

อิทธิพลของอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ต่อการกำจัด
สีย้อมไวแสงโรดามีน 6จี ภายใต้การฉายแสง
แบบต่อเนื่องและแบบพัลส์

INFLUENCE OF Fe_3O_4 MAGNETIC NANOPARTICLES ON
RHODAMINE 6G DYE REMOVAL UNDER CONTINUOUS
AND PULSED LIGHTING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2561

INFLUENCE OF Fe_3O_4 MAGNETIC NANOPARTICLES ON
RHODAMINE 6G DYE REMOVAL UNDER CONTINUOUS
AND PULSED LIGHTING



WARANYA RUNJAREUN
SIRICHAI HOOMSUK

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ACADEMIC YEAR 2018

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



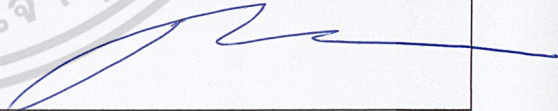
หัวข้อโครงการพิเศษ อิทธิพลของอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe₃O₄ ต่อการกำจัดสีย้อมไวแสงโรดามีน 6จี ภายใต้การฉายแสงแบบต่อเนื่องและแบบพัลส์
Influence of Fe₃O₄ Magnetic Nanoparticles on Rhodamine 6G Dye Removal under Continuous and Pulsed Lighting

ชื่อนักศึกษา นางสาวรณัญญา รุณเจริญ รหัสนักศึกษา 58051135
นายศิริชัย หุมสุข รหัสนักศึกษา 58051146

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กมลปัญญา สุวรรณสุข ประธานกรรมการ	
รศ.ดร.กฤษกร โล่เจริญรัตน์ กรรมการ	
รศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์
ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ไปยังสื่อหรือช่องทางใดๆ ที่มิใช่ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	อิทธิพลของอนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ต่อการกำจัดสีย้อมไวแสงโรดามีน 6จี ภายใต้การฉายแสงแบบต่อเนื่องและแบบพัลส์
ชื่อนักศึกษา	นางสาววรัญญา รุณเจริญ รหัสนักศึกษา 58051135 นายศิริชัย หุมสุข รหัสนักศึกษา 58051146
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ภาณุพล โขลอนกระโทก

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดสีย้อมโรดามีน 6จี (R6G) โดยใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็ก Fe_3O_4 ในน้ำปราศจากไอออน ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ การไม่ฉายแสง การฉายแสงแบบต่อเนื่องและการฉายแสงแบบพัลส์ ผู้วิจัยยังได้ศึกษากลไกการกำจัดสีย้อมโดยใช้แสงอัตราไวโอเล็ต แสงขาว และเปรียบเทียบกับสถานะไม่มีแสง โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม ได้แก่ Duty cycle และความถี่ ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม ซึ่งผลของประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้มีค่ามากถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ได้จากการฉายแสงขาวต่อเนื่องและการฉายแสงแบบพัลส์ที่มีค่า Duty cycle เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความถี่เท่ากับ 40 กิโลเฮิร์ต เป็นเวลา 30 นาที

คำสำคัญ : Fe_3O_4 โรดามีน 6จี ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

Title	Influence of Fe ₃ O ₄ Magnetic Nanoparticle on Rhodamine 6G Dye Removal under Continuous and Pulsed Lighting	
Students	Miss. Waranya Runjareun	Student ID 58051137
	Mr. Sirichai Hoomsuk	Student ID 58051146
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2018	
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pattareeya Dumrongsak	
Co-advisor	Dr. Bhanupol Klongratog	

Abstract

The removal of Rhodamine 6G (R6G) by using Fe₃O₄ in DI water has been investigated in dark, continuous and pulsed light source. The removal kinetics under UV and white lighting were also investigated and compared with the dark condition. Different parameters that affected on the removal efficiency, such as duty cycle and frequency were evaluated to find the optimal operation conditions. The experimental results showed that the removal efficiency more than 90% can be obtained from continuous white light and pulsed light at duty cycle 25 %, frequency 40 kHz at 30 minutes.

Keywords : Fe₃O₄ , Rhodamine 6G , Dye removal efficiency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ภทรียา ดำรงค์ศักดิ์ ที่กรุณาให้ข้อมูล คำแนะนำและคำปรึกษาทางด้านวิชาการที่ติดต่อมาและยังเสนอแนะสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย เสนอแนะแนวทางการแก้ปัญหาอย่างใกล้ชิด รวมถึงชี้แนวทางที่ถูกต้องในการทำงานวิจัยทำให้คณะผู้จัดทำมีความรู้ความเข้าใจในทางวิชาการและความรู้ด้านอื่นๆ มากยิ่งขึ้น ทำให้ผู้จัดทำสามารถนำโครงการพิเศษนี้ไปประยุกต์ใช้ในชีวิตการทำงานในอนาคตได้

ขอขอบคุณ ดร.ภาณุพล โขสนกระโทก ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับความรู้ความเข้าใจในการใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำมาใช้ในงานวิจัย ทำให้คณะผู้จัดทำสามารถทำงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร.กฤษกร โล้เจริญรัตน์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยหลายอย่างตลอดงานวิจัย เช่น เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอนและแท่งแม่เหล็กกวนสาร เป็นต้น อีกทั้งยังให้ความรู้ในด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอีกด้วย

