

การศึกษาสมบัติทางแสงของสารสีย้อมโรดามีน 6จีที่ผสมกับแท่งนาโนทองคำ
ที่ถูกเคลือบด้วยแพลเลเดียมและการประยุกต์ใช้งาน

INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES OF RHODAMINE 6G DYE
MIXED WITH Au COATED Pd NANORODS
AND THEIR APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-SC-D-030-045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES OF RHODAMINE 6G DYE
MIXED WITH Au COATED Pd NANORODS
AND THEIR APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

KMITL-2019-SC-D-030-045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติทางแสงของสารสีย้อมโรดามีน 6จีที่ผสมกับแท่งนาโนทองคำที่ถูกเคลือบด้วยแพลเลเดียมและการประยุกต์ใช้งาน
ชื่อนักศึกษา	นายเอกชัย รัมมะรัตน์
รหัสประจำตัว	58605017
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์

บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้สารสีย้อมโรดามีน 6จี (R6G) ที่ผสมกับอนุภาคทองคำเคลือบแพลเลเดียม (Au-Pd) ส่วนแรกเราได้ใช้วิธีการตอบสนองแบบพื้นผิวเพื่อศึกษาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ (FQY) โดย R6G และ Au-Pd มีความเข้มข้น 3.53×10^{-7} ถึง 1.7×10^{-6} โมลาร์ จากผลการทดลองพบว่าค่า FQY นั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของ R6G และ Au-Pd ความสัมพันธ์ระหว่าง FQY และความเข้มข้นได้รับการยืนยันโดยกราฟพื้นผิวการตอบสนอง พบว่าความแตกต่างระหว่างการทดสอบและการคำนวณน้อยกว่า 2% ในส่วนต่อมาได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างของ R6G ให้เป็นอนุพันธ์ของ R6G และนำไปผสมกับ Au-Pd เพื่อนำไปตรวจจับไอออนปรอท โดยความเข้มข้นของอนุพันธ์ R6G มีค่า 4.4×10^{-6} โมลาร์และ Au-Pd มีความเข้มข้น 10^{-5} โมลาร์ จากนั้นนำไปตรวจจับไอออนปรอทที่ความเข้มข้น 0-15.5 ไมโครโมลาร์ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ เมื่อนำไปคำนวณหาหาคัดจำกัดในการตรวจจับไอออนปรอทพบว่ามีขีดจำกัดที่ 20.6 นาโนโมลาร์ ในส่วนสุดท้ายได้นำ Au-Pd ไปเพิ่มประสิทธิภาพของ R6G ในการตรวจจับลายนิ้วมือแฝงด้วยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์โดยภาพที่ได้จะถูกวิเคราะห์ความเข้มแสงด้วยโปรแกรม Image J จากการศึกษาพบว่า Au-Pd สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของ R6G ได้

คำสำคัญ : ขีดจำกัด ฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ ลายนิ้วมือแฝง อนุภาคทองคำเคลือบแพลเลเดียม ไอออนปรอท

Thesis Title	Investigation of optical properties of Rhodamine 6G dye mixed with Au coated Pd nanorods and their applications
Student Name	EKKACHAI RAMMARAT
Student ID	58605017
Degree	Doctor of Philosophy in Applied Physics
Department	Physics
Year	2019
Thesis Advisor	Dr.WITOON YINDEESUK
Thesis Co-advisor	Assoc. Prof. PATTAREEYA DAMRONGSAK

Abstract

In this research, the application of Rhodamine 6G (R6G) dyes was mixed with Au-Pd core-shell nanorods (Au-Pd). Firstly, we have applied a response surface approach to study the fluorescence quantum yield (FQY) of R6G dyes mixed with Au-Pd. The FQYs have been measured for the R6G dyes which resulted in varying from 3.53×10^{-7} to 1.70×10^{-6} M followed by the Au-Pd from 7.06×10^{-6} to 1.36×10^{-4} M. The experimental results showed that the FQY depends notably on the proportions of R6G dyes and Au-Pd. The relationship between the FQY and the concentrations has also been confirmed and validated by a response surface plot. It was found out that the discrepancy of result between the experiment and the calculations was less than 2%. Secondly, the process of R6G dyes synthesis has been synthesized of its chemical structure into R6G derivative. The dye molecules were bounded with the surface of Au-Pd in order to detect the mercury ions in which R6G dyes and Au-Pd particle have concentration of 4.4×10^{-6} M and 10^{-5} M respectively. Fluorescence emission of the sensor was detected with the luminescence spectrophotometer under 0-15.5 μ M of mercury ions test condition. The experimental results demonstrated that fluorescence intensity in one of the studied sensors is directly proportional to the mercury-ion concentration which varied from 0-15.5 μ M. The detection limit of mercury ions is as low as 20.6 nM. Lastly, Au-Pd was added to increase the efficiency of R6G dyes for detecting the latent fingerprints and it was observed in microscope. The obtained image from microscope was analyzed by using the Image J program. Based on this studies. It was found out that the added Au-Pd was able to increase the efficiency of R6G dyes.

Keywords: fingerprints, fluorescence quantum yield, limit of detection, mercury ions, Au-Pd core-shell nanorods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.วิฑูรย์ ยืนดีสุข อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาทั้งเรื่องการทำวิจัย และการใช้ชีวิตในการเรียนระดับปริญญาเอก รวมทั้งตรวจรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้เพื่อความถูกต้องและสมบูรณ์ที่สุด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วมที่คอยให้คำแนะนำและปรึกษาอย่างใกล้ชิดทั้งแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ และการจัดหาอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ด้วย รวมทั้งตรวจรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้เพื่อความถูกต้องและสมบูรณ์ที่สุด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นันทินิตย์ วานิชวิชะ และ ดร.พัฒนาวิศว์ สว่างลาม อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัย และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และอุปกรณ์รวมทั้งเครื่องมือต่างๆในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ศศิวิมล ไกรทอง ที่ให้คำแนะนำและสอนการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ นักวิจัยหลังปริญญาเอก ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กฤษกร โล่เจริญรัตน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการยืมอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้รวมทั้งคอยให้คำแนะนำในการเขียนบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์ลงวารสารทางวิชาการรวมทั้งเสียสละเวลามาเป็นกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์สุรชาติ กมลดีถิก อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกุลการะเวก อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้โปรแกรมในการทำงานวิจัย และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย รวมถึงให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ในการทำงานวิจัยและให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เสียสละเวลาเป็นกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เสียสละเวลาเป็นกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษาและเงินทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณหน่วยงานบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในงานด้านเอกสาร

สุดท้ายนี้ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ นายสมชาย รัมมะรัตน์และนางพุลสุข รัมมะรัตน์ ผู้เป็นบิดาและมารดาที่คอยให้กำลังใจและคอยสนับสนุนการเรียนในครั้งนี้ และขอขอบคุณบุคคลในครอบครัวที่ให้ความช่วยเหลือทุกๆด้าน รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำให้คำปรึกษาตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์

นายเอกชัย รัมมะรัตน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงาน 36 เดือน.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 สารเรืองแสง.....	7
2.1.1 สารเรืองแสงชนิดอนินทรีย์ (Inorganic dyes).....	7
2.1.2 สารเรืองแสงชนิดอินทรีย์ (Organic dyes).....	7
2.1.3 สารเรืองแสงชนิดควอนตัมดอท (Quantum dots).....	8
2.2 การดูดกลืนแสง.....	8
2.3 การเปล่งแสง.....	9
2.4 ฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ (FQY)	13
2.5 การหักเหแสง.....	15
2.6 อนุภาคนาโนโลหะ.....	16
2.6.1 ปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์.....	18
2.6.2 ผลกระทบของอนุภาคนาโนโลหะที่มีต่อสีย้อมเรืองแสง	18
2.7 วิธีการแสดงผลตอบสนองโครงสร้างพื้นผิว (RSM).....	21
2.7.1 Central Composite Design (CCD).....	23
2.8 พรอท.....	23
2.9 กลไกการทำงานของเซนเซอร์ทางเคมี.....	26
2.9.1 ซีดจำกัดการตรวจหา.....	27
2.9.2 การคำนวณหาค่าขีดจำกัด.....	27
2.10 ลายนิ้วมือแฝง.....	28
2.10.1 ลายนิ้วมือ.....	28
2.10.2 การเกิดลายนิ้วมือ.....	29
2.10.3 ส่วนประกอบของลายนิ้วมือ.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10.4 ประเภทลายนิ้วมือ.....	30
2.10.5 การตรวจลายนิ้วมือ.....	32
2.11 ทบทวนวรรณกรรม.....	36
2.11.1 การหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยี่ลด์.....	36
2.11.2 การใช้วิธีการตอบสนองโครงสร้างพื้นผิว (RSM) ในงานวิจัย.....	37
2.11.3 การตรวจจับไอออนโลหะหนัก.....	38
2.11.4 การตรวจจับลายนิ้วมือแฝง.....	40
บทที่ 3 การหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยี่ลด์.....	42
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	42
3.1.1 สารเรืองแสง.....	42
3.1.2 อนุภาคนาโนโลหะ.....	42
3.1.3 น้ำดีไอ (Deionized water, DI).....	43
3.2 การจัดเตรียมระบบวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยี่ลด์.....	44
3.2.1 ระบบวัดการดูดกลืนแสง.....	44
3.2.2 ระบบวัดการเปล่งแสง.....	46
3.2.3 การวัดค่าดัชนีหักเหแสง.....	48
3.3 การทดลอง.....	48
3.3.1 ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของสารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสมกับ AuPd.....	48
3.3.2 การออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3.....	48
3.4 ผลการทดลอง.....	49
3.4.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสง ของสารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสมกับ AuPd.....	49
3.4.2 ผลการศึกษาค่า FOY ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert 9.0.3.....	56
บทที่ 4 การตรวจจับโลหะหนัก.....	80
4.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	80
4.1.1 Rhodamine 6G hydrazide (R6G-hydrazide)	80
4.1.2 เมทานอล (Methanol).....	80
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์.....	81
4.2.1 คิวเวตต์ควอตซ์ (Quartz cuvette).....	81
4.2.2 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์.....	81
4.3 การทดลอง.....	82
4.3.1 ศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G- hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 ศึกษาสารละลาย R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ในการตรวจจับโลหะไอออนหนัก.....	82
4.3.3 ศึกษาหาค่าความไวในการตรวจจับไอออนปรอท.....	83
4.4 ผลการทดลอง.....	84
4.4.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	84
4.4.2 ผลการศึกษาสารละลาย R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ในการตรวจจับโลหะไอออนหนัก.....	85
4.4.3 ผลการศึกษาหาค่าความไวในการตรวจจับไอออนปรอท.....	86
บทที่ 5 การตรวจสอบลายนิ้วมือแฝง.....	88
5.1 วัสดุอุปกรณ์.....	88
5.2 การเตรียมลายนิ้วมือแฝง.....	88
5.3 การทดลอง.....	90
5.3.1 ศึกษาระยะเวลาในการเข้สาร R6G และความแตกต่างในการล้างน้ำ DI.....	90
5.3.2 ศึกษาสเปกตรัมแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd.....	91
5.3.3 ศึกษาการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์.....	92
5.4 ผลการทดลอง.....	93
5.4.1 ผลการศึกษาระยะเวลาในการเข้สาร R6G และความแตกต่างในการล้างน้ำ DI.....	93
5.4.2 ผลการศึกษาสเปกตรัมแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd.....	96
5.4.3 ผลการศึกษาการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์.....	98
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	105
6.1 บทสรุป.....	105
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	106
เอกสารอ้างอิง.....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานในหัวข้อที่ 1.....	3
1.2 แผนการดำเนินงานในหัวข้อที่ 2.....	4
1.3 แผนการดำเนินงานในหัวข้อที่ 3.....	4
2.1 ชนิดของลิวินเนสเซนส์ประเภทต่างๆ.....	9
2.2 ค่ามาตรฐานปรอทของคุณภาพน้ำต่างๆ.....	25
3.1 สมบัติของ R6G.....	42
3.2 สมบัติพื้นฐานของ Au-Pd.....	43
3.3 สมบัติพื้นฐานของน้ำ DI.....	44
3.4 ค่าความเข้มข้นของ R6G และ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd.....	48
3.5 ค่าความเข้มข้นของ R6G และ Au-Pd ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert 9.0.3.....	56
3.6 ค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยิลด์ของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd.....	72
3.7 การวิเคราะห์สมการโดย ANOVA	73
3.8 ค่าความเข้มข้นของ R6G และ Au-Pd ที่ใช้ในการตรวจสอบสมการ 3.1	75
3.9 แสดงค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยิลด์ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจากสมการที่ 3.1 ...	79
4.1 คุณสมบัติของเมทานอล.....	81
4.2 ค่าความเข้มข้นของ R6G-hydrazide กับ Au-Pd ที่ผสมกัน.....	82
4.3 โลหะหนักชนิดต่างๆ.....	83
5.1 ระยะเวลาในการแช่สารละลายR6G และความแตกต่างระหว่างการล้างและไม่ล้างน้ำ DI.....	91
5.2 การเตรียมสารละลาย R6G และ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	91
5.3 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์และค่า Gray scale ของลายนิ้วมือ ที่แช่สาร R6G ที่ ระยะเวลา 15 นาที.....	94
5.4 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์และค่า Gray scale ของลายนิ้วมือ ที่แช่สาร R6G ที่ระยะเวลา 30 นาที.....	94
5.5 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์และค่า Gray scale ของลายนิ้วมือ ที่แช่สาร R6G ที่ระยะเวลา 60 นาที.....	95
5.6 แสดงค่าความแตกต่างของ Gray scale ของสารสี้อม R6G ที่เวลาต่างๆ.....	95
5.7 แสดงค่าการเปล่งแสงสูงสุดของสารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd.....	97
5.8 แสดงค่าการเปล่งแสงสูงสุดของลายนิ้วมือที่แช่สารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd...	98
5.9 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของสาร R6G.....	98
5.10 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง A.....	99
5.11 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง B.....	99
5.12 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง C.....	100
5.13 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง D.....	100
5.14 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง E.....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.15 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง F.....	101
5.16 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง G.....	102
5.17 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง H.....	102
5.18 แสดงค่าความแตกต่างของ Gray value ของภาพถ่ายลายนิ้วมือที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์.....	103



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย	5
2.1 การดูดกคืนแสง.....	8
2.2 แผนภาพแสดงทิศทางการหมุนของอิเล็กทรอนิกส์ในโมเลกุล.....	10
2.3 แผนภาพแสดงการดูดกคืนและการปลดปล่อยพลังงานรูปแบบต่างๆ.....	11
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการฟลูออเรสเซนซ์กับความเข้มข้นของสาร.....	12
2.5 ภาพแสดงการดูดกคืนแสงและการเปล่งแสง.....	13
2.6 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกคืนแสงในการหาค่า OD	14
2.7 ตัวอย่างสเปกตรัมการเปล่งแสงในการหาค่าพื้นที่ใต้กราฟ (I).....	15
2.8 การหักเหแสง.....	15
2.9 แนวการเดินทางของแสงที่เกิดจากการหักเหแสงผ่านตัวกลาง	
(ก) แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำไปหาตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหสูง.....	16
(ข) แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหสูงไปหาตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำ.....	16
2.10 อนุภาคขนาดนาโน.....	17
2.11 กระบวนการสันปรั้งของพลาสมอนสำหรับอนุภาคทรงกลม.....	18
2.12 (ก) ความเข้มข้นมาก.....	19
(ข) ความเข้มข้นปานกลาง.....	19
(ค) ความเข้มข้นน้อย.....	19
2.13 การถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคนาโนโลหะไปยังสารสีย้อมเมื่อระยะห่างระหว่างโมเลกุลทั้งสองมีระยะห่างมาก.....	19
2.14 การถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคนาโนโลหะไปยังสารสีย้อมเมื่อระยะห่างระหว่างโมเลกุลทั้งสองมีระยะห่างน้อย.....	20
2.15 การถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคนาโนโลหะไปยังสารสีย้อมเมื่อระยะห่างระหว่างโมเลกุลทั้งสองมีระยะห่างปานกลาง(เหมาะสม).....	19
2.16 ภาพ 3 มิติของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว.....	22
2.17 Central composite design สำหรับ 2 ตัวแปร.....	23
2.18 วัฏจักรการปนเปื้อนของปรอทในสิ่งแวดล้อมประเภทต่างๆ.....	24
2.19 โครงสร้างของฟลูออโรฟอร์และไอโอโนฟอร์บางชนิด.....	26
2.20 โครงสร้างของเซนเซอร์ทางเคมีบางชนิด.....	26
2.21 กระบวนการเปิดและปิดวง spiro lactam.....	27
2.22 ตัวอย่างการพิทกราฟในการคำนวณค่าขีดจำกัด.....	28
2.23 ตัวอย่างลายนิ้วมือ.....	28
2.24 ตัวอย่างองค์ประกอบลายนิ้วมือที่เป็นลักษณะทั่วไป.....	29
2.25 (ก) ลายนิ้วมือประเภทโค้งราบ (Plain arch)	30
(ข) ลายนิ้วมือประเภทโค้งกระโจม (Tented arch)	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 (ก) ลายนิ้วมือประเภทมัดหวายปัดขวา (Right slant loop or radial loop)	30
(ข) ลายนิ้วมือประเภทมัดหวายปัดซ้าย (Left slant loop or ulnar loop).....	30
(ค) ลายนิ้วมือประเภทมัดหวายคู่หรือมัดหวายแฝด(Double loop or Twin loop).....	30
2.27 (ก) ลายนิ้วมือประเภทกันหอยธรรมดา (Plain whorl)	31
(ข) ลายนิ้วมือประเภทกันหอยกระเป๋ากลาง (Central pocket loop whorl)	31
(ค) ลายนิ้วมือประเภทกันหอยกระเป๋าข้าง (Lateral pocket loop)	31
(ง) ลายนิ้วมือประเภทซับซ้อน (Accidental whorl)	31
2.28 การตรวจลายนิ้วมือด้วยการปิดฝุ่น.....	32
2.29 ตู้อบไอโอดีน (Iodine fuming cabinet).....	34
2.30 การใช้การระเหยจากกาว (Super glue).....	34
2.31 การลอกลายนิ้วมือด้วยเทปกาว.....	30
2.32 (ก) เครื่องโพลีไลท์ (Polilight).....	31
(ข) ภาพที่ได้จากการฉายแสงเลเซอร์.....	31
3.1 โครงสร้างของโรดามีน 6จี.....	42
3.2 (ก) อนุภาคนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียม.....	43
(ข) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Au-Pd.....	43
3.3 โครงสร้างทางเคมีของน้ำ DI.....	43
3.4 แผนภาพระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสง.....	44
3.5 ระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสง.....	45
3.6 สเปกตรัมแสงของหลอดไฟทั้งสแตนด์.....	45
3.7 อุปกรณ์จับยึดสายใยแก้วนำแสง.....	46
3.8 แผนภาพระบบวัดการเปล่งแสงของสารละลาย.....	46
3.9 ระบบวัดการเปล่งแสงของสารละลาย.....	47
3.10 สเปกตรัมแสง LED.....	47
3.11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 1	49
3.12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 2	50
3.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 3	50
3.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 4	51
3.15 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 5	51
3.16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 6	52
3.17 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 1	52
3.18 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 2	53
3.19 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 3	53
3.20 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 4	54
3.21 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 5	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 6	55
3.23 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 1	57
3.24 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 2	58
3.25 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 3	58
3.26 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 4	59
3.27 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 5	59
3.28 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 6	60
3.29 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 7	60
3.30 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 8	61
3.31 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 9	61
3.32 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 10	62
3.33 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 11	62
3.34 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 12	63
3.35 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 13	63
3.36 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 1	64
3.37 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 2	65
3.38 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 3	65
3.39 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 4	66
3.40 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 5	66
3.41 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 6	67
3.42 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 7	67
3.43 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 8	68
3.44 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 9	68
3.45 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 10	69
3.46 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 11	69
3.47 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 12	70
3.48 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 13	70
3.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่คาดการณ์กับค่าที่แท้จริงของค่า FOY	74
3.50 กราฟ 3 มิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ R6G กับ Au-Pd ที่มีผลต่อค่า FOY ของ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd	74
3.51 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวทดสอบที่ 1	75
3.52 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวทดสอบที่ 2	76
3.53 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวทดสอบที่ 3	76
3.54 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวทดสอบที่ 1	77
3.55 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวทดสอบที่ 2	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.56 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวทดสอบที่ 3	78
4.1 (ก) โครงสร้างของโรดามีน 6จี (R6G)	80
(ข) โครงสร้างของ R6G-hydrazine.....	80
4.2 โครงสร้างของเมทานอล.....	81
4.3 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	84
4.4 สเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่าง B ที่นำไปตรวจจับกับไอออนโลหะชนิดต่างๆ.....	85
4.5 (ก) การเปิดและปิดวง spirolactam	86
(ข) สีของตัวอย่าง B กับ ตัวอย่าง B ผสม Hg^{2+}	86
4.6 สเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่าง B ที่ผสมกับไอออนปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	86
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีการเปล่งแสงสูงสุดกับความเข้มข้นของไอออนปรอท.....	87
5.1 กระดาษสไลด์ที่พร้อมนำไปใช้งาน.....	89
5.2 เทปกาวที่เตรียมพิมพ์ลายนิ้วมือแฝง.....	89
5.3 แสดงเทปกาวที่ถูกพิมพ์ลายนิ้วมือแล้ว.....	90
5.4 แสดงการแบ่งเทปกาวที่ถูกพิมพ์ลายนิ้วมือแล้วเป็น 2 ส่วน.....	90
5.5 การจัดระบบการตรวจสอบลายนิ้วมือด้วยการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์ โดยใช้แสงจากกล้องจุลทรรศน์กระตุ้น.....	92
5.6 การจัดระบบการตรวจสอบลายนิ้วมือด้วยการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์ โดยใช้แสงจากไดโอดเปล่งแสงกระตุ้น.....	92
5.7 ภาพแสดงระดับสีของ Gray scale.....	93
5.8 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd	96
5.9 สเปกตรัมการเปล่งแสงของลายนิ้วมือที่แช่สารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd.....	97
5.10 ค่าความต่างของ Gray value ที่ได้จากภาพถ่ายโดยใช้แสงขาวกับ แสง LED กระตุ้นของตัวอย่างต่างๆ.....	103

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสารเรืองแสง (Fluorophores) ถูกนำมาศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น การใช้งานทางด้านชีวภาพ การใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจหาไอออนโลหะหนัก การทำฟิล์มบางเพื่อใช้งานทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวัสดุฟลูออเรสเซนต์ที่เป็นที่นิยมในการศึกษากันอย่างแพร่หลายคือ สารในกลุ่มสีย้อมแซนทีน (Xanthene dyes) เช่น โรดามีน 6จี โรดามีนบี โรดามีน 123 [1-3] เนื่องจากมีราคาถูก มีค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยี่สิบสูง [4,5] จากการศึกษาทบทวนงานวิจัยพบว่าได้มีการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารโรดามีนหลายด้านเช่นคุณสมบัติการดูดกลืนแสง คุณสมบัติการเปล่งแสง และค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยี่สิบ [6,7] รวมทั้งยังมีการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆ เช่น เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องสำอาง [8] ใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจหาไอออนโลหะหนัก [9] และใช้เป็นเลเซอร์สีย้อม [10] เป็นต้น และมีรายงานว่าความเข้มของการปลดปล่อย การเรืองแสงของสารเรืองแสงสามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อสารเรืองแสงอยู่ใกล้กับอนุภาคนาโนโลหะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาคนาโนโลหะและอนุภาคของ fluorophores การเพิ่มขึ้นของการเรืองแสงเนื่องจากอนุภาคนาโนโลหะจะทำให้เกิดการกระตุ้นของ plasmons ผิวบนพื้นผิวโลหะ [11] จากนั้นอนุภาคนาโนโลหะจะทำหน้าที่เพิ่มการเรืองแสง ในทางกลับกันปรากฏการณ์อื่นที่เรียกว่า การถ่ายโอนพลังงานเรโซแนนซ์ (Resonance energy transfer) จะเด่นชัดเมื่อ fluorophores ใกล้ชิดกับอนุภาคนาโนโลหะขนาดใกล้เคียง (น้อยกว่า 10 นาโนเมตร) [12] ผลกระทบนี้นำไปสู่การลดของสัญญาณเรืองแสง

ปฏิริยาระหว่างอนุภาคนาโนของโลหะและสารเรืองแสง (Fluorophores) ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีการใช้งานที่หลากหลายทั้งในด้านไบโอเซนเซอร์ [13] การถ่ายภาพด้วยเซลล์ [14] และ เซลล์แสงอาทิตย์ [15] โดยอนุภาคนาโนโลหะที่เป็นที่นิยมในการศึกษาในงานวิจัยอื่น ๆ นั้นโดยส่วนมากเป็นอนุภาคนาโนโลหะทองคำและเงินเนื่องจากมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติทางแสงของโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงผ่านกระบวนการได้หลายอย่างโดยเฉพาะการเกิดการสั่นพ้องที่แข็งแกร่งในช่วงที่ตามองเห็นของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากมีประจุที่เคลื่อนที่บริเวณผิวโลหะ (Surface Plasmon Resonance-SPR) [16-19] และต่อมายังมีงานวิจัยที่มีการนำวัสดุในกลุ่ม ทรานซิสซัน เช่น Pt, Pd มาสร้างอนุภาคนาโนโลหะร่วมกันกับทองหรือเงินโดยออกแบบให้วัสดุดังกล่าวหุ้มอนุภาคนาโนโลหะทองคำหรือเงินโดยมีโครงสร้างแบบ core-shell เช่น Au/Pd, Au/Pt [20,21] จะสามารถเพิ่มคุณสมบัติการเร่งปฏิริยาได้เนื่องจากอนุภาคไบนาโนโลหะมีคุณสมบัติการดูดกลืนแสงที่กว้างกว่าอนุภาคนาโนโลหะเดี่ยวและมีการทำปฏิริยาระหว่างโลหะทั้งสองชนิด [22,23]

จากการศึกษางานวิจัยอื่นๆ พบว่าการเพิ่มและลดประสิทธิภาพของการเรืองแสงนั้นเกิดจากอนุภาคนาโนของโลหะที่มีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกัน [24] เช่น ซิลเวอร์และคอปเปอร์ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเรืองแสงของโรดามีนบีโดยอนุภาคนาโนโลหะเงิน [25] เซน และคณะได้ทำการศึกษาการเพิ่มและลดประสิทธิภาพการเรืองแสงของ LEDs ด้วยอนุภาคนาโนโลหะเงิน [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายนี้ มีงานวิจัยก่อนหน้าได้ทำการศึกษาการเพิ่มและลดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารโรดามีน 6จี (R6G) ด้วยอนุภาคนาโนโลหะต่างๆคือ อนุภาคนาโนโลหะทองคำ (Au) อนุภาคนาโนแพลเลเดียมที่มีโครงสร้างแบบรูพรุน (Pd porous) และแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียม (Au-Pd) [27] ซึ่งจากการศึกษาพบว่า Au-Pd สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ดีกว่าทองคำและแพลเลเดียมที่เป็นอนุภาคนาโนโลหะเดี่ยว ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาการนำสารสีย้อมโรดามีน 6จี (R6G) มาผสมกับแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียม (Au-Pd) เพื่อทำการศึกษาเพิ่มเติมจากเดิมโดยทำการศึกษาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ในรูปแบบสารละลายและได้นำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านการตรวจจับโลหะหนักในสารละลายและได้ทำการประยุกต์ใช้งานในการตรวจจับลายนิ้วมือแฝงโดยได้ทำการสร้างลายนิ้วมือแฝงด้วยการพิมพ์ลายนิ้วมือลงบนเทปกาวแล้วนำสารละลาย R6G ที่ผสมกับ Au-Pd หยดลงบนลายนิ้วมือที่สร้างขึ้นจากนั้นนำไปตรวจวัดหาลายนิ้วมือแฝงด้วยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของสารสีย้อมโรดามีน 6จีที่ผสมแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียม
- 2) เพื่อทำการศึกษาหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารสีย้อมโรดามีน 6จีที่ผสมแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียมโดยใช้โปรแกรม Design Expert
- 3) เพื่อทำการศึกษาการนำแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียมไปเพิ่มประสิทธิภาพของสารสีย้อมโรดามีน 6จีในการตรวจจับไอออนปรอท
- 4) เพื่อทำการศึกษาการนำแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียมไปเพิ่มประสิทธิภาพของสารสีย้อมโรดามีน 6จีในการตรวจจับลายนิ้วมือแฝง

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 หัวข้อและมีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

หัวข้อที่ 1 ทำการศึกษาหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารโรดามีน 6จีที่ผสมกับแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียม ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการศึกษาทฤษฎีในการคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์

ขั้นตอนที่ 2 จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดลอง

ขั้นตอนที่ 3 ทำการศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสงและการเปล่งของสารโรดามีน 6จีและสารโรดามีน 6จีที่ผสมกับแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียม

ขั้นตอนที่ 4 ใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3 เพื่อออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนที่ 5 ทดการทดลองและวิเคราะห์ผลที่ได้จากโปรแกรม Design Expert 9.0.3

ขั้นตอนที่ 6 สรุปผลการทดลองและเขียนงานวิจัยเพื่อตีพิมพ์ลงวารสารวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อที่ 2 ทำการศึกษาการสังเคราะห์สารโรดามีน 6จีที่ผสมกับพังกาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียมเพื่อใช้ในการตรวจจับโลหะไอออนปรอท ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ทำการศึกษาทฤษฎีและวิธีการในการตรวจจับโลหะไอออนปรอท
- ขั้นตอนที่ 2 จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 3 ทำการศึกษาคุณสมบัติการเปล่งแสงของสารโรดามีน 6จีและสารโรดามีน 6จีที่ผสมกับพังกาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียมเพื่อใช้ในการตรวจจับโลหะไอออนปรอท
- ขั้นตอนที่ 4 ทำการคำนวณหาค่าขีดจำกัดในการตรวจจับโลหะไอออนปรอท
- ขั้นตอนที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 6 เขียนงานวิจัยเพื่อตีพิมพ์ลงวารสารวิชาการ

หัวข้อที่ 3 ทำการศึกษาการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยสารโรดามีน 6จี ที่ผสมกับพังกาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียม ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ทำการศึกษาทฤษฎีและวิธีการในการตรวจลายนิ้วมือแฝง
- ขั้นตอนที่ 2 จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 3 ทำการสร้างลายนิ้วมือแฝงเพื่อใช้ในการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 4 ทำการทดลองตรวจวัดลายนิ้วมือแฝงด้วยสารโรดามีน 6จีและสารโรดามีน 6จีที่ผสมกับพังกาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียมและตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์
- ขั้นตอนที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการวัดลายนิ้วมือแฝง
- ขั้นตอนที่ 6 เขียนงานวิจัยเพื่อตีพิมพ์ลงวารสารวิชาการ

1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงาน 36 เดือน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานในหัวข้อที่ 1

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงานในหัวข้อที่ 2

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

ตารางที่ 1.3 แผนการดำเนินงานในหัวข้อที่ 3

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยี่ลด์ของสารสีย้อมโรดามีน6จีที่ผสมแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียมในรูปของสารละลายโดยใช้โปรแกรม Design Expert
- 2) ประยุกต์ใช้สารสีย้อมโรดามีน6จีผสมกับแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียมไปตรวจจับไอออนปรอทในรูปแบบสารละลาย
- 3) ทำการสร้างลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีการพิมพ์ลายนิ้วมือลงบนเทปกาวเพื่อใช้ในการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝง
- 4) ประยุกต์ใช้สารสีย้อมโรดามีน6จีผสมกับแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียมไปตรวจจับลายนิ้วมือแฝงที่สร้างขึ้น

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยี่ลด์ของสารละลาย
- 2) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม Design Expert
- 3) มีความรู้ความเข้าใจในการตรวจจับไอออนปรอทในสารละลาย
- 4) มีความรู้ความเข้าใจในการตรวจจับลายนิ้วมือแฝงด้วยสารสีย้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสีย้อมโรดามีน 6จีที่ผสมกับอนุภาคนาโนทองคำเคลือบแพลเลเดียมและการประยุกต์ใช้งานนั้นต้องมีการศึกษาและทบทวนทฤษฎีพื้นฐานต่างๆดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1 สารเรืองแสง [28]

สารเรืองแสงเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ในการเกิดกลไกการเรืองแสง หรืออีกนัยหนึ่งคือเป็นวัสดุสำคัญในการแปลงความยาวคลื่นหรือพลังงานของแสง สมบัติของสารเรืองแสงที่ดีของสารเรืองแสงมีดังนี้

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

ในปัจจุบันนี้ยังไม่มีสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ชนิดใดที่มีสมบัติได้ครบถ้วนดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น แต่ในสารแต่ละชนิดจะมีข้อได้เปรียบและข้อบกพร่องที่แตกต่างกันออกไป ตามแต่ละชนิดของสาร ซึ่งจะขอยกตัวอย่างสาร 3 ชนิด ซึ่งมีข้อได้เปรียบและข้อบกพร่องที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

2.1.1 สารเรืองแสงชนิดอนินทรีย์ (Inorganic dyes)

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

2.1.2 สารเรืองแสงชนิดอินทรีย์ (Organic dyes)

สารอินทรีย์มีข้อได้เปรียบกว่าสารชนิดอื่น คือมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนซ์อยู่ในย่านความยาวคลื่นที่หลากหลาย และมีสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงที่สูง อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

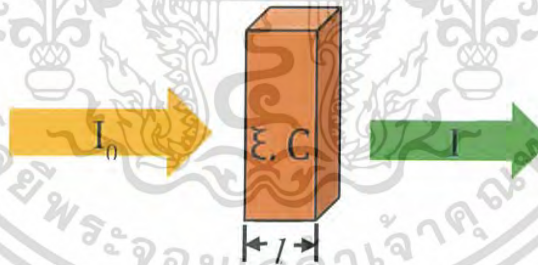
ทั้งในสารอินทรีย์หลายชนิดมีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์สูงเข้าใกล้หนึ่งและในปัจจุบันยังได้มีการสังเคราะห์สารอินทรีย์ชนิดใหม่ขึ้นอย่างแพร่หลายเพื่อให้มีการดูดกลืนแสงที่ครอบคลุมหลายความยาวคลื่นและปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ได้สูง แต่สารอินทรีย์มีข้อบกพร่องในแง่ของความเสถียรเชิงแสงที่ค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้สารอินทรีย์หลายชนิดที่มีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์สูงจะปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงของแสงสีเขียว-เหลือง ซึ่งถ้าพิจารณาเพื่อการนำมาใช้ประโยชน์กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแล้วย่านแสงดังกล่าวไกลจากแถบพลังงาน E_g ของสารซิลิคอนอยู่มาก ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่นำมาใช้ในอุปกรณ์ เช่น สารRhodamine 6G, Coumarin6, Oxazine 9, DCM, Kiton red 620 เป็นต้น

2.1.3 สารเรืองแสงชนิดควอนตัมดอท (Quantum dots)

เทคนิคควอนตัมดอทนี้แรกเริ่มได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย L.E. Brus ในสารควอนตัมดอทนี้ได้ทำการปรับจุดหรือดอทเพื่อให้เกิดการปลดปล่อยสารลูมิเนสเซนส์ และในสารชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์ด้วยหลายเหตุผลคือ มีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ที่สูง ยกตัวอย่างเช่น สาร CdSe/CdS มีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์สูงถึง 80% เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการทนทานต่อแสงได้ยาวนานและยังสามารถลดการเกิดการดูดกลืนซ้ำได้ด้วยการปรับจุดให้แยกกันของควอนตัมดอทในวัสดุตัวกลาง

2.2 การดูดกลืนแสง [29]

เมื่อแสงที่มีพลังงานเหมาะสมเดินทางผ่านตัวกลางวัสดุใดๆ หรือสารสีขุ่น แสงเหล่านั้นจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารเรืองแสง ปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนเข้าไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางที่แสงเดินทางผ่านวัสดุและความเข้มข้นของสารเรืองแสง ดังสมการความสัมพันธ์ของ Beer-Lambert คือ



รูปที่ 2.1 การดูดกลืนแสง

$$A(\lambda) = \log \left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \right) = \xi(\lambda) l C \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- A คือ ค่าการดูดกลืน (Absorbance)
 - ξ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสาร ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)
 - l คือ ระยะทางที่แสงเดินทางผ่าน
 - C คือ ความเข้มข้นของสารเรืองแสง (โมลาร์)
 - I_0 และ I คือ ความเข้มของแสงก่อนเดินทางและหลังเดินทางผ่านวัสดุตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเปล่งแสง [30]

แสงที่ดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารเรืองแสงที่ถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนในอะตอมของโมเลกุลสารเรืองแสงอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้นหรืออยู่ในสถานะกระตุ้นและเพื่อให้เข้าสู่ความเสถียรของระบบ อิเล็กตรอนในสถานะดังกล่าวจะต้องตกกลับลงมายังสถานะพื้น กระบวนการตกกลับลงมาของอิเล็กตรอนจากสถานะกระตุ้นมายังสถานะพื้นจะมีการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence) ออกมา แสงลูมิเนสเซนซ์สามารถจำแนกได้หลายประเภทดังตารางที่ 2.1 ซึ่งแต่ละประเภทจะถูกแบ่งตามแหล่งพลังงานที่กระตุ้นโมเลกุลของสารเรืองแสงแล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ เช่น โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) เกิดจากโมเลกุลทำอันตรกิริยากับโฟตอนและเรดิโอลูมิเนสเซนซ์ (Radioluminescence) เกิดจากโมเลกุลของสารนั้นได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปเป็นโมเลกุลที่สถานะกระตุ้น เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ชนิดของลูมิเนสเซนซ์ประเภทต่างๆ

ชนิดของลูมิเนสเซนซ์	แหล่งพลังงานในการกระตุ้นโมเลกุล
Bioluminescence	Biological process
Cathodoluminescence	Cathod ray
Chemiluminescence	Chemical energy
Electroluminescence	Electric field
Photoluminescence	Photon
Thermoluminescence	Thermal

สารเรืองแสงได้อาศัยหลักการในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ประเภทโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งมีแหล่งพลังงานในการกระตุ้นโมเลกุลสารเรืองแสงเป็นแสงอาทิตย์ที่มาจากกระทบบนผิวหน้าของแผ่นลูมิเนสเซนซ์ โฟโตลูมิเนสเซนซ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) และฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence) โดยกระบวนการในการเกิดแสงลูมิเนสเซนซ์เป็นดังนี้

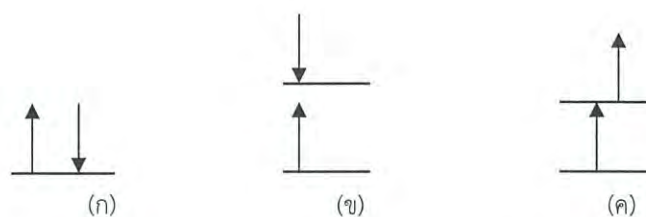
- กระบวนการกระตุ้น (Excitation)

โมเลกุลทั่วไปจะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ ที่สถานะพลังงานต่ำสุดหรือสถานะพื้น อิเล็กตรอนจะอยู่เป็นคู่ในออร์บิทัลและมีทิศทางการหมุนตรงกันข้ามกัน ถ้า M คือ Molecular multiplicity ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงโมเมนตัมเชิงมุมของออร์บิทัล (Orbital angular momentum) ของแต่ละสถานะมีค่า

$$M = 2S + 1 \quad (2.2)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงทิศทางการหมุนของอิเล็กตรอนในโมเลกุลที่อยู่สถานะเดี่ยวในสถานะพื้น (ก) สถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น (ข) และสถานะสามในสถานะกระตุ้น (ค)

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้ไปที่ระดับพลังงานสูงขึ้น โดยการกระตุ้นนั้นจะมี 2 แบบ คือกระตุ้นไปสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น (Excitation singlet state) และสถานะสามในสถานะกระตุ้น (Triplet singlet state) ดังรูปที่ 2.2 (ข) และ 2.2 (ค) ตามลำดับ ซึ่งในกรณีของการกระตุ้นอิเล็กตรอนไปยังสถานะสามในสถานะกระตุ้น เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นมีโอกาสในการหมุนกลับทิศทางทำให้ค่า S เปลี่ยนไป เมื่อมีการหมุน $S = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ เพราะฉะนั้นค่า M จะเป็น 3 มีความหมายว่าสถานะสาม (Triple state) ซึ่งสถานะกระตุ้นของสถานะสามหรือสถานะที่มีค่าพลังงานต่ำสุดของสถานะสามจะแทนด้วย T_1 และที่สถานะสามนี้จะไม่พบในสถานะพื้นของโมเลกุลที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นคู่เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นอิเล็กตรอนจะไปอยู่ในสถานะกระตุ้นในช่วงเวลาหนึ่งและจะตกกลับสู่สถานะพื้นหลังการดูดกลืน (Excitation-deexcitation process) เรียกการตกกลับของอิเล็กตรอนนี้ว่ากระบวนการลดระดับพลังงาน (Deexcitation)

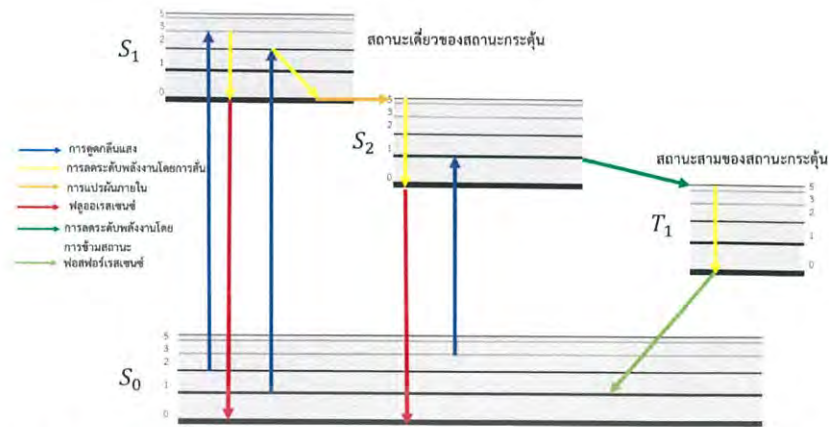
- กระบวนการลดระดับพลังงาน (Deexcitation)

อิเล็กตรอนของโมเลกุลสารเรืองแสงที่อยู่ในสถานะกระตุ้นต้องเกิดการตกกลับสู่สถานะพื้นด้วยกระบวนการลดระดับพลังงาน กระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดได้หลายรูปแบบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะดังนี้

1. กระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เกิดแสง

- การลดระดับพลังงานการสั่นของโมเลกุล (Vibrational relaxation: VR)

เมื่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลสารเรืองแสงได้รับพลังงาน อิเล็กตรอนจะขึ้นไปสู่สถานะพลังงานกระตุ้น ซึ่งมีระดับพลังงานการสั่นหลายค่า เช่น จากรูปที่ 2.3 ระดับชั้นพลังงาน S_1 จะมีระดับพลังงานการสั่น 5 ระดับ เป็นต้น กระบวนการนี้เกิดขึ้นในโมเลกุลที่อยู่ในรูปแบบของสารละลาย อิเล็กตรอนนั้นจะเกิดการสูญเสียพลังงานออกมาในรูปของความร้อนที่เกิดจากการสั่นในการชนกับตัวทำละลาย มีผลทำให้ตัวทำละลายมีพลังงานสูงขึ้น



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการดูดกลืนและการปลดปล่อยพลังงานรูปแบบต่างๆ [30]

- การแปลงผันภายใน (Internal conversion: IC)

กระบวนการนี้จะไม่เกิดการคายพลังงานแสงหรือพลังงานความร้อนออกมา แต่จะเกิดการส่งผ่านพลังงานระหว่างโมเลกุลเท่านั้น โดยโมเลกุลที่ส่งผ่านกันจะมีค่าพลังงานที่สถานะกระตุ้นต่างกันไม่มากนักหรือมีช่วงระดับพลังงานซ้อนทับกัน เช่น การส่งผ่านพลังงานในสถานะ S_1 ไปยังสถานะ S_2 ที่ระดับพลังงานเดียวกันดังรูปที่ 2.3 (กระบวนการในลูกศรสีชมพู)

- การลดระดับพลังงานข้ามสถานะ (Intersystem crossing: ISC)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนของโมเลกุลในสถานะกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนทิศทางการหมุน ซึ่งการที่อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนทิศทางการหมุนได้ก็ต่อเมื่อระดับพลังงานการสั่นของสถานะเดียวและระดับชั้นพลังงานการสั่นของสถานะสามในสถานะกระตุ้นตรงกัน (พลังงานเท่ากัน) หรือการทรานซิชั่นจากสถานะเดียวที่มีระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดไปสู่สถานะสามในสถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานการสั่นมากกว่า

2. กระบวนการลดระดับพลังงานแบบเกิดแสง

- ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence)

เมื่ออิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงมากผ่านกระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เกิดแสงดังที่กล่าวมาแล้ว จนกระทั่งเมื่ออิเล็กตรอนในโมเลกุลลดระดับพลังงานมาถึงระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดของสถานะเดียวในสถานะกระตุ้นจะเกิดการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้น ซึ่งการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้นนี้จะเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของแสงและเรียกกระบวนการคายพลังงานแสงนี้ว่าฟลูออเรสเซนซ์

- ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence)

การคายพลังงานในกระบวนการนี้จะแตกต่างจากการคายพลังงานแบบฟลูออเรสเซนซ์ เนื่องจากฟอสฟอเรสเซนซ์เป็นการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานการสั่นต่ำที่สุดของสถานะสามในสถานะกระตุ้น ซึ่งถ้าเป็นฟลูออเรสเซนซ์จะเป็นการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดของสถานะเดียวในสถานะกระตุ้น การปลดปล่อยพลังงานแสงแบบนี้ถูกเรียกว่าฟอสฟอเรสเซนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลต่อการเกิดแสงฟลูออเรสเซนซ์

- ผลจากสารเคมีชนิดอื่นๆ ที่เจือปน

หากมีสารเจือปนอยู่ในสารละลาย สารเหล่านั้นอาจมีผลกระทบต่อ การเกิดแสงฟลูออเรสเซนซ์ ถ้าสารเจือปนสามารถดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นเดียวกันกับแสง จะทำให้ความเข้มฟลูออเรสเซนซ์ลดลงไปส่วนหนึ่ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Inner-filter effect

- ผลจากค่าควอนตัมยิลด์ของสาร

ควอนตัมยิลด์คืออัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากสารเรืองแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนโดยสารเรืองแสง ดังนั้นสารเรืองแสงสามารถปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ได้มากหรือน้อยสามารถดูได้จากค่าควอนตัมยิลด์ ถ้าค่าควอนตัมยิลด์มีค่าเข้าใกล้ 1 จะเป็นตัวบ่งบอกว่าสารเรืองแสงสามารถปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ได้ดี

- ผลกระทบของอุณหภูมิต่อตัวทำละลาย

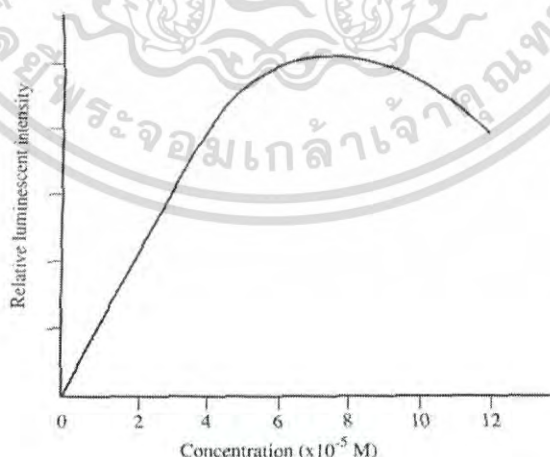
เมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลเพิ่มมากขึ้นทั้งที่อยู่ในสถานะพื้น ดังนั้นโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะชนกับโมเลกุลที่อยู่ในสถานะพื้น ทำให้เกิด Internal conversion เพิ่มขึ้นเป็นเหตุให้ฟลูออเรสเซนซ์ลดลงและค่านี้ทำให้ค่าควอนตัมยิลด์นั้นลดลงด้วย

- ผลของการมีออกซิเจนเจือปนต่อความเข้มฟลูออเรสเซนซ์

การมีออกซิเจนอยู่ในสารเรืองแสงอาจรบกวนการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ได้ 2 รูปแบบ โดยรูปแบบที่หนึ่งคือการเกิดออกซิเดชันโดยตรง ทำให้สารที่เกิดฟลูออเรสเซนซ์ได้เปลี่ยนไปเป็นสารที่ไม่เป็นฟลูออเรสเซนซ์

- ผลของความเข้มข้นที่มีต่อความเข้มฟลูออเรสเซนซ์

ปริมาณแสงที่เกิดจากโฟโตลูมิเนสเซนซ์ขึ้นอยู่กับปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนเพื่อทำให้เกิดการกระตุ้น



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการฟลูออเรสเซนซ์กับความเข้มข้นของสาร (ที่มาของภาพ: หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ รศ. แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Quenching

เป็นปรากฏการณ์ในการลดลงของค่าความเข้มของการฟลูออเรสเซนซ์ใดๆ ที่เกิดจากองค์ประกอบของสารละลายเองหรือสารอื่นที่อยู่ในองค์ประกอบซึ่งรวมทั้งตัวละลายด้วย โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

1 Self quenching เป็นผลเนื่องจากการชนกันระหว่างโมเลกุลที่สถานะกระตุ้น ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน โดยไม่มีการให้รังสีแกมมาตัวทำละลาย ซึ่งจัดว่าเกิด External conversion

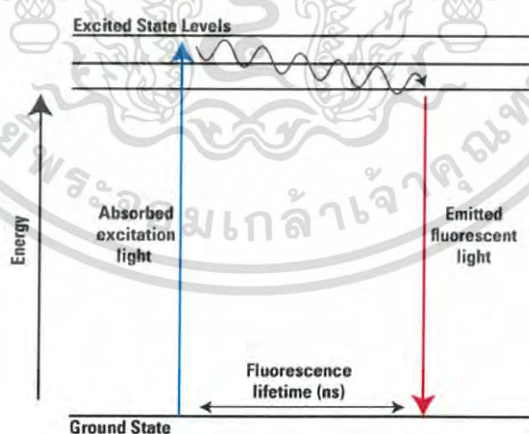
2 Self absorption เกิดขึ้นเมื่อความยาวคลื่นแสงฟลูออเรสเซนซ์มีการซ้อนทับกับแถบการดูดกลืนของสารเอง ทำให้โฟตอนหรือแสงที่เกิดขึ้นถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารเอง ผลแบบนี้เกิดเนื่องจากความเข้มข้นเพิ่มสูงมากขึ้น

2.4 ฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ (FQY) [31]

ฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ (FQY) คืออัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาทั้งหมด ($\text{Photon}_{\text{em}}$) จากสารเรืองแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนโดยสารเรืองแสง ($\text{Photon}_{\text{abs}}$) เป็นการวัดประสิทธิภาพเชิงปริมาณของวัสดุจะเป็นตัวกำหนดความเหมาะสมของวัสดุที่จะนำไปใช้งานด้านต่างๆ เช่น การวิเคราะห์ทางชีวภาพ ทางการแพทย์ เป็นต้น แสดงดังสมการที่ 2.3

$$\Phi_f = \frac{\text{Photon}_{\text{em}}}{\text{Photon}_{\text{abs}}} \quad (2.3)$$

ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ดีจะมีค่าเข้าใกล้ 1 ส่วนสารที่ไม่ให้ค่าฟลูออเรสเซนซ์จะมีค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์เป็นศูนย์



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสง [32]

มีงานวิจัยที่ศึกษาการวัดค่า FQY อยู่หลายเทคนิค เช่น เทคนิค Time-correlated single photon counting (TCSPC) [33] เทคนิค Thermal lens [34] และในงานวิจัยนี้จะวัดค่า FQY โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

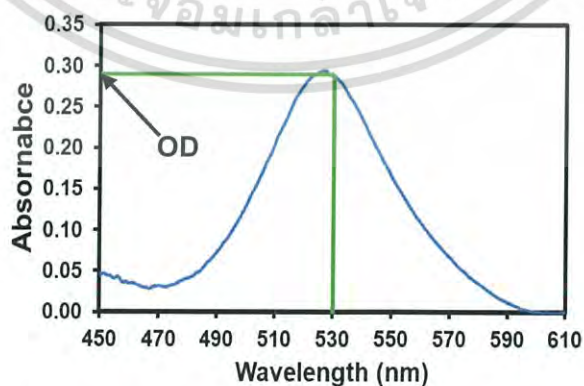
ใช้เทคนิค Relative [35] เนื่องจากเทคนิคนี้มีการจัดเตรียมระบบการวัดไม่ซับซ้อน วัดค่าได้แม่นยำ และใช้เวลาในการทดลองน้อย

เทคนิค Relative เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของค่า FQY ของสารเรืองแสงโดยการเปรียบเทียบกับสารเรืองแสงที่ทราบค่า FQY การศึกษาความสัมพันธ์ของค่า FQY นั้นมี 2 วิธี คือ วิธี Single-point และวิธีการเปรียบเทียบ (Comparative) วิธี Single-point เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์กับความยาวคลื่น และเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับสารอ้างอิง เทคนิคนี้จะใช้สารอ้างอิงที่ความเข้มข้นเดียวจึงเป็นวิธีที่วัดค่า FQY สะดวกและเร็ว ส่วนวิธีการเปรียบเทียบนั้นจะกำหนดความเข้มข้นหลายๆค่าความเข้มข้นทั้งสารที่ต้องการวัดและสารที่ใช้อ้างอิงซึ่งจะใช้เวลาในการวัดนาน วิธีการวัดค่า FQY ของเทคนิค Relative มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารตัวอย่างที่ความเข้มข้นที่ต้องการศึกษากับสารอ้างอิง
2. วัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์
3. คำนวณพื้นที่ใต้กราฟของการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์
4. คำนวณหาค่า FQY จากสมการที่ 2.4

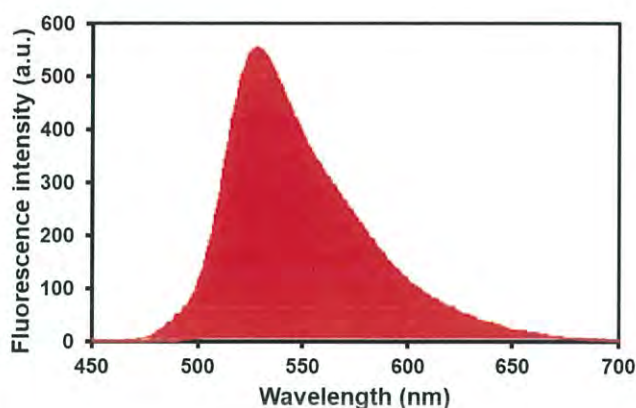
$$Q = Q_R \frac{I}{I_R} \frac{OD_R n^2}{OD n_R^2} \quad (2.4)$$

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



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในการหาค่า OD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างสเปกตรัมการเปล่งแสงในการหาค่าพื้นที่ใต้กราฟ (I)

2.5 การหักเหแสง [36]

การหักเหแสงเป็นสมบัติเกิดจากการที่แสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน เป็นผลทำให้ทิศทางของแสงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งในขณะที่แสงเกิดการหักเหก็จะเกิดการสะท้อนของแสงขึ้นพร้อมๆกันด้วย

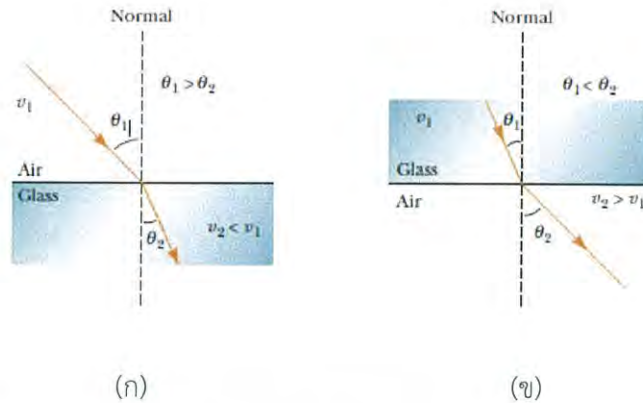
เมื่อแสงเดินทางผ่านวัตถุหรือตัวกลางโปร่งใส เช่น อากาศ แก้ว น้ำ พลาสติกใส แสงจะสามารถเดินทางผ่านได้เกือบหมด เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางชนิดเดียวกัน แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงเสมอ แต่ถ้าแสงเดินทางผ่านตัวกลางหลายตัวกลางแสงจะหักเห



รูปที่ 2.8 การหักเหแสง

สาเหตุที่ทำให้การหักเหแสงคือเกิดจากการเดินทางของแสงจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งซึ่งมีความหนาแน่นแตกต่างกันทำให้มีความเร็วไม่เท่ากัน โดยแสงจะเคลื่อนที่ในตัวกลางโปร่งกว่าได้เร็วกว่าตัวกลางที่ทึบกว่า เช่น ความเร็วของแสงในอากาศมากกว่าความเร็วของแสงในน้ำ และความเร็วของแสงในน้ำมากกว่าความเร็วของแสงในแก้วหรือพลาสติกการที่แสงเคลื่อนที่ผ่านอากาศและแก้วไม่เป็นแนวเส้นตรงเดียวกันเพราะเกิดการหักเหของแสง โดยแสงจะเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า (โปร่งกว่า) ไปยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่า (ทึบกว่า) แสงจะหักเหเข้าหาเส้นปกติ ในทางตรงข้ามถ้าแสงเดินทางจากยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่าไปยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แนวการเดินทางของแสงที่เกิดจากการหักเหแสงผ่านตัวกลาง [37]

(ก) แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำไปหาตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหสูง

(ข) แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหสูงไปหาตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำ

จากรูปที่ 2.9 เมื่อแสงเดินทางผ่านอากาศ(ตัวกลางที่ 1) มีค่าดัชนีหักเห n_1 ไปยังน้ำ (ตัวกลางที่ 2) มีค่าดัชนีหักเห n_2 จะเห็นได้ว่ารังสีของแสงที่เข้าไปในตัวกลางที่ 2 มีแนวทางการหักเหเปลี่ยนไปจากแนวรังสีตกกระทบเดิมแสงจะเกิดการหักเหโดยทำให้ θ_1 คือมุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นปกติ และ θ_2 คือมุมที่รังสีหักเหทำกับเส้นปกติ เรียกว่ามุมหักเห (angle of refraction) จากกฎของสเนลล์จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบ (θ_1) และมุมหักเห (θ_2) และค่าดัชนีหักเหในตัวกลางทั้งสอง n_1 และ n_2 ดังนี้

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.5)$$

และ

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.6)$$

เมื่อ n คือดัชนีหักเหแสงในตัวกลาง (ไม่มีหน่วย)

c คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ (3×10^8 m/s)

v คือ ความเร็วแสงในตัวกลางใดๆ

2.6 อนุภาคนาโนโลหะ [38,39]

วัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนเป็นอนุภาคที่มีขนาดในระดับ 1-100 นาโนเมตร ซึ่งโดยประมาณเทียบได้กับขนาดเฉลี่ยของไวรัส หรือมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมของคน ประมาณ 1,000 ถึง 100,000 เท่า อนุภาคนาโนถูกจัดเป็นอนุภาคระดับกล้องจุลทรรศน์ซึ่งหมายถึงเราไม่สามารถมองเห็นอนุภาคนั้นๆ ได้โดยตรงด้วยตาเปล่าสองข้างของเรานั้นเอง มีหลายสิ่งหลายอย่างที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าแต่สิ่งเหล่านั้นก็ได้ถูกนำมารวมเป็นอนุภาคนาโนทั้งหมด เพราะอนุภาคนาโนนั้นจะต้องมีขนาดในระดับนาโนเมตรเท่านั้น (nm = nanometers) อนุภาคนาโนนั้นต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 nm เท่านั้น อนุภาคนาโนนั้นเป็นอนุภาคที่สำคัญอย่างยิ่งในวงการวิทยาศาสตร์เนื่องจากเป็นสะพานเชื่อมของวัตถุ อะตอม และโครงสร้างระดับโมเลกุลได้เป็นอย่างดี วัตถุที่มีขนาดใหญ่จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

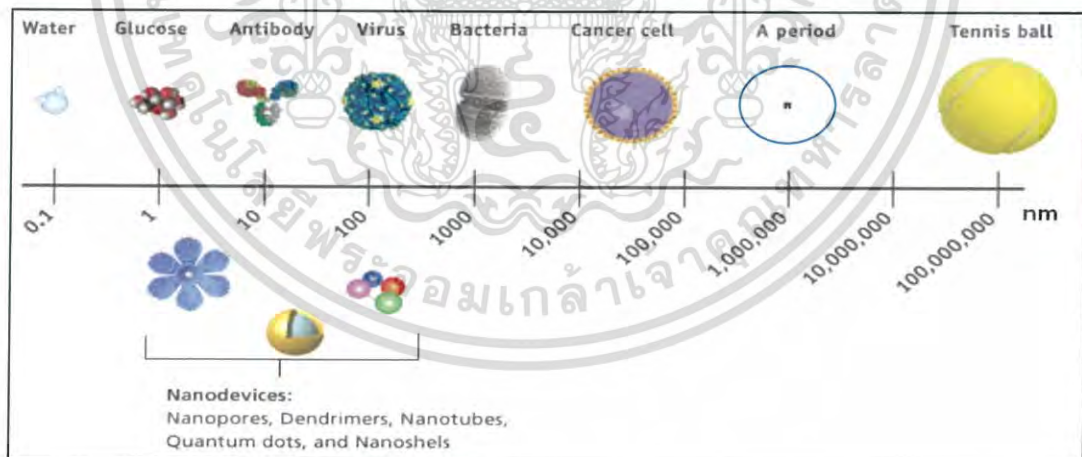
คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ตามขนาดของวัตถุนั้น แต่ในวัตถุระดับนาโนไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากมีคุณสมบัติอื่นเข้ามาช่วย ได้แก่ quantum confinement, surface plasmon resonance และ superparamagnetic ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคนาโนจะมีพื้นที่ผิวมากขึ้นต่อปริมาตรน้ำหนักรวมเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ จึงเป็นสาเหตุที่อนุภาคนาโนจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ๆ มากขึ้น ปัจจุบันมีการนำอนุภาคนาโนไปประยุกต์ใช้ดังจะยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

(1) การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนทางการแพทย์ [40] มีการนำอนุภาคนาโนพอลิเมอร์ไมเซลล์ในการส่งยาเพื่อรักษาเนื้องอกและยังมีการใช้อนุภาคนาโนพอลิเมอร์เคลือบเหล็กออกไซด์ทำลายกลุ่มของเชื้อแบคทีเรียและช่วยในการรักษาการติดเชื้อแบคทีเรียเรื้อรังให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

(2) การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนด้านการผลิตและวัสดุ เช่น อนุภาคนาโนของสังกะสีออกไซด์ที่สามารถกระจายตัวในอุตสาหกรรมเคลือบเพื่อปกป้องไม้ พลาสติก และสิ่งทอจากการตกกระทบของรังสียูวีและมีการนำเอาอนุภาคนาโนเงินใช้ในเนื้อผ้าเพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ทำให้มีกลิ่นเหม็นอับ

(3) การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนด้านสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันมีนักวิจัยใช้อนุภาคนาโนของทองคำฝังในรูพรุนของแมงกานีสออกไซด์เพื่อเร่งปฏิกิริยาสลายสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในอากาศที่อุณหภูมิห้องและใช้อนุภาคนาโนของเหล็กทำความสะอาดสารมลพิษคาร์บอนเตตระคลอไรด์ในน้ำใต้ดิน [41] และยังใช้อนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์ในการทำความสะอาดสารหนูในบ่อน้ำ [42]

(4) การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนด้านพลังงานและอิเล็กทรอนิกส์ นักวิจัยได้แสดงให้เห็นถึงแสงแดดที่ตกกระทบกับอนุภาคนาโนสามารถผลิตไอน้ำได้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง เรียกว่า “อุปกรณ์ผลิตไอน้ำพลังงานแสงอาทิตย์” มีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้ในพื้นที่ประเทศกำลังพัฒนาที่ไม่มีไฟฟ้าสำหรับการใช้งาน [43]



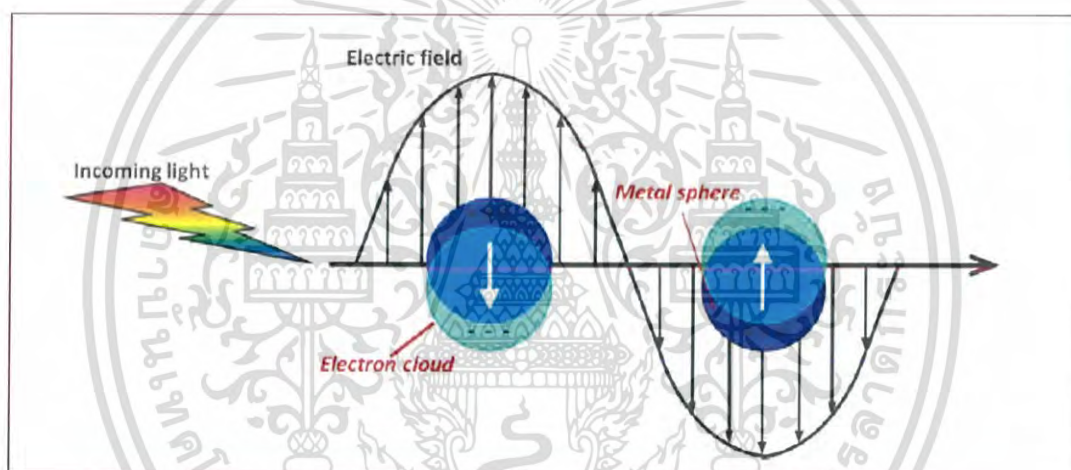
รูปที่ 2.10 อนุภาคนาโน [39]

2.6.1 ปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance SPR) [44]

SPR คือ ปรากฏการณ์เชิงแสง ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอิเล็กตรอนที่อยู่ในโลหะระดับนาโน กล่าวคือเมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมาตกกระทบโลหะ กลุ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนที่ถูกจำกัดอยู่ในอนุภาคระดับนาโนจะเกิดการสั่นรวม (collective oscillation) และเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก มีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่อิเล็กตรอนสั่นในอนุภาคนาโนจะทำให้เกิดการกำทอนขึ้น ซึ่งอันตรกิริยาที่แสงกระทำต่อโลหะจะเกิดได้สองแบบคือ แสงจะตกกระทบและสะท้อนออกไปด้วยความยาวคลื่นเท่าเดิมทุกทิศทุกทาง เรียกว่าการกระเจิง (scattering) และในขณะเดียวกัน บางโฟตอนก็จะถูกดูดกลืนและถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการสั่น ซึ่งเรียกว่าการดูดกลืนแสง (Absorption) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างระดับนาโนของทองจะเกิดทั้งกระบวนการกระเจิงแสงและการดูดกลืนแสงซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน

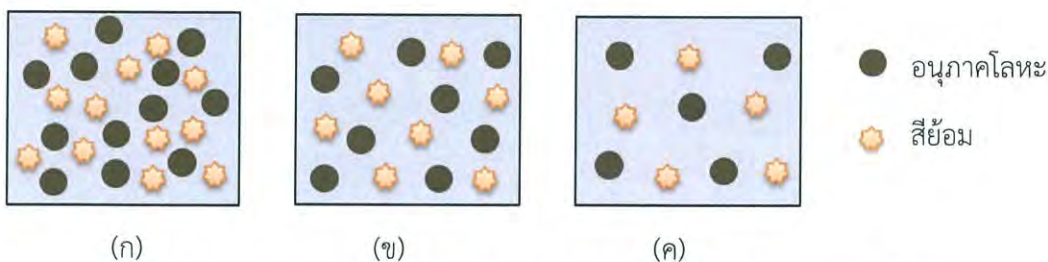
SPR จะเกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบที่โครงสร้างระดับนาโนของวัสดุโลหะ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปยังแถบเหนี่ยวนำและเกิดการสั่นพร้อมกันกับแสงที่มาจากตกกระทบส่งผลให้เกิดพลาสมอนโพลาริตอน ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจะสามารถถ่ายทอดพลังงานระหว่างรอยต่อของโลหะและไดอิเล็กทริกได้



รูปที่ 2.11 กระบวนการสั่นพ้องของพลาสมอนสำหรับอนุภาคทรงกลม [23]

2.6.2 ผลกระทบของอนุภาคนาโนโลหะที่มีต่อสีของวัสดุ

เมื่อสารสีถูกผสมด้วยอนุภาคนาโนโลหะจะทำให้สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารสีมีการเปลี่ยนแปลงทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของสารหรือจำนวนโมเลกุล เพราะจำนวนโมเลกุลจะบ่งบอกถึงระยะห่างระหว่างโมเลกุลของสีกับอนุภาคนาโนโลหะดังแสดงรูปที่ 2.12



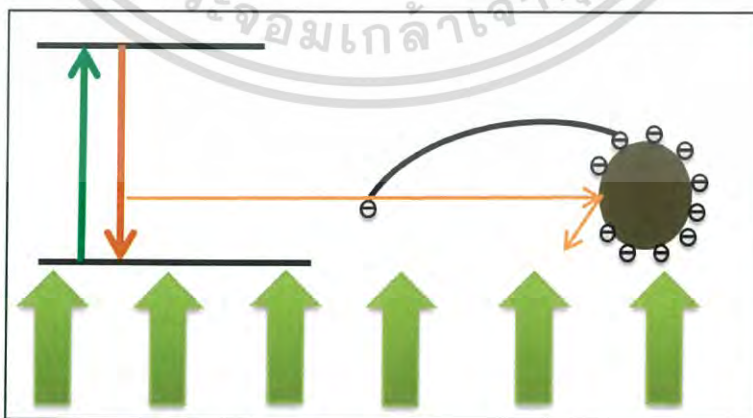
รูปที่ 2.12 (ก) ความเข้มข้นมาก (ข) ความเข้มข้นปานกลาง (ค) ความเข้มข้นน้อย

รูปที่ 2.12 แสดงความเข้มข้นของสารสียอมกับอนุภาคนาโนโลหะโดยความเข้มข้นมากๆจะทำให้ระยะห่างระหว่างสารสียอมกับอนุภาคนาโนโลหะมีค่าน้อย (ดังรูป ก) และที่ความเข้มข้นน้อยลงจะทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของสารสียอมกับอนุภาคนาโนมีระยะห่างเพิ่มมากขึ้นดังรูป (ข) และรูป (ค) ซึ่งระยะห่างระหว่างโมเลกุลของสารสียอมกับอนุภาคนาโนโลหะมีผลต่อการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคนาโนโลหะไปยังสารสียอมเมื่อเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์

2.6.2.1 การลดลงของสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารสียอมเมื่อผสมอนุภาคนาโนโลหะ

เมื่อสารสียอมมีการผสมกับอนุภาคนาโนโลหะแล้วทำให้เกิดสเปกตรัมการเปล่งแสงมีค่าลดน้อยลงซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้

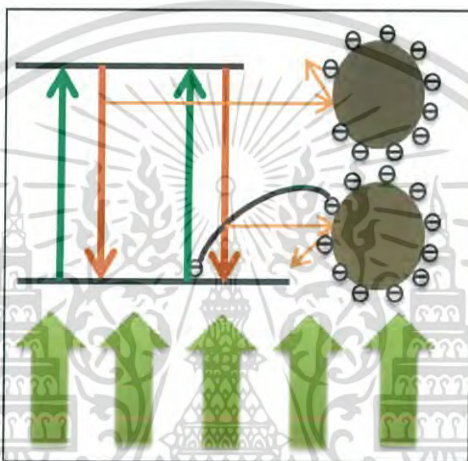
กรณีที่ 1 เมื่อความเข้มข้นของสารสียอมหรืออนุภาคนาโนมีค่าน้อยเกินไปจะส่งผลให้ระยะห่างระหว่างสารสียอมกับอนุภาคนาโนโลหะมีระยะห่างกันมาก ดังรูปที่ 2.13 เมื่ออนุภาคนาโนโลหะได้รับพลังงานจากแสงที่กระตุ้นมากพอจะทำให้เกิดการสั่นพ้องแล้วอิเล็กตรอนจะมาอยู่บริเวณผิวของโลหะจากนั้นจะหลุดออกไปยังสารสียอมแต่เนื่องจากระยะห่างระหว่างสียอมกับอนุภาคนาโนโลหะมีระยะห่างมากเกินไปส่งผลทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดจากอนุภาคนาโนโลหะจะไม่สามารถถ่ายเทพลังงานไปยังสารสียอมได้ อีกทั้งเมื่อสารสียอมมีการเปล่งแสงออกมาอนุภาคนาโนโลหะยังสามารถดูดกลืนแสงของสารสียอมนั้นอีกด้วยจึงส่งผลทำให้สเปกตรัมการเปล่งแสงมีค่าลดลง



รูปที่ 2.13 การถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคนาโนโลหะไปยังสารสียอมเมื่อระยะห่างระหว่างโมเลกุลทั้งสองมีระยะห่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีนี้ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารสีย้อมหรืออนุภาคนาโนโลหะมีค่ามากเกินไปจะส่งผลทำให้มีโมเลกุลของสารมีจำนวนมาก ดังรูปที่ 2.14 เมื่ออนุภาคนาโนโลหะได้รับพลังงานจากแสงที่กระตุ้นมากพอจะทำให้เกิดการสั่นพ้องแล้วอิเล็กตรอนจะมาอยู่บริเวณที่ผิวของโลหะจากนั้นจะหลุดออกไปยังสารสีย้อม จะส่งผลทำให้เมื่ออิเล็กตรอนที่หลุดมาจากอนุภาคนาโนโลหะที่ส่งพลังงานมายังสีย้อมถูกดูดกลืนไปยังสถานะกระตุ้นแล้วเมื่ออิเล็กตรอนคายพลังงานจากสถานะกระตุ้นมายังสถานะพื้นในรูปแบบแสงทั้งของสารสีย้อมและอิเล็กตรอนของอนุภาคโลหะ ทำให้แสงที่เปล่งออกมานั้นมาชนกับอนุภาคนาโนโลหะแล้วทำให้อนุภาคนาโนโลหะดูดกลืนแสงนั้นบางส่วนและอีกส่วนจะสะท้อนออกไปด้วยความยาวคลื่นเดิม การที่อนุภาคนาโนโลหะมีจำนวนมากจะทำให้ไปดูดกลืนแสงที่เปล่งออกมาส่งผลให้สเปกตรัมการเปล่งแสงที่วัดได้นั้นมีค่าลดน้อยลง

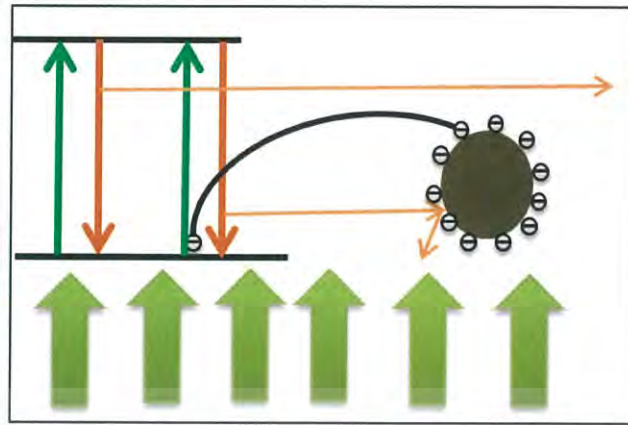


รูปที่ 2.14 การถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคนาโนโลหะไปยังสารสีย้อมเมื่อระยะห่างระหว่างโมเลกุลทั้งสองมีระยะห่างน้อย

2.6.2.1 การเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารสีย้อมเมื่อผสมอนุภาคนาโนโลหะ

เมื่อสารสีย้อมมีการผสมกับอนุภาคนาโนโลหะแล้วทำให้เกิดสเปกตรัมการเปล่งแสงที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากปริมาณความเข้มข้นของสารสีย้อมและอนุภาคนาโนโลหะมีความเข้มข้นที่เหมาะสมซึ่งจะส่งผลทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับอนุภาคนาโนโลหะมีระยะห่างที่เหมาะสมคือระยะห่างประมาณ 10 นาโนเมตร[12] ดังรูปที่ 2.15 เมื่ออนุภาคนาโนโลหะได้รับพลังงานจากแสงที่กระตุ้นมากพอจะทำให้เกิดการสั่นพ้องแล้วอิเล็กตรอนจะมาอยู่บริเวณที่ผิวของโลหะจากนั้นจะหลุดออกไปยังสารสีย้อม จะส่งผลทำให้เมื่ออิเล็กตรอนที่หลุดมาจากอนุภาคนาโนโลหะที่ส่งพลังงานมายังสีย้อมถูกดูดกลืนไปยังสถานะกระตุ้นแล้วเมื่ออิเล็กตรอนคายพลังงานจากสถานะกระตุ้นมายังสถานะพื้นทั้งของสารสีย้อมและอิเล็กตรอนของอนุภาคโลหะจะเกิดการเปล่งแสงโดยแสงที่ออกมาจะสามารถปลดปล่อยออกมาได้เกือบหมดเนื่องจากบางส่วนที่ถูกดูดกลืนไปโดยอนุภาคนาโนโลหะ โดยการที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมนั้นส่งผลให้โมเลกุลของอนุภาคนาโนโลหะมีการดูดกลืนแสงที่เปล่งมาน้อยหรืออาจไม่มีการดูดกลืนเลยส่งผลทำให้สเปกตรัมการเปล่งแสงที่วัดได้มีค่าเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคนาโนโลหะไปยังสารสีย้อมเมื่อระยะห่างระหว่างโมเลกุลทั้งสองมีระยะห่างปานกลาง(เหมาะสม)

2.7 วิธีการแสดงผลตอบสนองโครงร่างพื้นผิว (Response surface methodology –RSM) [45]

วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวหรือ RSM เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น

หลักการที่สำคัญของการทำพื้นผิวดอกตอบสนองเพื่อนำเสนอผลการวิจัย คือ การที่จะนำเสนอแบบพื้นผิวดอกตอบสนอง ต้องมีต้องมีแผนการทดลองที่เหมาะสมและปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ 2 ตัวขึ้นไป และต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ โดยมีตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัวแปร ดังนั้นแผนการทดลองที่จะสามารถสร้างพื้นผิวดอกตอบสนองได้คือ Factorial Design, Mixture Design, Central Composite Design (CCD) และ Plackett & Burman Design ระดับของตัวแปรอิสระที่ต้องผันแปรไปนั้นจำเป็นต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา จากนั้นนำข้อมูลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (X_i) มีสัมพันธ์กับข้อมูลของตัวแปรตาม (Y_i) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) ซึ่งอาจจะมีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง (Linear Model) ความสัมพันธ์ในเชิง Interaction (Interactin model) ความสัมพันธ์กันในเชิง Quadratic (Quadratic Model) แล้วเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปสร้างเป็นภาพสามมิติ หรือที่เรียกว่าสร้างพื้นผิวดอกตอบสนองนั้นเอง ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสามารถอธิบายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า สมการถดถอย (Regression equation) พิจารณาดังสมการที่ 2.7

$$Y=f(x_1, x_2)+\mu \quad (2.7)$$

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

$$\eta =f(x_1, x_2) \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเรียกว่าผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว (Response surface) (Montgomery, 1991) การนำค่า η มาพล็อตกับระดับของตัวแปร x_1 และ x_2 แสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวดังรูปที่ 2.16 อย่างไรก็ตามในการศึกษาโดยใช้วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวนั้นจำเป็นต้องค้นหาฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตามหรือค่าตอบสนองต่อตัวแปรอิสระต่างๆเป็นลำดับแรก การค้นหาฟังก์ชันต่างเหล่านี้มักใช้ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล (Polynomial) ลำดับต้นๆ ระดับของตัวแปรอิสระที่ต้องผันแปรไปนั้น จำเป็นต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษาจากนั้นนำข้อมูลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (X) มีสัมพันธ์กับข้อมูลของตัวแปรตาม (Y) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) ซึ่งอาจจะมีทั้งความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรง (Linear Model) ความสัมพันธ์ในเชิง Interaction (Interactin model) ความสัมพันธ์ในเชิง Quadratic (Quadratic Model) ความสัมพันธ์กันเชิง Quadratic (Quadratic Model) และเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปสร้างเป็นภาพสามมิติ หรือที่เรียกว่าสร้างพื้นผิวผลตอบสนองนั่นเอง

$$\text{Linear effect: } Y = a_0 + a_1 x_1 + \mu \quad (2.9)$$

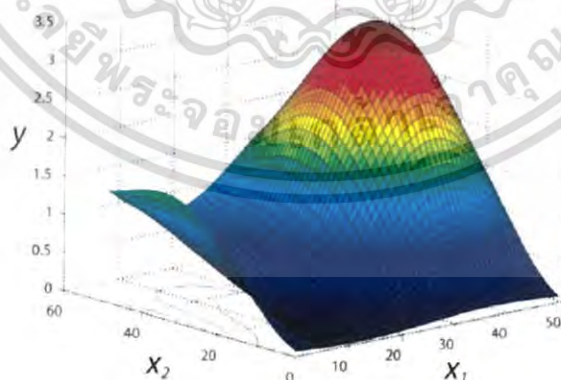
$$\text{Quadratic effect: } Y = a_0 + a_1 x_1 + a_{11} x_1^2 + \mu \quad (2.10)$$

$$\text{Interaction effect: } Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + \mu \quad (2.11)$$

สำหรับระบบมีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ต้องใช้โพลีโนเมียลที่มีลำดับสูงขึ้น เช่น ลำดับสองหรือกำลังสองซึ่งมีแบบจำลองดังนี้ ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์พจน์ทั่วไปจึงเขียนได้ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i^k \sum_{j_i < j} \beta_{ji} x_i x_j + \mu \quad (2.12)$$

เมื่อ Y คือค่าคาดการณ์, β_0 คือค่าคงที่ตัวแปรเชิงเส้น, β_{ii} คือค่าคงที่ Quadratic, β_{ji} คือค่าคงที่ Interaction, x_i และ x_j คือตัวแปรอิสระ



รูปที่ 2.16 ภาพ 3 มิติของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว [46]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

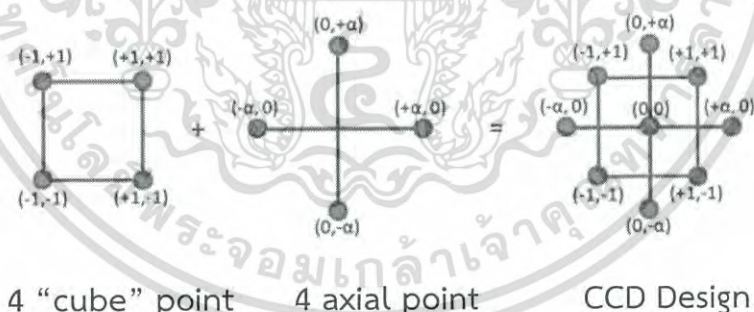
2.7.1 Central Composite Design (CCD) [47]

การออกแบบพื้นผิวตอบสนองมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนองซึ่งมีหลายวิธี เช่น วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least square) การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง (First-order model) และการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สอง (Second-order model) ซึ่งการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลอง Quadratic ของผลตอบสนองโดยมีวิธีการ 2 วิธีการ คือ Central Composite Design และ BoxBehnken 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 การทดลองคือตำแหน่งที่เป็นแนว $+ \pm$ 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 การทดลองรวมทั้งเป็น 13 การทดลองสำหรับจำนวนตัวแปรอิสระ 3 ตัว ($n=3$) จะทำให้การออกแบบ 2^n Factorial Design + $(2n+1)$ มี 15 การทดลอง แสดงดังรูปที่ 2.17 ทำให้การทดลองแบบนี้จึงสามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษาได้มากกว่า 2^2 Factorial Design



รูปที่ 2.17 Central composite design สำหรับ 2 ตัวแปร [47]

2.8 พรอท [48]

ปรอท (Mercury) เป็นโลหะหนักสามารถหาปรอทได้จากหินที่ขุดพบในเหมือง โดยการนำหินนั้นมาทำให้ร้อนด้วยอุณหภูมิ 357 องศาเซลเซียส ปรอทเป็นสารที่มีความหนาแน่นสูง เราสามารถนำปรอทมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมเครื่องวัดอุณหภูมิและความดัน การย้อมสี การผลิตเยื่อกระดาษ พลาสติก แก๊สซีกันท์ อุปกรณ์ในการถ่ายรูป อุปกรณ์ ไฟฟ้า สารฆ่าแมลง และยาฆ่าเชื้อนอกจากนี้เนื่องจากว่าปรอทมีจุดเดือดไม่สูงนัก จึงได้มีการทดลองนำเมอร์คิวรีออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสาทที่เกี่ยวข้องกับเซลล์ประสาทที่ควบคุมการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้ออาจเกิดโรคเขี้ยวฝาง การสูญเสียสติปัญญา (IQ) และโรคไตอักเสบ [50,51]

ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานปรอทของคุณภาพน้ำต่างๆ [52]

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค	ไม่เกิน 0.001 mg/L
มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท	ไม่เกิน 0.002 mg/L
มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	ต้องไม่มีเลยแต่อนุโลมได้สูงสุดไม่เกิน 0.001 mg/L
มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน	0.05 mg/L
มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน	ต้องไม่เกิน 0.001 mg/L
มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม	ไม่เกิน 0.005 mg/L
มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อน้ำบาดาล	0.002 mg/L
มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน	0.005 mg/L

ในปัจจุบันวิธีการตรวจวัดปรอทในสารปนเปื้อนน้ำมีด้วยกันหลายวิธี เช่น Stripping voltammetry, UV-VIS Spectrophotometry, Fluorescence spectroscopy, Inductively-Coupled Plasma - Mass Spectrometry (ICP-MS) และ Cold vapor atomic absorption spectrometer (CV-AAS) โดยวิธีวัดด้วยเครื่อง CV-AAS จัดเป็นวิธีที่กรมควบคุมมลพิษ และ United States Environmental Protection Agency (US EPA) ยอมรับเป็นวิธีมาตรฐานและใช้เป็นวิธีตรวจวัดปริมาณปรอทในแหล่งน้ำ หลักการโดยย่อของวิธีนี้คือจะต้องใช้สารเคมีที่มีดีบุกเป็นองค์ประกอบ (SnCl_2) ไปรีดิวซ์ปรอทในรูปของไอออน (Hg^{2+}) ให้อยู่ในรูปโลหะ (Hg^0) ซึ่งระเหยได้แล้ว จึงทำให้กลายเป็นอะตอมอิสระก่อนกระตุ้นให้ดูดกลืนแสงแล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง โดยค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของปรอท หากมีปริมาณปรอทมากก็จะดูดกลืนแสงมาก

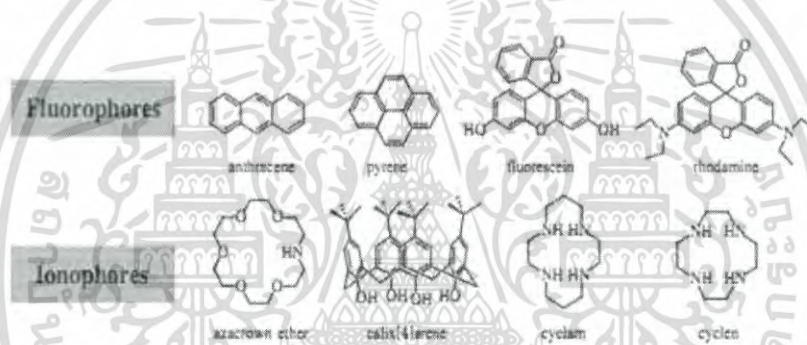
ถึงแม้วิธีนี้จะมีข้อดีคือให้ผลวิเคราะห์ที่ถูกต้องแม่นยำแต่ก็มีข้อเสียคือ ต้นทุนในการตรวจวัดค่อนข้างสูง ตัวเครื่องมีราคาแพง ยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้เครื่องนี้มีในบางห้องปฏิบัติการเท่านั้น นอกจากนี้วิธีนี้ยังประยุกต์ใช้งานในลักษณะภาคสนามไม่ได้ด้วยเพราะตัวเครื่องมีขนาดใหญ่ ไม่สะดวกสำหรับนำไปใช้ในนอกห้องปฏิบัติการ จำเป็นต้องเตรียมและเก็บรักษาตัวอย่างน้ำก่อนนำกลับมาวิเคราะห์ ทำให้ใช้เวลานานกว่าจะรู้ผลไม่เหมาะแก่การเฝ้าระวังและแจ้งเตือนอย่างทันท่วงทีในกรณีที่มีอุบัติเหตุเกิดการรั่วไหลของปรอทลงสู่แหล่งน้ำ อีกทั้งวิธีนี้ต้องใช้สารเคมีที่เป็นพิษเพื่อลดปรอทซึ่งเท่ากับว่าเป็นการเพิ่มมลพิษ ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้เซนเซอร์ทางแสงถูกนำมาใช้งาน โดยปัจจุบันเทคนิคการเรืองแสงได้กลายเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการในการตรวจจับโลหะไอออนเนื่องจากใช้งานง่าย ราคาถูก และมีความไวสูงต่อการตรวจจับ ในบรรดาสารเรืองแสงที่ได้รับการพัฒนาในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาโรดามีนได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์เนื่องจากมีคุณสมบัติการเรืองแสงที่ดี มีค่าควอนตัมยิลด์สูงและความสว่างที่โดดเด่น มีราคาถูก มีการดูดกลืนแสงที่ยาวนานและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

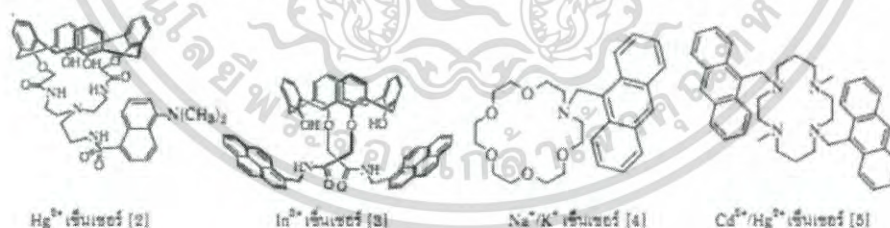
มีการเปล่งแสงที่อยู่ในบริเวณที่ตามองเห็น เนื่องจากอนุพันธ์ของโรดามีนชนิด Spirolactam ไม่มีการเรืองแสงและไม่มีสีในขณะที่การเปิดใช้ Spirolactam ทำให้เกิดการเรืองแสงที่แข็งแกร่งและเปลี่ยนเป็นสีชมพู [50,51]

2.9 กลไกการทำงานของเซนเซอร์ทางเคมี [48]

การนำเซนเซอร์ทางเคมีไปใช้ตรวจวัดไอออนโลหะจะต้องมีการออกแบบเซนเซอร์ให้มีโครงสร้างที่สามารถเหนี่ยวนำให้ทำงานได้โดยใช้แสงเป็นตัวกระตุ้น เมื่อเซนเซอร์เกิดการดักจับไอออน จะแสดงผลทางการเรืองแสงแบบฟลูออเรสเซนซ์ โครงสร้างของเซนเซอร์ทางเคมีจะมี 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) ฟลูออโรฟอร์ (Fluorophore) เป็นส่วนที่มีความสามารถแสดงคุณสมบัติของการเรืองแสงแบบฟลูออเรสเซนซ์ 2) ไอโอโนฟอร์ (Ionophore) เป็นส่วนที่มีความสามารถในการดักจับไอออนโลหะ โดยทั่วไปแล้วทั้งสองส่วน จะต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ โครงสร้างของฟลูออโรฟอร์และไอโอโนฟอร์บางชนิดแสดงดังรูปที่ 2.19 และ โครงสร้างของเซนเซอร์ทางเคมีบางชนิดแสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของฟลูออโรฟอร์และไอโอโนฟอร์บางชนิด [48]



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของเซนเซอร์ทางเคมีบางชนิด [48]

โดยกระบวนการทำงานของฟลูออเรสเซนซ์เซนเซอร์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซ็นเซอร์เมื่อมีการตรวจจับไอออนแสดงได้ดังภาพที่ 2.21 กล่าวคือในภาวะที่สารละลายไม่มีไอออน เซ็นเซอร์จะมีการปิดวง spirolactam ทำให้เกิดการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ได้น้อยมาก (OFF state) เนื่องจากระบบคอนจูเกต (conjugation system) ในโครงสร้างของเซนเซอร์ไม่ต่อเนื่องและค่อนข้างสั้น แต่เมื่อเซนเซอร์เกิดอันตรกิริยากับไอออนทำให้เกิดการเปิดวง spirolactam และเหนี่ยวนำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์ในโครงสร้างเคลื่อนที่เข้าสู่ระบบคอนจูเกต จึงสังเกตเห็นการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์ออกมาในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (ON state)



รูปที่ 2.21 กระบวนการเปิดและปิดวง spirolactam [53]

2.9.1 ขีดจำกัดการตรวจหา [54]

ขีดจำกัดการตรวจหาหรือ limit of detection (LOD) หรือ detection limit (DL) ตามข้อกำหนดของ The International Committee on Harmonization (ICH) ได้ระบุ กำหนดวิธีการหาค่าขีดจำกัดการตรวจหา 3 แบบคือ แบบแรก visual evaluation แบบที่สอง Signal to Noise และสุดท้าย Standard deviation of the response and slope ในที่นี้จะขอพูดถึงเฉพาะแบบสุดท้ายคือ การหาขีดจำกัดการตรวจหาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณและความชันของกราฟมาตรฐาน ขีดจำกัดการตรวจหา หมายถึงปริมาณต่ำสุดที่สามารถวัดได้ แต่ไม่ยืนยันว่าสามารถวัดเชิงปริมาณได้ถูกต้อง ซึ่ง ICH ได้กำหนดไว้คือ

$$\text{LOD} = (k)SD/\text{Slope} \quad (2.13)$$

เมื่อ SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณ

k คือ ค่าคงที่ความไม่แน่นอน (มีค่าเท่ากับ 3)

2.9.2 การคำนวณหาค่าขีดจำกัด [55]

ในการคำนวณหาค่าขีดจำกัดหรือค่า detection limit จะใช้การคำนวณแบบ Standard deviation of the response and slope โดยการคำนวณนั้นจะต้องทำการวัดสัญญาณของเซนเซอร์แบบไม่มีโลหะไอออนผสมเพื่อทำการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณ แล้วจึงนำเซนเซอร์ไปตรวจจับโลหะไอออนที่ความเข้มข้นต่างๆแล้วทำการวัดสัญญาณเพื่อนำสัญญาณที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะไอออนกับสัญญาณที่ได้แล้วนำกราฟที่ได้ไปพิตเพื่อหาสมการดังรูปที่ 2.18 จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า detection limit ดังสมการที่ 2.14

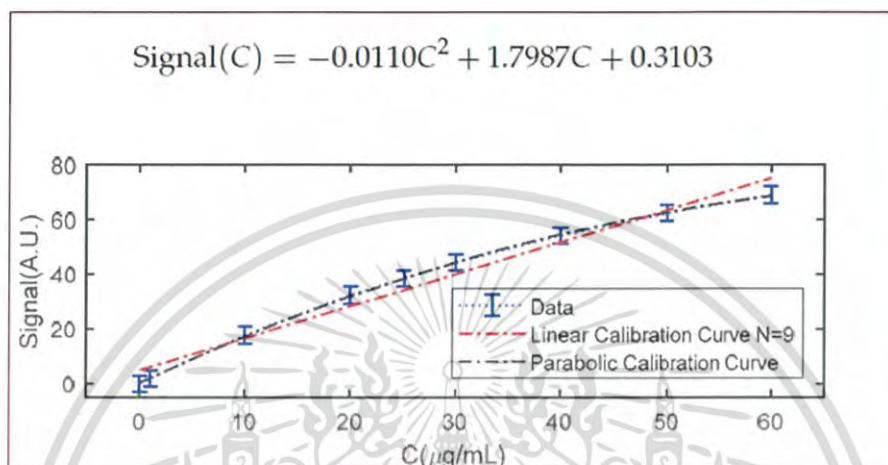
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$LOD = \frac{k}{a} \sqrt{\frac{SD^2}{n} + \frac{R^2}{12}} \quad (2.14)$$

เมื่อ a คือ ค่าความชันของการพิตกราฟ

n คือ จำนวนการวัดตัวอย่างซ้ำ

R คือ ความละเอียดของเครื่องมือที่อ่านได้



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างการพิตกราฟในการคำนวณค่าขีดจำกัด [55]

2.10 ลายนิ้วมือแฝง [56,57]

2.10.1 ลายนิ้วมือ

ลายนิ้วมือคือส่วนที่เป็นสันนูนขึ้นมาจากผิวหนังนอกสุดของคนหรือสัตว์โดยจะเชื่อมต่อกันเป็นแนวยาวมองเห็นเป็นลายเส้นและมีขนาดและรูปแบบที่แตกต่างกันไป ทำให้แต่ละบุคคลมีลายนิ้วมือเฉพาะไม่เหมือนกัน



รูปที่ 2.23 ตัวอย่างลายนิ้วมือ [58]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2 การเกิดลายนิ้วมือ

ลายนิ้วมือจะเริ่มแสดงเมื่อตอนเป็นทารกในครรภ์มารดาและจะคงอยู่ชั่วชีวิต ยกเว้นแต่ ถูกลบโดยตั้งใจ อุบัติเหตุหรือแผลเป็น และอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยแต่สามารถยอมรับได้ โดยเส้นลายนิ้วมือสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

- 1.) เส้นนูนหรือสันลายนิ้วมือ (ridge) คือ รอยนูนที่ยกสูงกว่าผิวนิ้วมือที่มีลักษณะเป็นเส้นนูนโค้งและยาวตามรูปแบบลายนิ้วมือ
- 2.) ร่องลายนิ้วมือ (furrow) คือ รอยลึกที่อยู่ต่ำกว่าระดับและสลับระหว่างเส้นนูนซึ่งจะมองเห็นเป็นร่องระหว่างเส้นนูน

2.10.3 ส่วนประกอบของลายนิ้วมือ

2.10.3.1 ลักษณะทั่วไป

สามารถมองเห็นและวิเคราะห์ได้ผิวดิน

- 1.) รูปแบบลายนิ้วมือ ชนิด จำนวนของเส้นลายนิ้วมือ และพื้นที่ทั้งหมดลายนิ้วมือ
- 2.) จุดใจกลางและจุดสันตอนหรือสามเหลี่ยมเดลต้า



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างองค์ประกอบลายนิ้วมือที่เป็นลักษณะทั่วไป [56]

2.10.3.2 ลักษณะเฉพาะ

- 1) เส้นแตก หรือ เส้นส้อม (bifurcation) คือ เส้นลายนิ้วมือที่มีปลายด้านหนึ่งแยกหรือแตกออกมากกว่าหรือเท่ากับ 2 เส้น หรือเส้นลายนิ้วมือหลายเส้นมารวมกันกลายเป็นเส้นเดียว
- 2) เส้นสั้นๆ (short ridge) คือ เส้นลายนิ้วมือที่สั้นกว่าเส้นลายนิ้วมือทั่วไป แต่จะไม่เป็นจุด
- 3) จุด (dot) คือ ลายเส้นนิ้วมือที่สั้นมากจนดูคล้ายเป็นจุดหรือขีดเล็กๆ
- 4) เส้นขาด (ending ridge) คือ เส้นลายนิ้วมือเป็นเส้นเดียวซึ่งมีช่องว่างเป็นรอยขาดออกจากกัน
- 5) เส้นทะเลสาบ (island) คือ เส้นลายนิ้วมือที่มีปลายแยกออกเป็น 2 เส้น แล้ววกกลับมา รวมกันกลายเป็นเส้นเดียวซึ่งทำให้เกิดเป็นพื้นที่ว่างตรงกลางคล้ายแอ่งน้ำหรือทะเลสาบ
- 6) เส้นตะขอ คือ เส้นลายนิ้วมือที่ปลายเส้นแยกออกเป็น 2 เส้น แต่ละเส้นแยกโค้งออกจากกัน และมีความยาวต่างกันลักษณะเหมือนตะขอ
- 7) เส้นอื่นๆ คือ เส้นลายนิ้วมือที่ต่างจากเส้นลายนิ้วมือที่กล่าวมาข้างต้น มีลักษณะเป็นเส้นเดียวที่มีปลายแยกออกเป็น 3 เส้น เรียกว่า “trifurcation”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.4 ประเภทลายนิ้วมือ

2.10.4.1 ลายนิ้วมือประเภทโค้ง

1) ลายนิ้วมือประเภทโค้งราบ (Plain arch) เป็นลักษณะลายนิ้วมือจากขอบด้านหนึ่งไปยังขอบอีกด้านหนึ่ง ไม่มีจุดสันตอน ซึ่งสังเกตง่ายที่สุด

2) ลายนิ้วมือประเภทโค้งกระโจม (Tented arch) เป็นลักษณะลายนิ้วมือจากขอบด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง เกิดเป็นเส้นพุ่งขึ้นจากแนวนอนเป็นมุมแหลม



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.25 (ก) ลายนิ้วมือประเภทโค้งราบ (Plain arch) [56]

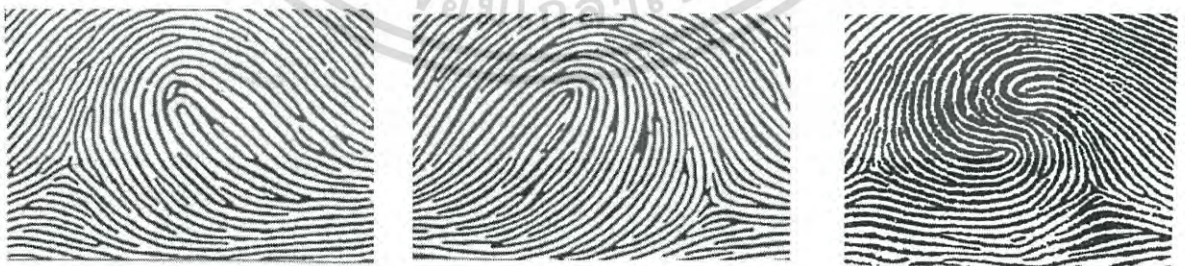
(ข) ลายนิ้วมือประเภทโค้งกระโจม (Tented arch) [56]

2.10.4.2 ลายนิ้วมือประเภทมัดหวาย

1) ลายนิ้วมือประเภทมัดหวายปิดขวา (Right slant loop or radial loop) มีลักษณะเป็นลายเส้นส่วนปลายเกือกม้าปิดไปทางขวา

2) ลายนิ้วมือประเภทมัดหวายปิดซ้าย (Left slant loop or ulnar loop) มีลักษณะเป็นลายเส้นส่วนปลายเกือกม้าปิดไปทางซ้าย

