ผลกระทบของการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี บนอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่มีต่อค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยีลด์

EFFECT OF RHODAMINE 6G ADSORPTION ONTO Fe_3O_4 MAGNETIC NANOPARTICLES ON FLUORESCENCE QUANTUM YIELD

สุวพิชญ์ เพิ่มพูนธัญญกิจ
SUWAPHIT PHOEMPHOONTHANYAKIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-030-068

ผลกระทบของการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี บนอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่มีต่อค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยีลด์

EFFECT OF RHODAMINE 6G ADSORPTION ONTO Fe_3O_4 MAGNETIC NANOPARTICLES ON FLUORESCENCE QUANTUM YIELD

สุวพิชญ์ เพิ่มพูนธัญญกิจ

SUWAPHIT PHOEMPHOONTHANYAKIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-030-068

EFFECT OF RHODAMINE 6G ADSORPTION ONTO Fe_3O_4 MAGNETIC NANOPARTICLES ON FLUORESCENCE QUANTUM YIELD

SUWAPHIT PHOEMPHOONTHANYAKIT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019

KMITL-2019-SC-M-030-068

COPYRIGHT 2019
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี บนอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่มีต่อค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยีลด์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสุวพิชญ์ เพิ่มพูนธัญญกิจ
รหัสประจำตัว	60605072
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ภัทรียา ดำรงศักดิ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาสมบัติทางแสงของสีย้อมโรดามีน 6จี ร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ อัตราเร็วในการปั่นกวนสาร และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี และค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมและปริมาณตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก ภายใต้เงื่อนไขไม่ฉายแสงและการฉายแสงขาวแบบต่อเนื่อง จากผลการศึกษาพบว่าอัตราเร็วที่เหมาะสมสำหรับการปั่นกวนคือ 1500 รอบต่อนาที สมดุลการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 60 นาที ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมภายใต้เงื่อนไขไม่ฉายแสงมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อใช้สารสีย้อม Rh6G ความเข้มข้น 1×10^{-6} โมลาร์ กับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เปลี่ยนแปลงในช่วง 90 - 94 เปอร์เซ็นต์ มีค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์อยู่ในช่วง 0.57 - 0.60 และประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีแนวโน้มลดลงน้อยที่สุดเมื่อใช้สารสีย้อม Rh6G ความเข้มข้น 5×10^{-6} โมลาร์ กับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เปลี่ยนแปลงในช่วง 27 - 29 เปอร์เซ็นต์ มีค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์อยู่ในช่วง 0.80 - 0.81 ผลจากการฉายแสงของสารละลายความเข้มข้นดังกล่าวพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า และค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์เปลี่ยนแปลงในช่วง 0.88 - 0.87

คำสำคัญ: อนุภาคนาโนแม่เหล็ก โรดามีน 6จี ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม ฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์

Thesis Title Effect of Rhodamine 6G Adsorption onto Fe_3O_4 Magnetic Nanoparticles on Fluorescence Quantum Yield

Student name Miss Suwaphit Phoemphoonthanyakit

Student ID 60605072

Degree Master of Science (Applied Physics)

Department Applied Physics

Year 2019

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr. Pattareeya Damrongsak

Abstract

We reported the feasibility of magnetic nanoparticles (Fe_3O_4) used as an adsorbent for the removal of rhodamine 6G dye (Rh6G) from aqueous solution. The optical properties were measured in term of absorbance and fluorescence spectroscopy by UV-Vis spectrometer. Various parameters consist of stirring speed (0 - 1500 rpm) and treatment time (0 - 150 min) were analyzed to find suitable conditions. The adsorption mechanisms of Rh6G on Fe_3O_4 determined by several parmeters such as initial concentration ($1x10^{-6}$ - $5x10^{-6}$ M) and amout of adsorbent dosage (100 – 500 mg/L) were compared with the dark condition and white lighting. The dye removal efficiency and fluorescence quantum yield (FQY) have been studied to explain the interaction of dyes. Moreover, the studies indicated the relation between dye removal efficiency and FQY. The experimental results, the optimum speed for stirring was 1500 rpm and treatment time of 60 min. Dye removal efficiency for dark condition when using Rh6G dye $1x10^{-6}$ M with Fe_3O_4 500 mg/L was 90 - 94 % and FQY ranged was obtained 0.57 - 0.60. The dye removal efficiency decreased when using Rh6G dye $5x10^{-6}$ M with the adsorbent dosage 100 mg /L range of 27 - 29 % and 0.80 - 0.81 for FQY. The results of the irradiation of the aqueous solution showed that the dye removal efficiency increased by 3 times and FQY varied in the range of 0.88 to 0.87.

Keywords: Fe_3O_4 magnetic nanoparticles, Rhodamine 6G, Dye removal efficiency, Fluorescence quantum yield

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุลวงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ภัทรียา ดำรงศักดิ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบังและเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย เสนอแนะแนวทางการแก้ปัญหาอย่างใกล้ชิด รวมถึงชี้แนวทางที่ถูกต้องในการทำงานวิจัย ตลอดจนดูแลและติดตามการทำงานของผู้จัดทำตลอดจนสำเร็จลุล่วงในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กฤษกร โล้เจริญรัตน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ ที่ให้ความรู้ในด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช และผศ.ดร.เอกรัฐ เดชศรี ภาควิชาเคมี ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีและหลอดไมโครเซนติฟิว รวมทั้ง ผศ.ดร.ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ภาควิชาฟิสิกส์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องปั่นกวนสารละลาย เพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณนายศิริชัย หุมสุข และนายมนตรี หาญโก่ย ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกคนที่ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยนี้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนพี่สาวทั้งสองคน พี่เขย และผู้ให้ความอุปการะทุกคน ที่ช่วยเหลือในทุกอย่าง ตลอดจนเป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวสุวพิชญ เพิ่มพูนธัญญกิจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3. ระเบียบวิธีวิจัย	2
1.4. ระยะเวลาดำเนินการวิจัย	3
1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)	6
2.1.1 ประเภทของการดูดซับ	6
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Factors Influencing Adsorption)	8
2.1.3 กลไกการดูดซับ	9
2.1.4 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ	10
2.1.5 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)	11
2.1.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)	13
2.2 กลไกการแปลงพลังงานของสารเรืองแสง	14
2.2.1 หลักการของโฟโต้ลูมิเนสเซนต์ (Photoluminescence)	16
2.2.1.1 กระบวนการกระตุ้น (Excitation)	16
2.2.1.2 กระบวนการลดระดับพลังงาน (Deexcitation)	17
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดแสงฟลูออเรสเซนต์	19
2.3 ฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ (Fluorescence quantum yield)	22
2.3.1 เทคนิคการวัดค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์	23
2.4 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process)	25
2.5 กระบวนการย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation)	26
2.6 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการฉายแสงในงานวิจัย	26
2.6.1 มอสเฟต	26
2.6.2 ทรานซิสเตอร์	28
2.6.3 ตัวต้านทาน	29
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	36
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	37
3.3 ระบบวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	39
3.3.1 ระบบวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย	39
3.3.2 ระบบวัดการเปล่งแสงของสารละลาย	41
3.3.3 ระบบการฉายแสงแบบต่อเนื่อง	42
3.4 การเตรียมสารละลาย	43
3.4.1 การเตรียมสารละลายสีย้อม Rh6G	43
3.4.2 การเตรียมวัสดุตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4	44
3.5 การศึกษาการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ด้วย Fe_3O_4	44
3.5.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารสีย้อม	44
3.5.2 การศึกษาผลของอัตราเร็วในการปั่นกวน	44
3.5.3 การศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับ	45
3.5.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G	45
3.5.5 การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ	46
3.5.6 การศึกษากลไกการย่อยสลายสีย้อม Rh6G โดยใช้ตัวดูดซับ Fe_3O_4 ภายใต้การใช้แสง	47
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	48
4.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลายโรดามีน 6จี	48
4.2 ผลการการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายโรดามีน 6จี	55
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ด้วย Fe_3O_4	55
4.3.1 ผลการศึกษาอัตราเร็วในการปั่นกวนสาร	55
4.3.2 การศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับ	58
4.3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G	61
4.3.4 การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ	68
4.3.5 การศึกษากลไกการย่อยสลายสีย้อม Rh6G โดยใช้ตัวดูดซับ Fe_3O_4 ภายใต้การฉายแสง	76
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	80
5.1 สรุปผลการวิจัย	80
5.1.1 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการปั่นกวนสารกับเวลา	80
5.1.2 สรุปผลการศึกษาเวลาที่มีต่อการดูดซับ	80
5.1.3 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมกับเวลา	81

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.4 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็กกับเวลา	81
5.1.5 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับเวลาภายใต้การฉายแสง	82
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
5.2.1 สภาพแวดล้อมและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	82
5.2.2 การเปรียบเทียบรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูล	83
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก	88
ภาคผนวก ก	89
ภาคผนวก ข	92
ประวัติผู้เขียน	98

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย 4
2.1 ชนิดของลูมิเนสเซนต์ประเภทต่างๆ จำแนกตามแหล่งพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้น 16
3.1 สมบัติพื้นฐานของสารเรืองแสง Rhodamine 6G 36
3.2 สมบัติพื้นฐานของอนุภาคนาโนแม่เหล็ก 37
3.3 แสดงการเตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้นต่างๆ 43
5.1 การเปรียบเทียบรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูล 83

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวและหลายชั้น	7
2.2 กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว	8
2.3 ขั้นตอนการดูดซับอนุภาคบนตัวดูดซับ	10
(ก) สารที่ถูกดูดซับแพร่ผ่านผิวของตัวดูดซับ	10
(ข) สารที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ	10
(ค) เกิดการดูดซับสารบนผิวของตัวดูดซับ	10
2.4 อัตราการดูดซับ	10
2.5 สภาวะสมดุลการดูดซับ	11
2.6 แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (ก)	14
แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นแบบหลายชั้น (ข) (ค) (ง) และ (จ)	14
2.7 ลำแสงที่ผ่านเข้าออกสารละลายความเข้มข้น C เป็นระยะทาง l	15
2.8 แผนภาพแสดงทิศทางการหมุนของอิเล็กตรอนในโมเลกุล	17
2.9 แผนภาพแสดงการดูดกลืนและการปลดปล่อยพลังงานรูปแบบต่าง ๆ	18
2.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลายโรดามีน 6จี	19
2.11 แผนภาพแสดงระดับพลังงานอธิบายการเกิดปรากฏการณ Fluorescence resonance energy transfer	20
2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของการฟลูออเรสเซนต์กับความเข้มข้นของสาร	22
2.13 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน	23
2.14 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันดชัน	25
2.15 แสดงปฏิกิริยาโฟโตดีเกรเดชัน	26
2.16 แสดงส่วนประกอบของมอสเฟส	27
2.17 แสดงสัญลักษณ์มอสเฟส P-channel F9540N	28
2.18 แสดงสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ประเภท NPN และ PNP ตามลำดับ	28
2.19 แสดงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาช่วยในการทำงานของหลอดไดโอดเปล่งแสง	29
2.20 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับสีย้อมโรดามีนบีโดยใช้ Belpatra Bark Charcoal	30
2.21 ผลของระยะเวลาสัมผัสและความเข้มข้นของสีย้อมโรดามีนบีเริ่มต้นโดยใช้ Belpatra Bark Charcoal (BBC)	31
2.22 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลบลูหลังจากเติม BPF ที่เวลาต่างๆ	31
2.23 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมลงบน PKSAC, Fe_3O_4 และ PKSAC-Fe_3O_4	32
2.24 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการกำจัดสีย้อมเมทิลบลูเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	33
2.25 ผลของเวลากวนและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในช่วง 10 ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	34
2.26 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการกำจัดสีย้อม	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 (ก) แสดงพีคการดูดกลืนแสงของโรดามีน 6จี (Rh6G) และโรดามีนบี (RhB)	35
(ข) แสดงพีคการเปลงแสงของโรดามีน 6จี (Rh6G) และโรดามีนบี (RhB)	35
3.1 โครงสร้างของสารเรืองแสง Rhodamine	36
3.2 อนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4	37
3.3 กราฟแสดงสเปคตรัมของแสงสีขาวที่ความเข้มแสง 50 ลักซ์	38
3.4 ระบบวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย (ก) ภาพจริง (ข) แผนภาพระบบวัด	40
3.5 ระบบวัดการเปล่งแสงของสารละลาย (ก) ภาพจริง (ข) แผนภาพระบบวัด	41
3.6 แสดงระบบการฉายแสงขาวแบบต่อเนื่อง (ก) แผนภาพจริง	42
แสดงระบบการฉายแสงขาวแบบต่อเนื่อง (ข) แผนภาพจำลอง	43
4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสีย้อม Rh6G ช่วง $1x10^{-7}$ ถึง $1x10^{-3}$ โมลาร์	47
4.2 พีคการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารสีย้อม Rh6G ช่วง $1x10^{-7}$ ถึง $1x10^{-3}$ โมลาร์	48
4.3 (ก) ถึง (ค) แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสีย้อม Rh6G ที่ความเข้มข้นในช่วง $1x10^{-6}$ ถึง $5x10^{-6}$ โมลาร์	49
4.4 (ก) ถึง (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสาร Rh6G ที่ความเข้มข้นในช่วง $1x10^{-6}$ ถึง $5x10^{-6}$ โมลาร์	51
4.5 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารสีย้อม Rh6G ที่ความเข้มข้น $1x10^{-6}$ ถึง $5x10^{-6}$ โมลาร์	52
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการเปล่งแสงของสารสีย้อม Rh6G ที่ความเข้มข้น $1x10^{-6}$ ถึง $5x10^{-6}$ โมลาร์	53
4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย	55
(ก) ไม่ปั่นกวนสารละลาย	55
(ข) ปั่นกวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 1200 รอบต่อนาที	55
(ค) ปั่นกวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 1500 รอบต่อนาที	55
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีคการดูดกลืนแสงกับอัตราเร็วในการปั่นกวนสารละลาย	56
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลา เมื่อใช้อัตราเร็วในการปั่นกวนที่แตกต่างกัน	57
4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ที่ $5x10^{-6}$ โมลต่อลิตร ผสมกับ Fe_3O_4	58
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีคการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ความเข้มข้น $5x10^{-6}$ โมลต่อลิตร ผสมกับ Fe_3O_4	59
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของสารละลาย Rh6G ความเข้มข้น $5x10^{-6}$ โมลต่อลิตร ผสมกับ Fe_3O_4	60
4.13 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้นต่างๆ	61
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสีย้อมกับเวลา	63
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารละลาย Rh6G ความเข้มข้นต่าง ๆ	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม 66

4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของปริมาณตัวดูดซับ 68

4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์เมื่อเติมตัวดูดซับที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 70

4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Rh6G กับเวลาภายใต้การฉายแสงขาวและไม่ฉายแสง 71

4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารละลาย Rh6G กับเวลาภายใต้การฉายแสงขาวและไม่ฉายแสง 72

4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารละลาย Rh6G ภายใต้การฉายแสงขาวและไม่ฉายแสง 73

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันแหล่งอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมฟอกย้อม ต่างให้ความสำคัญกับการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากน้ำเสียก่อให้เกิดมลพิษและเป็นแหล่งแพร่ระบาดของเชื้อโรค อีกทั้งกลิ่นหรือสีของน้ำเสียยังก่อให้เกิดความเดือดร้อนรำคาญ การบำบัดน้ำเสียจึงเป็นการช่วยรักษาแหล่งน้ำและยังสามารถนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ได้อีก [1] สีย้อม (Dye) เป็นสารอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อให้ดูดกลืนหรือดูดซับแสงของวัตถุเพื่อที่จะทำให้วัตถุนั้นมีสี ซึ่งสีย้อมแต่ละประเภทจะมีความทนทานต่างกันขึ้นกับชนิดของสีย้อมและพันธะในการยึดติดกับวัตถุนั้น ๆ [2 - 3] สีย้อมส่วนใหญ่ถูกพัฒนาให้มีความคงทนสูงและไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ จึงเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปัญหาในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม [4] โรดามีนเป็นสีย้อมในกลุ่มอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ถูกใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นการลดลงของสีย้อมโรดามีน 6จี (Rh6G) ในน้ำทิ้งจึงความจำเป็นกับสิ่งแวดล้อมเช่นกัน

โดยทั่วไปการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมทำได้หลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ได้แก่ การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) เป็นกระบวนการกำจัดสีย้อมโดยการเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อแยกสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กออกจากน้ำเสีย แต่ในกระบวนการบำบัดจะมีกากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมากซึ่งยุ่งยากในการนำไปกำจัด [5] การใช้โอโซน (Ozonation) เกิดจากการที่โอโซนทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์กับโมเลกุลของสีย้อม มีข้อดีคือสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมากได้และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย แต่ในการออกซิไดซ์อาจได้สารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ [6] กระบวนการออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation - Reduction) เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสีให้อยู่ในรูปที่มองไม่เห็นสี ใช้พื้นที่ในการบำบัดน้อย ไม่มีกากตะกอนเกิดขึ้นและมีราคาถูก แต่มีข้อเสียคือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษเมื่อใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซ์ [7] และกระบวนการดูดซับ (Absorption process) เป็นการแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากสารละลายโดยการเกาะติดบนพื้นผิวของของแข็งหรือตัวดูดซับ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงและสามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ [8] ตัวอย่างวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับ เช่น การใช้ถ่าน เนื่องจากมีพื้นผิวในการดูดซับมาก แต่การนำกลับมาใช้ใหม่ต้องฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาด้วยความร้อนสูงและมีค่าใช้จ่ายสูง [9] การใช้หินดินดาน เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้หลักการแบบธรรมชาติจึงประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้า แต่การใช้งานต้องเลือกใช้พื้นที่ให้เหมาะสม [10] การใช้ซีเรียมออกไซด์ – โคบอลต์เฟอร์ไรต์ (CeO_2-$CoFe_2O_4$) เพื่อใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาการสลายสีย้อมด้วยแสง มีข้อดีคือมีความเสถียรทางความร้อนและทางเคมีสูง แต่กระบวนการเตรียมโคบอลต์เฟอร์ไรต์มีหลายขั้นตอนและใช้เวลานาน [11]

การใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็ก (Magnetic Nanoparticles) ในการบำบัดน้ำเสียได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมากได้ในระยะเวลาอันสั้น ง่ายต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอก (External magnet) สามารถเก็บรักษาได้นาน (long-term preservation) อีกทั้งขนาดของอนุภาคที่เล็กในระดับนาโนของอนุภาคเหล็กออกไซด์ทำให้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงจึงนิยมนำมาใช้ในการดูดซับสีย้อม [12] มีงานวิจัยจำนวนมากได้ประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็กในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม เช่น การเตรียมอนุภาคนาโน Fe_3O_4 ในการกำจัดเมทิลีนบลูผ่านการดูดซับ [13] การกำจัดสีย้อม Rhodamine B ด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกเมล็ดในปาล์มและเคลือบด้วยอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ [14] พารามิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการดูดซับโครเมียม (III) ลงบนอนุภาคนาโนแม่เหล็กเหล็กออกไซด์ [15] การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในกระบวนการเฟนตัน [16] และการประยุกต์ใช้ $Ba_3(PO_4)_2/Fe_3O_4$ เป็นตัวดูดซับแม่เหล็กชนิดใหม่ที่ใช้กำจัดเมธิลบลูจากสารละลายในน้ำ [17]

ในการวิเคราะห์การปนเปื้อนของสีย้อมในน้ำโดยส่วนใหญ่จะทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อนำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการลดลงของสีย้อม (%Dye removal) ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงนั้นจะเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณสีย้อมที่ลดลงในน้ำ โดยปริมาณสีย้อมที่ลดลงนั้นเป็นผลมากจากการที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับ แต่เนื่องจากการดูดกลืนแสงที่ลดลงจะสัมพันธ์กับปริมาณแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากโมเลกุลของสีย้อมด้วย ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ผลของการลดลงของสีย้อมออกมาเป็นค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ (Fluorescence quantum yield) ได้ ในงานวิจัยนี้เราจึงสนใจวัดความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมาว่าส่งผลต่อค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์อย่างไร โดยทำการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลายและนำค่าที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์ฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ เพื่อพิจารณาหาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการลดลงของสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อใช้วิธีการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มที่ลดลงของสีย้อมที่แตกต่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติการทางแสง ได้แก่ สมบัติการดูดกลืนแสง และสมบัติการเปล่งแสง

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ ได้แก่ อัตราเร็วในการปั่นกวนสาร เวลา ความเข้มข้นของสารสีย้อม ปริมาณตัวดูดซับ และแสง

1.2.3 เพื่อศึกษากลไกการย่อยสลายสีย้อมภายใต้การฉายแสงขาวและไม่ฉายแสง

1.2.4 เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการลดลงของสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์

1.3. ระเบียบวิธีวิจัย

1.3.1 ศึกษาค้นคว้า ทบทวนบทความวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางแสงของกระบวนการดูดซับสีย้อม

1.3.2 จัดเตรียมสารละลายสีย้อม Rh6G และอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

จากนั้นทำการทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมการเปล่งแสง และค่าดัชนีหักเหแสงของสารละลายจากกระบวนการดูดซับสีย้อม

1.3.3 วิเคราะห์ผลสเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมการเปล่งแสง เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการลดลงของสีย้อมและค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์

1.3.4 วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการลดลงของสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์

1.4. ระยะเวลาดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัย มีรายละเอียดดังตารางที่ 1.1 ดังนี้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย 1 ปี

กิจกรรม	2561				2562		
	มิ.ย. - ก.ค.	ส.ค. - ก.ย.	ต.ค. - พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค. - ก.พ.	มี.ค. - เม.ย.	พ.ค. - มิ.ย.
1. กำหนดเค้าโครงวิทยานิพนธ์พร้อมแลกเปลี่ยนข้อคิดเห็น							
2. ค้นคว้าในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางแสง ได้แก่ สมบัติการดูดกลืนแสง สมบัติการเปล่งแสง และสมบัติค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ ของการดูดซับของสีย้อม							
3. จัดเตรียมสารละลายสีย้อม Rh6G และสารแขวนลอยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้นต่างๆ จากนั้นทำการทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมการเปล่งแสง และวัดค่าดัชนีหักเหแสง จากกระบวนการดูดซับสีย้อมที่เวลาต่างๆ							
4. เสนอหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์							
5. วิเคราะห์ผลสเปกตรัม เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการลดลงของสีย้อมและค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ที่เวลาต่างๆ							
6. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการลดลงของสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ที่เวลาต่างๆ							
7. เผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการ							
8. เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์							
9. สอบวิทยานิพนธ์							

1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้รับองค์ความรู้ใหม่ในการศึกษาผลกระทบของกระบวนการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี เมื่อใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 เป็นตัวดูดซับ จากการวิเคราะห์ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารละลาย

1.5.2 ได้รับความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการลดลงของสีย้อม RH6G กับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารละลาย จากกระบวนการดูดซับสีย้อม

1.5.3 สามารถนำผลจากการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับสารสีย้อมอื่นๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อวิเคราะห์หาค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารละลาย จากกระบวนการดูดซับสีย้อม

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง โดยมีเนื้อหาแบ่งออกเป็น 7 หัวข้อหลัก ดังนี้

1. กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)
2. กลไกการแปลงพลังงานของสารเรืองแสง
3. ฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ (Fluorescence quantum yield)
4. กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process)
5. กระบวนการย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation)
6. วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการฉายแสงในงานวิจัย
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะติดของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent)

การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่าง ๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง โดยสารที่ทำหน้าที่ในการดูดซับมีหลายประเภท เช่น สารอนินทรีย์ สารอินทรีย์สังเคราะห์ ถ่านกัมมันต์ วัสดุชีวภาพ และสารดูดซับชีวภาพ

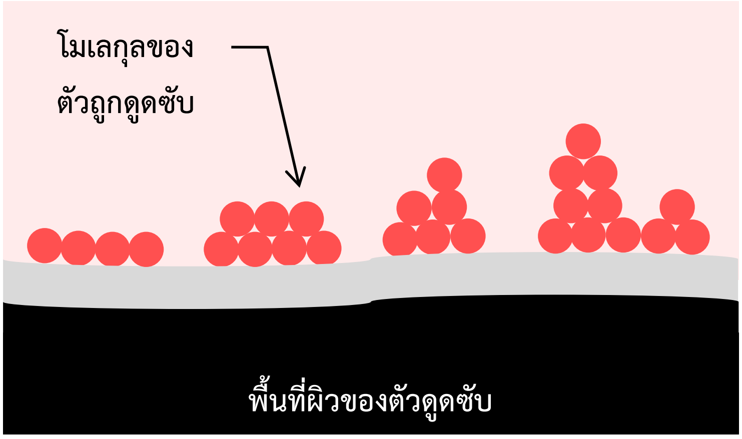
โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid –Solid Interface) ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยจะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนวัสดุดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของวัสดุดูดซับและมีเพียงบางส่วนเกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาวัสดุดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับวัสดุดูดซับ

2.1.1 ประเภทของการดูดซับ [18]

เมื่อจำแนกการดูดซับตามแรงกระทำ (interaction forces) ระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) จะเกิดแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับเรียกว่า แรงแวน-เดอร์วาวส์ (Van der waals force) แต่

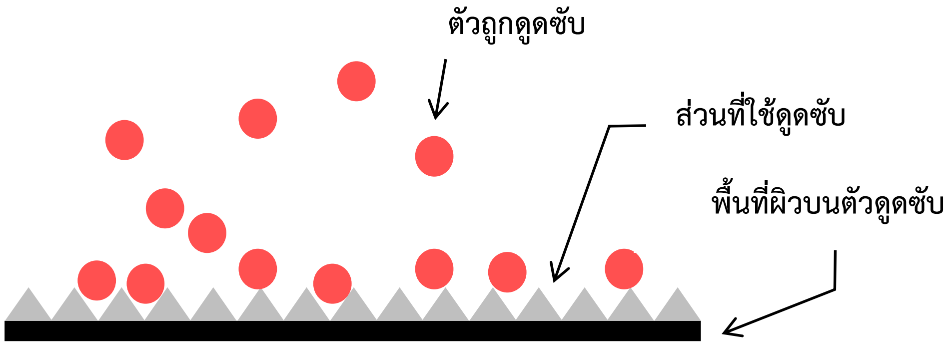
ถ้าหากโมเลกุลของสารถูกดูดซับนั้นถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวภายในของสารดูดซับด้วยพันธะเคมี จะจัดเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemical sorption) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) เนื่องจากแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล เกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่ายจึงสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) ดังรูปที่ 2.1 หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวและหลายชั้น

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50 - 400 กิโลจูลต่อโมล ดังนั้นการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจึงทำได้ยากและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) การดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ดังรูปที่ 2.2 และเมื่อถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการคายออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับอีก



รูปที่ 2.2 กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Factors Influencing Adsorption) [18]

ในขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกไปจากน้ำจะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งโมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะติดอยู่ในโพรงและผิวของตัวดูดซับ โดยการถ่ายเทโมเลกุลของสารจากน้ำไปยังตัวดูดซับจะเกิดขึ้นจนถึงสภาวะสมดุล ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับมีดังนี้

1) ความสามารถในการละลายของสารที่ถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนผิวของของแข็งที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ โดยสารที่ละลายน้ำหรือแตกตัวเป็นไอออนได้ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำมากจึงไม่ค่อยเกิดการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย มักเกาะติดบนผิวของวัสดุดูดซับได้ดีกว่า แต่ก็ไม่ได้เกิดขึ้นในทุกกรณีเพราะยังมีสารที่มีความสามารถในการละลายได้น้อยหลายชนิดที่ไม่เกาะบนผิวของวัสดุดูดซับ

2) ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ

ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ โดยการดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของวัสดุดูดซับเล็กน้อยหรือขนาดของโมเลกุลเข้าโพรงได้พอดี เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างวัสดุดูดซับและสารถูกดูดซับมีค่าดังนั้นโมเลกุลของสารขนาดเล็กหลุดเข้าไปในโพรงก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงจะหลุดเข้าไปได้

3) ขนาดและพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ

ขนาดของวัสดุดูดซับจะผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ โดยวัสดุดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราเร็วการดูดซับสูง ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ นั่นคือสารที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุล ได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อย ซึ่งการเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมีหลายวิธีเช่น การ กระตุ้นด้วยสารเคมี หรือการใช้ความร้อน

4) การปั่นกวน

อัตราเร็วของการดูดซับ ขึ้นอยู่กับการส่งผ่านในโมเลกุลของวัสดุดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบวัสดุดูดซับ หรือการแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างซึ่งขึ้นอยู่กับการปั่นกวนสาร ถ้าน้ำมีอัตราเร็วในการปั่นกวนต่ำ ส่งผลให้

ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบวัสดุดูดซับจะมีความหนามาก เนื่องจากไม่ถูกรบกวนและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาวัสดุดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของสารถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบวัสดุดูดซับได้ช้า ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำถูกปั่นกวนด้วยอัตราเร็วสูง ทำให้ไม่เกิดชั้นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าหาวัสดุดูดซับได้เร็วกว่า กรณีนี้การแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ดังนั้นถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้นเนื่องจากมีการปั่นกวนที่สูงขึ้น

5) ระยะเวลา

ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุล ณ สภาวะสมดุล อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายออกมา ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุดจากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

6) อุณหภูมิของสารละลาย

การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยา นอกจากนั้นอุณหภูมิจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับโดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

7) ค่า pH ของสารละลาย

ค่า pH ของสารละลายมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลต่อการดูดติดผิว และความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลต่าง ๆ

2.1.3 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับหรือการเกาะของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับประกอบด้วย 3 ขั้นตอน แสดงดังในรูป 2.3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับ

2) การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่รูพรุนหรือช่องวางภายในของตัวดูดซับ

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) เป็นกลไกที่ เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับพื้นผิวภายช่องว่างของตัวดูดซับ

รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการดูดซับอนุภาคบนตัวดูดซับ (ก) สารที่ถูกดูดซับแพร่ผ่านผิวของตัวดูดซับ (ข) สารที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ และ (ค) เกิดการดูดซับสารบนผิว ของตัวดูดซับ

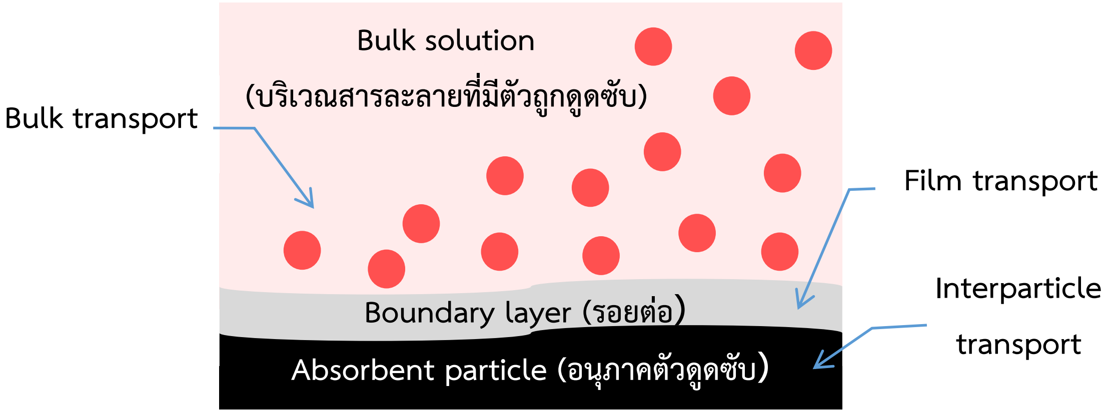
2.1.4 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญต่อกระบวนการดูดซับ เนื่องจากอัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นได้เร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว โดยอัตราการดูดซับถูกกำหนดด้วยขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด อัตราการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.4 โดยแต่ละขึ้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

1) การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบาง ๆ หรือผิวสัมผัสที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่ตัวถูกดูดซับแพรผ่านชั้นฟิล์มไปยังผิวของตัวดูดซับ

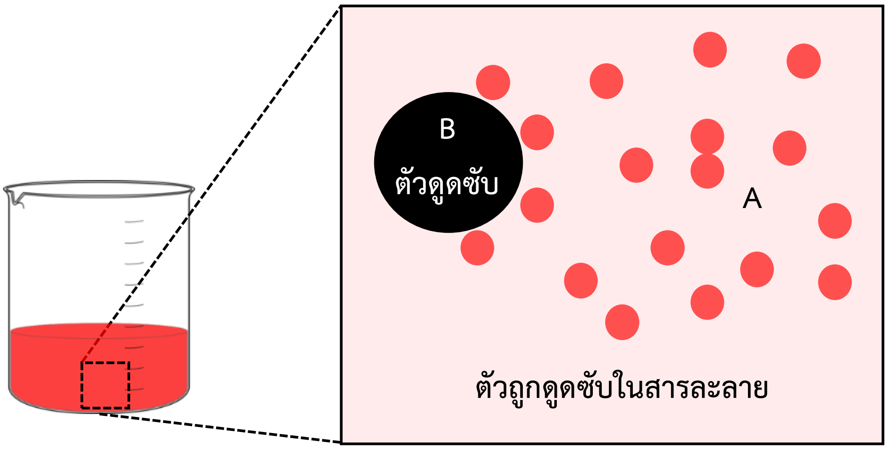
3) การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) โดยขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ



รูปที่ 2.4 อัตราการดูดซับ

2.1.5 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของมวลสาร จากรูปที่ 2.5 เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลาย ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนจะเกาะกับพื้นผิวของตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปพบว่าจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา (Desorption) ซึ่งอัตราการคายออกมาจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปเรื่อยๆ จนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายออกมา ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล [18]



รูปที่ 2.5 สภาวะสมดุลการดูดซับ

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น C_0 ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ

กระบวนการดูดซับ

$$A + B \xrightarrow{+k_1} A \cdot B \tag{2.1}$$

เมื่อ A คือ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลาร์ ในสารละลาย

B คือ โมเลกุลของตัวดูดซับ

$A \cdot B$ คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับ

เมื่อระยะเวลาผ่านไปจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น

$$r_1 = k_1[\mathrm{c}](1-q) \tag{2.2}$$

เมื่อ r_1 คือ อัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และแปรตามสัดส่วนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

c คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (โมลาร์)

$(1-q)$ คือ สัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ

ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4) อัตราการคายออกจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ

กระบวนการคาย

$$A \cdot B \xrightarrow{-k_2} A + B \tag{2.3}$$

$$r_2 = k_2(\mathrm{q}) \tag{2.4}$$

เมื่อ r_2 คือ อัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 คือ ค่าคงที่อัตราการคาย

q คือ สัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล

$$r_1 = r_2 \tag{2.5}$$

เมื่อนำสมการที่ (2.2) และ (2.4) มาแทนค่าในสมการที่ (2.5) จะได้สมการของการดูดซับ ณ สภาวะสมดุล

$$k_1[\mathrm{C}](1-\mathrm{q}) = k_2 q \tag{2.6}$$

$$\frac{q}{(1-q)} = \frac{k_1}{k_2}[\mathrm{C}] = \mathrm{K}[\mathrm{C}] \tag{2.7}$$

$$q = \frac{K[C]}{1+K[C]} \tag{2.8}$$

โดยที่ลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ (2.9) และมีค่าคงที่สมดุลการดูดซับแสดงดังสมการที่ (2.10)

$$A + B \rightleftharpoons A \cdot B \tag{2.9}$$

$$K = \frac{q}{C} \tag{2.10}$$

ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับ (q_e) และประสิทธิภาพการลดลงของสีย้อม (Dye concentration removal efficiency, %Dye) เป็นดังสมการ (2.11) และ (2.12) [20]

$$q_e = \frac{(\mathrm{C}_0 - \mathrm{C})\,\mathrm{V}}{W} \tag{2.11}$$

$$\%\ dye\ removal = \frac{(\mathrm{C}_0 - \mathrm{C})}{\mathrm{C}_0} \times 100\% \tag{2.12}$$

เมื่อ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/L)

V คือ ปริมาตรของสารผสม (L)

C_0 คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่เวลาเริ่มต้น (mg/L)

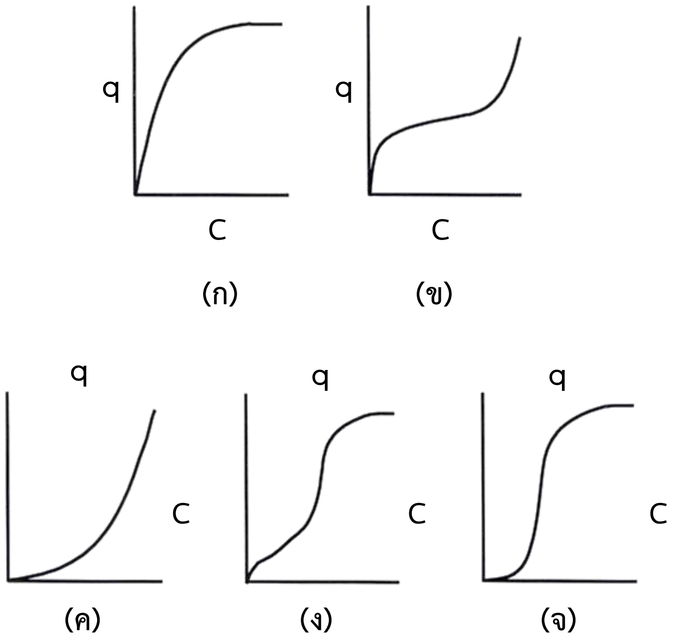
C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ ภาวะสมดุล (mg/L)

W คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

การดูดซับทางกายภาพเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจึงต้องคำนึงถึงความดัน อุณหภูมิ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ชนิดของสารถูกดูดซับและสารดูดซับด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่

2.1.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ แสดงได้จากเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) โดยกราฟรูปแบบพื้นฐานไอโซเทอร์มของการดูดซับ มีหลายแบบขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ชนิดสารที่ถูกดูดซับ และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวของสารดูดซับ แสดงดังรูป 2.6 และในการวิเคราะห์การดูดซับที่นิยมใช้กันมากคือวิธีของ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm



รูปที่ 2.6 แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (ก) และไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นแบบหลายชั้น (ข) (ค) (ง) และ (จ)

2.2 กลไกการแปลงพลังงานของสารเรืองแสง

การตรวจวัดความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์เป็นเทคนิคที่รู้จักกันดีในการใช้หาปริมาณสาร เช่น การตรวจวัดไอออนโลหะหนัก (อาเซนิก ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม) เป็นต้น และเป็นเทคนิคที่มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ มีความจำเพาะสูง (High specificity) เนื่องจากสารประกอบฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescence compound) แต่ละชนิดจะเปล่งแสงออกมามีลักษณะคงที่ที่แต่ละความยาวคลื่นของแสงตกกระทบ นำมาใช้ในการจำแนกชนิด (Identify) สารตัวอย่างได้ เนื่องจากมีความไวในการวิเคราะห์สูง (High sensitivity) สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างปริมาณน้อยได้ดี วิธีการวิเคราะห์ส่วนใหญ่ทำได้ง่ายและรวดเร็ว สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ทั้งในด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม ด้านสิ่งแวดล้อม และด้านเทคโนโลยีชีวภาพ เนื่องจากมีช่วงของการวิเคราะห์กว้าง [19]

กลไกหลักในการแปลงพลังงานของสารเรืองแสงประกอบด้วย 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการดูดกลืนแสง (Absorption) และกระบวนการในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนต์ (Luminescence) ของสารเรืองแสง

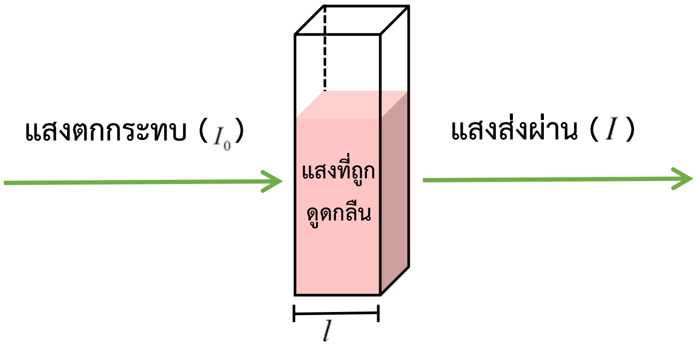
1) กระบวนการดูดกลืนแสง (Absorbance)

กระบวนการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นเมื่อลำแสงตกกระทบผิวหน้าของคิวเวทท์ ลำแสงเหล่านั้นจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารเรืองแสงผ่านเข้าไปในสารละลาย (Incident light: I_0) แล้ววัดปริมาณแสงที่เหลือผ่านออกมา (I) โดยไม่ได้คำนึงผลของแสงรบกวน (Stray light) [20] ปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืน

เข้าไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางที่แสงเดินทางผ่านคิวเวทท์ (l) และความเข้มข้นของสารเรืองแสง (C) ดังสมการความสัมพันธ์ของเบียร - แลมเบิรท (Beer-Lambert) คือ

$$A(\lambda) = \log\left(\frac{I_0(\lambda)}{\mathrm{I}(\lambda)}\right) = \varepsilon(\lambda)\mathrm{lC} \tag{2.13}$$

เมื่อ	A	คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย
	ε	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสารละลาย (L.mol^{-1}.cm^{-1}) ซึ่งเป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของสารและความยาวคลื่น
	l	คือ ระยะทางที่แสงเดินทางผ่านวัสดุ ซึ่งในที่นี้คือความหนาของคิวเวทท์ (cm)
	C	คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลาร์)
	I_0	คือ ปริมาณแสงที่ผ่านเข้าไปในคิวเวทท์
	I	คือ ปริมาณแสงที่ผ่านออกจากคิวเวทท์



รูปที่ 2.7 ลำแสงที่ผ่านเข้าออกสารละลายความเข้มข้น C เป็นระยะทาง l

2) กระบวนการปลดปล่อยแสง (Luminescence)

กระบวนการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนต์ของสารเรืองแสง เกิดจากแสงที่ดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารละลายในคิวเวทท์ถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนในอะตอมของโมเลกุลและมีการสั่นภายในโมเลกุลจากระดับชั้นพลังงานสถานะพื้น (Ground state) ไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น (Excited state) เรียกว่าการดูดพลังงาน (Excite energy) เมื่อโมเลกุลเคลื่อนที่ไปอยู่ในระดับของชั้นพลังงานที่สูงขึ้นจะไม่เสถียร ดังนั้นระบบจึงมีการปลดปล่อยพลังงานและตกลงมาในชั้นระดับพลังงานที่ต่ำกว่าเพื่อให้เข้าสู่ความเสถียร โดยในกระบวนการตกกลับลงมาของอิเล็กตรอนจากสถานะดังกล่าวจะทำให้เกิดการคายโฟตอน (Emission of photon) และมีการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนต์ออกมา เช่น โฟโตลูมิเนสเซนต์ (Photoluminescence) เกิดจากโมเลกุลทำอันตรกิริยากับ

โฟตอน ไบโอลูมิเนสเซนต์ (Bioluminescence) เป็นการเรืองแสงที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตสร้างขึ้น เป็นต้น เมื่อจำแนกชนิดของการเปล่งแสงลูมิเนสเซนต์ตามแหล่งพลังงานที่กระตุ้นโมเลกุลของสารเรืองแสงแล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนต์ สามารถจำแนกได้หลายประเภทดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของลูมิเนสเซนต์ประเภทต่างๆ จำแนกตามแหล่งพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้น

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

2.2.1 หลักการของโฟโต้ลูมิเนสเซนต์ (Photoluminescence)

การเรืองแสงได้อาศัยหลักการในการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนต์ประเภทโฟโต้ลูมิเนสเซนต์ ซึ่งในการทดลองได้ใช้แหล่งพลังงานในการกระตุ้นโมเลกุลสารเรืองแสงเป็นเลเซอร์ กระบวนการเกิดแสงลูมิเนสเซนต์แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ การวาวแสง (Fluorescence) และการเรืองแสง (Phosphorescence) ทั้งสองกระบวนการนี้แตกต่างกันที่กระบวนการกลับสู่สถานะพื้นใหม่ ประกอบด้วยกระบวนการกระตุ้นและกลับสู่สถานะพื้น มีรายละเอียดดังนี้

2.2.1.1 กระบวนการกระตุ้น (Excitation)

โมเลกุลทั่วไปจะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ ที่สถานะพลังงานต่ำสุดหรือสถานะพื้นอิเล็กตรอนจะอยู่เป็นคู่ในออบิทัลและมีทิศทางการหมุนตรงกันข้ามกัน ดังสมการ 2.14

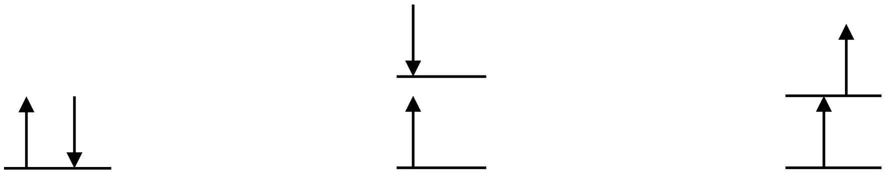
$$M = 2S + 1 \tag{2.14}$$

เมื่อ M คือ Molecular multiplicity ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงโมเมนตัมเชิงมุมของออบิทัล (Orbital angular momentum) ของแต่ละสถานะ

S คือ เลขควอนตัมการหมุน (Spin Quantum number) ของโมเลกุลและเป็นผลรวมของการหมุนสุทธิของอิเล็กตรอนในโมเลกุล

สารอินทรีย์ส่วนมากเลขควอนตัมการหมุนจะมีค่าเป็นศูนย์ $(S = +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0)$ เนื่องจากมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นคู่และมีทิศทางตรงกันข้ามกัน และมีค่าโมเมนตัมเชิงมุมเป็นหนึ่ง $(M = 1)$ มีความหมายว่าเป็นสถานะเดี่ยว (Singlet state) โดยสถานะเดี่ยวที่สถานะพื้นหรือมีพลังงานต่ำสุดจะแทน

ด้วย S_0 และหากเป็นสถานะเดี่ยวที่หนึ่ง (First excited singlet state: S_1) และสถานะเดี่ยวที่สองแทนด้วย (Second excited singlet state: S_2) แผนภาพแสดงทิศทางการหมุนของอิเล็กตรอนในโมเลกุลแสดงดังรูป 2.8



(ก) สถานะเดี่ยวในสภาวะพื้น (ข) สถานะเดี่ยวในสภาวะกระตุ้น (ค) สถานะสามในสภาวะกระตุ้น

รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงทิศทางการหมุนของอิเล็กตรอนในโมเลกุล

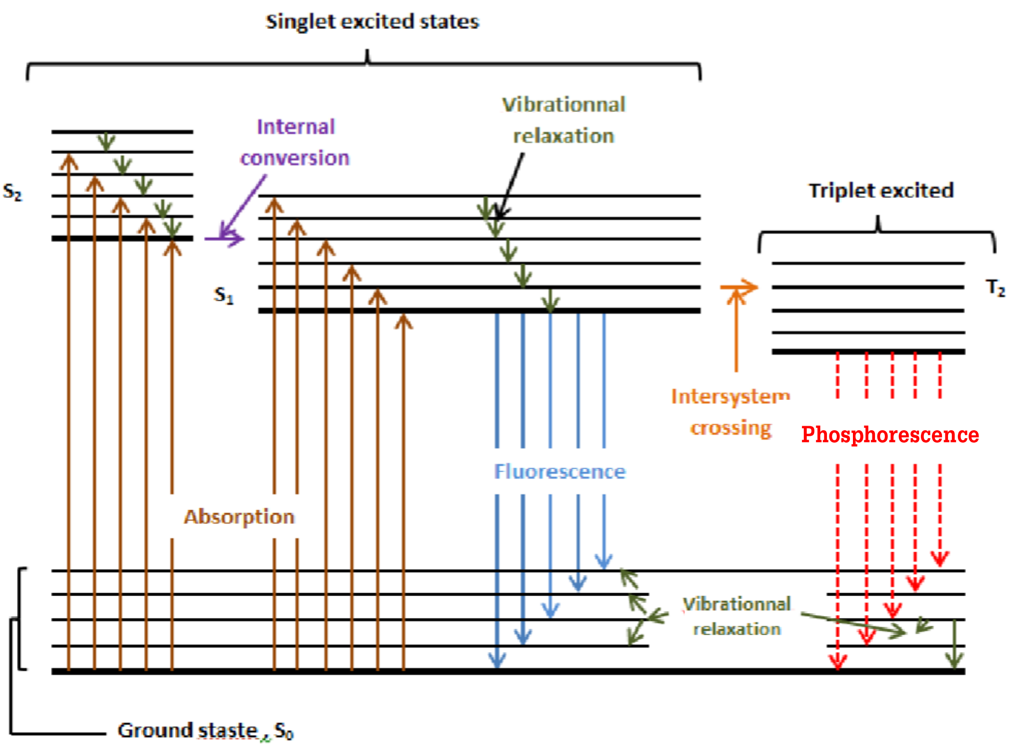
เมื่ออิเล็กตรอนในอะตอมของโมเลกุลถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในระดับพลังงานสูงขึ้นนั้น สามารถเกิดรูปแบบในการย้ายระดับพลังงานได้ 2 รูปแบบ คือ กระตุ้นไปสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น (Excitation singlet state) ดังรูป 2.8 (ข) และกระตุ้นไปสถานะสามในสถานะกระตุ้น (Triplet singlet state) ดังรูป 2.8 (ค) ซึ่งในกรณีนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นมีโอกาสในการหมุนกลับทิศทางทำให้ค่าสปินการหมุนเปลี่ยนไป เช่น เมื่อมีการหมุน $(S = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1)$ เพราะฉะนั้นค่า $(M = 3)$ หมายถึงสถานะสาม (Triple state) ซึ่งสถานะกระตุ้นของสถานะสามหรือสถานะที่มีค่าพลังงานต่ำสุดของสถานะสามจะแทนด้วย T_1 และที่สถานะสามนี้จะไม่พบในสถานะพื้นของโมเลกุลที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นคู่

2.2.1.2 กระบวนการลดระดับพลังงาน (Deexcitation)

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นอิเล็กตรอนจะไปอยู่ในสถานะกระตุ้นในช่วงเวลาหนึ่งและจะตกกลับสู่สภาวะพื้นหลังการดูดกลืน (Excitation-deexcitation process) ซึ่งอิเล็กตรอนจะตกกลับสู่สถานะพื้นโดยกระบวนการลดระดับพลังงาน (Deexcitation) และสามารถเกิดได้หลายรูปแบบ โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ กระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เกิดแสงและกระบวนการลดระดับพลังงานแบบเกิดแสง มีรายละเอียดดังนี้

1) กระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เกิดแสง

- กระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เกิดแสงจากการสั่นของโมเลกุล (Vibrational relaxation: VR) กระบวนการนี้เกิดขึ้นกับโมเลกุลที่อยู่ในรูปของสารละลาย เมื่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลสารเรืองแสงได้รับพลังงาน อิเล็กตรอนจะขึ้นไปสู่สถานะพลังงานกระตุ้นมีผลทำให้ตัวทำละลายมีพลังงานสูงขึ้นซึ่งมีระดับพลังงานในการสั่นหลายค่า เช่น จากรูปที่ 2.9 ระดับชั้นพลังงาน S_1 จะมีระดับพลังงานการสั่น 5 ระดับ และจะเกิดการสูญเสียพลังงานออกมาในรูปความร้อนที่เกิดจากการสั่นในการชนกับตัวทำละลาย



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงการดูดกลืนและการปลดปล่อยพลังงานรูปแบบต่าง ๆ [20]

- กระบวนการลดระดับพลังงานแบบแปลงผันภายใน (Internal conversion: IC) กระบวนนี้เกิดการส่งผ่านพลังงานระหว่างโมเลกุลของสารเท่านั้น จะไม่เกิดการคายพลังงานความร้อนหรือพลังงานแสงออกมา โดยโมเลกุลที่ส่งผ่านกันจะมีค่าพลังงานที่สถานะกระตุ้นต่างกันไม่มากหรือมีช่วงระดับพลังงานซ้อนทับกัน เช่นจากรูป 2.9 โมเลกุลเกิดการส่งผ่านพลังงานในสถานะ S_1 ไปยังสถานะ S_2 ที่ระดับพลังงานเดียวกัน

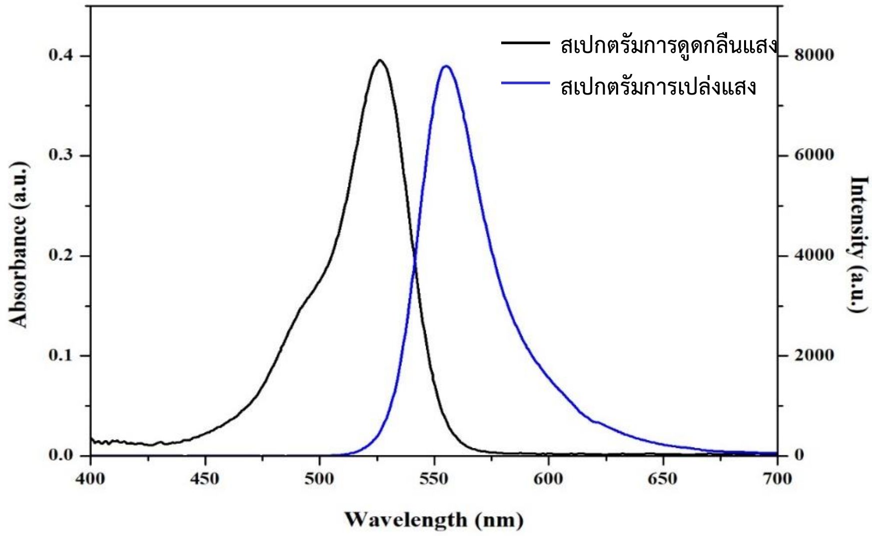
- กระบวนการลดระดับพลังงานแบบข้ามสถานะ (Intersystem crossing: ISC) เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนของโมเลกุลในสถานะกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนทิศทางการหมุน เนื่องมาจากระดับพลังงานการสั่นของสถานะเดี่ยวและระดับชั้นพลังงานการสั่นของสถานะสามในสถานะกระตุ้นตรงกัน (พลังงานเท่ากัน) หรือการทรานซิชันจากสถานะเดี่ยวที่มีระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดไปสู่สถานะสามในสถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานการสั่นมากกว่า

2) กระบวนการลดระดับพลังงานแบบเกิดแสง

- กระบวนการลดระดับพลังงานแบบเกิดแสงฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) เมื่ออิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงมากผ่านกระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เกิดแสงดังที่กล่าวมาแล้ว จนกระทั่งอิเล็กตรอนในโมเลกุลลดระดับพลังงานมาถึงระดับพลังงานการสั่นต่ำสุดของสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้นจะเกิดการลดระดับพลังงานไปยังสถานะพื้นและคายพลังงานออกมาในรูปของแสง

- กระบวนการลดระดับพลังงานแบบเกิดแสงฟอสฟอร์เรสเซนซ์ (Phosphorescence) การคายพลังงานในกระบวนการนี้เป็นการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานการสั่นต่ำที่สุดของสถานะสามในสถานะกระตุ้น

กระบวนการคายพลังงานแบบเกิดแสงจะปล่อยพลังงานออกมาในย่านความยาวคลื่นที่ยาวกว่าความยาวคลื่นที่มากระตุ้น ดังตัวอย่างของสารละลายโรดามีน 6จี ในรูปที่ 2.10 การเลื่อนของสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนต์เรียกว่า Stoke shift ซึ่งมีนิยามว่าคือระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสงลูมิเนสเซนต์ ส่วนในการเกิดฟอสฟอร์เรสเซนซ์ระยะห่างจากจุดสูงสุดของทั้งสองสเปกตรัมจะมากกว่าการเกิดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องจากชั้นพลังงานของสถานะสามในสถานะกระตุ้นสูงกว่าสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น

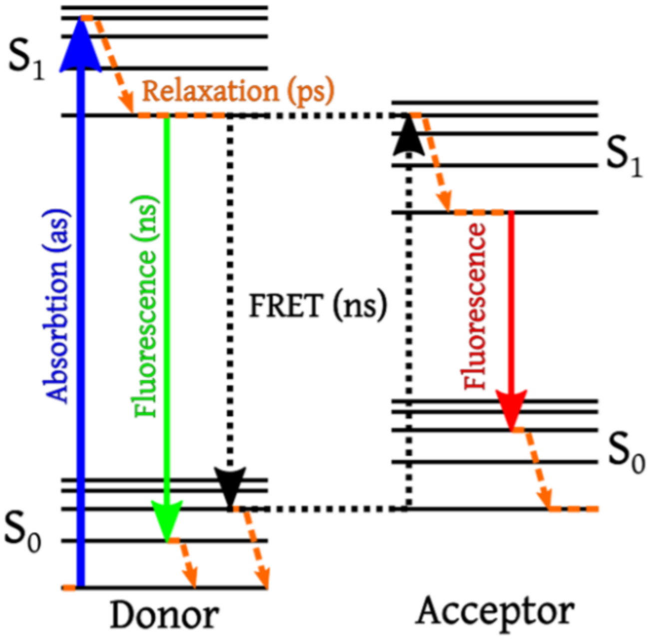


รูปที่ 2.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลายโรดามีน 6จี

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดแสงฟลูออเรสเซนต์

1) ผลจากสารเคมีชนิดอื่นๆ ที่เจือปน (Effect of impurities) หากในสารละลายมีสารเคมีเจือปนอยู่และสารนั้นดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นเดียวกันกับแสง ส่งผลให้ความเข้มฟอสฟอเซนต์ลดลงไปส่วนหนึ่ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Inner-filter effect

2) ผลจากค่าควอนตัมยีลด์ของสาร (Fluorescence quantum yield: Φ_F) สารเรืองแสงจะปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนต์ได้มากหรือน้อยดูได้จากค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ ซึ่งสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากสารเรืองแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนโดยสารเรืองแสง หากค่าดังกล่าวมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสารเรืองแสงนั้นปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนต์ได้ดี นอกจากนี้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ยังเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ Fluorescence resonance energy transfer (FRET) เป็นถ่ายทอดพลังงานระหว่างหมู่ที่ถ่ายทอดพลังงานหรือดูดกลืนแสง (Donor) กับหมู่ที่รับพลังงานหรือเรืองแสง (Acceptor) ภายในโมเลกุลเดียวกัน ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงระดับพลังงานอธิบายการเกิดปรากฏการณ Fluorescence resonance energy transfer [21]

ความเข้มของการเรืองแสงแสงลูมิเนสเซนต์จะเป็นผลมาจากระยะห่างระหว่างหมู่ที่ถ่ายทอดพลังงานกับหมู่ที่รับพลังงาน นั่นคือถ้าระยะห่างระหว่างสองตัวใกล้กันจะมีการถ่ายโอนพลังงานจากหมู่ที่ถ่ายทอดพลังงานไปยังหมู่ที่รับพลังงาน แต่ถ้าหมู่ที่รับพลังงานอยู่ไกลจากหมู่ที่ถ่ายทอดพลังงานจะเห็นการเรืองแสงลูมิเนสเซนต์จากหมู่ที่ถ่ายทอดพลังงานหรือดูดกลืนแสงเท่านั้น ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการติดตามระยะทางในโมเลกุลที่สนใจขณะเกิดการเปลี่ยนแปลง

3) ผลจากอุณหภูมิที่มีต่อตัวทำละลาย (Temperature effect) เมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้ของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะพื้นความเร็วเฉลี่ยเพิ่มขึ้นด้วย โมเลกุลดังกล่าวจึงมีโอกาสชนกับโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นทำให้เกิดการแปลงผันภายใน (IC) เพิ่มขึ้นเป็นเหตุให้ความเข้มของฟลูออเรสเซนต์และค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ลดลงด้วย

4) ผลจากออกซิเจนที่ละลายอยู่ (Effect of dissolved oxygen) ผลของการมีออกซิเจนเจือปนต่อความเข้มฟลูออเรสเซนต์ การมีออกซิเจนอยู่ในสารละลายอาจทำให้ความเข้มของฟลูออเรสเซนต์ลดลงเนื่องมาจากการเกิดออกซิเดชันโดยตรงหรือทำให้สารที่เกิดฟลูออเรสเซนต์ได้เปลี่ยนไปเป็นสารที่ไม่เกิดฟลูออเรสเซนต์

5) ผลจากปรากฏการณ์เควนชิง (Quenching) เป็นปรากฏการณ์ในการลดลงของค่าความเข้มของการฟลูออเรสเซนต์ที่เกิดจากองค์ประกอบของสารละลายหรือสารอื่นที่อยู่ในองค์ประกอบของสารละลาย ซึ่งรวมถึงทำตัวละลายด้วย แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ Self-quenching และ Self-absorption มีรายละเอียดดังนี้

Self-quenching เป็นผลเนื่องจากการชนกันระหว่างโมเลกุลที่สถานะกระตุ้น ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน แต่ไม่มีการให้รังสีแก่ตัวทำละลาย เรียกว่า External conversion

Self-absorption เกิดขึ้นเนื่องจากความยาวคลื่นแสงฟลูออเรสเซนต์มีการซ้อนทับกับแถบการดูดกลืนของสาร ส่งผลให้โฟตอนหรือแสงที่เกิดขึ้นถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารนั้น ซึ่งจะเกิดในกรณีสารละลายมีความเข้มข้นมาก

6) ผลของความเข้มข้นที่มีต่อความเข้มฟลูออเรสเซนต์ (Effect of concentration on fluorescent intensity) เนื่องจากปริมาณแสงที่เกิดจากโฟโตลูมิเนสเซนต์ขึ้นอยู่กับปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนเพื่อทำให้เกิดการกระตุ้นจะได้ว่า

$$I_F \alpha (\mathrm{I}_0 - \mathrm{I}) \tag{2.15}$$

$$I_F = \Phi_F (\mathrm{I}_0 - \mathrm{I}) \tag{2.16}$$

เมื่อ I_F คือ ความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนต์

จากความสัมพันธ์ของเบียร - แลมเบิรท (Beer-Lambert)

$$I = I_0 \times 10^{-\varepsilon lc} = I_0 \times e^{-2.303\varepsilon lc} \tag{2.17}$$

นำสมการที่ (2.17) แทนในสมการที่ (2.16) จะได้

$$I_F = \Phi_F \times I_0 (1 - e^{-2.303\varepsilon lc}) \tag{2.18}$$

จัดรูปจากอนุกรม จะได้ความสัมพันธ์ใหม่เป็น

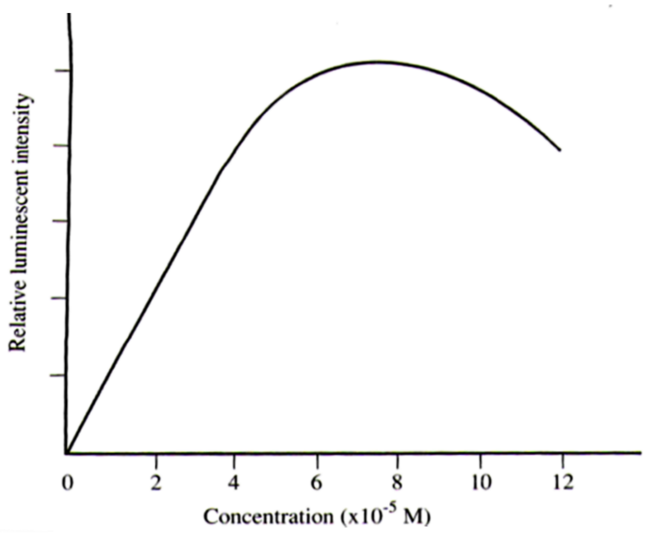
$$I_F = \Phi_F I_0 2.303\varepsilon lc \tag{2.19}$$

$$I_F = Kc \tag{2.20}$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $\Phi_F I_0 2.303\varepsilon l$ และจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า Φ_F โดยถ้า K มีค่ามากจะทำให้ค่า Φ_F มากด้วย

c คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลาร์)

จากสมการที่ (2.20) พบว่าความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนต์ (I_F) เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (c) เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนต์กับความเข้มข้นของสารละลายจะได้กราฟเป็นเส้นตรง แต่ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้นจะทำให้ความเข้มของฟลูออเรสเซนซ์ลดลง แสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจะเห็นว่าความไม่เป็นเชิงเส้นนี้เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์ของเบียร - แลมเบิรท [22] ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของการฟลูออเรสเซนต์กับความเข้มข้นของสาร

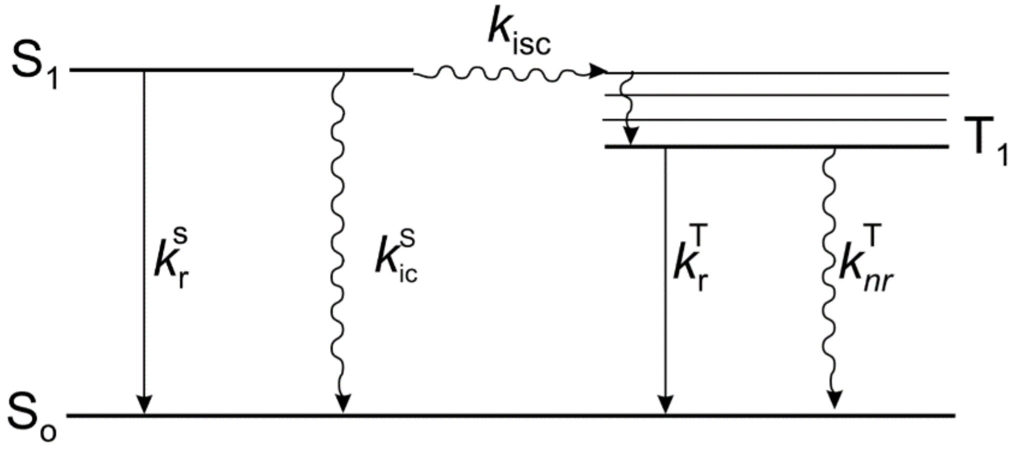
2.3 ฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ (Fluorescence quantum yield)

ฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ (Fluorescence quantum yield: FQY) เป็นค่าที่ใช้สำหรับวัดประสิทธิภาพเชิงปริมาณของวัสดุ เช่น การวิเคราะห์ทางชีวภาพและการวิเคราะห์ทางการแพทย์ โดยค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์หาได้จาก ค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาทั้งหมดจากสารเรืองแสง ($Photon_{em}$) ต่อจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนโดยสารเรืองแสง ($Photon_{abs}$) [23] และสามารถอธิบายได้ดังความสัมพันธ์

$$\Phi_F = \frac{k_r}{k_r + \sum k_{nr}} = \frac{Photon_{em}}{Photon_{abs}} \tag{2.21}$$

เมื่อ k_r คือ การปลดปล่อยโฟตอน

k_{nr} คือ การไม่ปลดปล่อยโฟตอน



รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน [23]

เมื่อ k_r^s คือ การปลดปล่อยโฟตอนในระดับพลังงาน S_1– S_0 หรือการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนต์

k_{ic}^s คือ การแปลงผันภายในระดับพลังงาน S_1 – S_0 และการไม่ปลดปล่อยโฟตอน

k_{isc} คือ การลดระดับพลังงานข้ามสถานะและไม่มีการปลดปล่อยโฟตอน

k_r^T คือ การปลดปล่อยโฟตอนในระดับพลังงาน T_1 – S_0 หรือเรียกว่าฟอสฟอร์เรสเซนต์

k_{nr}^T คือ การแปลงผันภายในระดับพลังงาน T_1 – S_0 และไม่ปลดปล่อยโฟตอน

2.3.1 เทคนิคการวัดค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์

จากการศึกษาพบว่ามีงานวิจัยที่ศึกษาการวัดค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์หลายเทคนิค ได้แก่ เทคนิค Relative เทคนิค Thermal lens และเทคนิค Time-correlated single photon counting (TCSPC) [24 - 26]

โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคนิค Relative ในการหาค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารละลาย เนื่องจากมีการจัดเตรียมระบบการวัดที่ไม่ซับซ้อน ใช้เวลาในการทดลองน้อย อีกทั้งยังวัดค่าได้แม่นยำด้วย เนื่องจากเทคนิค Relative เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารเรืองแสงที่เราสนใจเปรียบเทียบกับสารเรืองแสงที่ทราบค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ ซึ่งมีวิธีการศึกษา 2 วิธี ได้แก่

วิธี single-point ได้จากการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับความเข้มแสงฟลูออเรสเซนต์และนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับสารอ้างอิงที่มีความเข้มข้นเดียวกันซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและเร็ว แต่ไม่น่าเชื่อถือเนื่องจากวิธีนี้ใช้สารอ้างอิงที่ความเข้มข้นเดียวดังนั้นในการทดลองค่าการดูดกลืนแสงอาจมีการคลาดเคลื่อนได้

วิธีการเปรียบเทียบ (Comparative) จะกำหนดความเข้มข้นของสารที่ต้องการวัดและความเข้มข้นของสารอ้างอิงหลายค่า ใช้เวลาในการวัดนานกว่าวิธี single-point แต่มีความถูกต้องแม่นยำกว่า

ซึ่งเทคนิค Relative ที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้รายละเอียดดังนี้ [27]

จากสมการที่ (2.21) สามารถเขียนได้เป็น

$$\Phi_F = \frac{(\alpha)Photon_{em}}{(\beta)Photon_{abs}} \tag{2.22}$$

เมื่อ α คือ ค่าคงที่ของจำนวนโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมา

β คือ ค่าคงที่ของจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืน

พีคการดูดกลืนแสงของสาร (Fraction of light adsorbed: A) เขียนได้ดังสมการ

$$A = 1 - 10^{-b} \tag{2.23}$$

เมื่อ b คือ การดูดกลืนแสงของความยาวคลื่นที่ได้รับการกระตุ้น

สำหรับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารตัวอย่าง (X) และสารอ้างอิง (R) เป็นดังสมการ

$$\Phi_{F(\mathrm{x})} = \left[\frac{\alpha \times I}{\beta \times A}\right] \tag{2.24}$$

$$\Phi_{F(\mathrm{R})} = \left[\frac{\alpha \times A_R}{\beta \times F_R}\right] \tag{2.25}$$

นำสมการที่ (2.24) หารด้วยสมการที่ (2.25) โดยไม่พิจารณาค่า α และ β และจัดรูปสมการ จะได้

$$\Phi_{F(\mathrm{x})} = \Phi_{F(\mathrm{R})}\left[\frac{I}{I_R}\frac{A_R}{A}\right] \tag{2.26}$$

หากใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกัน จะเขียนสมการควอนตัมฟลูออเรสเซนต์โดยวิธีการเปรียบเทียบได้เป็น

$$\Phi_F = \Phi_{F(R)} \frac{I}{I_R}\frac{OD_R}{OD}\frac{n^2}{n_R^2} \tag{2.27}$$

เมื่อ $\Phi_{F(\mathrm{x})}$ คือ ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารตัวอย่าง

$\Phi_{F(\mathrm{R})}$ คือ ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารอ้างอิง

I คือ พื้นที่ใต้กราฟความเข้มแสงของการเปล่งแสงของสารตัวอย่าง

I_R คือ พื้นที่ใต้กราฟความเข้มแสงของการเปล่งแสงของสารอ้างอิง

A คือ ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารตัวอย่าง

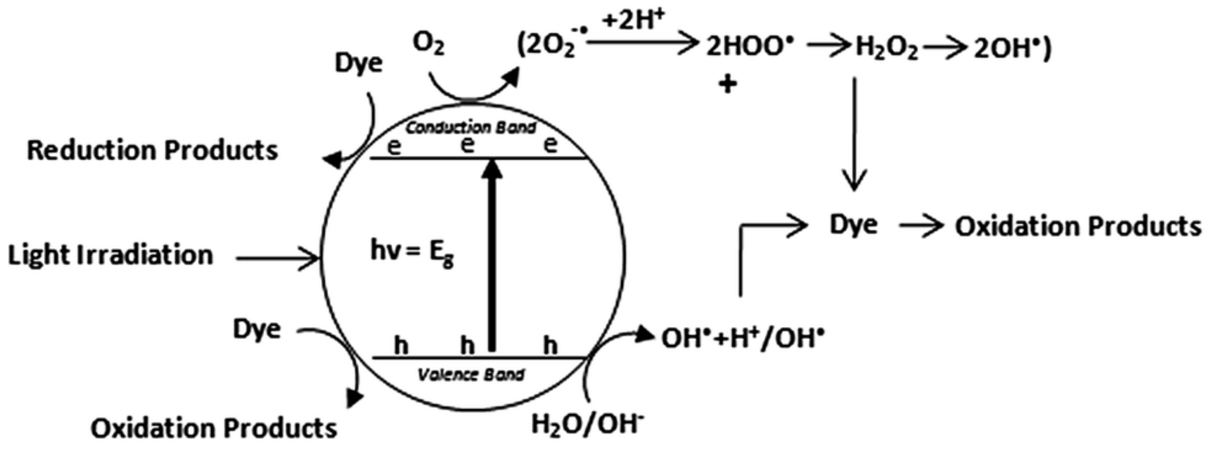
A_R คือ ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารอ้างอิง

n คือ ค่าดัชนีหักเหแสงของสารตัวอย่าง

n_R คือ ค่าดัชนีหักเหแสงของสารอ้างอิง

2.4 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process) [27]

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นกระบวนการดูดซับโฟตอน ที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำหรือเท่ากับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำประกอบด้วยระดับพลังงาน 2 ระดับ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence band : VB) และแถบคอนดักชัน (Conduction band : CB) ดังแสดงในภาพที่ 2.14 โดยแถบวาเลนซ์จะเป็นระดับพลังงานที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่จนเต็ม สำหรับแถบคอนดักชันจะเป็นระดับพลังงานที่มีออร์บิตอลว่างอยู่และมีพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์ โดยผลต่างระหว่างระดับพลังงานทั้งสองเรียกว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gab) มีพลังงานค่าหนึ่งในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (Electron volt : eV) และเมื่อสารกึ่งตัวนำถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่มีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์กระโดดขึ้นไปอยู่ที่แถบคอนดักชัน ทำให้เกิดช่องว่าง (Hole, h^+) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์และเกิดอิเล็กตรอน (e^-) ขึ้นที่แถบคอนดักชัน โดยช่องว่างจะรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล (•OH) ส่วนอิเล็กตรอนจะจับกับออกซิเจนเกิดเป็นซุปเปอร์ออกไซด์แรดิคัล ($•O^-_2$) ซึ่งทั้งสองตัวเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงจึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้

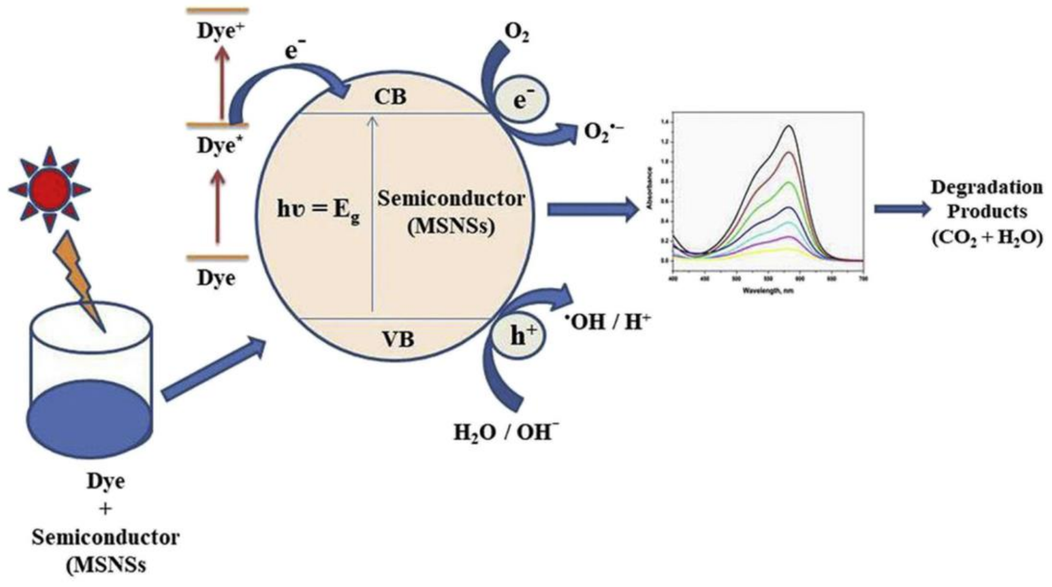


รูปที่ 2.14 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน [27]

2.5 กระบวนการย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation) [28]

เป็นการแตกตัวของโมเลกุลที่เกิดจากการดูดซับโฟตอนที่มาจากความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์ เช่น รังสีอินฟราเรด แสงที่ตามองเห็น และรังสีอัลตราไวโอเลต รูปแบบของอนุภาครังสีชนิดอื่นๆ อาจทำให้เกิดการย่อยสลายด้วยแสงได้ การย่อยสลายด้วยแสงนี้รวมถึงการสลายตัวของสารที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ไปเป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กกว่า การเปลี่ยนรูปโมเลกุลไปอยู่ในสภาพที่เปลี่ยนแปลงกลับเป็นอย่างเดิมไม่ได้ เช่น การเสียสภาพของโปรตีน และการเติมอะตอมบางชนิดเข้าในโมเลกุล ตัวอย่างที่เห็นได้โดยทั่วไปคือการกำจัดของเสียในน้ำดื่มหรือน้ำเสียด้วยแสงแดด

แสงสามารถใช้เป็นกระตุ้นการทำลายพันธะในการทำลายโมเลกุลของมลพิษได้ การย่อยสลายด้วยเคมีเชิงแสงจะอาศัยพื้นฐานทางเคมีซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษน้อยต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการออกซิเดชันโดยการกระตุ้นด้วยแสงสามารถใช้กับสารประกอบอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่างๆ เช่น สีย้อม ยาฆ่าแมลง ยากำจัดวัชพืช เป็นต้น สีย้อมเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ามารถทำให้อยู่ในรูปของสารที่มีความเป็นพิษต่ำ เช่น กรดอนินทรีย์ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เป็นต้น และยังสามารถทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ เช่น เฮไลต์ โลหะและอัลดีไฮด์ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารตั้งต้น จะทำให้สีที่ปรากฏจางลงหรือหายไป โดยสีที่เกิดจากสีย้อมจะเกิดจากสายโซ่ของสารที่มีพันธะคู่และวงแหวนที่สามารถดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่นในช่วงแสงที่ตามองเห็น



รูปที่ 2.15 แสดงปฏิกิริยาโฟโตดีเกรเดชัน [28]

2.6 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการฉายแสงในงานวิจัย

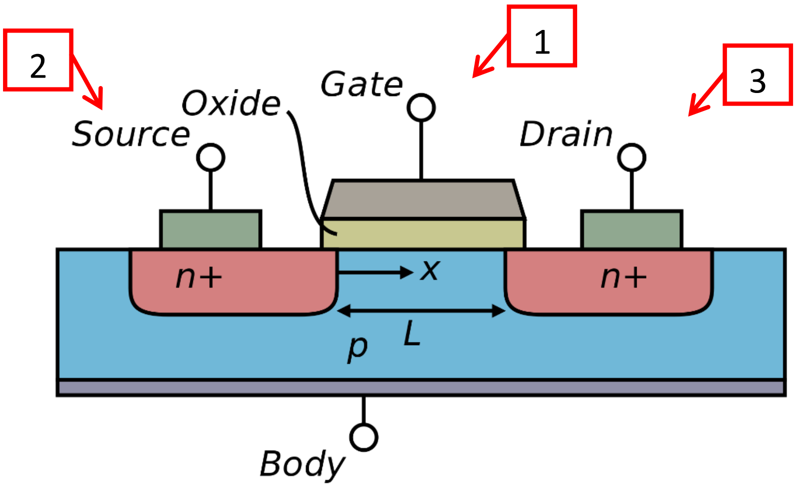
ในงานวิจัยนี้ได้นำวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาเป็นตัวช่วยในการทำงานของหลอดไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode) และหลอดไดโอดเปล่งแสงพลังงานสูง (High power Light Emitting Diode) ในการฉายแสงให้กับสารละลายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมด้วยแสง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรมีดังนี้

