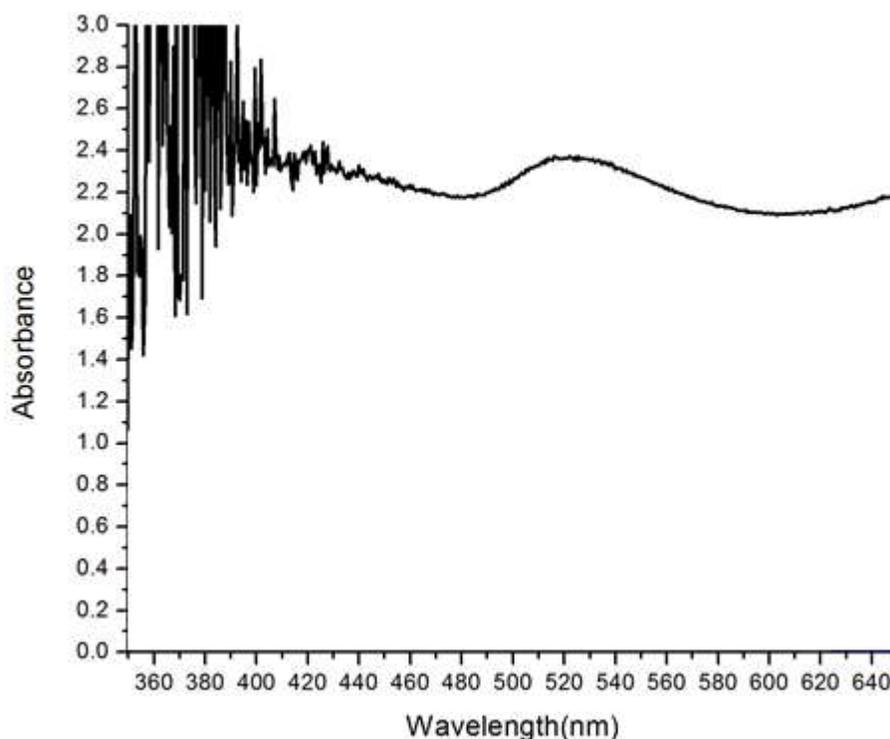
หมายเหตุ OD_R ค่าค่าที่ Integrated การดูดกลืนในช่วง 510-552 nm เท่ากับ 1.37 และ Integrated fluorescence สารอ้างอิงเท่ากับ 41,599.78

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

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

4.2.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง

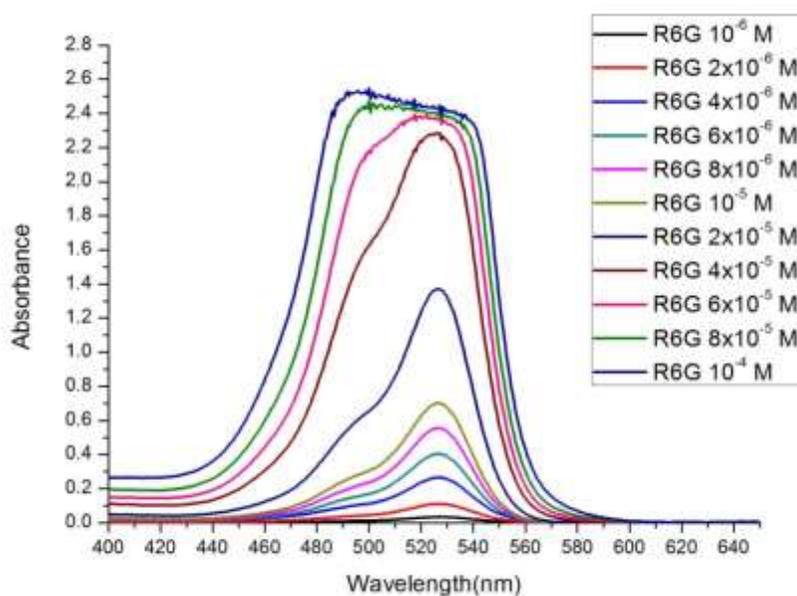
จากการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารนาโนพลาเดียมเคลือบทองคำ (AuPd) ที่มีค่าความเข้มข้น 3.6×10^{-4} M พบว่าได้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 4.4 ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าสารอนุภาค AuPd มีค่าการดูดกลืนแสงสูงถึง 2.36 ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร



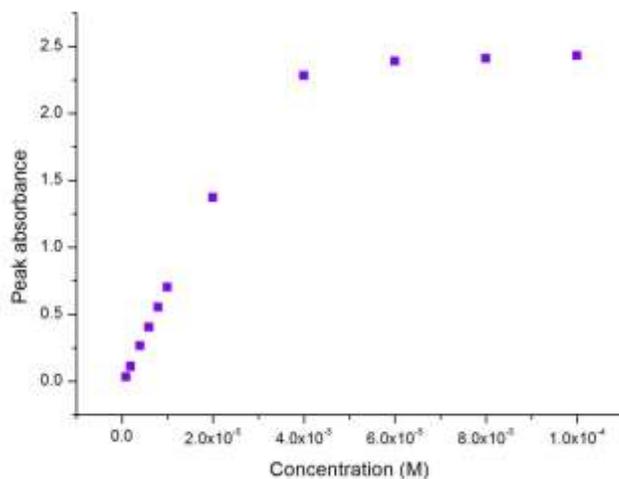
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาค AuPd