3) ลายนิ้วมือประเภทมัดหวายคู่หรือมัดหวายแฝด (Double loop or Twin loop) มีลักษณะคล้ายลายนิ้วมือแบบมัดหวายปิดซ้ายและมัดหวายปิดขวา มารวมกันโดยไม่จำเป็นต้องเท่ากัน



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 2.26 (ก) ลายนิ้วมือประเภทมัดหวายปิดขวา (Right slant loop or radial loop) [56]

(ข) ลายนิ้วมือประเภทมัดหวายปิดซ้าย (Left slant loop or ulnar loop) [56]

(ค) ลายนิ้วมือประเภทมัดหวายคู่หรือมัดหวายแฝด (Double loop or Twin loop) [57]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

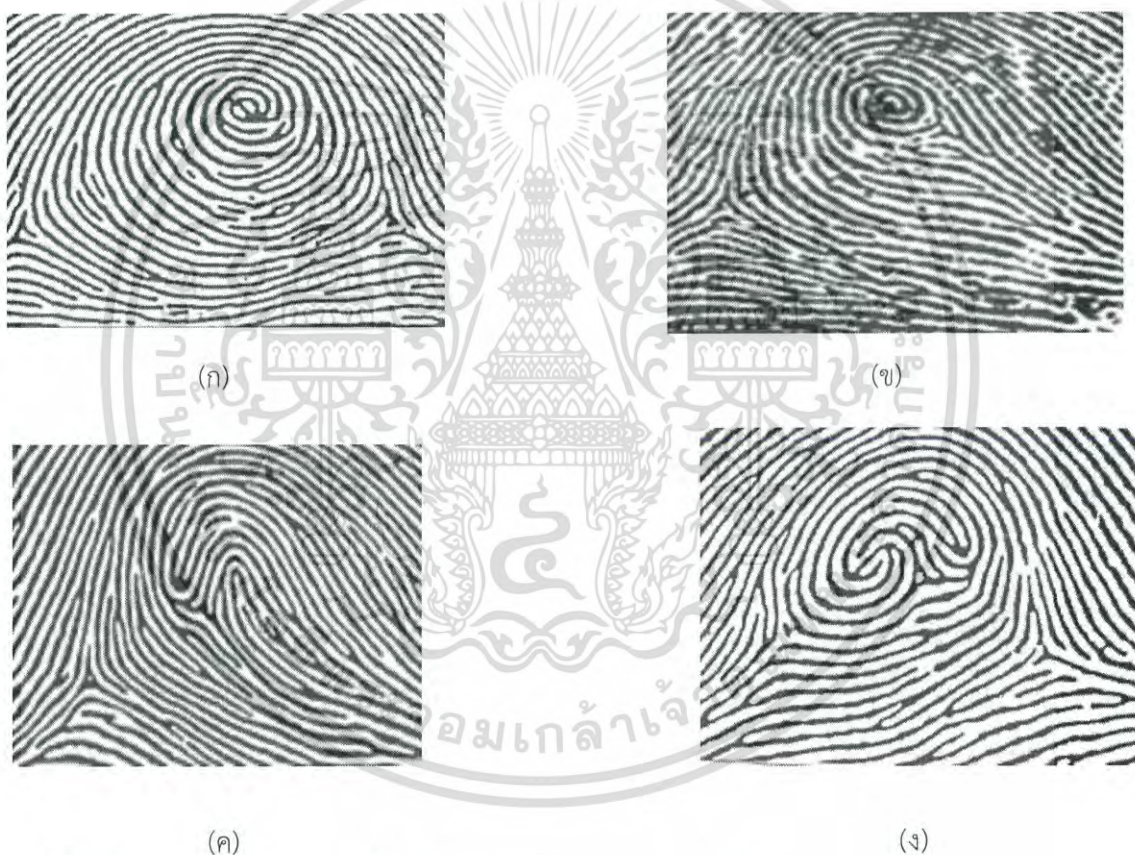
2.10.4.3 ลายนิ้วมือแบบก้นหอย (Whorl)

1) ลายนิ้วมือประเภทก้นหอยธรรมดา (plain whorl) ลายนิ้วมือที่มีเส้นเวียนรอบเป็นวงมีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปไข่หรือวงกลม

2) ลายนิ้วมือประเภทก้นหอยกระเป๋ากลาง (central pocket loop whorl) ต่างจากลายนิ้วมือก้นหอยแบบธรรมดา เมื่อลากเส้นสมมติจากสันตอนหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง เส้นสมมติจะไม่สัมผัสกับเส้นวงจรที่อยู่ด้านใน

3) ลายนิ้วมือประเภทก้นหอยกระเป๋าช้าง (lateral pocket loop) เป็นลายนิ้วมือที่คล้ายกับแบบมัดหวายคู่ แต่มีสันตอนอยู่ข้างเดียวกัน

4) ลายนิ้วมือประเภทซับซ้อน (accidental whorl) เป็นลายนิ้วมือที่ต่างจากชนิดที่กล่าวมา ซึ่งเป็นลายนิ้วมือแบบผสมกัน และมีสองสันตอนหรือมากกว่า



รูปที่ 2.27 (ก) ลายนิ้วมือประเภทก้นหอยธรรมดา (plain whorl) [56]

(ข) ลายนิ้วมือประเภทก้นหอยกระเป๋ากลาง (central pocket loop whorl) [56]

(ค) ลายนิ้วมือประเภทก้นหอยกระเป๋าช้าง (lateral pocket loop) [56]

(ง) ลายนิ้วมือประเภทซับซ้อน (accidental whorl) [56]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.5 การตรวจลายนิ้วมือ [56,57]

2.10.5.1 วิธีการปิดผงฝุ่น

เป็นวิธีการพื้นฐานในการตรวจสอบรอยลายแฝง โดยผงฝุ่นจะติดความชื้นและไขมันที่ขบออกมาทางนิ้วมือ ซึ่งจะใช้เทปในการลอกลายนิ้วมือมาติดกับกระดาษที่เตรียมไว้ หรือใช้การถ่ายภาพ หลักการคือ การนำเอาสารที่เป็นของแข็งมาทำเป็นผงฝุ่นสีต่างๆ ซึ่งแต่ละสีมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันที่จะทำให้รอยลายแฝงมองเห็นได้อย่างชัดเจน โดยสีที่เหมาะสมที่สุดคือสีดำ เพราะเหงื่อจะปรากฏอยู่ในสภาพที่ไม่มีสี จะพบเห็นได้ดีที่สุดบนพื้นผิววัตถุที่มีความเรียบ และเป็นมัน เช่น แก้ว กระจก เครื่องเรือนขัดมัน เป็นต้น ซึ่งสีดำจะติดกับสีของพื้นผิววัตถุได้อย่างชัดเจน แต่ถ้าเป็นพื้นผิววัตถุที่มีสีทึบๆ ก็ควรใช้แป้งฝุ่นสีขาวก็จะเห็นภาพได้ชัดเจนเช่นกัน นอกจากนี้ พื้นผิววัตถุบางอย่างอาจมีความเหมาะสมกว่าที่จะใช้ผงฝุ่นกว่า 2 ชนิดขึ้นไปผสมกัน เพื่อให้เห็นรอยและเก็บรอยลายแฝงได้ดีขึ้น แปรงที่ใช้ในการปิดผงฝุ่นเคมีมีอยู่ทั่วไป 3 ชนิด คือ 1) แปรงขนกระต่าย ใช้ในการปิดผงฝุ่นเบื้องต้น 2) แปรงขนอูฐ ใช้ปิดผงฝุ่นเพื่อให้เห็นรอยลายอย่างละเอียด 3) แปรงแม่เหล็ก ใช้กับผงฝุ่นสีดำที่มีแม่เหล็กเป็นส่วนผสมอยู่



รูปที่ 2.28 การตรวจลายนิ้วมือด้วยการปิดผงฝุ่น [59]

2.10.5.2 วิธีการใช้น้ำยาเคมี

เป็นวิธีในการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงบนวัตถุที่มีผิวหูดขีมี องค์ประกอบในสารเคมีทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่ขบออกมาทางนิ้วมือทำให้เกิดการเปลี่ยนสี หลักการคือ การนำสารหรือสารเคมีที่ใช้ในรูปแบบสารละลาย รวมถึงสารเคมีที่สามารถที่ระเหย หรือระเหิดเป็นไอได้ซึ่งเราอาจเรียกกันได้ว่าเป็นวิธีรมควัน โดยสามารถใช้ในการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงจากพื้นผิววัตถุที่เป็นกระดาษทั้งอ่อนและแข็ง ไม่เปลือยตลอดจนพื้นผิวที่มีคุณสมบัติหูดขีมีอื่นๆ

1) นิไฮดริน (Ninhydrin) ใช้กับงานประเภทกระดาษและเอกสารต่างๆ นิไฮดรินจะทำปฏิกิริยากับโปรตีนของเหงื่อจะเปลี่ยนรอยลายนิ้วมือแฝงเป็นสีม่วงบนน้ำเงินโดยอาจเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ความร้อน ซึ่งทำได้ทั้งฉีดเป็นละอองฝอย การจุ่ม หรือการแปรง ซึ่งวิธีที่ง่ายที่สุดคือการฉีดเป็นละอองฝอย โดยเมื่อพื้นผิววัตถุถูกอบด้วยน้ำยาแล้ว ให้นำไปถูกความร้อนอีกครั้ง โดยการใช้เตารีดไฟฟ้าาบลงไปโดยตรง หรือนำเอาไปผึ่งไว้กลางแดด หรือผึ่งด้วยลมร้อน แต่ต้องระวังอย่าใช้ความร้อนสูงเกินไปอาจทำให้ฟลักใหม่ได้ซึ่งวิธีการต่างๆ เหล่านี้จะทำให้สามารถเกิดภาพลายแฝงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชัดเจน จากนั้นควรถ่ายภาพในระยะใกล้ทันที แล้วเอาเทปกาวใสปิดทับ พร้อมถ่ายภาพซ้ำอีกครั้ง และ จดรายละเอียด

2) ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate) โดยหลักการคือ ซิลเวอร์ไนเตรทนั้นจะทำปฏิกิริยากับโซเดียมคลอไรด์ในเนื้อที่ขบออกมาทางนิ้วมือจะได้ซิลเวอร์คลอไรด์ ซึ่งจะมองด้วยตาเปล่าได้ยาก ต้องนำไปทำให้แห้งด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต หรือแสงแดด จะทำให้ลายนิ้วมือแฝงเปลี่ยนเป็นสีดำ และจะกลับคืนรูปเดิมไม่ได้ วิธีนี้จึงไม่ควรใช้กับพวกธนบัตรและเอกสารสัญญาต่างๆ วิธีการนี้เป็นวิธีการตรวจหาเกลือแกง ที่อยู่ในเนื้อของมนุษย์ น้ำยาซิลเวอร์ไนเตรทจะทำปฏิกิริยากับเกลือแกงที่มีอยู่ที่รอยเกิดเป็นซิลเวอร์คลอไรด์ได้ และจะเกิดรอยลายแฝงที่ชัดเจนมากกับวัตถุประเภทกระดาษและไม่โดยวิธีการคือ นำเอกสารจุ่มลงไปใต้น้ำยาโดยตรง หรือเป็นละออง แล้วปล่อยให้แห้งในห้องมืด แล้วจึงนำมาให้แสงสว่างจ้า (ประมาณ 1,000 แสงเทียน) ก็จะปรากฏเห็นรอยแฝงของพื้นผิววัตถุได้อย่างชัดเจน เป็นลายเส้นสีน้ำตาลไหม้เข้ม รอยที่ปรากฏขึ้นนี้จะต้องใช้วิธีการตรวจเก็บโดยการถ่ายภาพบันทึกใกล้และขยายและการรมด้วยควีนไอโอดีน

3) น้ำยาผลึกม่วง (Crystal Violet) เป็นสีย้อมที่ใช้ย้อมสีลายรอยแฝงติดอยู่บนพื้นผิวที่มีความเหนียวและไม่สามารถละลายน้ำเช่น เทปกาวใส หรือกระดาษกาว หรือเทปยางซึ่งบริเวณที่มีความเหนียวนั้นมักจะมีรอยลายนิ้วมือติดอยู่ด้วยเสมอ โดยในการเก็บรอยลายแฝงนั้นใช้วิธีแบบปิดผงฝุ่นธรรมดาไม่ได้ต้องใช้วิธี Crystal Violet ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องมีน้ำยาที่ประกอบด้วยผลึกม่วง (Crystal Violet) ขนาด 1 - 1.5 กรัม ละลายในเอธิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) ปริมาณ 100 มิลลิลิตร แล้วนำน้ำยาที่ผสมแล้วนี้ ปริมาณ 2 มิลลิลิตรเติมลงไปใต้น้ำ 100 มิลลิลิตรใสในภาชนะต่อจากนั้น ทำการจุ่มหรือวางวัตถุชิ้นนั้นแช่ลงไปใต้น้ำยาจนรอยลายนิ้วมือแฝงปรากฏเห็นแล้วล้างน้ำสะอาดเพื่อล้างสีส่วนที่เกินออกไปจะทำให้เหลือแต่รอยลายเส้นของรอยลายแฝงเท่านั้น ต่อจากนั้นจึงนำไปวางบนด้านมันของกระดาษอัดรูปที่มีความเปียกหมาดๆ นำไปรีดด้วยความร้อนอ่อนๆ แล้วจึงดึงเทปที่เป็นวัตถุที่มีรอยลายแฝงออกจากกระดาษอัดรูปออก จากนั้นทำการถ่ายภาพบันทึกไว้

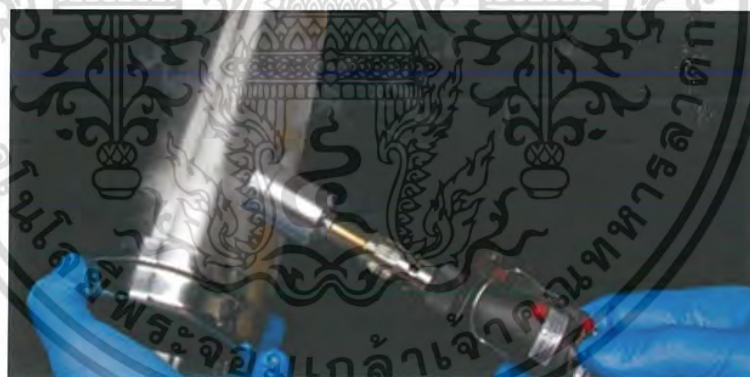
4) วิธีรมด้วยควีนไอโอดีน (Iodine Fuming) การตรวจสอบรอยลายแฝงของสารไอโอดีน เหมาะกับการตรวจวัตถุประเภทกระดาษ ผง และพื้นผิวที่มีความเหนียว หลักการ คือ เรา นำเกลือไอโอดีน ที่สามารถระเหิดเป็นก๊าซได้เมื่อได้รับความร้อน โดยมีการตรวจสอบ 2 แบบ แบบที่ 1 เป็นการตรวจในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตู้ไอโอดีน (Iodine Fuming Cabinet) แบบที่ 2 การใช้กระบอกที่เรียกว่า Iodine Fuming ซึ่งสารจะบรรจุอยู่ในกระบอกแก้วเล็กๆ ซึ่งมีความสะดวกในการพกพาและสามารถตรวจหาบนบริเวณพื้นผิวได้ไม่กว้างมาก โดยจะใช้ความร้อนช่วย ทำให้ปรากฏภาพรอยลายแฝงได้รวดเร็วขึ้น ปัจจัยที่ทำให้เกลือไอโอดีนระเหิดเป็นไอและควีนสีม่วง เนื่องจากไขมันหรือน้ำมันของเนื้อบรรอยแฝงจะดูดซึมไอควีนเหล่านี้ไว้โดยจะปรากฏเห็นเป็นรอยเส้นสีน้ำตาลหรือออกสีเหลืองๆทำให้เกิดภาพลายแฝงที่เด่นชัดขึ้นตัดกับสีพื้นวัตถุจากนั้นทำการถ่ายภาพไว้ทันที เนื่องจากรอยเส้นเหล่านี้จะหายอย่างรวดเร็วเมื่อกระบวนการนี้สิ้นสุดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 ตู้ไอโอดีน (Iodine Fuming Cabinet) [60]

5) วิธีการหรือ Super Glue วิธีนี้ใช้สารเคมีทำให้เกิดเป็นไอหรือก๊าซ เนื่องจากความร้อนไอของสารเคมีทำปฏิกิริยากับสารที่ขับออกมาจากรอยนิ้วมือแฝง ทำให้เกิดรอยลายนิ้วมือขึ้นมาเป็นสีขาวโดยวิธีการใช้ Super Glue จะคล้ายๆ กับการรมควันด้วยไอโอดีน แต่ต่างกันตรงที่มีการใช้ Super Glue แทน เมื่อสาร Cyanoacrylate Ester ได้รับความร้อนก็จะระเหยเป็นไอซึ่งมีความเข้มข้นสูงจะทำปฏิกิริยากับโปรตีน และน้ำที่มีอยู่ในเหงื่อ ทำให้ปรากฏเห็นเป็นรอยลายสีขาวแล้วจึงใช้ผงฝุ่นเคมีปิดชั้นอีกครั้งหนึ่งเพื่อเก็บถอดลอกรอยลายนั้นออกมาตามปกติ



รูปที่ 2.30 การใช้การระเหยจากกาว (Super glue) [61]

2.10.5.3 วิธีลอกลายนิ้วมือ

เป็นการใช้เทปกาวลอกลายนิ้วมือแฝง หลังจากการปิดฝุ่นหรือการใช้สารเคมี และทำการบันทึกภาพถ่ายโดยวิธีการ คือหาลายนิ้วมือที่ปรากฏให้เห็นก่อน เช่น ถ้าเป็นรอยนิ้วมือที่ติดอยู่บนของเหลวต่างๆ เช่น บนเลือด ไขมัน หรือรอยนิ้วมือที่ติดบนกระจกจะมองเห็นได้ สามารถใช้เทปกาวลอกเก็บรอยนิ้วมือได้เลย ส่วนบนพื้นผิวหรือพื้นผิวของวัตถุที่มองเห็นไม่ชัดเจนว่ามีรอยแฝงจะต้องมีการวิเคราะห์ดูก่อนว่าจะใช้ผงเคมีชนิดไหน สำหรับพื้นผิวที่มีความเรียบและก็มีสีอ่อน เราก็ควรใช้ผงฝุ่นสีดำในการปิด ถ้าเกิดบนพื้นผิวที่ค่อนข้างจะสีเข้ม เราก็ใช้ผงฝุ่นสีขาวมาปิด ในการปิด ต้องดูขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพื้นที่ หากพื้นที่เล็กจะใช้แปรงขนาดเล็ก พื้นที่ใหญ่ก็ใช้แปรงขนาดใหญ่ ส่วนวิธีการปิด จะต้องปิดไปในทางเดียวกันก่อน พอเห็นรอยค่อนข้างชัดเจนค่อยปิดแบบกันหอย จะทำให้ปรากฏรอยลายแฝงชัดเจนมากขึ้น จากนั้นใช้เทปกาวมาแปะลงไปเพื่อลอกลายนิ้วมือออกมาแล้วดึงออกไปแปะเก็บบนกระดาษเพื่อนำไปวิเคราะห์อีกที



รูปที่ 2.31 การลอกลายนิ้วมือด้วยเทปกาว [62]

2.10.5.4 วิธีใช้แสงโดยการใช้แสงเลเซอร์

เป็นการใช้แสงเลเซอร์นี้ในการตรวจหารอยลายแฝงที่วัตถุพื้นผิวชนิดต่างๆ ได้ เช่น แก้ว กระจก ผนัง พลาสติก และไม้ เป็นต้น หรือไม่ว่าจะเป็นการตรวจร่องรอยในลักษณะอื่นๆ ได้อีก เช่น รอยชุดลบบกั๊กไขเอกสาร ชนิดของหมึก รอยเหยียบย่ำ เป็นต้น ถือว่าเป็นเครื่องมือที่ดีมีประสิทธิภาพมากเครื่องหนึ่งในการตรวจหารอยแฝงโดยใช้แสงกล้าที่เป็นอุปกรณ์ทำขึ้นประกอบด้วยผลึก ก๊าซ หรือสารอย่างอื่นที่มีความเหมาะสม ซึ่งจะต่อมภายในนั้น เมื่อถูกกระตุ้นขึ้นด้วยการรวมจุดของคลื่นแสงทั้งหลายจะขยายและรวมกันอยู่ที่คลื่นเหล่านี้ แล้วจึงฉายเปล่งออกมาเป็นลำแสงแคบและจ๋ามากโดยหลักการของเครื่องเลเซอร์นี้จะเป็นแสงที่เกิดจากการกระตุ้นโดยใช้เครื่องมือ ซึ่งมีปรมาณูก๊าซอาร์กอน (Argon-Ion) ซึ่งเป็นธาตุบริสุทธิ์ประเภทหนึ่ง เป็นแหล่งกำเนิดแสง หรือไม่ว่าจะเป็นเครื่องโพลีไลท์ซึ่งเป็นเครื่องมือนี้ มีน้ำหนักเบา สามารถใช้ได้ทั้งในและนอกสถานที่ ปรกติมีสภาวะทางแสงเป็นสีขาวยที่สามารถเปลี่ยนเป็นแสงสีต่างๆ ได้ 5 ช่องสีโดยการใช้เครื่องกรองแสง (Filter) ซึ่งแสงแต่ละช่องสีจะมีความเหมาะสมกับการตรวจหารอยลายแฝงบนพื้นผิวและวัตถุที่มีลักษณะต่างๆ กัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.32 (ก) เครื่องโพลีไลท์ (Polilight) และ (ข) ภาพที่ได้จากการฉายแสงเลเซอร์ [63]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 ทบทวนวรรณกรรม

2.11.1 การหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์

ค.ศ. 1979 John Olmsted [64] ได้ทำการศึกษาหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสี ย้อมอินทรีย์และสารประกอบอะโรมาติก เช่น โรดามีน 6จี คูมารีน ฟลูเรสซิน cresyl violet methylene blue perylene เป็นต้น โดยทำการเตรียมสารละลายที่ตัวทำละลายหลายชนิด เช่น น้ำ เมทานอล เอทานอล โทลูอีน โดยใช้เทคนิค calorimetric โดยพบว่าค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารโรดามีน 6จี มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตัวทำละลายเปลี่ยนเช่นได้ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ 0.81 0.86 และ 0.88 ในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ เมทานอลและเอทานอลตามลำดับ ซึ่งสามารถทำการทดลองซ้ำได้ทำให้ได้ค่าแม่นยำโดยมีค่าความไม่แน่นอน ± 0.02

ค.ศ. 1996 Fischer M. และ Georges J. [65] ได้ทำการวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารโรดามีน 6จี ที่ทำละลายในเอทานอลที่ความเข้มข้นในช่วง 1×10^{-6} ถึง 1.5×10^{-4} โมลาร์ โดยทำการวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ด้วยเทคนิค thermal lens spectrometry จากการทดลองพบว่าค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.94

ค.ศ. 2002 Douglas M. และคณะ [66] ได้ทำการศึกษาหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารโรดามีน 6จี กับสารฟลูออรีซิน ซึ่งสารทั้งสองชนิดถูกทำละลายด้วยตัวทำละลายทั้งหมด 9 ชนิด คือ น้ำ (H_2O) ดิวทีเลียมออกไซด์ (D_2O) เมทานอล (MeOH) เอทานอล (EtOH) ไอโซโพรพานอล (i-PrOH) โพรพานอล (n-PrOH) บูทานอล (BuOH) เฮกซะนอล (HexOH) และ ออกทานอล (OctOH) โดยทำการวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ด้วยกับวิธี fluorescence lifetimes จากการทดลองพบว่าสารโรดามีน 6จีและฟลูออรีซินมีค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์สูงสุดที่ตัวทำละลายดิวทีเลียมออกไซด์เหมือนกันซึ่งมีค่าควอนตัมยิลด์ที่ 0.98 ± 0.015 และ 0.98 ± 0.01 สำหรับสารโรดามีน 6จีและฟลูออรีซินตามลำดับ

ค.ศ. 2004 Santhi A. และคณะ [67] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอนุภาคนาโนเงินที่มีผลต่อค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารโรดามีน 6จี โดยใช้เทคนิคเทอร์มอลเลนส์พีมคู โดยทำการศึกษาโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-6} ถึง 10^{-3} โมลาร์ จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นมากขึ้นค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์จะมีค่าลดลง และเมื่อเติมอนุภาคนาโนโลหะเงินไปผสมก็ทำให้ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ลดลงเช่นกัน

ค.ศ. 2012 Christian W. และคณะ [68] ได้ทำการศึกษาหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารโรดามีน โดยใช้วิธีการทางแสงและโฟโตอคูสติกเพื่อสร้างเป็นมาตรฐานสำหรับค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์จากการทดลองพบว่าค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสาร โรดามีน 6จี ที่ใช้วิธีวัดทางแสงที่ทำละลายในเอทานอลมีค่า 0.92 ± 0.05 และที่ทำละลายในน้ำมีค่า 0.83 ± 0.04 ในส่วนของการวัดแบบโฟโตอคูสติกนั้นให้ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ทำละลายในเอทานอลมีค่าเท่ากับ 1 ± 0.06 และที่ทำละลายในน้ำมีค่า 0.91 ± 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.ศ. 2014 Xian-Fu Z. และคณะ [69] ได้ทำการศึกษาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของ สารโรดามีนทั้ง 10 ชนิดคือ โรดามีน 110 (R110) โรดามีน 123(R123) โรดามีน 6จี (R6G) โรดามีนบี (RB) โรดามีนบีเอสทิลเอสเตอร์ (Ethyl-RB) โรดามีนบีบูทิลเอสเตอร์ (Butyl-RB) ลิสสะมีนโรดามีนบี (LA-RB) ซัลฟอนิลโรดามีนบี (Sulfo-RB) โรดามีน 101 (R101) ไพโรนีนบี (PYB) ในตัวทำละลายที่ แตกต่างกัน 4 ชนิดคือ ในเอทานอล น้ำ อะซิโตนไนไตรล์ (CH_3CN) และไดเมทิลฟอไรมด์ (DMF) จาก การทดลองพบว่าที่สารโรดามีน 6จี มีค่าควอนตัมยิลด์คือ 0.95 0.95 0.94 และ 0.75 ในตัวทำ ละลายเอทานอล น้ำ อะซิโตนไนไตรล์และไดเมทิลฟอไรมด์ตามลำดับ

2.11.2 การใช้วิธีการตอบสนองโครงสร้างพื้นผิว (RSM) ในงานวิจัย

ค.ศ. 2009 Shahin G. และคณะ [70] ได้ประยุกต์ใช้วิธีตอบสนองพื้นผิว (RSM) เพื่อศึกษา ประสิทธิภาพของการตกตะกอนของในการบำบัดน้ำชะขยะโดยใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) และ สารส้มโดยทำการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับ ปริมาณ PAC และค่า pH กับปริมาณ สารส้มที่มีผลต่อการบำบัดน้ำชะขยะโดยได้ทำการศึกษาทั้งหมดสี่อย่างคือ 1.ปริมาณออกซิเจนที่ สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD) 2.ความขุ่นของน้ำ (turbidity) 3.สีของน้ำ (color) และ 4.สารแขวนลอยทั้งหมด (TSS) จากการศึกษาพบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับปริมาณ ของ PAC เมื่อนำไปวิเคราะห์ ANOVA พบว่าให้ค่า R^2 ของตัวแปรที่ศึกษาทั้งสี่ตัวแปรเป็นดังนี้ 0.8061 0.9717 0.9720 และ 0.9499 และ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับปริมาณของสารส้ม เมื่อนำไปวิเคราะห์ ANOVA พบว่าให้ค่า R^2 ของตัวแปรที่ศึกษาทั้งสี่ตัวแปรเป็นดังนี้ 0.9186 0.7240 0.8801 และ 0.7926

ค.ศ. 2010 Keshani S. และคณะ [71] ได้ทำการศึกษาเพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของ การรักษากระบวนการที่มีผลต่อความเข้มข้นของน้ำส้มโอโดยใช้ RSM โดยได้ศึกษาตัวแปรสามตัวแปร ที่มีผลต่อความเข้มข้นน้ำส้มโอคือ ความเร็วรอบของเครื่องปั่น ระยะเวลา และอุณหภูมิ จากการศึกษา พบว่าถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นระยะเวลาเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความเข้มข้นของ น้ำส้มโอมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ ANOVA พบว่าสมการ ความสัมพันธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือเนื่องจากให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9808 และมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05

ค.ศ. 2012 Noshadi I. และคณะ [72] ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้ว โดยการกลั่นด้วยระบบรีแอกทีฟโดยได้ศึกษาตัวแปรทั้งหมดสี่ตัวคือ 1. อุณหภูมิก่อนเข้าในระบบ 2. ผลรวมของการไหลเวียนระบบ 3.อัตราส่วนระหว่างเมทานอลกับน้ำมัน 4. reboilder duty ที่มี ผลกระทบต่อ กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ยิลด์ โดยจากการศึกษาพบว่าตัวแปรที่สี่มีผลต่อค่ากรดไขมัน เมทิลเอสเทอร์ยิลด์ และได้สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสี่ตัวแปรที่มีผลต่อ กรดไขมัน เมทิลเอสเทอร์ยิลด์ ซึ่งเมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย ANOVA พบว่า ค่า p-value มีค่าน้อยกว่า 0.0001 และ R^2 และ R^2_{adj} มีค่าเท่ากับ 0.9653 และ 0.9307 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.ศ. 2015 Adewale O. และคณะ [73] ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกล้วยสองชนิดโดยใช้ทฤษฎี RSM โดยกล้วยทั้งสองชนิดคือ Luvhele และ Mabonde ซึ่งได้ทำการศึกษาตัวแปรของระยะเวลาในการอบกับกำลังไฟฟ้าในการอบโดยทำการศึกษาว่ามีผลต่อสีของกล้วยหรือไม่โดยทำการหั่นกล้วยเป็นชิ้นบางๆหนา 5 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบเพื่อศึกษาสีและความแข็งของกล้วยจากการศึกษาพบว่าระยะเวลาในการอบกับกำลังไฟฟ้ามีผลต่อสีของกล้วยและความแข็งของกล้วยทั้งสองชนิดเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย ANOVA พบว่ากล้วยชนิด Luvhele มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อความแข็งเนื่องจากให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.0001 และให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.97 ในส่วนของสีนั้นพบว่าให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.0001 แต่ค่า R^2 มีค่า 0.64 ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับทางสถิติ สำหรับกล้วยชนิด Mabonde นั้นพบว่าที่การศึกษาความแข็งมีค่า p-value น้อยกว่า 0.0001 แต่ค่า R^2 มีค่า 0.88 ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับทางสถิติแต่ในส่วนของสีนั้นพบว่าให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.0001 และให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.97

ค.ศ.2016 Xiulan Z. และคณะ [74] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยในการดูดซับสีย้อม natural red (NR), methylene blue (MB), และ rhodamine 6G (R6G) ซึ่งในกระบวนการสังเคราะห์จะต้องเตรียมสาร NaIO_4 และมีการเตรียมภายใต้อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นจึงได้ศึกษาการใช้ RSM เข้ามาออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปริมาณของ NaIO_4 และอุณหภูมิที่มีผลต่อการสังเคราะห์ไฟเบอร์เพื่อทำการดูดซับสารสีย้อมที่กล่าวมาทั้งสามชนิดซึ่งจากการทดลองพบว่าสีย้อม NR เมื่อปริมาณ NaIO_4 เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิลดลงทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับได้ดี ในส่วน MB กับ R6G นั้นเมื่อปริมาณ NaIO_4 เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นทำให้ค่าการดูดซับได้ดีและจากการศึกษาโดยการออกแบบการทดลองด้วย RSM นั้นพบว่าปริมาณของ NaIO_4 และอุณหภูมิมีผลต่อการสร้างไฟเบอร์เพื่อใช้ในการดูดซับสีย้อมซึ่งดูได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA พบว่าให้ค่า R^2 ของ NR MB และ R6G ที่ 0.9557 0.9938 และ 0.9677 ตามลำดับ

ค.ศ. 2017 Angelo A. และ Maria Anna M. [75] ได้ศึกษาการตรวจสอบโดยวิธีการตอบสนองพื้นผิว (RSM) ของผลรวมของค่าความเป็นกรด - ด่างและองค์ประกอบของส่วนผสมของเมทานอลกับน้ำที่มีผลต่อเสถียรภาพของไขมันชั้นจากการศึกษาพบว่าค่า pH ต่ำลงทำให้ความเสถียรของไขมันชั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นและปริมาณของเมทานอลเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความเสถียรของไขมันชั้นเพิ่มมากขึ้นโดยพบว่าค่า pH กับปริมาณเมทานอลมีผลต่อความเสถียรของไขมันชั้นซึ่งดูได้จากตารางวิเคราะห์ผล ANOVA ซึ่งมีค่า R^2_{adj} มีค่าเท่ากับ 0.98 และมีค่า p-value < 0.0001 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ทางสถิติ

2.11.3 การตรวจจับไอออนโลหะหนัก

ค.ศ. 2011 Prasenjit M.และคณะ [76] ได้ทำการสังเคราะห์อนุพันธ์ของโรดามีนสองชนิดในการตรวจจับ Hg^{2+} กับ Cr^{3+} โดยชนิดแรกมีความเข้มข้น 5×10^{-6} โมลาร์ และชนิดที่สองมีความเข้มข้น 5.84×10^{-6} โมลาร์ โดยอนุพันธ์ของโรดามีนชนิดแรกจะถูกนำไปทดสอบในการตรวจจับ Cr^{3+} ด้วยการนำไปผสมกันแล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงโดยค่าความเข้มข้นของ Cr^{3+} จะมีค่าอยู่ในช่วง $0-1.34 \times 10^{-3}$ โมลาร์ ส่วนโรดามีนชนิดที่สองนั้นจะนำไปตรวจจับ Hg^{2+} โดยค่าความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ Hg^{2+} จะอยู่ในช่วง $0-0.51 \times 10^{-3}$ โมลาร์ จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของโลหะเพิ่มมากขึ้น ทำให้การดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของโรดามีนมีค่าเพิ่มมากขึ้นแล้วเมื่อนำไปคำนวณหาค่าขีดจำกัด (detection limit) ในการตรวจวัดพบว่าอนุพันธ์ของโรดามีนตัวแรกมีค่าขีดจำกัดที่ 0.14 ppb และตัวที่สองมีค่า 0.35 ppb

ค.ศ. 2011 Vairaperumal T. และ Kasi P. [77] ได้ทำการสังเคราะห์ R6G และ Ag-nanocube เพื่อเป็นเซนเซอร์ในการตรวจจับไอออนปรอทในรูปแบบของสารละลายโดย R6G มีค่าความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ ผสมกับ Ag-nanocube ที่มีความเข้มข้น 1×10^{-7} โมลาร์ จากนั้นจึงนำไปตรวจจับไอออนปรอทในรูปแบบของสารละลายโดยวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของเซนเซอร์เมื่อนำไปผสมกับปรอทที่มีความเข้มข้นในช่วง 5×10^{-11} ถึง 1×10^{-5} โมลาร์ จากการศึกษาพบว่าเซนเซอร์ R6G ที่ผสมกับ Ag-nanocube สามารถตรวจจับปรอทได้และมีค่าขีดจำกัด (detection limit) เท่ากับ $5 \times 10^{-11} \text{ mol/L}^{-1}$

ค.ศ. 2012 Jessica C. และ Andrew C. [78] ได้ทำการศึกษา rhodamine 6G hydrozine derivative (RS) ที่รวมกับ polyaniline (PANI) ซึ่งตั้งอยู่บน ITO โดย ITO และอยู่บน TiO_2 (ITO/ TiO_2 /PANI-RS electrode) จากนั้นนำไปตรวจจับไอออนปรอทที่ความเข้มข้น $10 \mu\text{g/L}^{-1}$ และ $200 \mu\text{g/L}^{-1}$ นำไปวัด Photo-response แล้วไปคำนวณค่าขีดจำกัด (detection limit) มีค่า $4 \mu\text{g/L}^{-1}$

ค.ศ. 2013 Fanyong Y. และคณะ [79] ได้ทำการสังเคราะห์อนุพันธ์ของโรดามีนบีเพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจจับ Hg^{2+} กับ Al^{3+} โดย Hg^{2+} กับ Al^{3+} จะถูกทำลายในน้ำกับเมทานอลที่มีอัตราส่วน 60:40 และมีค่า pH เท่ากับ 7 โดยในงานวิจัยนี้ยังได้ทดลองนำเซนเซอร์ไปตรวจจับกับโลหะหนักอื่นๆแต่พบว่าเซนเซอร์ตรวจจับได้แต่กับ Hg^{2+} กับ Al^{3+} และยังพบว่าค่าขีดจำกัด (detection limit) ในการตรวจจับ Hg^{2+} กับ Al^{3+} มีค่าเท่ากับ 2.5×10^{-8} โมลาร์ และ 4.2×10^{-8} โมลาร์ ตามลำดับ

ค.ศ. 2014 HE S. และคณะ [80] ได้ทำการสังเคราะห์อนุพันธ์ของโรดามีน 6จี (RH6G) เป็นเซนเซอร์ในการตรวจจับโลหะหนักในสารละลายน้ำโดยได้ทำการตรวจจับโลหะหนักชนิดต่างๆ K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Al^{3+} , Co^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} , Ag^+ , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Ca^{2+} , Zn^{2+} และ Mg^{2+} พบว่าเซนเซอร์สามารถตรวจจับโลหะได้สองชนิดคือ Cu^{2+} และ Hg^{2+} ซึ่งเซนเซอร์ RH6G มีความเข้มข้นสาร 1×10^{-5} โมลาร์ จากการทดลองพบว่าเซนเซอร์เมื่อเจอไอออนโลหะหนักจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากไม่มีสีเปลี่ยนเป็นสีชมพูซึ่งสามารถมองได้ด้วยเปล้า และจากการทดลองพบว่า detection limit ในการตรวจจับ Cu^{2+} และ Hg^{2+} มีค่าเท่ากับ 3.3×10^{-8} โมลาร์ และ 1.7×10^{-7} โมลาร์ ตามลำดับ

ค.ศ. 2016 Miao H. และคณะ [81] ได้ทำการสังเคราะห์อนุพันธ์ของโรดามีนสามชนิดเพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจจับไอออนปรอท โดยเซนเซอร์ทั้ง 3 ชนิดคือ 1-(2-(3,6-bis(diethylamino)-3-oxospiro[isindoline-1,9-xanthen]-2-yl)ethyl)-3-phenyl-1-(2-(3-phenylthioureido)ethyl) thiourea (RDTU), 1-(2-(3,6-bis(diethylamino)-3-oxospiro[isindoline-1,9-xanthen]-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2-yl)ethyl) -3-phenyl-1-(2-(3-phenyl-1-(2-(3-phenylthioureido)ethyl) thioureido) ethyl)thiourea (RTTU) และ 1-(2-(3,6-bis-(diethylamino)-3-oxospiro [isoindoline-1,9-xanthen]-2-yl)ethyl)-3-phenyl-1-(2-(3-phenyl-1-(2-(3-phenyl-1-(2-(3-phenylthioureido) ethyl)thioureido)-ethyl) thioureido) ethyl) thiourea (RPTU) จากการทดลองพบว่าเซนเซอร์ ทั้งสามชนิดนั้นสามารถตรวจจับไอออนปรอทได้และเมื่อเซนเซอร์ผสมกับปรอทจะทำให้เซนเซอร์มีการ เปลี่ยนเป็นสีชมพูและเมื่อนำไปหาค่า detection limit ของเซนเซอร์ RDTU RTTU และ RPTU พบว่ามีค่าเท่ากับ 512 62.6 และ 37.6 ppbตามลำดับ

ค.ศ. 2018 Kyeong S. และคณะ [82] ทำการสังเคราะห์อนุพันธ์โรดามีน6จีกับฟลูออรีนแล้ว นำมาเชื่อมต่อกันเป็นเซนเซอร์ในการตรวจจับไอออนโลหะหนักที่ทำละลายกับน้ำและไดเมทิลฟูมาเรท ในอัตราส่วน 80:20 (v/v) โดยโลหะหนักมีดังนี้ Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Li^+ , Cs^+ , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ag^+ , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} , และ Al^{3+} โดยเซนเซอร์มีค่าความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ จากการทดลองพบว่าเซนเซอร์สามารถตรวจจับได้เฉพาะ Hg^{2+} ซึ่งเมื่อเซนเซอร์ผสมกับ Hg^{2+} นั้นจะ พบว่ามีการเปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีชมพูซึ่งสามารถมองได้ด้วยตาเปล่าและเมื่อนำไปวัดค่า ฟลูออเรสเซนซ์หาค่า detection limit พบว่ามีค่าเท่ากับ 7.48×10^{-9} โมลาร์ นอกจากนี้ยังสามารถนำ เซนเซอร์ไปประยุกต์ใช้งานกับเครื่องปริ้นเตอร์ในการตรวจจับปรอท

2.11.4 การตรวจจับสายนิ้วมือแฝง

ค.ศ. 2007 Naveed U. และคณะ [83] ได้ศึกษาเรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพปลายนิ้วมือนิติ วิทยาศาสตร์โดยใช้ Biothesive Chitosan และอนุภาคนาโนทองคำ พบว่าเทคนิคใหม่สำหรับการ เพิ่มประสิทธิภาพของการใช้นิ้วมือที่แฝงด้วย lipophilic natural polymer ซึ่ง ได้แก่ ไคโตซานที่ช่วย ยึดอนุภาคนาโนทองคำไว้กับรอยนิ้วมือแฝงเพื่อเพิ่มความคมชัดของแสง การศึกษาการรวมตัวของ อนุภาคนาโนทองคำกับการตกค้างของไขมันที่ผ่านการเตรียมด้วย lipophilic chitosan เป็นวิธีที่ เหมาะสมที่สุดและมีความแตกต่างอย่างยอดเยี่ยมสำหรับไคโตซาน 1% โดยใช้เวลาในการรักษานาน 30 นาทีและพัฒนาสารละลายทองคำคอลลอยด์ต่อเนื่องเพื่อพัฒนา ระยะเวลา 6 ถึง 7 ชั่วโมง ความ แตกต่างที่ได้รับชัดเจนแตกต่างสิ้นเชิงและวิธีการนี้มีโอกาสที่ดีที่จะใช้สำหรับการพิสูจน์ตัวตนทาง นิติวิทยาศาสตร์

ค.ศ. 2008 Masahisa T. และคณะ [84] ได้ทำการถ่ายภาพปลายนิ้วมือบนแผ่นพลาสติกสีขาว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แล้วใช้สารสีย้อมโรดามีน6จีในการสร้างลายนิ้วมือโดยการถ่ายภาพนั้นจะทำการ กระตุ้นการเรืองแสงของลายนิ้วมือด้วยกับไดโอดเปล่งแสง(LED) ที่มีสีเขียวและสีน้ำเงินแล้วเมื่อทำการ ถ่ายภาพแล้วจะนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการเพิ่มประสิทธิภาพของ ลายนิ้วมือด้วยการนำโรดามีน6จีไปผสมกับ Ninhydrin และ Indium Chloride ซึ่งจากการทดลอง พบว่าการนำ Indium Chloride ไปผสมกับโรดามีน 6จินั้นจะทำให้ภาพลายนิ้วมือมีความชัดเจนเพิ่ม มากขึ้นเมื่อเทียบกับ Ninhydrin ซึ่งการเติม Ninhydrin นั้นทำให้ภาพลายนิ้วมือมีความชัดเจนน้อยลง ไปจากเดิมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.ศ. 2009 Quan C. และคณะ [85] ได้ทำการตรวจภาพลายนิ้วมือแฝงด้วยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์ โดยลายนิ้วมือจะถูกบีมลงบนกระจกสไลด์จากนั้นจะทำการปิดฝุ่นด้วยสารสีย้อม โรดามีน 6จี กับเมททีลีนบลูโดยสารสีย้อมทั้งสองจะถูกผสมกับผงของดินเบนโทไนท์โดยสารสีย้อมจะถูกดูดซับบนผงดินเบนโทไนท์และเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่พื้นผิวของอนุภาค โดยหลังจากการปิดฝุ่นเสร็จแล้วลายนิ้วมือจะถูกตรวจสอบด้วยการนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงขาวกับแสงยูวี

ค.ศ. 2013 Jhuma D. และคณะ [86] ได้ทำการตรวจจับลายนิ้วมือแฝงบนแผ่นกระจกสไลด์เรียบและแผ่นอลูมิเนียมที่มีการสะท้อนแสงสูงโดยใช้สารสีย้อมโรดามีน 6จีแล้วทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดมากขึ้นด้วยการนำฟิล์มบางมาวางเรียงเป็นแถวทับบนรอยนิ้วมือนั้นจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการมองเห็นลายนิ้วมือแฝงได้เนื่องจากการนำฟิล์มบางไปวางทับบนรอยนิ้วมือนั้นจะทำให้เกิดไอระเหยขึ้นซึ่งสังเกตได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์

ค.ศ. 2013 Kaiyang C. และคณะ [87] ได้ทำการตรวจจับลายนิ้วมือโดยใช้สารแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) ที่เป็นควอนตัมดอท เปรียบเทียบกับ methyl violet และโรดามีน 6จี โดยลายนิ้วมือแฝงถูกสร้างโดยการบีมลายนิ้วมือลงวัสดุที่มีรูพรุนเช่น เทปกาอไรส พอลิออลูมิเนียมและสแตนเลสจากนั้นนำลายนิ้วมือไปจุ่มลงสารละลายสีย้อมที่เตรียมไว้โดยได้ทำการศึกษาค่า pH ของสารละลายที่ต่างกัน รวมทั้งยังได้ศึกษาระยะเวลาในการบีมลายนิ้วมือลงบนวัสดุ โดยลายนิ้วมือแฝงจะถูกถ่ายภาพด้วยกล้อง Nikon D80 ในห้องที่มีแสง UV ความยาวคลื่น 365 nm และแสงขาวในการกระตุ้น

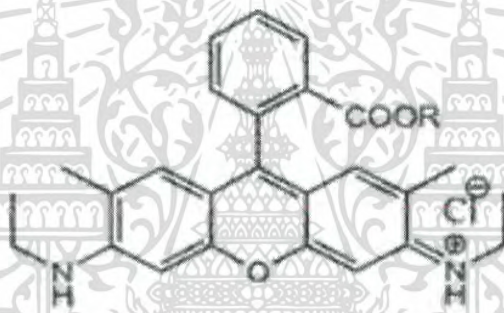
บทที่ 3

การหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์

ในบทนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสารโรดามีน 6จีที่ผสมกับแท่งนาโนทองคำเคลือบแพลเลเดียม ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการตอบสนองของพื้นผิว (response surface methodology, RSM) โดยใช้การใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3 ในการออกแบบการทดลอง เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมสารละลายรวมถึงวัสดุที่ใช้และเงื่อนไขในการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเรืองแสง ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกศึกษาสารเรืองแสงคือสารโรดามีน 6จี (R6G) เป็นสารเรืองแสงในกลุ่มของสารอินทรีย์ (Organic dyes) เนื่องจากมีราคาถูกและยังมีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่สูงกล่าวคือมีค่าควอนตัมยิลด์สูง [4,5] โดย R6G ถูกซื้อจากบริษัท Sigma Aldrich, USA.