2.6.1 **มอสเฟต (metal oxide semiconductor field effect transistor : MOSFET)** เป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในการควบคุมสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้ออกไซด์ของโลหะในการทำส่วนเกต (Gate) นิยมใช้ในวงจรดิจิตอลโดยนำไปสร้างลอจิกเกตต่างๆ เนื่องจากมีขนาดเล็ก โครงสร้างของมอสเฟตประกอบด้วย 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้ [29]

1) ขาเกต (Gate) เป็นส่วนที่ทำมาจากออกไซด์ของโลหะ โดยสร้างให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแผ่นสองแผ่นเพื่อ สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมการเข้าออกของสัญญาณไฟฟ้า

2) ขาซอส (Source) เป็นส่วนขาเข้าของสัญญาณ

3) ขาเดรน (Drian) เป็นส่วนขาออกของสัญญาณ



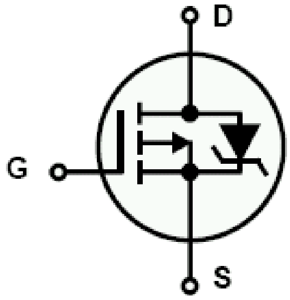
รูปที่ 2.16 แสดงส่วนประกอบของมอสเฟส [29]

มอสเฟต แบ่งเป็น 2 ชนิด ดังนี้

1) มอสเฟตชนิดเอ็น (Negative MOSFET : nMOS) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภท NPN เมื่อมีความต่างศักย์เป็นบวก (สนามไฟฟ้าแรง) สัญญาณไฟฟ้าจึงจะไหลจากขาซอสไปขาเดรนได้ เมื่อปล่อยความต่างศักย์สูง จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศลงอย่างแรงทำให้โฮลใน p-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่างประกอบกับมีอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบนแทนที่โฮล ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีอิเล็กตรอนอิสระมากจนเป็น n-type เรียกว่า channel สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วง channel นี้ซึ่งเป็นเหมือนกับขาเดรนและขาซอสได้โดยใช้อิเล็กตรอนอิสระเป็นพาหะนำไฟฟ้า

2) มอสเฟตชนิดพี (Positive MOSFET : pMOS) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภท PNP เมื่อมีความต่างศักย์ต่ำหรือเป็นลบ (สนามไฟฟ้าอ่อน) สัญญาณไฟฟ้าจึงจะไหลจากขาซอสไปขาเดรนได้ ซึ่งจะทำงานกลับกัน nMOS โดยเมื่อปล่อยความต่างศักย์ต่ำ (โดยมากมักจะติดลบ) จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศขึ้นอย่างแรง อิเล็กตรอนอิสระใน n-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่างประกอบกับมีโฮลบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบน ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีโฮลมากจนเป็น p-type ได้เรียกว่า channel สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วง channel นี้ซึ่งเป็นเหมือนกับขาเดรนและขาซอสได้โดยใช้โฮลเป็นพาหะนำไฟฟ้า

ในงานวิจัยได้เลือกใช้มอสเฟตชนิด PNP F9540N ดังแสดงสัญลักษณ์ในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงสัญลักษณ์มอสเฟส P-channel F9540N

2.6.2 ทรานซิสเตอร์ (Transistor) [30]

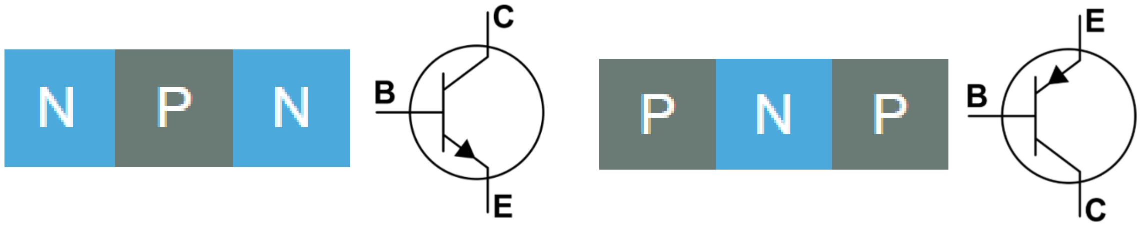
ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ มีหน้าที่ในการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้า (ทั้งให้ไหลและบล็อคไม่ให้ไหลผ่าน) ซึ่งคล้ายกับไดโอดเปล่งแสง แต่ทรานซิสเตอร์ยังสามารถควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าได้เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำภายในตัว ปัจจุบันมีการนำทรานซิสเตอร์มาประยุกต์ใช้งาน เช่น การนำอดูโน่ (Arduino) มาควบคุมหลอดไดโอดเปล่งแสงหลายสิบดวง ขาดิจิตอลของอดูโน่ไม่สามารถจ่ายกระแสได้มากพอให้กับไดโอดเปล่งแสงได้ เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการนำทรานซิสเตอร์มาใช้เป็นตัวขยายกระแสไฟฟ้า (Amplifier)

หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์

ตามที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าทรานซิสเตอร์มีหน้าที่ในการคอนโทรลทิศทางทางและปริมาณกระแสไฟฟ้า แต่หลักการสำคัญก็คือการใช้กระแสไฟฟ้าน้อยๆ ควบคุมกระแสไฟฟ้ามากๆ นั่นคือเมื่อมีปริมาณกระแสไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยที่ขาเบส ก็จะสามารถคอนโทรลปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าหลายเท่าตัวของขาคอลเล็คเตอร์และขาอีมิตเตอร์ได้ เนื่องจากทรานซิสเตอร์มีค่ากำลังขยายหรือที่เรียกว่า Current Gain หรือ HFE หรือ β นั่นเอง ทรานซิสเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1) ทรานซิสเตอร์ประเภท NPN ประกอบด้วยสารชนิด N 2 ตัวและชนิด P 1 ตัววางตัวสลับกัน หรืออาจเรียกได้ว่า (Negative-Positive-Negative) ดังแสดงสัญลักษณ์ในรูปที่ 2.18 (ก)

2) ทรานซิสเตอร์ประเภท PNP ประกอบด้วยสารชนิด P 2 ตัวและชนิด N 1 ตัววางตัวสลับกัน (Positive-Negative-Positive) ดังแสดงสัญลักษณ์ในรูปที่ 2.18 (ข) ในวิจัยนี้ได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN รุ่น BC 337



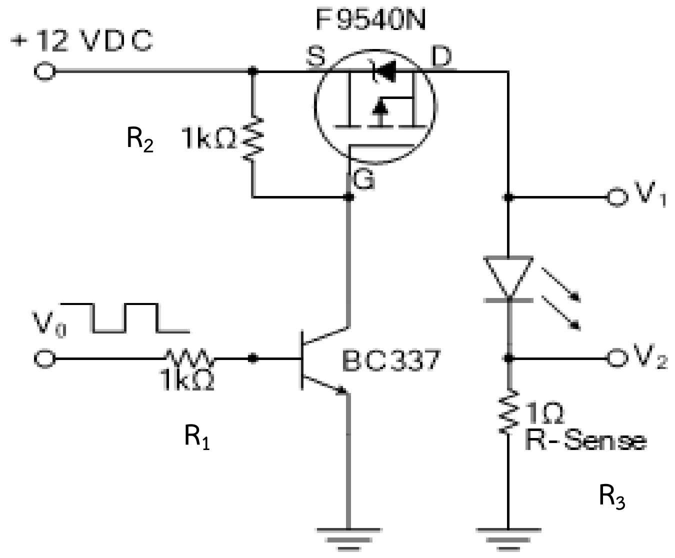
(ก) (ข)

รูปที่ 2.18 แสดงสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ประเภท NPN และ PNP ตามลำดับ [30]

2.6.3 ตัวต้านทาน (Resistor)

ตัวต้านทานหรือรีซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติในการต้านการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าทำด้วยลวดต้านทานหรือถ่านคาร์บอน เป็นต้น ซึ่งถ้าอุปกรณ์นั้นมีความต้านทานมากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจะน้อยลง เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดพาสซีฟสองขั้วที่สร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมขั้วทั้งสอง โดยมีสัดส่วนมากน้อยตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์ และปริมาณกระแสไฟฟ้าก็คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าหรือค่าความต้านทานของตัวนำมีหน่วยเป็นโอห์ม

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาช่วยในการทำงานของหลอดไอโอดเปล่งแสงและหลอดไดโอเปล่งแสงพลังงานสูงคือวงจรแสดงดังรูปที่ 2.19



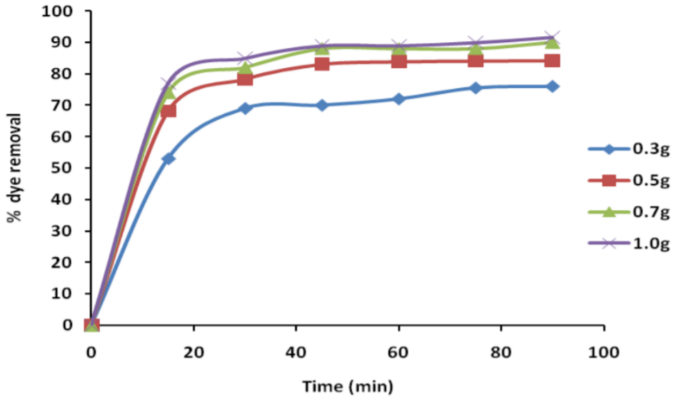
รูปที่ 2.19 แสดงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาช่วยในการทำงานของหลอดไดโอดเปล่งแสง

จากรูปที่ 2.19 การทำงานของวงจรมีดังนี้ เมื่อมีสัญญาณ High หรือลอจิก 1 เข้าขึ้นมาที่ V_0 แล้วไหลไปขาเบสซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมสัญญาณที่เข้ามาโดยมีตัวต้านทาน R_1 ทำหน้าที่จำกัดไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขาเบสมากเกินไป เมื่อมีลอจิก 1 เข้ามาที่ขาเบส กระแสและแรงดันจากไฟ DC ผ่าน R_2 มาที่ขาคอลเลคเตอร์และไหลผ่านลงไปยังขาอีมิตเตอร์ไปยังกาวด์ ทำให้ขณะนั้นแรงดันต่ำหรือลอจิก 0 ไปยังขาเกตของมอสเฟตส่งผลมอสเฟตทำงาน กระแสและแรงดันจากไฟ DC ไหลผ่านจากขาซอสไปขาเดรนและไหลไปยังหลอดไดโอดเปล่งแสงและลงกาวด์ทำให้หลอดไดโอดเปล่งแสงทำงาน แต่เมื่อมีสัญญาณ Low หรือลอจิก 0 มาที่ V_0 ตัวทรานซิสเตอร์จะไม่ทำงาน เนื่องจากไม่มีกระแสมาที่ขาเบส ทำให้กระแสและแรงดันจากไฟ DC ไหลผ่าน R_2 ไปที่ขาเกตของตัวมอสเฟตส่งผลให้ตัวมอสเฟตไม่ทำงานเนื่องจากมีแรงดันสูงหรือลอจิก 1 เข้ามา ทำให้กระแสและแรงดันไม่สามารถไหลผ่านขาซอสไปยังขาเดรน และไหลผ่านหลอดไดโอดเปล่งแสงลงกาวด์ได้ส่งผลให้หลอดไดโอดเปล่งแสงไม่ทำงาน จะเห็นได้ว่าเมื่อมีลอจิก 1

และ 0 เข้ามาที่เขาเบสส่งผลให้หลอดไดโอดเปล่งแสงทำงานและไม่ทำงาน โดยมีมอสเฟตทำหน้าที่เป็นสวิชต์ในการเปิด - ปิด หลอดไดโอดเปล่งแสง

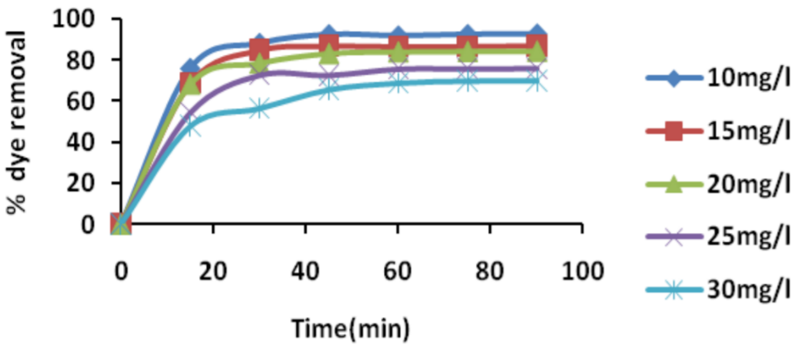
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2017 Vandana Gupta และคณะ ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมโรดามีนบี (RB) ในน้ำโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกไม้ Belpatra (BBC) เป็นตัวดูดซับ จากการศึกษาอิทธิพลของการดูดซับสีเริ่มต้นปริมาณ 0.3 ถึง 1.0 กรัม ต่อการดูดซับสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดอนุภาค 150 ถึง 299 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 320 เคลวิน และค่าพีเอช 3 แสดงดังรูปที่ 2.20 พบว่าการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นจาก 76 เปอร์เซ็นต์ เป็น 91.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่การดูดซับที่ใช้งาน (พื้นที่ผิว) เพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น จึงเกิดการดูดซับมากขึ้นเนื่องจากการดูดซับเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว [31]



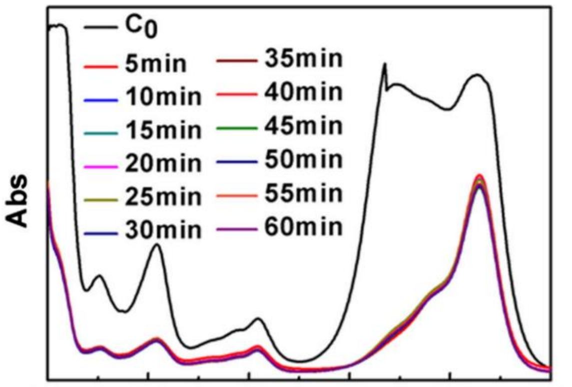
รูปที่ 2.20 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับสีย้อมโรดามีนบีโดยใช้ Belpatra Bark Charcoal [31]

จากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นสำหรับการกำจัดสีของสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 5 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้ตัวดูดซับ BBC ปริมาณ 0.5 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ขนาดอนุภาค 150 ถึง 299 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 310 เคลวิน และค่าพีเอช 3.0 สำหรับเวลาสัมผัส 90 นาที แสดงดังรูปที่ 2.21 พบว่าการดูดซับสูงสุดเกิดขึ้นใน 15 ถึง 20 นาทีและหลังจากเวลา 35 ถึง 40 นาที เข้าสู่สภาวะสมดุล ในทุกกรณี เนื่องจากตัวดูดซับแต่ละตัวมีขนาดตัวดูดซับที่จำกัดและหลังจากผ่านไประยะเวลาหนึ่งสิ่งเหล่านี้หมดไปและกระบวนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสีย้อมลดลงจาก 92.8 เปอร์เซ็นต์ เป็น 70.1 เปอร์เซ็นต์ เพราะที่ความเข้มข้นน้อยๆ มีปริมาณตัวดูดซับที่ใช้งานเพียงพอสำหรับการดูดซับโมเลกุลของสีย้อมที่มีอยู่ในปัจจุบัน แต่ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นอัตราส่วนไม่เพียงพอกับโมเลกุลสีย้อมจึงเกิดการดูดซับน้อยลง [31]



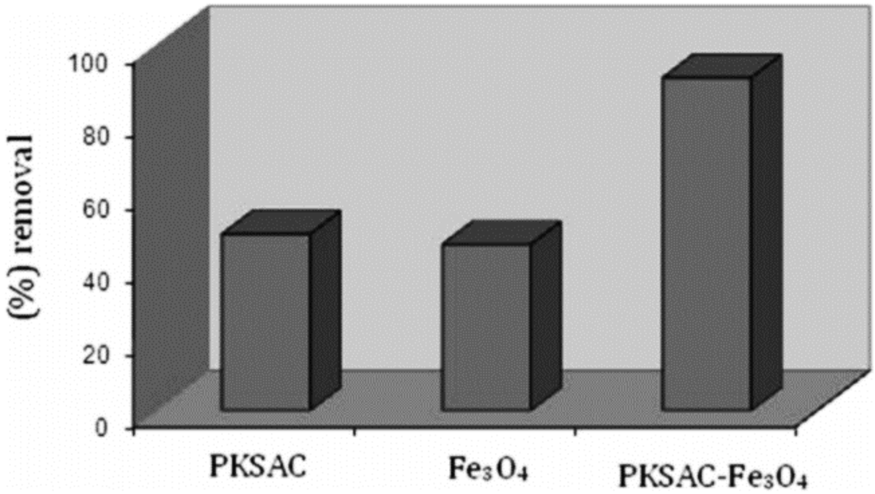
รูปที่ 2.21 ผลของระยะเวลาสัมผัสและความเข้มข้นของสีย้อมโรดามีนบีเริ่มต้นโดยใช้ Belpatra Bark Charcoal (BBC) [31]

ในปี ค.ศ. 2015 Fan Zhang และคณะได้ศึกษาการประยุกต์ $Ba_3(PO_4)_2/Fe_3O_4$ เป็นตัวดูดซับแม่เหล็กแบบใหม่เพื่อกำจัดเมทิลบลูจากสารละลายที่เป็นน้ำ แสดงดังรูปที่ 2.22 จากการศึกษาพบว่าตัวดูดซับคอมโพสิตแม่เหล็กแบบใหม่ที่ประกอบด้วย $Ba_3(PO_4)_2$ นาโนฟอลส์และไมโครสเฟียร์ Fe_3O_4 (BPF) ที่ถูกเตรียมไว้ เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาโครงสร้างทางเคมีและสมบัติทางแม่เหล็กของ BPF การดูดซับเมธิลบลู (MB) บน BPF ถูกตรวจสอบด้วยค่า pH อุณหภูมิ ปริมาณตัวดูดซับ เวลาที่ใช้ในการดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลบลู พบว่าข้อมูลจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับนั้นดีกว่าการใช้ pseudo-secondorder model และสมการ Langmuir ความสามารถในการดูดซับของเมทิลบลู โดย BPF ประกอบด้วย 334.5 ± 12.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าของพารามิเตอร์ เช่น free energy (DG, -4.25 ± 0.16 mol^{-1} ถึง -6.06 ±0.12 $kJ \cdot mol^{-1}$) เอนทาลปี (DH, -24.93 ± 1.50 $kJ \cdot mol^{-1}$) และเอนโทรปี (DS, -60.29 ± 3.20 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาพบว่าการดูดซับนั้นเกิดขึ้นเองได้ดีและคายความร้อนในธรรมชาติ การกำจัดสีย้อมเมทิลบลูมีสาเหตุมาจากพันธะไฮโดรเจนและปฏิกิริยาไอออนิก ยิ่งกว่านั้น BPF สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ง่ายและความสามารถในการดูดซับประมาณ 92 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเริ่มต้น ความสามารถในการดูดซับความอิ่มตัวหลังจากใช้ซ้ำห้าครั้ง [32]



รูปที่ 2.22 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลบลูหลังจากเติม BPF ที่เวลาต่างๆ [32]

ในปีค.ศ. 2013 P. Panneerselvam และคณะ ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมโรดามีนบี ด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากกะลาปาล์มเคอร์เนลและเคลือบด้วยอนุภาคนาโนออกไซด์ของเหล็ก จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ตัวดูดซับ Fe_3O_4 ปริมาณ 0.2 กรัม เพื่อกำจัดสีย้อม Rhodamine B ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีรอบการปั่นกวน 100 รอบต่อนาที สามารถกำจัดสีย้อมได้ถึง 44.5 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 2.23 [33]

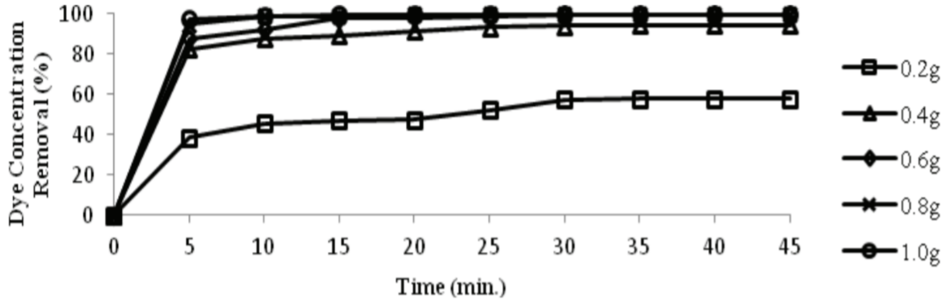


รูปที่ 2.23 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมลงบน PKSAC, Fe_3O_4 และ PKSAC-Fe_3O_4 [33]

ในปีค.ศ. 2015 Elias Ranjbari และคณะ ได้ศึกษาอนุภาคนาโนออกไซด์ของแม่เหล็กออกไซด์เคลือบ hemi/ad-micelle SDS (MHAMS-MIONPs) ถูกใช้เป็นตัวดูดซับสีของ Rhodamine B (RB) และ Rhodamine 6G (Rh6G) การศึกษาแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดสำหรับโรดามีนบีและโรดามีน 6จี คือ 385 และ 323 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับ MHAMS-MIONP ที่ใช้ในการดูดซับโรดามีนบีและโรดามีน 6จี ภายใต้สภาพที่เหมาะสม (ค่าพีเอช 2 ปริมาณ MHAMS-MIONPs 90 มิลลิกรัม ปริมาตรของตัวทำละลาย 2.6 มิลลิลิตร ของกรดอะซิติก 3% ใน acetonitrile) สกัดแยกได้ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 98 เปอร์เซ็นต์ และ 99 เปอร์เซ็นต์ ด้วยปัจจัยความเข้มข้นเท่ากับ 327 และ 330 ตามลำดับ ข้อจำกัดของการตรวจจับที่ได้รับสำหรับสีโรดามีนนั้นถูกนำไปใช้อย่างประสบความสำเร็จสำหรับการกำจัดและการตรวจหาร่องรอยของโรดามีนบีและโรดามีน 6จี ในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมและน้ำเสีย [34]

ในปี ค.ศ. 2012 Kah Aik Tan และคณะได้ศึกษาการเตรียมอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 จากการตกตะกอนทางเคมีของเกลือ Fe^{2+} และเกลือ Fe^{3+} จากสารละลายที่เป็นน้ำด้วยสารละลายแอมโมเนีย เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ซังข้าวโพดแบบเปิดเคลือบด้วยอนุภาคนาโนแม่เหล็กเฟอร์ริกออกไซด์ Fe_3O_4 สำหรับการดูดซับเมทิลีนบลู (MB) บนซังข้าวโพดแบบเคลือบด้วยเฟอริกออกไซด์ (Fe3O4-MCP) ได้ถูกศึกษาภายใต้เงื่อนไข ค่าพีเอชในช่วง 3 ถึง 8 ปริมาณตัวดูดซับ 0.2 ถึง 1.0 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ถึง 250 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าการดูดซับของสีย้อม MB นั้นขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด

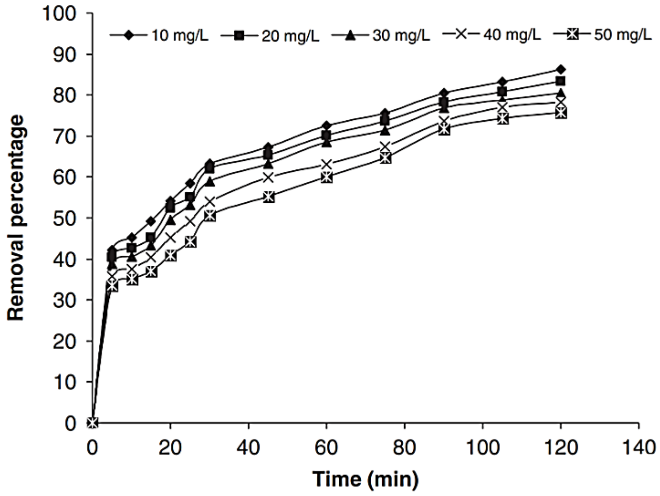
ด่างและประสิทธิภาพในการกำจัดความเข้มข้นของสีจะสูงขึ้นที่ค่าพีเอช 6.0 จลน์ศาสตร์การดูดซับถูกแสดงด้วย pseudo-first-order และ pseudo-second-order ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่าการเคลือบ Fe_3O_4 บนผงซังข้าวโพดข้าวโพดเพิ่มการกำจัดความเข้มข้นของสีย้อมในกระบวนการดูดซับ และจากการศึกษาผลกระทบของปริมาณการดูดซับสีย้อม MB โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.2 - 1.0 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ในสารละลายตัวอย่าง สำหรับสีย้อมความเข้มข้นเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ ± 27°C ความเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที และค่าพีเอช 6.0 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.24 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นจาก 57.79 เป็น 99.89 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 0.2 ถึง 1.0 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ ในแต่ละช่วงเวลาสมดุล เนื่องจากเมื่อปริมาณสารดูดซับเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นพื้นที่การดูดซับ MB จากสารละลายน้ำจึงมีมากขึ้น แต่ในเวลาสมดุลประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมจะลดลงเมื่อปริมาณตัวดูดซับสูงขึ้น โดยลดลงจาก 84.58 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 28.44 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 1.0 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร อาจเกิดจากการซ้อนทับกันหรือการรวมตัวของพื้นที่ผิวดูดซับที่มีให้กับ MB และการเพิ่มความยาวเส้นทางการแพร่ เพราะฉะนั้นปริมาณตัวดูดซับจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญมากในการกำหนดความสามารถในการดูดซับ [35]



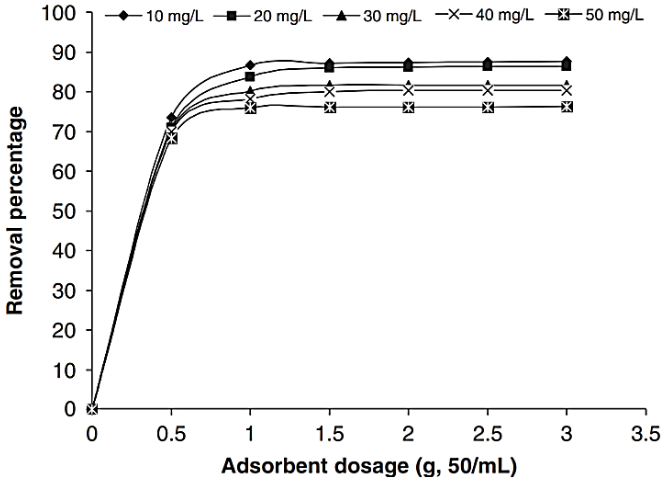
รูปที่ 2.24 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการกำจัดสีย้อมเมทิลบลูเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร [35]

ในปี ค.ศ. 2007 S. Sadhasivam และคณะได้ศึกษาของเสียจากเส้นใยที่เก็บเกี่ยวได้จาก Trichoderma harzianum นั้นใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี โดยศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการกวน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ปริมาณตัวดูดซับและค่าความเป็นกรด-เบส จากการศึกษาสีย้อมโรดามีน 6จี ความเข้มข้นในช่วง 10 ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดของตัวดูดซับ 1.0 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร และค่าพีเอช 8.0 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและปริมาณการใช้สีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นแต่ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อถึงเวลาสมดุล แสดงดังรูปที่ 2.25 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่เวลาสมดุลลดลงจาก 86.26 เปอร์เซ็นต์ ถึง 75.73 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความเข้มข้นของสีย้อม 10 ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เห็นได้ชัดว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสี เวลาสมดุลสำหรับตัวดูดซับคือ 120 นาทีที่ความเข้มข้นสีย้อมทั้งหมดที่

ศึกษา ผลของเวลาปั่นกวนต่อการดูดสีย้อมนั้นเป็นเส้นโค้งที่เรียบเนียนและต่อเนื่องซึ่งนำไปสู่ความอิ่มตัวของสีซึ่งบอกถึงการครอบคลุม monolayer ของสีย้อมที่เป็นไปได้บนพื้นผิวของตัวดูดซับ และผลการศึกษาปริมาณของตัวดูดซับต่อประสิทธิการดูดซับสีย้อมได้นำเสนอในรูปที่ 2.26 พบว่าการกำจัดสีย้อมขั้นต่ำและสูงสุดอยู่ที่ 68.33 ถึง 73.34 เปอร์เซ็นต์ และ 76.21 ถึง 87.60 เปอร์เซ็นต์ ที่ขนาด 0.5 และ 3.0 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร ตามลำดับ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มประสิทธิการดูดซับสีย้อมเนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากขึ้น [36]



รูปที่ 2.25 ผลของเวลากวนและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในช่วง 10 ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร [36]

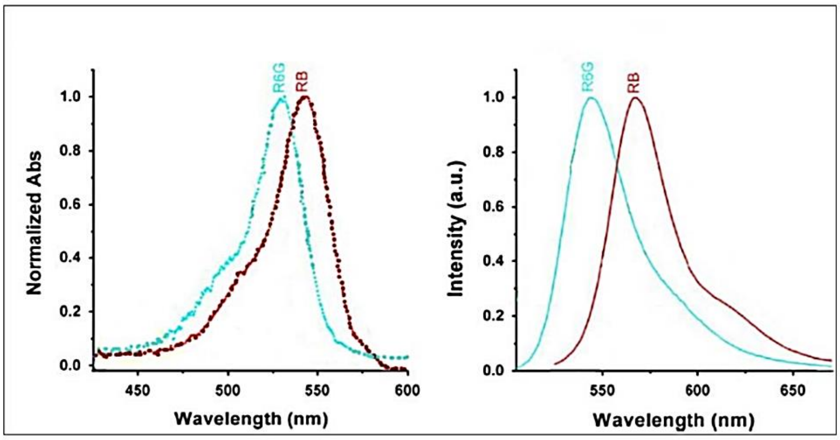


รูปที่ 2.26 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการกำจัดสีย้อม [36]

ในปี ค.ศ. 2012 Yin-Yin Xu และคณะ ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กออกไซด์ Fe_3O_4@PAA NPs และศึกษาคุณลักษณะโดย TEM, FT-IR, VSM และ XRD ผลการศึกษาคุณลักษณะระบุ

ว่า PAA เหมาะสมสำหรับการเคลือบผิวบนพื้นผิวของ Fe_3O_4 และไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในคุณสมบัติแม่เหล็ก Fe_3O_4@PAA NPs ถูกใช้เพื่อดูดซับ สีย้อมโรดามีน 6จี (Rh6G) เป็นตัวอย่างสีย้อมที่เป็นมลพิษในน้ำ จากข้อมูลพบว่าสมดุลการดูดซับเกิดขึ้นในช่วงเวลา 20 นาที แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่เตรียมไว้แสดงอัตราการดูดซับที่รวดเร็วมากและผลการวิจัยพบว่าตัวดูดซับแม่เหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมพื้นฐานในตัวอย่างจริง [37]

ในปี ค.ศ. 2013 Xian-Fu Zhang และคณะได้ศึกษาค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของวัสดุฟลูออเรสเซนต์โรดามีน 6จี และโรดามีนบี ในตัวทำละลายเอทานอล โดยใช้เทคนิค Time-correlated single photon counting (TCSPC) จากการทดลองพบว่าโรดามีน 6จี มีพีคการดูดกลืนและพีคการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ 527 นาโนเมตร และ 552 นาโนเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.27 และมีค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์เท่ากับ 0.95 $(\Phi_F = 0.95)$ สำหรับโรดามีนบี มีพีคการดูดกลืน 539 นาโนเมตร พีคการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ 571 นาโนเมตร และมีค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์เท่ากับ 0.66 $(\Phi_F = 0.66)$ [38]



(ก) (ข)

รูปที่ 2.27 (ก) แสดงพีคการดูดกลืนแสงของโรดามีน 6จี (Rh6G) และโรดามีนบี (RhB)
(ข) แสดงพีคการเปลงแสงของโรดามีน 6จี (Rh6G) และโรดามีนบี (RhB)

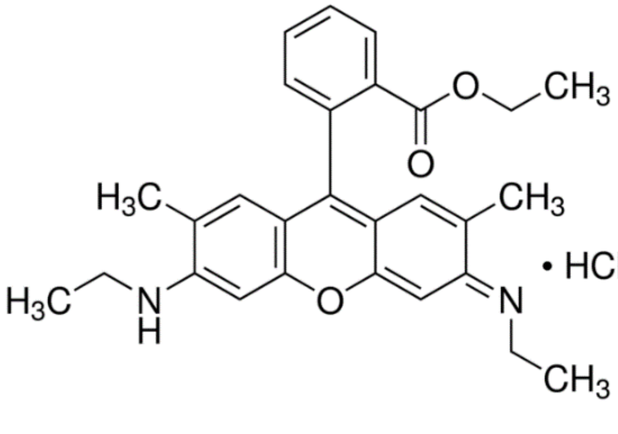
บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะอธิบายถึงเครื่องมือและระบบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมถึงวิธีดำเนินงานวิจัย โดยมีเนื้อหาแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อหลัก ดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
3. ระบบวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
4. การเตรียมสารละลายสีย้อมโรดามีน 6จี และสารคอลลอยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4
5. การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ด้วย Fe_3O_4

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้สารเรืองแสงในกลุ่มสารอินทรีย์ (Organic dyes) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนส์สูงและมีราคาถูก ผู้วิจัยได้จัดเตรียมสารละลายจากสารเรืองแสงโรดามีน 6จี (Rhodamine 6G: Rh6G) (รุ่น CAS. 989-38-8 จากบริษัท SIGMA-ALDRICH) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.1 และมีสมบัติดังตารางที่ 3.1 [39]



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสารเรืองแสง Rhodamine 6G [39]

ตาราง 3.1 สมบัติพื้นฐานของสารเรืองแสง Rhodamine 6G

สมบัติ	Rhodamine 6G
สูตรเคมี	$C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	497.02
ค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยีลด์	0.95
ความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสงและเปล่งแสง (นาโนเมตร)	527 และ 552

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยีลด์ของสารสีย้อมเรืองแสงโรดามีน 6จี (Rh6G) ผสมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 (CAS. 1317-61-9 จากบริษัท SIGMA-ALDRICH) ดังรูปที่ 3.2 และมีสมบัติดังตารางที่ 3.2 [40]

รูปที่ 3.2 อนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 [40]

ตาราง 3.2 สมบัติพื้นฐานของอนุภาคนาโนแม่เหล็ก

สมบัติ	**อนุภาคนาโนแม่เหล็ก**
ชื่อทางเคมี	iron(II) iron(III) oxide
สูตรเคมี	Fe_3O_4
มวลโมเลกุล	231.53
ขนาดของอนุภาค (นาโนเมตร)	50-100
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	4.8-5.1
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	1538

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยีลด์ในรูปแบบของสารละลาย โดยได้เลือกตัวทำละลายเป็นน้ำปราศจากไอออน หรือน้ำ DI เป็นน้ำที่ผ่านการกรองไอออน ใช้เรซิ่นเป็นตัวกรองโดยผ่านการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เพื่อจับทั้งไอออนบวกและไอออนลบออกจากน้ำ จึงทำให้ได้น้ำไม่มีไอออนหลงเหลืออยู่ จึงเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงเพราะโมเลกุลที่เหลืออยู่จะมีเพียงโมเลกุลของน้ำ H_2O เท่านั้น จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นตัวทำละลายในสารสีย้อมไวแสง Rh6G [41]

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้จัดเตรียมอุปกรณ์เพื่อใช้สำหรับเตรียมสารสารละลาย มีรายละเอียดดังนี้

1) บิกเกอร์ (Beaker) ชนิดแก้วใส สำหรับบรรจุสารละลาย จากบริษัท PYREX

2) ช้อนตักสารเคมี สำหรับตักสารเคมีเพื่อใช้ในการทดลอง

3) เครื่องชั่งดิจิตอล (รุ่น Pioneer จากบริษัท OHAUS) ใช้สำหรับชั่งสารละลาย

4) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic stirrer bar) ขนาด 30 มิลลิเมตร จากบริษัท Fisher scientificใช้งานร่วมกับเครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer)

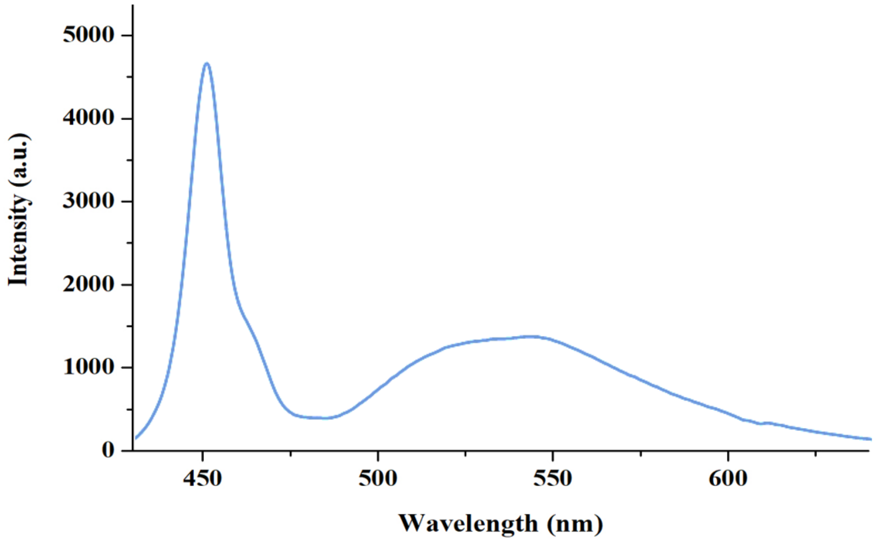
5) เครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer) สำหรับกวนสารละลาย จากบริษัท Fisher scientific ใช้แรงดันไฟฟ้า 230 โวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 2.7 แอมแปร์

6) หลอดไมโครเซนติฟิว (Micro centrifuge tube) สำหรับบรรจุสารละลาย รุ่น TUBE-200-C จากบริษัท Extregene ขนาด 2 มิลลิลิตร ใช้งานร่วมกับเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน

7) เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน (Centrifuge) สำหรับแยกตัวอย่างส่วนที่เป็นของแข็งออกจากส่วนที่เป็นของเหลว รุ่น Force 1418 ใช้แรงดันไฟฟ้า 230 โวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 0.6 แอมแปร์

8) คิวเวทท์พลาสติก (Plastic cuvette) สำหรับบรรจุสารละลายในการวัดสเปกตรัมแสง ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร จากบริษัท Brain

9) หลอดไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode : LED) ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงที่ให้แสงสีขาว โดยไดโอดเปล่งแสงสีขาวเกิดจากไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินถูกเคลือบด้วยสารเรืองแสงฟอสเฟอร์ขนาดกำลังไฟฟ้า 1.5 วัตต์ ให้ความยาวคลื่นในช่วง 430 – 630 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยใช้แสงขาวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงสเปคตรัมของแสงสีขาวที่ความเข้มแสง 50 ลักซ์

10) แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) แหล่งจ่ายไฟที่เปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนเข้าสู่โหลด สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เอาท์พุตให้มีค่าคงที่ได้ ใช้สำหรับจ่ายไฟกระแสตรงให้กับวงจร

11) วงจรไฟฟ้า (แสดงหลักการทำงานและภาพวงจรในบทที่ 2 หัวข้อ 2.6)

12) ลักซ์มิเตอร์ (Lux meter) (รุ่น UT380 Series) เป็นเครื่องมือวัดปริมาณของแสงที่มองเห็นในพื้นที่ที่กำหนดทดสอบความสว่าง ในหน่วยของ LUX โดย 1 ลักซ์ มีค่าเท่ากับความสว่างของพื้นผิวหนึ่งเมตร ในงานวิจัยนี้ใช้ลักซ์มิเตอร์สำหรับวัดความเข้มแสงของหลอดไดโอดเปล่งแสง

3.3 ระบบวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงระบบต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ระบบวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย ระบบวัดการเปล่งแสงของสารละลาย และระบบการฉายแสงขาว รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ดังแสดงตามหัวข้อต่อไปนี้

3.3.1 ระบบวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย

ในการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลาย มีอุปกรณ์ที่ใช้ดังนี้

1) แหล่งกำเนิดแสง ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟทังสเตน จากบริษัท Schott Megalight 100 ให้สเปกตรัมแสงในย่านความยาวคลื่น 400 ถึง 900 นาโนเมตร ใช้แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 0.9 แอมแปร์