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช และ ผศ.ดร.เอกรัฐ เดชศรี ภาควิชาเคมี ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีและหลอดไมโครเซนติพีพเพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ ดร.กัจปัญญา สุวรรณสุขโข ที่ให้คำปรึกษาทฤษฎีที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ทำให้คณะผู้จัดทำมีความรู้มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องกวนสารละลายตลอดงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ นางสาวสุวิษญ์ เพิ่มพูนธัญญกิจ นางสาวสิทธิรักษ์ ไพโรจน์ และนายเอกชัย รัมมะรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือเรื่องการสอนใช้เครื่องมือในงานวิจัย ให้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสิ่งต่างๆ ในงานวิจัย ตลอดจนดูแลและติดตามการทำงานของคณะผู้จัดทำตลอดจนสำเร็จลุล่วงในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ทุกคนตลอดจนพี่ๆ น้องๆ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกคนที่ให้คำปรึกษาช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการพิเศษนี้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจน คุณย่า คุณยาย และผู้ให้ความอุปการะทุกคน ที่การอนุเคราะห์ส่งเสียค่าเล่าเรียน ช่วยเหลือในทุกอย่าง ตลอดจนเป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุดที่ทำให้คณะผู้จัดทำสามารถทำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นางสาววรัญญา รุณเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญ นายศิริชัย ใช้มุมสุข ษณด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการดูดซับ.....	4
2.1.1 การดูดซับ.....	4
2.1.2 กลไกการดูดซับ.....	5
2.1.3 ตัวดูดซับ.....	7
2.1.4 สมดุลการดูดซับ.....	7
2.1.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	9
2.2 กระบวนการดูดกลืนแสง.....	10
2.2.1 คุณสมบัติการดูดกลืนแสง.....	10
2.2.2 การตรวจสอบคุณสมบัติในการดูดกลืนแสง.....	10
2.3 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	11
2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก.....	12
2.4 กระบวนการย่อยสลายด้วยแสง.....	14
2.4.1 ปฏิกิริยาโฟโตเคมี.....	14
2.5 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการฉายแสงในงานวิจัย.....	15
2.5.1 มอสเฟต.....	15
2.5.2 ทรานซิสเตอร์.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2.5:3 ตัวต้นทวน... ไร้... เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์อื่นใด... 18 คำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1 แผนการทดลองของงานวิจัย.....	21
3.2 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.3 การเตรียมสารเพื่อใช้ในการทดลอง.....	27
3.4 ระบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัย.....	30
3.5 วิธีการทดลองของงานวิจัย.....	34
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	39
4.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาเมื่อฉายแสงต่อเนื่อง.....	39
4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับ Duty cycle เมื่อฉายแสงขาวแบบพัลส์.....	44
4.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดของสีย้อมกับความถี่เวลาเมื่อฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก.....	53
ภาคผนวก ก.....	54
ภาคผนวก ข.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	3
3.1 สมบัติพื้นฐานของสารเรืองแสงโรดามีน 6จี.....	22
3.2 ตารางแสดงสมบัติพื้นฐานของเหล็กออกไซด์.....	23
4.1 ตารางแสดงหัวข้อการทดลองกับเงื่อนไขการทดลอง.....	39
4.2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของแสงที่ใช้กับความเข้มแสง กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย เวลาที่ใช้ในการ ทดลองพลังงานสูงสุด และประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ 150 นาที่.....	43
4.3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle ต่างๆกับความเข้มแสง ประสิทธิภาพการ กำจัดสีย้อมและพลังงานเฉลี่ย ที่เวลา 30 – 150 นาที่ ความถี่คงที่ 1 กิโลเฮิร์ต.....	45
4.4 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ต่างๆ กับความเข้มแสง ประสิทธิภาพการกำจัด สีย้อมและพลังงานเฉลี่ย ที่เวลา 30 – 150 นาที่ ของการฉายแสงแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโลเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ.....	7
2.2 ภูมิภาคการดูดซับ.....	8
2.3 สมดุลการดูดซับ.....	8
2.4 แสดงการดูดกลืนแสงการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล.....	10
2.5 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน.....	11
2.6 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	12
2.7 แสดงปฏิกิริยาโฟโตเรเดชัน.....	14
2.8 แสดงส่วนประกอบของมอสเฟต.....	15
2.9 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟต.....	16
2.10 แสดงสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ประเภท NPN.....	17
2.11 แสดงสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ประเภท PNP.....	17
2.12 แสดงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาช่วยในการทำงานของหลอดไดโอดเปล่งแสงและหลอด ไดโอดเปล่งแสงพลังงานสูง.....	18
2.13 การเปรียบเทียบการดูดซับโครเมียมที่เวลาต่างๆ.....	20
3.1 รูปแสดงโครงสร้างของสารเรืองแสงโรดามีน 6จี.....	22
3.2 แสดงโครงสร้างผลึกของเหล็กออกไซด์.....	23
3.3 กราฟแสดงสเปกตรัมของแสงสีขาว ที่ความเข้มแสง 50 ลักซ์.....	25
3.4 กราฟแสดงสเปกตรัมของแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่ความเข้มแสง 50 ลักซ์.....	26
3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นของสารละลาย โรดามีน 6จี.....	29
3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงสูงสุดกับความเข้มข้นของสารละลาย โรดามีน 6จี.....	29
3.7 แสดงระบบวัดการดูดกลืนของสารละลาย.....	31
3.8 แสดงระบบกวนสารละลาย.....	32
3.9 แสดงระบบการฉายแสงต่อเนื่อง.....	33
3.10 แสดงระบบฉายแสงแบบพัลส์.....	34
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาของเงื่อนไขที่ 1.....	40
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาของเงื่อนไขที่ 2.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาของเงื่อนไขที่ 3.....	42
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับ Duty cycle.....	44
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับความถี่ต่างๆ.....	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคสมัยปัจจุบันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเป็นสิ่งที่ทุกภาคส่วนให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากการใช้ชีวิตในยุคสมัยนี้มีสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ มากมายเกิดขึ้น เนื่องจากความต้องการในการพึ่งพาสิ่งอำนวยความสะดวกที่มากขึ้นจนเกินไป ทำให้ส่วนใหญ่ไม่คำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น รวมถึงการบำบัดของเสียที่ด้อยคุณภาพ จึงทำให้ปัญหานี้ทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการเจริญเติบโตของภาคอุตสาหกรรม เพื่อรองรับความต้องการของประชาชนโดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีอัตราการขยายตัวสูง ทำให้มีการพัฒนาทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและการแข่งขันที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น และน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ร่วมกับวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการผลิตไม่ว่าจะเป็น การผลิตเส้นใย การปั่น การทอ การถักผ้า รวมถึงการฟอกย้อม โดยวัตถุดิบที่ใช้ เช่น สีย้อมผ้า สารเคมี เป็นต้น บางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดละลายน้ำไม่ได้ จึงทำให้น้ำมีสภาพที่เปลี่ยนไปหรือเรียกว่าน้ำเสีย พบว่าอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการใช้น้ำและสารเคมีจำนวนมาก ปัญหาใหญ่ที่พบและมีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมคือการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานลงสู่สิ่งแวดล้อม แน่แน่นอนว่าน้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมากต้องมีการปนเปื้อนของสีย้อมและสารเคมี จากกระบวนการย้อมสี (dyeing) อย่างแน่นอน เป็นผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและทำลายทัศนียภาพ อีกประการคือน้ำนั้นไม่สามารถนำไปใช้อุปโภคหรือบริโภคต่อได้ ดังนั้นการวางแผนการจัดการ สิ่งแวดล้อมของอุตสาหกรรมสิ่งทอ จึงมีความจำเป็นในการป้องกันปัญหามลพิษเพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่มีคุณภาพตามมาตรฐานและเกณฑ์ที่กำหนด

มีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับการสลายสีย้อมด้วยแสงหนึ่งในนั้นคือ การวิเคราะห์วัสดุผสมขนาดนาโนของซีเรียมออกไซด์-โคบอลต์เฟอร์ไรต์เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการสลายสีย้อม มีเนื้อหาเกี่ยวกับการสังเคราะห์วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง เพื่อใช้เป็นตัวเร่งในการสลายสีย้อมด้วยแสง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสีย้อมหลายชนิด เช่น เมทิลีนบลู โรดามีนบีและคองโกเรด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ขึ้นเอง คือ โคบอลต์เฟอร์ไรต์ (Cobalt ferrite : CoFe_2O_4) ซีเรียมออกไซด์ (Cerium oxide : CeO_2) และซีเรียมออกไซด์-โคบอลต์เฟอร์ไรต์ (Cerium oxide-Cobalt ferrite : $\text{CeO}_2 - \text{CoFeO}_4$) ในโครงการพิเศษนี้จึงจะศึกษาต่อเกี่ยวกับคุณสมบัติทางแสงของการดูดกลืนแสง (Absorbance) ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีชื่อว่าโรดามีน 6จี (Rhodamine 6G : $\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{O}_3$) ซึ่งถือเป็นหนึ่งในสีย้อมที่มีผลทำให้เกิดน้ำเสีย โดยศึกษาการสลายสีย้อมชนิดนี้ด้วยการเติมวัสดุที่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็กและมีความสามารถในการดูดซับแสง เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายสีย้อมด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้โครงการวิจัยได้แก่ ไอรอนไดออกไซด์ (Iron(II,III)