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของโรดามีน 6จี

ตารางที่ 3.1 สมบัติของ R6G [88]

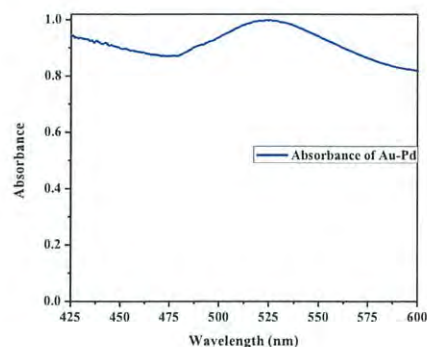
คุณสมบัติ	R6G
สูตรทางเคมี	$C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$
มวลโมเลกุล (กรัม / โมล)	479.02
ค่าควอนตัมยิลด์	0.95
ความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน (นาโนเมตร)	527
ความยาวคลื่นที่เกิดการเปล่งแสง (นาโนเมตร)	552

3.1.2 อนุภาคนาโนโลหะ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกแท่งนาโนโลหะมาผสมกับสารสีย้อมเรืองแสงเพื่อศึกษาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่เปลี่ยนไป โดยได้เลือกอนุภาคนาโนโลหะที่เป็นสองชนิดเคลือบกันคือแท่งนาโนโลหะทองคำที่ถูกเคลือบด้วยแพลเลเดียม (Au-Pd) โดยแท่งนาโนโลหะนี้เป็นแบบ core-shell nanorods เป็นสารแขวนลอยอยู่ในน้ำดีไอ ซึ่งถูกซื้อมาจากบริษัท NonoSeedz Limited ประเทศฮ่องกง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) แท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียม [89]

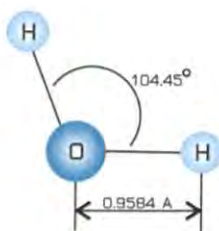
(ข) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Au-Pd

ตารางที่ 3.2 สมบัติพื้นฐานของ Au-Pd [89]

คุณสมบัติ	Au-Pd
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน (นาโนเมตร)	40±3
ความยาวของท่อน (นาโนเมตร)	96±6
ความหนาของแพลเลเดียมที่เคลือบท่อน (นาโนเมตร)	3
Mass concentration Au-Pd (µg/L)	250
ปริมาตรของ Au (nm ³)	120,637.44
ปริมาตรของ Pd (nm ³)	48,876.36
ปริมาตรของ Au (%)	71.17
ปริมาตรของ Pd (%)	28.83

3.1.3 น้ำดีไอ (Deionized water, DI) ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลต์ในรูปแบบของสารละลาย ผู้วิจัยได้เลือกน้ำ DI เป็นตัวทำละลายเนื่องมาจาก Au-Pd เป็นสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ DI อยู่แล้ว จึงนำน้ำ DI เป็นตัวทำละลายให้กับ R6G

น้ำ DI คือ น้ำที่ผ่านขบวนการขจัดไอออนของสารละลายทั้งหมด ทำให้ได้น้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากเกลือแร่ ไม่มีสารใดๆหลงเหลืออยู่ในน้ำอีก มีเพียงแต่โมเลกุลของน้ำบริสุทธิ์ล้วนๆ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า น้ำดีมัน (Deminerall Water) ไม่เหมาะสำหรับการดื่ม แต่มีประโยชน์อย่างมากในการทำยา เกษษกรรม เครื่องสำอาง อุตสาหกรรมเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการผลิตอาหาร กิจการเสริมความงาม [90]



รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของน้ำ DI [91]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สมบัติพื้นฐานของน้ำ DI [91]

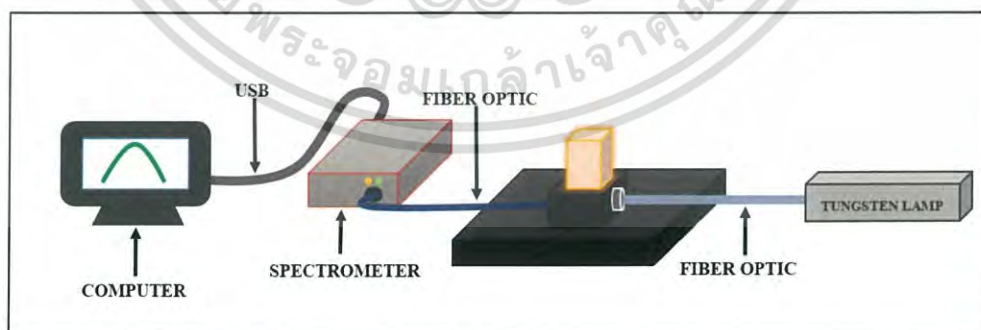
คุณสมบัติ	น้ำ DI
สูตรทางเคมี	H ₂ O
มวลโมเลกุล	18.015 g / cm ³
ความหนาแน่น	1 g / cm ³
จุดหลอมเหลว	0 °C
จุดเดือด	100 °C

3.2 การจัดเตรียมระบบวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกศึกษาหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ด้วยวิธีแบบ Relative [35] เนื่องจากมีความเหมาะสมต่อการจัดเตรียมอุปกรณ์ในการวัดค่าที่ห้องวิจัยของสาขาวิชา โดยการหาค่าควอนตัมยิลด์ด้วยวิธีนี้จะมีสมการดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4 ดังนั้นการวัดค่าควอนตัมยิลด์จึงประกอบไปด้วย 3 ส่วน ดังนี้

3.2.1 ระบบวัดการดูดกลืนแสง

สารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd ที่ถูกเตรียมขึ้นจะถูกนำมาวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงโดยอาศัยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Avantes รุ่น 2048 การจัดระบบเพื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะใช้ระบบมาตรฐานที่แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยแหล่งกำเนิดแสงในระบบคือแสงจากหลอดทั้งสแตน แสงจากหลอดทั้งสแตนจะเดินทางผ่านสายใยแก้วนำแสงไปยังสารละลายที่อยู่ในควิเวตต์ แสงบางส่วนจะถูกดูดกลืนไว้ภายในสารละลายและแสงในบางส่วนที่สามารถส่องผ่านออกมาได้จะผ่านไปยังสายใยแก้วนำแสงอีกเส้นหนึ่ง ซึ่งสายใยแก้วนำแสงนี้จะถูกต่อกับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์และถูกวิเคราะห์หาสเปกตรัมการดูดกลืนโดยโปรแกรม Avasoft version 7.4 ในที่นี้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายจะถูกคำนวณโดยอาศัยสมการของเบียร์-แลมเบิร์ต ดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 3.4 แผนภาพระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสง

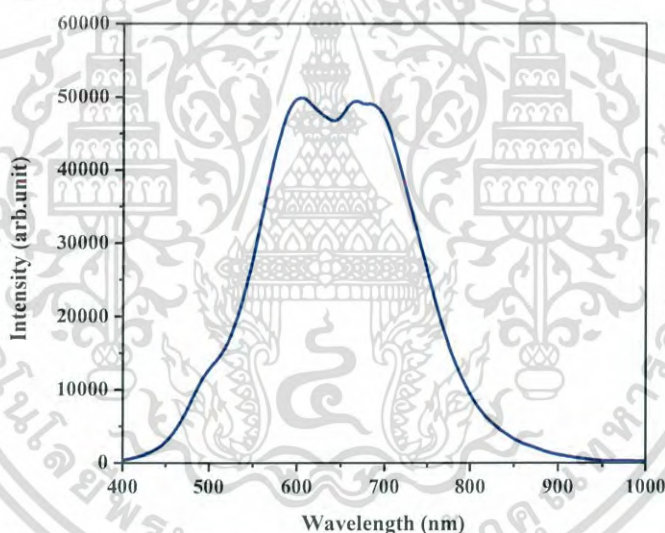
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสง

โดยระบบวัดการดูดกลืนแสงมีส่วนประกอบของระบบดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสงทังสเตน (Schott Megalight 100) ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 0.19 แอมแปร์ ซึ่งมีสเปกตรัมแสงที่เป็นดังรูปที่ 3.5 ให้แสงในย่านความยาวคลื่น 400-900 นาโนเมตร และสามารถปรับความเข้มแสงได้



รูปที่ 3.6 สเปกตรัมแสงของหลอดไฟทังสเตน

2. สายใยแก้วนำแสงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรสำหรับนำส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังอุปกรณ์จับยึดสารตัวอย่าง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 นาโนเมตรสำหรับนำแสงที่ผ่านจากตัวอย่างเข้าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์
3. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (UV-Vis spectrometer Avantesavaspec-EDU) พร้อมสายใยแก้วนำแสง (Avantes FC-UV200-2) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ทำหน้าที่ในการวัดแสง ซึ่งสามารถวัดแสงได้ในย่านความยาวคลื่น 200 – 1100 นาโนเมตร
4. อุปกรณ์จับยึด ทำหน้าที่ในการจับยึดสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 เส้นโดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.6 ซึ่งอุปกรณ์จับยึดจะมีช่องว่างอยู่กึ่งกลางระหว่างตัวยึดสายใยแก้วนำแสง สำหรับเป็นช่องใส่สารละลายตัวอย่างที่บรรจุในควอตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



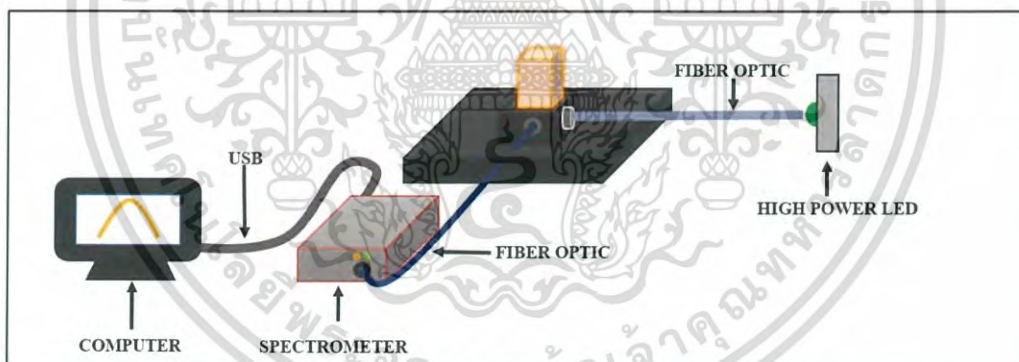
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์จับยึดสายใยแก้วนำแสง

5.คิวเวตต์ (Cuvette)

คิวเวตต์พลาสติก มีขนาด กว้าง 1.0 เซนติเมตร ยาว 1.0 เซนติเมตร สูง 4.0 เซนติเมตร ของบริษัท BRAND GMBH ประเทศเยอรมัน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้บรรจุสารละลายเพื่อทำการทดลอง

3.2.2 ระบบวัดการเปล่งแสง

การวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงจะสามารถทำได้โดยอาศัยระบบวัดดังรูปที่ 3.7 โดยผู้วิจัยจะทำการฉายแสงในย่านที่สารละลายดูดกลืนแสงได้ดีแล้วทำการวัดการเปล่งแสงบริเวณด้านข้างของสารละลายที่ถูกเตรียมในคิวเวตต์



รูปที่ 3.8 แผนภาพระบบวัดการเปล่งแสงของสารละลาย

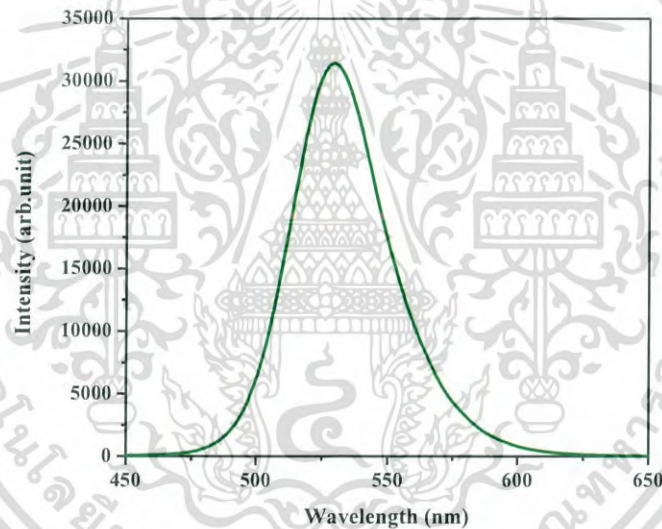
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ระบบวัดการเปล่งแสงของสารละลาย

ระบบการตรวจวัดการเปล่งแสงสำหรับสารละลายจะมีส่วนประกอบของระบบดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสงสำหรับการกระตุ้นสารเรืองแสง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode: LED) เป็นตัวกระตุ้นและไดโอดเปล่งแสงจะถูกยึดติดกับอุปกรณ์ระบายความร้อน โดยมีสเปกตรัมแสงเป็นดังรูปที่ 3.8 โดย LED นี้เป็นแสงสีเขียวมีความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร



รูปที่ 3.10 สเปกตรัมแสง LED สีเขียว

2. สเปกโตรมิเตอร์และสายใยแก้วนำแสง จะใช้เหมือนกับระบบวัดการดูดกลืนแสง
3. แท่นยึดจับจะใช้เหมือนกับระบบวัดการดูดกลืนแสง

3.2.3 การวัดค่าดัชนีหักเหแสง ในการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์นั้นผู้วิจัยต้องทำการวัดค่าดัชนีหักเหแสงของสารละลาย โดยผู้วิจัยได้ใช้เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหแสงรุ่น ATAGO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดลอง

3.3.1 ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของสารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd

วัตถุประสงค์

- เพื่อทำการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd

- เพื่อทำการหาช่วงความเข้มข้นของ Au-Pd ที่เติมลงใน R6G แล้วทำให้สเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G มีค่าเพิ่มมากขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาหาช่วงความเข้มข้นของสารละลาย R6G กับ Au-Pd เพื่อหาช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมของ R6G และ Au-Pd ที่นำมาผสมกันแล้วสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเปล่งแสงได้ โดยผู้วิจัยได้เตรียมสารละลาย R6G และสารละลาย R6G ผสม Au-Pd โดยค่าความเข้มข้นที่ได้เป็นดังตารางที่ 3.4 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย R6G และ Au-Pd มีค่าเท่ากับ 6×10^{-6} และ 0.4698×10^{-3} โมลาร์ตามลำดับ โดยวิธีการนี้ได้เตรียมมาจากงานวิจัยของ ณิชากร บูลพิภพอนันต์ [27] ที่ได้ทำก่อนหน้านี้

ตารางที่ 3.4 ค่าความเข้มข้นของ R6G และ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น R6G (โมลาร์)	ความเข้มข้น R6G ผสม Au-Pd (โมลาร์)	
		R6G	Au-Pd
1	3.00×10^{-6}	3.00×10^{-6}	2.34×10^{-4}
2	1.50×10^{-6}	1.50×10^{-6}	1.17×10^{-4}
3	7.50×10^{-7}	7.50×10^{-7}	5.87×10^{-5}
4	3.75×10^{-7}	3.75×10^{-7}	2.93×10^{-5}
5	1.87×10^{-7}	1.87×10^{-7}	1.46×10^{-5}
6	9.37×10^{-8}	9.37×10^{-8}	7.34×10^{-6}

3.3.2 การออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3

วัตถุประสงค์

- เพื่อหาค่า FQY ของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd
- เพื่อทำการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้น R6G กับ Au-Pd ที่มีผลต่อค่า FQY และทำการตรวจสอบสมการด้วยการทดลองจริง

การใช้ RSM ในการหาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าความเข้มข้นระหว่าง R6G กับ Au-Pd ที่ความเข้มข้น 5.50×10^{-7} ถึง 1.50×10^{-6} โมลาร์ และ 2.60×10^{-5} ถึง 1.17×10^{-4} โมลาร์ของ R6G และ Au-Pd ตามลำดับ ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะทำการออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

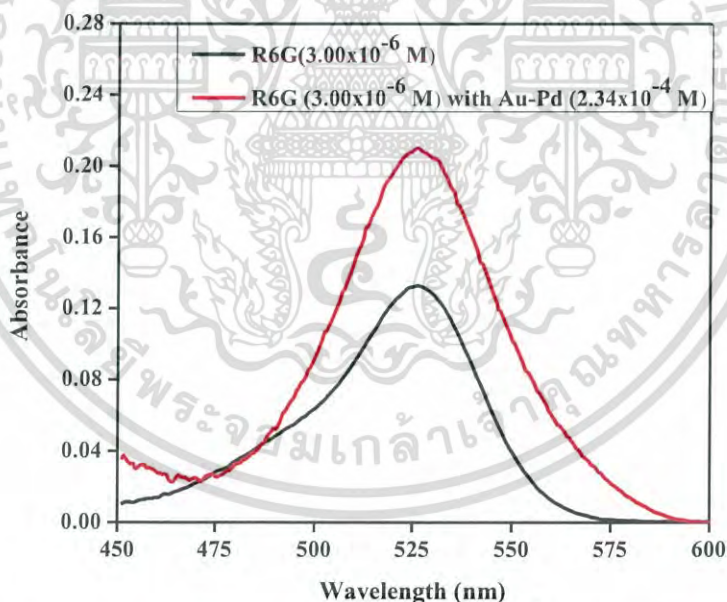
Design Expert 9.0.3 โดยได้รับความอนุเคราะห์จากห้องวิจัย ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สุกการะเวก อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากนั้นวิเคราะห์ผลของค่าความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ R6G กับ Au-Pd ที่มีผลต่อค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ โดยตัวแปรที่ศึกษามี 2 ตัวแปรทำให้โปรแกรมจะสุ่มเงื่อนไขการทดลองออกมา 13 เงื่อนไข โดยผู้วิจัยต้องทำการทดลองตามเงื่อนไขความเข้มข้นที่โปรแกรมออกแบบการทดลองมาให้

จากข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมนั้นจะถูกนำไปหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง การเปล่งแสง และค่าดัชนีหักเหแสงดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกสารอ้างอิงคือ R6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} โมลาร์ ที่ทำละลายในน้ำ DI ซึ่งมีค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์เท่ากับ 0.95 [69]

3.4 ผลการทดลอง

3.4.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของสารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd

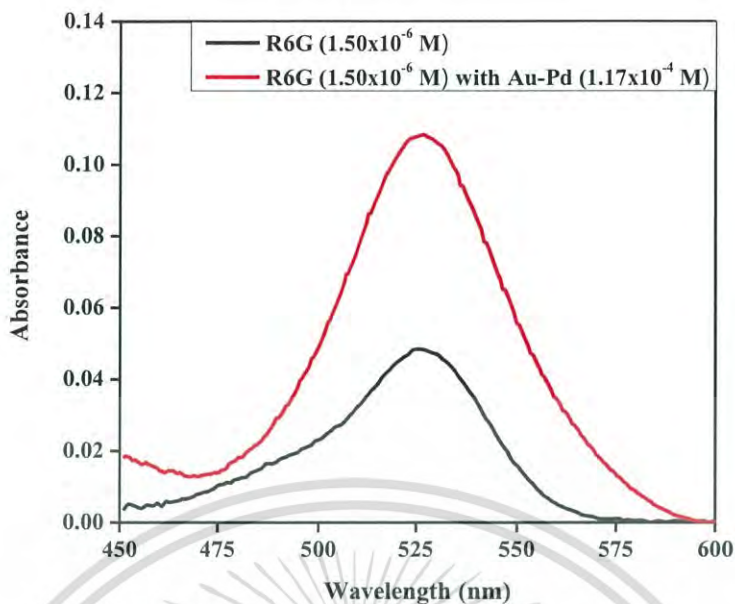
จากการทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างที่เตรียมในตารางที่ 3.4 ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.11 ถึง 3.16



รูปที่ 3.11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 1

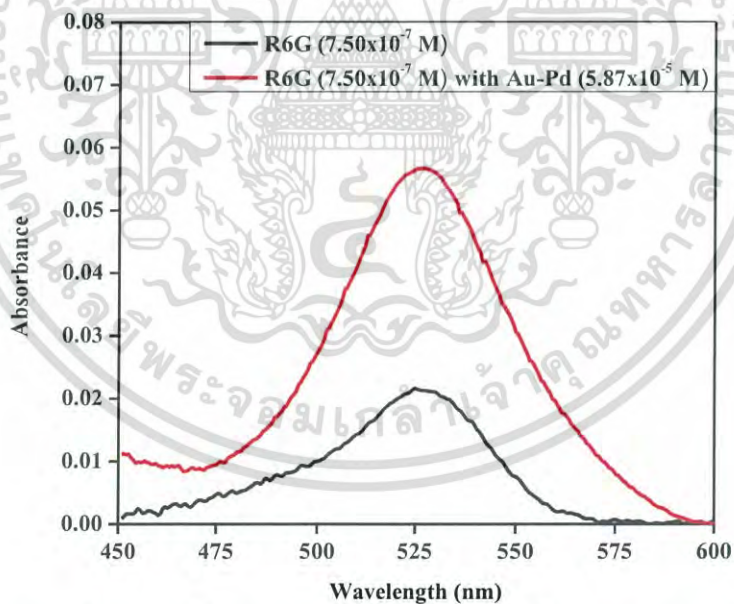
รูปที่ 3.11 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ 1 จากการทดลองพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของ R6G มีค่า 0.1330 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีการดูดกลืนเพิ่มขึ้นเป็น 0.2098 ซึ่งมีค่าการดูดกลืนเพิ่มขึ้น 1.57 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 2

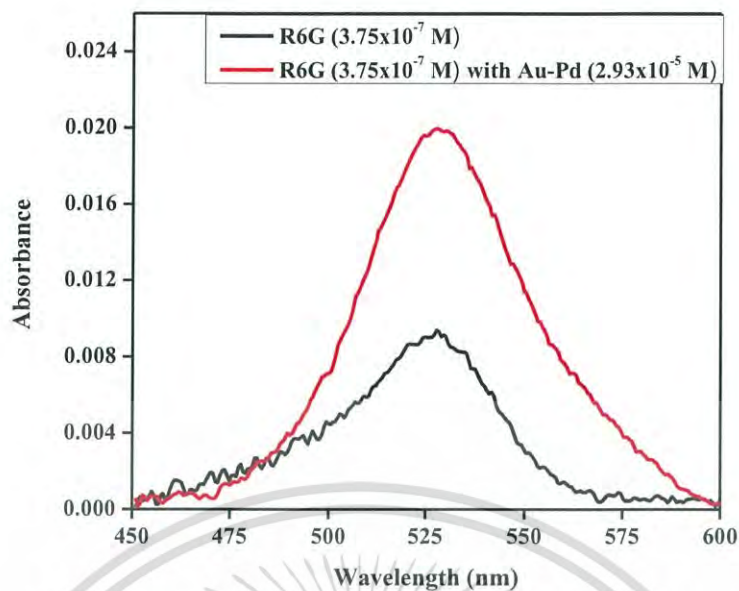
รูปที่ 3.12 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ 2 จากการทดลองพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของ R6G มีค่า 0.0485 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีการดูดกลืนเพิ่มขึ้นเป็น 0.1083 ซึ่งมีค่าการดูดกลืนเพิ่มขึ้น 2.23 เท่า



รูปที่ 3.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 3

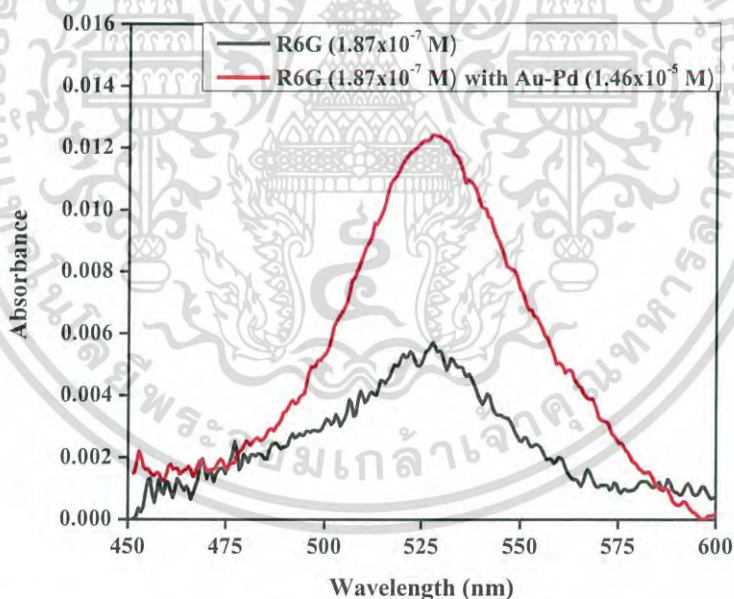
รูปที่ 3.13 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ 3 จากการทดลองพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของ R6G มีค่า 0.0216 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีการดูดกลืนเพิ่มขึ้นเป็น 0.0567 ซึ่งมีค่าการดูดกลืนเพิ่มขึ้น 2.61 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 4

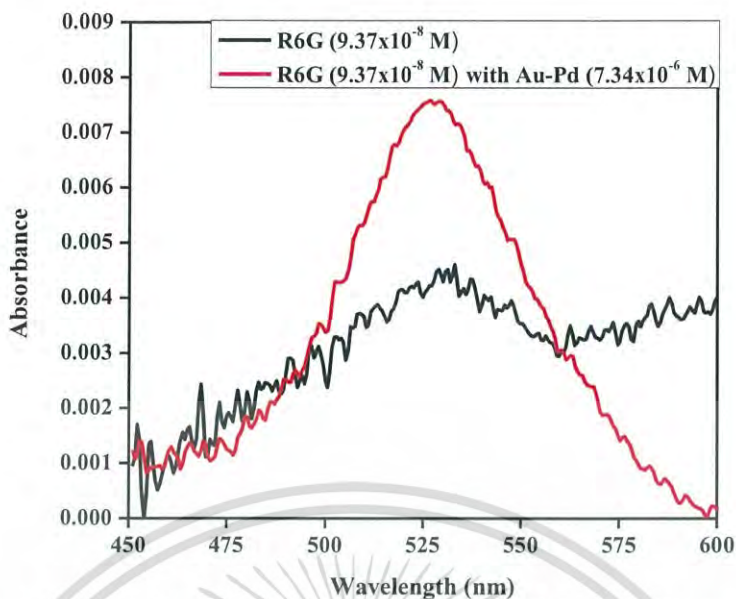
รูปที่ 3.14 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ 4 จากการทดลองพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของ R6G มีค่า 0.0094 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีการดูดกลืนเพิ่มขึ้นเป็น 0.0199 ซึ่งมีค่าการดูดกลืนเพิ่มขึ้น 2.12 เท่า



รูปที่ 3.15 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 5

รูปที่ 3.15 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ 5 จากการทดลองพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของ R6G มีค่า 0.0057 ซึ่งมีค่าน้อยมากทำให้สเปกตรัมที่ได้นั้นอาจมีค่าผิดเพี้ยนไปเนื่องจากมีสัญญาณรบกวน และเมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีการดูดกลืนเพิ่มขึ้นเป็น 0.0124 ซึ่งมีค่าการดูดกลืนเพิ่มขึ้น 2.17 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

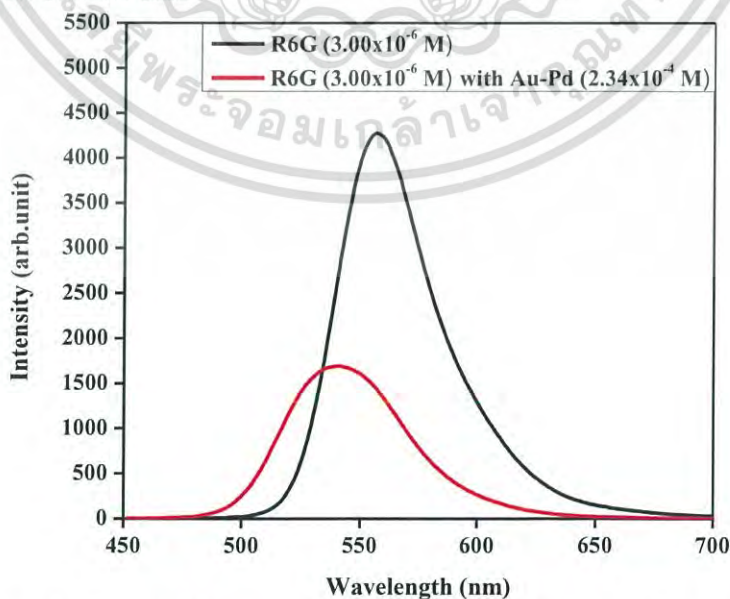


รูปที่ 3.16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 6

รูปที่ 3.16 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ 6 จากการทดลองพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของ R6G มีค่า 0.0046 ซึ่งมีค่าน้อยมากทำให้สเปกตรัมที่ได้นั้นอาจมีค่าผิดเพี้ยนไปเนื่องมาจากมีสัญญาณรบกวน และเมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีการดูดกลืนเพิ่มขึ้นเป็น 0.0076 ซึ่งมีค่าการดูดกลืนเพิ่มขึ้น 1.64 เท่า

จากการทดลองทั้ง 6 ตัวอย่าง พบว่าเมื่อนำ Au-Pd ไปผสมกับสารสีย้อม R6G ค่าการดูดกลืนมีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้ง 6 ตัวอย่าง เนื่องมาจาก Au-Pd มีการดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับ R6G จึงส่งผลทำให้มีค่าการดูดกลืนเพิ่มสูงขึ้น

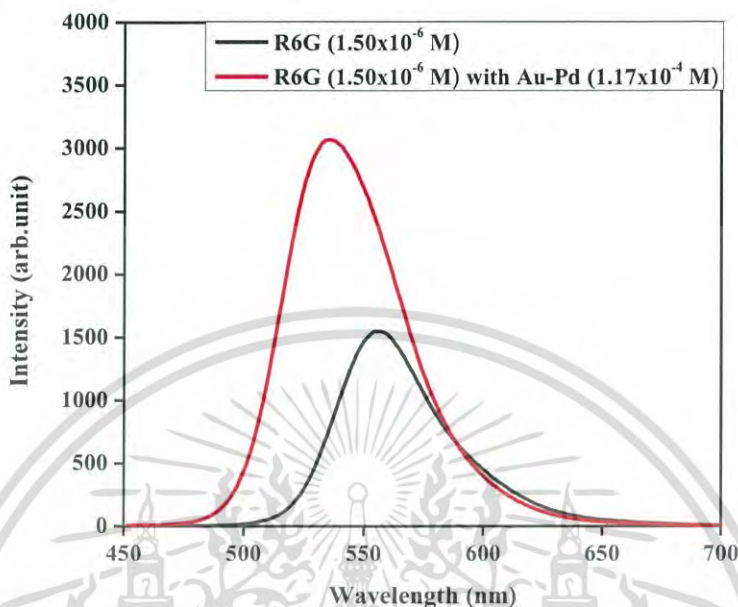
จากการทดลองวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารตัวอย่างที่เตรียมในตารางที่ 3.4 ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.17 ถึง 3.22



รูปที่ 3.17 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 1

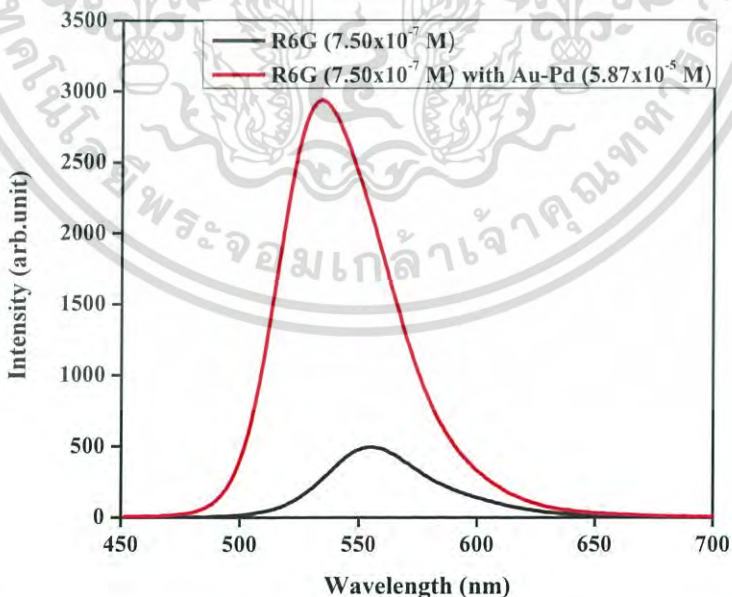
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.17 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่างที่ 1 จากการทดลองพบว่าค่าการเปล่งแสงของ R6G มีค่า 238,963.28 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีการเปล่งแสงลดลงเหลือ 110,895.96 arb.unit. ซึ่งมีค่าการเปล่งแสงลดลง 0.46 เท่า



รูปที่ 3.18 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 2

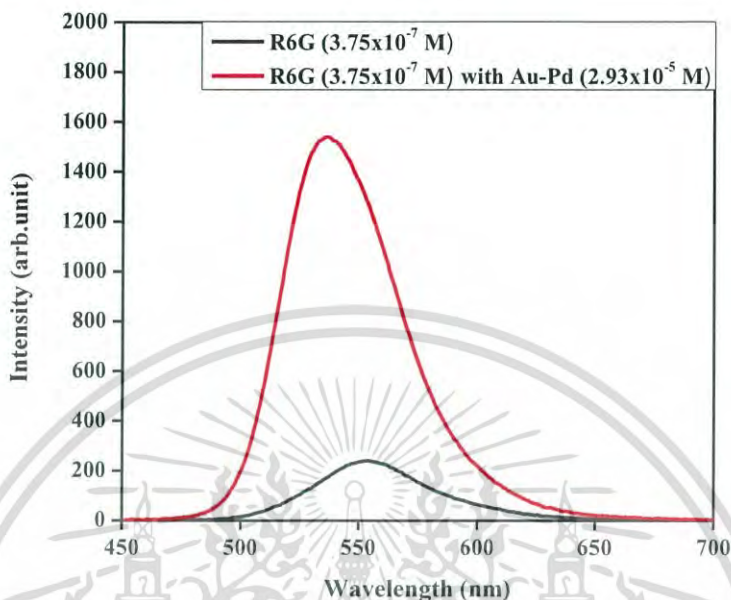
รูปที่ 3.18 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่างที่ 2 จากการทดลองพบว่าค่าการเปล่งแสงของ R6G มีค่า 88,163.40 arb.unit เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีการเปล่งแสงเพิ่มขึ้นเป็น 190,128.14 arb.unit ซึ่งมีค่าการเปล่งแสงเพิ่มขึ้น 2.16 เท่า



รูปที่ 3.19 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 3

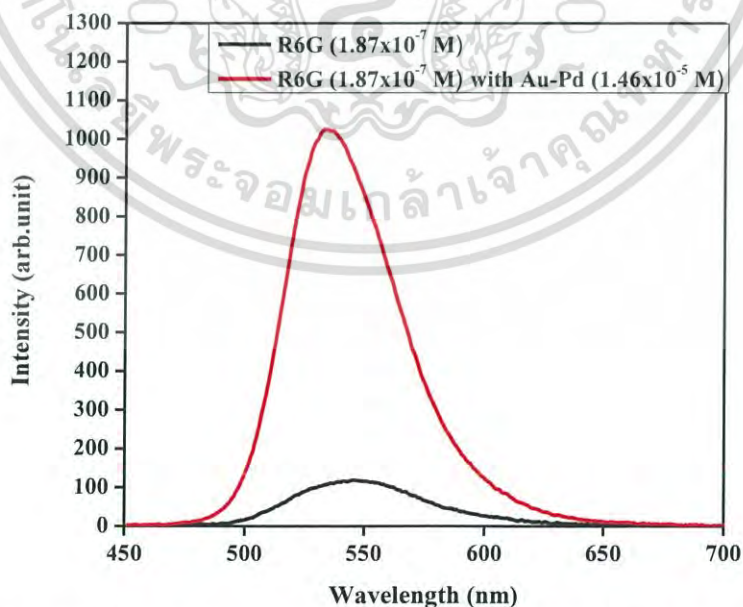
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.19 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่างที่ 3 จากการทดลองพบว่าค่าการเปล่งแสงของ R6G มีค่า 29,419.79 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีการเปล่งแสงเพิ่มขึ้นเป็น 173,136.67 arb.unit. ซึ่งมีค่าการเปล่งแสงเพิ่มขึ้น 5.89 เท่า



รูปที่ 3.20 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 4

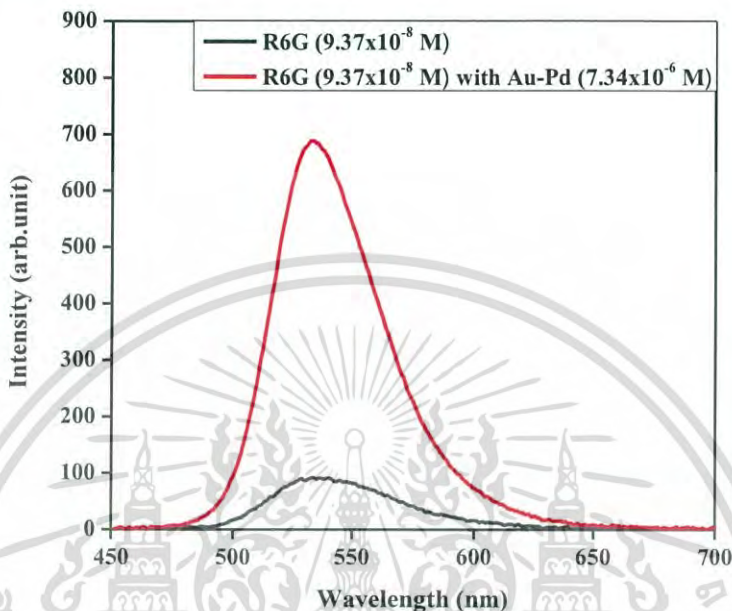
รูปที่ 3.20 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่างที่ 4 โดย R6G มีความเข้มข้น 3.75×10^{-7} โมลาร์ และ Au-Pd มีความเข้มข้น 2.93×10^{-5} โมลาร์ จากการทดลองพบว่าค่าการเปล่งแสงของ R6G มีค่า 15,207.34 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีการเปล่งแสงเพิ่มขึ้นเป็น 95,851.55 arb.unit. ซึ่งมีค่าการเปล่งแสงเพิ่มขึ้น 6.30 เท่า



รูปที่ 3.21 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.21 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่างที่ 5 โดย R6G มีความเข้มข้น 1.87×10^{-7} โมลาร์ และ Au-Pd มีความเข้มข้น 1.46×10^{-5} โมลาร์ จากการทดลองพบว่าค่าการเปล่งแสงของ R6G มีค่า 8,393.51 arb.unit เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีการเปล่งแสงเพิ่มขึ้นเป็น 61,140.55 arb.unit. ซึ่งมีค่าการเปล่งแสงเพิ่มขึ้น 7.28 เท่า



รูปที่ 3.22 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวอย่างที่ 6

รูปที่ 3.22 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่างที่ 6 โดย R6G มีความเข้มข้น 9.37×10^{-8} โมลาร์ และ Au-Pd มีความเข้มข้น 7.34×10^{-6} โมลาร์ จากการทดลองพบว่าค่าการเปล่งแสงของ R6G มีค่า 6,108.09 arb.unit. ซึ่งมีค่าความเข้มข้นน้อยมากทำให้สเปกตรัมการเปล่งแสงที่ได้นั้นอาจมีค่าผิดเพี้ยนไปเนื่องมาจากมีแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเกิดการกระเจิงแสงของ Au-Pd ออกมา ซึ่งได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ก และเมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีการเปล่งแสงเพิ่มขึ้นเป็น 39,710.12 arb.unit. ซึ่งมีค่าการเปล่งแสงเพิ่มขึ้น 6.50 เท่า

จากรูปที่ 3.17 ถึง รูปที่ 3.22 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd ของตัวอย่างที่ 1- 6 จากการทดลองพบว่าเมื่อเติม Au-Pd ผสมลงใน R6G ทำให้สเปกตรัมการเปล่งแสงมีการเปลี่ยนแปลงทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยในตัวอย่างที่ 1 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปพบว่าสเปกตรัมการเปล่งแสงมีค่าลดลงและในตัวอย่างที่ 2-6 พบว่าสเปกตรัมการเปล่งแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแท่งนาโนโลหะ Au-Pd และโมเลกุลของ R6G อยู่ห่างกันในระยะที่เหมาะสมทำให้เกิดอิเล็คตรอนอิสระของแท่งนาโนโลหะเกิดปรากฏการณ์ Surface plasmon ถูกส่งผ่านไปยัง R6G หรือเรียกว่าเกิดกลไก Plasmonic resonance energy transfer ขึ้น [92,93] ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.6.2

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจช่วงความเข้มข้นของ R6G และ Au-Pd ที่ทำให้ R6G มีสเปกตรัมการเปล่งแสงเพิ่มมากขึ้นนั่นคือตัวอย่างที่ 2-6 โดย R6G มีความเข้มข้น 1.50×10^{-6} ถึง 9.37×10^{-8} โมลาร์ และ Au-Pd มีความเข้มข้น 1.17×10^{-4} ถึง 7.34×10^{-6} โมลาร์ ผู้วิจัยจึงเลือกความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นของ R6G และ Au-Pd ที่มีความเข้มข้น 5.50×10^{-7} ถึง 1.50×10^{-6} โมลาร์ และ 2.60×10^{-5} ถึง 1.17×10^{-4} โมลาร์ ตามลำดับ เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมไม่น้อยเกินไปเพราะจะส่งผลต่อสัญญาณที่วัดออกมาได้เนื่องจากขีดจำกัดของเครื่องมือ จากนั้นจึงนำค่าความเข้มข้นไปออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Design expert 9.0.3 จะได้ค่าความเข้มข้นของ R6G และ Au-Pd เป็น 13 เงื่อนไข ดังตารางที่ 3.5 แล้วนำค่าที่ได้นี้ไปทำการทดลองหาค่าการดูดกลืนแสงเพื่อหาค่าพีคการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 nm (OD) หาค่าการแปลงแสงเพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ (I) และค่าดัชนีหักเหแสงซึ่งทั้งหมดนี้จะนำไปคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ (FQY)

ตารางที่ 3.5 ค่าความเข้มข้นของ R6G และ AuPd ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert 9.0.3

ลำดับ	ความเข้มข้น R6G	ความเข้มข้น R6G ผสม AuPd (โมลาร์)	
		R6G	AuPd
1	3.53×10^{-7}	3.53×10^{-7}	7.17×10^{-5}
2	5.50×10^{-7}	5.50×10^{-7}	2.60×10^{-5}
3	5.50×10^{-7}	5.50×10^{-7}	1.17×10^{-4}
4	1.03×10^{-6}	1.03×10^{-6}	7.06×10^{-6}
5	1.03×10^{-6}	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
6	1.03×10^{-6}	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
7	1.03×10^{-6}	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
8	1.03×10^{-6}	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
9	1.03×10^{-6}	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}
10	1.03×10^{-6}	1.03×10^{-6}	1.36×10^{-4}
11	1.50×10^{-6}	1.50×10^{-6}	2.60×10^{-5}
12	1.50×10^{-6}	1.50×10^{-6}	1.17×10^{-4}
13	5.50×10^{-7}	1.70×10^{-6}	7.17×10^{-5}

ในการหาค่า FQY ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธี Relative โดยวิธีนี้ต้องเตรียมสารที่ทราบค่า FQY แล้วทำการวัดการดูดกลืนแสง การแปลงแสงและค่าดัชนีหักเหแสง เพื่อเทียบกับสารที่ต้องการศึกษา โดยผู้วิจัยได้เลือกสารที่ทราบค่าเพื่อเป็นสารอ้างอิงคือสาร R6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} โมลาร์ ซึ่งมีค่า FQY เท่ากับ 0.95 [69]

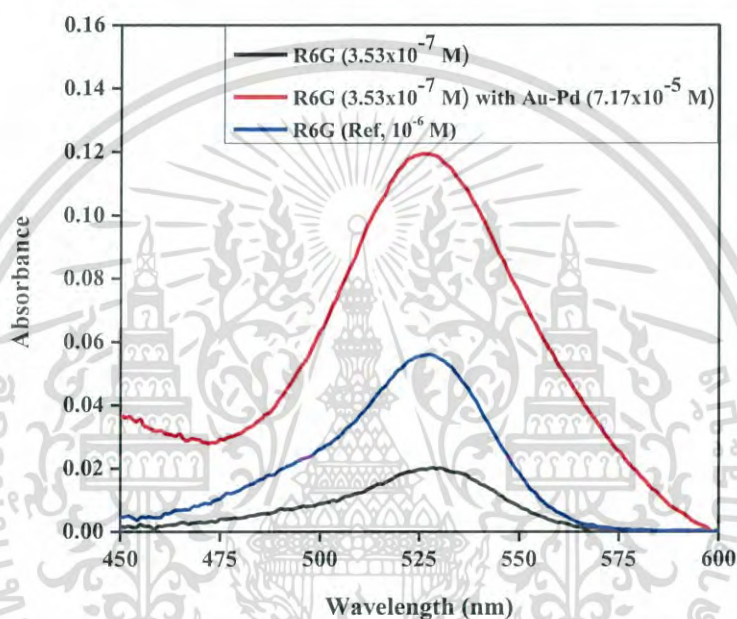
3.4.2 ผลการศึกษาค่า FQY ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert 9.0.3

ในการหาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ดังที่กล่าวมาข้างต้นและจะพบว่าต้องทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงทั้ง 3 อย่างคือ คุณสมบัติการดูดกลืนแสง คุณสมบัติการแปลงแสงและค่าดัชนีหักเหแสง ดังนั้นในส่วนของผลการทดลองในหัวข้อนี้จึงมีผลการทดลองทั้ง 3 อย่างดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสง

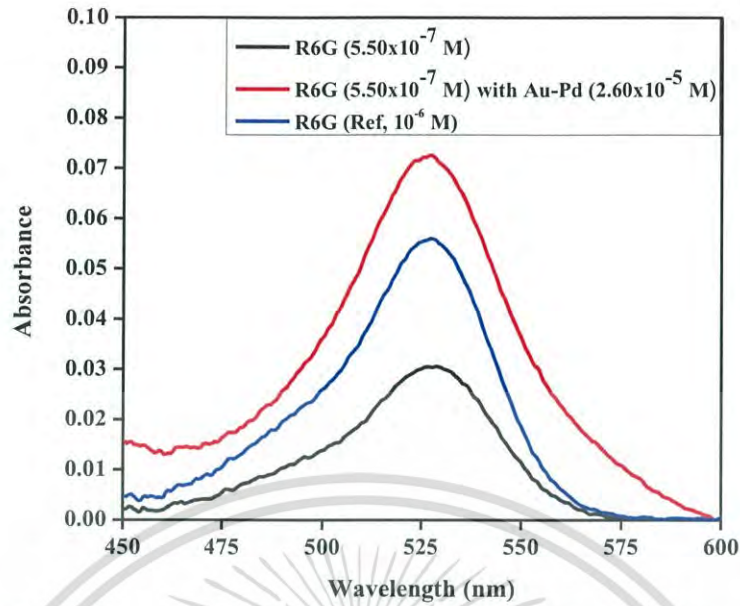
จากการทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างที่เตรียมในตารางที่ 3.5 ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.23 ถึง 3.35 โดยผู้วิจัยได้แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงแต่ละเงื่อนไข โดยแต่ละเงื่อนไขจะถูกนำไปหาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 nm (OD) ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.6 ในการหาค่า FQY ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารอ้างอิงที่ทราบค่า FQY ด้วยระบบวัดผลการดูดกลืนแสงเดียวกันที่ผู้วิจัยจัดระบบวัดขึ้นมาเพื่อทำการเปรียบเทียบกับ 13 เงื่อนไข โดยผู้วิจัยได้เลือกสารอ้างอิงคือ R6G ที่ทำละลายในน้ำ DI ที่ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์ ซึ่งมีค่า FQY เท่ากับ 0.95[69] เมื่อทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารอ้างอิงพบว่า มีค่า OD เท่ากับ 0.055



รูปที่ 3.23 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 1

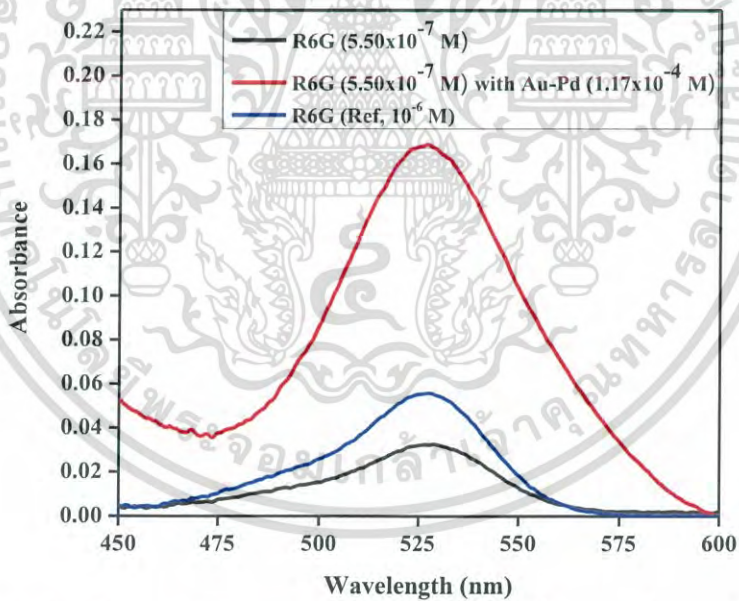
รูปที่ 3.23 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 1 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.022 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.199 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 5.40 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 2

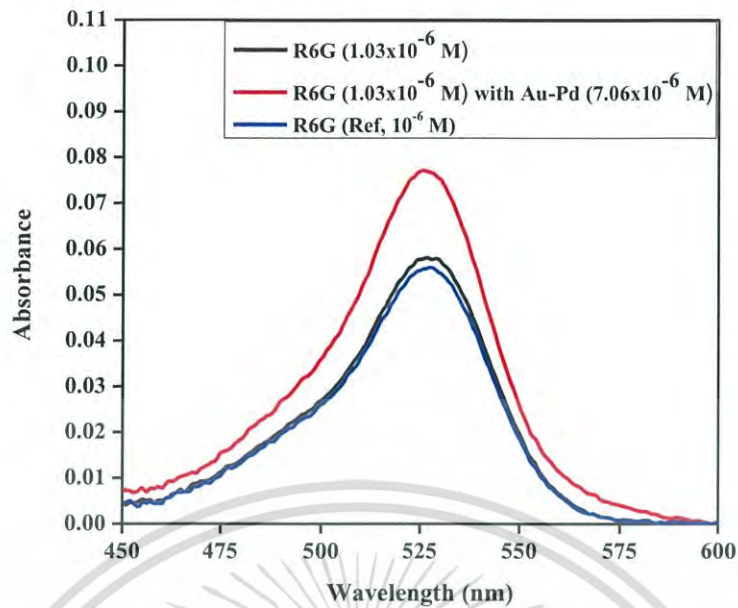
รูปที่ 3.24 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 2 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.032 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.071 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.21 เท่า



รูปที่ 3.25 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 3

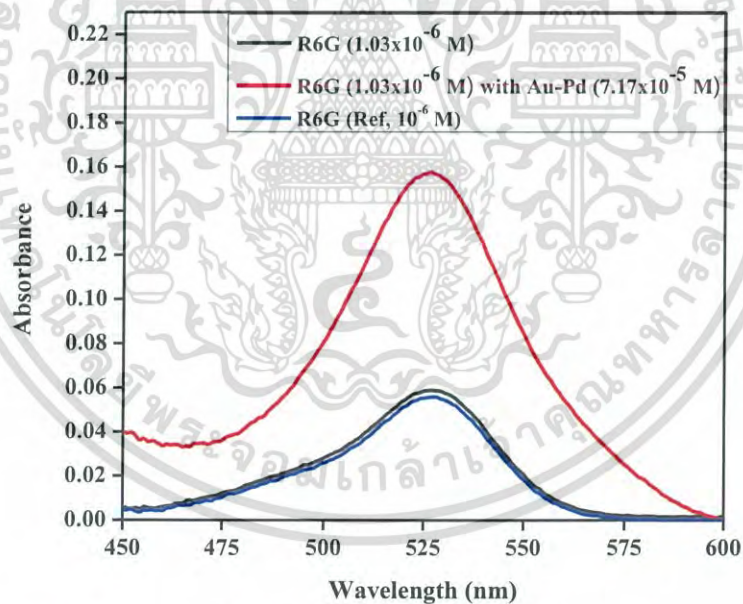
รูปที่ 3.25 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 3 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.032 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.166 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 5.18 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 4

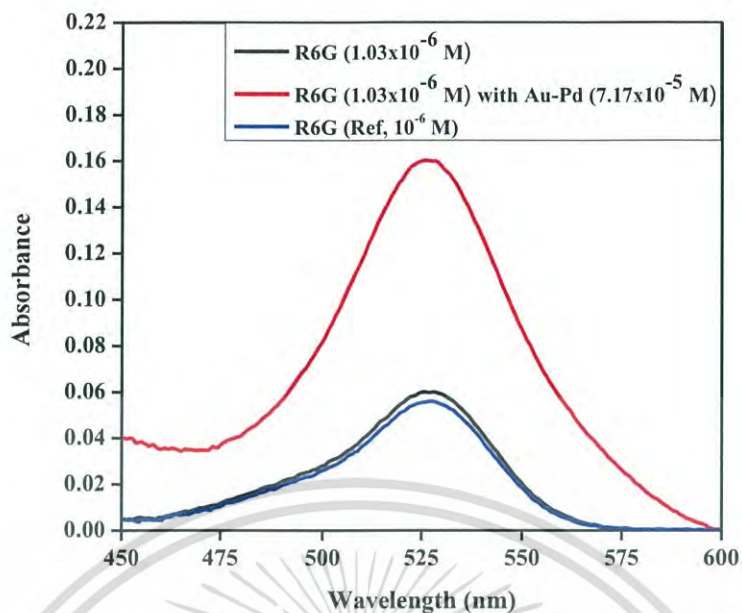
รูปที่ 3.26 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 4 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.058 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.075 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.29 เท่า



รูปที่ 3.27 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 5

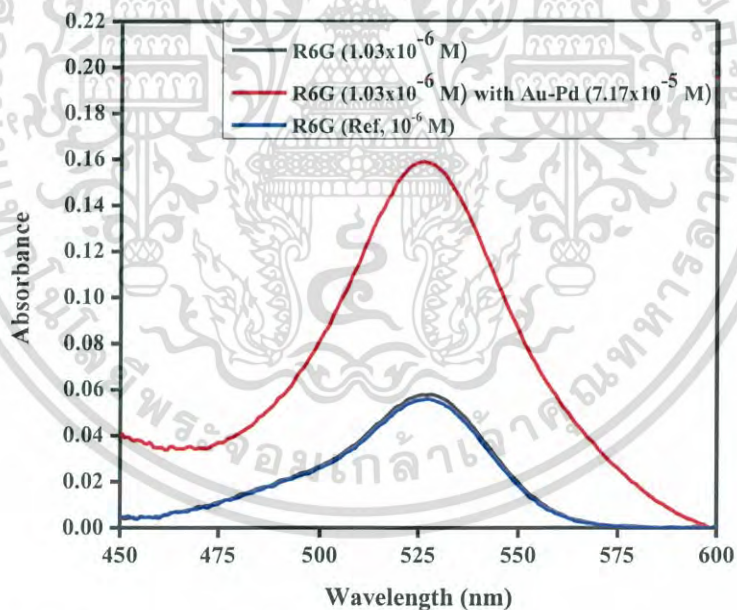
รูปที่ 3.27 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 5 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.058 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.155 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.67 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 6