2) เส้นใยแก้วนำแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร ใช้สำหรับนำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงมายังสารตัวอย่าง

3) คิวเวทท์พลาสติก รุ่น Macro cuvette จากบริษัท Brain ใช้บรรจุสารละลาย ในการวัดสเปกตรัมแสง แท่นจับยึดคิวเวทท์ ใช้สำหรับยึดจับคิวเวทและต่อกับสายใยแก้วนำแสง

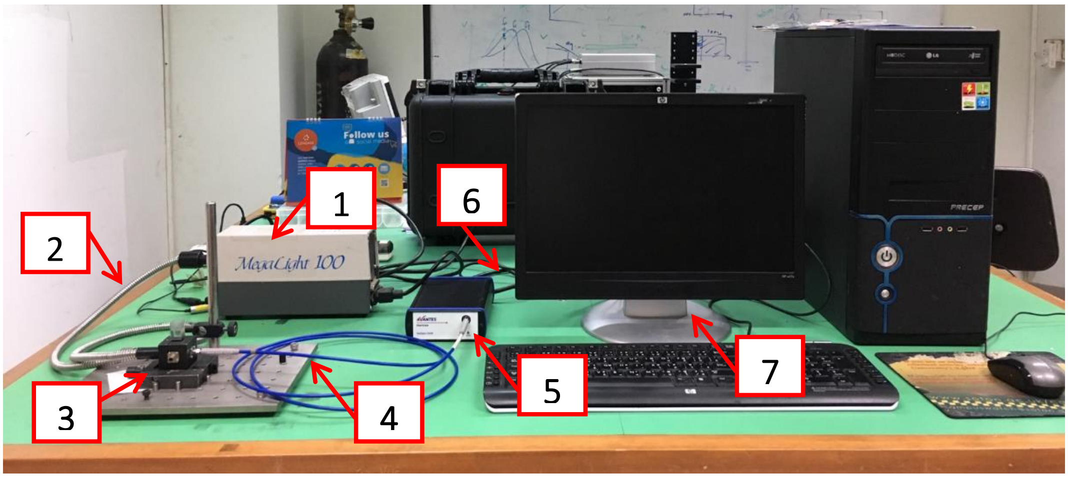
4) เส้นใยแก้วนำแสง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร ใช้สำหรับนำส่งแสงจากสารตัวอย่างในคิวเวทท์มายังเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

5) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น ULS2048XL-EVO จากบริษัท AvaSpec ใช้สำหรับวัดสเปกตรัมแสง ในย่านความยาวคลื่น 200 ถึง 1100 นาโนเมตร

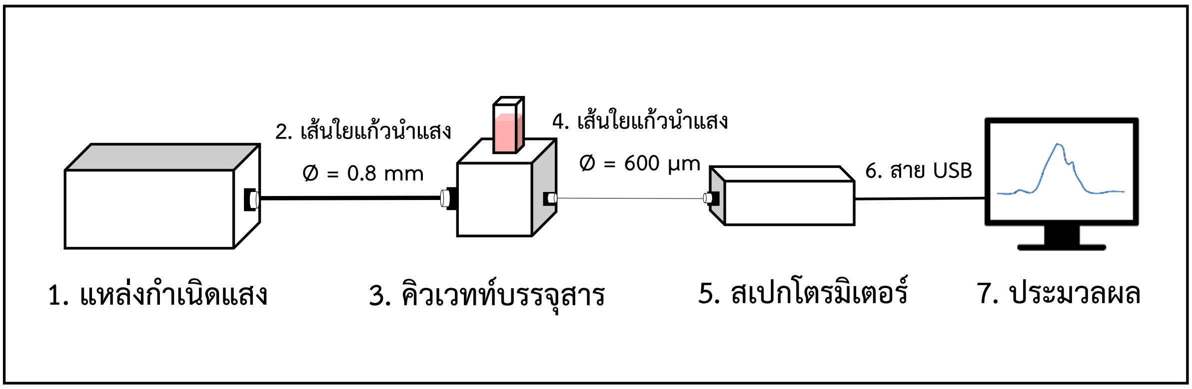
6) สาย USB ใช้สำหรับนำส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์

7) เครื่องคอมพิวเตอร์ ใช้สำหรับประมวลผลค่าการดูดกลืนแสง ด้วยโปรแกรม Avasoft 8.1

ผู้วิจัยได้จัดระบบการวัดการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 3.4 และมีรายละเอียดดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 ระบบวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย (ก) ภาพจริง (ข) แผนภาพระบบวัด

จากแผนภาพระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลาย รูปที่ 3.4 แสงจากแหล่งกำเนิดแสงทังสเตนจะเดินทางผ่านสายใยแก้วนำแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร เพื่อนำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงมายังสารตัวอย่างที่อยู่ในคิวเวทท์ แสงจะตกกระทบกับสารตัวอย่างและส่องผ่านออกมา ซึ่งแสงที่ผ่านออกมานั้นจะถูกนำเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ด้วยสายใยแก้วนำแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร แสงที่เข้าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์จะถูกวิเคราะห์ส่งเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB และทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายด้วยโปรแกรม Avasoft 8.1 โดยสมการ

$$A = -\log \frac{I}{I_0} \tag{3.1}$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย

I คือ ปริมาณแสงที่ผ่านออกจากคิวเวทท์

I_0 คือ ปริมาณแสงที่ผ่านเข้าไปในคิวเวทท์

3.3.2 ระบบวัดการเปล่งแสงของสารละลาย

ในการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติการเปล่งแสงของสารละลาย มีอุปกรณ์ที่ใช้ดังนี้

1) แหล่งกำเนิดแสง ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ จากบริษัท Thorlabs GmbH มีความเข้มแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ให้แสงสีเขียว ในการกระตุ้นสารเรืองแสงโรดามีน 6จี

2) คิวเวทท์พลาสติก (Brain-Macro cuvette) และแท่นจับยึดคิวเวทท์

3) สายใยแก้วนำแสง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร

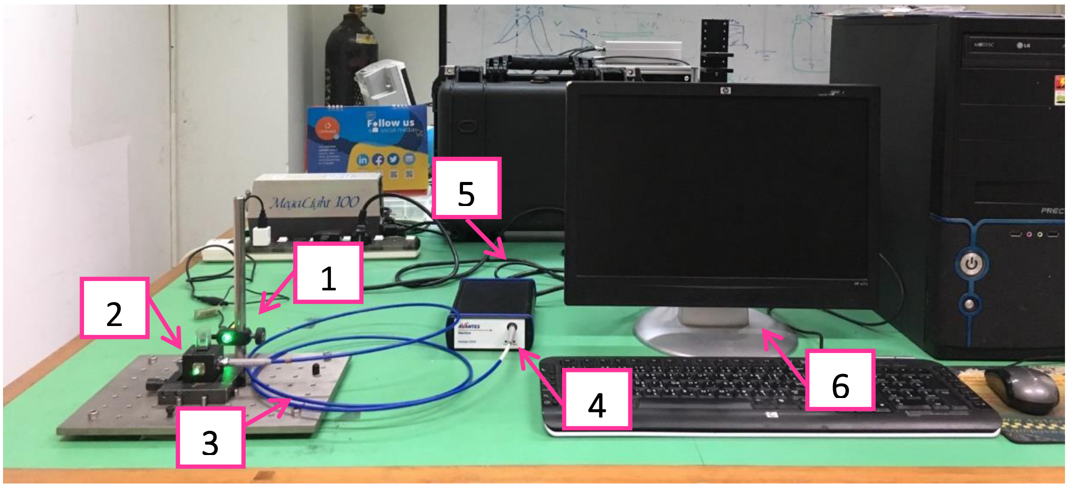
4) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

5) สาย USB

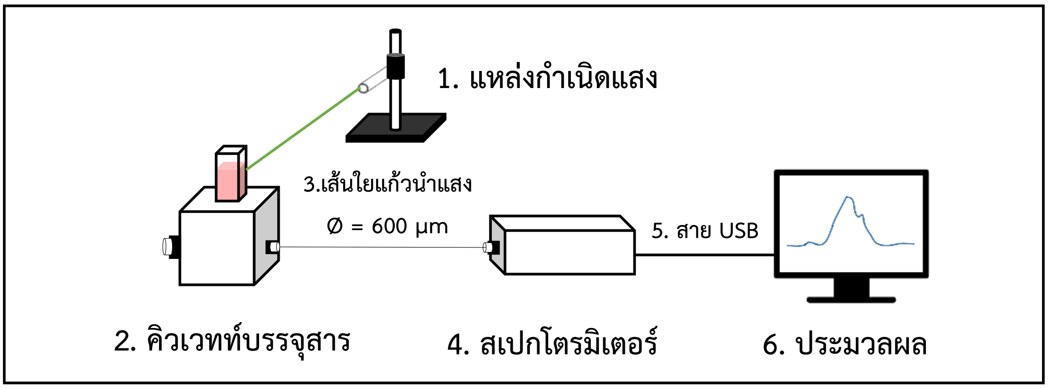
6) เครื่องคอมพิวเตอร์

7) เครื่องวัดดัชนีหักเห (ATAGO - Pocket refractometer) ใช้สำหรับวัดดัชนีหักเหของสารในช่วง 1.3306 – 1.5284

ในการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย ผู้วิจัยได้จัดระบบการวัดการเปล่งแสงดังรูปที่ 3.5 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 ระบบวัดการเปล่งแสงของสารละลาย (ก) ภาพจริง (ข) แผนภาพระบบวัด

จากแผนภาพระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลาย รูปที่ 3.5 แสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์จะตกกระทบกับสารตัวอย่างที่อยู่ในคิวเวทท์ในทิศทำมุม 90 องศา และส่องผ่านออกมาเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ด้วยสายใยแก้วนำแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร แสงที่เข้าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์จะถูกวิเคราะห์ส่งเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB และทำการวิเคราะห์ค่าการเปล่งแสงของสารละลายด้วยโปรแกรม Avasoft 8.1 เช่นกัน

3.3.3 ระบบการฉายแสงแบบต่อเนื่อง

เพื่อฉายแสงให้สารละลายโรดามีน 6จี ที่ถูกดูดซับด้วยอนุภาคเหล็กออกไซต์ให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก มีอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.6

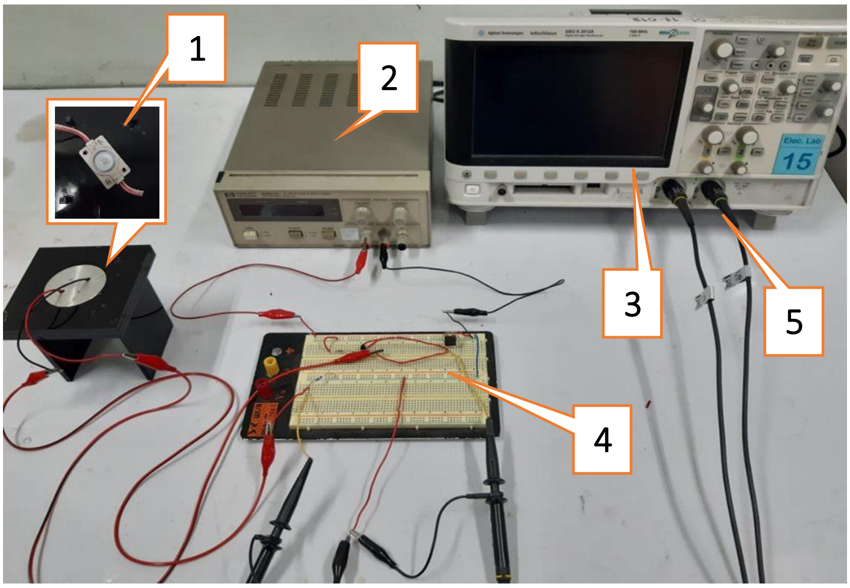
1) หลอดไดโอดเปล่งแสงสีขาว

2) แหล่งจ่ายไฟ

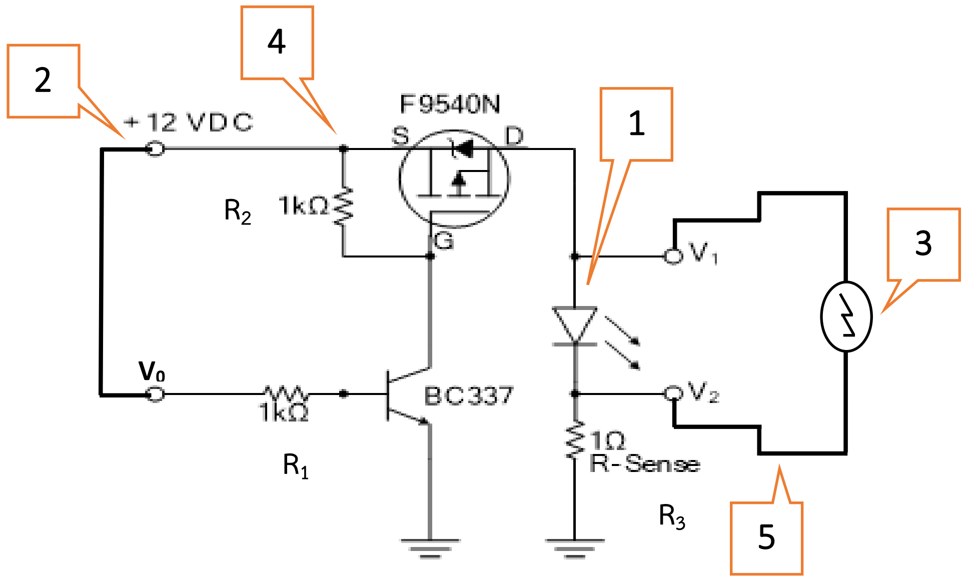
3) ออสซิลโลสโคป

4) วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (หลักการทำงานแสดงในบทที่ 2 หัวข้อ 2.6)

5) สายจับสัญญาณจากออสซิลโลสโคป



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 แสดงระบบการฉายแสงขาวแบบต่อเนื่อง (ก) แผนภาพจริง (ข) แผนภาพจำลอง

3.4 การเตรียมสารละลาย

ผู้วิจัยได้จัดเตรียมสารตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 การเตรียมสารละลายสีย้อม Rh6G

ขั้นตอนการเตรียม

1) ชั่งสารสีย้อม Rh6G ปริมาณ 0.0049 กรัม และนำมาทำละลายกับน้ำ DI ปริมาตร 10 มิลลิตร เพื่อเตรียมสารละลายตั้งต้นที่มีความเข้มข้น $1x10^{-3}$ โมลาร์ (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก)

2) เจือจางสารตั้งต้นเพื่อเตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.3 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ตารางที่ 3.3 แสดงการเตรียมสารละลาย Rh6G ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G (โมลาร์)	Rh6G ที่ความเข้มข้น $1x10^{-3}$ โมลาร์	เจือจางด้วยน้ำ DI (mL)
$1x10^{-6}$	0.1	49.9
$2x10^{-6}$	0.2	49.8
$3x10^{-6}$	0.3	49.7
$4x10^{-6}$	0.4	49.6
$5x10^{-6}$	0.5	49.5

3.4.2 การเตรียมวัสดุตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4

เพื่อศึกษาผลการดูดซับสีย้อม Rh6G ด้วยวัสดุนาโนแม่เหล็ก ผู้วิจัยได้จัดเตรียมสารแขวนลอยนาโนแม่เหล็กที่มีความเข้มข้นในช่วง 100 - 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

ขั้นตอนการเตรียม

ชั่งอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ปริมาณ 0.005 กรัม ปริมาณ 0.015 กรัม และปริมาณ 0.025 กรัม และนำมาทำละลายกับน้ำ DI ปริมาตร 50 มิลลิตร (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก)

3.5 การศึกษาการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ด้วย Fe_3O_4

การศึกษาดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ด้วยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยแบ่งเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

3.5.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารสีย้อม

ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการลดลงของสีย้อมจากสมการที่ (2.12) จะต้องทราบตัวแปรค่าความเข้มข้น (C) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการดูดกลืนแสง (A) ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงค่าความเข้มข้นสัมพันธ์กับค่าการดูดกลืนแสง จึงต้องมีกราฟมาตฐาน (Calibration curve) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว

<u>วัตถุประสงค์</u>

เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานของความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืน สำหรับใช้ในการหาค่าความเข้มข้นของสารตัวอย่าง

<u>วิธีการทดลอง</u>

1) นำสารละลายที่ได้จากการจัดเตรียมตารางที่ 3.3 มาวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงทังสเตน ซึ่งมีระบบการวัดดังรูป 3.4

2) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นกับความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงที่สุดของสารเพื่อหาสมการเชิงเส้น

3.5.2 การศึกษาผลของอัตราเร็วในการปั่นกวน

การปั่นกวนเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.1.2 ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงสนใจศึกษาอัตราเร็วในการปั่นกวนที่เหมาะสมเพื่อนำค่าที่ได้มาใช้กับการทดลอง

<u>วัตถุประสงค์</u>

เพื่อหาอัตราเร็วที่เหมาะสมของการปั่นกวน

<u>วิธีการทดลอง</u>

1) นำสารละลายสีย้อม Rh6G เข้มข้น 4×10^{-6} โมลาร์ (จากตาราง 3.3) ผสมกับตัวดูดซับ Fe_3O_4 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในอัตราส่วน 1:1 ลงในบีกเกอร์

2) ปั่นกวนในที่มืด ภายใต้เงื่อนไขไม่ปั่นกวนสารละลายและปั่นกวนสารละลายโดยใช้ความเร็วรอบการหมุน 1200 รอบต่อนาที และ 1500 รอบต่อนาที ตามลำดับ เป็นเวลา 150 นาที และทำการเก็บสารละลายสีย้อม 2 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน

3) นำสารละลายสีย้อมไปวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งมีระบบการวัดดังรูป 3.4

4) นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ไปหาความเข้มข้น โดยการเทียบจากกราฟมาตรฐาน (จากข้อ 3.5.1) เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม จากสมการที่ (2.12)

5) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการปั่นกวนกับค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม เพื่อหาอัตราเร็วที่เหมาะสมของการปั่นกวน

3.5.3 การศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับ

เวลาเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.1.1 ดังนั้นในหัวนี้จึงสนใจศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการเกิดกระบวนการดูดซับ (Treatment time) และนำค่าที่ได้มาใช้กับการทดลอง

<u>วัตถุประสงค์</u>

เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ

<u>วิธีการทดลอง</u>

1) นำสารละลายสีย้อม Rh6G เข้มข้น 5×10^{-6} โมลาร์ (จากตาราง 3.3) ผสมกับตัวดูดซับคอลลอยแม่เหล็ก Fe_3O_4 100 – 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในอัตราส่วน 1:1 ลงในบีกเกอร์

2) ปั่นกวนในที่มืดโดยใช้ความเร็วรอบการหมุนที่ดีที่สุด เป็นเวลา 150 นาที และทำการเก็บสารละลายสีย้อม 2 มิลลิลิตร ทุก ๆ 30 นาที จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน

3) นำสารละลายสีย้อมไปวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งมีระบบการวัดดังรูป 3.4

4) นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ไปหาความเข้มข้น โดยการเทียบจากกราฟมาตรฐาน (จากข้อ 3.5.1) เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม จากสมการที่ (2.12)

5) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ

3.5.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่หากใช้สารละลายสีย้อมที่มากเกินไปจะทำให้ความสามารถในการดูดซับ (q_e) มีค่าลดลง อธิบายดังสมการ (2.11) ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายสีย้อมด้วย

<u>วัตถุประสงค์</u>

เพื่อหาผลของความเข้มข้นของสารสีย้อมที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมและค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์

<u>วิธีการทดลอง</u>

1) นำสารละลายสีย้อม Rh6G เข้มข้นดังตาราง 3.3 ผสมกับตัวดูดซับ Fe_3O_4 ที่เตรียมจากข้อ 3.4.2 ในอัตราส่วน 1:1 ลงในบีกเกอร์

2) ปั่นกวนในที่มืดด้วยอัตราเร็ว 1500 รอบต่อนาที ทำการทดลองเป็นเวลา 150 นาที และทำการเก็บสารละลายสีย้อม 2 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน

3) นำสารละลายสีย้อมไปวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งมีระบบการวัดดังรูป 3.4 นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ไปหาความเข้มข้น โดยการเทียบจากกราฟมาตรฐาน (จากข้อ 3.5.1) เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม จากสมการที่ (2.12)

4) นำสารละลายสีย้อมไปวัดสเปกตรัมการเปล่งแสง ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ให้แสงสีเขียว ซึ่งมีระบบการวัดดังรูป 3.5

5) วัดค่าดัชนีหักเหแสง (Refractive index) ของสารละลายสีย้อม ด้วยเครื่องวัดดัชนี รุ่น Pocket refractometer จากบริษัท ATAGO

6) นำค่าที่ได้จากข้อ 3 - 5 ไปคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยีลด์ จากสมการที่ (2.27)

7) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยีลด์ เพื่อวิเคราะห์ผลของเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมาว่าส่งผลต่อค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์อย่างไร

3.5.5 การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ

เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับสารละลายมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่การใช้ตัวดูดซับที่มากเกินไปจะทำให้ความสามารถในการดูดซับ (q_e) มีค่าลดลง อธิบายดังสมการ (2.11) ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสมของวัสดุตัวดูดซับด้วย

<u>วัตถุประสงค์</u>

เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของวัสดุตัวดูดซับ Fe_3O_4 ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมและค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์

<u>วิธีการทดลอง</u>

1) นำสารละลายสีย้อม Rh6G เข้มข้นดังตาราง 3.3 ผสมกับตัวดูดซับคอลลอยแม่เหล็ก Fe_3O_4 ความเข้มข้น 100 – 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในอัตราส่วน 1:1 ลงในบีกเกอร์

2) ปั่นกวนในที่มืดด้วยอัตราเร็ว 1500 รอบต่อนาที ทำการทดลองเป็นเวลา 150 นาที และทำการเก็บสารละลายสีย้อม 2 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน

3) นำสารละลายสีย้อมไปวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งมีระบบการวัดดังรูป 3.4 นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ไปหาความเข้มข้น โดยการเทียบจากกราฟมาตรฐาน (จากข้อ 3.5.1) เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม จากสมการที่ (2.12)

4) นำสารละลายสีย้อมไปวัดสเปกตรัมการเปล่งแสง ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ซึ่งมีระบบการวัดดังรูป 3.5

5) วัดค่าดัชนีหักเหแสง (Refractive index) ของสารละลายสีย้อม ด้วยเครื่องวัดดัชนี

6) นำค่าที่ได้จากข้อ 3 - 5 ไปคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยีลด์ จากสมการที่ (2.27)

7) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยีลด์ เพื่อวิเคราะห์ผลของเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมาว่าส่งผลต่อค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์อย่างไร

3.5.6 การศึกษากลไกการย่อยสลายสีย้อม Rh6G โดยใช้ตัวดูดซับ Fe_3O_4 ภายใต้การใช้แสง

การฉายแสงจะทำให้โมเลกุลถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่มีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์กระโดดขึ้นไปอยู่ที่แถบคอนดักชัน ทำให้เกิดช่องว่าง (Hole, h^+) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ และเกิดอิเล็กตรอน (e^-) ขึ้นที่แถบคอนดักชัน โดยช่องว่างจะรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล (•OH) ส่วนอิเล็กตรอนจะจับกับออกซิเจนเกิดเป็นซุปเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (•O^-_2) ซึ่งทั้งสองตัวเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง ทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับมีประสิทธิภาพมากขึ้น

<u>วัตถุประสงค์</u>

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมื่อฉายแสงขาวกับในที่มืด

<u>วิธีการทดลอง</u>

1) นำสารละลายสีย้อม Rh6G ความเข้มข้น 5×10^{-6} โมลลาร์ ผสมกับตัวดูดซับ Fe_3O_4 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในอัตราส่วน 1:1 ลงในบีกเกอร์

2) ปั่นกวนพร้อมกับฉายแสงและทำการเก็บสารละลายสีย้อม 2 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน

3) นำสารละลายสีย้อมไปวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งมีระบบการวัดดังรูป 3.4 นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ไปหาความเข้มข้น โดยการเทียบจากกราฟมาตรฐาน (จากข้อ 3.5.1) เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม จากสมการที่ (2.12)

4) นำสารละลายสีย้อมไปวัดสเปกตรัมการเปล่งแสง ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ซึ่งมีระบบการวัดดังรูป 3.5

5) วัดค่าดัชนีหักเหแสง (Refractive index) ของสารละลายสีย้อม ด้วยเครื่องวัดดัชนี

6) นำค่าที่ได้จากข้อ 3 - 5 ไปคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยีลด์ จากสมการที่ (2.27)

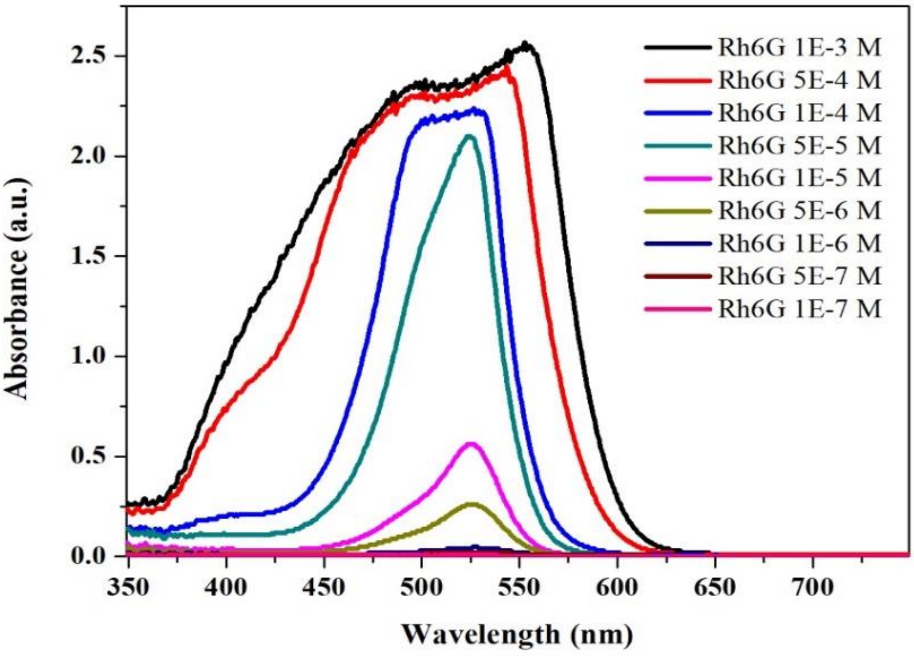
7) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนส์ควอนตัมยีลด์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมื่อฉายแสงกับในที่มืด

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลายโรดามีน 6จี โดยผู้วิจัยได้ศึกษาผลของการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ด้วยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ได้แก่ อัตราเร็วในการปั่นกวนสาร เวลา ความเข้มข้นของสารสีย้อม ปริมาณตัวดูดซับ รวมถึงกลไกการย่อยสลายสีย้อมภายใต้การฉายแสงและไม่ฉายแสงขาว ที่ส่งผลต่อค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ โดยผลการศึกษาแต่ละหัวข้อมีรายละเอียดดังนี้

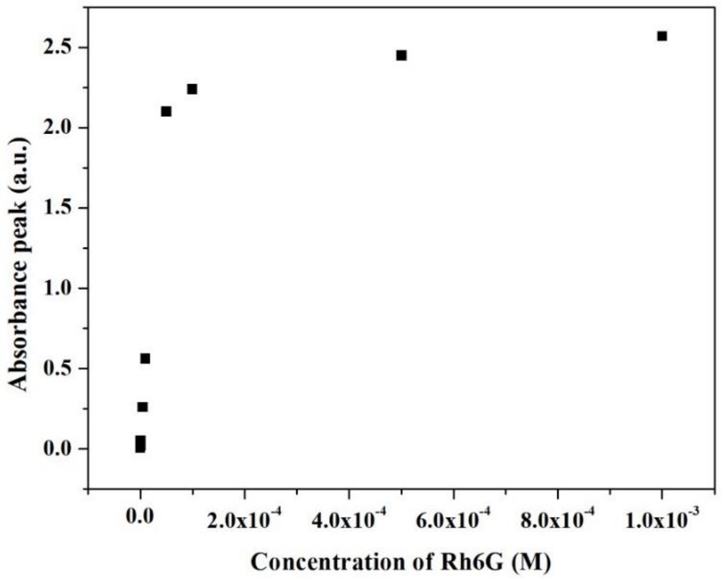
4.1 ผลการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลายโรดามีน 6จี

จากผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสีย้อม Rh6G ในรูปของสารละลาย ในช่วงความเข้มข้น 10^{-7} ถึง 10^{-3} โมลาร์ โดยวิธีการที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3.1 ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.1 ผลการวัดแสดงให้เห็นว่า สารละลาย Rh6G ดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 600 นาโนเมตร พีคการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตรและค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย เปลี่ยนแปลงในช่วง 0.006 - 2.571



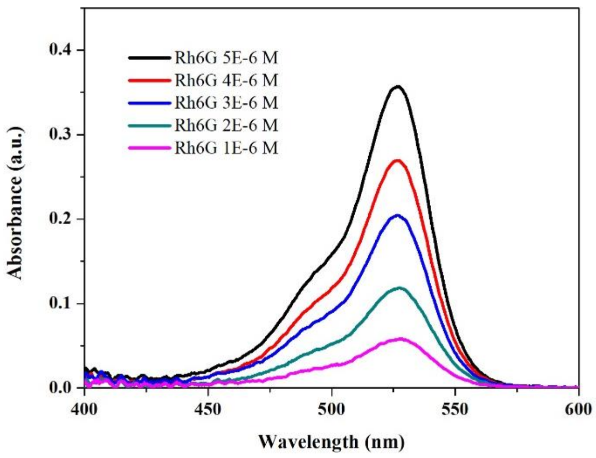
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสีย้อม Rh6G ช่วง $1x10^{-7}$ ถึง $1x10^{-3}$ โมลาร์

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับพีคการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลาย Rh6G ในช่วงความเข้มข้น $1x10^{-7}$ ถึง $1x10^{-3}$ โมลาร์ แสดงดังรูปที่ 4.2 จากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของในช่วง $1x10^{-4}$ ถึง $1x10^{-3}$ โมลาร์ เนื่องจากในช่วงความเข้มข้นดังกล่าวสารละลายมีความเข้มข้นมากเกินไปทำให้โมเลกุลของสารส่วนหนึ่งไม่สัมผัสกับแสง ดังนั้นค่าการดูดกลืนแสงจะไม่สะท้อนปริมาณโมเลกุลของสารที่มีในสารละลาย (Inner filter effect) จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงเลือกสารละลายที่มีช่วงความเข้มข้นน้อยๆ มาใช้ในการทดลอง

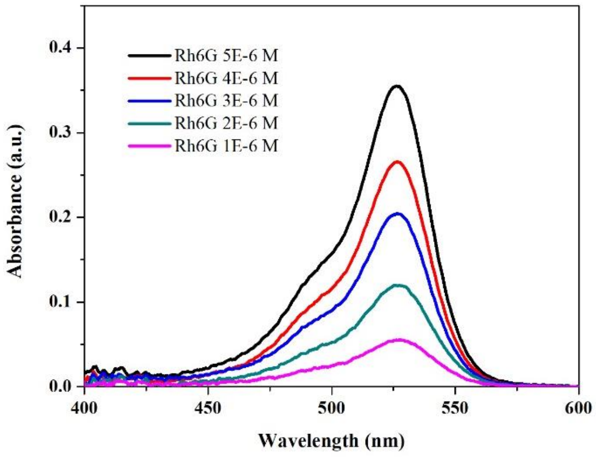


รูปที่ 4.2 พีคการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารสีย้อม Rh6G ช่วง $1x10^{-7}$ ถึง $1x10^{-3}$ โมลาร์

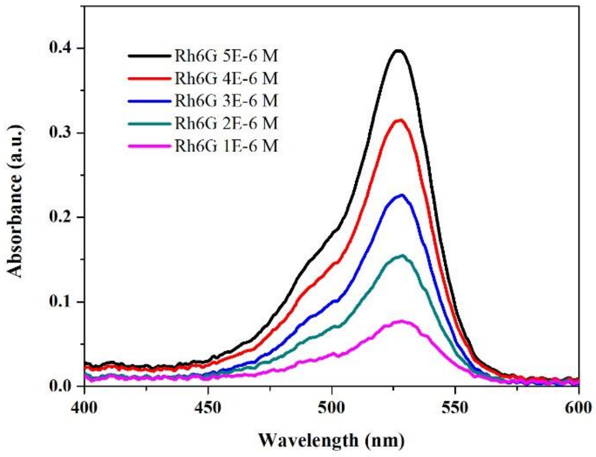
ผู้วิจัยเลือกสารละลาย Rh6G ในช่วงความเข้มข้น $1x10^{-6}$ ถึง $5x10^{-6}$ โมลาร์ สำหรับใช้ในการทดลอง ดังเหตุผลที่กล่าวในข้างต้น โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อให้ข้อมูลมีความเชื่อมั่นมากขึ้น ได้ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสีย้อม Rh6G แสดงดังรูปที่ 4.3 ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าสารละลาย Rh6G ดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 600 นาโนเมตร พีคการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร มีค่าการดูดกลืนแสงเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.05 – 0.40 จากผลการวัดซ้ำทั้ง 3 ครั้ง เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสิถิติ มีค่าเฉลี่ยของการวัดครั้งที่ 1 อยู่ที่ 0.23 ± 0.13 ครั้งที่ 2 อยู่ที่ 0.20 ± 0.12 และครั้งที่ 3 อยู่ที่ 0.21 ± 0.12 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าทางสถิติของของมูลทั้ง 3 ครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน



(ก) วัดครั้งที่ 1



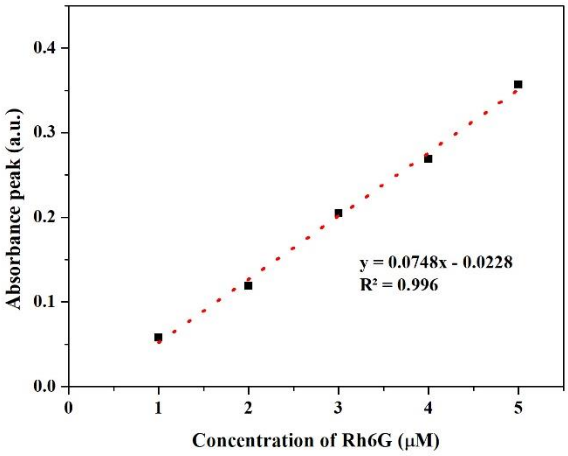
(ข) วัดครั้งที่ 2



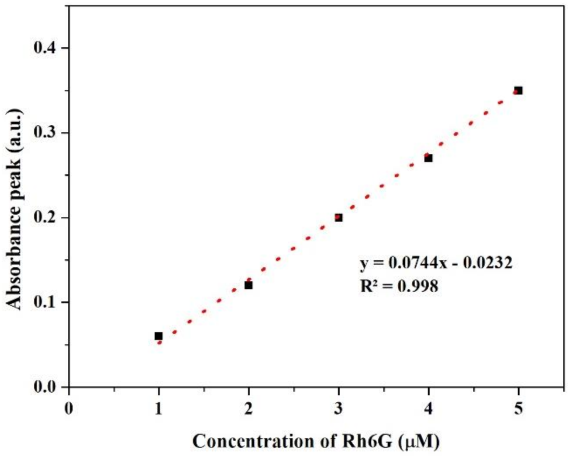
(ค) วัดครั้งที่ 3

รูปที่ 4.3 (ก) ถึง (ค) แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสีย้อม Rh6G ที่ความเข้มข้นในช่วง $1x10^{-6}$ ถึง $5x10^{-6}$ โมลาร์

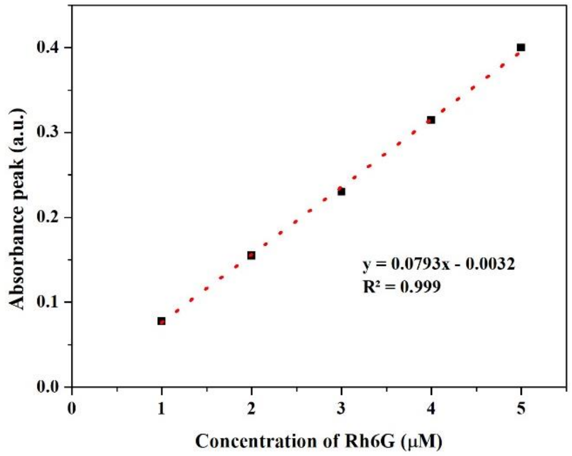
เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ในช่วงความเข้มข้น $1x10^{-6}$ ถึง $5x10^{-6}$ โมลาร์ แสดงดังรูปที่ 4.4 จากกราฟพบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟของการทดลอง โดยค่า R^2 ของครั้งที่ 1 เท่ากับ 0.999 ค่า R^2 ของครั้งที่ 2 เท่ากับ 0.996 และมีค่า R^2 ของ ครั้งที่ 3 เท่ากับ 0.997 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ที่กล่าวว่าค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสาร ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.2



(ก) วัดครั้งที่ 1



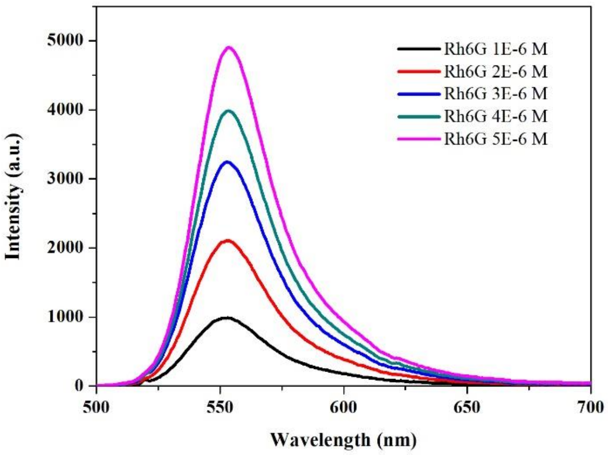
(ข) วัดครั้งที่ 2



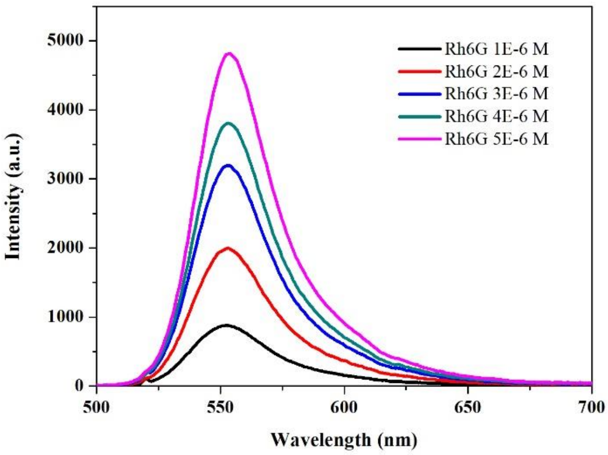
(ค) วัดครั้งที่ 3

รูปที่ 4.4 (ก) ถึง (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสาร Rh6G ที่ความเข้มข้นในช่วง 1×10^{-6} ถึง 5×10^{-6} โมลาร์

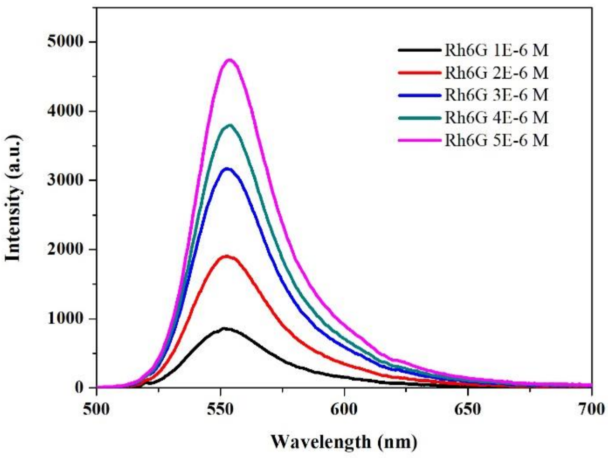
จากผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ในช่วงความเข้มข้นที่กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.5 แสดงดังรูปที่ 4.5 ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าสารละลาย Rh6G สามารถเปล่งแสงได้ในช่วงความยาวคลื่น 500 ถึง 700 นาโนเมตร มีค่าการเปล่งแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 552 นาโนเมตร และจากกราฟยังพบว่าค่าการเปล่งแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 857.16 ถึง 4904.23 ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายมีค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่าการเปล่งแสงเพิ่มขึ้น จากผลการวัดซ้ำทั้ง 3 ครั้ง เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ มีค่าเฉลี่ยของการวัดครั้งที่ 1 อยู่ที่ 2553.58 ± 1534.76 ครั้งที่ 2 อยู่ที่ 2595.67 ± 1536.94 และครั้งที่ 3 อยู่ที่ 2703.61 ± 1540.08 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าทางสถิติของของมูลทั้ง 3 ครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน



(ก) วัดครั้งที่ 1



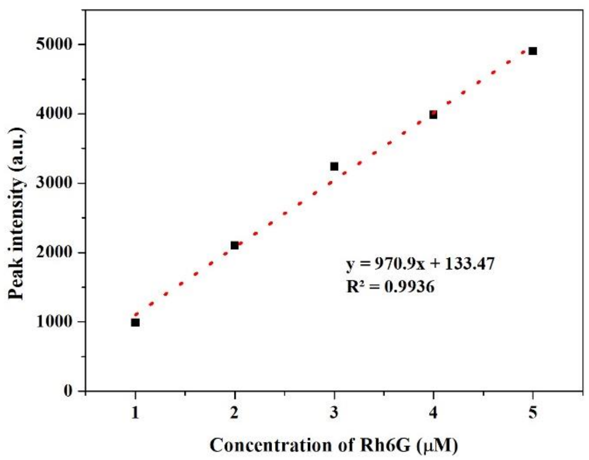
(ข) วัดครั้งที่ 2



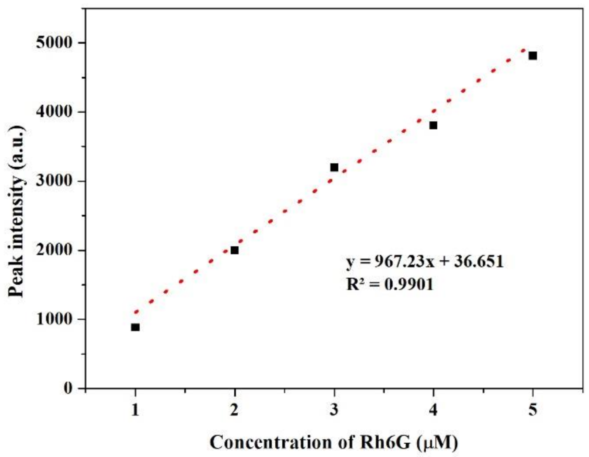
(ค) วัดครั้งที่ 3

รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสารสีย้อม Rh6G ที่ความเข้มข้น 1x10^{-6} ถึง 5x10^{-6} โมลาร์

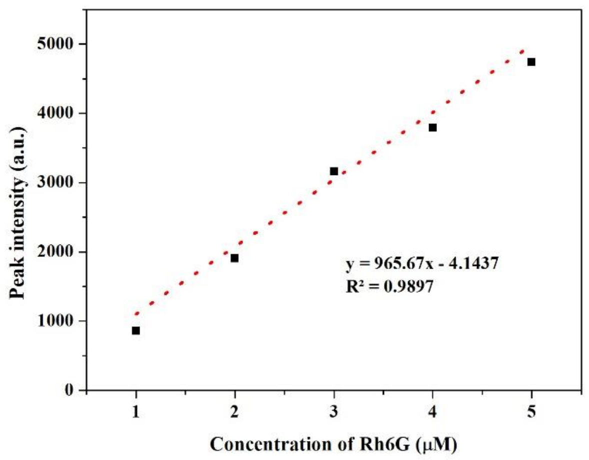
เมื่อนำสารละลาย Rh6G ความเข้มข้นดังกล่าว มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการเปล่งแสงของสารละลายแสดงดังรูปที่ 4.6 จากกราฟพบว่าข้อมูลมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้น สังเกตได้จากค่า R^2 ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟของการทดลอง โดยค่า R^2 ของครั้งที่ 1 เท่ากับ 0.9936 ค่า R^2 ของครั้งที่ 2 เท่ากับ 0.9901และมีค่า R^2 ของ ครั้งที่ 3 เท่ากับ 0.9897 ตามลำดับ



(ก) วัดครั้งที่ 1



(ข) วัดครั้งที่ 2



(ค) วัดครั้งที่ 3

รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการเปล่งแสงของสารสีย้อม Rh6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} ถึง 5×10^{-6} โมลาร์

จากผลการวัดที่แสดงข้างต้นจะเห็นว่าช่วงที่สารละลายมีการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงและค่าการเปล่งแสงแบบเป็นเชิงเส้นคือช่วงความเข้มข้น $1x10^{-6}$ ถึง $5x10^{-6}$ โมลาร์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกนำสารละลายที่อยู่ในช่วงความเข้มข้นดังกล่าวมาทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ด้วยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ได้แก่ อัตราเร็วในการปั่นกวนสาร เวลา ความเข้มข้นของสารสีย้อม ปริมาณตัวดูดซับ รวมถึงกลไกการย่อยสลายสีย้อมภายใต้การฉายแสงและไม่ฉายแสงขาว ที่ส่งผลต่อค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์

4.2 ผลการการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายโรดามีน 6จี

จากการทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในย่านความเข้มข้น $1x10^{-6}$ – $5x10^{-6}$ โมลาร์ โดยอาศัยการทดลองที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3 ได้ผลดังรูปที่ 4.4 (ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1) ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโรดามีน 6จี แปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้น มีค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนสูงสุดดังสมการ

$$y = 0.0793x - 0.0032 \qquad (4.1)$$

เมื่อ

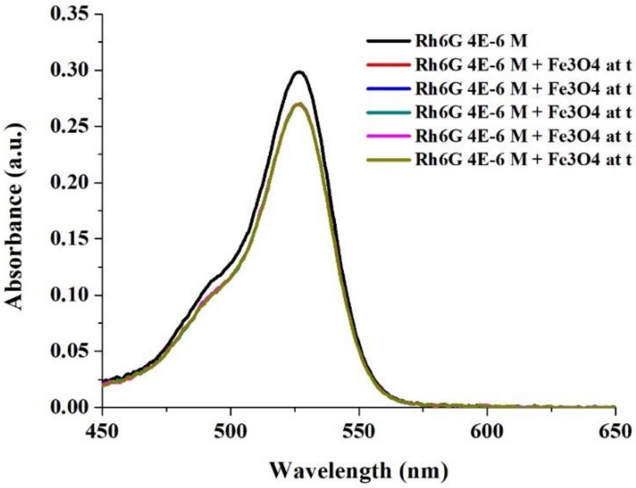
x คือ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมโรดามีน 6จี (โมลาร์)

y คือ ค่าพีคการดูดกลืนแสงสูงสุด

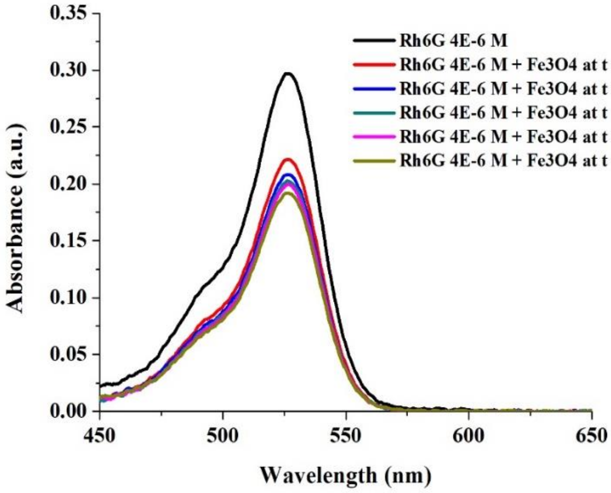
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีต่อการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ด้วย Fe_3O_4

4.3.1 ผลการศึกษาอัตราเร็วในการปั่นกวนสาร

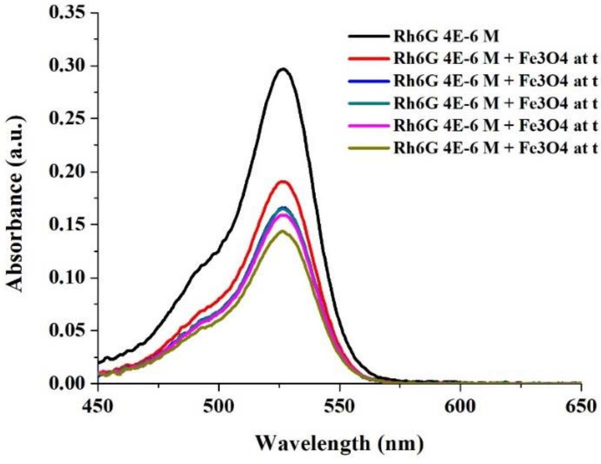
จากผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสีย้อม Rh6G ในรูปของสารละลายที่ความเข้มข้น $4x10^{-6}$ โมลาร์ ผสมกับตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยอาศัยการทดลองที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.5.2 ภายใต้เงื่อนไขไม่ปั่นกวนสารละลายและปั่นกวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 1200 รอบต่อนาที และ 1500 รอบต่อนาที ตามลำดับ ทำการทดลองเป็นเวลา 150 นาที ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.7 ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสดงให้เห็นว่าเมื่อไม่ปั่นกวนสารละลายส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับการปั่นกวน ซึ่งเมื่อเพิ่มการปั่นกวนสารละลายโดยใช้อัตราเร็วในการปั่นกวน 1200 รอบต่อนาที และ 1500 รอบต่อนาที พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีค่าลดลงจากเดิม 2 เท่า



(ก) ไม่ปั่นกวนสารละลาย



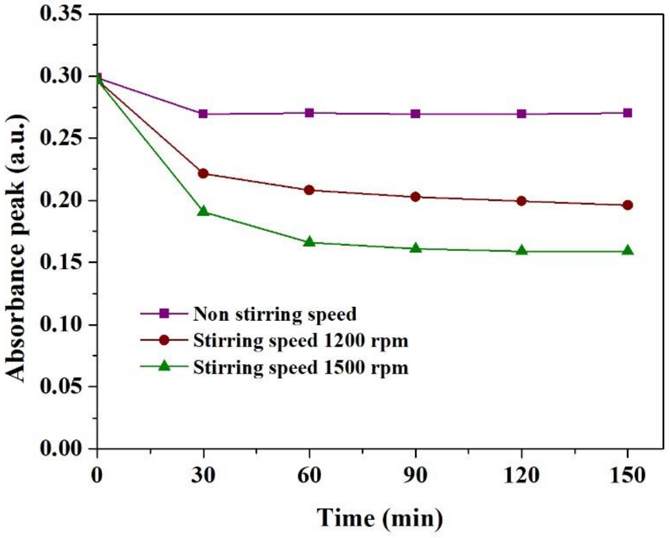
(ข) ปั่นกวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 1200 รอบต่อนาที



(ค) ปั่นกวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 1500 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย (ก) ไม่ปั่นกวนสารละลาย (ข) และ (ค) ปั่นกวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 1200 รอบต่อนาที และ 1500 รอบต่อนาที ตามลำดับ

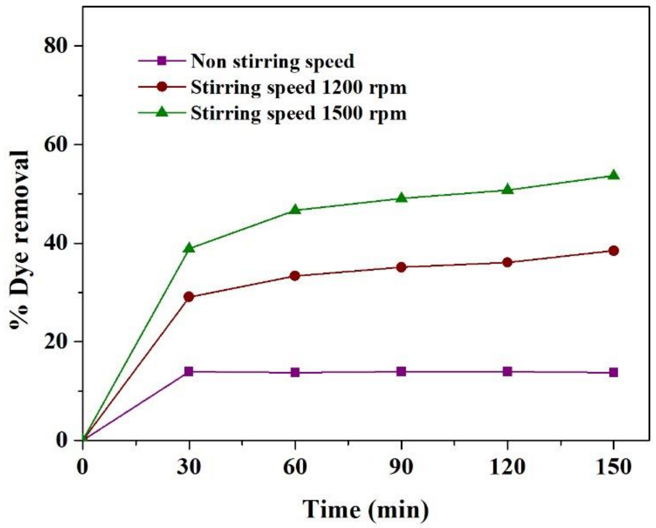
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีคการดูดกลืนแสงกับเวลาของสารละลาย Rh6G ความเข้มข้น $4x10^{-6}$ โมลาร์ ผสมกับตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้เงื่อนไขไม่ปั่นกวนสารละลายและปั่นกวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 1200 รอบต่อนาที และอัตราเร็ว1500 รอบต่อนาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.8 จากกราฟพบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงในช่วงเวลา 30 ถึง 150 นาที ซึ่งเมื่อไม่ปั่นกวนสารมีค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ 0.074 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปั่นกวนสารด้วยอัตราเร็ว 1200 รอบต่อนาที มีค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ 2.3538 เปอร์เซ็นต์ และอยู่ที่ 2.565 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอัตราเร็ว 1500 รอบต่อนาที เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเงื่อนไขการปั่นกวนกับไม่ปั่นกวนสารละลายพบว่าเมื่อเพิ่มการปั่นกวนโดยใช้อัตราเร็วในการปั่นกวน 1200 รอบต่อนาที และ 1500 รอบต่อนาที ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลงถึง 2 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มการปั่นกวนทำให้อนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 สามารถเกาะกับสีย้อมได้มากขึ้น อีกทั้งการเพิ่มความเร็วรอบทำให้อนุภาคนาโนแม่เหล็กออกไซด์สัมผัสหรือชนกับสีย้อมได้มากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีคการดูดกลืนแสงกับอัตราเร็วในการปั่นกวนสารละลาย

เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงจากเงื่อนไขที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ไปหาความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ ด้วยสมการที่ 4.1 จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมจากสมการที่ 2.12 เพื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลา ได้กราฟดังรูปที่ 4.9 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก มีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ 1.67 เปอร์เซ็นต์ 27.67 เปอร์เซ็นต์ และ 32.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หลังจากนั้นมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลง และจากกราฟยังพบว่าเมื่อไม่ปั่นกวนสารละลายจะสามารถกำจัดสีย้อมได้เพียง 13.76 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มการปั่นกวนส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อใช้อัตราเร็วในการปั่นกวน 1200 รอบต่อนาที จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงสุดที่ 38.47 เปอร์เซ็นต์ และหากปั่นกวนสารด้วยอัตราเร็ว 1500 รอบต่อนาที จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงถึง 53.67 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเงื่อนไขการปั่นกวนกับไม่ปั่นกวนสารละลายพบว่าการเพิ่มการปั่นกวนส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากการปั่นกวนเป็นการเพิ่มโอกาสให้อนุภาคของเหล็กมีโอกาสเกาะกับสีย้อมได้มากขึ้นทำให้เกิดการดูดซับมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มการปั่นกวนสารละลายจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมีค่าสูงกว่าการไม่ปั่นกวน [33]

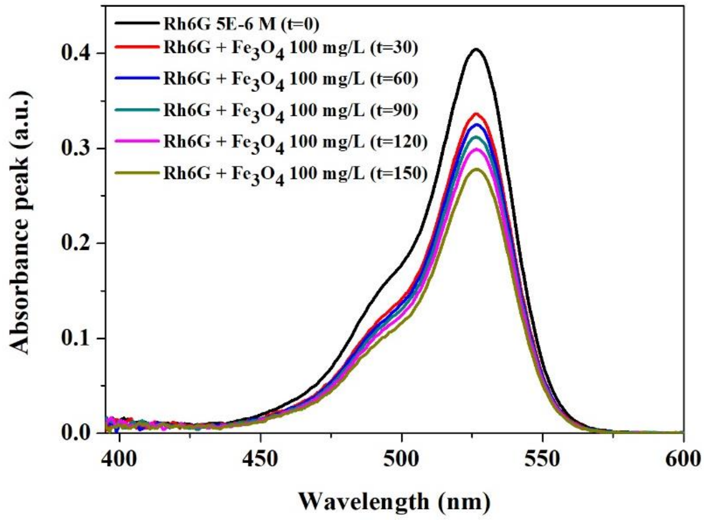


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลา เมื่อใช้อัตราเร็วในการปั่นกวนที่แตกต่างกัน

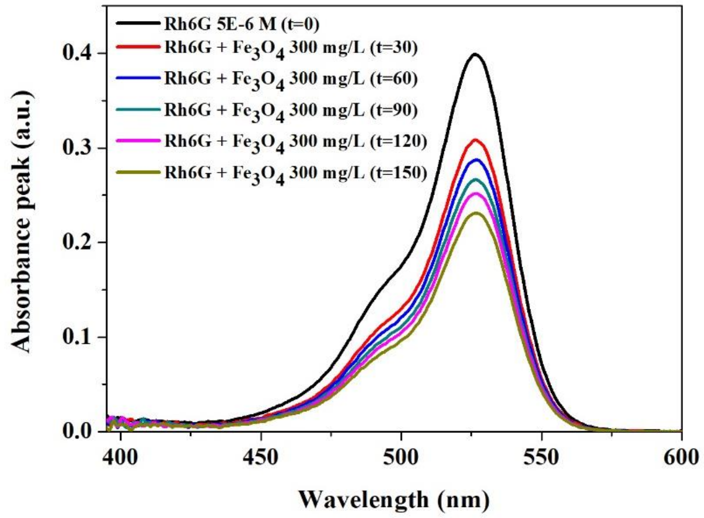
ดังนั้นจากเหตุผลดังที่กล่าวไปข้างต้นผู้วิจัยจึงเพิ่มการปั่นกวนสารละลาย โดยเลือกใช้อัตราเร็วในการปั่นกวน 1500 รอบต่อนาที เป็นอัตราเร็วที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดลอง

4.3.2 การศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับ

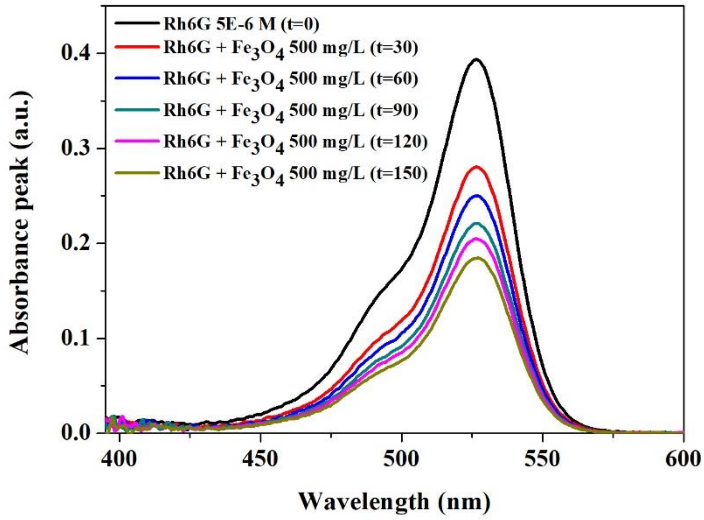
ในการศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม Rh6G ความเข้มข้น $5x10^{-6}$ โมลต่อลิตร ผสมกับตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีการที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.6.3 เป็นเวลา 150 นาที ได้ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง แสดงดังรูปที่ 4.10 ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งลดลงถึง 37.11 เปอร์เซ็นต์ 53.30 เปอร์เซ็นต์ และ 72.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเนื่องจากมีระยะเวลาในการสัมผัสมากขึ้น



(ก) สารละลายโรดามีน 6จี 5x10^{-6} โมลต่อลิตร ผสมกับ Fe_3O_4 100 มิลลิกรัมต่อลิตร



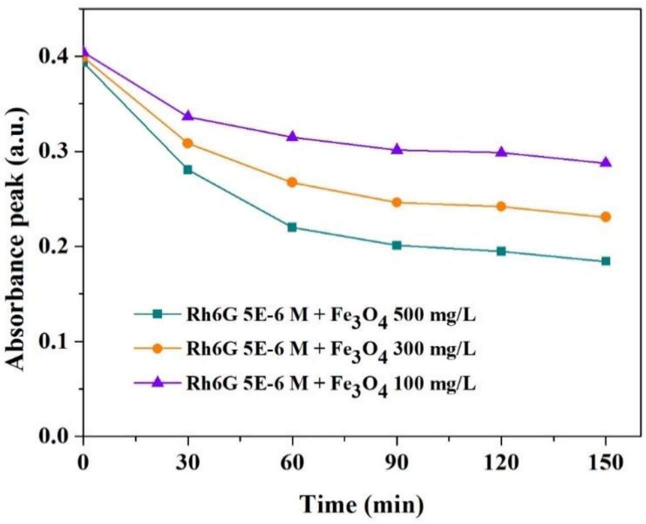
(ข) สารละลายโรดามีน 6จี 5x10^{-6} โมลต่อลิตร ผสมกับ Fe_3O_4 300 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ค) สารละลายโรดามีน 6จี 5x10^{-6} โมลต่อลิตร ผสมกับ Fe_3O_4 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

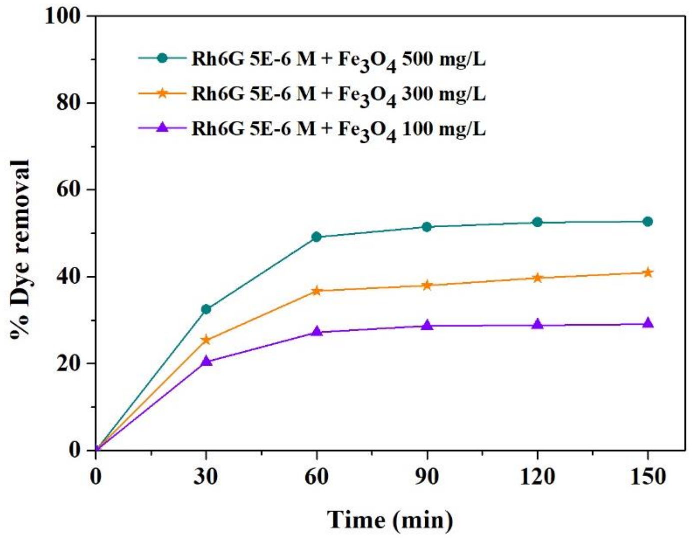
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ที่ 5x10^{-6} โมลต่อลิตร ผสมกับ Fe_3O_4

เมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีคการดูดกลืนแสงกับเวลาของสารละลาย Rh6G ความเข้มข้น $5x10^{-6}$ โมลาร์ ผสมกับตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่มีความเข้มข้นในช่วง 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้กราฟแสดงดังรูปที่ 4.11 จากกราฟพบว่าค่าการดูดซับภายหลังจากเติมสารคอลลอยด์ของแม่เหล็ก Fe_3O_4 จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก อยู่ที่ 18.33 เปอร์เซ็นต์ 25.73 เปอร์เซ็นต์ และ 33.43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลา 60 นาที หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงในช่วงเวลา 60 ถึง 150 นาที เนื่องจากในช่วงแรกที่ว่างบนผิวของตัวดูดซับยังคงมีมากและมีความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลาย จึงเกิดการดูดซับสีย้อมได้มาก หลังจากนั้นการดูดซับจะลดลงจนเข้าสู่ภาวะสมดุล เพราะที่ว่างเหล่านั้นดูดซับสีย้อมไว้แล้ว



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีคการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ความเข้มข้น $5x10^{-6}$ โมลต่อลิตร ผสมกับ Fe_3O_4

ผลการศึกษาเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมื่อเติมตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่มีความเข้มข้นในช่วง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.12 จากการศึกษาพบว่าที่เวลา 150 นาที สามารถดูดซับสีย้อมได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ 41 เปอร์เซ็นต์ และ 53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากมีเวลาที่อนุภาคนาโนแม่เหล็กทำปฏิกิริยากับสาร Rh6G ที่ปนอยู่ในน้ำมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 30 นาที ความสามารถในการดูดซับสารสีย้อมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและดำเนินจนถึงเวลา 60 นาที หลังจากนั้นการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยจนไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากในช่วงแรกพื้นที่ผิวของตัวดูดซับยังมีปริมาณมากส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมาก ระยะเวลาในการดูดซับดำเนินไปเรื่อยๆ จนกระทั่งปริมาณพื้นที่ในการดูดซับอิ่มตัว อัตราการดูดซับจะคงที่ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับจึงมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคงที่ [31]

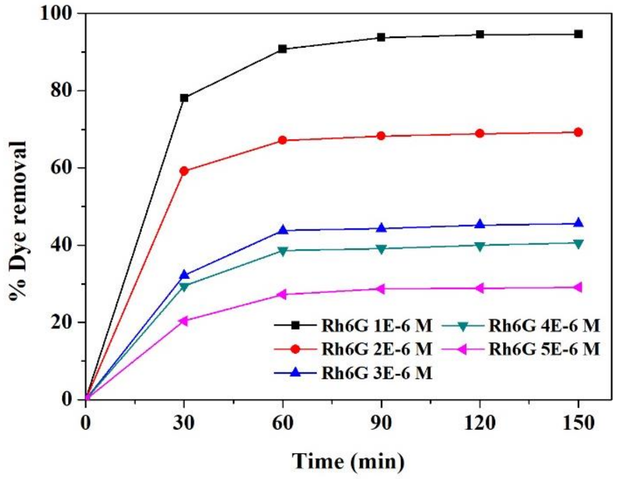


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของสารละลาย Rh6G ความเข้มข้น 5×10^{-6} โมลต่อลิตร ผสมกับ Fe_3O_4

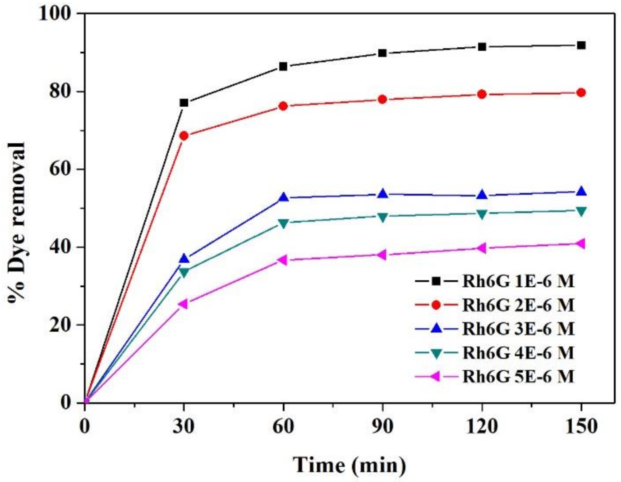
ดังนั้นจากเหตุผลดังที่กล่าวไปข้างต้นเวลาที่เหมาะสมที่อนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 เกิดการดูดซับสีย้อม Rh6G และเข้าสู่สมดุลของการดูดซับคือ 60 นาที

4.3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G

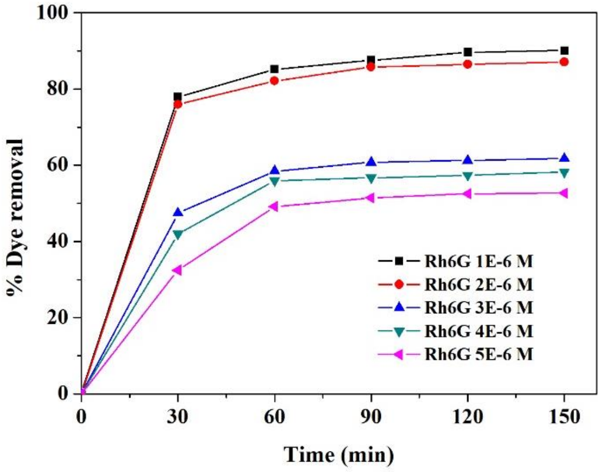
จากผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Rh6G ในช่วงความเข้มข้น 1×10^{-6} โมลต่อลิตร 2×10^{-6} โมลต่อลิตร 3×10^{-6} โมลต่อลิตร 4×10^{-6} โมลต่อลิตร และ 5×10^{-6} โมลต่อลิตร โดยใช้ตัวดูดซับสารแขวนลอยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ในช่วงความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปั่นกวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 150 นาที ด้วยวิธีการที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.5.4 จากนั้นนำผลที่ได้จากการวัดไปคำนวณหาความเข้มข้นและประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมด้วยสมการที่ 4.1 และ 2.12 ตามลำดับ และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมื่อเติมตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ในช่วงความเข้มข้น 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.13 จากกราฟพบว่าการดูดซับสารสีย้อม Rh6G ด้วยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ทุกๆ ช่วงความเข้มข้นมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน และเข้าสู่สมดุลหลังจากเวลาผ่านไป 60 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซับน้อยลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นปริมาณของสีจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเกิดการดูดซับน้อยย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมน้อยลงด้วย [31, 33 - 35]



(ก) ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Rh6G เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 100 มิลลิกรัมต่อลิตร



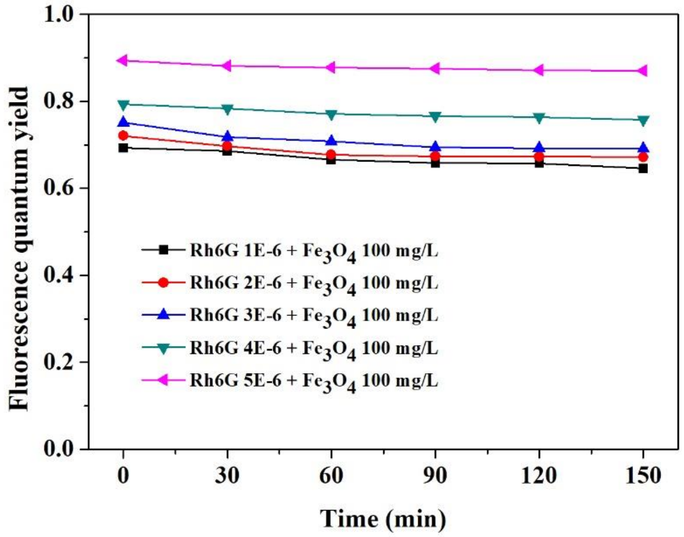
(ข) ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Rh6G เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 300 มิลลิกรัมต่อลิตร



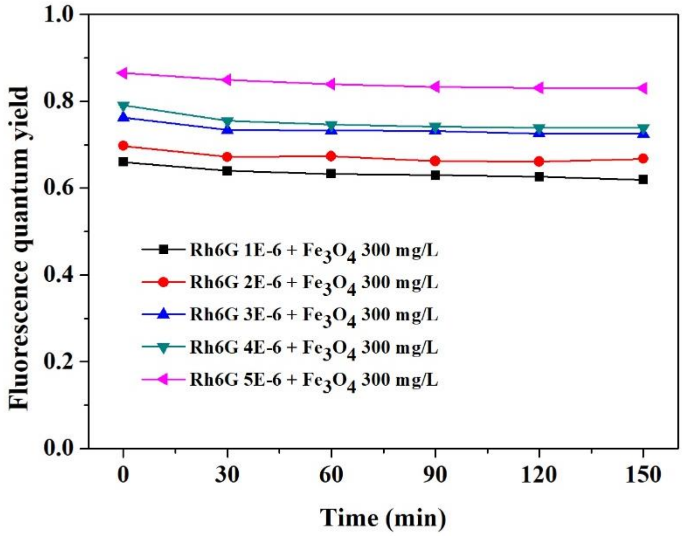
(ค) ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Rh6G เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.13 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้นต่างๆ

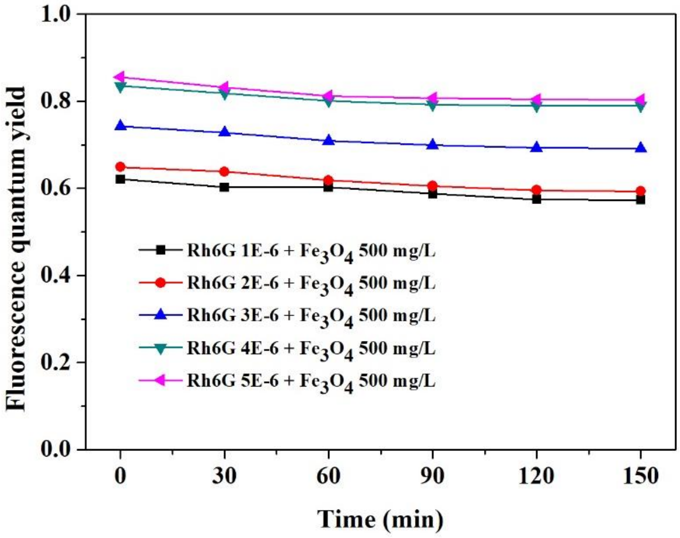
เมื่อนำสารละลายความเข้มข้นที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ไปวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงและวัดค่าดัชนีหักเหแสง จากนั้นนำค่าต่างๆ ที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์ฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ด้วยสมการที่ (2.27) และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์กับเวลา ได้กราฟแสดงดังรูปที่ 4.14 จากกราฟพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสีย้อมโรดามีน 6จี ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารสีย้อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีจำนวนอนุภาคของสารเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่ออนุภาคเหล่านั้นได้รับการกระตุ้นจากความยาวคลื่นที่ทำให้เกิดการเปล่งแสงจึงเกิดการเรืองแสงมากขึ้น และจากกราฟยังพบว่าค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารสีย้อมโรดามีน 6จี ทุกความเข้มข้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากภายในเวลา 60 นาที และจะเริ่มคงที่ในช่วงเวลา 60 ถึง 150 นาที เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ



(ก) ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ Rh6G เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 100 มิลลิกรัมต่อลิตร



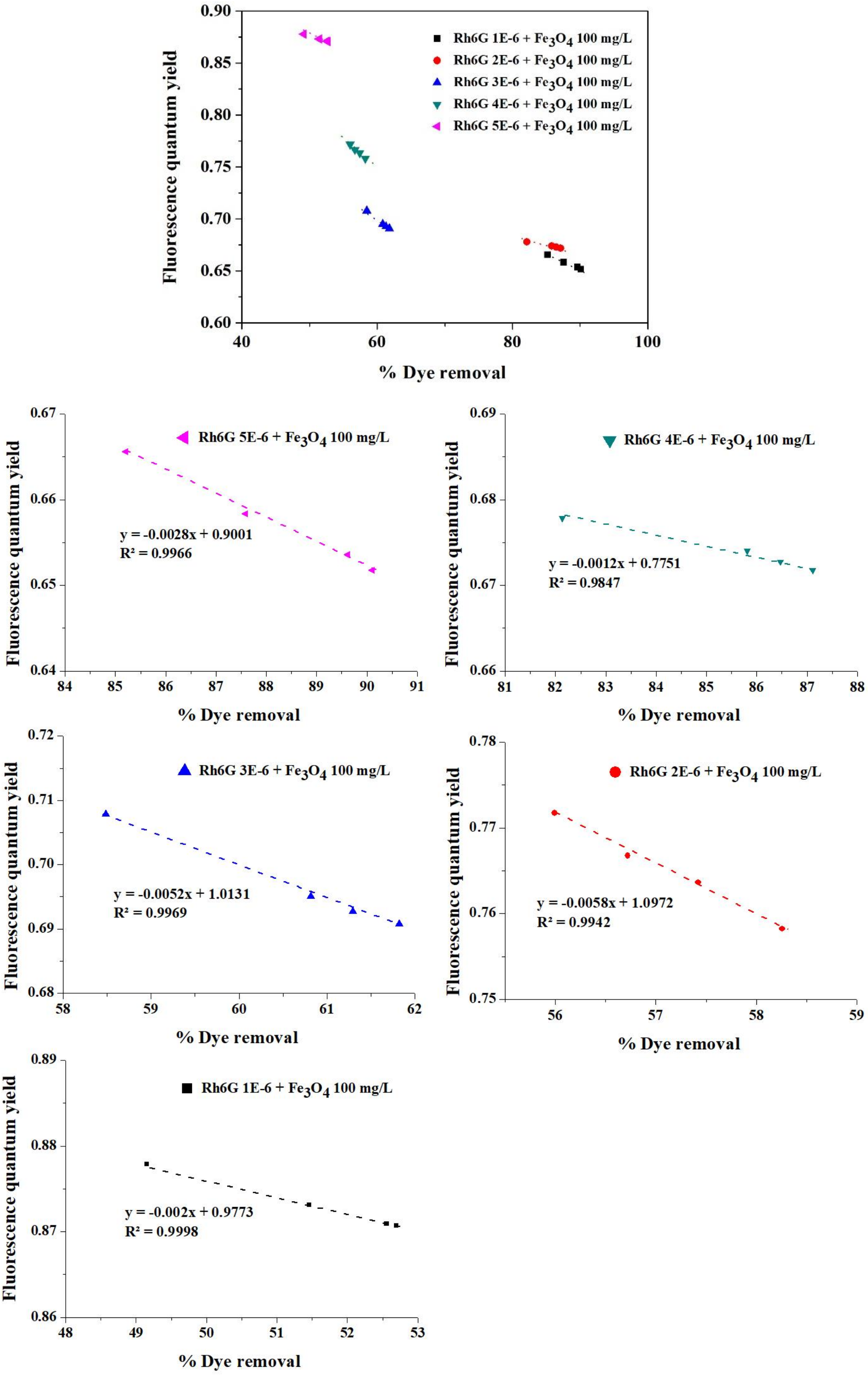
(ข) ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ Rh6G เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 300 มิลลิกรัมต่อลิตร



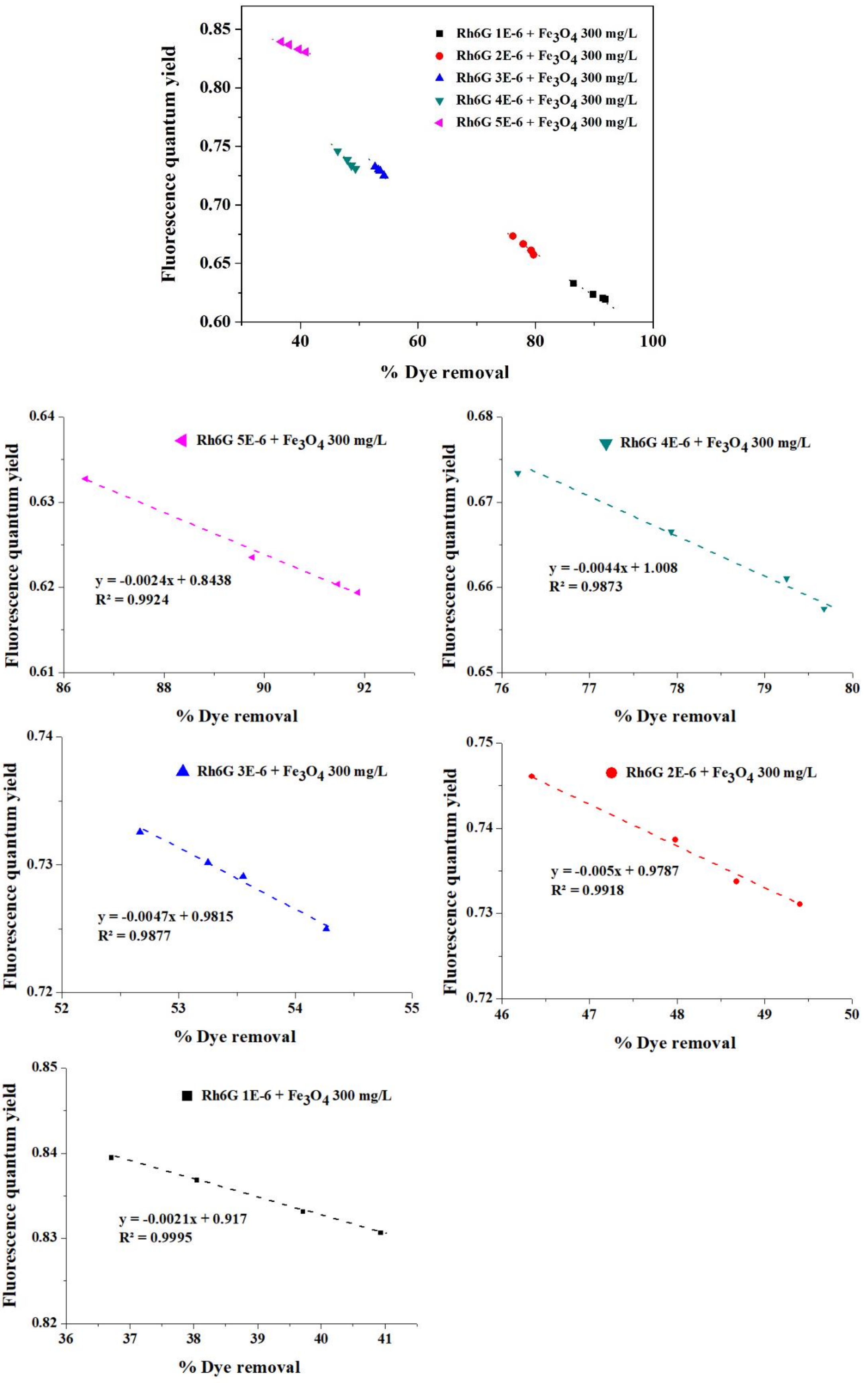
(ค) ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ Rh6G เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสีย้อมกับเวลา