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

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



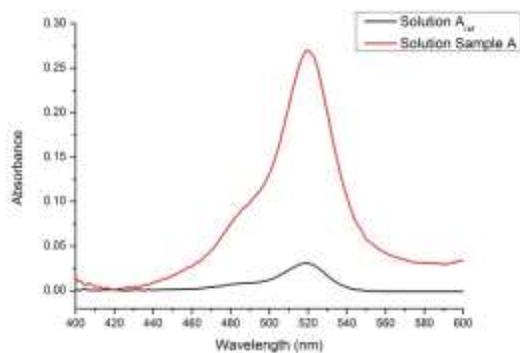
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G



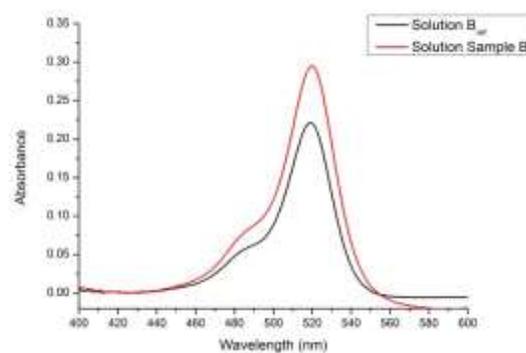
รูปที่ 4.6 ค่าพีคสูงสุดของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G

4.2.2 ผลการศึกษาสเปกตรัมของแสงของสารละลายของสารละลายสีที่สัมพันธ์กับสารละลายของอนุภาคโลหะนาโน

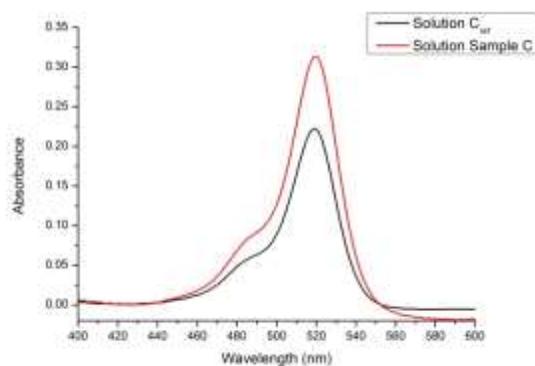
จากการศึกษาสเปกตรัมของแสงของสารละลายของสารละลายสีที่สัมพันธ์กับสารละลายของอนุภาคโลหะนาโนที่ถูกจัดเตรียมขึ้น 5 เงื่อนไข ตามรายละเอียดในการทดลองที่ 2 หัวข้อ 3.4 ได้ผลดังนี้



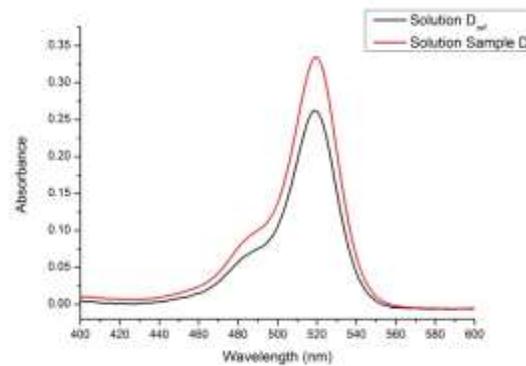
สารตัวอย่าง A



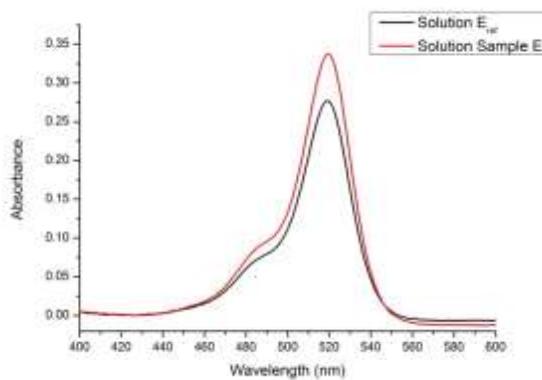
สารตัวอย่าง B



สารตัวอย่าง C



สารตัวอย่าง D

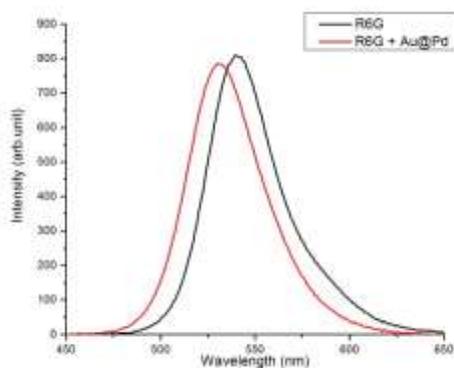


สารตัวอย่าง E

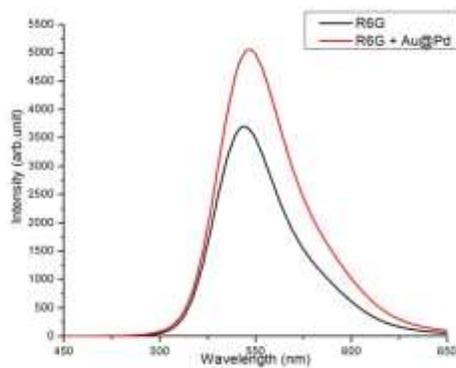
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G กับสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd

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

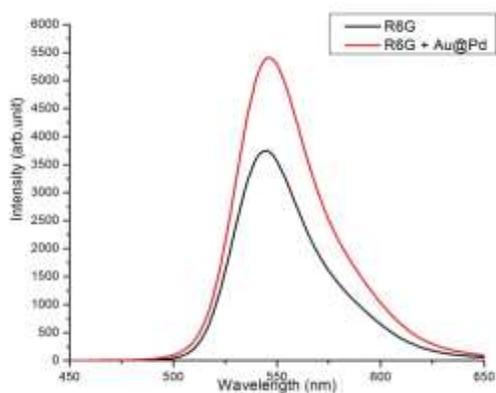
สเปกตรัมการเปล่งของสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน Au/Pd แสดงดังรูป 4.8 จากกราฟจะเห็นว่าสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน AuPd มีการเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่น 450 – 650 นาโนเมตร สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารผสม A มีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ต่ำกว่าสารละลาย Aref (Rh6G) และกรณีสารตัวอย่าง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



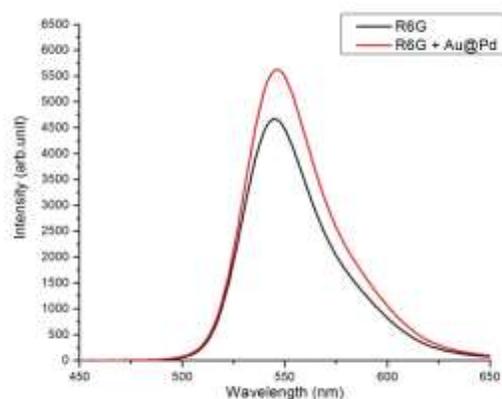
สารตัวอย่าง A



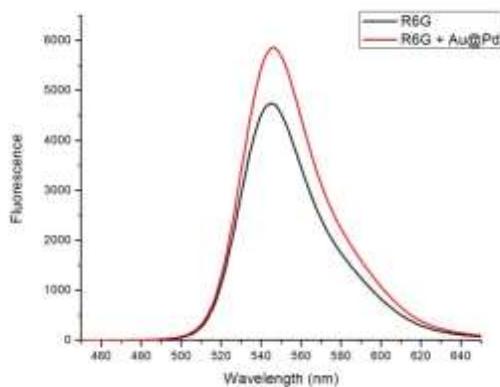
สารตัวอย่าง B



สารตัวอย่าง C

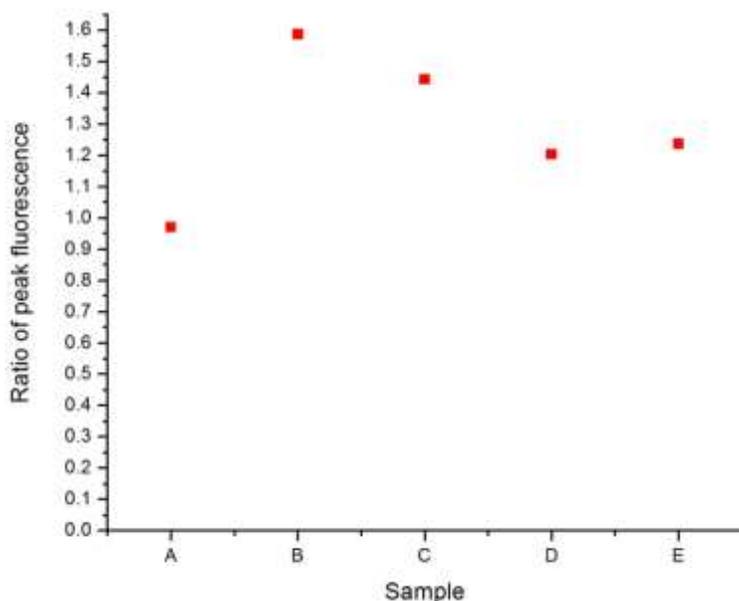


สารตัวอย่าง D



สารตัวอย่าง E

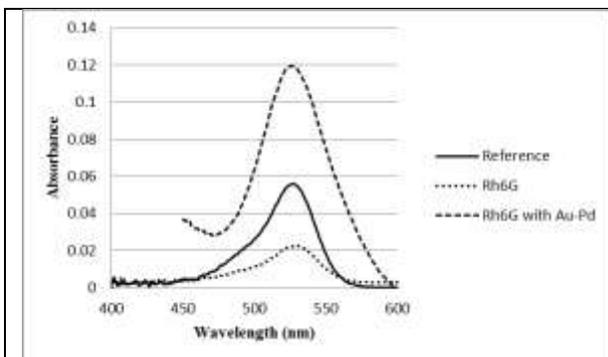
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ผสมกับอนุภาคนาโน Au/Pd เทียบกับ สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G