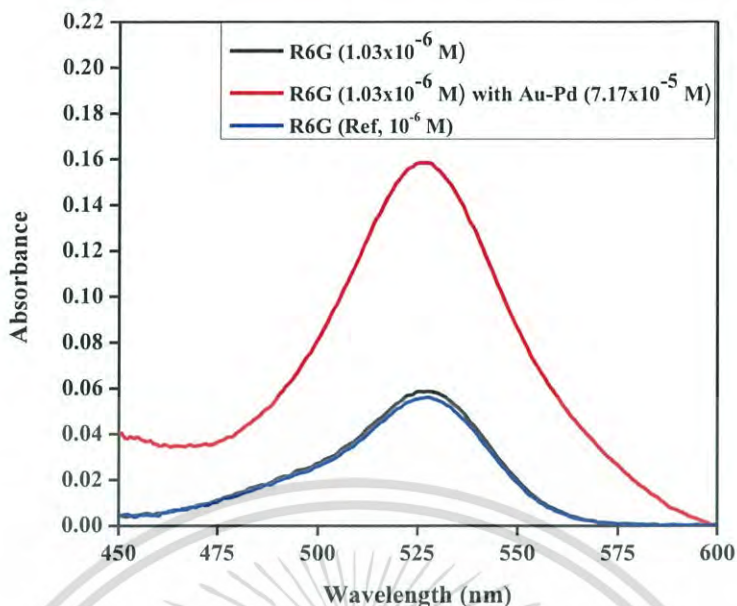
รูปที่ 3.28 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 6 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.059 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.158 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.67 เท่า



รูปที่ 3.29 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 7

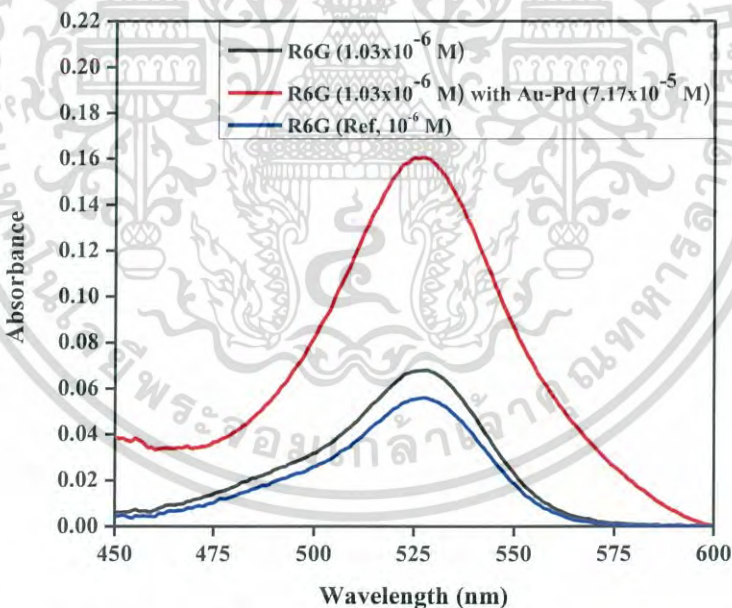
รูปที่ 3.29 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 7 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.057 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.157 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.75 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 8

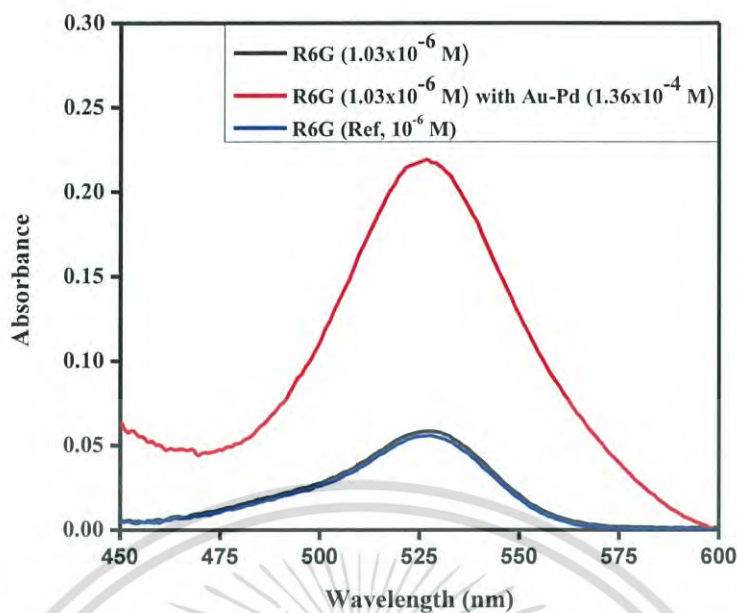
รูปที่ 3.30 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 8 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.058 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.157 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.70 เท่า



รูปที่ 3.31 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 9

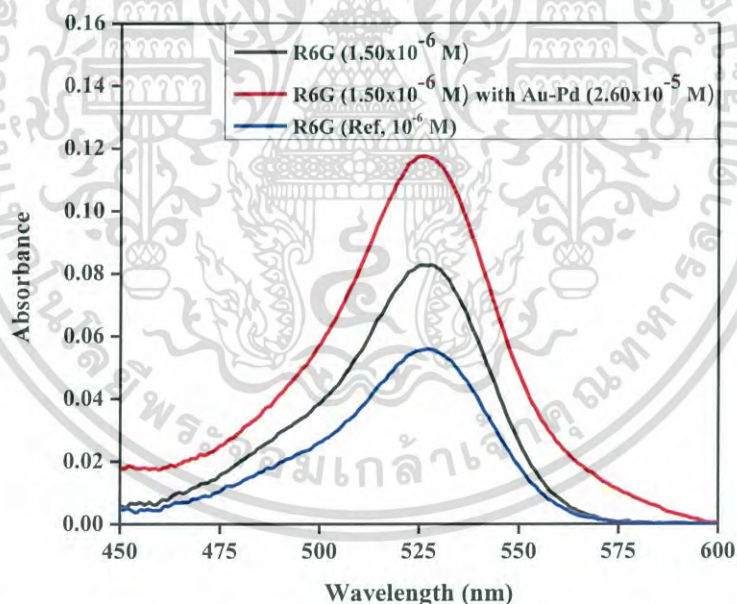
รูปที่ 3.31 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 9 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.067 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.159 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.37 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 10

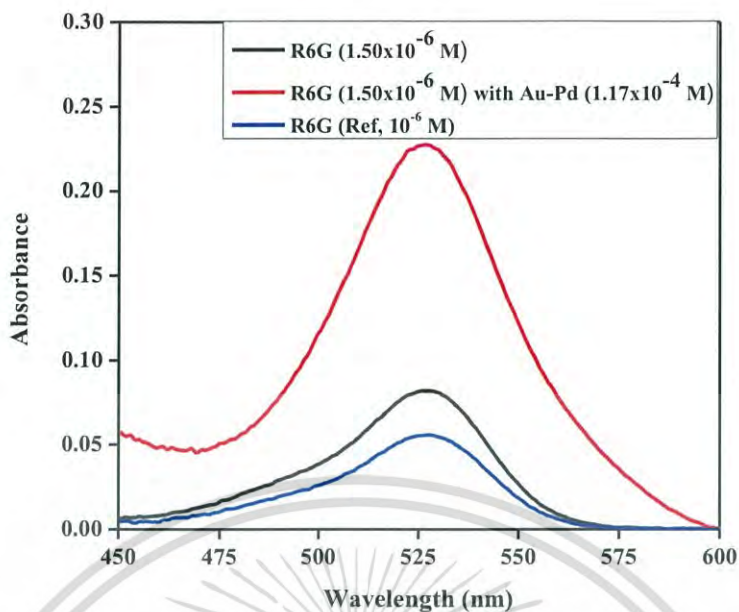
รูปที่ 3.32 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 10 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.058 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.216 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 3.72 เท่า



รูปที่ 3.33 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 11

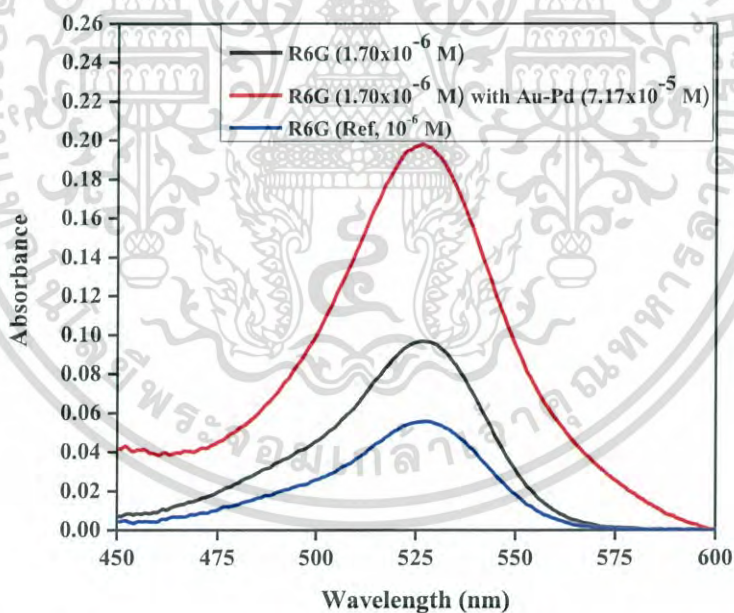
รูปที่ 3.23 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 11 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.082 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.116 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.41 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.34 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 12

รูปที่ 3.34 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 12 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.081 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.225 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.77 เท่า



รูปที่ 3.35 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 13

รูปที่ 3.35 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงื่อนไขที่ 13 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.096 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.194 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.02 เท่า

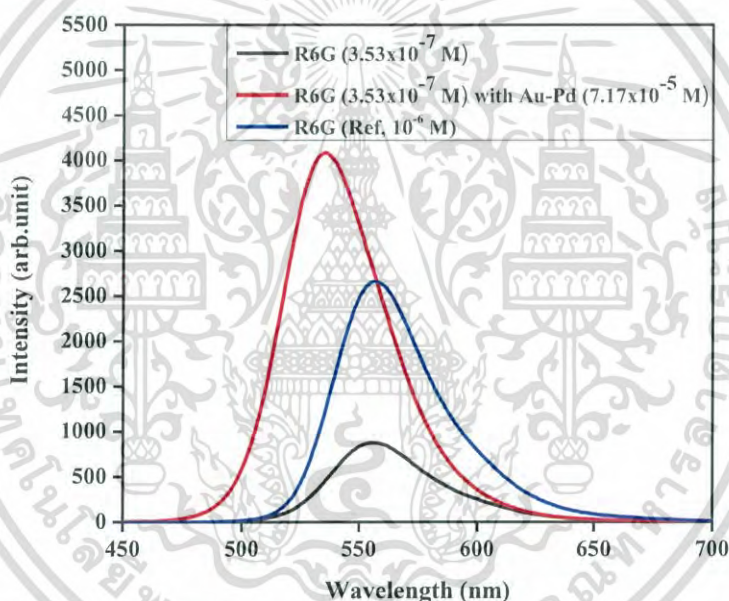
จากการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ R6G และ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd พบว่าเมื่อนำ Au-Pd ไปผสมกับ R6G จะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจาก Au-Pd มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับ R6G จึงส่งผลทำให้มีค่าการดูดกลืนเพิ่มสูงขึ้น โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะถูกนำไปหาค่า OD จากนั้นนำค่าที่ได้ ไปคำนวณหาค่า FQY ต่อไปซึ่งแสดงในตารางที่ 3.6

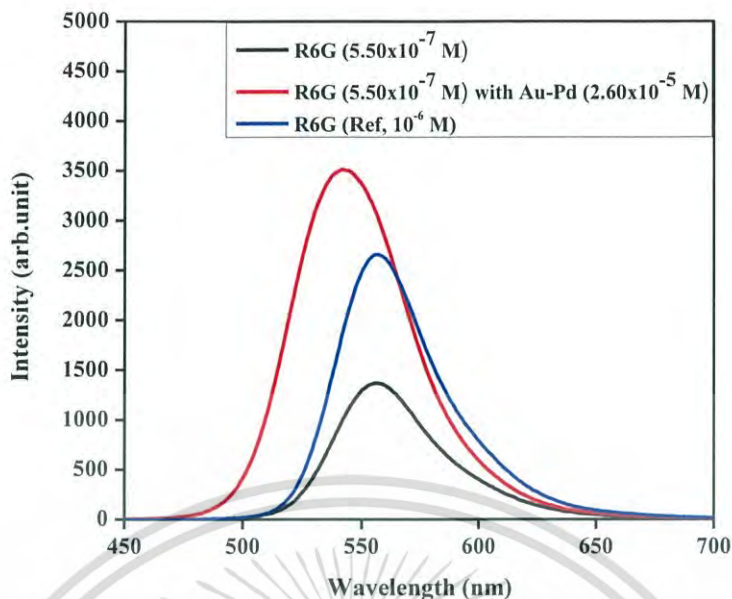
3.4.2.2 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสง

จากการทดลองวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารตัวอย่างที่เตรียมในตารางที่ 3.5 ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.36 ถึง 3.48 โดยผู้วิจัยได้แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงแต่ละเงื่อนไข โดยแต่ละเงื่อนไขจะถูกนำไปหาค่าพื้นที่ใต้กราฟ (I) ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.6 ในการหาค่า FQY ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดค่าการเปล่งแสงของสารอ้างอิงที่ทราบค่า FQY ด้วยระบบวัดการเปล่งแสงเดียวกันที่ผู้วิจัยจัดระบบวัดขึ้นมาเพื่อทำการเปรียบเทียบกับ 13 เงื่อนไข โดยผู้วิจัยได้เลือกสารอ้างอิงคือ R6G ที่ทำละลายในน้ำ DI ที่ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์ ซึ่งมีค่า FQY เท่ากับ 0.95 เมื่อทำการวัดค่าการเปล่งแสงของสารอ้างอิงพบว่า มีค่า I เท่ากับ 149,435.761 arb.unit.



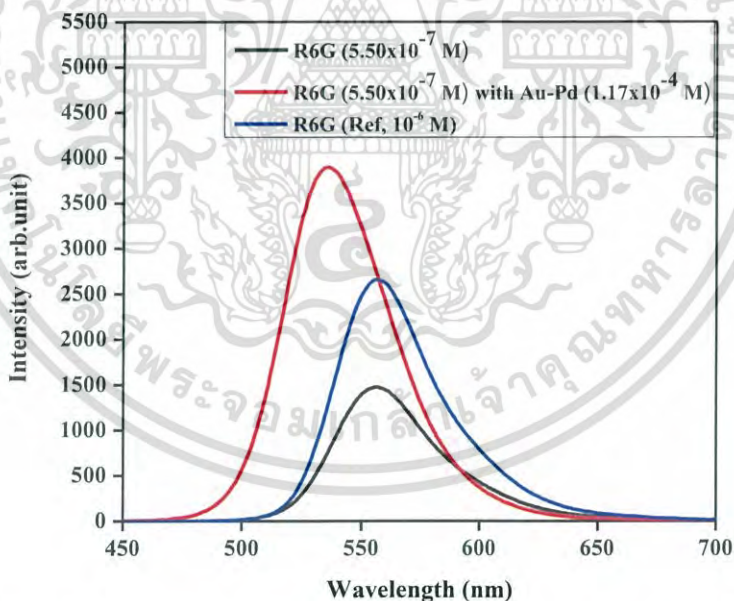
รูปที่ 3.36 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 1

รูปที่ 3.36 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 1 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 50,302.005 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 228,739.129 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 4.54 เท่า



รูปที่ 3.37 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 2

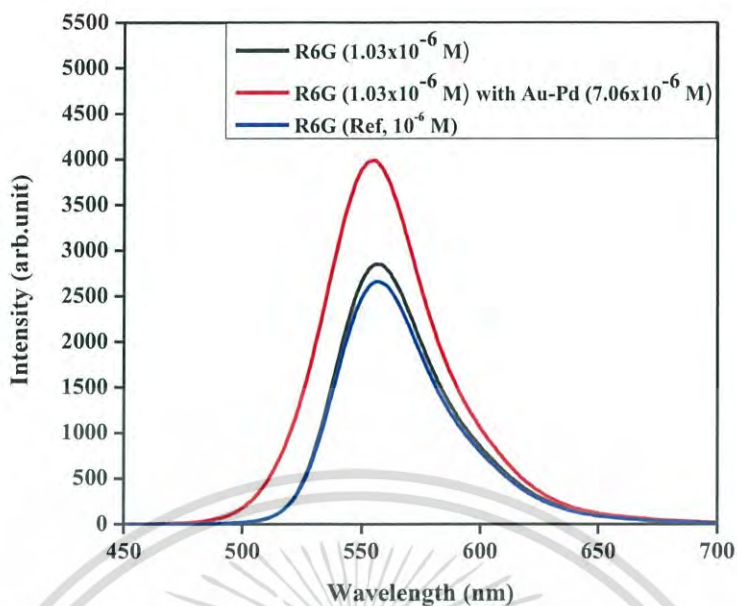
รูปที่ 3.37 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 2 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 82,603.744 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 224,184.172 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.71 เท่า



รูปที่ 3.38 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 3

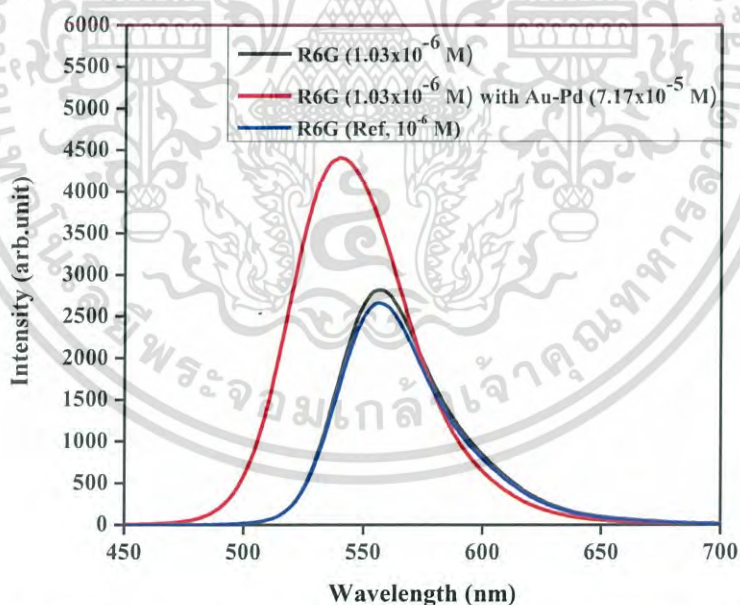
รูปที่ 3.38 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 3 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 83,819.022 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 223,775.028 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.66 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.39 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 4

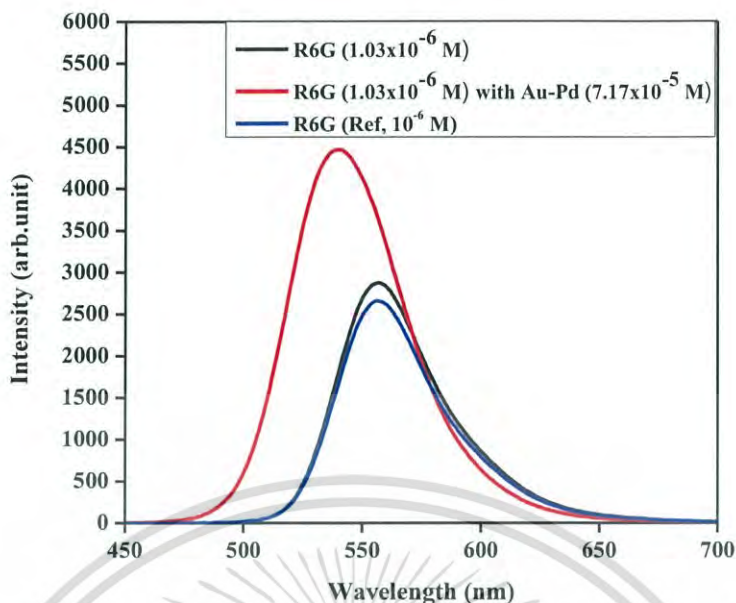
รูปที่ 3.39 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 4 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 159,959.841 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 241,897.851 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.51 เท่า



รูปที่ 3.40 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 5

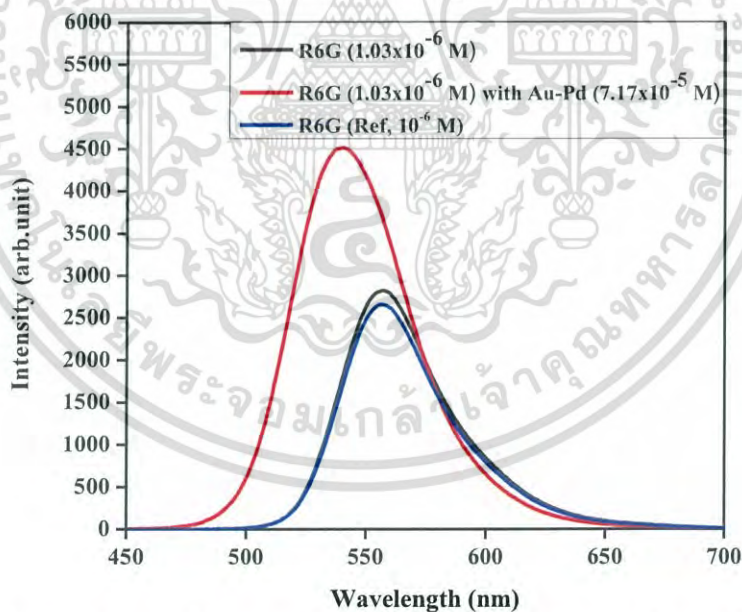
รูปที่ 3.40 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 5 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 158,155.123 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 274,404.869 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.74 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.41 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 6

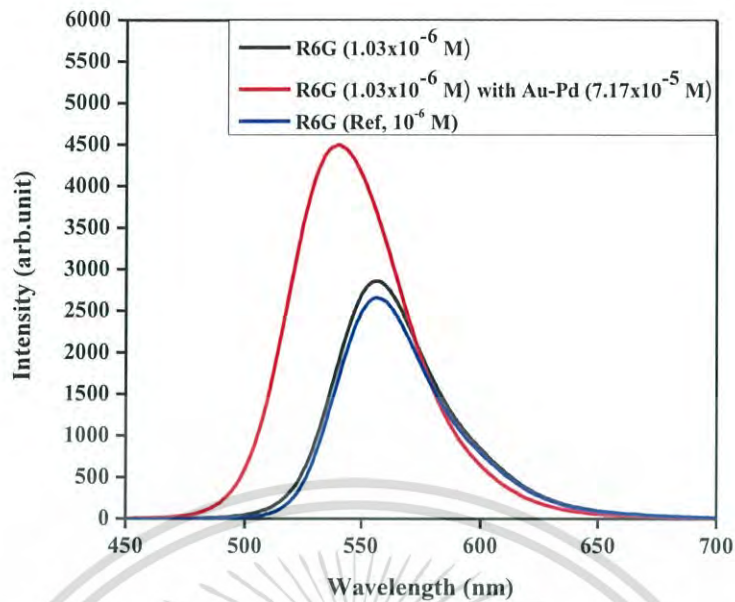
รูปที่ 3.41 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 6 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 161,241.487 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 278,442.149 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.72 เท่า



รูปที่ 3.42 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 7

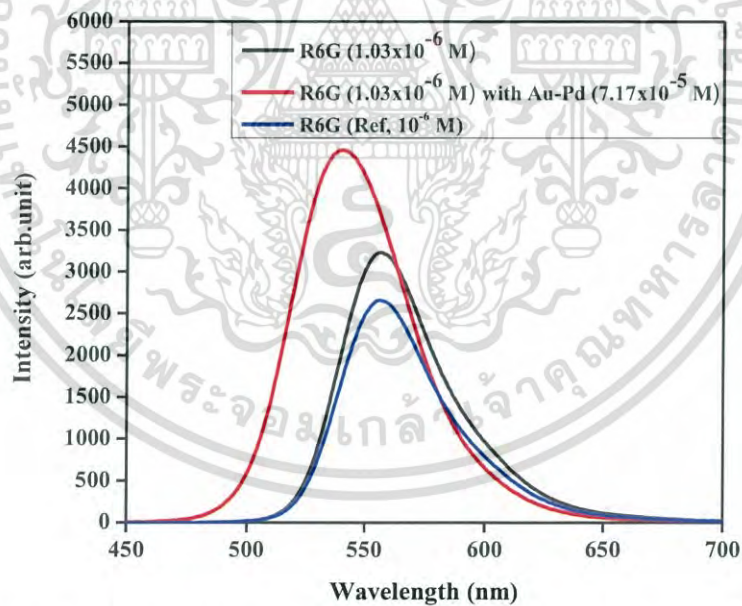
รูปที่ 3.42 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 7 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 158,536.007 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 281,573.074 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.77 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.43 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 8

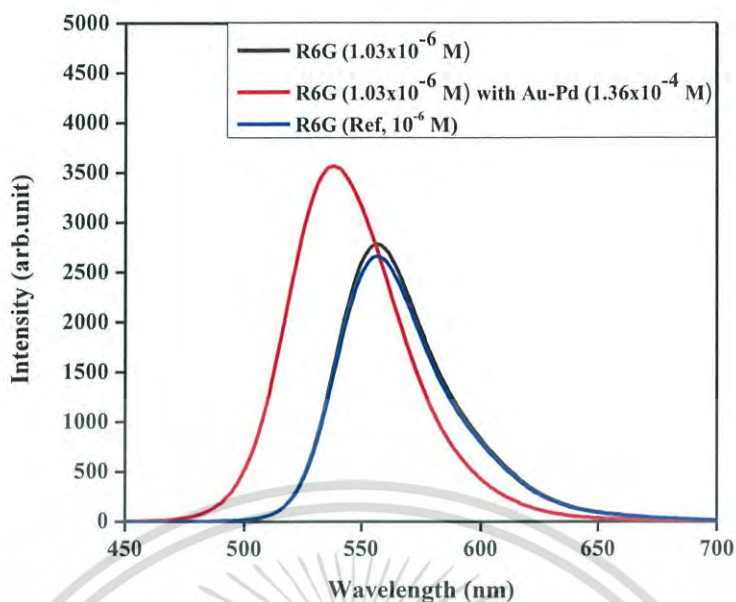
รูปที่ 3.43 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 8 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 161,413.131 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 279,859.644 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.73 เท่า



รูปที่ 3.44 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 9

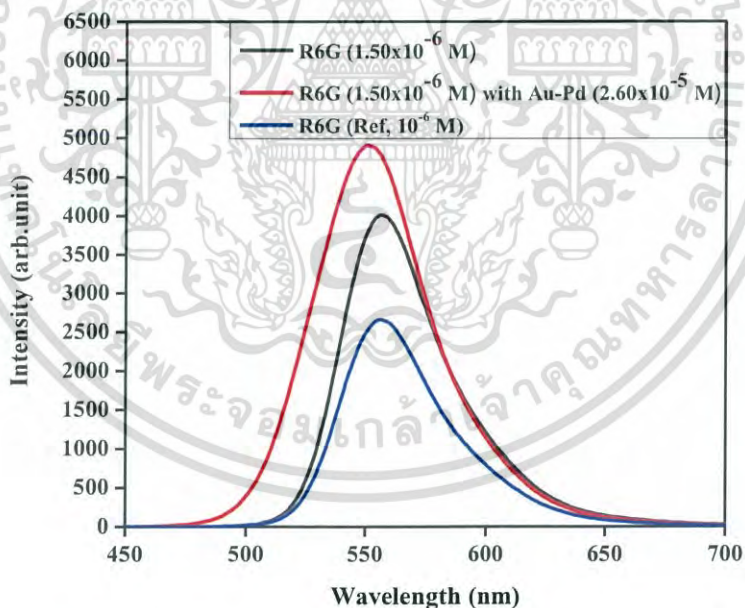
รูปที่ 3.44 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 9 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 180,939.336 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 279,066.648 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.54 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.45 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 10

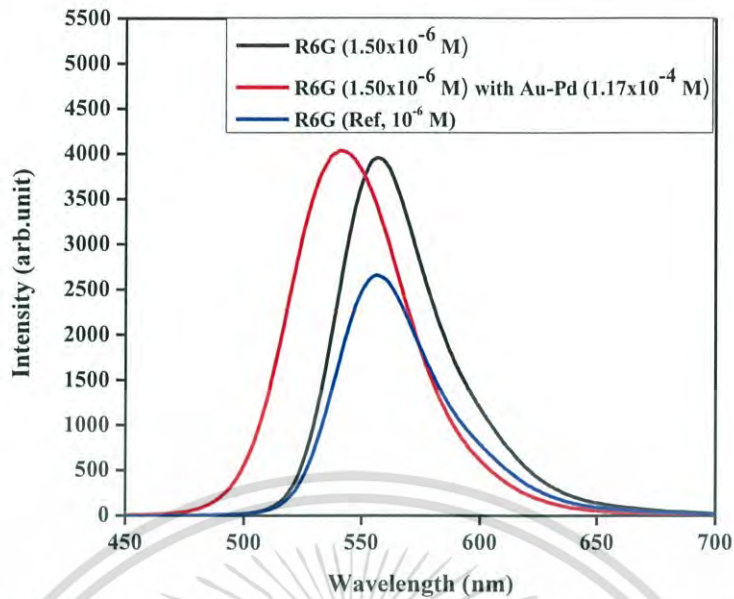
รูปที่ 3.45 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 10 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 156,218.158 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 215,292.498 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.37 เท่า



รูปที่ 3.46 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 11

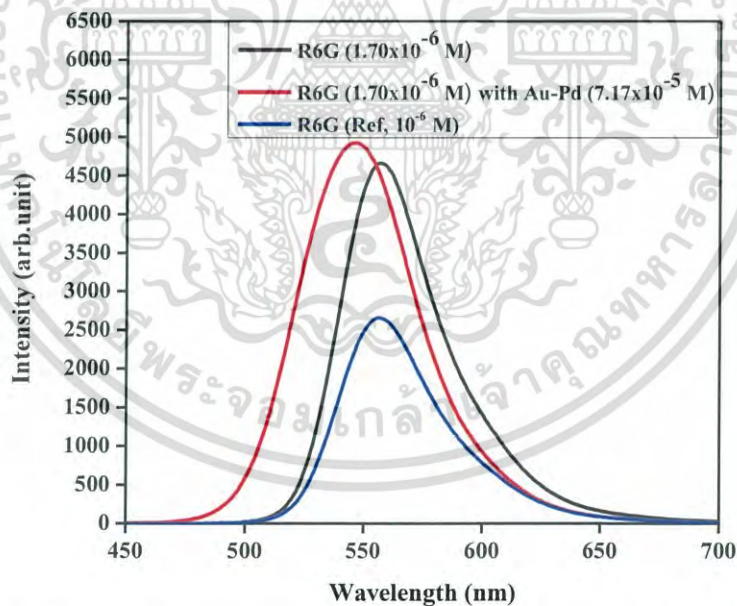
รูปที่ 3.46 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 11 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 224,084.840 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 313,036.022 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.39 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.47 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 12

รูปที่ 3.47 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 12 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 221,412.541 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 255,871.570 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.55 เท่า



รูปที่ 3.48 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของเงื่อนไขที่ 13

รูปที่ 3.48 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเงื่อนไขที่ 13 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 260,328.150 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 320,301.143 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.23 เท่า

จากการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G และ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd พบว่าเมื่อนำ Au-Pd ไปผสมกับ R6G จะทำให้ค่าการเปล่งแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเท่านาโนโลหะ Au-Pd เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และโมเลกุลของ R6G อยู่ห่างกันในระยะที่เหมาะสมทำให้อิเล็กทรอนิกส์ของแท่งนาโนโลหะเกิดปรากฏการณ์ Surface plasmon ถูกส่งผ่านไปยัง R6G หรือเรียกว่าเกิดกลไก Plasmonic resonance energy transfer [92,93] ขึ้น ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.6.2 โดยสเปกตรัมการเปล่งแสงจะถูกนำไปหาค่า I จากนั้นนำค่าที่ได้ ไปคำนวณหาค่า FQY ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.6

3.4.2.3 ผลการศึกษาค่าดัชนีหักเหแสง

ค่าดัชนีหักเหแสงของสาร R6G และ R6G ที่ผสม Au-Pd จากการทดลองพบว่าเมื่อนำ Au-Pd ไปผสมกับ R6G ทำให้มีค่าดัชนีหักเหแสงเปลี่ยนไปเล็กน้อย โดยค่าดัชนีหักเหแสงนี้จะถูกนำไปคำนวณหาค่า FQY ต่อไปดังตารางที่ 3.6 ซึ่งค่าดัชนีหักเหแสงของสารอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 1.3320

จากการศึกษาการดูดกลืนแสง การเปล่งแสงและค่าดัชนีหักเหแสงแล้วจึงนำค่าที่ได้ทั้ง 3 นี้ ไปคำนวณหาค่า FQY จากสมการที่ 2.4 ซึ่งค่า FQY ที่ได้นั้นแสดงได้ในตารางที่ 3.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd

ลำดับ	ความเข้มข้น		ค่าการดูดกลืนแสง (OD)		พื้นที่ใต้กราฟของการเปล่งแสง (I)		ค่าดัชนีหักเหแสง (n)		FQY	
	R6G	Au-Pd	R6G	R6G ผสม Au-Pd	R6G	R6G ผสม Au-Pd	R6G	R6G ผสม Au-Pd	R6G	R6G ผสม Au-Pd
1	3.53×10^{-7}	7.17×10^{-5}	0.022	0.119	50,302.005	228,739.129	1.3312	1.3319	0.78	0.67
2	5.50×10^{-7}	2.60×10^{-5}	0.032	0.071	82,603.744	224,184.172	1.3322	1.3316	0.90	1.10
3	5.50×10^{-7}	1.17×10^{-4}	0.032	0.166	83,819.022	223,775.028	1.3319	1.3321	0.90	0.47
4	1.03×10^{-6}	7.06×10^{-6}	0.058	0.075	159,959.841	241,897.851	1.3324	1.3322	0.97	1.12
5	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.058	0.155	158,155.123	275,404.869	1.3319	1.3318	0.95	0.62
6	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.059	0.158	161,241.487	278,442.149	1.3316	1.3319	0.95	0.61
7	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.057	0.157	158,536.007	281,573.074	1.3319	1.3317	0.97	0.63
8	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.058	0.157	161,413.131	279,859.644	1.3322	1.3324	0.97	0.63
9	1.03×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.067	0.159	180,939.336	279,066.648	1.3326	1.3316	0.94	0.61
10	1.03×10^{-6}	1.36×10^{-4}	0.058	0.216	156,218.158	215,292.498	1.3315	1.3318	0.94	0.35
11	1.50×10^{-6}	2.60×10^{-5}	0.082	0.116	224,084.840	313,036.022	1.3335	1.3326	0.96	0.95
12	1.50×10^{-6}	1.17×10^{-4}	0.081	0.225	221,412.541	255,871.570	1.3323	1.3339	0.96	0.40
13	1.70×10^{-6}	7.17×10^{-5}	0.096	0.194	260,328.150	320,301.143	1.3317	1.3321	0.95	0.58

จากตารางที่ 3.6 แสดงค่า FQY ของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd จากการทดลองพบว่า เมื่อเติม Au-Pd ลงใน R6G ทำให้ค่า FQY มีการเปลี่ยนแปลงลดน้อยลง แต่มีเงื่อนไขที่ 2 กับเงื่อนไขที่ 4 ที่มีค่า FQY เกิน 1 ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎีเนื่องมาจากการในการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd จะทำให้เกิดการกระเจิงแสงของแหล่งกำเนิดแสงกับ Au-Pd ซึ่งผู้วิจัยได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ก จากนั้นเมื่อนำค่า FQY ไปหาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากโปรแกรม Design Expert จะได้เป็นดังสมการที่ 3.1 โดยสมการที่ 3.1 จะถูกวิเคราะห์โดยตาราง ANOVA ดังตารางที่ 3.7 และสมการที่ 3.1 จะถูกออกแบบเป็นโมเดล 3 มิติดังรูปที่ 3.50

$$FQY = 1.48345 - (2.93524 \times 10^5 \times A) - (11949.31203 \times B) + (9.20837 \times 10^8 \times A \times B) + (6.64820 \times 10^{10} \times A^2) + (3.34804 \times 10^7 \times B^2) \quad (3.1)$$

เมื่อ FQY คือ ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของ R6G ผสมกับ Au-Pd

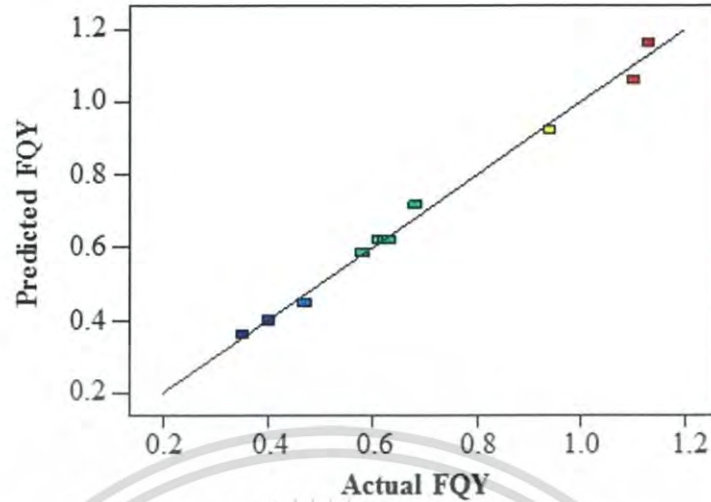
- A คือ ค่าความเข้มข้นของ R6G ในหน่วยโมลาร์
- B คือ ค่าความเข้มข้นของ Au-Pd ในหน่วยโมลาร์

ตารางที่ 3.7 การวิเคราะห์ผลของค่าความแปรปรวน (ANOVA)

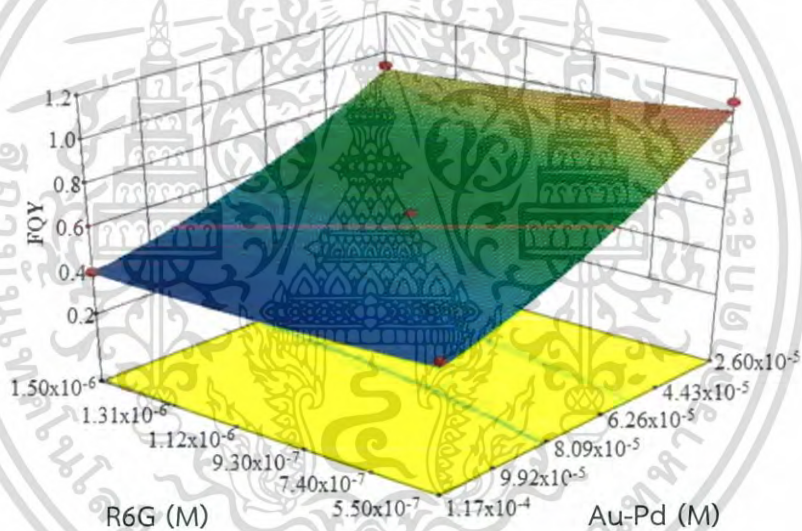
Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value
Model	0.69	5	0.14	129.45	< 0.0001
A = R6G	0.015	1	0.015	14.05	0.0072
B = Au-Pd	0.64	1	0.64	599.73	< 0.0001
AB	1.600E-003	1	1.600E-003	1.49	0.2616
A ²	1.565E-003	1	1.565E-003	1.46	0.2664
B ²	0.034	1	0.034	31.77	0.0008
Residual	7.511E-003	7	1.073E-003		
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			

จากตารางที่ 3.7 จะพบว่าค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ซึ่งเป็นนัยสำคัญ [72] โดยจากรูปที่ 3.49 แสดงให้เห็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทดลองกับการคาดการณ์ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd จะพบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่า R² เท่ากับ 0.9923 ซึ่งมีค่ายอมรับทางสถิติ [94] จากการวิเคราะห์ทางสถิตินี้จะพบว่าสมการ 3.1 ที่ได้มาจากโปรแกรม Design Expert มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้คาดการณ์ในการทดลองครั้งต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่คาดการณ์กับค่าที่แท้จริงของค่า FQY



รูปที่ 3.50 กราฟ 3 มิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ R6G กับ Au-Pd ที่มีผลต่อค่า FQY ของ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd

จากรูปที่ 3. 50 เป็นการแสดงกราฟ 3 มิติของค่าความเข้มข้น R6G กับ Au-Pd ที่มีผลต่อค่า FQY ของสาร R6G ที่ผสมกับ Au-Pd จากกราฟจะพบว่าค่าความเข้มข้นของ R6G กับ Au-Pd มีผลต่อค่า FQY โดยที่ R6G ที่ความเข้มข้นต่ำๆ กับ Au-Pd ที่ความเข้มข้นต่ำๆจะทำให้มีค่า FQY สูง

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบสมการที่ 3.1 โดยทำการเลือกค่าความเข้มข้นของ R6G กับ Au-Pd ใหม่ซึ่งแตกต่างจาก 13 เงื่อนไข เพื่อไปทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง การเปล่งแสง และค่าดัชนีหักเหแสง จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า FQY เพื่อตรวจสอบสมการที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนหรือไม่ ซึ่งความเข้มข้นของ R6G และ Au-Pd ที่

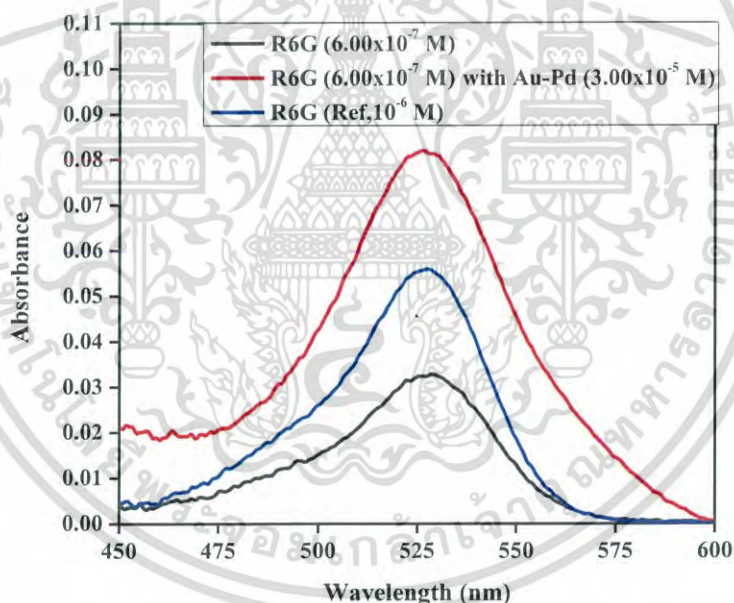
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ในการทดสอบมี 3 ค่าดังตารางที่ 3.8 โดยในการตรวจสอบครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกสารอ้างอิง เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้คือ R6G ที่ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์

ตารางที่ 3.8 ค่าความเข้มข้นของ R6G และ Au-Pd ที่ใช้ในการตรวจสอบสมการ 3.1

ตัวทดสอบ	ความเข้มข้น	
	R6G (โมลาร์)	Au-Pd (โมลาร์)
1	6.0×10^{-7}	3.0×10^{-5}
2	9.0×10^{-7}	6.0×10^{-5}
3	1.2×10^{-6}	8.0×10^{-5}

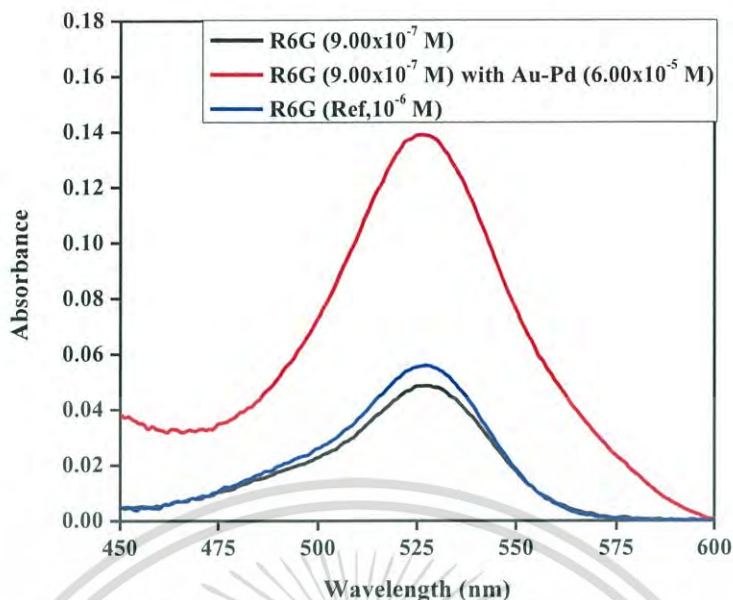
จากการทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารตัวทดสอบที่เตรียมในตารางที่ 3.8 ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.51 ถึง 3.53 โดยผู้วิจัยได้แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงแต่ละตัวทดสอบ โดยแต่ละตัวทดสอบจะถูกนำไปหาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 nm (OD) ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.9



รูปที่ 3.51 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวทดสอบที่ 1

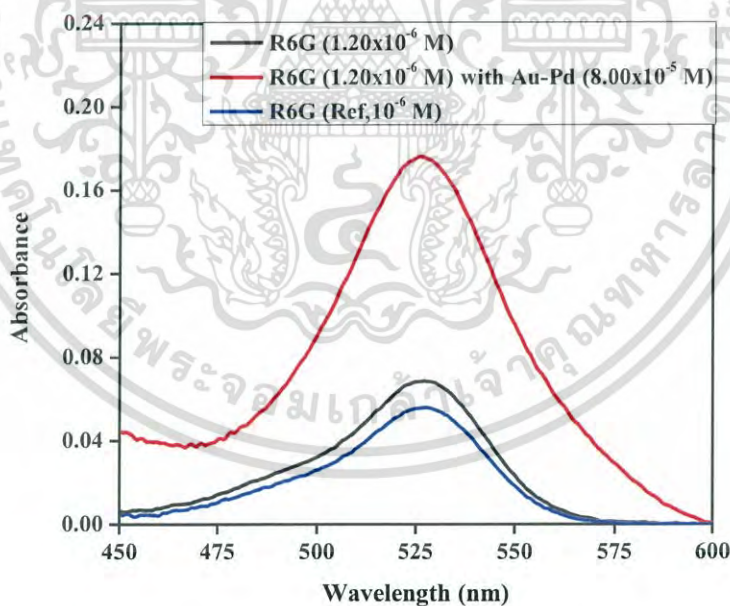
รูปที่ 3.51 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวทดสอบที่ 1 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.033 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.081 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.45 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.52 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวทดสอบที่ 2

รูปที่ 3.52 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวทดสอบที่ 2 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.048 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.138 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.87 เท่า

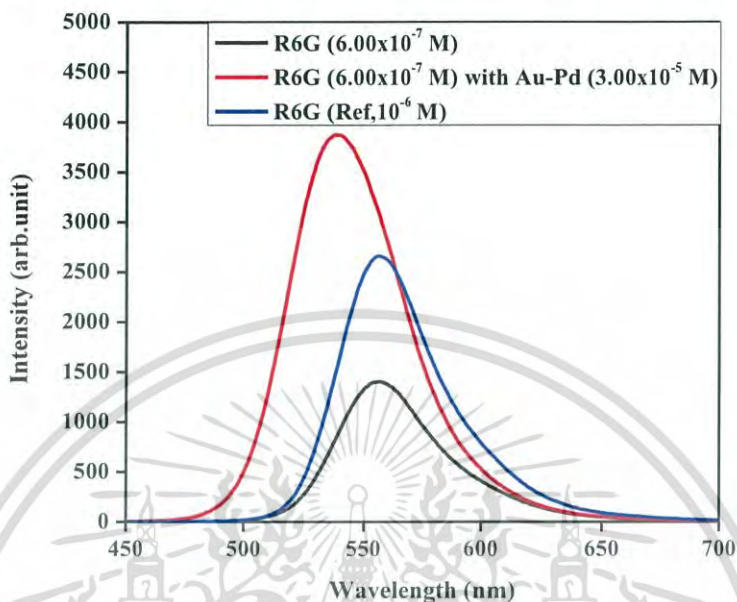


รูปที่ 3.53 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวทดสอบที่ 3

รูปที่ 3.53 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวทดสอบที่ 3 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า OD เท่ากับ 0.068 เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า OD เพิ่มขึ้นเป็น 0.173 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.54 เท่า

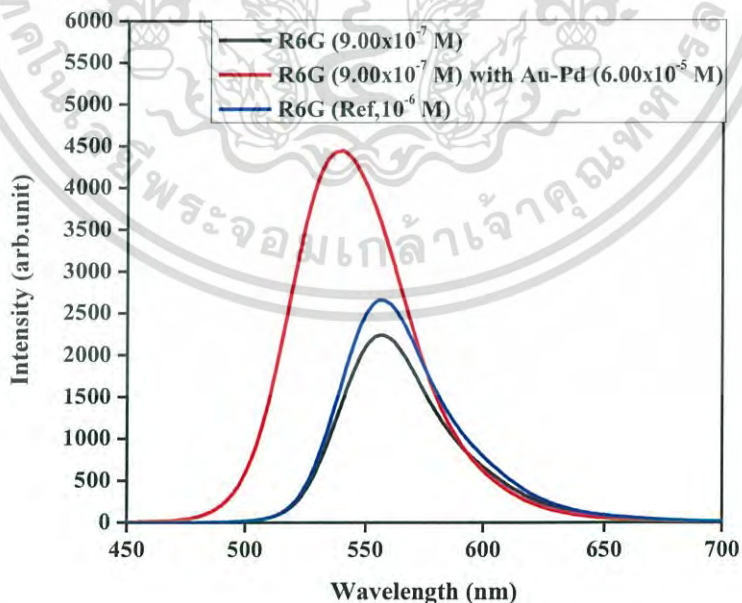
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารตัวอย่างที่เตรียมในตารางที่ 3.8 ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.54 ถึง 3.56 โดยผู้วิจัยได้แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงแต่ละตัวทดสอบ โดยแต่ละตัวทดสอบจะถูกลำดับไปหาค่าพื้นที่ใต้กราฟ (I) ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.9



รูปที่ 3.54 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวทดสอบที่ 1

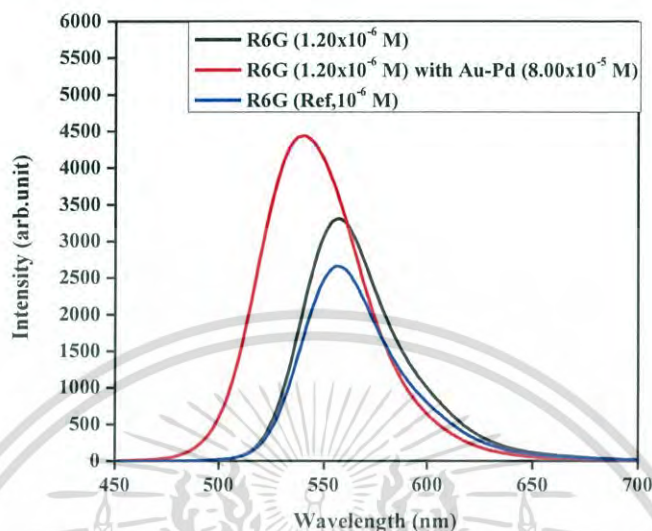
รูปที่ 3.54 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวทดสอบที่ 1 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 79,894.201 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 273,322.127 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.97 เท่า



รูปที่ 3.55 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวทดสอบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.55 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวทดสอบที่ 2 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 126,155.201 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 274,498.541 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 2.17 เท่า



รูปที่ 3.56 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ของตัวทดสอบที่ 3

รูปที่ 3.56 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวทดสอบที่ 2 จากการทดลองพบว่า R6G มีค่า I เท่ากับ 185,571.766 arb.unit. เมื่อเติม Au-Pd ลงไปทำให้มีค่า I เพิ่มขึ้นเป็น 271,105.656 arb.unit. ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1.49 เท่า

จากตารางที่ 3.9 แสดงค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 และค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ได้จากการทดลองโดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นไม่ให้ซ้ำกับ 13 เงื่อนไขที่ได้จากโปรแกรม Design Expert จากการทดลองพบว่าค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อนำไปหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนพบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ 2% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการที่ 3.1 สามารถคาดการณ์ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ของ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd ได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 แสดงค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจากสมการที่ 3.1