ไดออกไซด์ : Fe_3O_4) และสารชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มของแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ (Ferrite Magnet) มี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของ Fe เพื่อเข้าไปเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารอินทรีย์เป็นปฏิกิริยาลูกลูโซ่ ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์มีขนาดเล็กลง ความเป็นพิษลดลงหรือหมดไป[1]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของอนุภาคแม่เหล็กร่วมกับสีย้อมไวแสง โดยวิธีการตรวจสอบการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของโรดามีน 6 จี (Rhodamine 6G)
- 2) เพื่อศึกษาการสลายสีย้อมไวแสงภายใต้แสงขาว (White Light) และแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet)
- 4) เพื่อศึกษาการย่อยสลายสีย้อมไวแสงด้วยการฉายแสงแบบพัลส์ (Pulse)
- 5) เพื่อศึกษาการย่อยสลายสีย้อมไวแสงด้วยการเพิ่มความถี่ของการฉายแสงแบบพัลส์ (Pulse)
- 6) เพื่อศึกษาพลังงานที่ใช้ในการฉายแสงแบบต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาคุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงเหล็กออกไซด์ในการสลายสีย้อมไวแสง
- 2) ศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสงและสมบัติพื้นฐานของสารละลายโรดามีน 6 จี
- 3) ทำการทดลองวัดเสปคตรัมการดูดกลืนแสง และวิเคราะห์ผลการทดลองรวมถึงคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ในการฉายแสง
- 4) วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลา Duty cycle และความถี่ รวมถึงวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในการฉายแสง

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ อาทิ คุณสมบัติแม่เหล็ก คุณสมบัติโรดามีน 6 จี รวมทั้งการใช้แสงในการสลายสีย้อมไวแสง
- ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในการทำการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 3 ทำการทดลองวัดคุณสมบัติทางแสงของโรดามีน 6 จี รวมถึงวิเคราะห์ผลการทดลองและแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดจากการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 4 จัดทำรูปเล่มโครงการพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลา ปีการศึกษา 2561								
	ภาคเรียนที่ 1				ภาคเรียนที่ 2				
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย	พ.ค.
ขั้นตอนที่ 1									
ขั้นตอนที่ 2									
ขั้นตอนที่ 3									
ขั้นตอนที่ 4									

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมไวแสงและทราบถึงกระบวนการในการกำจัดน้ำเสียจากสีย้อมไวแสง
- 2) ทราบว่าประเภทของแสงที่เหมาะสมกับการกำจัดสีย้อม
- 3) ได้รับความรู้เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลา รวมถึงมีความรู้ความเข้าใจในการใช้พลังงานในการฉายแสง
- 4) ได้รับความรู้ว่าการฉายแสงแบบพัลส์และความถี่ มีผลต่อการกำจัดสีย้อม
- 5) สามารถนำความรู้ที่ได้รับไปประยุกต์ใช้ในการทำงาน ที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการการวิจัย โดยมีเนื้อหา ดังนี้

2.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

2.1.1 การดูดซับ (Adsorption) [2]

การดูดซับ คือ เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือบริเวณระหว่างพื้นผิวหน้า กระบวนการนี้เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับของแข็ง ของเหลวกับก๊าซ ของแข็งกับก๊าซ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับจะเรียกว่า สารถูกดูดซับ ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ

สารดูดซับ (Sorbent) คือของแข็งที่ดูดซับสารเคมีไว้ซึ่งในทางการจัดการของเสียอันตราย รวมถึงดิน สลัดจ์ ชั้นใต้ดินของระบบน้ำใต้ดิน และถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด (Granular activated carbon)

สารถูกดูดซับ (Sorbate) คือสารประกอบในเฟสของเหลวซึ่งถูกแยกไปยังสารดูดซับ เฟสของเหลวมักจะเป็นน้ำ แต่กรณีที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ก็อาจพบบ้างเป็นกรณีพิเศษ

กลไกของกระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่กักพวกละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า สารดูดซับ ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ การดูดซับนี้จะเป็นการดูดซับระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆ ทั้ง 3 สถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งได้ทั้งแบบ ของเหลว - ของเหลว ก๊าซ - ของเหลว ก๊าซ - ของแข็งและของเหลว - ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว - ของแข็ง (Liquid - Solid Interface) ซึ่งในการดูดซับโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงภาวะสมดุลจึงจะหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 กลไกการดูดซับ

การเกาะหรือการดูดซับประกอบไปด้วย 2 กลไก ได้แก่ กลไกทางเคมี (Chemical) และ กลไกทางกายภาพ (Physical)

1) การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 แรง คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่ต่ำหรือมีค่าไม่สูง ทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อยคือประมาณต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่ายถือเป็นข้อดี เพราะจะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายอีกด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ เพราะจำนวนชั้นของผิวตัวดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย เมื่อถูกดูดซับมีความพรุนสูงของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นก็สามารถแทรกเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ แม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอขององค์ประกอบนั้นก็ตาม ปรากฏการณ์นี้ที่เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ โดยอาจคายความร้อนออกมาเล็กน้อย แม้จะมากกว่าความร้อนของการควบแน่นหรือไม่ขึ้นอยู่กับความดันย่อยของสารถูกดูดซับชนิดนั้น อีกทั้งตัวถูกดูดซับยังสามารถดูดซับสารถูกดูดซับไว้ได้ในปริมาณที่สูงมากต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ แต่เมื่อความดันของระบบลงหรือเพิ่มอุณหภูมิขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เป็นผลให้สารถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปรากฏการณ์ในช่วงนี้เรียกว่า การคายซับ ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

2) การดูดซับทางเคมี การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกันซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วจะมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมี ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50 -400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพโดยที่ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับและจะสร้างสารประกอบระหว่างตัวดูดซับชั้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งจะทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลงและจะดูดซับตัวถูกทำละลายหรือตัวถูกดูดซับได้เพียงเล็กน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ และจะ

ให้ความร้อนออกมาสูงมากโดยที่การดูดซับทางเคมีไม่สามารถเกิดการคายซับได้ เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวไม่ขึ้นกับความดันแต่จะขึ้นกับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะพบว่าสารผสมบางไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิที่เหมาะสมให้กับระบบก็สามารถจะเกิดการดูดซับทางเคมีได้เช่นกัน

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าหาตัวถูกดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มอยู่โดยโมเลกุลจะแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแพร่กระจายเข้าสู่พื้นผิวภายในโพรงของตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะดูดติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