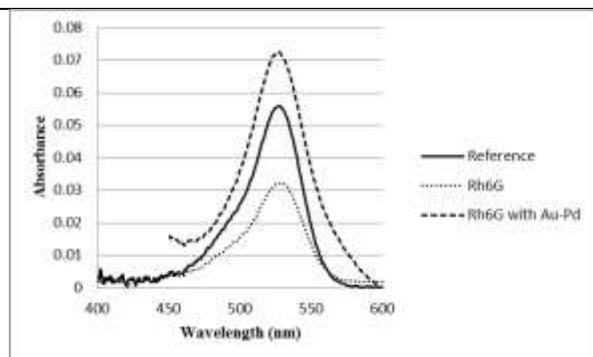
รูปที่ 4.9 อัตราส่วนแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ AuPd + Rh6G : Rh6G

4.3 ผลการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rhodamine 6G ผสม AuPd โดยการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert 9.0.3

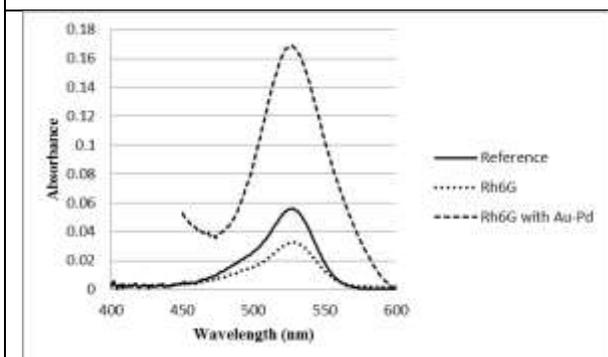
จากการนำสารละลาย Rh6G และสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับ AuPd ซึ่งเตรียมในหัวข้อ 3.4 (การทดลองที่ 3) มาวัดสเปกตรัมการดูดกลืนได้ผลดังรูป 4.10 จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาค AuPd มีค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่เติมอนุภาค AuPd ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาค AuPd มีการดูดกลืนแสงในย่านที่ใกล้เคียงกันกับสารละลาย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