ตัวทดสอบ	ความเข้มข้น		ค่าการดูดกลืนแสง (OD)		พื้นที่ใต้กราฟของการเปล่งแสง (I)		ค่าดัชนีหักเหแสง (n)		FQY			เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
	R6G	Au-Pd	R6G	R6G ผสม Au-Pd	R6G	R6G ผสม Au-Pd	R6G	R6G ผสม Au-Pd	R6G	R6G ผสม Au-Pd	จากสมการที่ 3.1	
1	6.0×10^{-7}	3.0×10^{-5}	0.033	0.081	79,894.201	237,322.127	1.3333	1.3330	0.85	1.02	1.00	-2.00
2	9.0×10^{-7}	6.0×10^{-5}	0.048	0.138	126,155.273	274,498.541	1.3322	1.3321	0.92	0.70	0.71	1.89
3	1.2×10^{-6}	8.0×10^{-5}	0.068	0.173	185,571.766	277,105.656	1.3319	1.3322	0.95	0.56	0.55	-0.16

บทที่ 4

การตรวจจับโลหะหนัก

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยพบว่าการนำแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียมมาผสมกับสีย้อมโรดามีน 6จี ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการเปล่งแสง ผู้วิจัยจึงได้นำไปประยุกต์ใช้งานในทางเคมีเซนเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจจับไอออนปรอท

4.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

4.1.1 Rhodamine 6G hydrazide (R6G-hydrazide) [95]

Rhodamine 6G hydrazide (R6G-hydrazide) ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร โดยมีกระบวนการเตรียมดังนี้ เริ่มจากการกวนปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศอาร์กอนของสารละลายของโรดามีน 6จี คลอไรด์ 0.10 กรัม ใส่ขวดก้นกลมขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นละลายด้วย dry EtOH 7.0 มิลลิลิตร และเติม dry Et₃N 0.10 มิลลิลิตร ซึ่งทำหน้าที่เป็นเบส กวนปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 30 นาที แล้วเติมไฮดรารซีน โมโนไฮเดรต 0.10 มิลลิลิตร จากนั้นให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึง 78 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยจะเกิดตะกอนสีชมพูอ่อนขึ้น เมื่อครบกำหนดเวลาทั้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำไปกรองเพื่อกำจัด EtOH ออก และล้างตะกอนด้วย EtOH จากนั้นนำตะกอนไปทำให้แห้ง พบว่าได้สาร R6G-hydrazide มีลักษณะเป็นของตะกอนสีชมพูอ่อน 0.067 กรัม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ผลผลิตเท่ากับ 75%



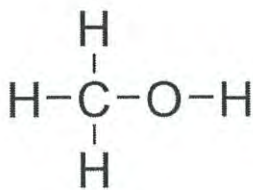
รูปที่ 4.1 (ก) โครงสร้างของโรดามีน 6จี (R6G) [95]

(ข) โครงสร้างของ R6G-hydrazide [95]

4.1.2 เมทานอล (Methanol) [96]

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลายของ R6G-hydrazide เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดีโดยงานวิจัยนี้ใช้เมทานอล 10% ผสมกับน้ำ DI 90% ในการทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของเมทานอล [96]

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของเมทานอล [96]

สูตรทางเคมี	CH ₃ OH
มวลโมเลกุล	32.05 g/mol
ความหนาแน่น	0.7918 g/cm ³ (25°C)
จุดหลอมเหลว	-97 °C
จุดเดือด	64.7 °C
ความสามารถในการละลายน้ำ	ผสมเข้ากันได้

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์

ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการตรวจจับโลหะปรอทโดยการดูการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์โดยสาร R6G-hydrazide ที่ผสมกับแท่งนาโนโลหะจะถูกเตรียมในคิวเวตต์ควอตซ์และนำไปวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Perkin Elmer Luminescence spectrometer model LS-50B)

4.2.1 คิวเวตต์ควอตซ์ (Quartz cuvette)

ในงานวิจัยนี้ได้วัดความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ในรูปแบบของสารละลายจึงได้ใช้คิวเวตต์ควอตซ์ในการใส่สารละลายตัวอย่างเพื่อทำการวัด โดยคิวเวตต์ควอตซ์เป็นของบริษัท ERMA FRANCE ซึ่งมีขนาด กว้าง 1.25 เซนติเมตร ยาว 1.25 เซนติเมตร สูง 4.5 เซนติเมตร

4.2.2 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

การวัดคุณสมบัติการเปล่งแสงของสารสีย้อม R6G-hydrazide ที่ผสมกับแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียม ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์รุ่น Perkin Elmer Luminescence spectrometer model LS-50B

4.3 การทดลอง

4.3.1 ศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ที่ความเข้มข้นต่างๆ

วัตถุประสงค์

- เพื่อทำการศึกษาค่าความเข้มข้นของ R6G-hydrazide กับ Au-Pd ที่ให้สเปกตรัมการเปล่งแสงสูงสุดเพื่อนำความเข้มข้นนี้ไปใช้เป็นตัวตรวจจับโลหะหนัก

โดยผู้วิจัยได้เลือกศึกษาค่าความเข้มข้นของ R6G-hydrazide ที่ความเข้มข้น 4.4 ไมโครโมลาร์ เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่เคยทำก่อนหน้านี้ [95] ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาค่าความเข้มข้นของ Au-Pd ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังตารางที่ 4.2 โดยทำการศึกษาเพื่อหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของ Au-Pd ที่นำไปผสมกับ R6G-hydrazide ที่ความเข้มข้น 4.4 ไมโครโมลาร์ โดยค่าที่เหมาะสมคือความเข้มข้นของ Au-Pd ที่ทำให้มีสเปกตรัมการเปล่งแสงสูงสุด

ตารางที่ 4.2 ค่าความเข้มข้นของ R6G-hydrazide กับ Au-Pd ที่ผสมกัน

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของ R6G-hydrazide (ไมโครโมลาร์)	ความเข้มข้นของ Au-Pd (โมลาร์)
A	4.4	-
B	4.4	10^{-5}
C	4.4	10^{-6}
D	4.4	10^{-7}

4.3.2 ศึกษาสารละลาย R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ในการตรวจจับโลหะ

วัตถุประสงค์

- เพื่อทำการศึกษาสารละลาย R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ว่ามีความสามารถในการตรวจจับโลหะหนักชนิดใดได้บ้าง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคำแนะนำ R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ไปตรวจจับโลหะชนิดต่างๆเพื่อทำการศึกษว่าสามารถตรวจจับโลหะปรอทได้เพียงตัวเดียวหรือไม่ โดยทำการตรวจจับโลหะทั้ง 11 ชนิด ดังตารางที่ 4.3 โดยโลหะทั้งหมดเป็นเกลือโลหะซึ่งซื้อมาจากบริษัท Sigma Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยที่โลหะชนิดต่างๆถูกเตรียมไว้ที่ความเข้มข้น 15.5 ไมโครโมลาร์

ตารางที่ 4.3 โลหะหนักชนิดต่างๆ

ลำดับ	ชื่อ	ชื่อย่อ	สูตรทางเคมี	มวลโมเลกุล (g/mol)
1	Mercury (II) Acetate	Hg(II)	Hg(OAc) ₂	318.678
2	Sodium (I) Acetate	Na(I)	Na(OAc)	82.0343
3	Potassium(I) Acetate	K(I)	K(OAc)	98.15
4	Silver (I) Acetate	Ag(I)	Ag(OAc)	166.91
5	Calcium (II) Acetate	Ca(II)	Ca(OAc) ₂	158.17
6	Copper (II) Acetate	Cu(II)	Cu(OAc) ₂	181.63
7	Lead (II) Acetate	Pb(II)	Pb(OAc) ₂	325.29
8	Cadmium (II) Acetate	Cd(II)	Cd(OAc) ₂	230.50
9	Zinc (II) Acetate	Zn(II)	Zn(OAc) ₂	183.48
10	Iron (III) Acetate	Fe(III)	Fe(OAc) ₃	233.00
11	Manganese (III) Acetate	Mn(III)	Mn(OAc) ₃	268.10

4.3.3 ศึกษาหาค่าความไวในการตรวจจับไอออนปรอท

วัตถุประสงค์

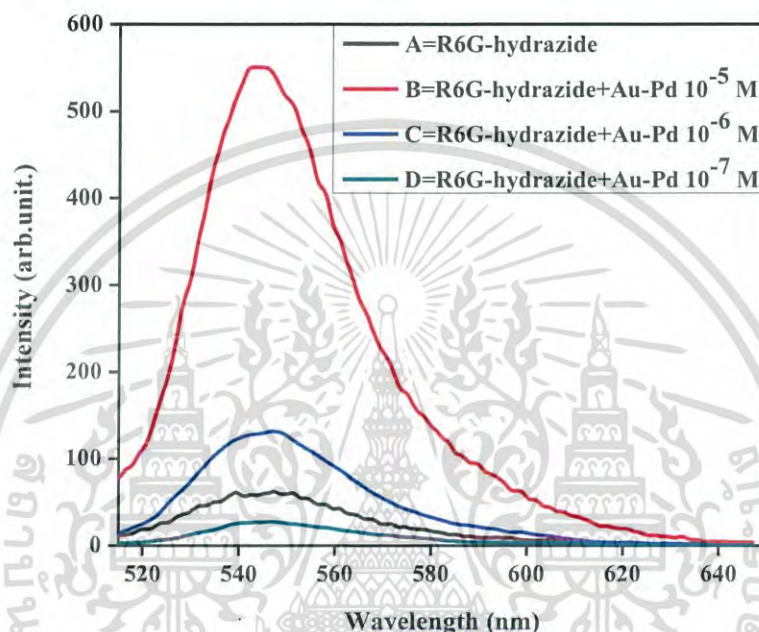
- เพื่อทำการหาค่าความสามารถในการตรวจจับไอออนโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่เป็นไปได้ในทางอุดมคติ

การศึกษาค่าความไวในการตรวจจับไอออนปรอทนั้นผู้วิจัยได้ทำการเตรียมสารละลาย R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd โดยดูเงื่อนไขความเข้มข้นที่ได้จากหัวข้อที่ 4.3.1 จากนั้นนำไปผสมกับเกลือปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆโดยทำการเตรียมสารละลายในคิวเวตต์ควอตซ์แล้วทำการวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Perkin Elmer Luminescence spectrometer model LS-50B) จากนั้นจึงนำไปคำนวณหาค่าขีดจำกัด (detection limit) จากสมการที่ 2.14

4.4 ผลการทดลอง

4.4.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากการทดลองวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ที่เตรียมในตารางที่ 4.2 ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ที่ความเข้มข้นต่างๆ

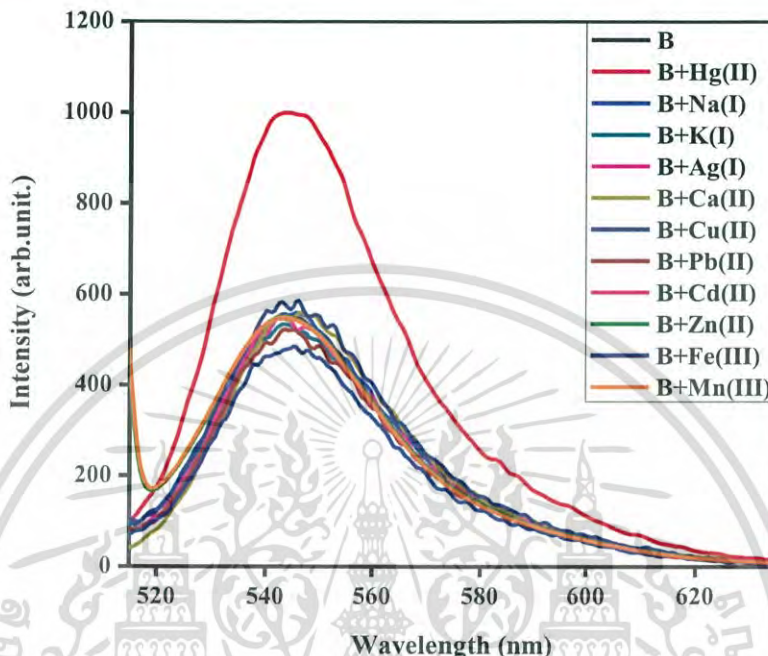
ในการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกศึกษาความเข้มข้นของ Au-Pd ที่มีผลต่อการเปล่งแสงของสาร R6G-hydrazide โดยที่ค่าความเข้มข้นของ R6G-hydrazide มีค่า 4.4×10^{-6} โมลาร์ (ตัวอย่าง A) เนื่องจากใช้ค่าความเข้มข้นอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [95] และค่าความเข้มข้นของ Au-Pd ที่นำไปผสมกับ R6G-hydrazide มีค่า 10^{-5} , 10^{-6} และ 10^{-7} โมลาร์ ซึ่งเป็นตัวอย่าง B, C และ D ตามลำดับ โดยจากการทดลองพบว่าค่าความเข้มข้นของ Au-Pd มีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าการเปล่งแสงของสาร R6G-hydrazide มีค่าเพิ่มมากขึ้นดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.3 โดยค่าการเปล่งแสงเพิ่มขึ้นเนื่องจากแท่งนาโนโลหะ Au-Pd และโมเลกุลของ R6G อยู่ห่างกันในระยะที่เหมาะสมทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานจากแท่งนาโนโลหะเกิดปรากฏการณ์ Surface plasmon ถูกส่งผ่านไปยัง R6G หรือเรียกว่าเกิดกลไก Plasmonic resonance energy transfer [92,93] ขึ้น ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.6.2

ค่าความเข้มข้นของ Au-Pd ที่มีความเข้มข้น 10^{-5} โมลาร์ส่งผลให้มีค่าการเปล่งแสงสูงสุด (ตัวอย่าง B) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้เงื่อนไขของตัวอย่าง B ในการนำไปตรวจจับไอออนปรอทในการศึกษาในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

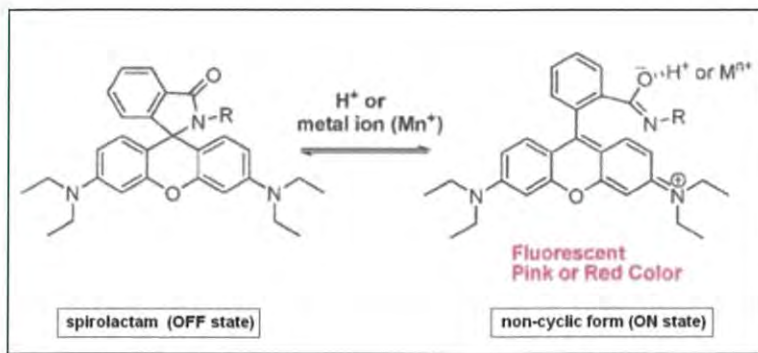
4.4.2 ผลการศึกษา R6G-hydrazide ที่ผสมกับ AuPd ในการตรวจจับโลหะไอออนหนัก

จากการทดลองวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ในการตรวจจับโลหะหนักที่เตรียมในตารางที่ 4.3 ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่าง B ที่นำไปตรวจจับกับไอออนโลหะชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่าง B ที่นำไปตรวจจับไอออนโลหะหนักชนิดต่างๆ ทั้ง 11 ชนิดที่แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าตัวอย่าง B นั้นให้ค่าสเปกตรัมการเปล่งแสงสูงสุดซึ่งมีความเข้ม 999 arb.unit. เมื่อนำไปตรวจจับกับไอออนปรอท และสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่าง B เมื่อนำไปตรวจจับกับไอออนโลหะหนักชนิดอื่นๆ จะพบว่ามีสเปกตรัมการเปล่งแสงใกล้เคียงกันที่ประมาณ 500-580 arb.unit. จากการทดลองนี้พบว่าตัวอย่าง B มีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจจับไอออนโลหะหนักได้ดีสำหรับไอออนปรอท ในส่วนของโลหะหนักชนิดอื่นๆ ตรวจจับได้แต่ไม่มีประสิทธิภาพดีเท่ากับไอออนปรอทซึ่งได้มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้สังเคราะห์ R6G ในการตรวจจับไอออนปรอทและยังสามารถตรวจจับไอออนโลหะหนักชนิดอื่นได้อีกเช่น Cu^{2+} Al^{3+} Cr^{3+} [76,79,80] การที่ตัวอย่าง B สามารถตรวจจับไอออนปรอทได้ดีกว่าไอออนโลหะชนิดอื่นๆ เนื่องมาจากการที่ตัวอย่าง B ไปตรวจจับกับไอออนปรอทนั้น ไอออนปรอทจะทำการเปิดวงสไปโรแลคแทม (Spirolactam) [50,51] ดังรูปที่ 4.5 ภายในโครงสร้างของตัวอย่าง B ทำให้เกิดการเปล่งแสงเพิ่มขึ้นและมีการเปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีชมพูอ่อน



(ก)



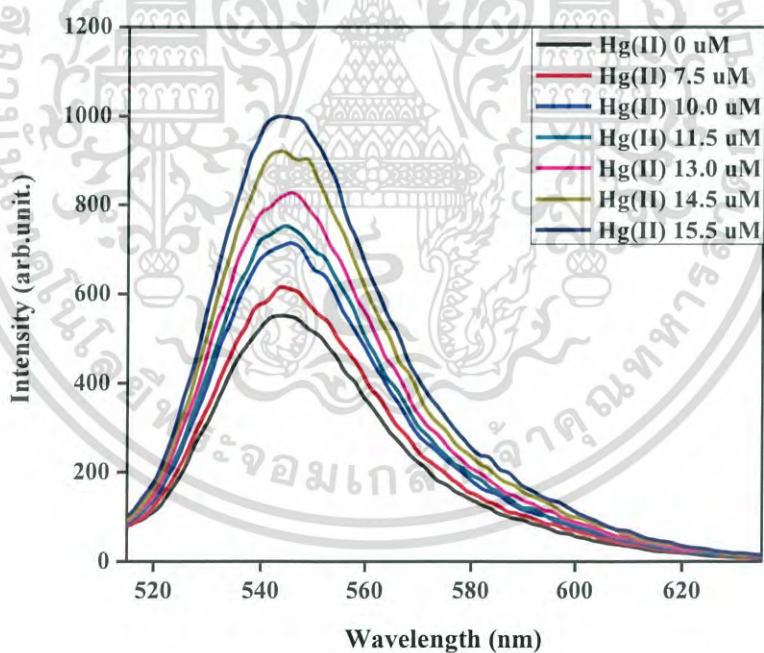
(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) การเปิดและปิดวง spirolactam [53]

(ข) สีของตัวอย่าง B กับ ตัวอย่าง B ผสม Hg^{2+}

4.3.3 ผลการศึกษาหาค่าความไวในการตรวจจับไอออนปรอท

จากการทดลองวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G-hydrazide ที่ผสมกับ Au-Pd ในการตรวจจับไอออนปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6

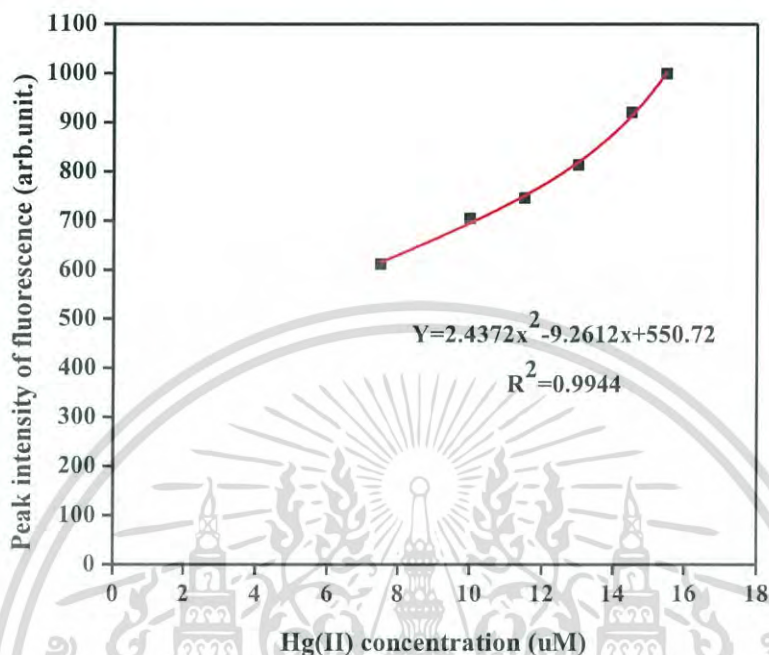


รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่าง B ที่ผสมกับไอออนปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารตัวอย่าง B ที่นำไปตรวจจับกับไอออนปรอทที่มีความเข้มข้นจาก 0 ถึง 15.5 ไมโครโมลาร์ จากการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของไอออนปรอทมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้สเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่าง B มีค่าเพิ่มมากขึ้นโดยสเปกตรัมการเปล่งแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 520 nm ถึง 630 nm โดยมีความยาวคลื่นสูงสุดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปล่งแสงออกมามีค่าเท่ากับ 545 nm จากนั้นเพื่อนำไปคำนวณหาค่า detection limit ของตัวอย่าง B จึงนำสเปกตรัมการเปล่งแสงนี้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง พีคการเปล่งแสงสูงสุดเป็นแกน Y และความเข้มข้นของไอออนปรอทเป็นแกน X จึงได้กราฟความสัมพันธ์เป็นดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีคการเปล่งแสงสูงสุดกับความเข้มข้นของไอออนปรอท

จากรูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีคการดูดกลืนแสงสูงสุดกับความเข้มข้นของไอออนปรอท พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งมีสมการความสัมพันธ์เป็นสมการ $Y=2.4372X^2-9.2612X+550$ เมื่อนำไปคำนวณหา detection limit จากสมการที่ 2.14 พบว่ามีค่า detection limit อยู่ที่ 20.6 นาโนโมลาร์ ซึ่งหมายความว่าในทางอุดมคติที่ไอออนปรอทที่มีความเข้มข้นอย่างน้อย 20.6 นาโนโมลาร์ จะทำให้ตัวอย่าง B มีการเปลี่ยนแปลงสีหรือสามารถตรวจจับได้

บทที่ 5

การตรวจสอบลายนิ้วมือแฝง

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงการประยุกต์ใช้งานของสาร R6G ที่ผสมกับแท่งนาโนโลหะทองคำเคลือบแพลเลเดียมในการตรวจจับลายนิ้วมือแฝง โดยทำการเตรียมลายนิ้วมือแฝงด้วยการพิมพ์ลายนิ้วมือจากเทปกาว ซึ่งสาร R6G และ Au-Pd จะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับบทที่ 3 แล้วจะถูกทำละลายโดยน้ำ DI ซึ่งได้กล่าวคุณสมบัติไว้ในบทที่ 3 แล้วเช่นกัน ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมลายนิ้วมือแฝงและวิธีการตรวจวัดลายนิ้วมือแฝงด้วยกล้องจุลทรรศน์

5.1 วัสดุอุปกรณ์

5.1.1. กระดาษลิต

กระดาษลิตยี่ห้อ Sail Brand ขนาดกว้าง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 76.2 มิลลิเมตรหนา 1 มิลลิเมตร ทำหน้าที่สำหรับวางตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงเพื่อใช้ในการถ่ายรูปจากกล้องจุลทรรศน์

5.1.2 เทปกาว

เทปกาว ยี่ห้อ 3M มีขนาดความกว้าง 18 มิลลิเมตร ทำหน้าที่สำหรับพิมพ์ลายนิ้วมือ

5.1.3 ลูกตุ้ม

ลูกตุ้มมวล 1 กิโลกรัม ใช้ในการกดทับนิ้วมือเพื่อให้เกิดรอยนิ้วมือบนเทปกาว

5.1.4 ไมโครปิเปตต์ (Micropipette)

ไมโครปิเปตต์ทำหน้าที่วัดปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการทดลองซึ่งมีความแม่นยำสูงและใช้ในการดูดสารจากคิวเวตต์มาหยดลงบนลายนิ้วมือบนเทปกาว

5.1.5 ไมโครปิเปตต์ทิป (Micropipette tip)

ไมโครปิเปตต์ทิป ใช้ร่วมกับไมโครปิเปตต์เพื่อทำให้สามารถดูดสารละลายได้สะดวกมีหลายขนาดขึ้นอยู่กับไมโครปิเปตต์ที่เลือกใช้

5.1.6 กระดาษเช็ดเลนส์ (Delicate task wipers)

กระดาษเช็ดเลนส์ ยี่ห้อ KIMTECH SCIENCE KIMWIPES Delicate Task Wipers ใช้ทำความสะอาดกระดาษลิต

5.1.7 กล้องจุลทรรศน์และกล้องดิจิทัลคอนนอน

กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Nikon ECLIPSE E200 ทำหน้าที่ส่องหาความชัดเจนของภาพลายนิ้วมือ และกล้องถ่ายภาพ Canon DS126491 ทำหน้าที่บันทึกภาพลายนิ้วมือ เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลด้วยคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

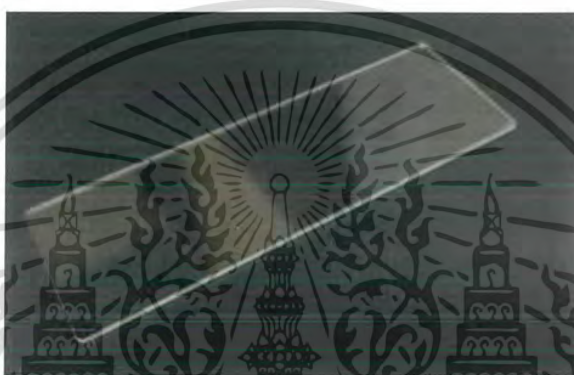
5.2 การเตรียมลายนิ้วมือแฝง

ในการเตรียมลายนิ้วมือแฝงนั้นผู้วิจัยได้ทำการเตรียมลายนิ้วมือด้วยวิธีการพิมพ์ลายนิ้วมือลงบนเทปกาวซึ่งมีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. เตรียมกระจกสไลด์สำหรับวางตัวอย่างลายนิ้วมือ นำกระจกสไลด์ไปล้างน้ำยาล้างจานให้สะอาด จากนั้นทำความสะอาดด้วยอะซิโตนและเอทานอล โดยวางบนเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลาอย่างละ 10 นาที ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 2 ตากกระจกสไลด์ให้แห้ง แล้วนำมาเช็ดด้วยกระดาษเช็ดเลนส์ให้สะอาดดังรูปที่

5.1



รูปที่ 5.1 กระจกสไลด์ที่พร้อมนำไปใช้งาน

ขั้นตอนที่ 3 เตรียมเทปกาวยี่ห้อ 3M ขนาดความกว้าง 1.8 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ตัดเทปกาวและพับให้มีส่วนจับได้ดังรูปที่ 5.2 โดยระวางเทปกาวมีฟองอากาศอาจทำให้พิมพ์ภาพลายนิ้วมือผิดเพี้ยนได้



รูปที่ 5.2 เทปกาวที่เตรียมพิมพ์ลายนิ้วมือแฝง

ขั้นตอนที่ 4 นำนิ้วมืออุบริเวณใบหน้าที่มีความมัน จากนั้นนำนิ้วมือวางบนเทปกาวที่เราเตรียมไว้ แล้วนำลูกตุ้มที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม วางทับนิ้วมือโดยลูกตุ้มจะออกแรงกระทำต่อนิ้วมือด้วยแรง 10 นิวตัน ทิ้งไว้เป็นเวลา 20 วินาที จะได้ลายนิ้วมือแฝงดังรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 เทปกาวที่ถูกพิมพ์ลายนิ้วมือแล้ว

ขั้นตอนที่ 5 แบ่งเทปกาวที่พิมพ์ลายนิ้วมือแล้วออกเป็น 2 ส่วน เพื่อนำไปทำการทดลอง ขั้นตอนต่อไป โดยจะทำการเปรียบเทียบลายนิ้วมือที่ตรวจวัดโดยสาร R6G กับ ลายนิ้วมือที่ตรวจวัดโดยสาร R6G ผสม Au-Pd



รูปที่ 5.4 การแบ่งเทปกาวที่ถูกพิมพ์ลายนิ้วมือแล้วเป็น 2 ส่วน

5.3 การทดลอง

5.3.1 ศึกษาระยะเวลาในการแช่สาร R6G และความแตกต่างในการล้างน้ำ DI

วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการนำลายนิ้วมือที่สร้างขึ้นมาแช่สารละลาย R6G

เมื่อได้ลายนิ้วมือแผลงมาแล้วจากหัวข้อที่กล่าวมา ต่อมาในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะทำการศึกษาระยะเวลาในการนำลายนิ้วมือไปแช่สาร R6G ที่ความเข้มข้น 1.5×10^{-6} โมลาร์ ที่เวลาต่างๆ โดยหลังจากการแช่สาร R6G นั้น จะทำการเปรียบเทียบการนำลายนิ้วมือไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ DI กับ ไม่ล้างน้ำ DI ดังตารางที่ 5.1 โดยจะนำลายนิ้วมือแผลงที่ได้ไปทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Nikon ECLIPSE E200 ที่ต่อกับกล้องถ่ายภาพ Canon DS126491

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ระยะเวลาในการแช่สารละลาย R6G และความแตกต่างระหว่างการล้างและไม่ล้างน้ำ DI

ระยะเวลา (นาที)	ล้างน้ำ DI	ไม่ล้างน้ำ DI
15	✓	✓
30	✓	✓
60	✓	✓

5.3.2 ศึกษาสเปกตรัมแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd

วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลายและลายนิ้วมือแฝงที่แช่สาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสเปกตรัมแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสาร R6G ที่ความเข้มข้น 1.5×10^{-6} โมลาร์ และ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยค่าความเข้มข้นตั้งต้นของ R6G กับ Au-Pd มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 6×10^{-6} โมลาร์และ 0.4698×10^{-3} โมลาร์ ตามลำดับ ซึ่งผู้วิจัยได้เตรียมสารละลายในคิวเวตต์พลาสติกโดยมีปริมาตรสารที่เตรียมคือ 2 มิลลิลิตร ผู้วิจัยได้เลือกเงื่อนไขความเข้มข้นเป็นดังตารางที่ 5.1 จากนั้นจึงนำไปวัดสเปกตรัมแสงฟลูออเรสเซนซ์จากระบบที่จัดขึ้นในหัวข้อที่ 3.2.2

ตารางที่ 5.2 การเตรียมสารละลาย R6G และ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตัวอย่าง	ปริมาตร (ml)			อัตราส่วน ปริมาตร ระหว่าง R6G และ Au-Pd	ความเข้มข้น (โมลาร์)		อัตราส่วนความ เข้มข้น ระหว่าง R6G และ Au-Pd
	R6G	Au-Pd	DI		R6G (10^{-6})	Au-Pd (10^{-4})	
R6G	0.25	-	0.75	-	1.5	-	1
A	0.25	0.01	0.74	1:0.04	1.5	0.0470	1:3
B	0.25	0.02	0.73	1:0.08	1.5	0.0940	1:6
C	0.25	0.03	0.72	1:0.12	1.5	0.1409	1:9
D	0.25	0.04	0.71	1:0.16	1.5	0.1879	1:13
E	0.25	0.05	0.70	1:0.20	1.5	0.2349	1:16
F	0.25	0.15	0.60	1:0.60	1.5	0.7047	1:47
G	0.25	0.25	0.50	1:1.00	1.5	1.1745	1:78
H	0.25	0.35	0.40	1:1.00	1.5	1.6443	1:110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ศึกษาการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์

วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยกล้องจุลทรรศน์
- เพื่อศึกษาความเข้มของภาพถ่ายลายนิ้วมือด้วยโปรแกรม Image J

การศึกษาการตรวจสอบลายนิ้วมือด้วยการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์ ผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาการตรวจสอบลายนิ้วมือด้วยการถ่ายภาพโดยใช้แสงจากกล้องจุลทรรศน์กระตุ้นและการศึกษาการตรวจสอบลายนิ้วมือด้วยการถ่ายภาพโดยใช้แสงจากไดโอดเปล่งแสงโดยเงื่อนไขในการเลือกความเข้มข้นของสารละลาย R6G และ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd เป็นดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.5 การจัดระบบการตรวจสอบลายนิ้วมือด้วยการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์โดยใช้แสงจากกล้องจุลทรรศน์กระตุ้น



รูปที่ 5.6 การจัดระบบการตรวจสอบลายนิ้วมือด้วยการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์โดยใช้แสงจากไดโอดเปล่งแสงกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอ่านค่าสีจากโปรแกรม Image J ในการอ่านค่าความเข้มสีในโปรแกรม Image J นั้นภาพที่ได้จากจะเป็นไฟล์ขนาด 8 บิต ซึ่งจะอ่านภาพสีออกมาเป็น Gray scale กล่าวคือ ให้สีออกมาสองสีคือสีขาวกับสีดำ โดยมีระดับความเข้มสีตั้งแต่ 0- 255 คือมี 256 ระดับ ซึ่งสีดำให้ค่าเป็น 0 และสีขาวให้ค่าเป็น 255 ซึ่งสีระหว่างสีขาวและสีดำนั้นจะเป็นความเข้มแตกต่างกันออกไปทำให้มีสีเทาจึงถูกเรียกว่า Gray scale ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ภาพแสดงระดับสีของ Gray scale [97]

ในส่วนของภาพสีนั้นโปรแกรม Image J จะแปลงภาพสีออกมาเป็น Gray scale เช่นกัน โดยอาศัยหลักการ Red Green Blue (RGB) [98] โดย RGB จะถูกแปลงให้เป็น Gray scale โดยอาศัยสมการ 5.1 ดังนี้

$$Y=0.3(R) +0.59(G) +0.11(B) \quad (5.1)$$

โดยที่ Y คือค่าระดับสีเทาของจุดที่ต้องการสังเกต

R คือ ค่าสีแดงของจุดที่ต้องการสังเกต

G คือ ค่าสีเขียวของจุดที่ต้องการสังเกต

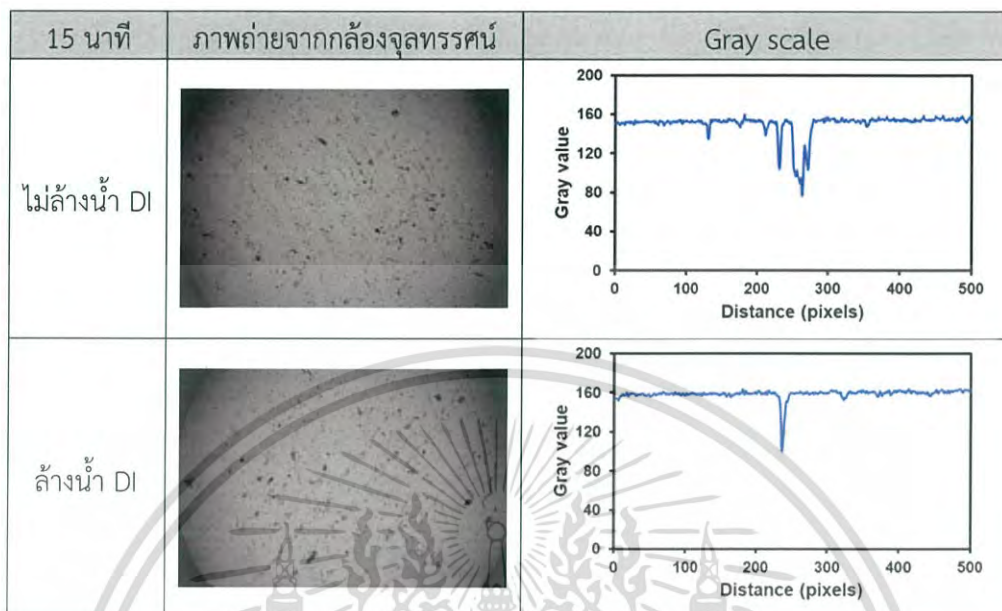
B คือ ค่าสีน้ำเงินของจุดที่ต้องการสังเกต

5.4 ผลการทดลอง

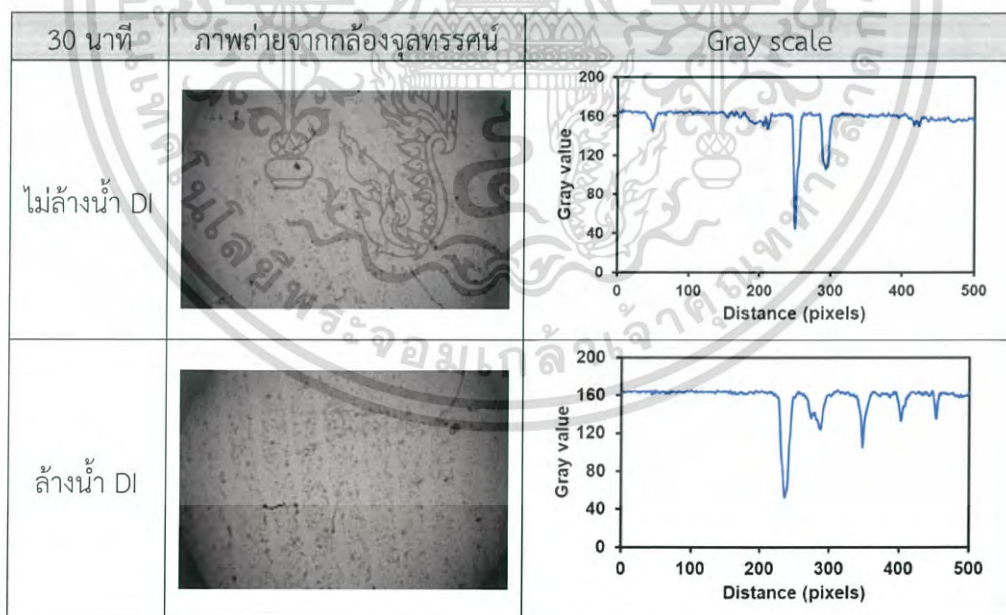
5.4.1 ผลการศึกษาระยะเวลาที่ดีที่สุดในการเข้ารหัส R6G และความแตกต่างในการล้างน้ำ DI

จากการศึกษาระยะเวลาที่ดีที่สุดในการเข้ารหัส R6G และความแตกต่างในการล้างน้ำ DI ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาระยะเวลา 3 ค่า คือ 15 นาที 30 นาที และ 60 นาที โดยจะนำลายนิ้วมือแฝงที่ได้ไปทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Nikon ECLIPSE E200 ที่ต่อกับกล้องถ่ายภาพ Canon DS126491 จากนั้นนำภาพที่ได้ไปหาค่าความเข้มแสงของภาพด้วยโปรแกรม Image J ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.3 ถึง 5.5 ดังนี้

ตารางที่ 5.3 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์และค่า Gray scale ของลายนิ้วมือที่แฉสาร R6G ที่ระยะเวลา 15 นาที

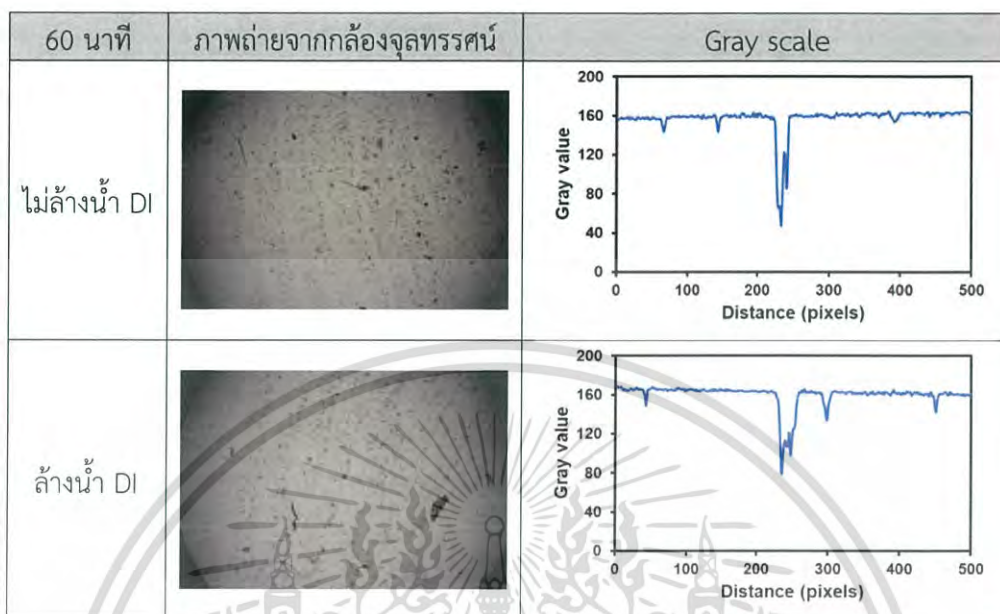


ตารางที่ 5.4 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์และค่า Gray scale ของลายนิ้วมือที่แฉสาร R6G ที่ระยะเวลา 30 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์และค่า Gray scale ของลายนิ้วมือที่แฉ่สาร R6G ที่ระยะเวลา 60 นาที



จากตารางที่ 5.3 ถึงตารางที่ 5.5 เป็นการแสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือแฝงที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แล้วนำภาพที่ได้ไปหาค่าความแตกต่างความเข้มของค่า Gray value โดยค่าความแตกต่างของค่า Gray value นั้นจะแสดงในตารางที่ 5.6 จากการทดลองพบว่าการนำลายนิ้วมือแฝงไปแฉ่สารสีย้อม R6G ที่เวลาต่างๆพบว่าที่เวลา 30 นาทีแบบไม่ล้างน้ำ DI ให้ค่าความต่างของค่า Gray value มากที่สุดคือ 121.3 ในส่วนของลายนิ้วมือที่แฉ่สารที่ระยะเวลา 15 นาทีอาจมีสาเหตุมาจากการที่แฉ่สารน้อยเกินไปอาจส่งผลทำให้สารสีย้อมยังติดกับลายนิ้วมือได้ไม่มากพอและในส่วนของการแฉ่สารที่ระยะเวลาามากไปคือ 60 นาทีก็อาจทำให้ลายนิ้วมือนั้นละลายจางหายไปได้ และในส่วนของการล้างน้ำ DI ที่ทุกเวลานั้นอาจส่งผลทำให้ความเข้มข้นของสาร R6G มีความเจือจางลง ดังนั้นที่ระยะเวลา 30 นาทีแบบไม่ล้างน้ำ DI จึงให้ความแตกต่างมากที่สุดและสามารถระบุได้ว่าภาพที่ได้มีค่าความชัดเจนมากที่สุด ผู้วิจัยจึงเลือกเงื่อนไขในการทดลองในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความแตกต่างของ Gray scale ของสารสีย้อม R6G ที่เวลาต่างๆ

ระยะเวลา (นาที)	ล้างน้ำ DI	ค่าความเข้มสูงสุดของ Gray value	ค่าความเข้มต่ำสุดของ Gray value	ผลต่างของความเข้มสูงสุดกับต่ำสุด
15	X	159.9	76.4	83.5
	✓	163.7	100.2	63.5
30	X	166.0	44.7	121.3
	✓	165.8	52.8	113.0
60	X	165.0	47.6	117.4
	✓	168.8	78.8	90.0

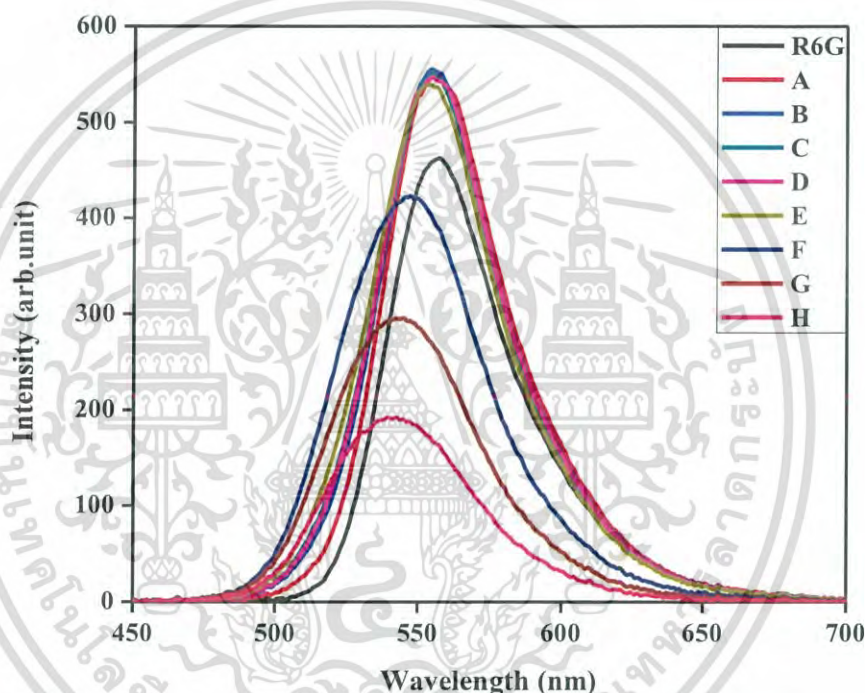
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 ผลการศึกษาสเปกตรัมแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd

ในการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสองส่วนคือในรูปแบบของสารละลายและในรูปแบบของลายนิ้วมือแฝง โดยค่าความเข้มข้นของสาร R6G กับ Au-Pd เป็นดังตารางที่ 5.2 ซึ่งผลการทดลองเป็นดังนี้

5.4.2.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd

จากการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd ที่เตรียมความเข้มข้นดังตารางที่ 5.2 ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd

จากรูปที่ 5.8 พบว่าเมื่อเติม Au-Pd ลงไปใน R6G จะทำให้ค่าการเปล่งแสงมีการเปลี่ยนแปลงทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง 3 โดยค่าการเปล่งแสงเพิ่มขึ้นเนื่องจากแท่งนาโนโลหะ Au-Pd และโมเลกุลของ R6G อยู่ห่างกันในระยะที่เหมาะสมทำให้อิเล็กตรอนอิสระของแท่งนาโนโลหะเกิดปรากฏการณ์ Surface plasmon ถูกส่งผ่านไปยัง R6G หรือเรียกว่าเกิดกลไก Plasmonic resonance energy transfer [92,93]ขึ้น และในส่วนของ การลดลงนั้นเกิดมาจากการที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารมีค่ามากทำให้มีโมเลกุลมากส่งผลต่อการดูดกลืนซ้ำ โดยการเพิ่มขึ้นและลดลงของการเปล่งแสงอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.6.2

จากการทดลองนี้จะพบว่าที่ตัวอย่าง B ให้ค่าการเปล่งแสงสูงสุดที่ 555.5 ที่ความยาวคลื่น 554.4 nm และยังพบอีกว่าเมื่อเติม Au-Pd ลงไปใน R6G นั้นสเปกตรัมการเปล่งแสงจะมีการเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่น้อยลงหรือเรียกว่า blue-shift โดยค่าความเข้มข้นของ Au-Pd มีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้สเปกตรัมมีการเลื่อนมากยิ่งขึ้นโดยค่าการเปล่งแสงของตัวอย่างต่างๆแสดงให้เห็นในตารางที่ 5.7

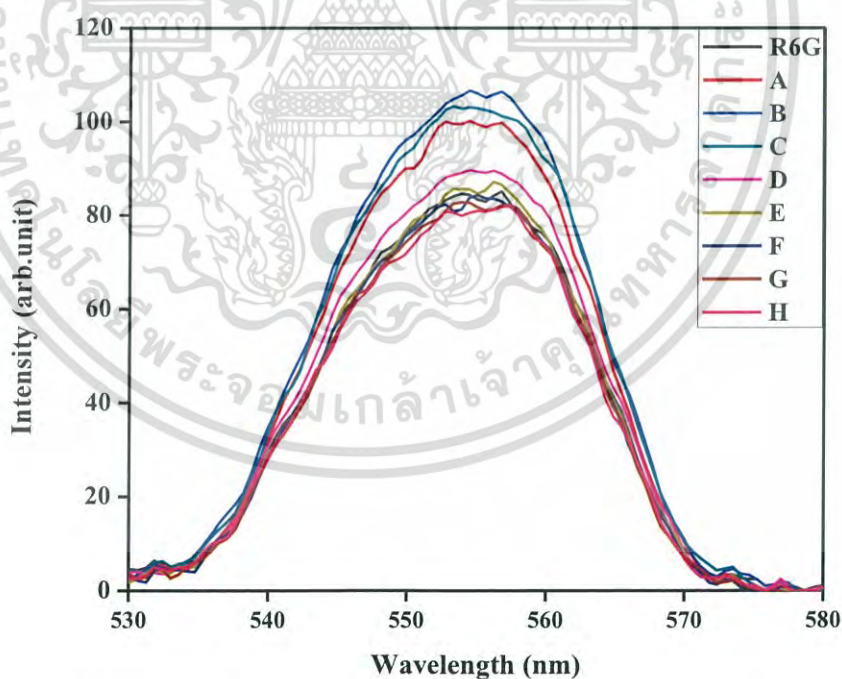
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าการเปล่งแสงสูงสุดของสารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd

ตัวอย่าง	ค่าการเปล่งแสงสูงสุด (arb.unit)	ความยาวคลื่น (nm)
R6G	462.7	557.3
A	549.0	555.0
B	555.5	554.4
C	553.3	554.4
D	547.0	554.4
E	539.1	553.8
F	423.2	546.9
G	296.0	544.6
H	192.5	542.2

5.4.2.2 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของลายนิ้วมือ R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd

ในการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของลายนิ้วมือแฝงแสดงดังรูปที่ 5.9 จากการทดลองพบว่าเมื่อเติม Au-Pd ลงใน R6G พบว่าสเปกตรัมการเปล่งแสงมีการเปลี่ยนแปลงทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยที่ตัวอย่าง B ให้ค่าการเปล่งแสงสูงสุดที่ 106.6 ที่ความยาวคลื่น 554.4 nm โดยมีความสอดคล้องกับรูปแบบสารละลาย ซึ่งค่าการเปล่งแสงแสดงไว้ในตารางที่ 5.8



รูปที่ 5.9 สเปกตรัมการเปล่งแสงของลายนิ้วมือที่แช่สารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

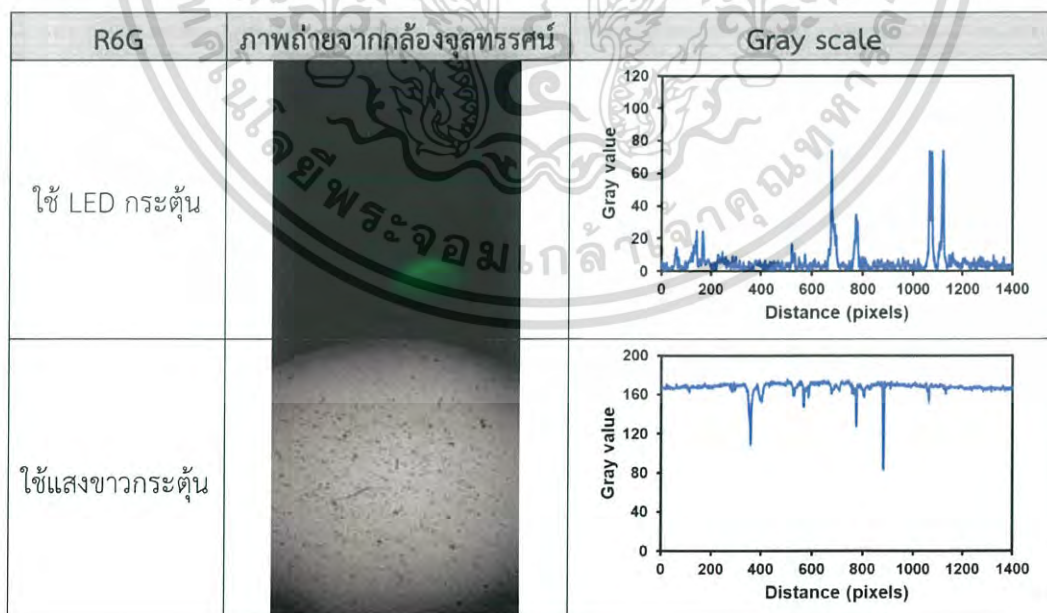
ตารางที่ 5.8 แสดงค่าการเปล่งแสงสูงสุดของลายนิ้วมือที่แช่สารละลาย R6G กับ R6G ที่ผสม Au-Pd