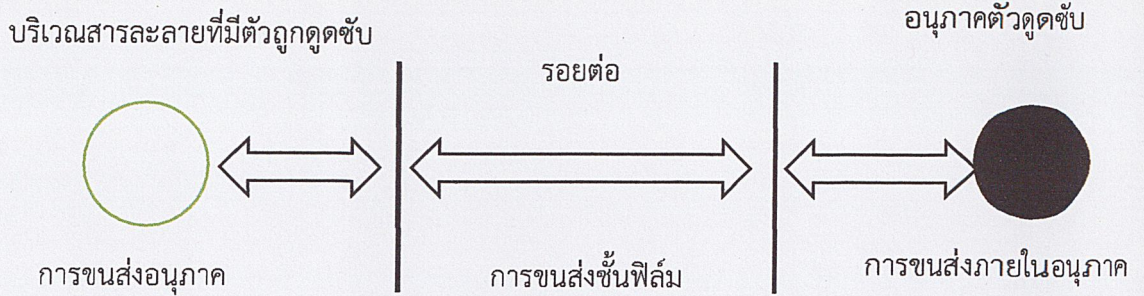
อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมากอัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลที่เคลื่อนที่ช้าที่สุดจะอยู่ในขั้นตอนการกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการกำหนดอัตราการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1) การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆแทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับการขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านชั้นฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

3) การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายหรือตัวถูกดูดซับเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับเรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.1 การยึดติดของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้นซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งแบบก็ได้



รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ [2]

2.1.3 ตัวดูดซับ

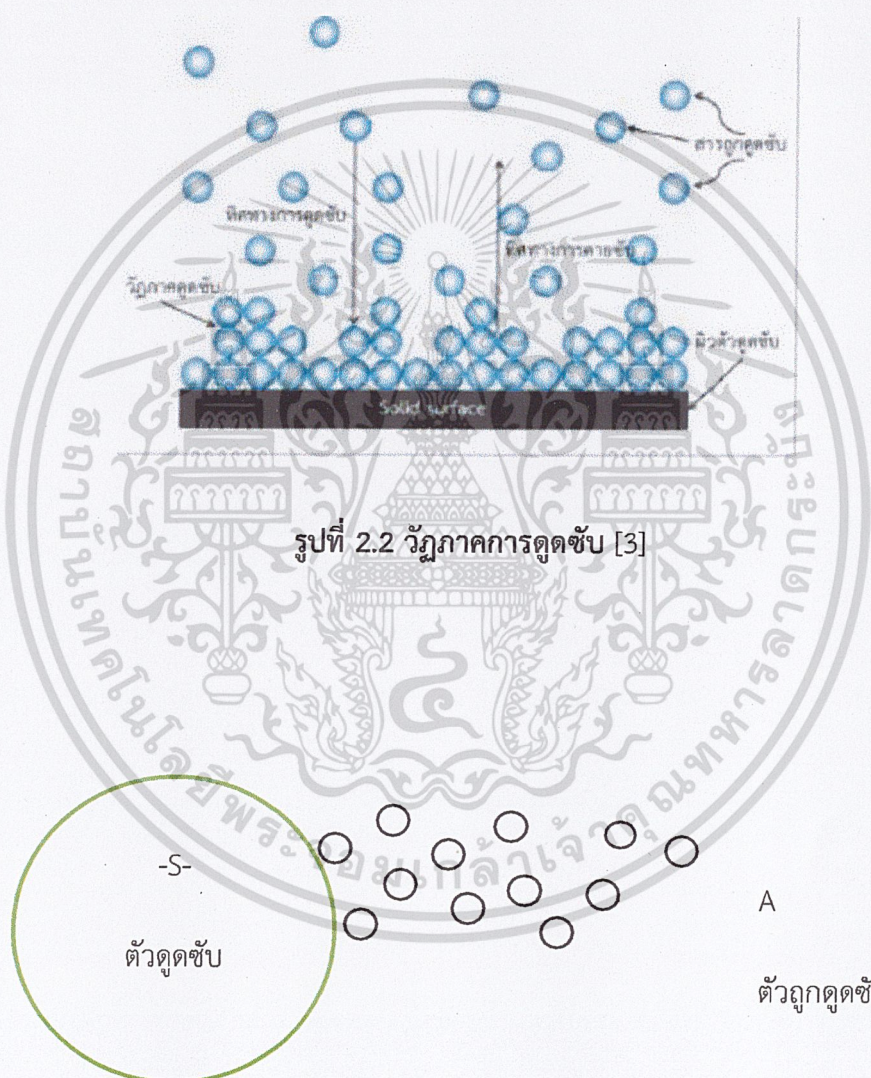
ตัวดูดซับ คือ สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายประเภทอาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

- 1) สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ อะลูมิเนียมกัมมันต์ ถ่านกระดูก สินแร่จำพวกอะลูมิเนียมลิเกด ตัวดูดซับที่เป็นสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับสารอนินทรีย์มีข้อจำกัด
- 2) ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500 - 1,400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในदानต่างๆ เช่น การฟอกสีเพื่อใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น
- 3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 - 500 ตารางเมตรต่อกรัม
- 4) วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการแพทย์ เช่น ชี้อัลไคไดออกไซด์ อกาแฟ อกาชา อกาลู่วาล์ว ฟางข้าว เปลือกไม้ เถาแกลบดำ เป็นต้น
- 5) การดูดซับชีวภาพ (Bio sorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย

2.1.4 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium) [3]

เมื่อกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นในวัฏภาคดูดซับ (Adsorbed phase) จะเกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตัวถูกดูดซับที่อยู่ในวัฏภาคของไหล (Fluid phase) ซึ่งอาจมีสถานะเป็นของเหลวหรือก๊าซที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระจะถูกถ่ายโอนไปยังตัวดูดซับในสภาวะที่ควบคุมไว้ เช่น อุณหภูมิที่กำหนดไว้ให้คงที่ เป็นต้น เมื่ออัตราการถ่ายโอนตัวถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปเอกสารยังวัฏภาคดูดซับเท่ากับอัตราการถ่ายโอนตัวถูกดูดซับจากวัฏภาคดูดซับไปยังวัฏภาคของไหล นั่นคืออัตราค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับสุทธิเป็นศูนย์ แม้ว่าตัวถูกดูดซับจะยังคงถ่ายโอนกันระหว่างวิภาคของไหลกับวิภาคของไหลกับวิภาคดูดซับแต่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวิภาคของไหลและปริมาณดูดซับจะไม่เปลี่ยนแปลงอีกในสภาวะที่ควบคุมไว้ ดังนั้นการดูดซับดังกล่าวจึงเข้าสู่สมดุล (Equilibrium) ของการถ่ายโอนมวลสาร สมดุลการดูดซับเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการแยกของสารผสมเนื้อเดียว (Homogeneous mixture) สมดุลการดูดซับไม่เพียงแยกตัวดูดซับออกจากการของผสมเนื้อเดียวแต่สมดุลการดูดซับยังมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับอีกด้วย เมื่อสมดุลการดูดซับถึงจุดอิ่มตัว กระบวนการดูดซับจะสิ้นสุดลงดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 วิภาคการดูดซับ [3]