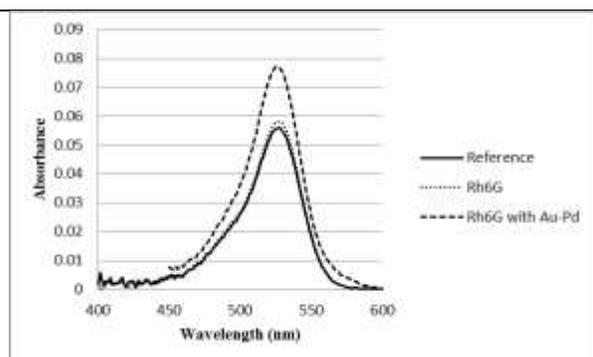
ตัวอย่างที่ 1



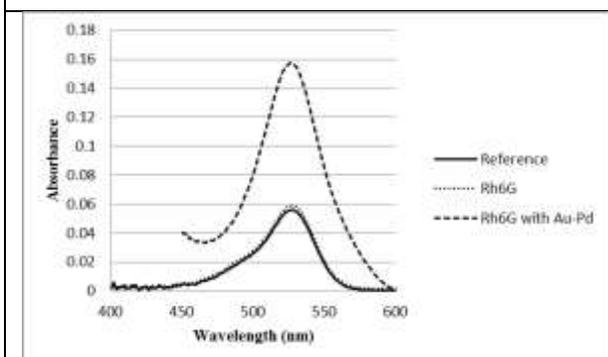
ตัวอย่างที่ 2



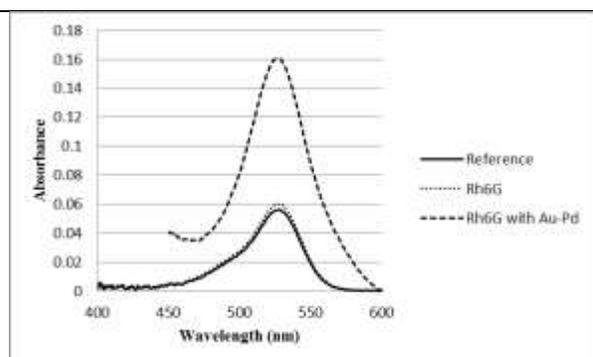
ตัวอย่างที่ 3



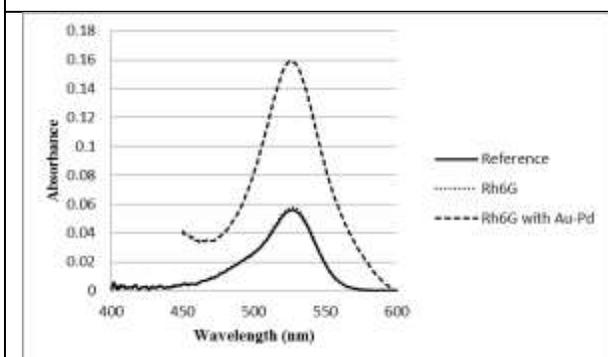
ตัวอย่างที่ 4



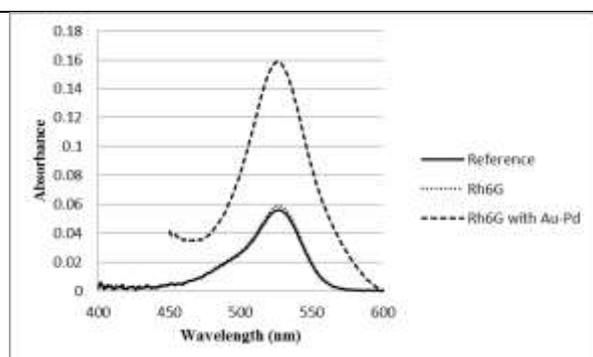
ตัวอย่างที่ 5



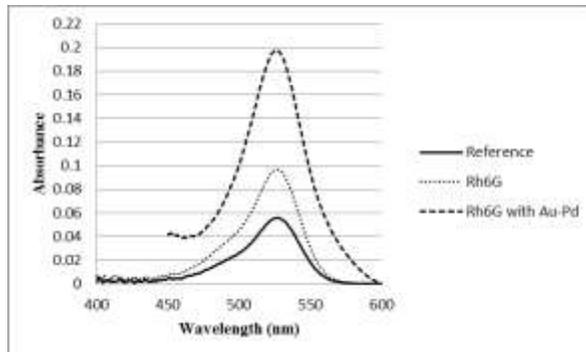
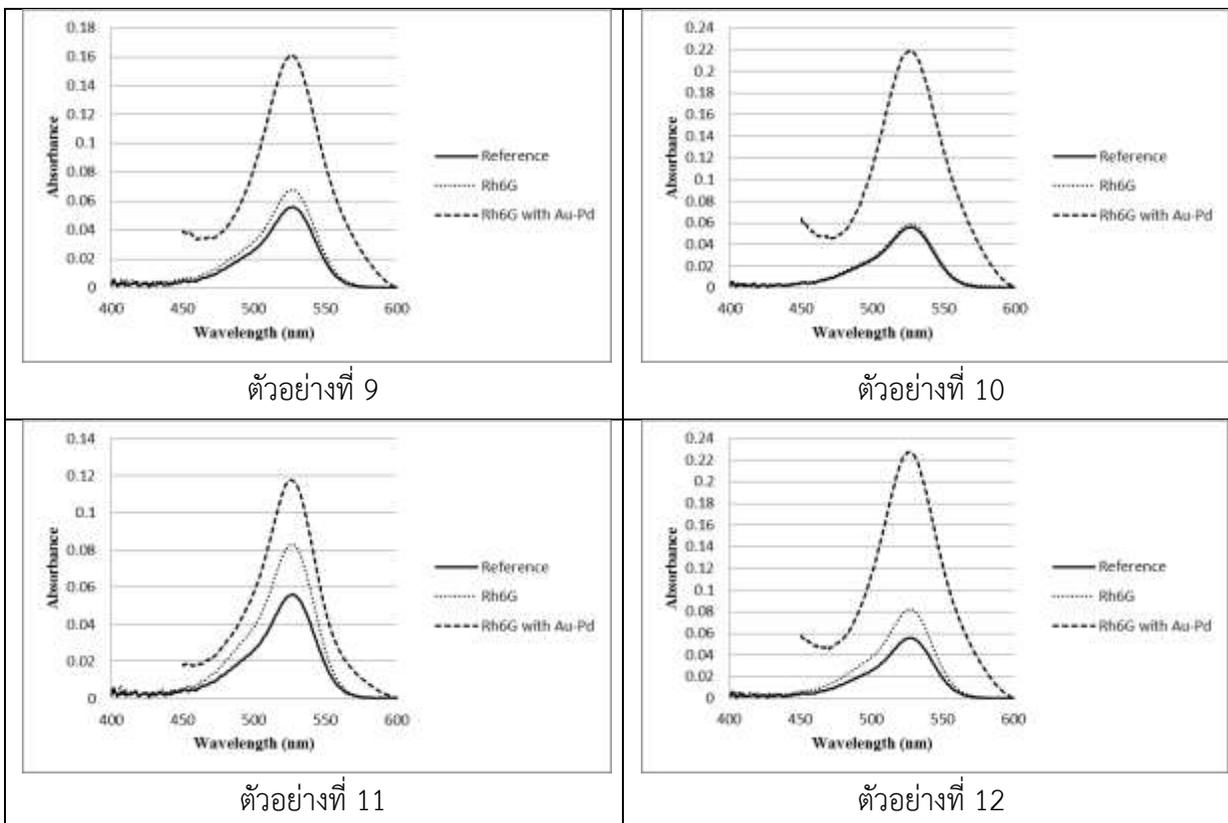
ตัวอย่างที่ 6