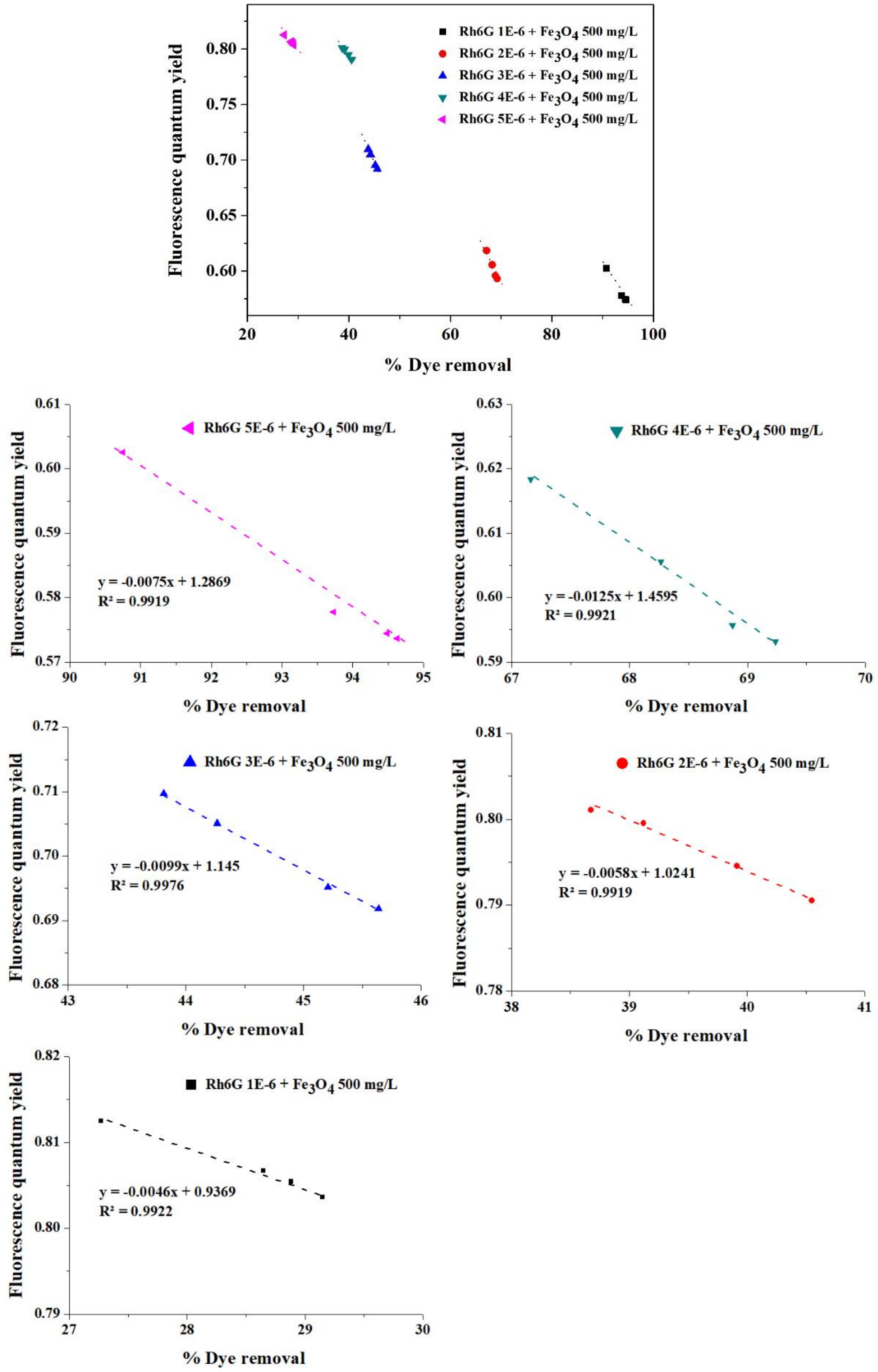
ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมและค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ ของการทดลองที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ในช่วงเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (60 – 150 นาที) และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ ได้กราฟแสดงดังรูปที่ 4.15 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมลดลงส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์มีแนวโน้มลดลงด้วยในทุกๆ ช่วงความเข้มข้น โดยมีแนวโน้มลดลงแบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟของการทดลอง โดยค่า R^2 เปลี่ยนแปลงในช่วง 0.98 – 0.99 ซึ่งมีสาเหตุมาจากเมื่อเกิดกระบวนการดูดซับโมเลกุลสารย้อม Rh6G ไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลง ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมีแนวโน้มลดลงด้วย แต่เนื่องจากการดูดกลืนแสงที่ลดลงจะสัมพันธ์กับปริมาณแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากโมเลกุลของสีย้อมให้มีค่าลดลง ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์มีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นเดียวกัน



(ก) สารละลาย Rh6G ที่ $1x10^{-6}$ – $5x10^{-6}$ โมลาร์ เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 100 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ข) สารละลาย Rh6G ที่ $1x10^{-6}$ – $5x10^{-6}$ โมลาร์ เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

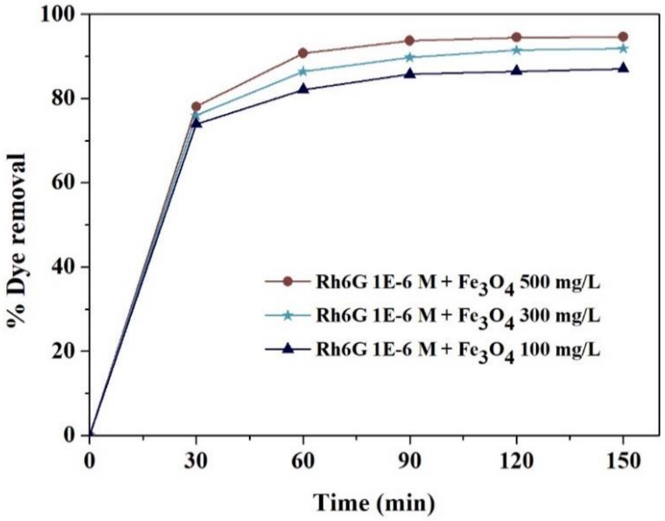


(ค) สารละลาย Rh6G ที่ $1x10^{-6}$ – $5x10^{-6}$ โมลาร์ เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

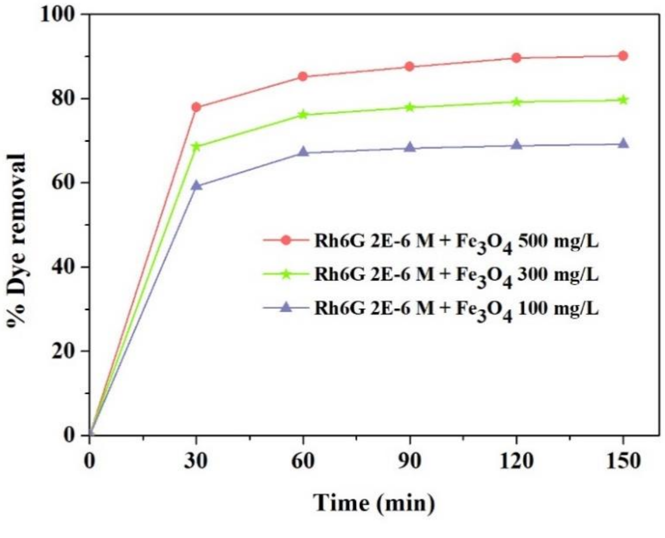
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารละลาย Rh6G ความเข้มข้นต่าง ๆ

4.3.4 การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ

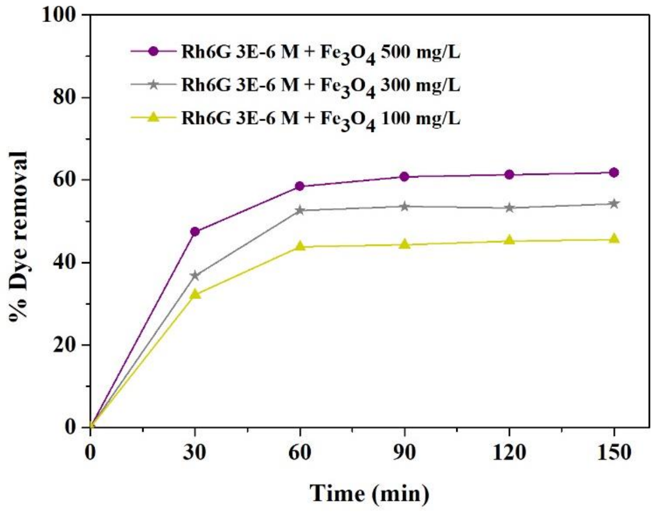
จากผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงด้วยวิธีการที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.5.5 ของสารละลาย Rh6G ในช่วงความเข้มข้น 1x10^{-6} โมลต่อลิตร 2x10^{-6} โมลต่อลิตร 3x10^{-6} โมลต่อลิตร 4x10^{-6} โมลต่อลิตร และ 5x10^{-6} โมลต่อลิตร โดยใช้ตัวดูดซับสารแขวนลอยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ในช่วงความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปั่นกวนสารละลายด้วยอัตราเร็ว 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 150 นาที นำผลที่ได้จากการวัดไปคำนวณหาความเข้มข้นและประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมด้วยสมการที่ (4.1) และ (2.12) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.16 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าสมดุลของการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 60 นาที และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับและบริเวณที่เกิดการดูดซับมีมากขึ้น แต่ถ้าหากใช้ปริมาณตัวดูดซับที่มากเกินไปจะทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับและบริเวณที่เกิดการดูดซับมีมากเกินเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมีแนวโน้มลดลง [36 – 37]



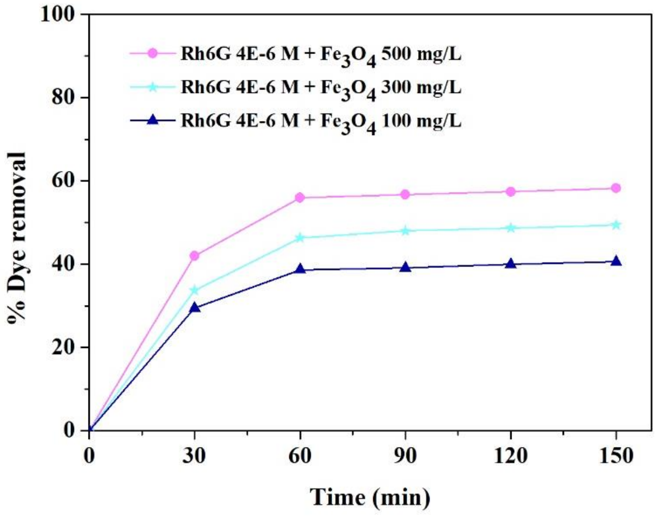
(ก) ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Rh6G 1x10^{-6} โมลาร์ เติม Fe_3O_4 100–500 มิลลิกรัมต่อลิตร



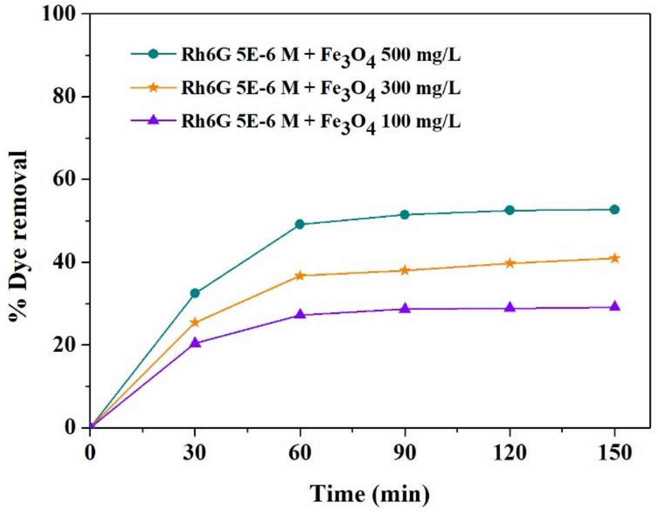
(ข) ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Rh6G 1x10^{-6} โมลาร์ เติม Fe_3O_4 100–500 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ค) ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Rh6G 1x10^{-6} โมลาร์ เติม Fe_3O_4 100–500 มิลลิกรัมต่อลิตร



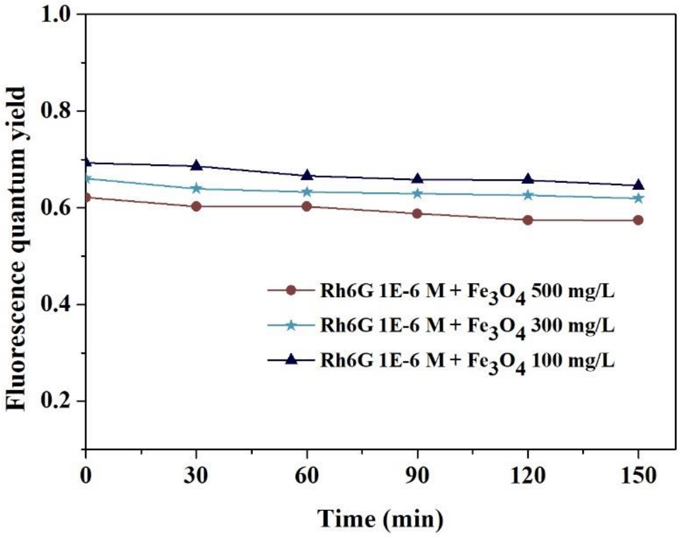
(ง) ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Rh6G 1x10^{-6} โมลาร์ เติม Fe_3O_4 100–500 มิลลิกรัมต่อลิตร



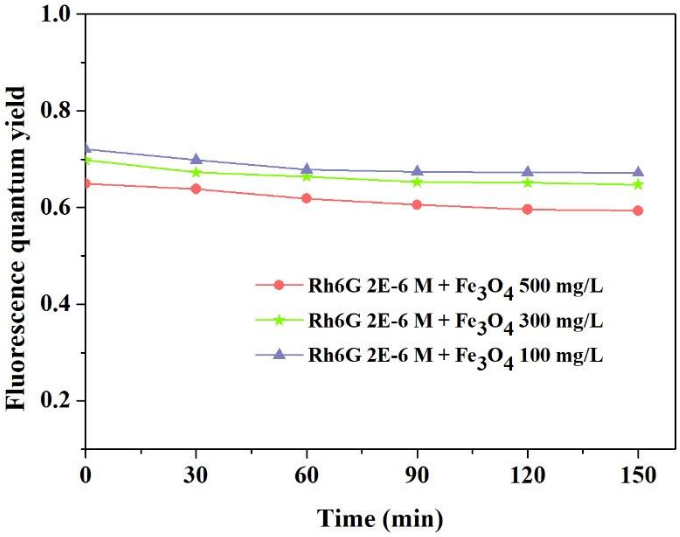
(จ) ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Rh6G 1x10^{-6} โมลาร์ เติม Fe_3O_4 100–500 มิลลิกรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม

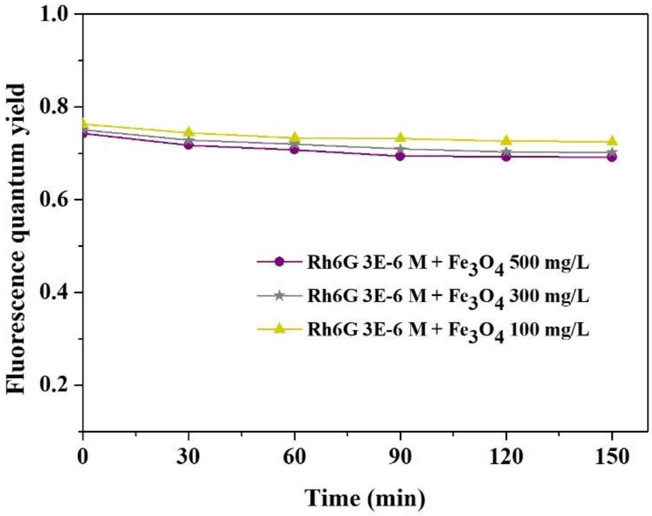
จากการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงและวัดค่าดัชนีหักเหแสงของสารละลายความเข้มข้นดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น วิเคราะห์ฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ด้วยสมการที่ (2.27) และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์กับเวลา ได้กราฟแสดงดังรูปที่ 4.17 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารสีย้อม Rh6G มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับและบริเวณที่เกิดการดูดซับมีมากขึ้น ซึ่งเมื่อสารละลายเกิดการดูดซับมากขึ้นส่งผลให้ความเข้มของสารสีย้อมลด ดังนั้นเมื่ออนุภาคเหล่านั้นได้รับการกระตุ้นจากความยาวคลื่นที่ทำให้เกิดการเปล่งแสงจึงเกิดการเรืองแสงลดลงด้วย



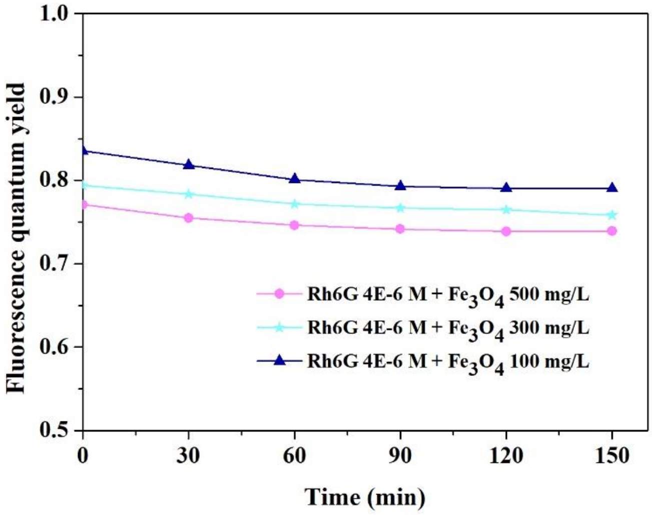
(ก) ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ Rh6G 1x10^{-6}โมลาร์ เติม Fe_3O_4 100–500 มิลลิกรัมต่อลิตร



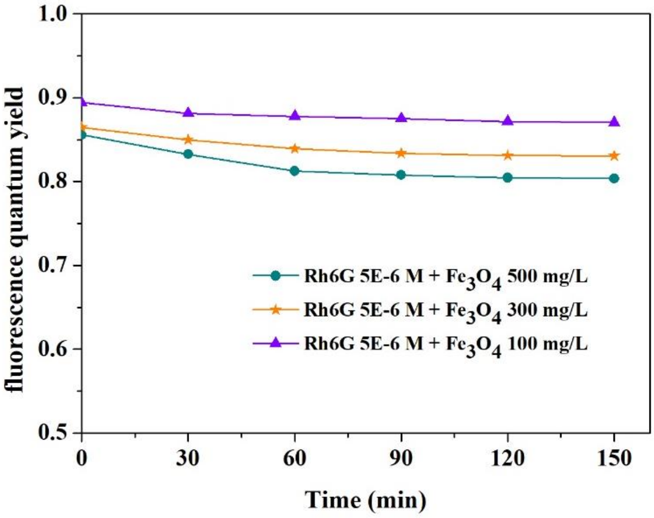
(ข) ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ Rh6G 2x10^{-6}โมลาร์ เติม Fe_3O_4 100–500 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ค) ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ Rh6G 3x10^{-6}โมลาร์ เติม Fe_3O_4 100–500 มิลลิกรัมต่อลิตร



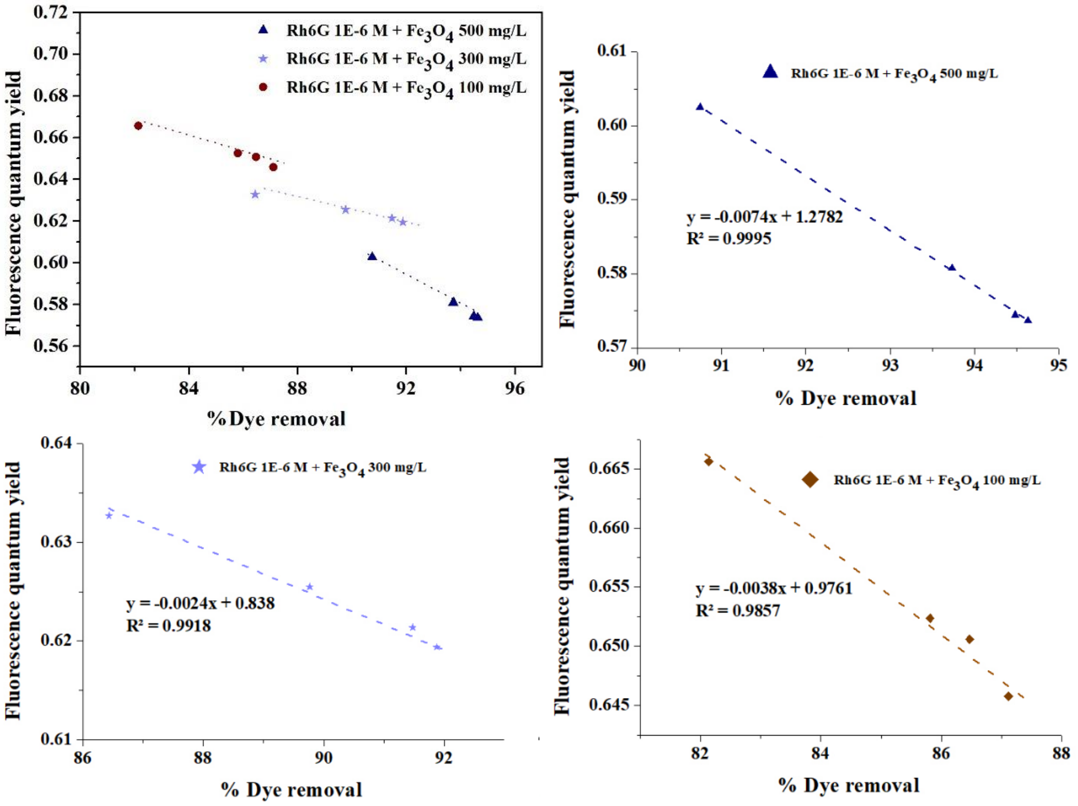
(ง) ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ Rh6G 4x10^{-6}โมลาร์ เติม Fe_3O_4 100–500 มิลลิกรัมต่อลิตร



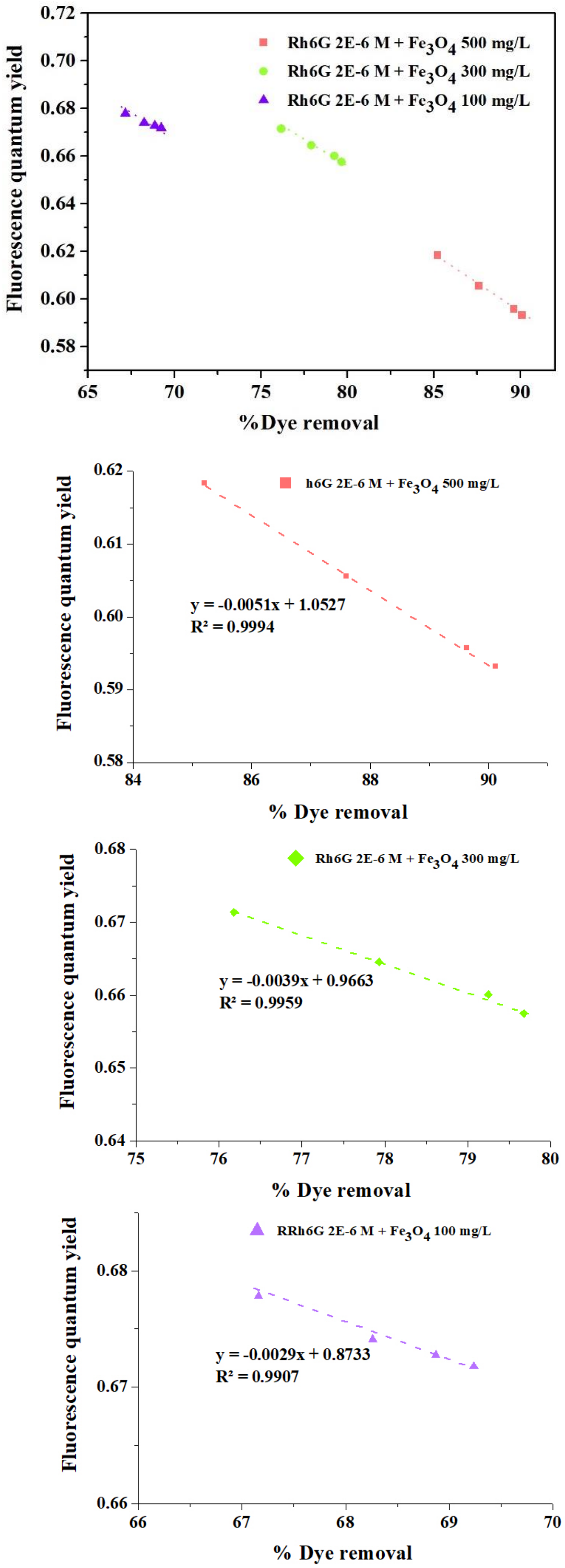
(จ) ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ Rh6G 5x10^{-6}โมลาร์ เติม Fe_3O_4 100–500 มิลลิกรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของปริมาณตัวดูดซับ

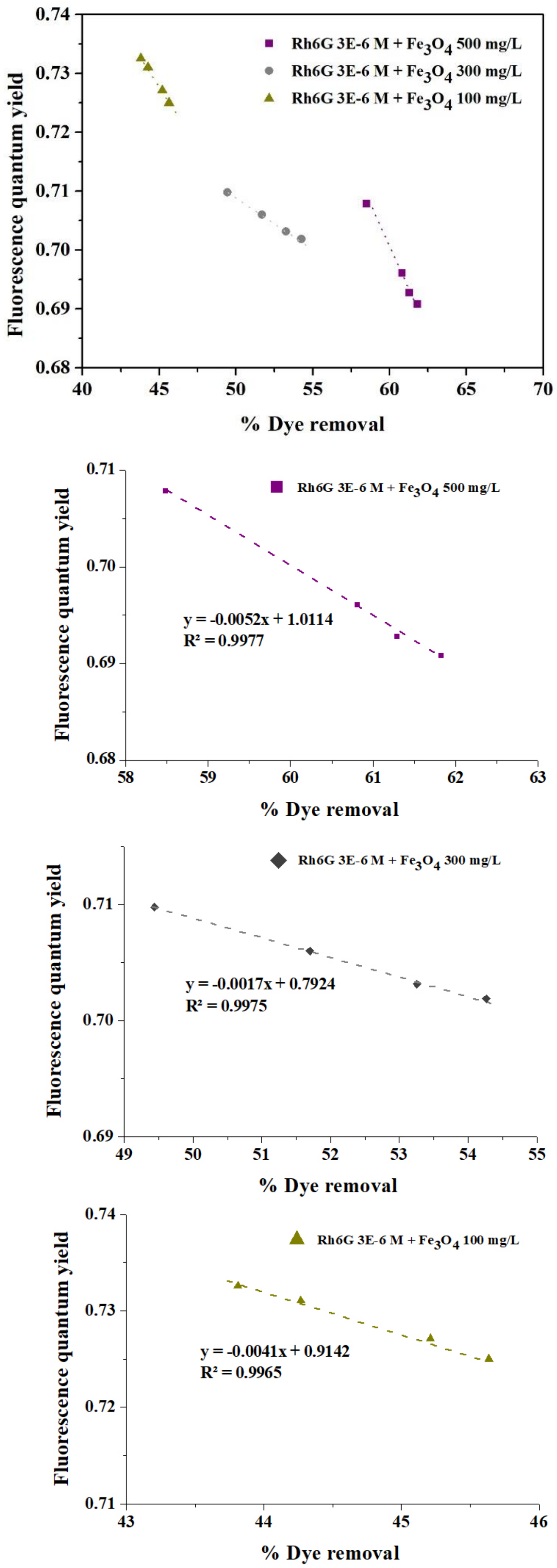
จากผลการทดลองที่กล่าวไปแล้วข้างต้นไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ ในช่วงเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (60 – 150 นาที) ได้กราฟแสดงดังรูปที่ 4.18 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมลดลงส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์มีแนวโน้มลดลงด้วยในทุกๆ ช่วงความเข้มข้น ซึ่งสังเกตได้จากค่า R^2 ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟของการทดลอง โดยค่า R^2 เปลี่ยนแปลงในช่วง 0.98 – 0.99 และมีแนวโน้มลดลงแบบเป็นเชิงเส้น ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากเมื่อเกิดกระบวนการดูดซับโมเลกุลสารย้อม Rh6G ไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็กส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลง ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมีแนวโน้มลดลงด้วย แต่เนื่องจากการดูดกลืนแสงที่ลดลงจะสัมพันธ์กับปริมาณแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากโมเลกุลของสีย้อมให้มีค่าลดลง จึงส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน



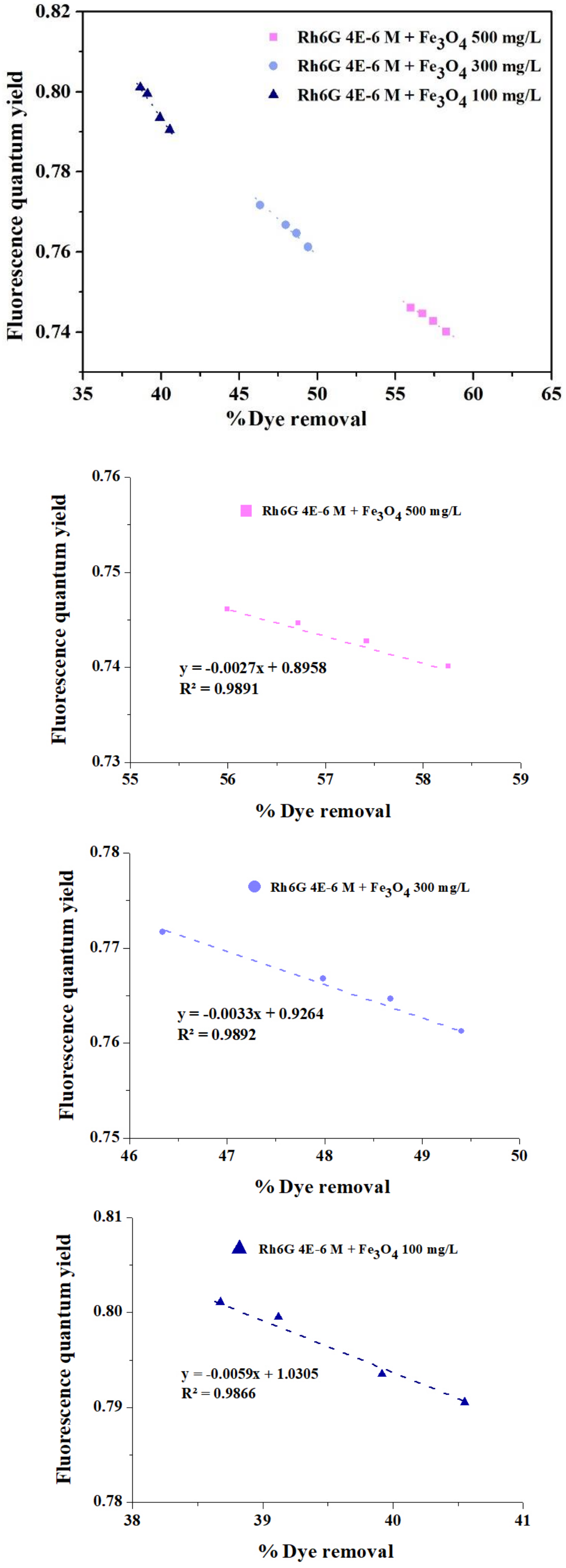
(ก) สารละลาย Rh6G 1x10^{-6} โมลาร์ เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร



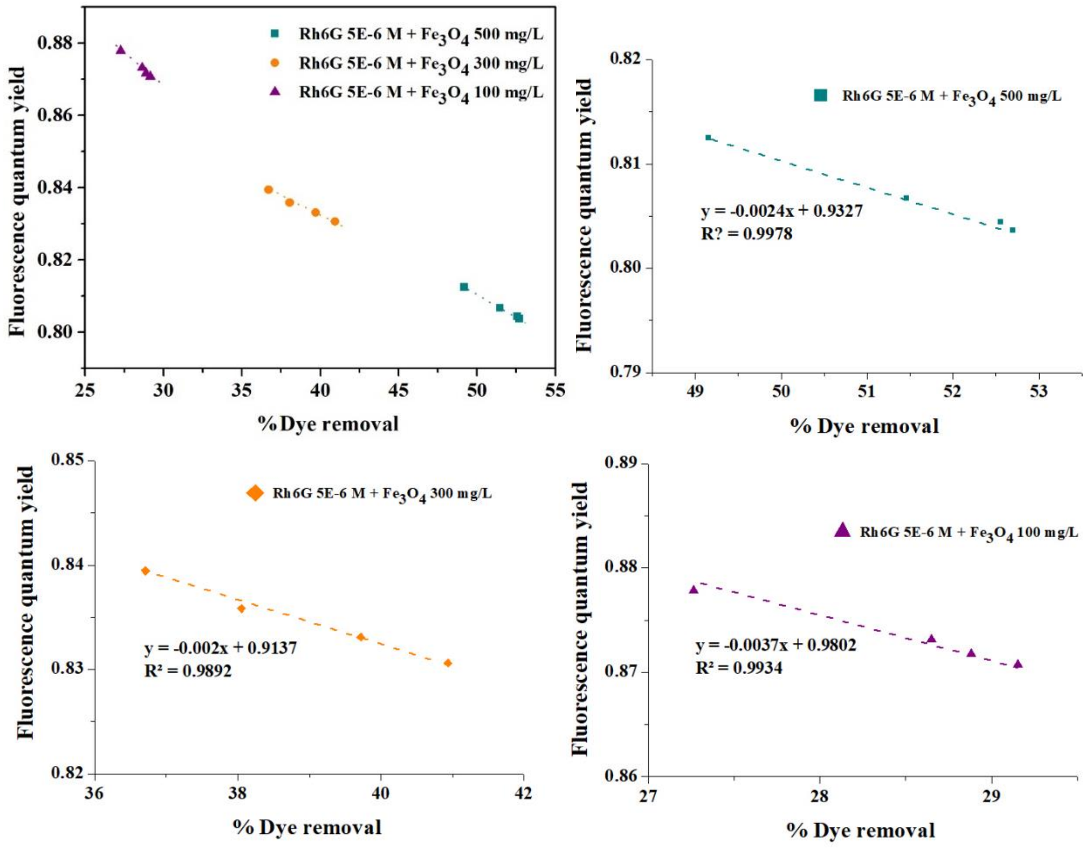
(ข) สารละลาย Rh6G 2x10^{-6} โมลาร์ เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ค) สารละลาย Rh6G 3x10^{-6} โมลาร์ เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ง) สารละลาย Rh6G 4x10^{-6} โมลาร์ เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร



(จ) สารละลาย Rh6G 5x10^{-6} โมลาร์ เมื่อเติมตัวดูดซับ Fe_3O_4 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

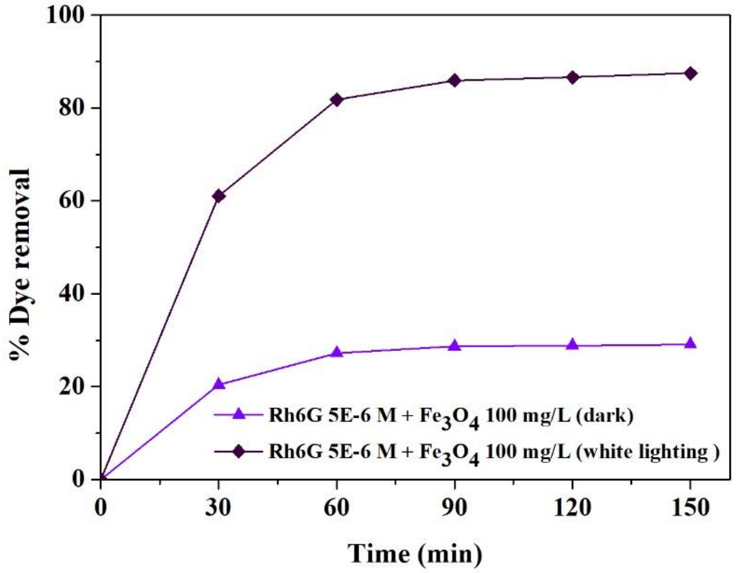
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์เมื่อเติมตัวดูดซับที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

4.3.5 การศึกษากลไกการย่อยสลายสีย้อม Rh6G โดยใช้ตัวดูดซับ Fe_3O_4 ภายใต้การฉายแสง

จากผลการทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสีย้อม Rh6G ในรูปของสารละลายที่ความเข้มข้น 5x10^{-6} โมลาร์ ผสมกับตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยอาศัยระบบวัดในหัวข้อ 3.3.3 ภายใต้เงื่อนไขไม่ฉายแสงและฉายแสงขาว ทำการทดลองเป็นเวลา 150 นาที ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.19

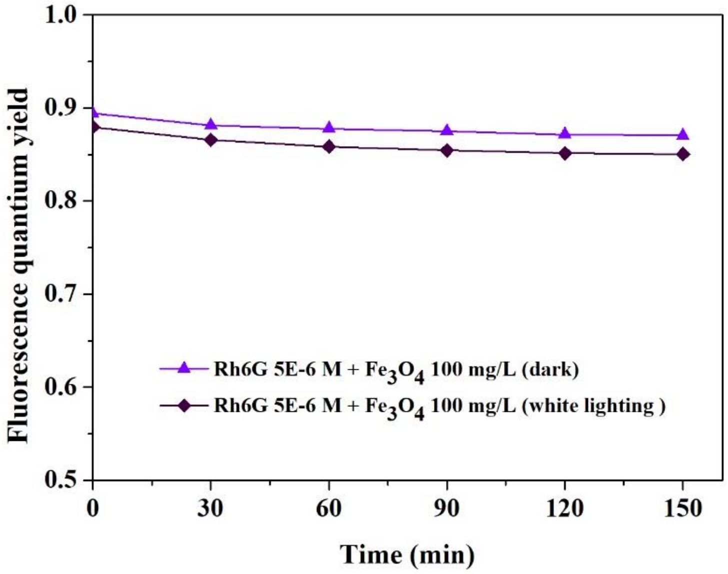
จากกราฟพบว่าการไม่ฉายแสงและฉายแสงขาว มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วได้ช่วง 30 นาทีแรก ต่อเนื่องไปจนถึง 60 นาที และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลง ในช่วงเวลา 60 นาที ถึง 150 นาที และจากกราฟแสดงให้เห็นว่าแสงมีผลต่อการกำจัดสีย้อมอย่างมาก ซึ่งเมื่อไม่ฉายแสงและฉายแสงขาวมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงสุดที่ 29.15 และ 89.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมระหว่างการไม่ฉายแสงและฉายแสงขาว พบว่าการฉายแสงขาวทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า มีสาเหตุจากการฉายแสงขาวให้พลังงานที่อนุภาคเหล็กออกไซต์สามารถนำไปใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ โดยอนุภาคเหล็กออกไซต์ต้องการ

พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ 2.12 อิเล็กตรอนโวลต์หรือช่วงความยาวคลื่นประมาณ 585 นาโนเมตร เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนข้ามผ่านแถบพลังงานจากชั้นวาเลนซ์แบนด์ไปยังชั้นคอนดักชันแบนด์จนเกิดคู่พาหะที่ไปจับกับสีย้อมแล้วเกิดการสลายตัว ซึ่งแสงขาวให้พลังงานในย่านความยาวคลื่น 430 - 630 นาโนเมตร หรือ 2.88 - 1.96 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นช่วงของแถบพลังงานที่เหล็กออกไซต์สามารถนำพลังงานไปใช้ได้ และในขณะเดียวกันสารสีย้อมก็จะตอบสนองต่อค่าพลังงานที่มีค่าเท่ากับตัวเองหรือเป็นช่วงพลังงานที่สีย้อมเองสามารถดูดกลืนแสงได้ ทำให้เกิดการสลายตัวในขณะที่ได้รับพลังงานในช่วงที่ต้องการ ซึ่งสีย้อม Rh6G มีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 525 นาโนเมตรหรือ 2.35 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่แสงขาวสามารถให้พลังงานได้ [42]



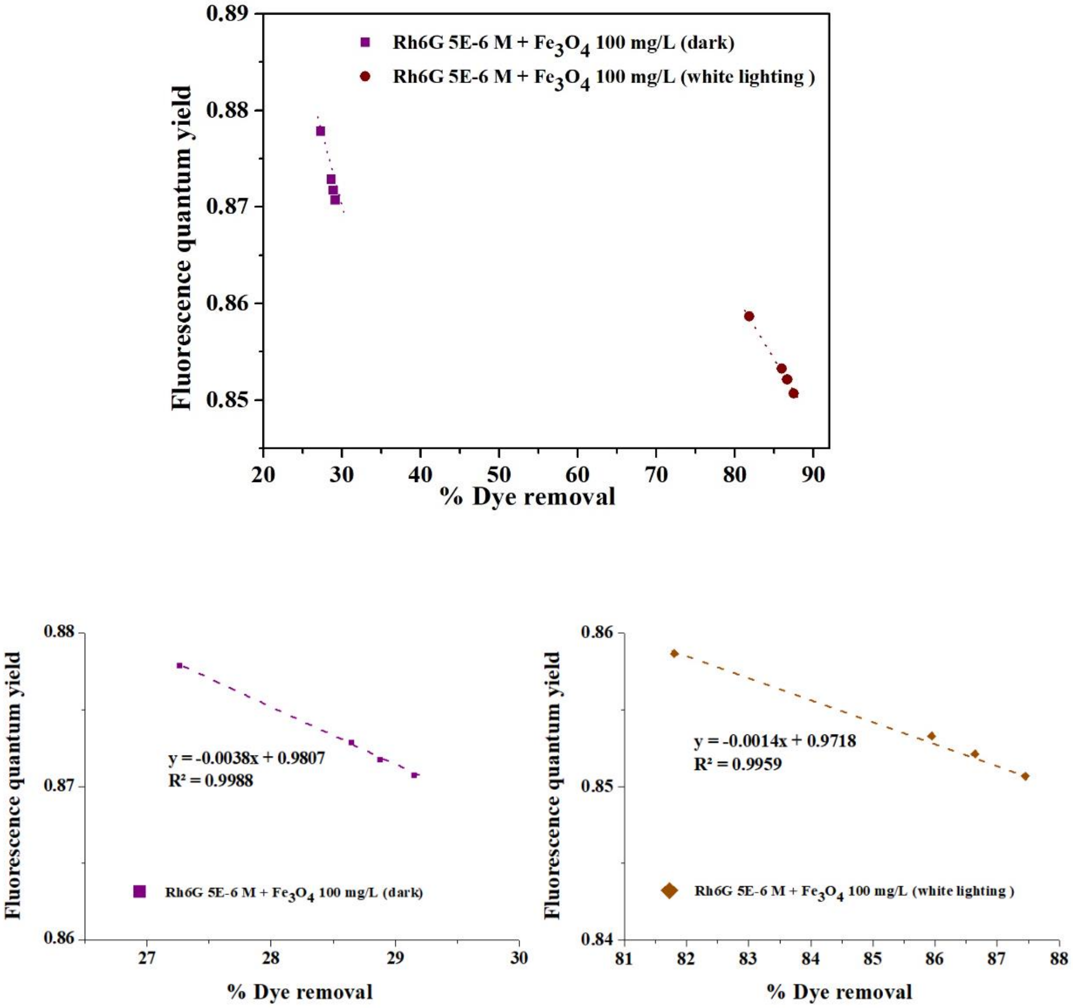
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Rh6G กับเวลาภายใต้การฉายแสงขาวและไม่ฉายแสง

เนื่องจากการฉายแสงขาวส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า ซึ่งค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากค่าการดูดกลืนที่ลดลงอย่างมากเมื่อเกิดการฉายแสง ดังนั้นเมื่อสารละลายเกิดการดูดกลืนแสงน้องลงส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์มีแนวโน้มเช่นกัน โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์กับเวลา แสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารละลาย Rh6G กับเวลาภายใต้การฉายแสงขาวและไม่ฉายแสง

จากผลการทดลองข้างต้นเมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ ในช่วงเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีย้อม ได้กราฟแสดงดังรูปที่ 4.21 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อฉายแสงขาวส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมลดลงอย่างมากและทำให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์มีแนวโน้มลดลงด้วย โดยมีแนวโน้มลดลงแบบเป็นเชิงเส้นซึ่งวิเคราะห์ได้จากค่า R^2 ที่ได้จากกราฟของการทดลอง โดยค่า R^2 มีค่า 0.9988 และ 0.9959เมื่อไม่ฉายแสงและฉายแสงขาวตามลำดับ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการฉายแสงขาวให้พลังงานที่อนุภาคเหล็กออกไซต์สามารถนำไปใช้ในการบวนการโฟโตคะตะไลติกได้ ซึ่งแสงขาวให้พลังงานในย่าน 2.88 ถึง 1.96 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นช่วงพลังงานที่เหล็กออกไซต์สามารถนำไปใช้ในการจับกับสีย้อมแล้วเกิดการสลายตัวได้จึงสามารถดูดซับสีย้อมได้มากขึ้น ในขณะเดียวกันแสงขาวยังให้พลังงานในช่วงที่สารสีย้อม Rh6G สามารถดูดกลืนแสงได้ดี ดังนั้นเมื่อได้รับพลังงานในช่วงที่ต้องการจึงทำให้เกิดการสลายตัวและถูกดูดซับมากขึ้นทำให้มีค่าการดูดกลืนแสงลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากโมเลกุลของสีย้อมให้มีค่าลดลงด้วย



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารละลาย Rh6G ภายใต้การฉายแสงขาวและไม่ฉายแสง

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางสเปกโตรสโคปีแสงของสีย้อมไวแสงโรดามีน 6จี ร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 เพื่อทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม ปริมาณตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี และค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์เมื่อไม่ฉายแสงและการฉายแสงขาว ผลการวิจัยสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการปั่นกวนสารกับเวลา

จากการศึกษาเงื่อนไขของการปั่นกวนสาร ได้แก่ ไม่ปั่นกวนสารกับปั่นกวนสารด้วยอัตราเร็วในการปั่นกวน 1200 รอบต่อนาที และ 1500 รอบต่อนาที ตามลำดับ ของสารละลายโรดามีน 6จี ความเข้มข้น $4x10^{-6}$ โมลาร์ เมื่อเติมตัวดูดซับสารคอลลอยด์ Fe_3O_4 ที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อไม่ปั่นกวนสารละลายส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับการปั่นกวน เมื่อเพิ่มการปั่นกวนสารละลายโดยใช้อัตราเร็วในการปั่นกวน 1200 รอบต่อนาที พบว่าค่าการดูดกลืนแสงลดลงจากเดิม 42.99 เปอร์เซ็นต์ และจะลดลงถึง 69.45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้อัตราเร็วในการปั่นกวน 1500 รอบต่อนาที เมื่อนำค่าความเข้มข้นที่ได้ไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมพบว่าเมื่อไม่ปั่นกวนสารละลายจะสามารถกำจัดสีย้อมได้เพียง 13.76 ปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มงานปั่นกวนจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้ถึง 38.47 เปอร์เซ็นต์ และ 53.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการไม่ปั่นกวนสารกับปั่นกวนสารด้วยอัตราเร็ว 1500 รอบต่อนาที พบว่าเมื่อปั่นกวนสารด้วยอัตราเร็วดังกล่าวส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมากกว่าเงื่อนไขไม่ปั่นกวนสารละลายถึง 2 เท่า และจากการทดลองพบว่าอัตราเร็วในการปั่นกวนที่เหมาะสม คือ 1500 รอบต่อนาที เนื่องจากเป็นขีดจำกัดของเครื่องมือวัด

5.1.2 สรุปผลการศึกษาเวลาที่มีต่อการดูดซับ

จากการศึกษาผลของเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ความเข้มข้น $5x10^{-6}$ โมลาร์ เมื่อเติมตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงระยะเวลาในการดูดซับตั้งแต่ 0 ถึง 150 นาที พบว่าที่ระยะเวลา 150 นาที ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าลดลงมากที่สุดถึง 37.11 เปอร์เซ็นต์ 53.30 เปอร์เซ็นต์ และ 72.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ ไปหาค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ ภาวะสมดุล พบว่าค่าการดูดซับภายหลังจากเติมสารคอลลอยด์ของแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่ 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 0 ถึง 30 นาทีแรก อยู่ที่ 18.33 เปอร์เซ็นต์ 25.73 เปอร์เซ็นต์ และ 33.43 เปอร์เซ็นต์

ตามลำดับ และเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลา 60 นาที จากนั้นมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลงในช่วงเวลา 60 ถึง 150 นาที เนื่องจากการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล และจากการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมที่อนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 เกิดการดูดซับสีย้อม Rh6G และเข้าสู่สมดุลของการดูดซับคือ 60 นาที

5.1.3 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมกับเวลา

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นสารสีย้อมโรดามีน 6จี ในย่านความเข้มข้น $1x10^{-6}$ โมลาร์ $2x10^{-6}$ โมลาร์ $3x10^{-6}$ โมลาร์ $4x10^{-6}$ โมลาร์ และ $5x10^{-6}$ โมลาร์ เมื่อเติมตัวดูดซับสารแขวนลอยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่ 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ความเร็วในการปั่นกวนสารละลาย 1500 รอบต่อนาที ทำการทดลองเป็นเวลา 150 นาที พบว่าการดูดซับสารสีย้อม Rh6G ด้วยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ทุกๆ ช่วงความเข้มข้นมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันและเข้าสู่สมดุลหลังจากเวลาผ่านไป 60 นาที เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซับน้อยลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นปริมาณของสีจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเกิดการดูดซับน้อยย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมน้อยลงด้วย ซึ่งความเข้มข้นของสารสีย้อมโรดามีน 6จี ที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารสีย้อมโรดามีน 6จี ทุกความเข้มข้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากภายในเวลา 60 นาที และจะเริ่มคงที่ในช่วงเวลา 60 ถึง 150 นาที เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ และจากการทดลองยังพบว่าความเข้มข้นของสีย้อมโรดามีน 6จี ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดลองนี้คือ $1x10^{-6}$ โมลาร์ เพราะส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลดลงมากที่สุด

5.1.4 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็กกับเวลา

จากการศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับสารแขวนลอยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ในย่านความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ที่มีความเข้มข้น $1x10^{-6}$ ถึง $5x10^{-6}$ โมลาร์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ Fe_3O_4 จาก 100 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของสารสีย้อมโรดามีน 6จี สูงขึ้น สมดุลของการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 60 นาที และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับและบริเวณที่เกิดการดูดซับมีมากขึ้น แต่ถ้าหากใช้ปริมาณตัวดูดซับที่มากเกินไปจะทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับและบริเวณที่เกิดการดูดซับมีมากเกินเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมีแนวโน้มลดลง และการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ของสารสีย้อม Rh6G มีแนวโน้มลดลงด้วย ดังนั้นเมื่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมลดลงส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์มีแนวโน้มลดลงด้วยในทุกๆ ช่วงความเข้มข้น และจากการทดลองยังพบว่าปริมาณตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่

เหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ในการทดลองนี้คือ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะส่งผลให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลดลงมากที่สุด

5.1.5 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมกับเวลาภายใต้การฉายแสง

จากการศึกษาผลของประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี ความเข้มข้น $5x10^{-6}$ โมลาร์ เติมตัวดูดซับสารแขวนลอยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้เงื่อนไขการไม่ฉายแสงและฉายแสงขาว พบว่าแสงมีผลต่อการกำจัดสีย้อมอย่างมาก ซึ่งเมื่อไม่ฉายแสงมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงสุดที่ 29.15 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อฉายแสงขาวพบว่ามีค่ามากถึง 89.45 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการฉายแสงขาวทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมีค่ามากกว่าไม่ฉายแสงถึง 3 เท่า เมื่อฉายแสงขาวส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมลดลงอย่างมาก ทำให้ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์มีแนวโน้มลดลงด้วย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการฉายแสงทำให้อนุภาคเหล็กออกไซต์เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกจึงสามารถดูดซับสีย้อมได้มากขึ้น ดังนั้นเมื่อสารละลายถูกดูดซับได้มากจะทำให้มีค่าการดูดกลืนแสงลดลงซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากโมเลกุลของสีย้อมให้มีค่าลดลงด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาสมบัติทางแสงของสารสีย้อมไวแสงโรดามีน 6จี ร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กออกไซต์ เพื่อทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ ซึ่งเมื่อผู้ทำการวิจัยได้ทำการทดลองก็พบกับปัญหาในงานวิจัยด้านต่างๆดังนี้

5.2.1 สภาพแวดล้อมและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- ขณะทำการทดลองต้องอยู่ในสภาวะที่ไม่มีแสงภายในมารบกวน เพราะอาจจะมีผลต่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้ และถ้าไม่ระมัดระวังอาจเป็นอันตรายต่อผู้ทำการทดลองได้
- ขณะทำการทดลองต้องอยู่ในสภาวะอุณภูมิห้อง เพราะอาจจะมีผลต่อการวิเคราะห์ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ เนื่องจากเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน
- การดูดสารละลายโรดามีน 6จี จากหลอดไมโครเซนติฟิวที่ปั่นเหวี่ยงตกตะกอนมาแล้วต้องทำด้วยความระมัดระวังและเบามือเพื่อไม่ให้อนุภาคเหล็กออกไซต์ที่จับตัวเป็นก้อนเกิดการแตกตัว หากอนุภาคเหล็กออกไซต์ติดเข้ามาขณะดูดใส่ไมโครคิวเวทท์อาจมีผลต่อการวัดค่าการดูดกลืนของแสงและค่าการเปล่งแสงได้
- การปั่นกวนสารละลายต้องทำงานร่วมกับแท่งแม่เหล็กกวนสารละลายซึ่งถ้าปั่นเหวี่ยงในจำนวนรอบที่สูงมาก ต้องจัดตำแหน่งของแท่งแม่เหล็กกวนสารให้อยู่ตรงการของเครื่องกวนสาระละลาย และตรงกึ่งกลางของภาชนะเพื่อป้องกันไม่ให้แท่งแม่เหล็กกวนสารเกิดการปั่นที่ไม่เสถียร อาจมีผลต่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมและค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ได้

5.2.2 การเปรียบเทียบรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมโรดามีน 6จี บนตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 โดยใช้รูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลที่แตกต่างกัน ได้แก่ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม (%Dye removal) และการวิเคราะห์ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ (FQY) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยรูปแบบดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบข้อดี - ข้อเสีย ได้ดังตาราง 5.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตาราง 5.1 การเปรียบเทียบรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูล

รูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูล	ข้อดี	ข้อเสีย
1. ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม	สามารถทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองได้ง่าย เนื่องจากใช้ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเพียงอย่างเดียว และขั้นตอนในการทดลองไม่ซับซ้อน	มีความยุ่งยากในการทำกราฟมาตรฐานของสารละลาย จึงต้องศึกษาให้ละเอียดและรอบครอบก่อนเริ่มทำการทดลองเพราะถ้าหากวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงผิดจะส่งผลให้กราฟมาตรฐานที่ใช้สำหรับหาความเข้มข้นผิด ดังนั้นเมื่อกราฟมาตรฐานผิดจะทำให้ผลการทดลองผิดด้วย
2. ค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์	เนื่องจากในการคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ต้องใช้ผลจากการวัดหลายขั้นตอน ได้แก่ การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง การวัดสเปกตรัมการเปล่งแสง และการวัดค่าดัชนีหักเหแสง อีกทั้งค่าที่ได้จากการวัดในแต่ละขั้นตอนต้องสัมพันธ์กันจึงจะทำให้แนวโน้มของค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ถูกต้อง จึงเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับการทดลองที่ต้องการความแม่นยำสูง	การทดลองมีความซับซ้อนและในการทดลองแต่ละความเข้มข้นใช้เวลาในการทดลองนานเนื่องจากต้องวัดค่าถึง 3 อย่าง ได้แก่ วัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมการเปล่งแสง และค่าดัชนีหักเหแสง จึงจะสามารถนำมาคำนวณหาค่าฟลูออเรสเซนต์ควอนตัมยีลด์ได้

เอกสารอ้างอิง

[1] วนิดา ชูอักษร. 2555. “เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม.” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 17(1) : 181-191.

[2] เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์. 2544. “การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลายสีย้อมโดยการดูดซับด้วยซิลิกาอลูมินาที่ใช้แล้ว.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[3] สกล ศิริรัตน์. 2546. “การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสิคจากสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบด้วยไคโตซาน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[4] ปวีณา ธนะสังข์. 2539. “การกำจัดสีจากน้ำทิ้งฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีการออกซิเดชัน-รีดักชัน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, สถาบันพระจอมเกล้าธนบุรี.

[5] ชุตินธร มูลทองน้อย. 2543. “การปนเปื้อนและการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทางเคมี โดยวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร, มหาวิทยาลัยมหิดล.

[6] Wijannarong, S., Aroonsrimorakot, S., Thavipoke, P., Kumsopa, c. and Sangjan, S. 2013. “Removal of Reactive Dyes from Textile Dyeing Industrial Effluent by Ozonation Process.” *APCBEE Procedia*. 5 : 279-282.

[7] Brik, M., Chamam, B., Schoberl, P., Braun, R., and Fuchs, W. 2004. “Effect of Ozone, Chlorine and Hydrogen Peroxide on the Elimination of Colour in Treated Textile Wastewater by MBR.” *Water Sci Technol*. 49(4) : 299-303.

[8] Fu, J., Chen, Z., Wang, M., Liu, S., Zhang, J., Zhang, J., Han, R. and Xu, Q. 2015. “Adsorption of Methylene Blue by a Eigh-Efficiency Adsorbent (Polydopamine Microspheres): Kinetics, Isotherm, Thermodynamics and Mechanism Analysis.” *Chemical Engineering Journal*. 259 : 53-61.

[9] Gupta, V., Agarwal, A., Singh, M.K. and Singh, N.B. 2017. “Removal of Red RB Dye from Aqueous Solution by Belpatra Bark Charcoal.” *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 8(10) : 3718-3729.

[10] สายรุ้ง นพขุนทด. 2554. “การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

[11] พัชรา พสุพงศ์. 2560. "การสังเคราะห์วัสดุผสมขนานาโนของซีเรียมออกไซด์-โคบอลต์เฟอร์ไรต์เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการสลายสีย้อม." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[12] Nassar, N.N. 2010. "Rapid Removal and Recovery of Pb(II) from Wastewater by Magnetic Nanoadsorbents." *Journal of Hazardous Materials*. 184(1-3) : 538-546.

[13] Hernandez, J.S.T., Muriel, A.A., Tabares, J.A., Alcazar, G.A. P. and Bolanos, A. 2015. "Preparation of Fe_3O_4 Nanoparticles and Removal of Methylene Blue through Adsorption." *Journal of Physics* : Conference Series. 614.

[14] Panneerselvam, P.,Morad, N. Tan, K.A. and Mathiyarasi, R. 2012. "Removal of Rhodamine B Dye Using Activated Carbon Prepared from Palm Kernel Shell and Coated with Iron Oxide Nanoparticles." *Separation Science and Technology*. 47(5) : 742-752.

[15] Shahriari, T., Nabi Bidhendi, G., Mehrdadi, N. and Torabian, A. 2013. "Effective Parameters for the Adsorption of Chromium(III) onto Iron Oxide Magnetic Nanoparticle." *International Journal of Environmental Science and Technology*. 11(2) : 349-356.

[16] Yang, X., Chen, W., Huang, J., Zhou, Y., Zhu, Y. and Li, C. 2015. "Rapid Degradation of Methylene Blue in a Novel Heterogeneous Fe_3O_4 @rGO@TiO_2-Catalyzed Photo-Fenton System." *Scientific Reports*. 5(1).

[17] Fan, Zhang., Xiaoju, Yin., Jing, Lan. and Weihua, Zhang. 2015. "Application of $Ba_3(PO_4)_2/Fe_3O_4$ as a Novel Magnetic Adsorbent to Removal Methyl Blue Aqueous Solution." *Journal of Materials Science*. 51(7).

[18] นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์. 2550. **หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[20] Nguyen T.K. and Selvanayagam R. 2015. **Nanotech weapon against chronic bacterial infections**. [Online]. Available : http://www.understandingnano.com/iron-oxide-nanoparticles-bacteria.html.

[21] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2559. **การทดลองเชิงโมเลกุลเดี่ยว**. [Online]. Available : http://th.wikipedia.org/wiki/การทดลองเชิงโมเลกุลเดี่ยว.

[22] แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. 2552. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ**. กรุงเทพฯ : ชวนพิมพ์.

[23] Valeur, B. 2001. **Molecular Fluorescence: Principles and Applications**. Germany : Betz-Druck Gmbh.

[24] Allen, M.W. **Thermo Fisher Scientific**. USA : Madison.

[25] Zhang, X.F., Zhang, Y. and Liu L. 2014. "Fluorescence Lifetimes and Quantum Yields of Ten Rhodamine Derivatives: Structural Effect on Emission Mechanism in Different Solvents." *Journal of Luminescence*. 145 : 448-453.

[26] Pathrose, B., Sahira, H., Nampoori, V.P.N., Radhakrishnan P. and Mujeeb A. 2014. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 128 : 522–526.

[27] Ajmal, A., Majeed, I., Malik, R. N., Idriss, H. and Nadeem, M. A. 2014. "Principles and Mechanisms of Photocatalytic Dye Degradation on TiO_2 Based Photocatalysts: a Comparative Overview." *Royal Society of Chemistry*. 4(70) : 37003–37026.

[28] Ayodhya, D. and Veerabhadram, G. 2018. "A Review on Recent Advances in Photodegradation of Dyes Using Doped and Heterojunction Based Semiconductor Metal Sulfide Nanostructures for Environmental Protection." *Materials Today Energy*. 9 : 83–113.

[29] Wikipedia. 2561. **มอสเฟต**. [Online]. Available : https://th.wikipedia.org/wiki/มอสเฟต. (วันที่ค้นข้อมูล : 2 พฤษภาคม 2562).

[30] Commandronestore.com. 2016. **ทรานซิสเตอร์**. [Online] Available : https://commandronestore.com/learning/transistor000.php

[31] Gupta, V., Agarwal, A., Singh, M.K. and Singh N.B. 2017. Removal of Red Dye from Aqueous Solution by Belpatra Bark Charcoal (BBC) Adsorbent. *Journal of Materials and Enviromental Sciences*. 8(10) : 3718-3729.

[32] Fan, Zhang., Xiaoju, Yin., Jing, Lan. and Weihua, Zhang. 2015. "Application of $Ba_3(PO_4)_2/Fe_3O_4$ as a Novel Magnetic Adsorbent to Remove Methyl Blue from Aqueous Solution." *Journal of Materials Science*. 51(7) : 3525–3535.

[33] Panneerselvam, P., Mord, N., TAN, K.A. and Mathiyarasi, R. 2012. "Removal of Rhodamine B Dye Using Activated Carbon Prepared from Palm Kernel Shell and Coated with Iron Oxide Nanoparticles." *Separation Science and Technology*. 47(5) : 742-752.

[34] Ranjbari, E., Hadjmohammadi, M. R., Kiekens, F., and De, Wael, K. 2015. "Mixed Hemi/Ad-Micelle Sodium Dodecyl Sulfate-Coated Magnetic Iron Oxide Nanoparticles for the Efficient Removal and Trace Determination of Rhodamine B and Rhodamine-6G." *Analytical Chemistry*. 87(15) : 7894-7901.

[35] Tan, K. A., Morad, N., Teng, T. T., Norli, I. and Panneerselvam, P. 2012. "Removal of Cationic Dye by Magnetic Nanoparticle (Fe_3O_4) Impregnated onto Activated Maize Cob Powder and Kinetic Study of Dye Waste Adsorption." *APCBEE Procedia*. 1 : 82-89.

[36] Sadhasivam, S., Savitha, S. and Swaminathan, K. 2007. "Exploitation of Trichoderma Harzianum Mycelial Waste for the Removal of Rhodamine 6G from Aqueous Solution." *Journal of Environmental Management*. 85(1). : 155–161.

[37] Xu, Y.-Y., Zhou, M., Geng, H.-J., Hao, J.-J., Ou, Q.-Q., Qi, S.-D. and Chen, X.-G. 2012. "A Simplified Method for Synthesis of Fe_3O_4@PAA Nanoparticles and its Application for the Removal of Basic Dyes." *Applied Surface Science*. 258(8). : 3897–3902.

[38] Zhang, X.F. Zhang, Y and Liu, L. 2014. "Fluorescence Lifetimes and Quantum Yields of Ten Rhodamine Derivatives: Structural Effect on Emission Mechanism in Different Solvents." *Journal of Luminescence*. 145 : 448-453.

[39] Wikipedia. 2016. **Rhodamine 6G**. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Rhodamine_6G. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 9 มกราคม 2562).

[40] Wikipedia. 2016. **Iron(II,III) oxide**. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Iron(II,III)_oxide. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 9 มกราคม 2562).

[41] BuyTropicalife.com. 2018. **DI WATER**. [Online]. Available : https://buytropicalife.com/di-water-de-ionized-water.html. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 9 มกราคม 2562).

[42] Bagbi, Y., Sarswat, A., Mohan, D., Pandey, A. and Solanki, P. R. 2017. "Lead and Chromium Adsorption from Water using L-Cysteine Functionalized Magnetite (Fe_3O_4) Nanoparticles." *Scientific Reports*. 7(1).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารเพื่อใช้ในงานวิจัย

เนื่องจากการทดลองใช้ความเข้มข้นของโรดามีน 6จี $1x10^{-6}$ โมลาร์ $2x10^{-6}$ โมลาร์ $3x10^{-6}$ โมลาร์ $4x10^{-6}$ โมลาร์ และ $5x10^{-6}$ โมลาร์ ผสมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงต้องเตรียมสารละลายโรดามีน 6จี และอนุภาคนาโนแม่เหล็กให้มีความเข้มข้นมากกว่าเดิม 2 เท่า

1. วิธีการคำนวณการเตรียมสารละลายโรดามีน 6จี

ในการเตรียมสารละลายตั้งต้นโรดามีน 6จีที่มีความเข้มข้น $1x10^{-3}$ โมลาร์ ในปริมาตร
10 มิลลิตร สามารถคำนวณได้ดังนี้
จากสูตร

$$g = (N_1 \times V_1 \times MW) \times 1000$$

เมื่อ g คือ ปริมาณสารที่ต้องการ (กรัม)
MW คือ มวลโมเลกุลของสาร (มวลโมเลกุลของโรดามีน 6จี 479.02 g/mol)
V_1 คือ ปริมาตรสารละลาย (มิลลิลิตร) (10 มิลลิลิตร)
N_1 คือ ความเข้มข้นที่ต้องการ (โมลาร์) (10^{-3} โมลาร์)

จะได้

$$g = (10^{-3} \text{ M} \times 10 \text{ mL} \times 479.02 \text{ g/mol}) \times 1000$$

$$g = 0.\ 0047 \text{ g}$$

ดังนั้น จากการคำนวณจะต้องชั่งสารสีย้อม Rh6G ปริมาณ 0.0047 กรัม และนำมาทำละลายกับน้ำปราศจากไอออน

2. วิธีการคำนวณการเจือจางสารละลายสีย้อมให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ

คำนวณได้จากสมการ

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

เมื่อ C_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น
C_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ
V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายตั้งต้นที่เตรียมไว้
V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการ

2.1 เตรียมสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 2×10^{-6} โมลาร์ ที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์

ปริมาตรที่ต้องการแบ่งมา $V_1 = (C_2 \times V_2) \div C_1$

$V_1 = ((2\times10^{-6}) \times (10)) \div (10^{-3})$

$V_1 = 0.02$ มิลลิลิตร

ดังนั้นนำสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ มา 0.02 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 9.8 มิลลิลิตร

2.2 เตรียมสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 4×10^{-6} โมลาร์ ที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์

ปริมาตรที่ต้องการแบ่งมา $V_1 = (C_2 \times V_2) \div C_1$

$V_1 = ((4\times10^{-6}) \times (10)) \div (10^{-3})$

$V_1 = 0.04$ มิลลิลิตร

ดังนั้นนำสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ มา 0.04 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 9.6 มิลลิลิตร

2.3 เตรียมสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 6×10^{-6} โมลาร์ ที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์

ปริมาตรที่ต้องการแบ่งมา $V_1 = (C_2 \times V_2) \div C_1$

$V_1 = ((6\times10^{-6}) \times (10)) \div (10^{-3})$

$V_1 = 0.06$ มิลลิลิตร

ดังนั้นนำสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ มา 0.06 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 9.4 มิลลิลิตร

2.4 เตรียมสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 8×10^{-6} โมลาร์ ที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์

ปริมาตรที่ต้องการแบ่งมา $V_1 = (C_2 \times V_2) \div C_1$

$V_1 = ((8\times10^{-6}) \times (10)) \div (10^{-3})$

$V_1 = 0.08$ มิลลิลิตร

ดังนั้นนำสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ มา 0.08 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 9.2 มิลลิลิตร

2.5 เตรียมสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 10×10^{-6} โมลาร์ ที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์

ปริมาตรที่ต้องการแบ่งมา $V_1 = (C_2 \times V_2) \div C_1$

$V_1 = ((10\times10^{-6}) \times (10)) \div (10^{-3})$

$V_1 = 0.1$ มิลลิลิตร

ดังนั้นนำสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ มา 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 9.9 มิลลิลิตร

3.3.3 วิธีคำนวณปริมาณสารเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

ดังนั้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร = 0.002 กรัมต่อ10มิลลิลิตร

เพราะฉะนั้นปริมาณสารเหล็กออกไซด์ ที่ต้องการชั่งเท่ากับ 0.002 กรัม ผสมน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร จะได้อนุภาคเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. การเตรียมวัสดุตัวดูดซับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4

ในการเตรียมสารแขวนลอยนาโนแม่เหล็กที่มีความเข้มข้นในช่วง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีวิธีการคำนวณดังนี้

3.1 เตรียมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

โดยความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร = 0.002 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร

ดังนั้นต้องชั่งอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ปริมาณ 0.002 กรัม ผสมน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร จะได้อนุภาคเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2 เตรียมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

โดยความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร = 0.006 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร

ดังนั้นต้องชั่งอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ปริมาณ 0.006 กรัม ผสมน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร จะได้อนุภาคเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

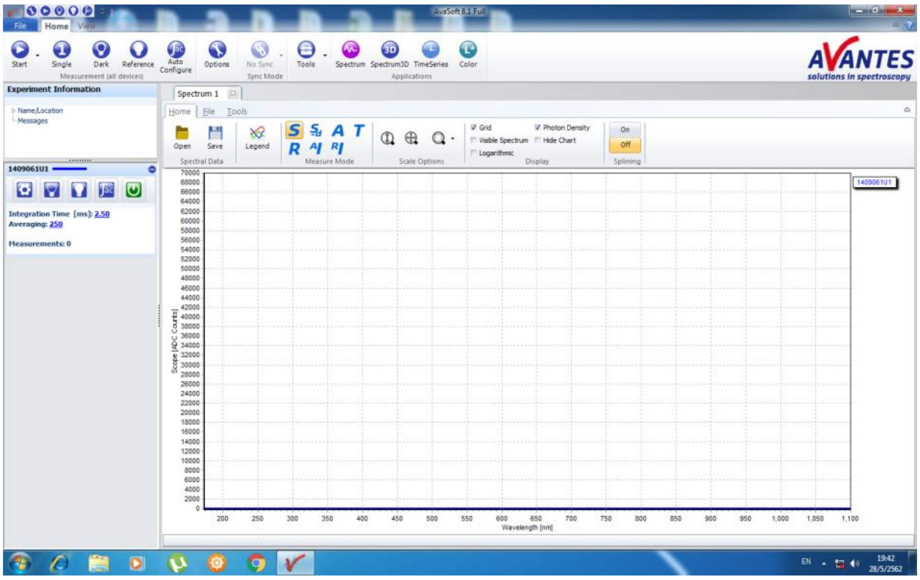
3.3 เตรียมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

โดยความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร = 0.01 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร

ดังนั้นต้องชั่งอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ปริมาณ 0.01 กรัม ผสมน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร จะได้อนุภาคเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

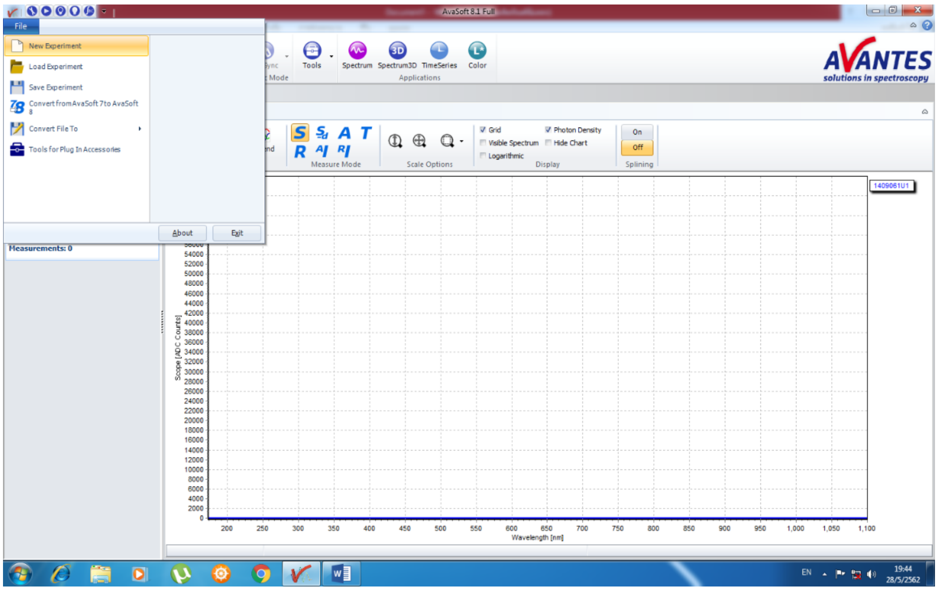
ภาคผนวก ข

การเปิดโปรแกรม Avasorf 8.1 เมื่อคลิกไปที่โปรแกรม Avasorf 8.1 แล้วจะได้หน้าโปรแกรมดังรูปที่ ข.1



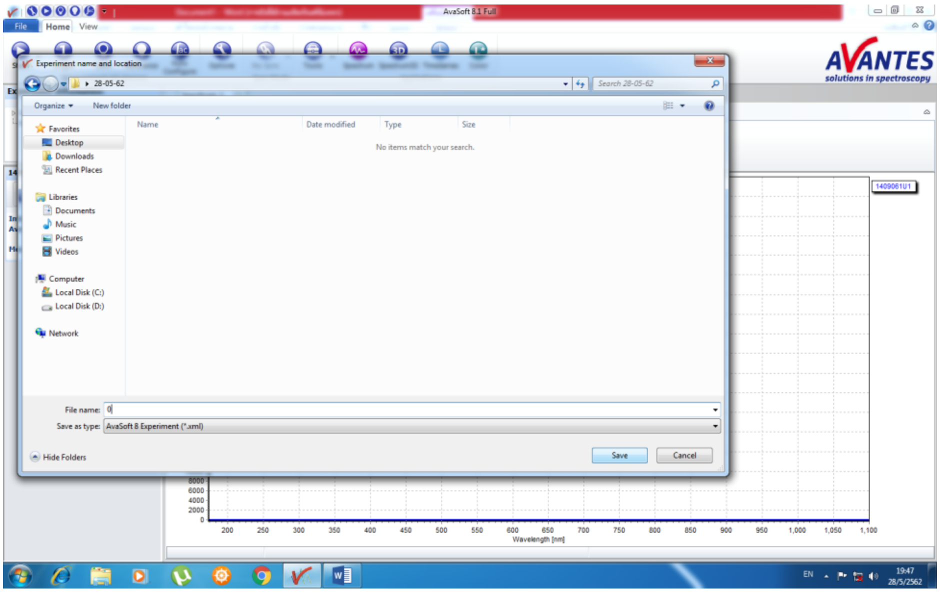
รูปที่ ข.1 แสดงหน้าแรกของโปรแกรม Avasorf 8.1

จากนั้น ขั้นตอนที่ 1 คลิกไป File จากนั้นกดไปที่ New Experiment ดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 แสดงการกด New Experiment เพื่อเริ่มการใช้โปรแกรม

ขั้นตอนที่ 2 สร้าง Folder แล้วตั้งชื่อไฟล์งานที่จะเซฟแล้วกด Save ดังรูปที่ ข.3

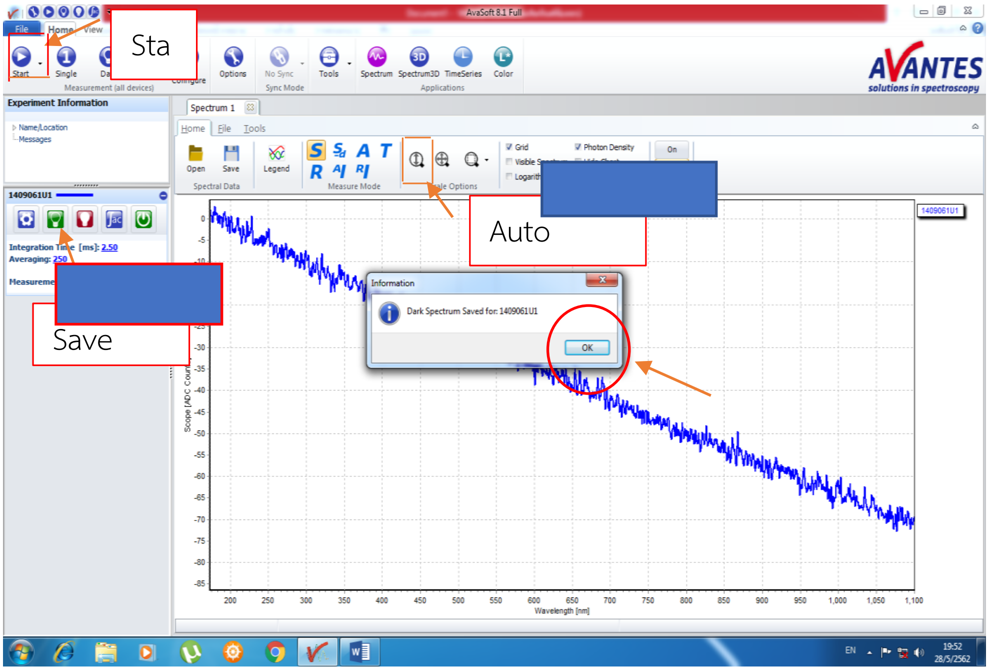


รูปที่ ข.3 แสดงการเปิด Folder

ขั้นตอนที่ 3 ในขณะที่เครื่องปิดรูรับแสงให้เราทำการวัด Dark ในขั้นตอนต่อมา ดังรูปที่ ข.4

รูปที่ ข.4 แสดงการปิดกั้นแสงเพื่อวัด Dark

ขั้นตอนที่4 ปิดทางเดินแสงเข้าสเปกโตมิเตอร์กด Start จากนั้นกด Save Dark แล้วกด OK ดังรูปที่ ข.5