รูปที่ 2.3 แสดงสมดุลการดูดซับ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1) ธรรมชาติของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการดูดซับ โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น กล่าวคือถ้าตัวดูดซับไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับมีขนาดลดลงซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับอยู่ในรูพรุนขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

2) ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ ซึ่งแนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดีเพราะว่าก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำเพื่อให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำและไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่มีขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลงจึงมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น

3) อัตราเร่งการปั่นกววน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งโมเลกุลของระบบ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์มและการแพร่เข้าสู่โพรงซึ่งแล้วแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าการปั่นกววนน้อยอาจทำให้ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับมีความหนามาก ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นขั้นตอนในการกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4) อุณหภูมิ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของตัวดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้นแต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

5) ผลของการความเป็นกรด - เบส ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นซ้ำของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรดต่ำส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเพิ่มขึ้น และเมื่อสารละลายมีความเป็นด่างเพิ่มขึ้นมีผลทำให้มี OH^- บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้นและสามารถดูดซับเพิ่มขึ้นและสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมีความเป็นกรด - เบสมากกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

2.2 กระบวนการดูดกลืนแสง (Absorbance process)

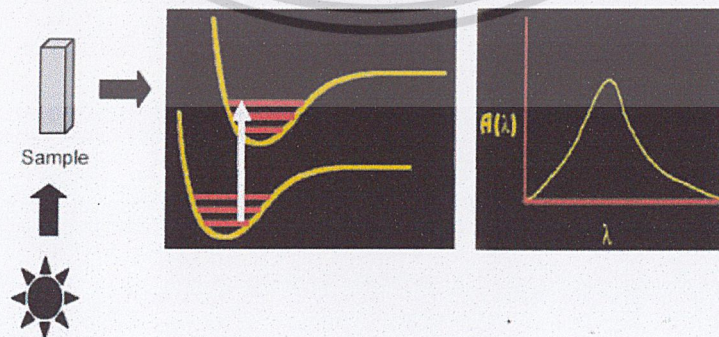
กระบวนการที่วัตถุดูดกลืนสารหรือพลังงาน เช่น ใบไม้ ดูดกลืนพลังงานแสงบางความถี่ เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงหรือฟิวโหละดูดกลืนพลังงานแสงบางความถี่แล้วทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอน เป็นต้น

2.2.1 คุณสมบัติในการดูดกลืนแสง

เมื่อโมเลกุลของสารตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตหรือช่วงแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นต่างๆ ตามกฎของเบียร์ - แลมเบิร์ต (Beer-Lambert) ค่าการดูดกลืนแสงของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

2.2.2 การตรวจสอบคุณสมบัติในการการดูดกลืนแสง [4]

การตรวจสอบโดยใช้เครื่องยูวีวิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ (UV-Visible spectrometer) จะอาศัยหลักการพื้นฐานคือเมื่อโมเลกุลใด รับพลังงานคลื่นแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นถึงแสงอัลตราไวโอเล็ตอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุล จะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารตัวอย่างได้รับพลังงานในช่วงคลื่นที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นที่โมเลกุลต้องการ หรือโมเลกุลของสารตัวอย่างได้รับพลังงานในช่วงคลื่นแสงที่เข้ากัน (Electronic transition) กับอิเล็กตรอนภายในโมเลกุลพลังงานจะถูกดูดกลืนและอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลจะมีวงโคจรพลังงานที่สูงขึ้น (Higher energy orbital) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์จะบันทึกความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสงและปริมาณการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่น

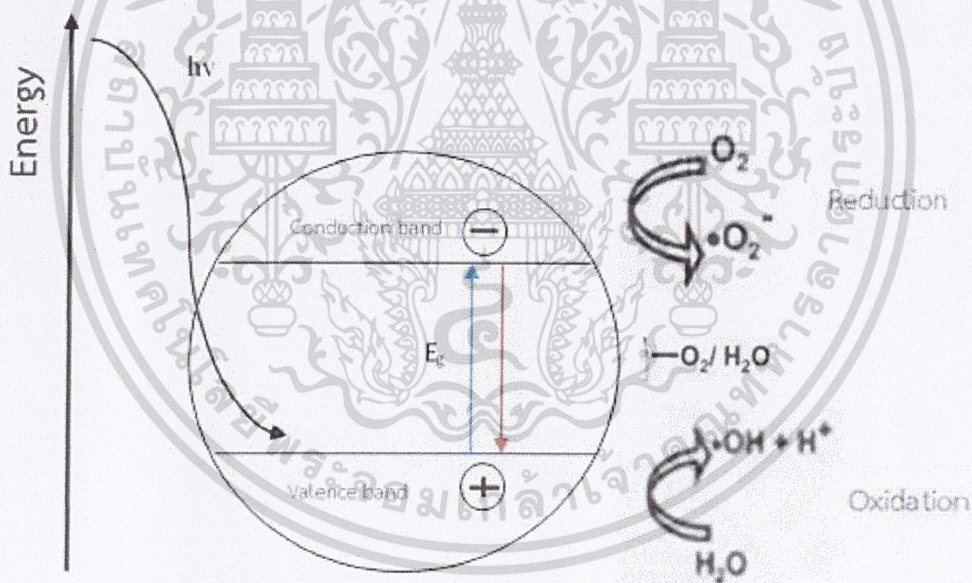


รูปที่ 2.4 แสดงการดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่ถูกต้องตามกฎหมาย หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และขอแจ้งให้ทราบว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

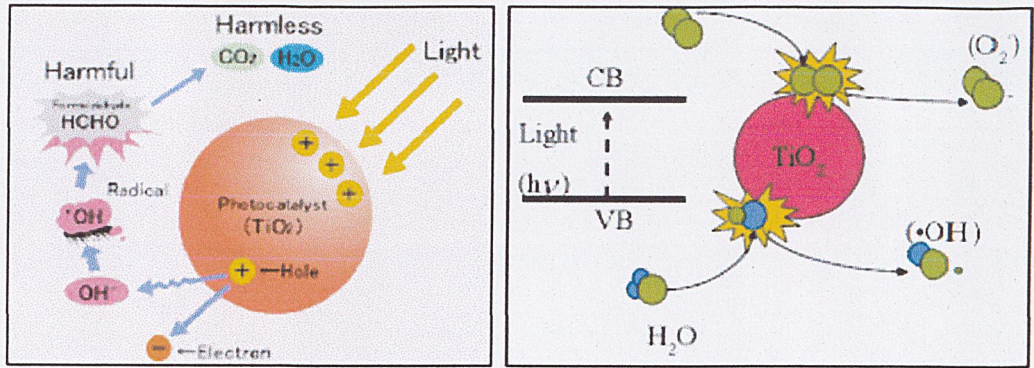
2.3 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process) [5]