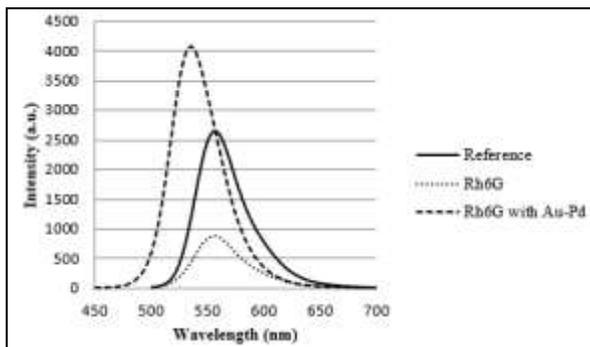
ตัวอย่างที่ 7



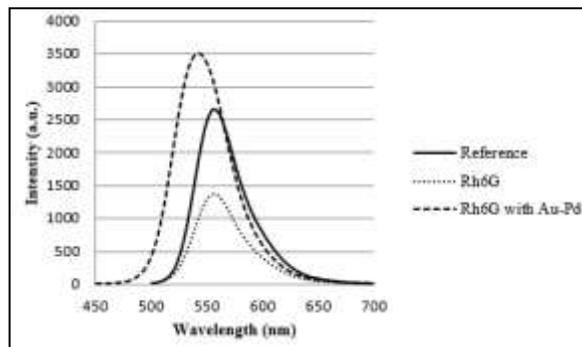
ตัวอย่างที่ 8



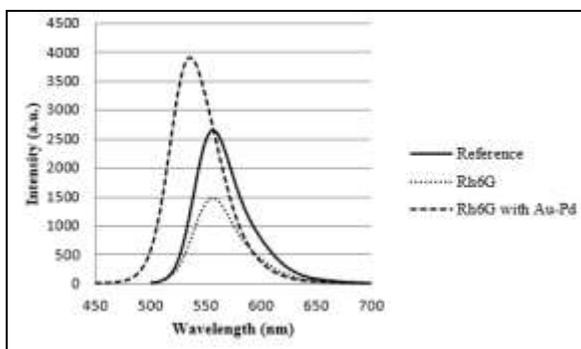
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G และสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาค AuPd