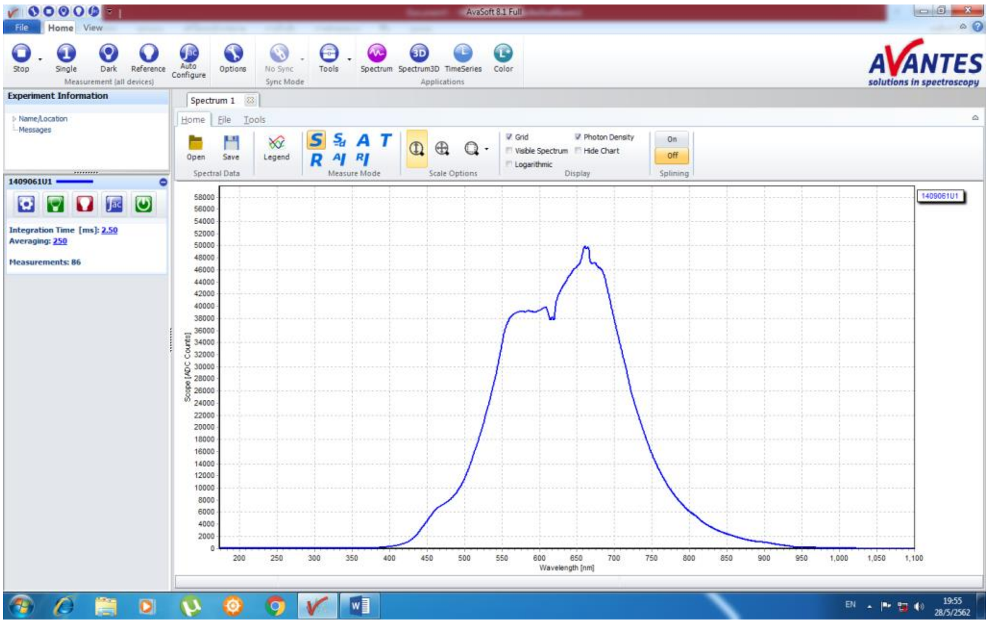


รูปที่ ข.5 แสดงการวัด Dark

ขั้นตอนที่ 5 จากนั้นต่อสายไฟเบอร์เข้ากับรู้รับแสงของเครื่องสเปกโตมิเตอร์ ดังรูปที่ ข.6

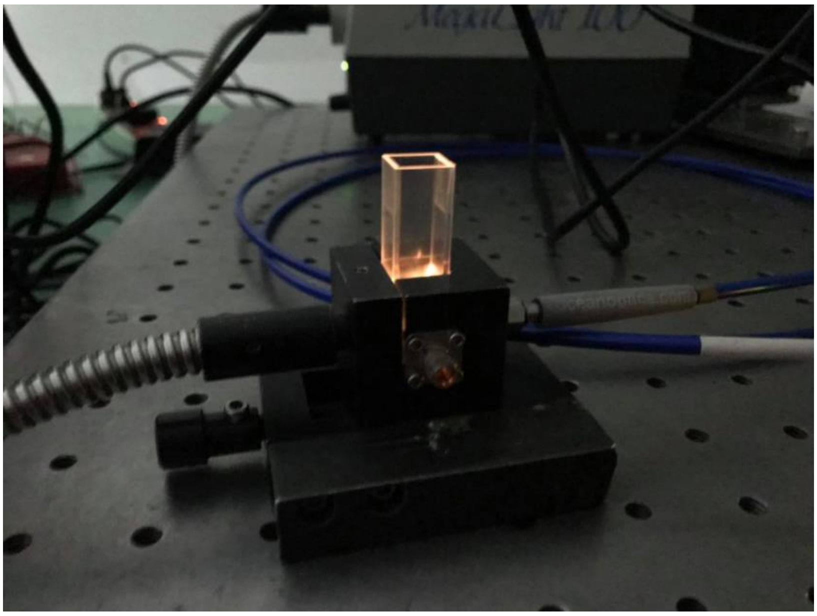
รูปที่ ข.6 แสดงการต่อสายไฟเบอร์

ขั้นตอนที่ 6 ปรับความเข้มแสงจากหลอดทังสตน จนได้ความเข้มแสงประมาณ 50000 counts ดังรูปที่ ข.7



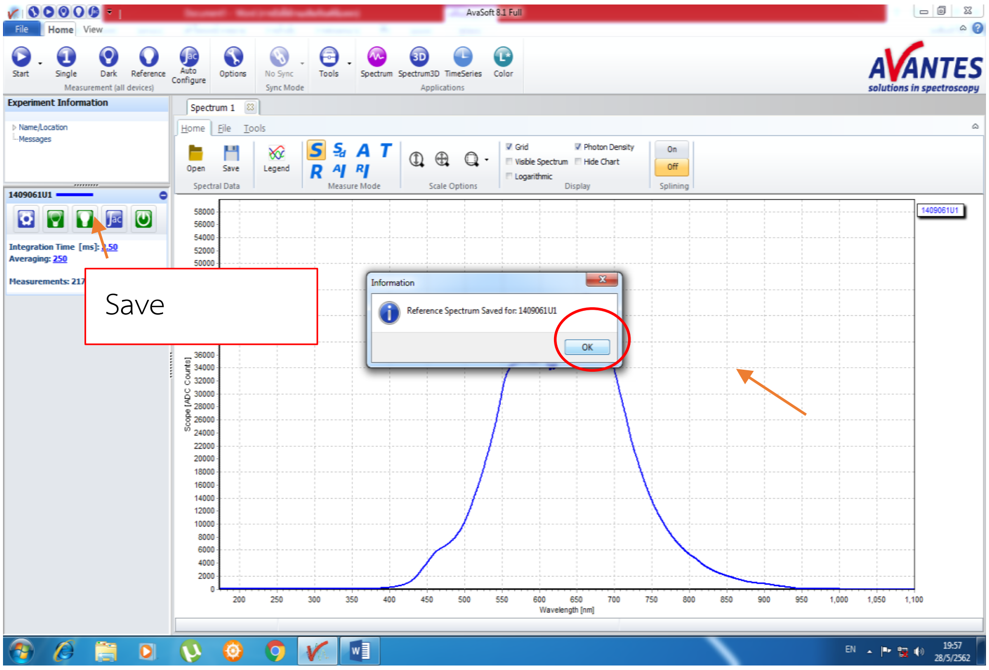
รูปที่ ข.7 แสดงการปรับค่าความเข้มแสงจากหลอดทังสเตน 50000 counts

ขั้นตอนที่ 7 นำตัวอ้างอิงที่ไม่มีสารตัวอย่างหรือน้ำบิสุทธิมาว่างเพื่อเป็นตัว Blank เพื่อวัด White mode ดังรูปที่ ข.8



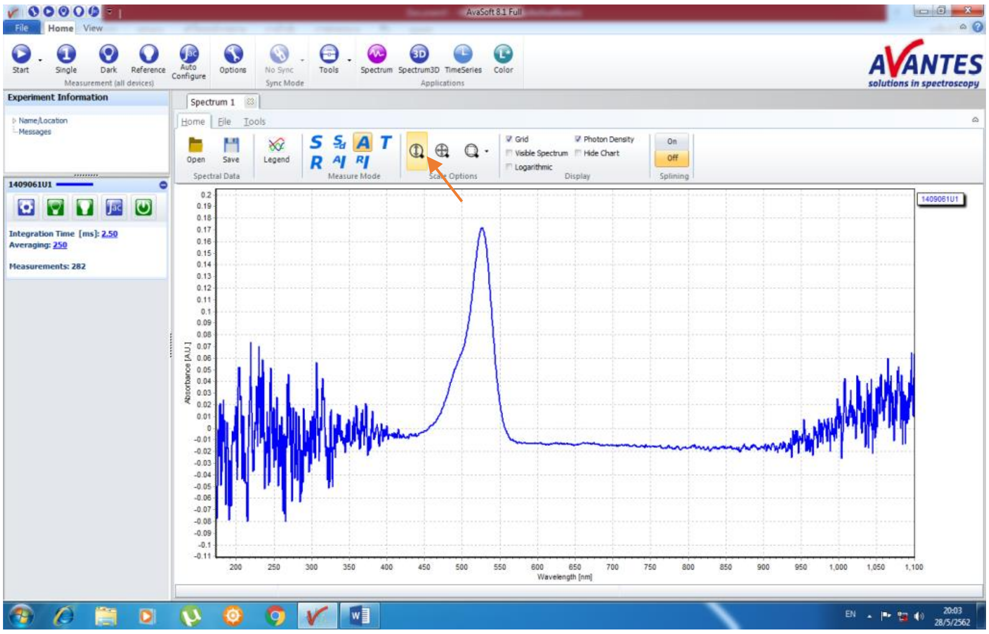
รูปที่ ข.8 แสดงการวัดสารอ้างอิงหรือน้ำบริสุทธิ

ขั้นตอนที่ 9 จากนั้นกด Save Reference แล้วกด OK ได้ ดังรูปที่ ข.9



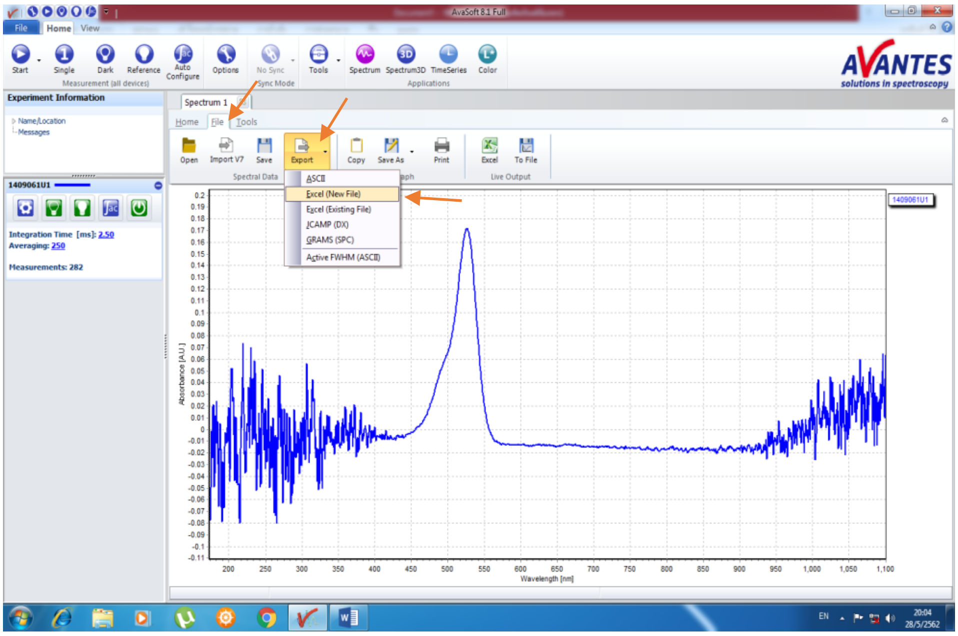
รูปที่ ข.9 แสดงการ Save Reference

ขั้นตอนที่ 10 จากนั้นนำสารละลายที่ต้องการวัดมาใส่แทนน้ำบริสุทธิ เปลี่ยนโหมดเป็น A แล้วทำการวัด ดังรูปที่ ข.10



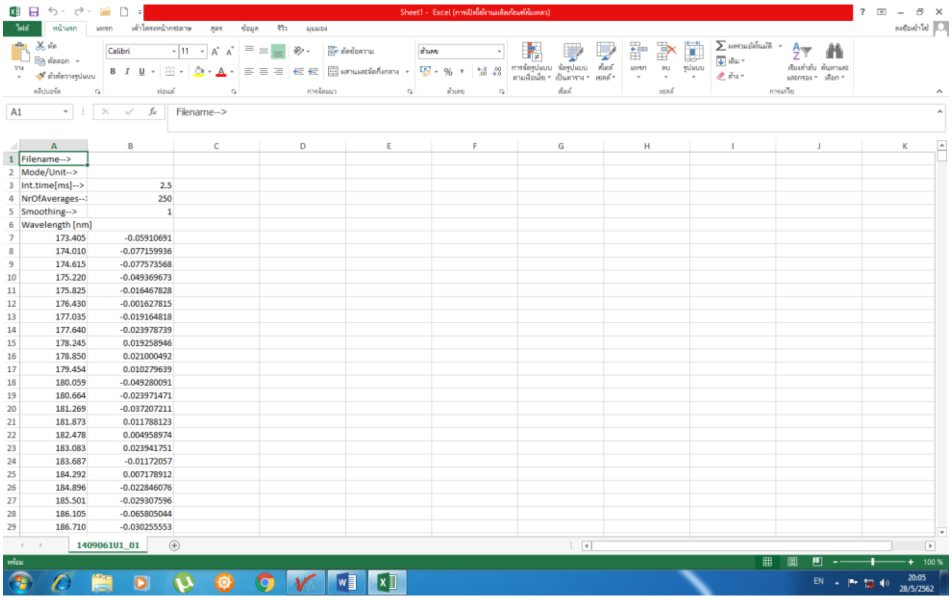
รูปที่ ข.10 แสดงการปรับโหมด A

ขั้นตอนที่ 11 จากนั้นกด File กด Export แล้วเลือก Excel(New Fild) แล้วกด OK ดังรูปที่ ข.11



รูปที่ ข.11 แสดงการวัดสารตัวอย่างและSave ไฟล์เป็น Excel

ขั้นตอนที่ 12 ทำการ Export แล้วเลือก Excel(New Fild) แล้วกด OK จได้ค่าที่เป็น Excel ขึ้นมา ดังรูปที่ ข.12



รูปที่ ข.12 แสดงค่าวัดในรูป Excel

Journal of Nanomaterials
Journal of Analytical Methods in Chemistry
The Scientific World Journal
Journal of Applied Chemistry
International Journal of Photoenergy
Advances in Physical Chemistry
Hindawi
Submit your manuscripts at
www.hindawi.com
International Journal of Medicinal Chemistry
Bioinorganic Chemistry and Applications
Journal of Materials
Advances in Tribology
Journal of Chemistry
BioMed Research International
International Journal of Spectroscopy
International Journal of Electrochemistry
International Journal of Analytical Chemistry
Journal of Spectroscopy
Journal of Nanotechnology
Enzyme Research
Biochemistry Research International

Hindawi
Journal of Spectroscopy
Volume 2019, Article ID 2853989, 5 pages
https://doi.org/10.1155/2019/2853989

Research Article

Effect of Adsorption Characteristics of Rhodamine 6G Dye Solution in Fe_3O_4 Magnetic Nanoparticles on Fluorescence Quantum Yield

Suwaphit Phoemphoonthanyakit,[1] Panpailin Seeharaj,[2] Pattareeya Damrongsak,[1] and Kitsakorn Locharoenrat[1]

[1]*Biomedical Physics Research Unit, Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*
[2]*Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*

Correspondence should be addressed to Kitsakorn Locharoenrat; kitsakorn.lo@kmitl.ac.th

Received 7 March 2019; Accepted 25 June 2019; Published 3 July 2019

Academic Editor: K.S.V. Krishna Rao

Copyright © 2019 Suwaphit Phoemphoonthanyakit et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this work, the use of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles in the adsorption of rhodamine 6G solution was evaluated via absorbance and fluorescence spectroscopy using the UV-Vis spectrometer. The adsorption mechanism of rhodamine 6G on Fe_3O_4 was determined with respect to the adsorbent dosage (2.5–10 mg/L) and treatment time (0–150 min). The experimental data revealed that the fluorescence quantum yield of rhodamine 6G was inversely proportional to the percentage of dye removal. The highest efficiency of dye removal was obtained at 10 mg/L Fe_3O_4, and the adsorption capacity was about 150 mg/g, together with a reduced treatment time of 30 min, owing to active adsorption of Fe_3O_4. We believe that our study makes a significant contribution to the literature because Fe_3O_4 magnetic nanoparticles were found to be able to quench rhodamine 6G dye molecules, which will aid in eliminating toxic and hazardous pollutants from dye wastewater, which are otherwise detrimental to the environment and human health.

1. Introduction

Nowadays, the textile industry, being the highest user of dyes for fiber coloration, is faced with the challenge of disposal of dye wastewater worldwide. Effluents derived from many manufacturing units are sometimes discharged into water resources without any treatment, partly due to economic and technical restrictions. Because most dyes are stable against oxidizing agents and sunlight, nonremoval of color from dye wastewater is becoming one of the main water pollutants. They cause severe environmental hazards, not only affecting the aesthetic merit but also decreasing the penetration of light, and it can even prove to be carcinogenic for humans. As a result, various physical, chemical, and biological techniques have been developed to eliminate dissolved inorganic/organic compounds by converting them into harmless end products. Among these treatment approaches, physical adsorption on activated carbon is a very practical one to produce effluents composing low level of these compounds [1–3]. However, the use of alternative substitutes to eliminate such dyes from other materials like nanomaterials has emerged as they are able to treat a large amount of dye wastewater and are not time-consuming and produce a low amount of contaminants. In recent years, magnetic nanoparticles have gained considerable interest with regard to environmental concerns. Among them, Fe_3O_4 is considered as a good candidate capable of removal of original dyes [4]; however, there is no empirical study on the relationship between the adsorption process of dyes and fluorescence quantum yield. Fe_3O_4 nanoparticles have been proved to be biocompatible with low-toxicity and are applicable for a variety of biomedical researches. For instance,

they are commonly used as a contract agent, therapeutic agent, and sensing probe for magnetic resonance imaging, hyperthermia therapy, and targeted-drug delivery, respectively [5]. However, although there are many common cationic rhodamine family dyes used in the textile industry, only a few studies have been focused on adsorption behaviors of rhodamine 6G. Therefore, in this study, we select rhodamine 6G as a dye model to elucidate the interaction mechanism between Fe_3O_4 magnetic nanoparticles and rhodamine 6G dye. Based on dosages of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles, it is possible to observe both amplification and quenching of fluorescence of dye molecules.

2. Materials and Methods

Iron-(II,III) oxide or Fe_3O_4 with particle sizes in the range of 50–100 nm and cationic dye rhodamine 6G were purchased from Sigma-Aldrich, USA. The dye powder was first dissolved in deionized water for use as a stock solution. The stock solution was, then, diluted in two proportions. The first portion was used to acquire a calibration curve as $y = 79289x – 0.0032$, where y and x represent the absorbance peak and rhodamine 6G concentration, respectively, as shown in Figure 1.

The second portion was used further as adsorbate. Next, the adsorption experiments were performed by mixing 1 mL dye solution of fixed concentration (3 μM rhodamine 6G) and 1 mL adsorbent of known quantity (2.5–10 mg/L Fe_3O_4) under a sonicator at the room temperature of 26°C and pH 7.0. The treatment time was varied from 0 to 150 min. At every 30 min time interval, the mix solution was studied under the UV-Vis spectrometer by measuring the absorbance at wavelength of 525 nm and fluorescence at wavelength 555 nm. More details of the optical setup were

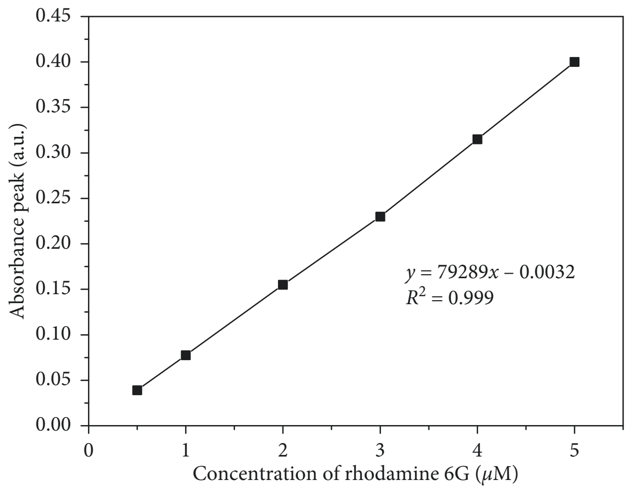


Figure 1: Calibration curve of rhodamine 6G dye concentration determination.

explained in [6]. Fluorescence quantum yield, efficient removal of dye, and amount of dye adsorbed on adsorbent were calculated using the following equations:

Fluorescence quantum yield (Q) was calculated by [6]

$$Q = Q_{REF} \cdot \frac{I}{A} \cdot \frac{A_{REF}}{I_{REF}} \cdot \frac{n^2}{n^2_{REF}}, \quad (1)$$

where I and A are the integrated fluorescence intensity and absorbance peak, respectively; n is the refractive index of the solvent; and subscript REF is the reference fluorophore. The dye concentration was calculated from the calibration curve.

Efficiency of dye concentration removal was calculated as follows:

$$\%\ \text{dye removal} = \frac{\text{initial concentration of dye} - \text{equilibrium concentration of dye}}{\text{initial concentration of dye}} \times 100. \quad (2)$$

Amount of dye adsorbed on the adsorbent at equilibrium state was calculated as follows:

$$\text{adsorption capacity} = \frac{\text{initial concentration of dye} - \text{equilibrium concentration of dye}}{\text{mass of adsorbent}} \times \text{volume of solution}. \quad (3)$$

3. Results and Discussion

Adsorbent dosage is an imperative factor in the determination of its adsorption capacity on an adsorbate. To verify the effect of the adsorbent dosage on rhodamine 6G adsorption, adsorption experiments were performed by mixing the Fe_3O_4 dosage (2.5, 5.0, 7.5, and 10.0 mg/L) in a solution form, for certain amount of rhodamine 6G of 3.0 μM at a room temperature of 26°C and pH 7.0 and for time intervals from 0 to 150 min. The absorption and fluorescence intensities of the mixed solution are displayed in Figures 2 and 3, respectively, and the absorbance peak and integrated fluorescence intensity of the solution are shown in Figures 4 and 5, respectively. The absorption and fluorescence intensities of Fe_3O_4 mixed with rhodamine 6G are found to be remarkably lower than those of rhodamine 6G alone. They all tend to decrease as dosages of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles increase, owing to the following reasons. Since a surface-to-volume ratio of Fe_3O_4 is high, it intensely adsorbs rhodamine 6G. A reduction in the fluorescence intensity will thus occur due to the inner filter effect [7]. The fluorescence intensity reduces not only due to the strong adsorption capacity of Fe_3O_4 but also due to the fluorescence energy resonance transfer of rhodamine 6G by the Fe_3O_4

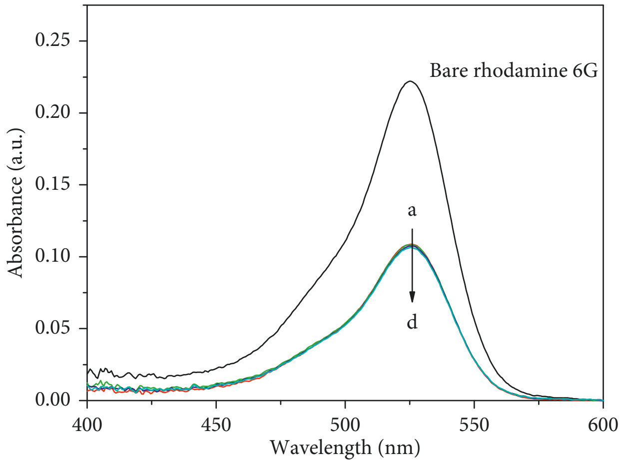


FIGURE 2: Absorbance spectra of 3.0 μM rhodamine 6G mixed with four different dosages of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles. The treatment time is 0 min, as a representative sample. a, b, c, and d represent Fe_3O_4 magnetic nanoparticles dosages of 2.5, 5.0, 7.5, and 10.0 mg/L, respectively. Absorbance peak exists at 525 nm.

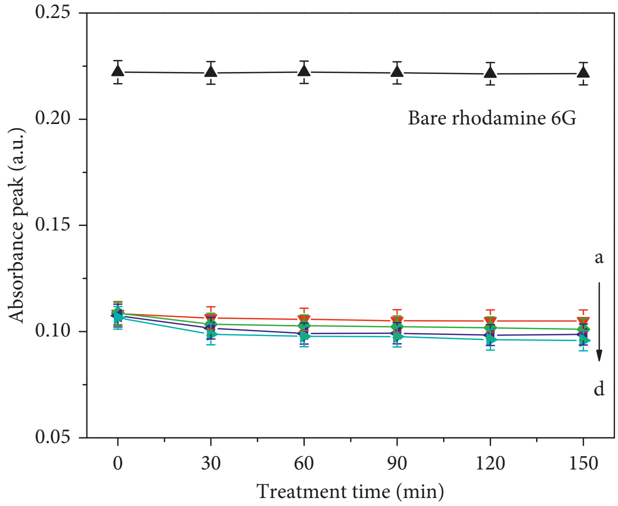


FIGURE 4: Absorbance peak of 3.0 μM rhodamine 6G mixed with four different dosages of Fe_3O_4 nanoparticles under six different treatment times. a, b, c, and d represent Fe_3O_4 magnetic nanoparticles dosages of 2.5, 5.0, 7.5, and 10.0 mg/L, respectively.

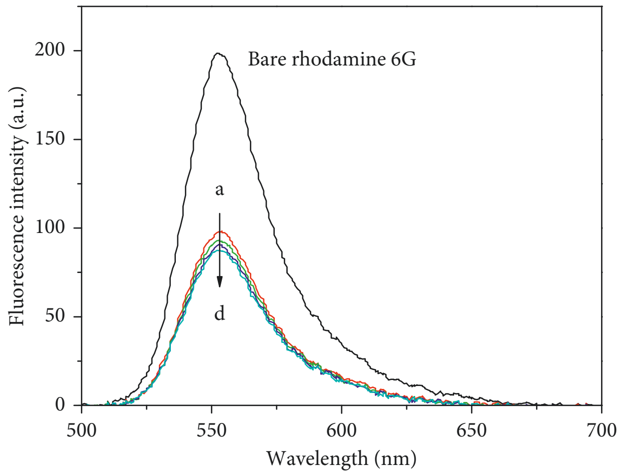


FIGURE 3: Fluorescence spectra of 3.0 μM rhodamine 6G mixed with four different dosages of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles. The treatment time is 0 min as a representative sample. a, b, c, and d represent Fe_3O_4 magnetic nanoparticles dosages of 2.5, 5.0, 7.5, and 10.0 mg/L, respectively. Peak fluorescence exists at 555 nm.

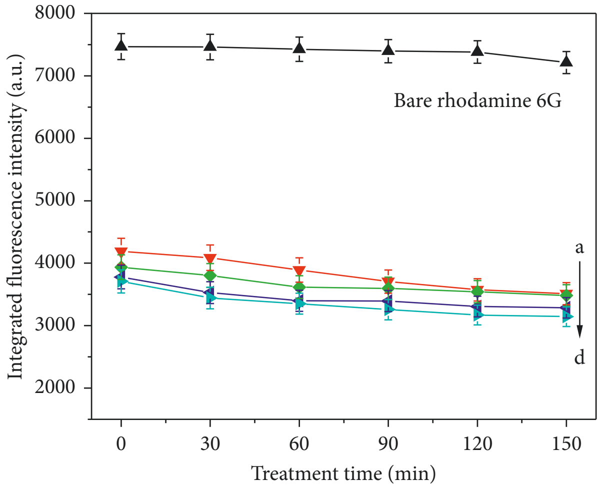


FIGURE 5: Integrated fluorescence intensity of 3.0 μM rhodamine 6G mixed with four different dosages of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles under six different treatment times. a, b, c, and d represent Fe_3O_4 magnetic nanoparticles dosages of 2.5, 5.0, 7.5, and 10.0 mg/L, respectively.

nanoparticles. It is a nonradiative energy transfer from an excited donor fluorophore to an acceptor though nonradiative dipole-dipole coupling [8–10]. Hence, it is possible to quench the rhodamine 6G dye molecule by Fe_3O_4.

A reduction of both absorption and fluorescence intensities further results in a significant decrease in the fluorescence quantum yield, calculated using equation (1) and as shown in Figure 6. The fluorescence quantum yield is in the range of 0.81–0.88. In Figure 7, the fluorescence quantum yield is plotted with respect to the dye removal calculated using equation (2). The fluorescence quantum yield is inversely proportional to dye removal. That is, with the increase in dye removal, the fluorescence quantum yield gradually decreases. The relationship is linear, which further confirms that Fe_3O_4 magnetic nanoparticles are an efficient fluorescence quencher for rhodamine 6G. The observed fluorescence mechanism of rhodamine 6G under the influence of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles possibly involves fluorescence resonance energy transfer between the dye molecule and Fe_3O_4 magnetic nanoparticles.

The effect of Fe_3O_4 dosage on rhodamine 6G concentration removal shows a small change, as displayed in Figure 8; however, the adsorption capacity of Fe_3O_4 calculated using equation (3) shows a considerable change, as exhibited in Figure 9. The adsorption capacity is in the range of 150–600 mg/g. It is seen that the treatment time profile of rhodamine 6G uptake is a smooth and continuous curve leading to a saturation stage, indicating the available

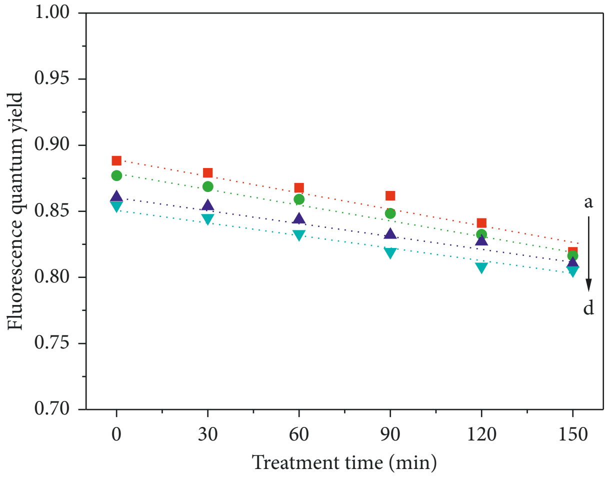


Figure 6: Percentage of fluorescence quantum yield of 3.0 μM rhodamine 6G mixed with four different dosages of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles under six different treatment times. a, b, c, and d represent Fe_3O_4 magnetic nanoparticles dosages of 2.5, 5.0, 7.5, and 10.0 mg/L, respectively. Dashed lines are for guide to the eyes.

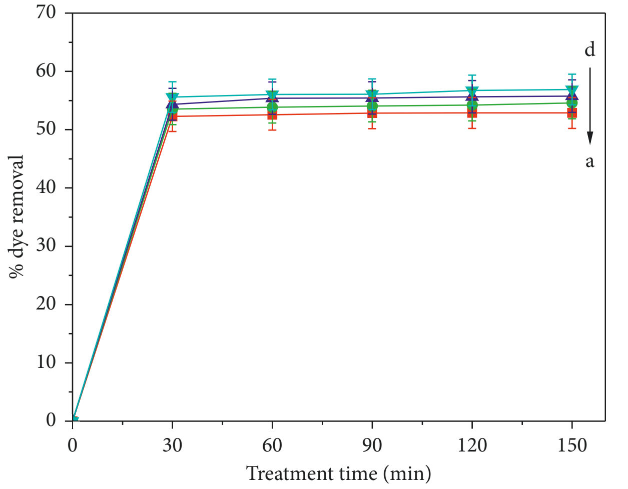


Figure 8: Percentage of dye removal of 3.0 μM rhodamine 6G mixed with four different dosages of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles under six different treatment times. a, b, c, and d represent Fe_3O_4 magnetic nanoparticles dosages of 2.5, 5.0, 7.5, and 10.0 mg/L, respectively.

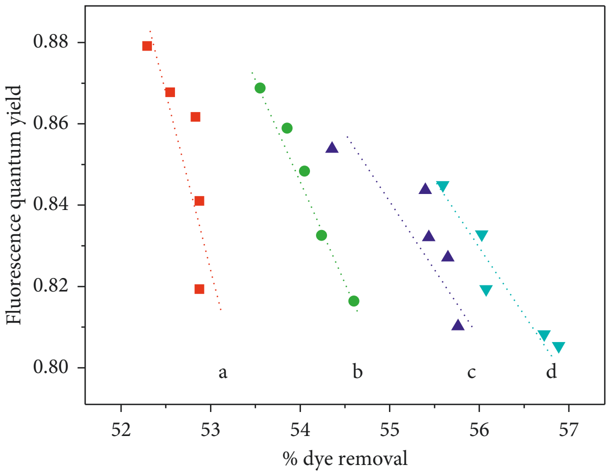


Figure 7: Relationship between fluorescence quantum yield and dye removal of 3.0 μM rhodamine 6G mixed with four different dosages of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles under six different treatment times. a, b, c, and d represent Fe_3O_4 magnetic nanoparticles dosages of 2.5, 5.0, 7.5, and 10.0 mg/L, respectively. Dashed lines are for guide to the eyes.

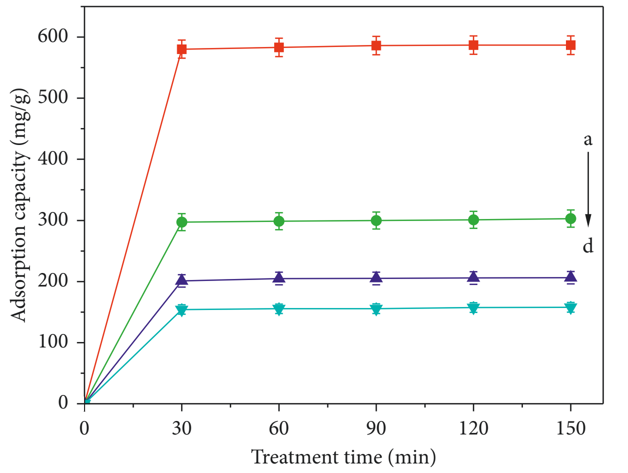


Figure 9: Adsorption capacity of 3.0 μM rhodamine 6G mixed with four different dosages of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles under six different treatment times. a, b, c, and d represent Fe_3O_4 magnetic nanoparticles dosages of 2.5, 5.0, 7.5, and 10.0 mg/L, respectively.

monolayer coverage of rhodamine 6G on the surface of Fe_3O_4.

In all cases, it is clearly seen that the adsorption of rhodamine 6G is rapid at the first treatment time of 30 min because the mass transfer driving force is large. Adsorption of rhodamine 6G remains constant after reaching an equilibrium state because rhodamine 6G reaches a boundary layer and then possibly diffuses into the tiny pores of Fe_3O_4. Furthermore, the equilibrium time is shorter at a higher Fe_3O_4 dosage. This is because, as the Fe_3O_4 dosage increases, the surface area of Fe_3O_4 will increase, leading to higher availability of active adsorbent sites to adsorb rhodamine 6G from aqueous solution. Furthermore, at each equilibrium time, it is found that the percentage of rhodamine 6G concentration removal tends to increase from 52 to 57% when the Fe_3O_4 dosage is increased from 2.5 to 10.0 mg/L, respectively. It is believed that the removal percentage would not go beyond 60% even when more than 10 mg/L of Fe_3O_4 is added. These results are in good agreement with those in [4]. Thus, the highest efficiency of dye removal is achieved at 10 mg/L Fe_3O_4, whereas the corresponding adsorption capacity is about 150 mg/g in this study. This value is still higher in comparison with the results reported over the last ten years [11, 12] in other studies on the adsorption of different dyes on different adsorbents, except for [13]. The best treatment time in our adsorption process is 30 min, involving low operation cost that is very important for

industry-scale application of an adsorbent. Since rhodamine 6G concentration removal cannot reach 100% similar to [4], partly due to the aggregation of Fe_3O_4 surface area available to rhodamine 6G and consequently a reduction in the diffusion path length, application of UV light irradiation is suggested to be added in the present process in order to further improve the adsorption capacity. It is expected that the dye removal might go beyond 60% in that case and a comparative study will be presented in the future.

4. Conclusions

The effectiveness of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles as an adsorbent for the elimination of rhodamine 6G dye solution was investigated in this study, by using a UV-Vis spectrometer. Further, amplification and quenching of fluorescence of dye molecules were observed with respect to the dosage of Fe_3O_4 nanoparticles. Upon the addition of Fe_3O_4 in rhodamine 6G solution, the absorption and fluorescence intensities were significantly reduced due to the adsorption of rhodamine 6G molecules on the surface of Fe_3O_4 and the quenching of rhodamine 6G as a fluorophore. The fluorescence quantum yield of rhodamine 6G was therefore decreased, conforming to an increase in dye removal. The highest efficiency of dye removal was achieved at 10 mg/L Fe_3O_4, whereas the corresponding adsorption capacity was approximately 150 mg/g at a shortened treatment time of 30 min. It is expected that Fe_3O_4 magnetic nanoparticles will be applied as an adsorbent for elimination of a variety of toxic and hazardous pollutants from dye wastewater because the magnetic nanoparticles have a high surface-to-volume ratio and appropriate pore size for adsorption of dye molecules.

Data Availability

The data used to support the findings of this study are included within the article.

Conflicts of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding this study.

Acknowledgments

This research was funded by the King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

References

[1] L. Ding, B. Zou, W. Gao et al., "Adsorption of rhodamine-B from aqueous solution using treated rice husk-based activated carbon," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 446, no. 5, pp. 1–7, 2014.

[2] Z. Chennouf-Abdellatif, B. Cheknane, F. Zermane, E. M. Gaigneaux, O. Mohammedi, and N. Bouchenafa-Saib, "Equilibrium and kinetic studies of methyl orange and rhodamine B adsorption onto prepared activated carbon based on synthetic and agricultural wastes," *Desalination and Water Treatment*, vol. 67, pp. 284–291, 2017.

[3] M. Danish, T. Ahmad, R. Hashim et al., "Comparison of surface properties of wood biomass activated carbons and their application against rhodamine B and methylene blue dye," *Surfaces and Interfaces*, vol. 11, pp. 1–13, 2018.

[4] A. Khorshid and M. Hajnajafi, "Degradation of rhodamine 6G in aqueous solution by using Au/Fe_3O_4 core/shell nanoparticles," *Journal of Applied Chemistry*, vol. 13, no. 47, pp. 21–34, 2018.

[5] N. T. K. Thanh, *Clinical Applications of Magnetic Nanoparticles*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2018.

[6] E. Rammarat, K. Locharoenrat, W. Yindeesuk, and P. Damrongsak, "Studies of concentration dependence of the fluorescent quantum yield from rhodamine 6G and Au–Pd core–shell nanorods, using a response surface methodology," *Ukrainian Journal of Physical Optics*, vol. 18, no. 3, pp. 179–186, 2017.

[7] A. V. Fonin, A. I. Sulatskaya, I. M. Kuznetsova, and K. K. Turiverov, "Fluorescence of dyes in solutions with high absorbance. Inner filter effect correction," *PLoS One*, vol. 9, no. 7, Article ID e103878, 2014.

[8] P.-J. J. Huang and J. Liu, "Molecular beacon lighting up on graphene oxide," *Analytical Chemistry*, vol. 84, no. 9, pp. 4192–4198, 2012.

[9] M. Ujihara, N. M. Dang, and T. Imae, "Fluorescence quenching of uranine on confeito-like Au nanoparticles," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 14, no. 7, pp. 4906–4910, 2014.

[10] B. Gilbert, J. E. Katz, N. Huse et al., "Ultrafast electron and energy transfer in dye-sensitized iron oxide and oxyhydroxide nanoparticles," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 15, no. 40, pp. 17303–17313, 2013.

[11] B. Uçar, A. Güvenç, and Ü. Mehmetoglu, "Use of aluminium hydroxide sludge as adsorbents for the removal of reactive dyes: equilibrium, thermodynamic, and kinetic studies," *Hydrology Current Research*, vol. 2, no. 2, article 1000112, 2011.

[12] A. Azizi, M. A. Moghaddam, and M. Arami, "Removal of a reactive dye using ash of pulp and paper sludge," *Journal of Residuals Science and Technology*, vol. 9, pp. 159–168, 2012.

[13] S. C. R. Santos and R. A. R. Boaventura, "Treatment of a simulated textile wastewater in a sequencing batch reactor (SBR) with addition of a low-cost adsorbent," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 291, pp. 74–82, 2015.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวสุวพิชญ์ เพิ่มพูนธัญญกิจ
วัน เดือน ปีเกิด	2 ตุลาคม พ.ศ. 2536
ที่อยู่ปัจจุบัน	197 หมู่ 6 ตำบล ท่าบัว อำเภอ โพทะเล จังหวัด พิจิตร รหัสไปรษณีย์ 66130
ประวัติการศึกษา	
	พ.ศ. 2559 วิทยาศาสตรบัณฑิต (กศ.บ.) สาขา ฟิสิกส์ เกรดเฉลี่ย 3.2 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
	พ.ศ. 2562 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัย	Effect of Adsorption Characteristics of Rhodamine 6G Dye Solution in Fe_3O_4 Magnetic Nanoparticles on Fluorescence Quantum Yield