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นกระบวนการดูดซับโฟตอน ที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำหรือเท่ากับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำประกอบด้วยระดับพลังงาน 2 ระดับ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence band : VB) และแถบคอนดักชัน (Conduction band : CB) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยแถบวาเลนซ์จะเป็นระดับพลังงานที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่จนเต็ม และแถบคอนดักชันจะเป็นระดับพลังงานที่มีออร์บิทัลว่างอยู่และมีพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์ โดยผลต่างระหว่างระดับพลังงานทั้งสองเรียกว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) มีพลังงานค่าหนึ่งในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (Electron volt : eV) และเมื่อสารกึ่งตัวนำถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่มีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์กระโดดขึ้นไปอยู่ที่แถบคอนดักชัน ทำให้เกิดช่องว่าง (Hole, h^+) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ และเกิดอิเล็กตรอน (e^-) ขึ้นที่แถบคอนดักชัน โดยช่องว่างจะรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH$) ส่วนอิเล็กตรอนจะจับกับออกซิเจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ($\cdot O_2^-$) ซึ่งทั้งสองตัวเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้



รูปที่ 2.5 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [5]

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ได้แก่ ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ความเข้มข้นของอนุภาค อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen) และความเข้มของแสง

1) ค่าความเป็นกรด - ด่าง ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด - ด่าง ในสารละลายหรือสารแขวนลอยซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่าความเป็นกรด - ด่าง มีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนไปเมื่อค่าความเป็นกรด - ด่าง สูงหรือต่ำ โดยจะเป็นบวกที่ค่าความเป็นกรด - ด่าง ต่ำและมีค่าเป็นลบเมื่อค่าความเป็นกรด - ด่าง สูงอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเมื่อค่าความเป็นกรด - ด่าง น้อยกว่า 3 ในขณะที่ไฮดรอกซิลเรดิคัลมีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาที่ค่าความเป็นกรด - ด่าง น้อยกว่า 3 และค่าความเป็นกรด - ด่าง ที่เปลี่ยนแปลงไปยังทำให้ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำประเภทโลหะออกไซด์ (Metal oxide) เปลี่ยนแปลงได้ 0.059 มิลลิโวลต์ต่อหนึ่งหน่วยความเป็นกรด - ด่าง

2) ความเข้มข้นของอนุภาคสารกึ่งตัวนำ อนุภาคในสารละลายหรือสารแขวนลอย ทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลและซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล เร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารปนเปื้อนและทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะโดยการยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของอนุภาคดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แต่ปริมาณสารกึ่งตัวนำที่มากในสารละลาย อาจจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลงได้ เนื่องจากอนุภาคจะไปขัดขวางแสงที่ส่องไปยังสารละลาย ทำให้ปริมาณสารกึ่งตัวนำที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคแสงและปริมาณการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลและซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลลดลง

3) อุณหภูมิ จากข้อมูลทางจลศาสตร์อุณหภูมินับว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาโดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากสมการของอาร์เรเนียสเขียน ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K = Ae^{-E_a/RT} \quad (2.1)$$

- เมื่อ K = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา, นาทีกำลังลบหนึ่ง (Reaction rate constant, min^{-1})
 A = แฟคเตอร์ความถี่, นาทีกำลังลบหนึ่ง (Frequency factor, min^{-1})
 E_a = พลังงานกระตุ้น, จูล/โมล (Activation energy, J/mol)
 R = ค่าคงที่ (8.314 จูล/โมล·เคลวิน)
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน (Absolution temperature, K)

โดยสามารถหาพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากความชันของกราฟลอการิทึมที่พล็อตระหว่างค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) กับค่า ($1/T$) และหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากสมการที่ 2.2

$$\ln K = -RT E_a + \ln A \quad (2.2)$$

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาของ e_{cb}^- และ h_{vb}^- กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e_{cb}^- และ h_{vb}^- และควมถี่ในการชนกันของโมเลกุลก็มีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

4) ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในสารละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ยึดจับ e_{cb}^- ที่แยกคอนดักชัน ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล และจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ออกซิเจนจึงเป็นตัวยึดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e_{cb}^- และ h_{vb}^+ และออกซิเจนยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลอีกด้วย

5) ความเข้มของแสง (light intensity) เนื่องจากความเข้มของแสง คือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา นั่นคือ อนุภาคแสง 1 โฟตอน ที่มีความถี่ (ν) จะมีพลังงานเท่ากับ

$$E = h\nu \quad (2.3)$$

- เมื่อ E = พลังงาน (J)
 h = ค่าคงที่ของพลังค์ ($\text{J}\cdot\text{s}$)
 ν = ความถี่ (s^{-1})

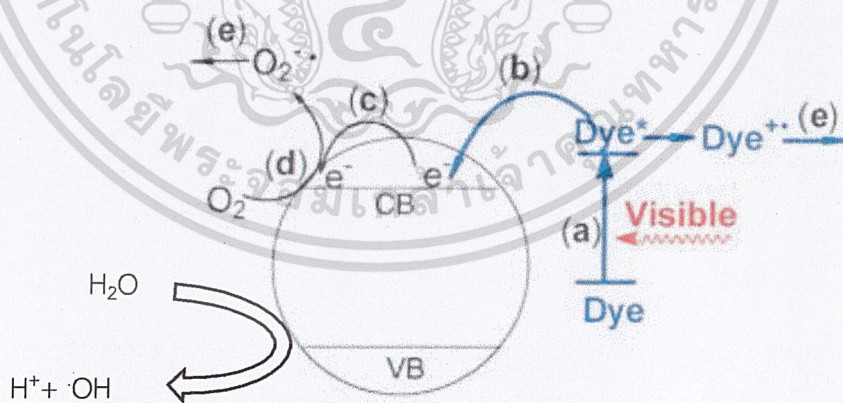
หรือคิดเป็น 1 ควอนตัม ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานแสงโดยตรง ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบบนพื้นที่ของผิวหน้าโลหะเป็น E_r ดังนั้นจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบนพื้นที่เท่ากับพลังงานของแสง ไม่ว่าจะกี่องศา ทุกองศา ออกห่างห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ทั้งหมดที่ตกกระทบส่วนด้วยพลังงานของแสง 1 โฟตอน จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อ 1 วินาที เท่ากับความเข้มแสงส่วนด้วย $h\nu$

2.4 กระบวนการย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation)

เป็นการแตกของโมเลกุลที่เกิดจากการดูดซับโฟตอน ที่มาจากความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์ เช่น รังสีอินฟราเรด แสงที่ตามองเห็น และรังสีอัลตราไวโอเล็ต รูปแบบของอนุภาครังสีชนิดอื่นๆ อาจทำให้เกิดการย่อยสลายด้วยแสงได้ การย่อยสลายด้วยแสงนี้รวมถึงการสลายตัวของสารที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ไปเป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กกว่า การเปลี่ยนรูปโมเลกุลไปอยู่ในสภาพที่เปลี่ยนแปลงกลับเป็นอย่างเดิมไม่ได้ เช่น การเสียสภาพของโปรตีน และการเติมอะตอมบางชนิดเข้าไปในโมเลกุล ตัวอย่างที่เห็นได้โดยทั่วไปคือการกำจัดของเสียในน้ำดื่มหรือน้ำเสียด้วยแสงแดด [6]