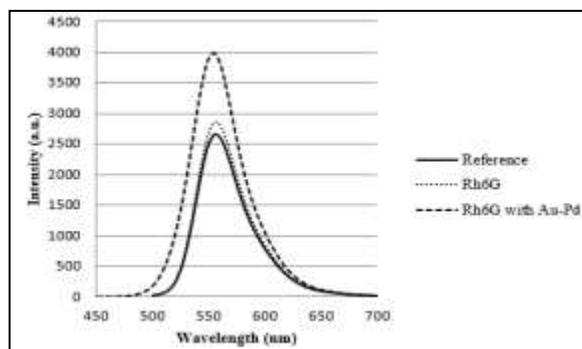
ตัวอย่างที่ 1



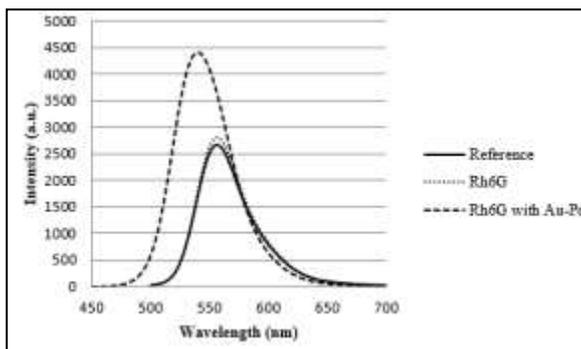
ตัวอย่างที่ 2



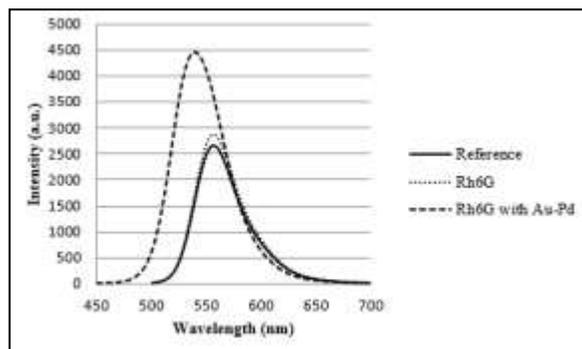
ตัวอย่างที่ 3



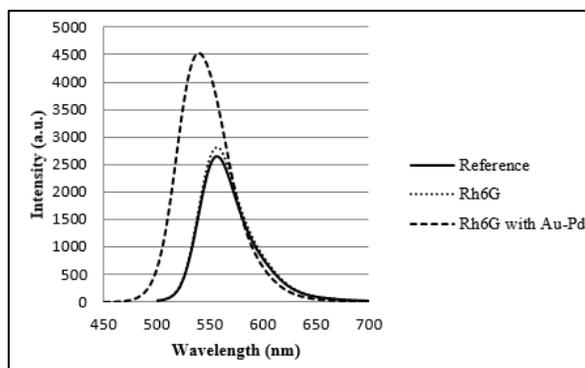
ตัวอย่างที่ 4



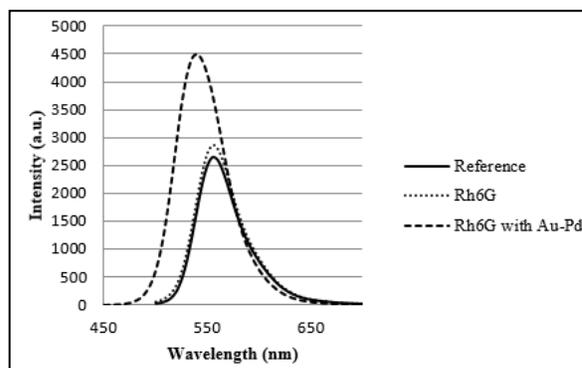
ตัวอย่างที่ 5



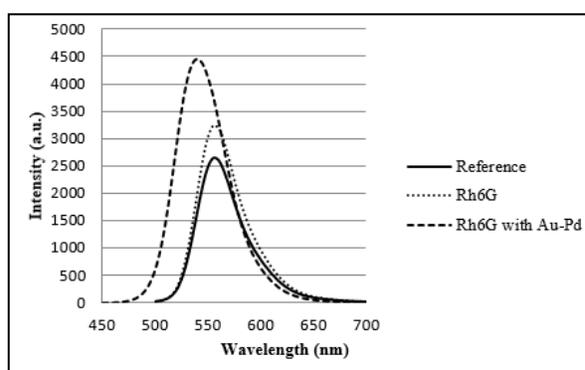
ตัวอย่างที่ 6



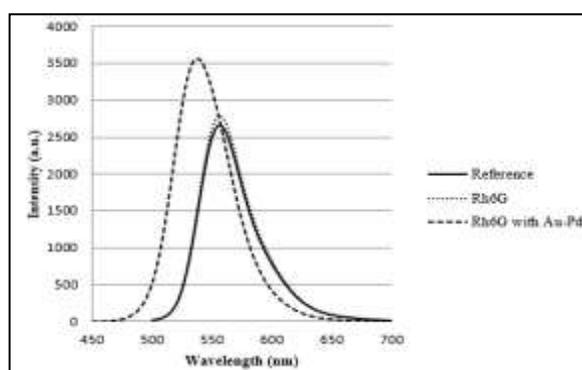
ตัวอย่างที่ 7



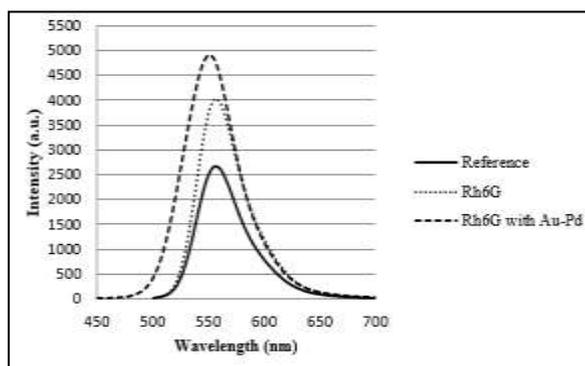
ตัวอย่างที่ 8



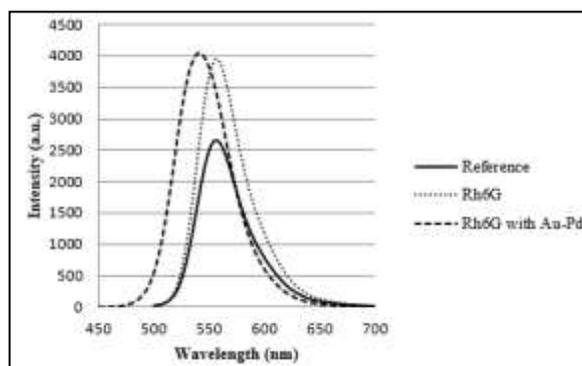
ตัวอย่างที่ 9



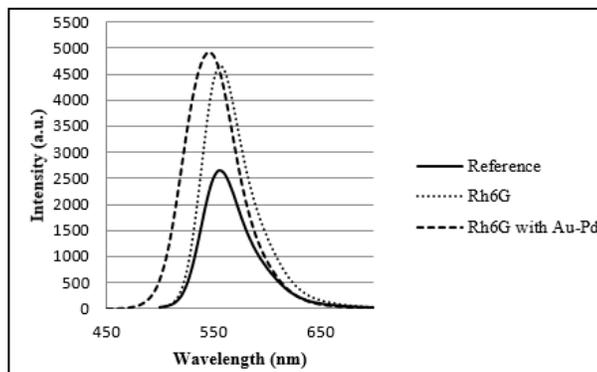
ตัวอย่างที่ 10



ตัวอย่างที่ 11



ตัวอย่างที่ 12



ตัวอย่างที่ 13

รูปที่ 4.11 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ Rh6G และสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาค AuPd