ตัวอย่าง	ค่าการเปล่งแสงสูงสุด (arb.unit)	ความยาวคลื่น (nm)
R6G	85.1	556.7
A	100.1	554.4
B	106.6	554.4
C	103.3	553.2
D	89.6	554.4
E	87.1	556.1
F	84.3	555.0
G	82.8	553.8
H	81.9	557.3

5.4.3 ผลการศึกษาการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงด้วยการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์

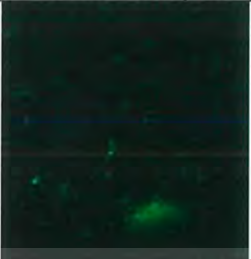
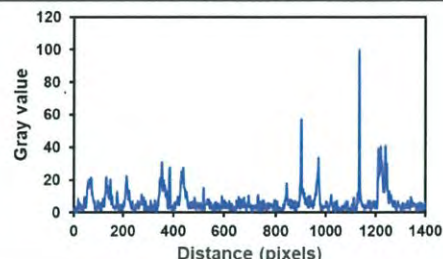

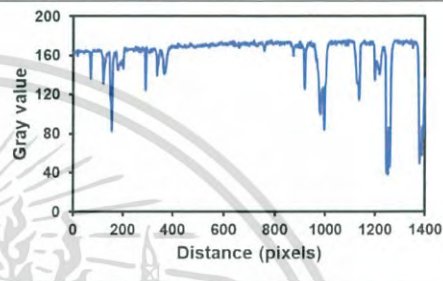
ในการทดลองนี้จะนำลายนิ้วมือแฝงที่แช่สารละลายไปทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้วยกัน 2 วิธีดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.3.3 โดยภาพถ่ายลายนิ้วมือที่ได้จะถูกนำไปหาค่าความเข้มของแสงด้วยโปรแกรม Image J แล้วนำไปหาค่าความแตกต่างของ Gray value ซึ่งผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 5.9 ถึง ตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.9 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของสาร R6G

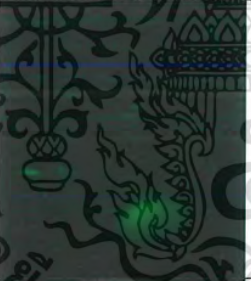
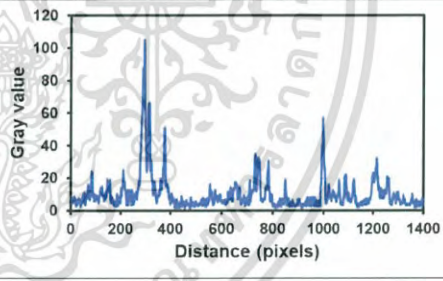
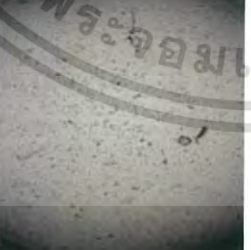
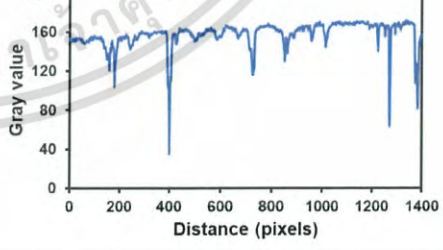


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง A

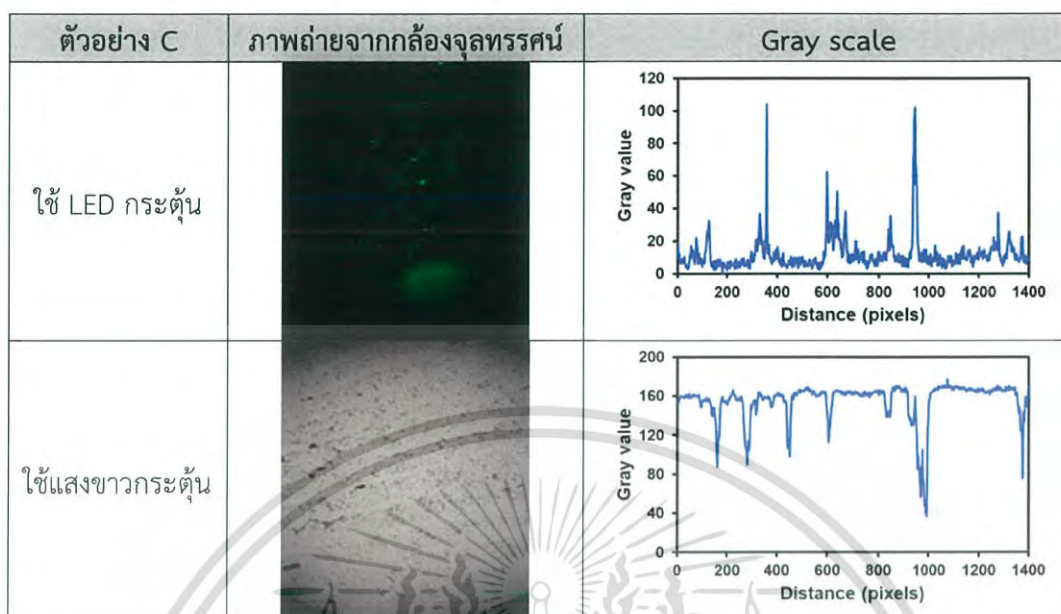
ตัวอย่าง A	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์	Gray scale
ใช้ LED กระตุ้น		
ใช้แสงขาวกระตุ้น		

ตารางที่ 5.11 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง B

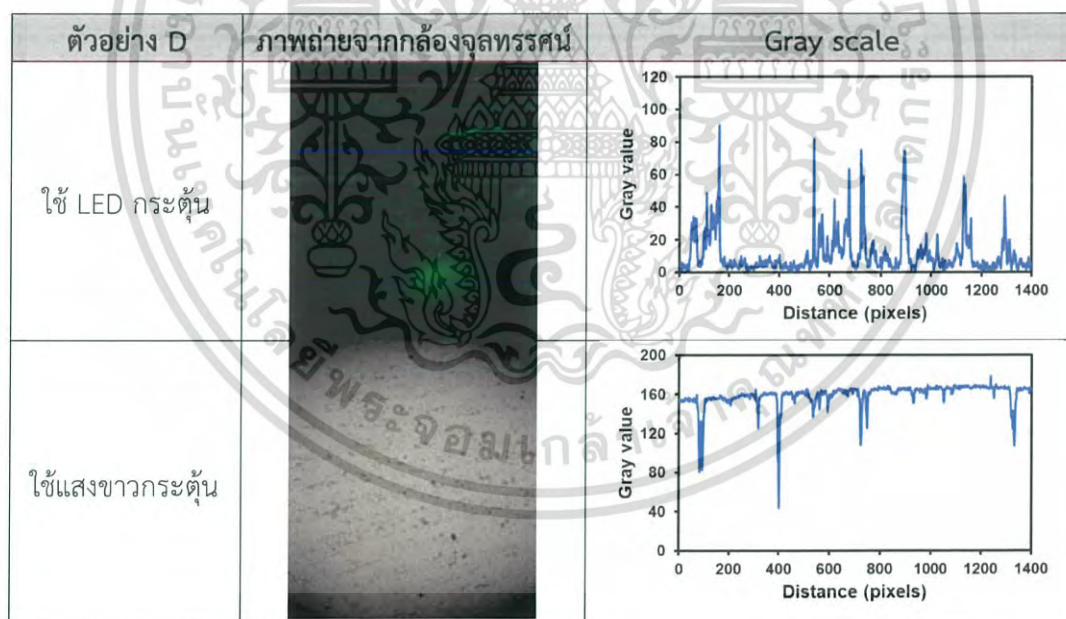
ตัวอย่าง B	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์	Gray scale
ใช้ LED กระตุ้น		
ใช้แสงขาวกระตุ้น		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง C

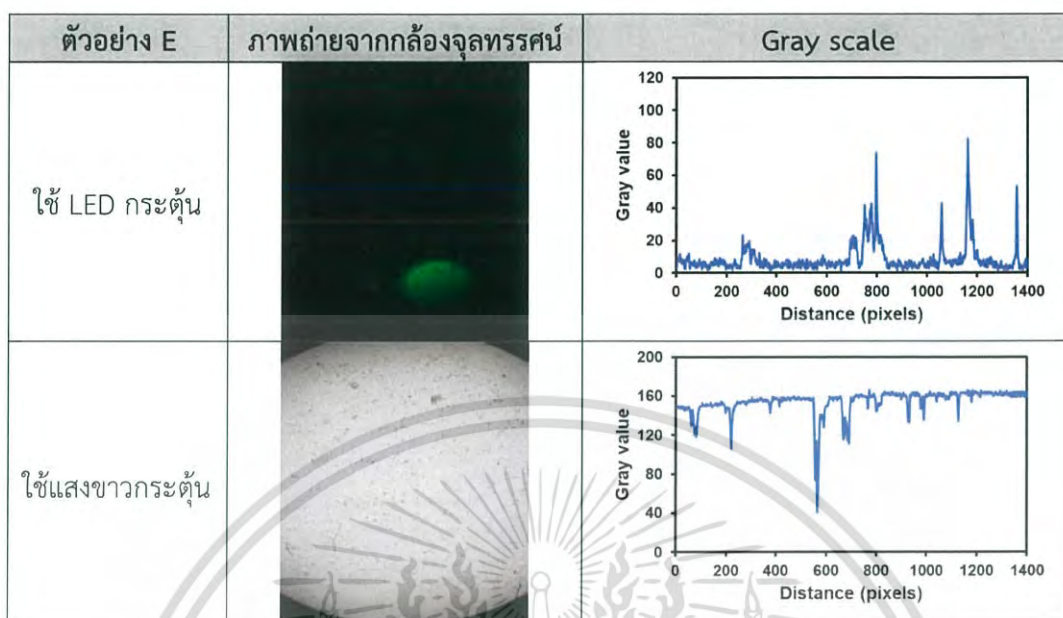


ตารางที่ 5.13 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง D

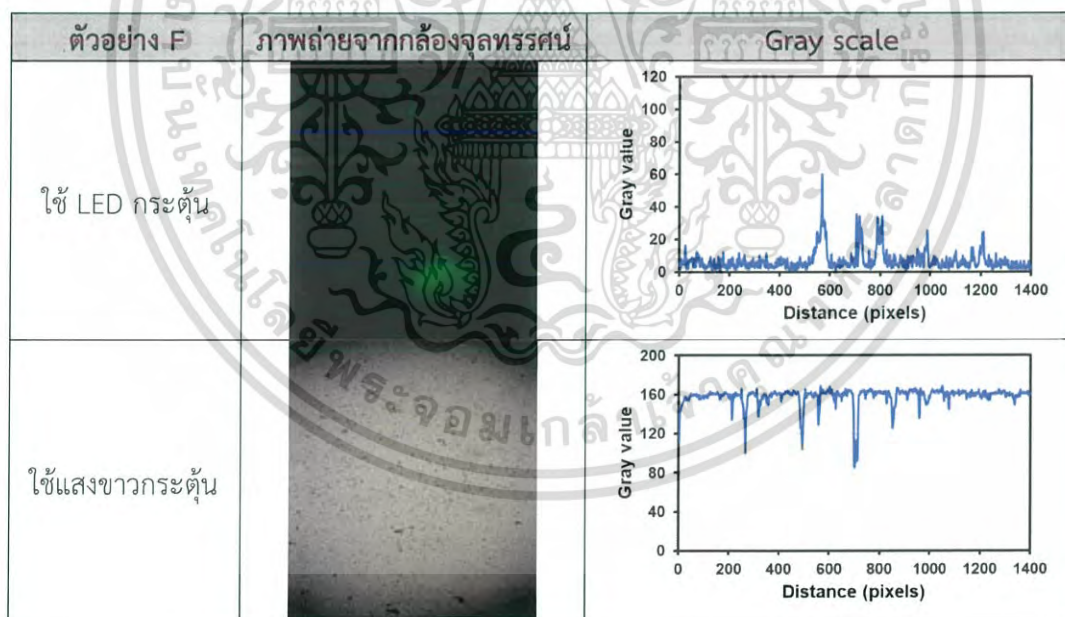


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.14 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง E


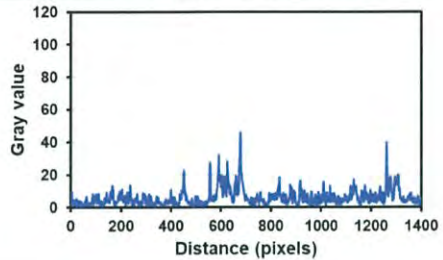
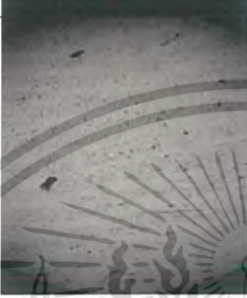
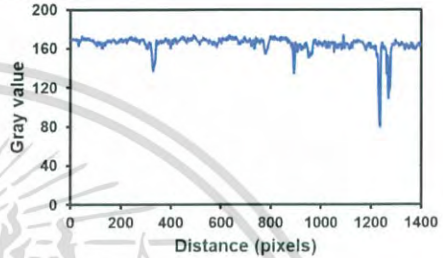


ตารางที่ 5.15 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง F


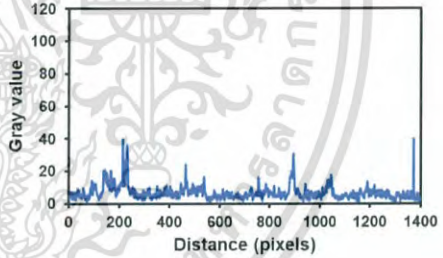

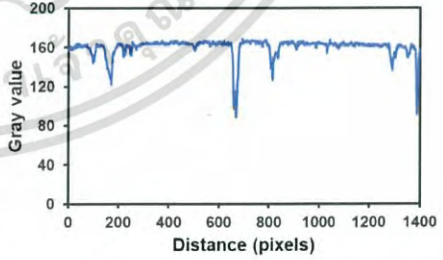


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.16 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง G

ตัวอย่าง G	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์	Gray scale
ใช้ LED กระตุ้น		
ใช้แสงขาวกระตุ้น		

ตารางที่ 5.17 แสดงภาพถ่ายลายนิ้วมือกับกราฟ Gray scale ของตัวอย่าง H

ตัวอย่าง H	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์	Gray scale
ใช้ LED กระตุ้น		
ใช้แสงขาวกระตุ้น		

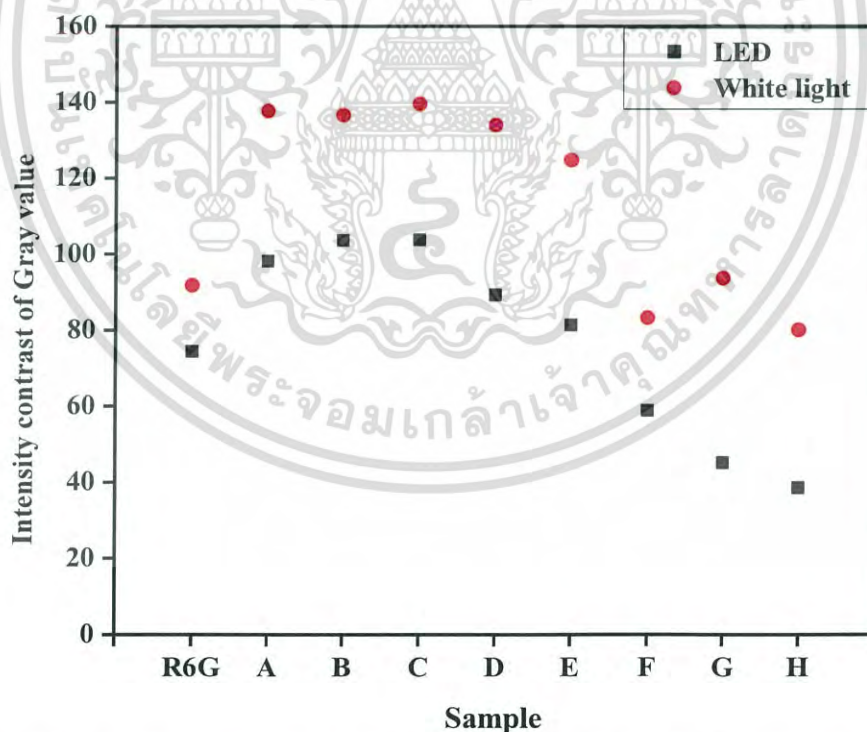
จากการทดลองนี้จะพบว่าการใช้แสงจาก LED กับแสงขาวกระตุ้นนั้น จะทำให้ได้ค่าความแตกต่างของค่า Gray value ที่ต่างกันเนื่องจากหลักการของ Red Green Blue (RGB) ซึ่งการวิเคราะห์จากการใช้แสงขาวกระตุ้นนั้นพบว่าภาพที่ได้จากการทดลองนั้นแสงที่ได้จะเป็นแสงสีขาวซึ่งเป็นสีอ้างอิงส่วนตำแหน่งของสารจะเป็นสีเทาหรือสีดำซึ่งทำให้มีความแตกต่างกันมากที่สุดคือ 0 ถึง 255 แต่ในส่วนของการใช้ LED กระตุ้นพบว่าแสงที่เป็นแสงอ้างอิงคือสีดำส่วนแสงที่ใช้ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแสงสีเขียวซึ่งมีความแตกต่างระหว่างแสงสีดำกับแสงสีเขียวมีความต่างกันน้อยกว่าแสงสีดำกับสีขาว ซึ่งค่าความต่างของค่า Gray value สรุปได้ดังตารางที่ 5.18 และรูปที่ 5.10

ตารางที่ 5.18 แสดงค่าความแตกต่างของ Gray value ของภาพลายนิ้วมือที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์

ตัวอย่าง	ใช้ LED กระตุ้น			ใช้แสงขาวกระตุ้น		
	ค่าความเข้มสูงสุดของ Gray value	ค่าความเข้มต่ำสุดของ Gray value	ผลต่างของความเข้มสูงสุดกับต่ำสุด	ค่าความเข้มสูงสุดของ Gray value	ค่าความเข้มต่ำสุดของ Gray value	ผลต่างของความเข้มสูงสุดกับต่ำสุด
R6G	74.4	0.1	74.3	175.4	83.6	91.8
A	98.2	0.1	98.1	176.0	38.3	137.7
B	104.8	1.3	103.5	172.0	35.3	136.7
C	103.7	0.0	103.7	176.8	37.3	139.5
D	89.4	0.2	89.2	178.4	44.4	134.0
E	82.4	1.1	81.3	165.8	41.0	124.8
F	60.0	1.1	58.9	168.9	85.7	83.2
G	45.7	0.6	45.1	173.6	80.0	93.6
H	39.6	1.0	38.6	168.5	88.5	80.0



รูปที่ 5.10 ค่าความต่างของ Gray value ที่ได้จากภาพถ่ายโดยใช้แสงขาวกับแสง LED กระตุ้นของตัวอย่างต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต่างของ Gray value ที่ได้จากภาพถ่ายนั้นจะพบว่าที่การกระตุ้นด้วยแสง LED ค่าความต่างที่มากที่สุดคือตัวอย่าง C ซึ่งมีค่าความต่างของ Gray value อยู่ที่ 103.7 และมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่าง B ซึ่งมีค่าความต่างของ Gray value ที่ 103.5 เช่นเดียวกันกับการใช้แสงขาวกระตุ้นพบว่าที่ตัวอย่าง C มีค่าผลต่างของ Gray value มากสุดอยู่ที่ 139.5 และมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่าง A และ B ที่มีผลต่างของ Gray value อยู่ที่ 137.7 และ 136.7 จากการทดลองจะพบว่าค่าการกระตุ้นด้วยแสง LED หรือแสงขาวนั้นพบว่าที่ตัวอย่าง C ให้ผลต่างของ Gray value มากสุดและยังมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่าง A และตัวอย่าง B เนื่องมาจากความเข้มข้นของ Au-Pd มีค่าใกล้เคียงกันมากจากการทดลองยังพบอีกว่าที่การใช้แสงขาวกระตุ้นนั้นจะพบแนวโน้มของความต่างของค่า Gray value ที่แตกต่างไปจากการใช้ LED กระตุ้น ดังตัวอย่าง F พบว่ามีค่าความต่างของ Gray value น้อยกว่าตัวอย่าง G ซึ่งอาจเกิดมาจากการที่ลายนิ้วมือมีฝุ่นเจือปนส่งผลทำให้ภาพที่ได้เป็นภาพออกไปทางสีดำหรือสีเทาเข้มส่งผลให้การอ่านค่าจาก Image J มีค่าเข้าใกล้ 0 ทำให้ค่าความต่างที่ได้นั้นมีค่าน้อยลงหรือผิดเพี้ยนไป

จะเห็นได้ว่าในการนำ Au-Pd มาผสมกับสีย้อม R6G สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจลายนิ้วมือแฝงได้ เนื่องจากองค์ประกอบของเหงื่อจากผิวหนังจะมีกรดไขมันอิ่มตัวที่เรียกว่า ไตรกรีเซอไรด์ซึ่งพบว่า R6G ทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมัน แต่กรดไขมันทำปฏิกิริยาแล้วเกิดแรงปฏิกิริยาที่อ่อนมากจึงไม่ส่งผลต่อการเรืองแสงของสารสีย้อม R6G



สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารสีย้อมโรดามีน 6จี (R6G) กับสารสีย้อมโรดามีน 6จี ที่ผสมกับแท่งทองคำเคลือบแพลเลเดียม (Au-Pd) โดยคุณสมบัติทางแสงที่ได้ทำการศึกษาคือคุณสมบัติการดูดกลืนแสง การเปล่งแสง ดัชนีหักเหแสง และฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ โดยค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์จะถูกหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ R6G กับ Au-Pd โดยใช้การออกแบบการทดลองโดยโปรแกรม Design Expert อีกทั้งยังได้ทำการศึกษานำ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd ไปประยุกต์ใช้งานทางด้านตรวจจับไอออนโลหะหนักและตรวจจับลายนิ้วมือแฝง ซึ่งผลการวิจัยสามารถสรุปเป็นข้อได้ดังนี้

6.1.1 การศึกษาค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์

1.ในการศึกษาหาช่วงความเข้มข้นของ R6G กับ Au-Pd ที่ผสมกันแล้วทำให้ค่าการเปล่งแสงของสาร R6G มีค่าเพิ่มมากขึ้นพบว่าช่วงความเข้มข้นของ R6G มีความเข้มข้น 1.5×10^{-6} ถึง 9.37×10^{-8} โมลาร์ และ Au-Pd มีความเข้มข้น 1.17×10^{-4} ถึง 7.34×10^{-6} โมลาร์

2.การหาค่าความสัมพันธ์ของความเข้มข้น R6G กับ Au-Pd ที่มีผลต่อค่า FQY โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert นั้นพบว่าความเข้มข้นของ R6G และ Au-Pd มีผลต่อค่า FQY ของ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd โดยสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการโปรแกรมนั้นเมื่อนำไปทดลองจริงพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ได้จากโปรแกรมกับค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 2%

6.1.2 การตรวจจับไอออนโลหะหนัก

1.การศึกษาค่าความเข้มข้นของ Au-Pd ที่มีผลต่อการเปล่งแสงของสาร R6G-hydrazine โดยที่ค่าความเข้มข้นของ R6G-hydrazine มีค่า 4.4×10^{-6} โมลาร์ โดยจากการทดลองพบว่าค่าความเข้มข้นของ Au-Pd มีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าการเปล่งแสงของสาร R6G มีค่าเพิ่มมากขึ้นและค่าความเข้มข้นของ Au-Pd ที่มีความเข้มข้น 10^{-5} โมลาร์ให้ผลการเปล่งแสงที่ดีที่สุด

2.การศึกษากการตรวจจับโลหะไอออนหนักพบว่า R6G-hydrazine ที่ผสมกับ Au-Pd นั้น มีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจจับไอออนโลหะหนักได้เพียงไอออนปรอทเท่านั้น

3. ในการหาค่าความไวในการตรวจจับไอออนปรอทพบว่าสาร R6G-hydrazine ที่ผสมกับ Au-Pd นั้น มีขีดจำกัดในการตรวจจับไอออนปรอทที่ 20.6 นาโนโมลาร์

6.1.3 การตรวจจบลายนิ้วมือแฝง

1. ในการศึกษาระยะเวลาในการนำลายนิ้วมือแฝงมาแช่สารละลายสีย้อมพบว่าที่ระยะเวลา 30 นาทีแบบไม่ล้างน้ำ DI จะได้ภาพลายนิ้วมือแฝงที่ชัดเจนที่สุดโดยดูได้จากค่าความต่างของ Gray value ที่มีค่าความต่างที่ 121.2596 ผู้วิจัยจึงได้เลือกเงื่อนไขในการทำการศึกษาในการสร้างลายนิ้วมือแฝงในการแช่สารสีย้อม R6G

2. ในการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G กับ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd ในรูปแบบของสารละลายและลายนิ้วมือแฝงนั้นพบว่ามีความไวเหมือนกันคือเมื่อนำ Au-Pd ผสมลงใน R6G จะทำให้สเปกตรัมการเปล่งแสงมีค่าเปลี่ยนแปลง โดยที่สเปกตรัมที่มีการเปล่งแสงสูงสุดคือตัวอย่าง B ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของ R6G เท่ากับ 1.5×10^{-6} โมลาร์ และ Au-Pd มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.0940×10^{-4} โมลาร์

3. ในการศึกษาภาพถ่ายลายนิ้วมือแฝงด้วยกล้องจุลทรรศน์นั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษา 2 วิธีคือใช้แสงขาวจากกล้องจุลทรรศน์กับใช้ LED สีเขียวที่มีความยาวคลื่น 530 nm กระตุ้น พบว่าที่ตัวอย่าง C ซึ่งมีความเข้มข้นของ R6G เท่ากับ 1.5×10^{-6} โมลาร์ และ Au-Pd มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1409×10^{-4} โมลาร์ เมื่อใช้แสง LED กระตุ้นมีค่าความต่างของ Gray value มากที่สุดคือ 103.7

6.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับในงานวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้พบข้อจำกัดในการทดลองหลายประการเช่นปริมาณสาร Au-Pd ที่มีปริมาณน้อยทำให้การทดลองซ้ำเป็นไปได้น้อยและข้อจำกัดในการใช้อุปกรณ์ในการเตรียมสารมีจำกัด ในการนำลายนิ้วมือแฝงไปแช่สารละลายระหว่างที่แช่สารละลายต้องคอยระวังฝุ่นหรือสิ่งแปลกปลอมปนเปื้อนด้วยซึ่งควบคุมได้ยาก และการวิเคราะห์ภาพที่ได้จากโปรแกรม Image J ต้องเลือกช่วงของภาพที่ตำแหน่งเดียวกันซึ่งมีความยากในการเลือกตำแหน่ง

สำหรับงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อไปในอนาคตอาจจะทำการทดลองหาค่า FOY ของ R6G ที่ผสมกับ Au-Pd อาจศึกษาในช่วงความเข้มข้นอื่นๆ ในส่วนของสารสีย้อม R6G ที่มีค่าควอนตัมยิลด์สูงอาจศึกษาสารสีย้อมชนิดอื่นที่มีค่าควอนตัมยิลด์ต่ำๆแต่มีค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างจาก R6G เพื่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านอื่นๆที่เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Florian, M.Z et al., 2014. "Fluorescence Spectroscopy of Rhodamine 6G: Concentration and Solvent Effects." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*.121 : 147-151.
- [2] Andreea B. et al., 2017. "Quantum-mechanical study and spectral analysis on some derivatives of Rhodamine in solutions." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 172 : 91-99.
- [3] Yi W. et al., 2011. "Development of fluorescence imaging-based assay for screening cardioprotective compounds from medicinal plants." *Analytica Chimica Acta*. 702 : 87-94.
- [4] Li C. et al., 2018. "Selective and differential detection of Hg^{2+} and Cu^{2+} with use of a single rhodamine hydrazone-type probe in the absence and presence of UV irradiation." *Dyes and Pigments*. 153 : 174-124.
- [5] Abimbola O. 2018. "Solvent Effects on the Spectral Properties of Rhodamine 6G: Estimation of Ground and Excited State Dipole Moments." *J Solution Chem*. 47 : 203–219.
- [6] Barzan M. and Hajiesmaeilbaigi F. 2018. "Investigation the concentration effect on the absorption and fluorescence properties of Rhodamine 6G dye." *Optik*. 159 : 157–161.
- [7] Markus G. et al., 2009. "Determination of the Fluorescence Quantum Yield of Quantum Dots: Suitable Procedures and Achievable Uncertainties." *Anal. Chem*. 81: 6285–6294.
- [8] Andreea. et al. 2017. "Spectral study of Rhodamine dyes in binary solutions." *Journal of Molecular Structure*. 1140 : 71-76.
- [9] Senthil A. et al. 2018. "In vivo bio-imaging studies of highly selective, sensitive rhodamine based fluorescent chemosensor for the detection of Cu^{2+}/Fe^{3+} ions." *Sensors & Actuators: B. Chemical*. 274 : 22–29.
- [10] Valerii F. et al. 2017. "One-pot synthesis of new acid photogenerators for Rhodamine laser dyes fluorescence activation." *Dyes and Pigments*. 136 : 612-618.
- [11] Lee J. et al. 2015. Metal-enhanced fluorescence: wavelength-dependent ultrafast energy transfer. *J. Phys. Chem. C*. 119 : 23285–23291.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Acuna G P. et al. 2012. Distance dependence of single fluorophore quenching by gold nanoparticles studied on DNA origami. *ACS Nano*. 6 : 3189–3195.
- [13] Menendez-Miranda M. et al. 2016. “Determination of the ratio of fluorophore/nanoparticle for fluorescence-labeled nanoparticles.” *Analyst*. 141 : 1266–1272.
- [14] Mingcong R. et al. 2016. “Study on the ultrahigh quantum yield of fluorescent P,O-g-C₃N₄ nanodots and its application in cell imaging.” *Chem. - A Europ. Journ.* 22 : 9387–9395.
- [15] El-Bashir S M. et al. 2013. “Metal-enhanced fluorescence of mixed coumarin dyes by silver and gold nanoparticles: towards plasmonic thin-film luminescent solar concentrator.” *J. Lumin.* 143 : 43–49.
- [16] Monica I. et al. 2009. “Plasmon-enhanced fluorescence of dye molecules.” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 267 : 403–405.
- [17] Xiu L. et al. 2014. “Fluorescence Enhancement by Silver Nanoparticles Controlled via Self Assembly Effect.” *POEM*. 4.
- [18] Oleg A. et al. 2015. “Photoluminescence of rhodamine 6G in plasmonic field of Au nanoparticles :Temperature effects.” *J. Lumin.* 158 : 294–300.
- [19] ZhuHong C. et al. 2015. “Metal-enhanced fluorescence effect of Ag and Au nanoparticles modified with rhodamine derivative in detecting Hg²⁺.” *Sensors and Actuators B*. 212 : 495–504.
- [20] Hyon S. et al. 2012. “Hollow Au@Pd and Au@Pt core-shell nanoparticles as electrocatalysts for ethanol oxidation reactions.” *J. Mater. Chem.*
- [21] Wei X. et al. 2011. “Synthesis of Bifunctional Au/Pt/Au Core/Shell Nanoraspberries for in Situ SERS Monitoring of Platinum-Catalyzed Reactions.” *J. Am. Chem. Soc.* 133 : 19302–19305.
- [22] Beibei L. et al. 2016. “Geometry-Dependent Surface Plasmonic Properties and Dielectric Sensitivity of Bimetallic Au@Pd Nanorods.” *Plasmonics*.
- [23] Adriana Z. et al. 2016. “Noble metal-based bimetallic nanoparticles: the effect of the structure on the optical, catalytic and photocatalytic properties.” *Advances in Colloid and Interface Science*. 229 : 80-107.
- [24] Nikolai G. and Lev A. 2010. “Optical properties and biomedical applications of plasmonic nanoparticles.” *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 111 : 1–35.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] Suslov A. et al. 2015. "Fluorescence enhancement of Rhodamine B by monodispersed silver nanoparticles." *Optics Communications*. 345 : 116–119.
- [26] Chen Y.C. et al. 2013. "Enhancement and quenching of fluorescence by silver nanoparticles in organic light-emitting diodes." *J.Nanomater*. 2013: 84136.
- [27] ณิชากร บูลพิภพอนันต์ .2560 "การศึกษาออปติคอลสเปกโทรสโคปีจากสีย้อมไวแสงร่วมกับอนุภาคนาโน" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [28] วิชญ์พร สุธัญพานิชย์. 2555 "การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสารเรืองแสง." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [29] สุภรณ์ รุจิหาญ. 2556 "การพัฒนาระบบการสร้างไมโครฟลูอิดิกแซนแนลต้นทุนต่ำสำหรับการตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. 2552. *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เครื่องมือ*. กรุงเทพฯ: บริษัท ขอนิมพ์ 50 จำกัด.
- [31] Bernard V. and Marino N. Berberan-Santos. 2012. *Molecular Fluorescence : Principles and Applications*. Germany : Wiley-VCH
- [32] Muhammad H. et al. 2017. "Fluorescence Spectroscopy for the Monitoring of Food Processes." *Adv Biochem Eng Biotechnol*.
- [33] *Adv Biochem Eng Biotechnol*. 2001. A practical guide to time-resolved luminescence lifetime determination using dedicated Time-correlated Single-Photon Counting System. Scotland. UK.
- [34] Estupinaa-Lopez C. et al. 2013. "Eclipsing thermal lens spectroscopy for fluorescence quantum yield measurement." *Optical Society of America*. 21(15).
- [35] Michael W., Thermo Fisher Scientific, Madison. *Measurement of Fluorescence Quantum Yields*. USA.
- [36] วีทิต วรรณเลิศลักษณ์. 2560. การหักเหของแสง.
[Online]. Available: <http://www.scimath.org/>.
- [37] 2018. ภาพที่เกิดจากการสะท้อนของแสง การหักเหของแสงแล ผ่านกระจก หรือเลนส์.
[Online]. Available:
<http://www.physic2u.com/Topic55/Optics/ReflectionVSRefraction.html>.
- [38] ณิชพันธุ์ ศุภกา. 2018. *วัสดุนาโน*. [Online]. Available: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/217_8-11-edit.pdf.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [39] Luiza F. and Duncan S. 2010. *Fundamental concepts in nanoscience and nanotechnologies*. Denmark.
- [40] Maastricht. 2017. "Cristal Therapeutics starts clinical phase I trial with nanomedicine CriPet docetaxel in patients with solid tumour." [Online]. Available : <https://www.b3cnewswire.com /201711011666/ cristal -therapeutics-progresses -nanomedicine -cripecr -docetaxel -to -phase -1b -development -in-patients-with-solid-tumours.html>.
- [41] Portland. 2005. "OHSU-Led Study Finds Advantages to Iron Nanoparticles for Environmental Cleanup." [Online]. Available:https://www.ohsu.edu/xd/about/news_events/news/2005/01-12-ohsu-led-study-finds-adv.cfm.
- [42] 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 : <https://www.understandingnano.com/nanoparticle-water-pollution-iron-oxide-arsenic.html>.
- [43] Angewandte Chemie. 2012. "Highly efficient electrocatalyst for the reduction of oxygen in fuel cells and batteries." [Online]. Available : <https://phys.org/news/2012-01-21-highly-efficient-electrocatalyst-reduction-oxygen.html>.
- [44] อภิวัฒน์ ชมพูสอ .2013 "โครงสร้างระดับนาโนของทอง: การสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง." *วิทย.ม.ช.* 2013(41) : 859-872.
- [45] วาสิณี ประดับศรี และคณะ. 2558. "การศึกษาแผนแบบพื้นผิวตอบสนองขนาดเล็กสำหรับตัวแบบกำลังสองเต็มและตัวแบบลดรูปในขอบเขตทรงกลม." *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.* 23
- [46] Tony Butterfield. 2017. *Method of Steepest Ascent*. [Online]. Available: https://www.che.utah.edu/~tony/course/material/ExperimentalDesign/30_meth_of_steepest_asc.php.
- [47] กัลยาณี เต็งพงศธร. 2554. "พื้นที่ผิวผลตอบ (Response Surface)" กรุงเทพฯ : คณะอุตสาหกรรมเกษตร.สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.เอกสารอัดสำเนา
- [48] ณัฐวุฒิ เจริญชัย.2558. "การสังเคราะห์และประยุกต์ใช้เซนเซอร์ทางเคมีเพื่อพัฒนาวิธีตรวจวัดปรอทในแหล่งน้ำด้วยเครื่องมืออัตโนมัติและชุดทดสอบภาคสนาม." *คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [49] Ruiqi F. 2015. "Development of Methods for Determining Dye Deposition of Mercury Using an Ion-Exchange Membrane: Relative Rates of Mercury Dye Deposition at Sardis, Enid, and Grenada Lakes." A thesis submitted to the faculty of The University of Mississippi in partial fulfillment of the requirements of the Sally McDonnell Barksdale Honors College. Oxford.
- [50] Lei S. et al. 2015. "Rhodamine functionalized magnetic core-shell nanocomposite: An emission "Off-On" sensing system for mercury ion detection and extraction." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 138 : 348-356.
- [51] Zohreh P. 2018. "Electrospun nanofibers decorated with bio-sonochemically synthesized gold nanoparticles as an ultrasensitive probe in amalgam-based mercury (II) detection system." *Ultrasonics – Sonochemistry*. 44 : 24-35.
- [52] กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข.2543. หนังสือความรู้สิ่งเป็นพิษตอนที่14 หน้าที่9-13.
- [53] ศศิวิมล ไกรทอง.2556. "การสังเคราะห์อนุพันธ์ของโรดามีนสำหรับใช้เป็นสารตรวจจับไอออนและอนุพันธ์ของคาร์บาไซลสำหรับใช้เป็นไดโอดเปล่งแสงชนิดอินทรีย์" ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอินทรีย์ ภาควิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [54] นารท พรหมรังสรรค์.2558. "การหาค่าขีดจำกัดการตรวจหาและขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณจากกราฟมาตรฐานสำหรับเทคนิคโครมาโทกราฟี". กรมวิทยาศาสตร์บริการ.เอกสารอัดสำเนา.
- [55] Lavin A. et al. 2018. On the determination of uncertainty and limit of detection in label-free biosensors. *Sensors*. 38: 2038.
- [56] ชัยรัตน์ องค์กรวิศิษฐ์. 2548. "ระบบตรวจสอบลายนิ้วมือแบบอัตโนมัติเพื่อประมวลผลบนสมาร์ตการ์ด" วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมคอมพิวเตอร์,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [57] 2018. ประเภทของลายนิ้วมือ [Online].. Available: <https://www.siamfinger.com/>
- [58] sanomaru. 2561. "ทำไมคนเราถึงมีลายนิ้วมือไม่เหมือนกัน" [Online]. Available: <https://www.truelookpanya.com/knowledge/content/65845/-blo-scibio-sci->
- [59] สถาบันนิติวิทยาศาสตร์.2562 "การตรวจลายนิ้วมือด้วยการปิดฝุ่น". [Online]. Available: <http://www.cifs.moj.go.th/main/index.php/th/about-cifs/administration/division-forensic-investigation/fingerprints>.
- [60] 2562. "Iodine Fuming Cabinet" [Online]. Available:<https://www.sirchie.com/laboratory-fuming-cabinet-heat-chamber.html#.XFNLx1WTKM9>.
- [61] MGR Online. 2557. "หาลายนิ้วมือแฝงด้วย"กาวตราช้าง"" [Online]. Available: <https://mgronline.com/science/detail/9570000018373>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [62] พิชัยยุทธ พิชัยสงคราม. 2561 . “เก็บลายนิ้วมือ” [Online]. Available: <https://www.gotoknow.org/posts/130112>.
- [63] ROFIN F. 2019. “Polilight” [Online]. Available: <http://www.rofinforensic.com.au/pl500.htm>.
- [64] John O. 1979. “Calorimetric Determinations of Absolute Fluorescence Quantum Yields.” *The Journal of Physical Chemistry*. 83(20) : 2581-2583.
- [65] Fischer M. and Georges J. 1996. “Fluorescence quantum yield of rhodamine 6G in ethanol as a function of concentration using thermal lens spectrometry.” *Chemical Physics Letters*. 260 : 115-118.
- [66] Douglas M. et al. 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.
- [67] Santhi A. et al. 2004. “Effect of silver nano particles on the fluorescence quantum yield of Rhodamine 6G determined using dual beam thermal lens method.” *Spectrochimica Acta Part A*. 60 : 1077-1083.
- [68] Christian W. et al. 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.
- [69] Zang X-F. et al. 2014. Fluorescence life times and quantum yields of ten rhodamine derivatives: Structural effect on emission mechanism in different solvents. *J.Lumin*. 145: 448–453.
- [70] Shahin G. et al. 2009. “Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum.” *Journal of Hazardous Materials*. 163 : 650–656.
- [71] Keshani S. et al. 2010. “Optimization of concentration process on pomelo fruit juice using response surface methodology (RSM).” *International Food Research Journal*. 17: 733-742.
- [72] Noshadi I. et al. 2012. “Continuous production of biodiesel from waste cooking oil in a reactive distillation column catalyzed by solid heteropolyacid: Optimization using response surface methodology (RSM).” *Fuel*. 94 : 156–164.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [73] Adewale O. et al. 2015. "Optimization of microwave drying conditions of two banana varieties using response surface methodology." *Food Sci. Technol.* 35(3) : 438-444.
- [74] Xiulan Z. et al. 2016. "Carboxylation kapok fiber as a low-cost, environmentally friendly adsorbent with remarkably enhanced adsorption capacity for cationic dyes." *Res Chem Intermed.* 42 : 5069–5085.
- [75] Angelo A. and Maria A. 2017. "Investigation by response surface methodology of the combined effect of pH and composition of water-methanol mixtures on the stability of curcuminoids." *Food Chemistry.* 219 : 414–418.
- [76] Prasenjit M. et al. 2012. "Ratiometric Detection of Cr^{3+} and Hg^{2+} by a Naphthalimide-Rhodamine Based Fluorescent Probe." *Inorg. Chem.* 51 : 1769–1777.
- [77] Vairaperumal T. and Kasi P. 2011. "Alginate stabilized silver nanocube–Rh6G composite as a highly selective mercury sensor in aqueous solution." *Nanoscale.* 3 : 1166.
- [78] Jessica C. and Andrew M. 2012. "Improved photoelectrochemical detection of mercury (II) with a TiO_2 -modified composite photoelectrode." *Materials Chemistry and Physics.* 132 : 10– 16.
- [79] Fanyong Y. et al. 2013. "New fluorescent and colorimetric chemosensors based on the rhodamine detection of Hg^{2+} and Al^{3+} and application of imaging in living cells." *Dyes and Pigments.* 98 : 42-50.
- [80] HE S. et al. 2014. "Rhodamine 6G-based Chemosensor for the Visual Detection of Cu^{2+} and Fluorescent Detection of Hg^{2+} in Water. *Chem. Res. Chin. Univ.* 30(1) : 32-36.
- [81] Miao H. et al. 2016. "Synthesis and properties of three novel rhodamine-based fluorescent sensors for Hg^{2+} ." *Chinese Chemical Letters.* 27 : 989–992.
- [82] Kyeong S. et al. 2018. "Rhodamine-fluorene based dual channel probe for the detection of Hg^{2+} ions and its application in digital printing." *Sensors and Actuators B.* 261 : 545–552.
- [83] Naveed U. et al. 2007. "Forensic Fingerprint Enhancement using Bioadhesive Chitosan and Gold Nanoparticles." หน้า 411-415.in Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. , Bangkok, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [84] Masahisa T. et al. 2008. "Detection of Pretreated Fingerprint Fluorescence Using an LED-based Excitation System." *J Forensic Sci*, 53(4).
- [85] Quan C. et.al. 2009. "Application of dye intercalated bentonite for developing latent fingerprints." *Applied Clay Science*. 44 :156–160.
- [86] Jhuma D. et al. 2013. "Fingerprint visualization enhancement by deposition of columnar thin films and fluorescent dye treatment." *Forensic Science International*. 228 : 32–37.
- [87] Kaiyang C. et.al. 2013. "Super fast detection of latent fingerprints with water soluble CdTe quantum dots." *Forensic Science International*. 226 : 240–243.
- [88] 2018. **Rhodamine 6G**. [Online]. Available :
https://en.wikipedia.org/wiki/Rhodamine_6G.
- [89] 2018. **Au@Pd, Au@Pt Nanorods**. [Online]. Available:
<http://nanoseedz.com/product/aupd-aupt-nanorods/>.
- [90] ร้านเดือนดาวเครื่องสำอาง. 2561. น้ำปราศจากไอออน. [Online]. Available:
<https://www.duan-daw.com/article/12/>.
- [91] ณัฐพร อัครภูมิ และ วิมลมาศ ยศปราณี . 2559. "ค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยี่ลด์ของสารผสมโรดามีน-6จีและอนุภาคทองแพลเลเดียมที่มีขนาดนาโน." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [92] Dong L. et.al. 2011. "Fluorescence quenching and photobleaching in Au/Rh6G nanoassemblies: impact of competition between radiative and nonradiative decay." *Jeos*. 6 :11019.
- [93] Ashley E. Augspurger. et.al. 2014. "Detecting Plasmon Resonance Energy Transfer with Differential Interference Contrast Microscopy." *Anal. Chem*. 86 :1196-1201.
- [94] Danmaliki G I, Saleh T A and Shamsuddeen A A, 2017. "Response surface methodology optimization of adsorptive desulfurization on nickel/activated carbon." *Chem. Eng. J*. 313:993–1003.
- [95] Sasiwimon K. et al. 2016. "Highly Hg²⁺-sensitive and selective fluorescent sensors in aqueous solution and sensors encapsulated polymeric membrane." *RSC Adv*. 6 : 10401.
- [96] 2019. **เมทานอล**. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[97] 2019. ภาพสี grayscale. [Online].Available:

<http://babsoftsoft.blogspot.com/2015/10/image-processing-convert-gray-scale.html>.