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

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย

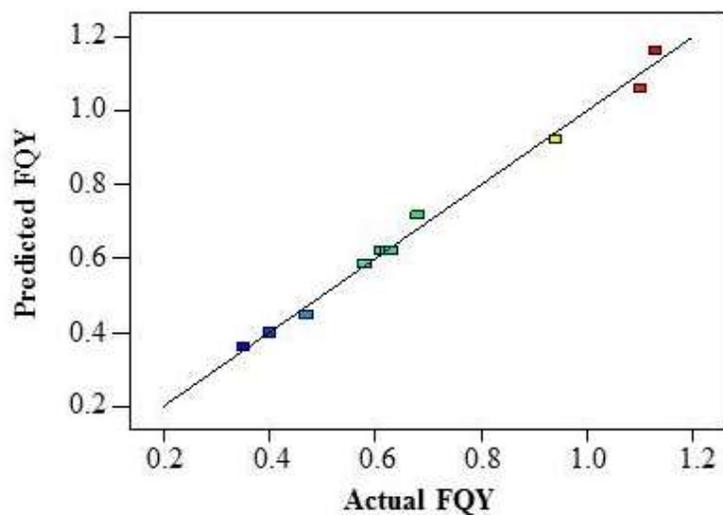
No.	Concentration in Molar		Absorbance (A)		Integrated Fluorescence (I)		Refractive Index (n)		ϕ_f	
	Rh6G	Au-Pd NRs	Rh6G	Mix	Rh6G	Mix	Rh6G	Mix	Rh6G	Mix
1	3.53×10^{-7}	7.17×10^{-5}	0.022	0.119	50302.005	228739.129	1.3312	1.3319	0.78	0.67
2	5.50×10^{-7}	2.60×10^{-5}	0.032	0.071	82603.744	224184.172	1.3322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

หมายเหตุ ค่าพีคการดูดกลืนแสงของสารอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 0.055 และอินทิเกรตสเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์มีค่าเท่ากับ 149435.761

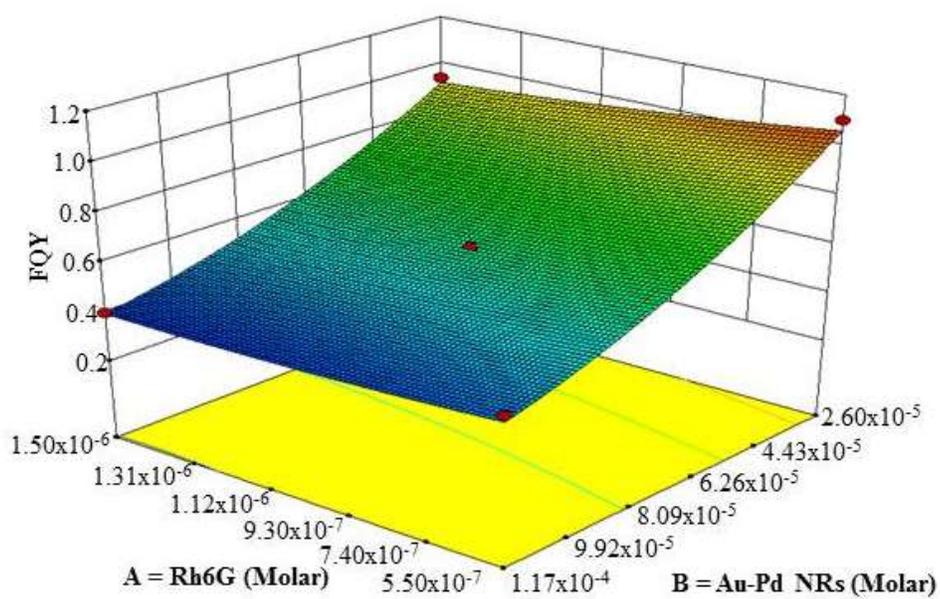
เมื่อนำค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ได้จากการทดลอง (Actual) กับค่าที่คาดการณ์ได้ (Predict) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) มาพลอตกราฟความสัมพันธ์ได้ผลดังรูปที่ 4.12 และสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์กับความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G (ตัวแปร A) และอนุภาค AuPd (ตัวแปร B) แสดงดังนี้

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

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของอนุภาค AuPd จะส่งผลต่อค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์มากกว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 (ก) ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ ค่าความเข้มข้นของสาร Rh6G และอนุภาค AuPd

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับแบบจำลอง

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

เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสมการที่ (4.1) ผู้วิจัยได้ทดลองเตรียมสารตัวอย่างเพิ่มเติมอีกจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยมีค่าความเข้มข้นของสารแตกต่างกันไปจากเงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 4.4 และทำการทดลองเพื่อหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G ผสมอนุภาค AuPd ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณด้วยสมการ

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

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ได้จากการทดลองและจากสมการมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า 2% ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสมการที่จำลองได้มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ได้จริง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

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

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาและทดลองวัดหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารละลาย Rh6G ที่ผสมกับอนุภาคนาโนโลหะ AuPd ที่ความเข้มข้นต่างๆนั้นสามารถเป็นประโยชน์ต่อกับผู้วิจัยที่จะวิเคราะห์และพัฒนาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ต่อไป ดังนี้

1. ในการทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนและสเปกตรัมการเปล่งแสงควรจะควบคุมระบบให้ใกล้เคียงกัน เช่น อุณหภูมิ ฯลฯ
2. เทคนิค Relative สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารอื่นๆได้

บทที่ 6

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

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

เอกสารอ้างอิง

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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