[98] ชนากานต์ ผ่องสีโส และคณะ. 2559. “ระบบวัดการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์สำหรับการวัดความเข้มข้นของสารละลายโรดามีน 6จี.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



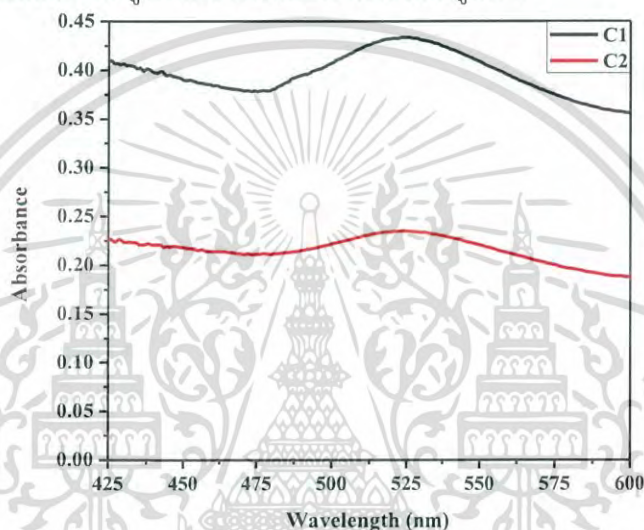
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

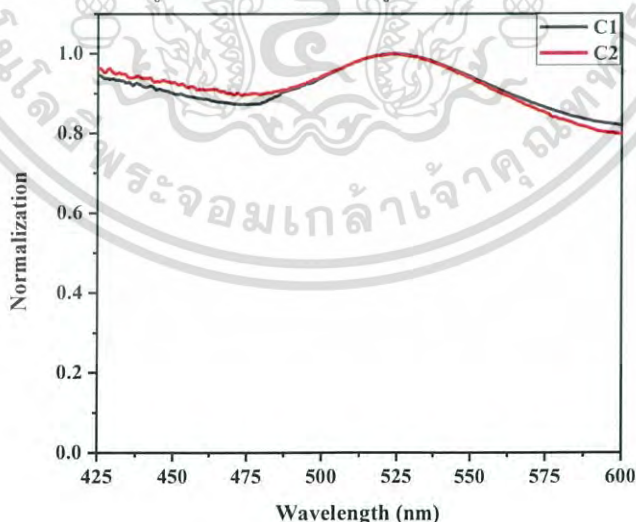
ภาคผนวก ก

1. ผลกระทบของความเข้มข้นของ Au-Pd ที่มีผลต่อค่าการดูดกลืนแสง

ในงานวิจัยครั้งนี้จะเห็นผลกระทบของลักษณะกราฟที่มีค่าความแตกต่างกันออกไปตามความเข้มข้นของ Au-Pd โดยผู้วิจัยได้ทำการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงตามระบบวัดการดูดกลืนแสงในหัวข้อที่ 3.2.1 โดยได้เตรียมความเข้มข้นของ Au-Pd เป็นสองค่าคือ C1 กับ C2 โดย C2 จะมีความเข้มข้นน้อยกว่า C1 อยู่ 50% ซึ่งให้ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเป็นดังรูปที่ 1 จะพบว่าที่ค่าความเข้มข้นของ Au-Pd มีค่ามากก็จะทำให้ค่าการดูดกลืนมาค่าเพิ่มมากขึ้นแล้วจะอีกว่าเมื่อนำกราฟไปทำการ Normalization เพื่อดูลักษณะของเส้นกราฟจะได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง



2. สเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ Normalization

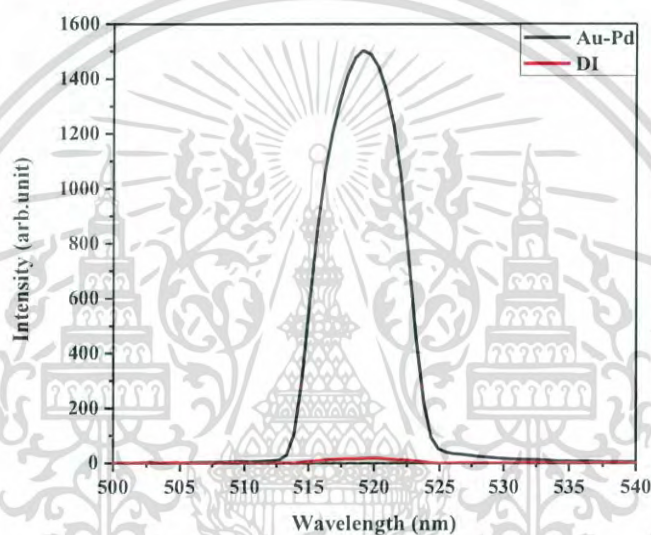
จากรูปที่ 2 พบว่าที่ค่าความเข้มข้นต่างกันจะมีลักษณะเส้นกราฟที่แตกต่างกันออกไปโดยลักษณะเส้นกราฟที่แต่ละความเข้มข้นแตกต่างกันเมื่อนำ Au-Pd ไปผสมกับ R6G แล้วทำการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมการดูดกลืนจะพบว่าที่ความเข้มข้นต่างกันจะส่งผลทำให้เส้นกราฟมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป

2.ผลกระทบของสเปกตรัมการเปล่งแสงของ Au-Pd

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยต้องการวัดค่าการเปล่งแสงซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าการเปล่งสารของสารละลาย R6G ที่ผสม Au-Pd นั้น จะมีปรากฏการณ์การกระเจิงแสงซึ่งดูได้จากรูปที่ 3 กล่าวคือเมื่อทำการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงดังระบบที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2.2 จะพบว่าสารละลายที่มี Au-Pd นั้นเมื่อนำไปวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงจะมีสเปกตรัมแสงของแหล่งกำเนิดแสงออกมาอย่างเห็นได้ชัดเนื่องมาจากปรากฏการณ์การกระเจิงแสงที่แหล่งกำเนิดแสงทำกับ Au-Pd นั้นเอง ซึ่งจะแตกต่างน้ำ DI นั้นมีจากแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการกระตุ้นออกมาเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 3 สเปกตรัมของน้ำ DI กับ Au-Pd ในระบบวัดการเปล่งแสงในหัวข้อ 3.2.2

ภาคผนวก ข

1. การใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น AvaSpec-EDU สำหรับโปรแกรม AvaSoft 7.4 USB 2

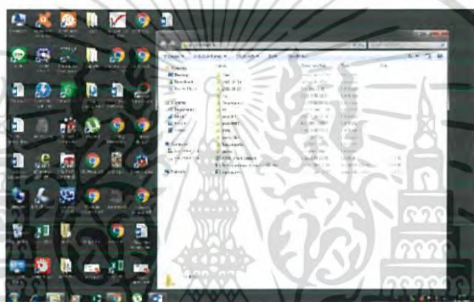
ขั้นตอนการใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 ตั้งค่าโปรแกรม Avasorf 7.4 USB2

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนที่ทำกรวัดค่าต่างๆ เช่น การวัดการวัดการดูดกลืน การวัดการส่องผ่าน การวัดการเปล่งแสง

ขั้นตอนที่ 1 การตั้งค่าโปรแกรม Avasorf 7.4 USB2

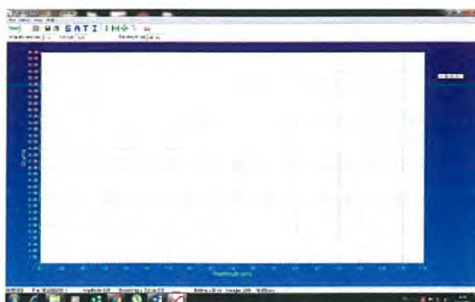
1.สร้าง Folder งานที่ต้องการเก็บข้อมูล



2.ต่อสาย USB จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์เข้ากับคอมพิวเตอร์ โดยสาย USB จะต่อทางด้านหลังของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

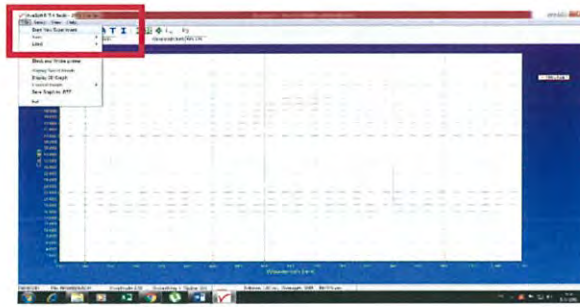


3.เปิดโปรแกรม AvaSoft 7.4

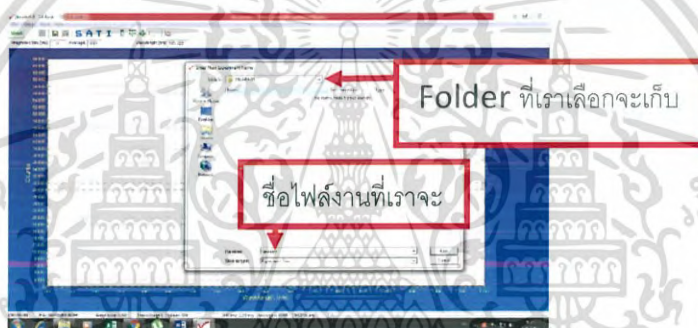


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

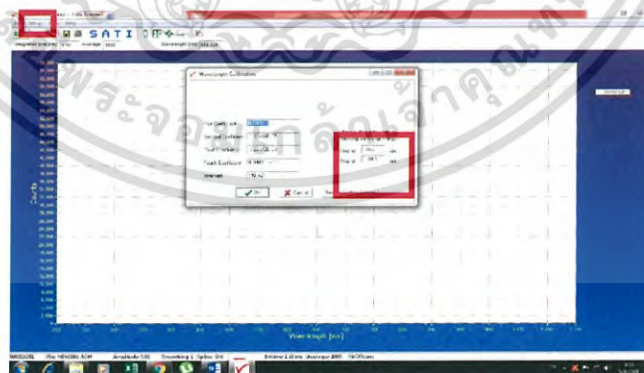
4. ตั้งค่าเครื่องก่อนโดยการคลิก file > Start New Experiment



5. เลือก Folder ที่เราสร้างไว้ในข้อที่ 1 จากนั้นเลือกชื่อไฟล์งานที่เราต้องการเซฟงาน จากนั้นกด Save

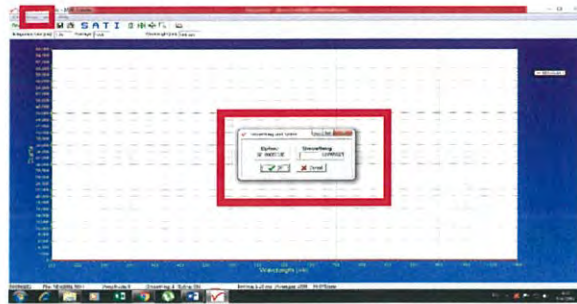


6. กด Setup > Wavelength Calibration Coefficients ดูช่วงวัดกว้างสุดช่วงประมาณ 200-1100 nm จากนั้น กด OK

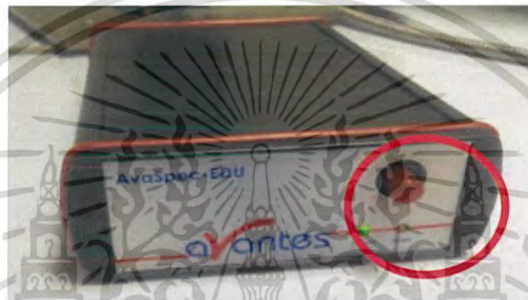


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. กด Setup > Smoothing and Spline ให้ข้อมูลเป็นดังรูป กด OK

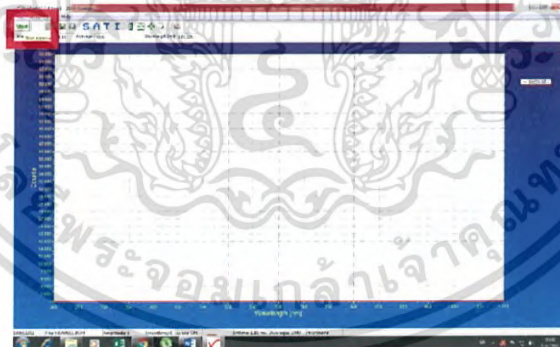


8. ในขณะที่เครื่องปิดรูรับแสงอยู่ให้เราทำการวัด Dark ในขั้นตอนต่อไป

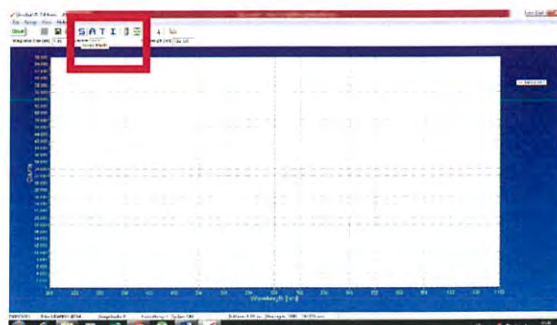


9. การวัด Dark

9.1 ขั้นตอนแรกก็กด Start

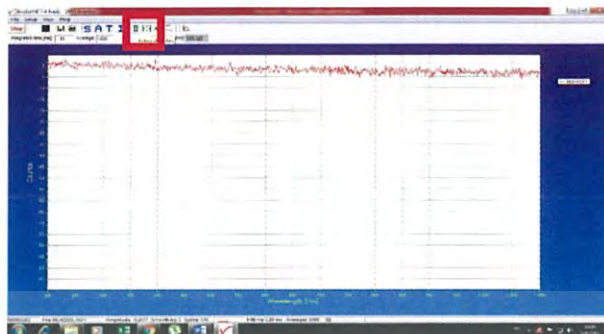


9.2 กดวัดโหมด S (Scope Mode)

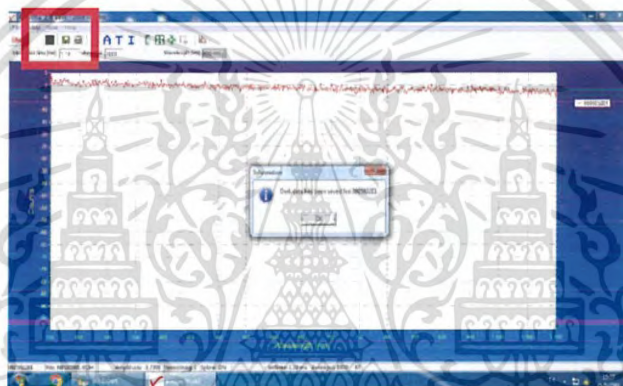


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

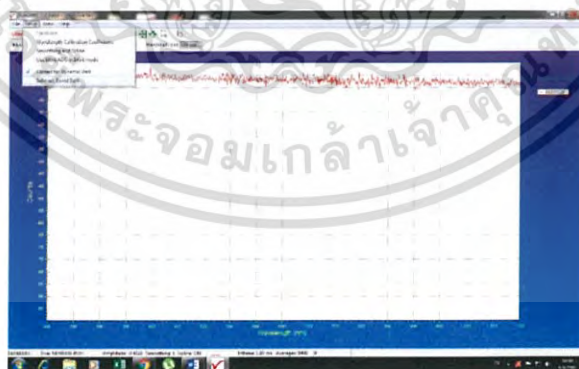
9.3 กดปุ่ม Autoscale Y-Axis จะขึ้นเส้นกราฟสีแดงมีความเป็นเส้นตรงเนื่องจากไม่มีสเปกตรัมแสง



9.4 กด Save Dark (สี่เหลี่ยมสีดำ) > OK



9.5 คลิก Setup > Subtract Saved Dark



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

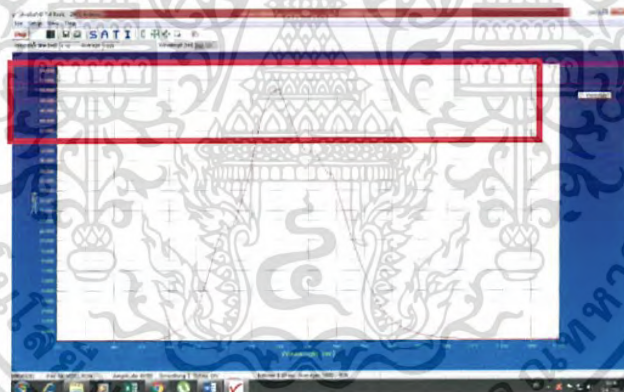
ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนทำการวัดค่าต่างๆ

10. การวัดการดูดกลืน ตั้งค่าเครื่องปรกติตามข้อ 1-9

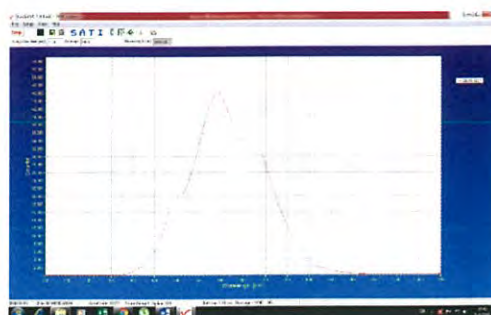
10.1 จัดอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับตัวอย่างที่เราต้องการวัดว่าเป็นฟิล์มบางหรือสารละลายดังรูป



10.2 ทำการวัดแสงขาว (วัดโหมด S) ซึ่งในแล็บที่ใช้คือหลอดไฟทังสเตน ปรับให้มีความเข้มสูงสุด ประมาณ 50000 (ดูที่แกน Y) ดูตัวอย่างการเซ็ตอุปกรณ์ได้ในรูปถัดไป ระวังอย่าให้แสงมีความเข้มมากเกินไปจนเกิดการ **Saturated**

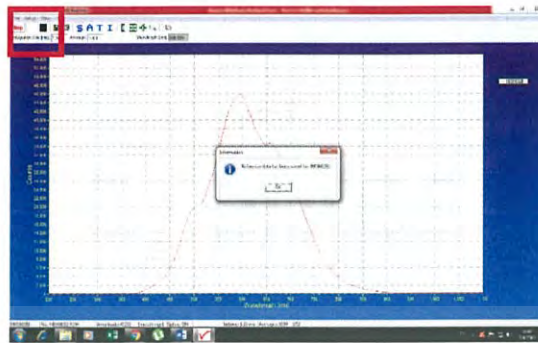


10.3 นำชิ้นงานที่ไม่มีการเจือสารหรือที่เราต้องการวัด blank มาวัด (I_0) เช่นทำฟิล์มบนกระจกสไลด์ bank ที่ต้องวัดก็คือกระจกสไลด์เปล่า หรือทำฟิล์มเคลือบ PMMA ที่ผสมสารต่างๆ blank ก็คือฟิล์มที่มีแค่ PMMA ที่ไม่มีสารเจือ สังเกตได้ว่าเมื่อวัด blank ความเข้มของสเปกตรัมจะเปลี่ยนไป

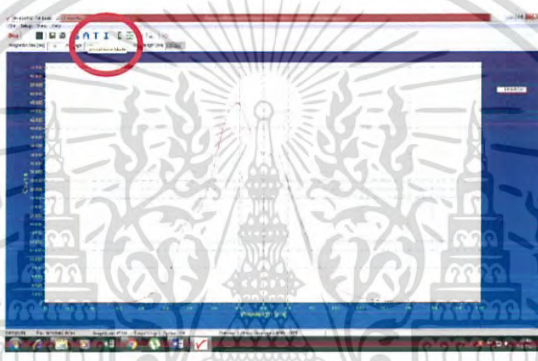


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

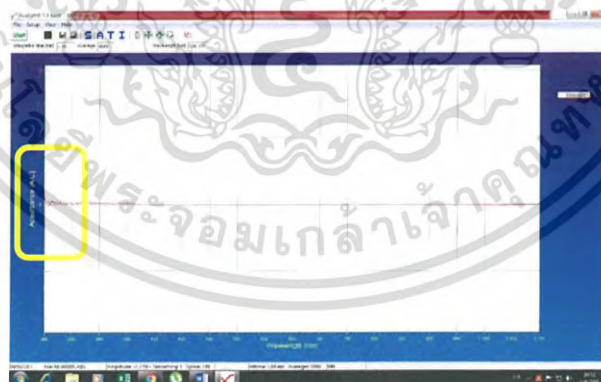
10.4 คลิก Save Reference (รูปสี่เหลี่ยมสีขาว) คลิก OK



10.5 คลิกโหมด A (Absorbance Mode)

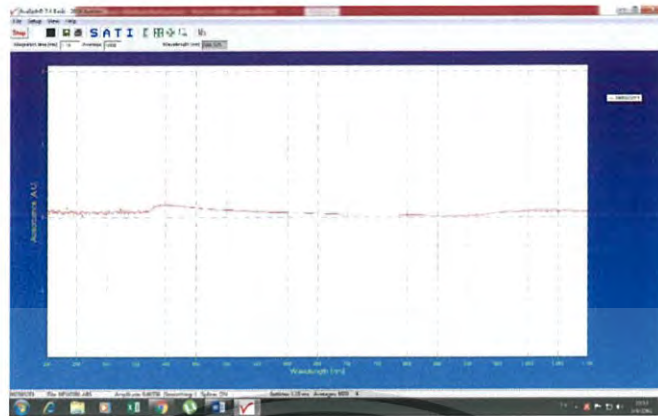


10.6 จะ ได้สเปกตรัมที่มีค่าความเข้มเป็น 0



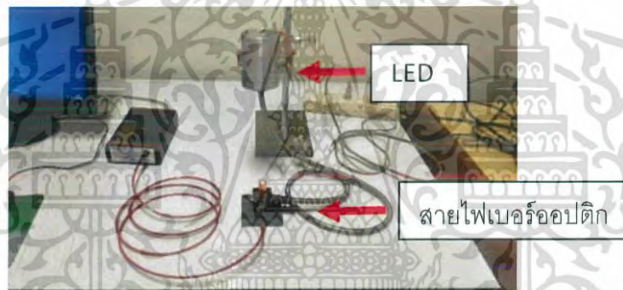
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.7 นำตัวอย่างที่เราต้องการวัดไปวัดได้เลย โดยใส่แทน blank จากนั้นสเปกตรัมจะเพิ่มขึ้นมา

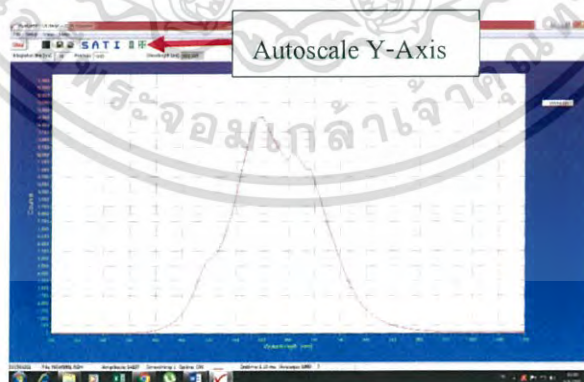


11. การวัดสเปกตรัมการเปล่งแสง ตั้งค่าเครื่องปรกติตามข้อ 1-9

11.1 จัดระบบตั้งรูป



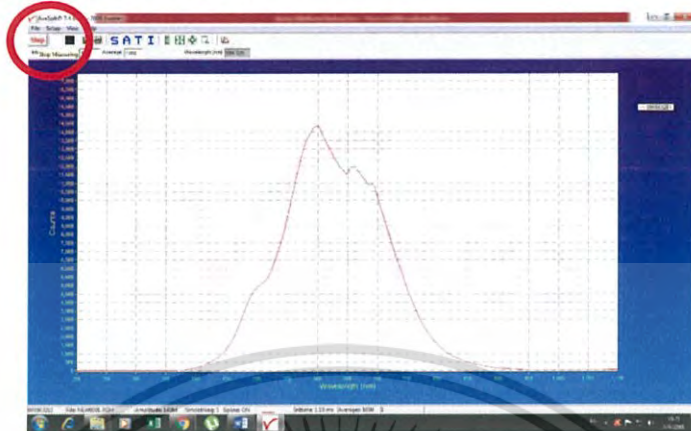
11.2 จะได้สเปกตรัมแสงตามรูป แกน X คือความยาวคลื่น (nm) แกน Y คือค่าความเข้ม (a.u.) ถ้าไม่
ขึ้นตั้งรูปให้กด Autoscale Y-Axis



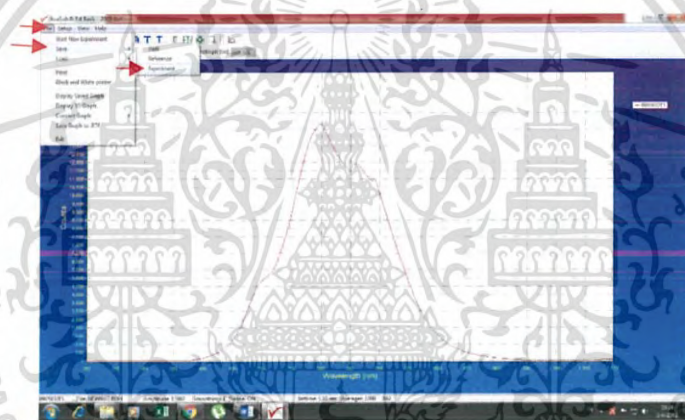
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. การบันทึกงาน

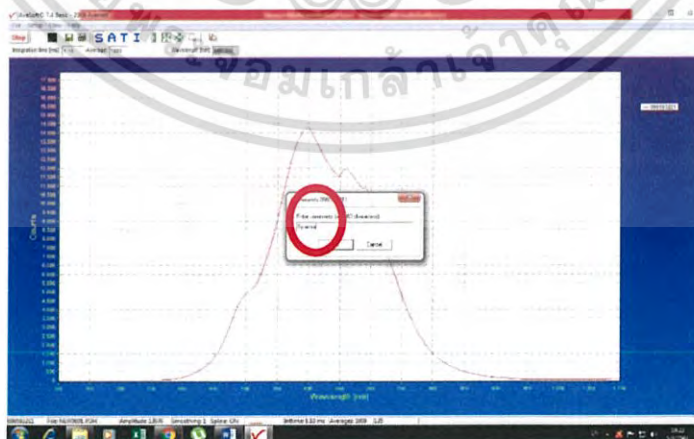
12.1 กด Stop มั่นคืออันเดียวกับ Strat



12.2 กด File > Save > Experiment

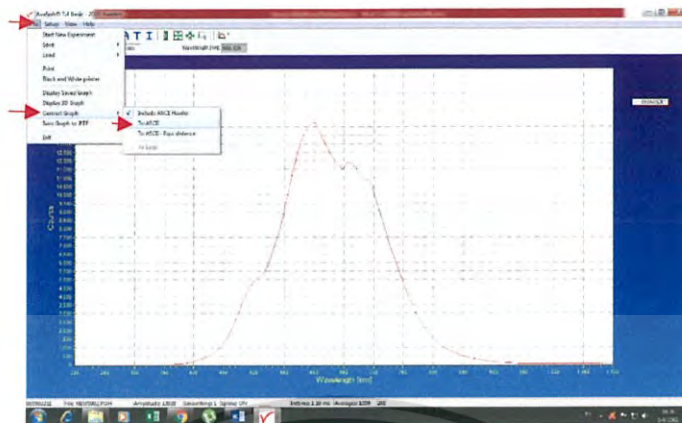


12.3 จะให้เราใส่ชื่อกราฟที่เราวัดได้ เช่น Spectra จากนั้น คลิก OK

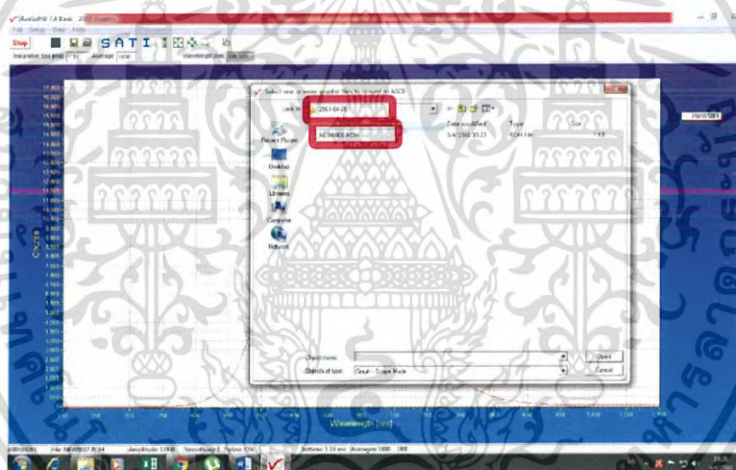


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

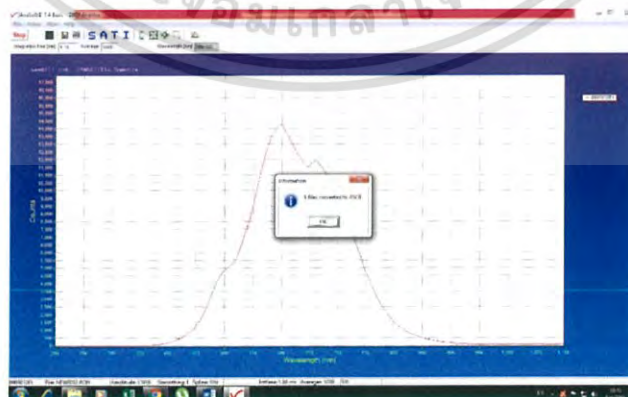
12.4 คลิก File > Convert Graph > To ASCII



12.5 จากนั้นให้ดูว่าใช้ Folder ที่เราสร้างไว้เซฟงานตั้งแต่แรกหรือไม่ ใช้ชื่องานที่เราตั้งชื่อไว้แต่แรกหรือไม่



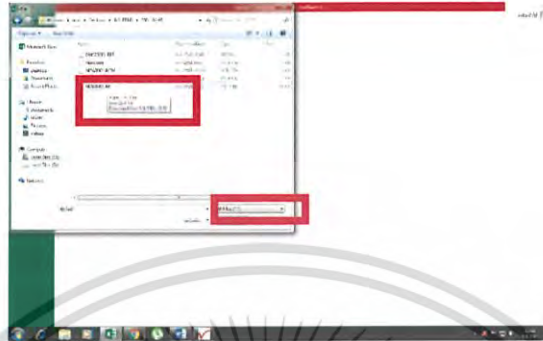
12.6 คลิกที่ไฟล์งานจะเห็นว่ามันจะขึ้นชื่อกราฟที่เราตั้งชื่อไว้ว่า Spectra จากนั้น คลิก Open แล้วกด OK



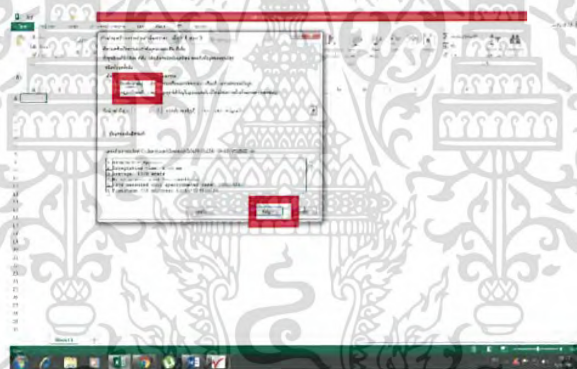
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13 การเปิดไฟล์งานใน Excel

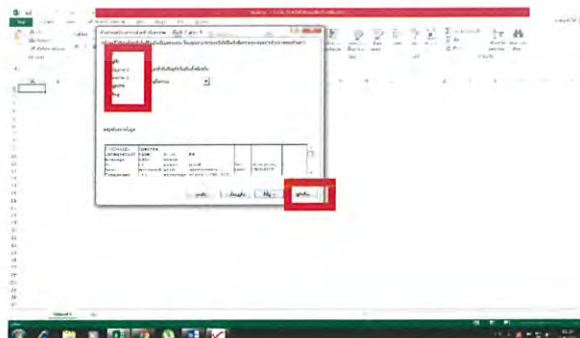
13.1 เปิดโปรแกรม Excel จากนั้นกด file > Open จากนั้นเลือก Folder ที่เราเซฟงานไว้ตั้งแต่ตอนแรก (ข้อ 1) เลือก All files จากนั้นเลือกไฟล์ที่เราเซฟไว้ ส่วนใหญ่ไฟล์จะเป็น .txt



13.2 พอเปิดไฟล์มาจะขึ้นผังรูป ให้เราเลือก มีการตั้งค่าเริ่มต้น (เลือกอันบนอันเดียว) กด ถัดไป (Next)

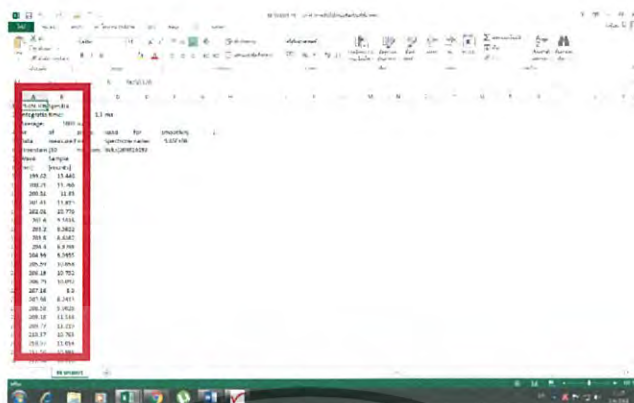


13.3 เลือกข้อมูลผังรูปภาพ จะเลือก 4 อันบน จากนั้นกดเสร็จสิ้นหรือ finish



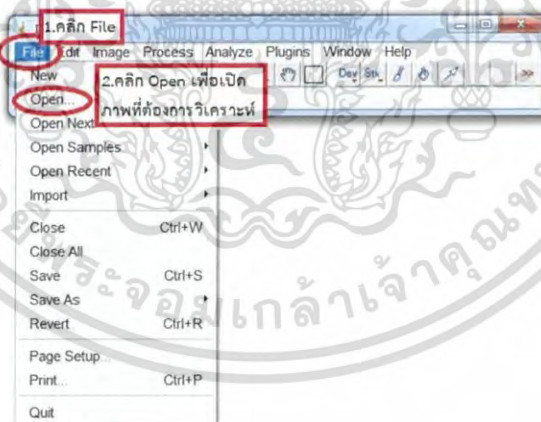
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13.4 การวัดสเปกตรัมแสงจะมี 2 คอลัมน์ ช่อง A คือค่าความยาวคลื่น ช่อง B คือ ความเข้ม



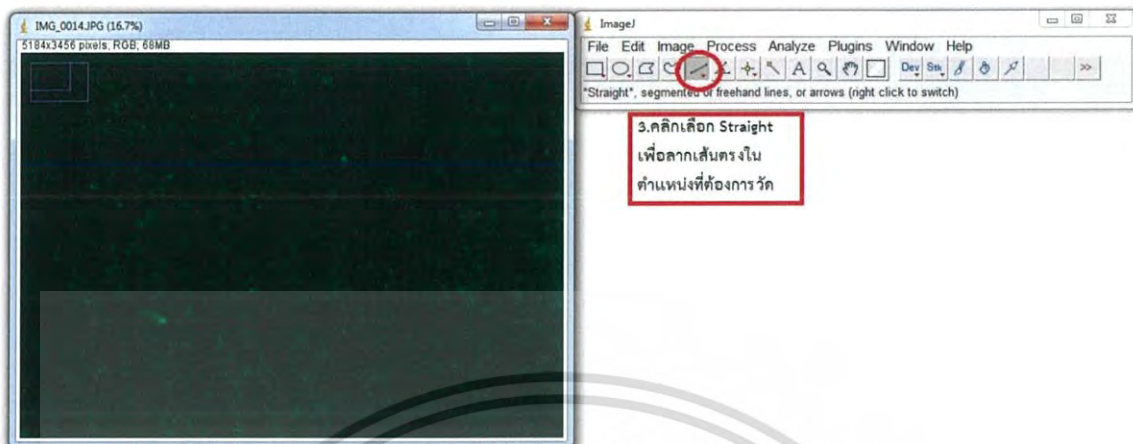
2. การใช้โปรแกรม Image J

1. เปิดโปรแกรม แล้วคลิก File
2. คลิก Open เพื่อเลือกไฟล์ภาพที่ต้องการวิเคราะห์

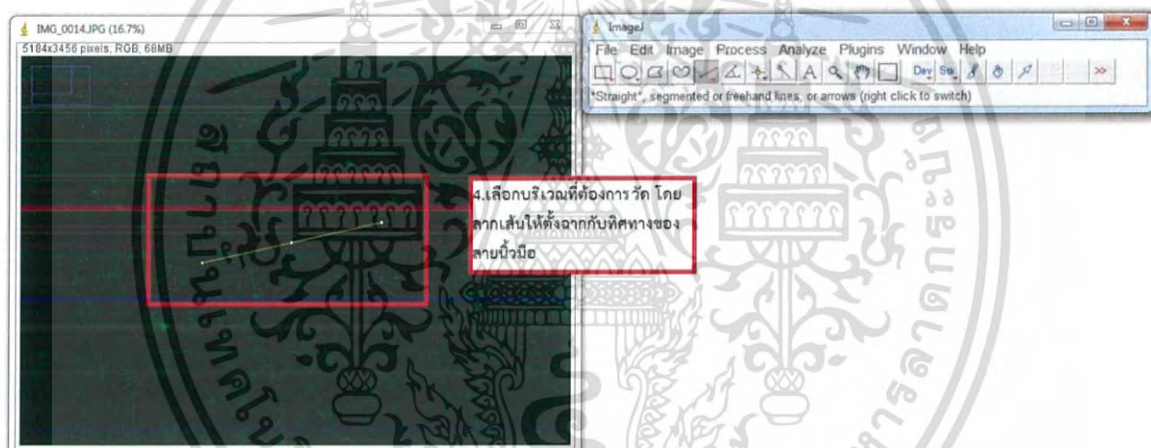


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.คลิกเลือกเมนู Straight

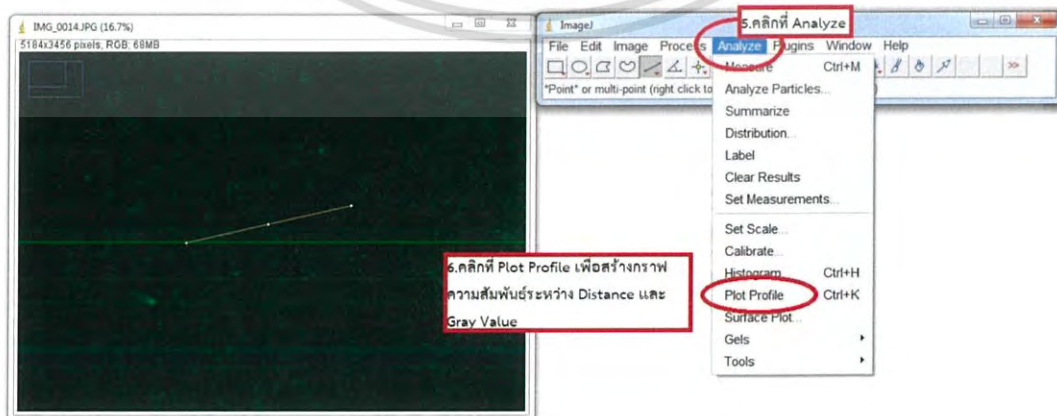


4.ลากเส้นตรงลงบนภาพในตำแหน่งที่ต้องการวิเคราะห์



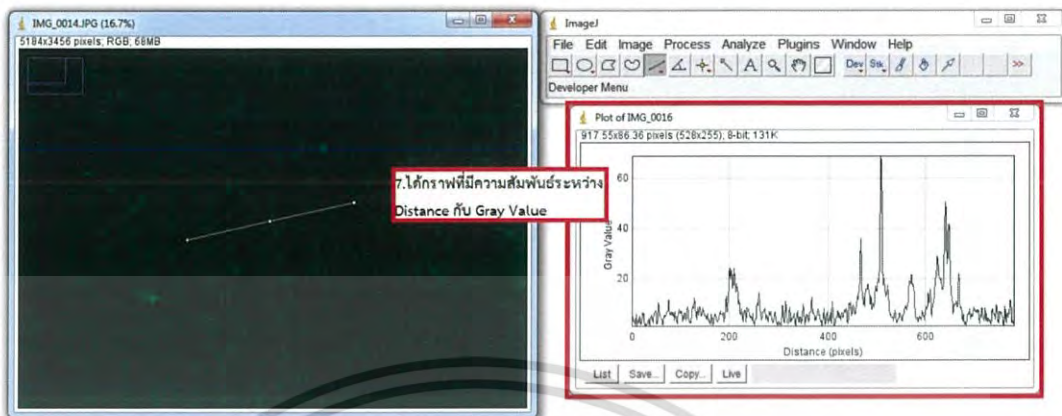
5.คลิกที่ Analyze เพื่อจะทำการวิเคราะห์

6.คลิก Plot Profile เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Distance กับ Gray Value

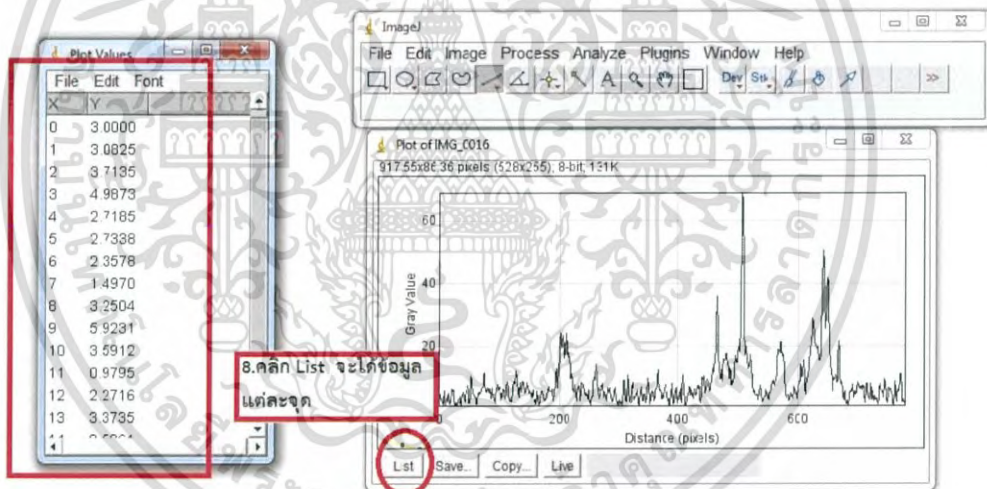


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Distance กับ Gray Value



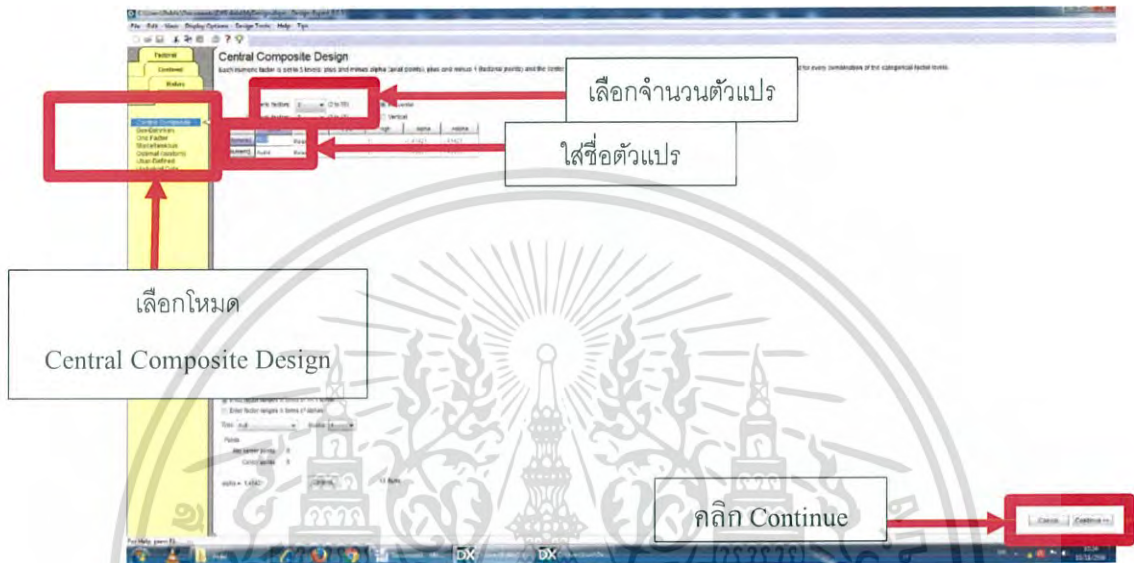
8. คลิก List จะได้ข้อมูลแต่ละจุดเพื่อนำไปอ่านค่าอย่างละเอียดอีกทีโดยใช้ Excel



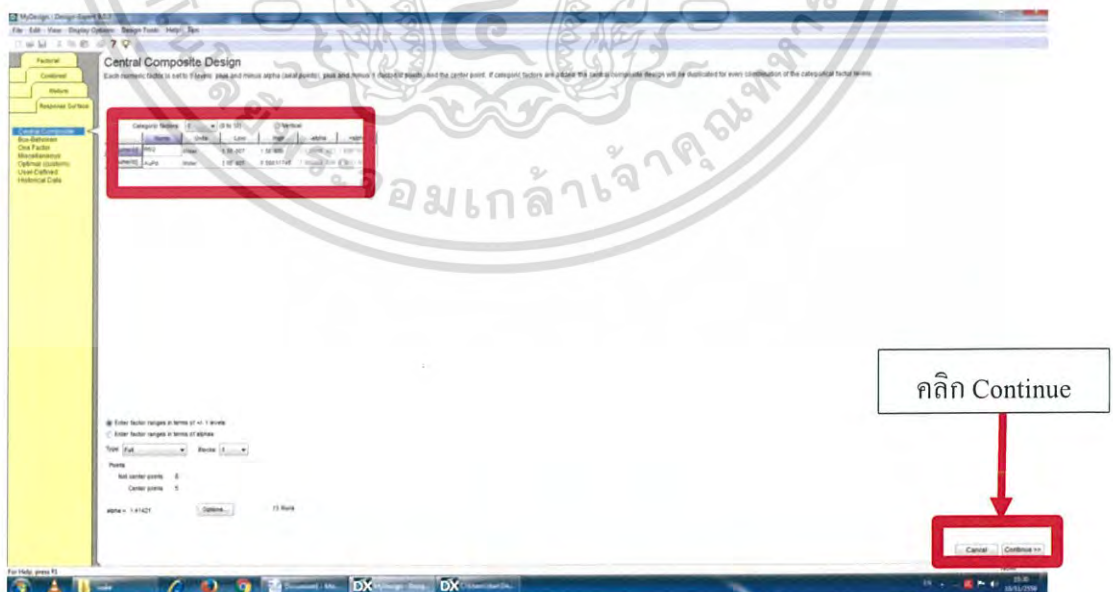
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การใช้โปรแกรม Design Expert

1. เปิดโปรแกรมเลือกโหมด Central Composite Design จากนั้นเลือกจำนวนตัวแปรต้นที่ต้องการศึกษาเช่น 2 ตัวแปรแล้วใส่ชื่อตัวแปรนั้นลงไปด้วย แล้วคลิก Continue

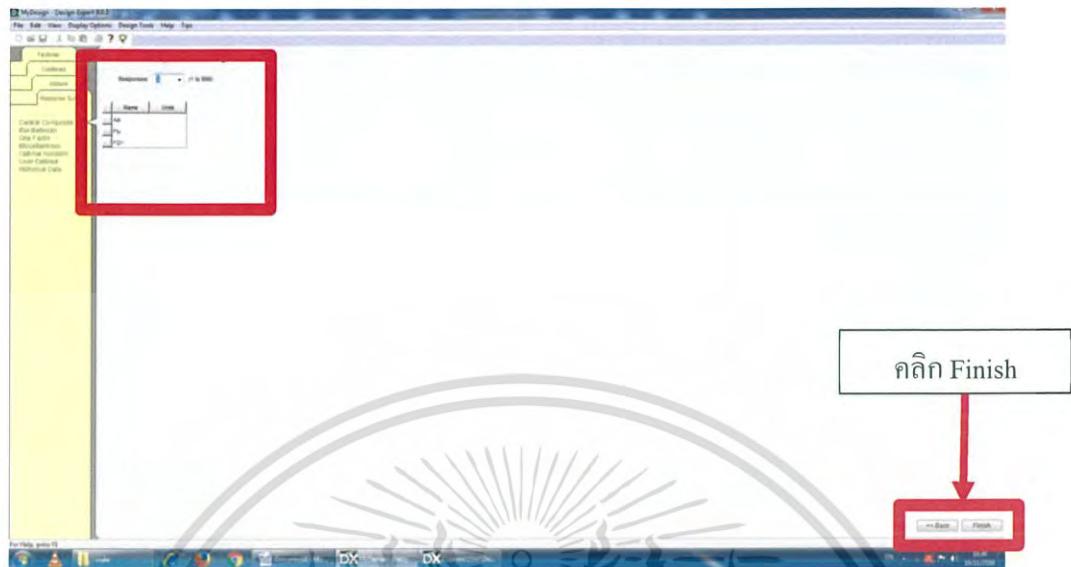


2. ใส่ตัวเลขสูงสุดต่ำสุดหรือขอบเขตที่เราต้องการศึกษาแล้วคลิก Continue

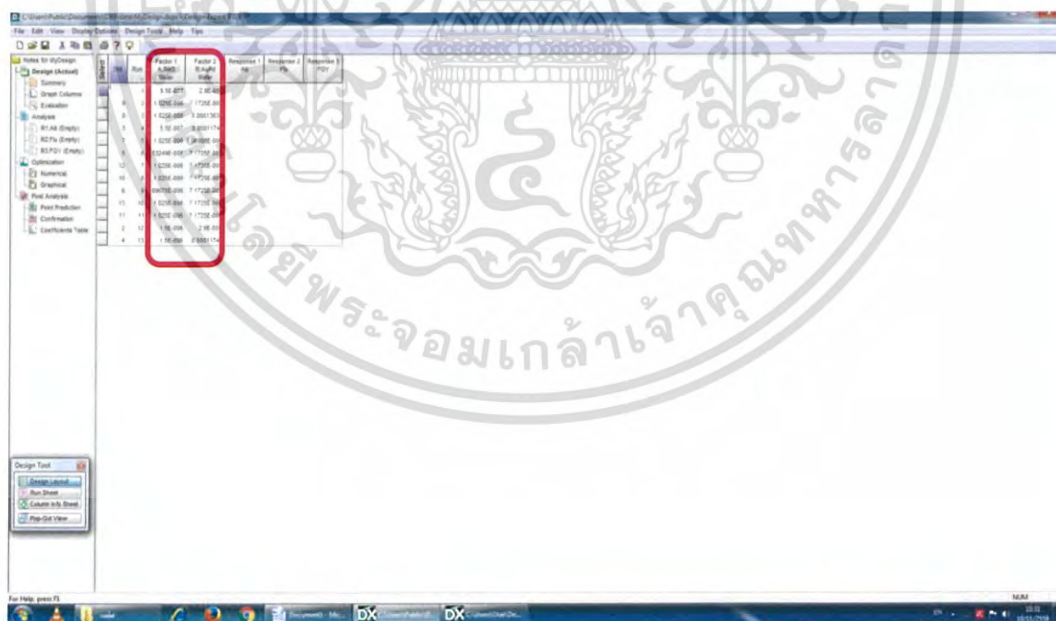


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือกจำนวนตัวแปรตามที่เราต้องการศึกษาพร้อมใส่ชื่อตัวแปรนั้นแล้วคลิก Finish

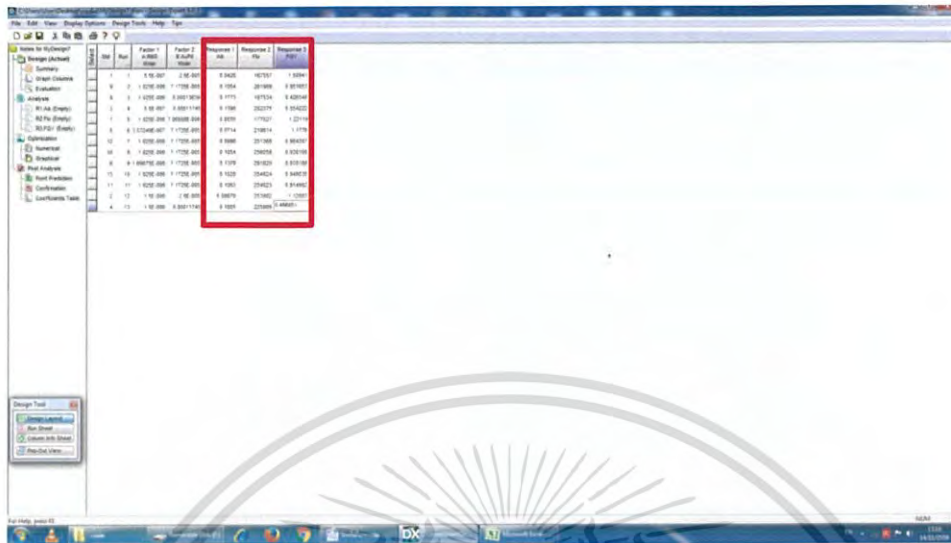


4. โปรแกรมจะออกแบบเงื่อนไขการทดลองออกมาให้ทั้งหมด เช่น 13 เงื่อนไข จากนั้นทำการทดลองตามเงื่อนไขที่ได้มา

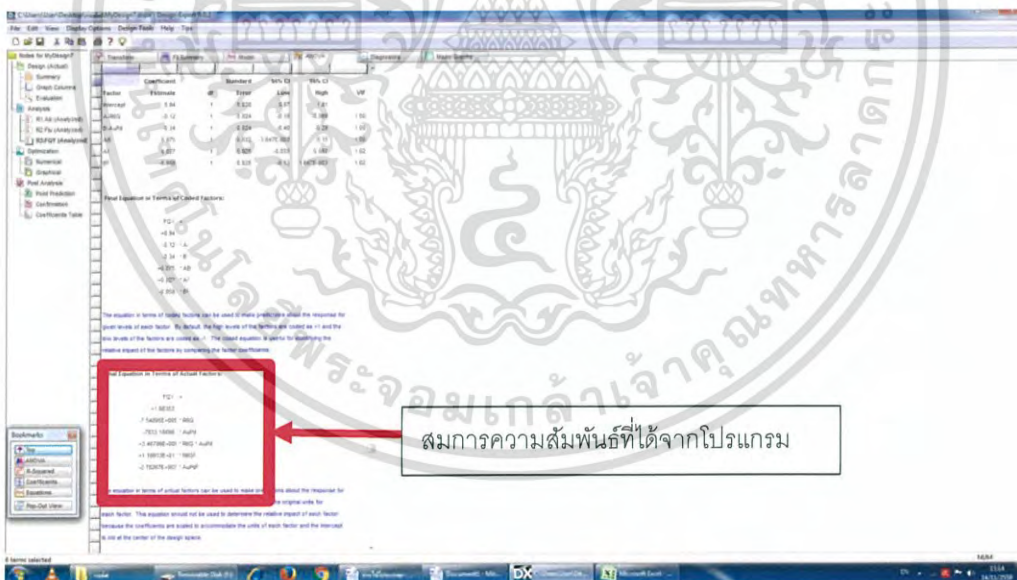


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำค่าการทดลองที่ได้จริงไปใส่ในโปรแกรม

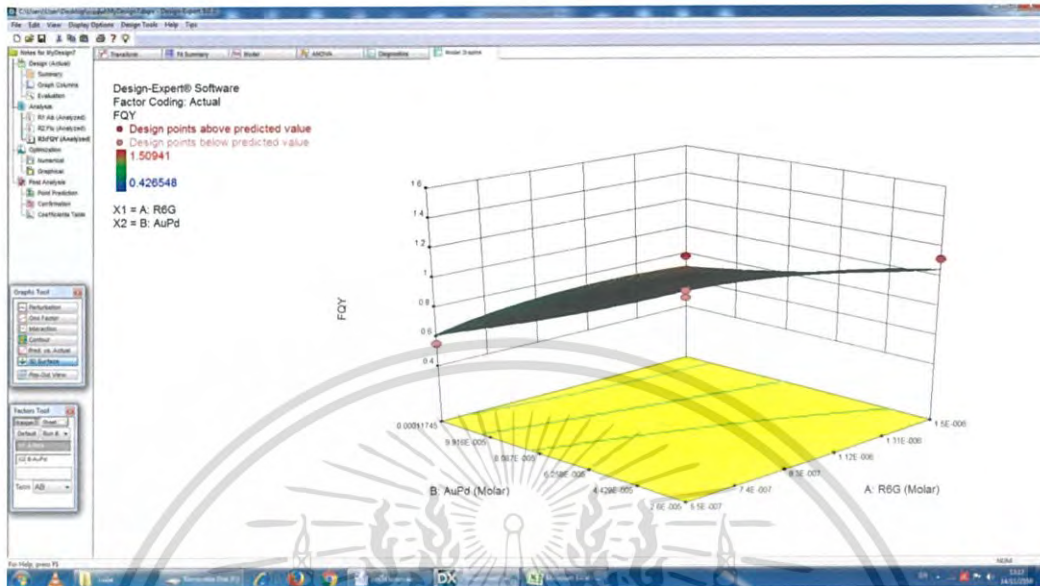


6. จากนั้น โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ผลซึ่งผลที่ได้จาก โปรแกรมมีทั้งตาราง ANOVA และ สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ในโปรแกรมสามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้เช่นกราฟสามมิติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้