แสงสามารถใช้ในการทำลายโมเลกุลของมลพิษได้ โดยใช้แสงเป็นกระตุ้นการทำลายพันธะ การย่อยสลายด้วยเคมีเชิงแสงจะอาศัยพื้นฐานทางเคมีซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษน้อยต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการออกซิเดชันโดนการกระตุ้นด้วยแสงสามารถใช้กับสารประกอบอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่างๆ เช่น สีย้อม ยาฆ่าแมลง ยากำจัดวัชพืช เป็นต้น สีย้อมเมื่อถูกกระตุ้นเชิงแสงสามารถทำให้อยู่ในรูปของสารที่มีความเป็นพิษต่ำแห่งเช่น กรดอินทรีย์ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เป็นต้น และยังสามารถทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ เช่น เฮไลต์ โลหะและอัลดีไฮด์ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารตั้งต้น จะทำให้สีที่ปรากฏจางลงหรือหายไป โดยสีที่เกิดจากสีย้อมจะเกิดจากสายโซ่ของสารที่มีพันธะคู่และวงแหวนที่สามารถดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่นในช่วงแสงที่ตามองเห็น [7]



รูปที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิซิส [7]

2.4.1 ปฏิกิริยาโฟโตเคมี

หลักการง่าย ๆ ก็คือ การให้แสงที่มีพลังงานพอกับพลังงานพันธะ เพื่อให้เกิดการดูดกลืนคลืนแสงของสารเคมีตั้งต้นนั่นเอง จากนั้นสารตั้งต้นที่มีพลังงานสูงขึ้นก็จะพยายามจัดการกับพลังงาน

ส่วนเกินนี้ในหลายๆ วิธี ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือการเกิดปฏิกิริยาเคมีนั่นเองปรากฏการณ์นี้เราเรียกว่าปฏิกิริยาโฟโตเคมี (Photochemical reaction) สารเคมีใดๆ ที่สภาวะปกติจะอยู่ในสภาวะที่ถือว่ามีความพลังงานต่ำสุดนั่นคือ สภาวะพื้น (Ground State, S_0) เมื่อได้รับพลังงานแสงที่มีพลังงานเหมาะสมแล้ว จะเข้าสู่สภาวะใหม่ซึ่งมีความพลังงานสูงขึ้น เราเรียกสภาวะที่สารถูกกระตุ้นรวมๆ ว่าสภาวะเร้า (Excited State, S_1 or T_1) จากนั้นจะเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮล โดยโฮลจะรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) ส่วนอิเล็กตรอนจะจับกับออกซิเจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (O_2^-) ซึ่งทั้งสองตัวมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้

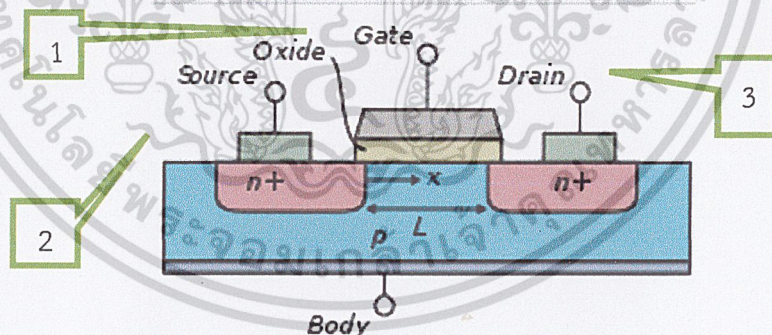
2.5 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการฉายแสงในงานวิจัย

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

อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรมีดังนี้

2.5.1 มอสเฟต (metal oxide semiconductor field effect transistor : MOSFET) [8]

เป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้อิทธิพลสนามไฟฟ้าในการควบคุมสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้ออกไซด์ของโลหะในการทำส่วนเกต (Gate) นิยมใช้ในวงจรดิจิทัล โดยนำไปสร้างลอจิกเกตต่างๆ เพราะมีขนาดเล็กโครงสร้างของมอสเฟตประกอบด้วย 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบของมอสเฟต [8]

- 1) ขาเกต (Gate) เป็นส่วนที่ทำมาจากออกไซด์ของโลหะ โดยสร้างให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแผ่นสองแผ่นเพื่อ สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมการเข้าออกของสัญญาณไฟฟ้า
- 2) ขาซอส (Source) เป็นส่วนขาเข้าของสัญญาณ
- 3) ขาเดรน (Drian) เป็นส่วนขาออกของสัญญาณ

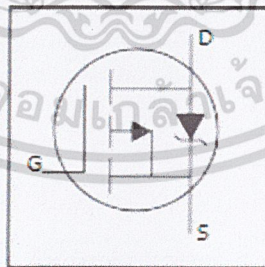
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอสเฟตถูกแบ่งเป็น 2 ชนิดดังนี้

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 ซึ่งจะทำนากลับกัน nMOS โดยเมื่อปล่อยความต่างศักย์ต่ำ (โดยมากมักจะติดลบ) จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศขึ้นอย่างแรง อิเล็กตรอนอิสระใน n-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่างประกอบกับมีโฮลบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบน ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีโฮลมากจนเป็น p-type ได้เรียกว่า channel สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วง channel นี้ซึ่งเป็นเหมือนกับขาเดรนและขาซอสได้โดยใช้โฮลเป็นพาหะนำไฟฟ้า

มอสเฟตในทางดิจิทัลถูกมองว่าเป็นสวิตช์โดย nMOS จะเป็นสวิตช์ที่เมื่อสัญญาณเข้าเป็น "1" สวิตช์ก็จะปิด ถ้าไม่สวิตช์ก็ยังไม่เปิดอยู่ (Normal opened switch) ส่วน pMOS จะเป็นสวิตช์ที่เมื่อสัญญาณเข้าเป็น "1" สวิตช์ก็จะเปิด ถ้าไม่สวิตช์ก็จะปิดอยู่ (Normal closed switch) และสัญลักษณ์ทั่วไปจะมีสามขา ขากลางเป็นขาเกตส่วนอีกสองขาคือขาซอสและขาเดรนโดยใช้ใน nMOS เป็นหลักเพื่อสื่อสัญลักษณ์เดียวกับทรานซิสเตอร์ทั่วไปคือ ไฟฟ้าเข้าขาเบส (base) และขาคอลเล็คเตอร์ (Collector) จะต่อกับขาอิมิตเตอร์ (Emittor) ส่วน pMOS ก็จะใช้ bubble ที่ขา gate ในงานวิจัยได้เลือกใช้มอสเฟตชนิด PNP F9540N ดังแสดงสัญลักษณ์ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงสัญลักษณ์มอสเฟต P-channel F9540N

2.5.2 ทรานซิสเตอร์ (Transistor) [9]

ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ มีหน้าที่ในการคอนโทรลการไหลของกระแสไฟฟ้า (ทั้งอนุญาตให้ไหล และบล็อกไม่ให้ไหลผ่าน) ซึ่งคล้ายกับไดโอดเปล่งแสง แต่ทรานซิสเตอร์สามารถทำอะไรได้มากกว่า เพราะนอกจากจะคอนโทรลทิศทางการไหลได้แล้ว ยังสามารถขยายสัญญาณได้ทั้งสัญญาณอนาล็อกและดิจิทัลอีกด้วย นอกจากนี้ยังใช้ทำเป็นสวิตช์เปิดปิดไฟได้

สามารถควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าได้ด้วยความสามารถดังกล่าวเกิดขึ้นได้เพราะสารกึ่งตัวนำภายในตัว

ในวงจรหลายๆ วงจรยกตัวอย่างเช่น การใช้บอร์ด (Arduino) มาควบคุมหลอดไฟ LED หลายหลอด ขาดิจิตอลของบอร์ดไม่สามารถจ่ายกระแสได้มากพอให้กับหลอดไฟ LED ได้ เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการนำทรานซิสเตอร์ มาใช้เป็นตัวขยายกระแสไฟฟ้า (Amplifier)

หลักการการทำงานของทรานซิสเตอร์

ตามที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าทรานซิสเตอร์มีหน้าที่ในการคอนโทรลทิศทางและปริมาณกระแสไฟฟ้าแต่ทั้งนี้ หลักการสำคัญหรือเรียกได้ว่าเป็นจุดประสงค์หลักก็คือ การใช้กระแสไฟฟ้าน้อยๆ ควบคุมกระแสไฟฟ้ามากๆ หมายถึง เมื่อมีปริมาณกระแสไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยที่ขาเบส ก็สามารถคอนโทรลปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าหลายเท่าตัวของขาคอลเล็กเตอร์และขาอีมิเตอร์ได้ เนื่องจากทรานซิสเตอร์มีค่ากำลังขยายหรือที่เรียกว่า Current Gain หรือ HFE หรือ β นั้นเอง

ทรานซิสเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1) ทรานซิสเตอร์ประเภท NPN ประกอบด้วยสารชนิด N 2 ตัวและชนิด P 1 ตัววางตัวสลับกันหรืออาจเรียกได้ว่า (Negative-Positive-Negative) ดังแสดงสัญลักษณ์ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ประเภท NPN [9]

2) ทรานซิสเตอร์ประเภท PNP ประกอบด้วยสารชนิด P 2 ตัวและชนิด N 1 ตัววางตัวสลับกัน (Positive-Negative-Positive) ดังแสดงสัญลักษณ์ในรูปที่ 2.11 ในวิจัยนี้ได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN รุ่น BC 337



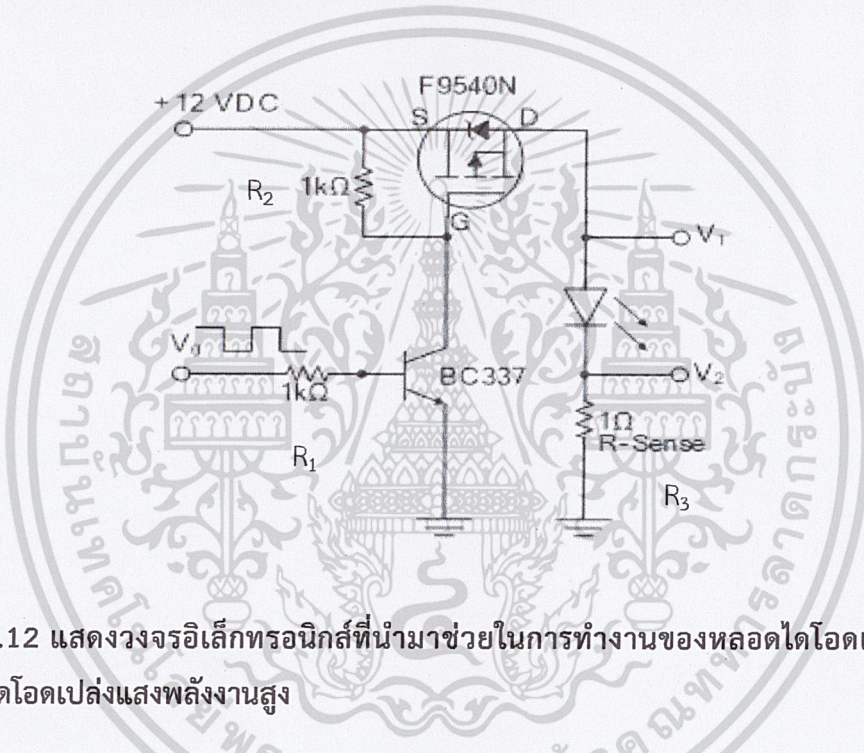
รูปที่ 2.11 แสดงสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ประเภท PNP [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 ตัวต้านทาน (Resistor)

ตัวต้านทานหรือรีซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติในการต้านการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าทำด้วยลวดต้านทานหรือถ่านคาร์บอน เป็นต้น นั่นคือถ้าอุปกรณ์นั้นมีความต้านทานมาก กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจะน้อยลง เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดพาสซีฟสองขั้วที่สร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมขั้วทั้งสอง โดยมีสัดส่วนมากน้อยตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์ และปริมาณกระแสไฟฟ้าก็คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า หรือค่าความต้านทานของตัวนำมีหน่วยเป็นโอห์ม

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาช่วยในการทำงานของหลอดไอโอดเปล่งแสงและหลอดไอโอดเปล่งแสงพลังงานสูงคือวงจรแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาช่วยในการทำงานของหลอดไอโอดเปล่งแสงและหลอดไอโอดเปล่งแสงพลังงานสูง

จากรูปที่ 2.12 การทำงานของวงจรมีดังนี้ เมื่อมีสัญญาณ High หรือลอจิก 1 เข้าขึ้นมาที่ V_0 แล้วไหลไปขาเบสซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมสัญญาณที่เข้ามา โดยมีตัวต้านทาน R_1 ทำหน้าที่จำกัดไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขาเบสมากเกินไป เมื่อมีลอจิก 1 เข้ามาที่ขาเบส กระแสและแรงดันจากไฟ DC ผ่าน R_2 มาที่ขาคอลเลคเตอร์และไหลผ่านลงไปยังขาอีมีเตอร์ไปยังกาวด์ ทำให้ขณะนั้นแรงดันต่ำหรือลอจิก 0 ไปยังขาเกตของมอสเฟตส่งผลมอสเฟตทำงาน กระแสและแรงดันจากไฟ DC ไหลผ่านจากขาซอสไปขาเดรนและไหลไปยังหลอดไอโอดเปล่งแสงและลงกาวด์ทำให้หลอดไอโอดเปล่งแสงทำงาน แต่เมื่อมีสัญญาณ Low หรือลอจิก 0 มาที่ V_0 ตัวทรานซิสเตอร์จะไม่ทำงาน เนื่องจากไม่มีกระแสมาที่ขาเบส ทำให้กระแสและแรงดันจากไฟ DC ไหลผ่าน R_2 ไปที่ขาเกตของตัวมอสเฟตส่งผล

ให้ตัวมอสเฟตไม่ทำงานเนื่องจากมีแรงดันสูงหรือลอจิก 1 เข้ามา ทำให้กระแสและแรงดันไม่สามารถไหลผ่านขาซอสไปยังขาเดรน และไหลผ่านหลอดไอโอดเปล่งแสงลงกาวด์ได้ส่งผลให้หลอดไม่สว่างทุกครั้ง ingsun อักทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

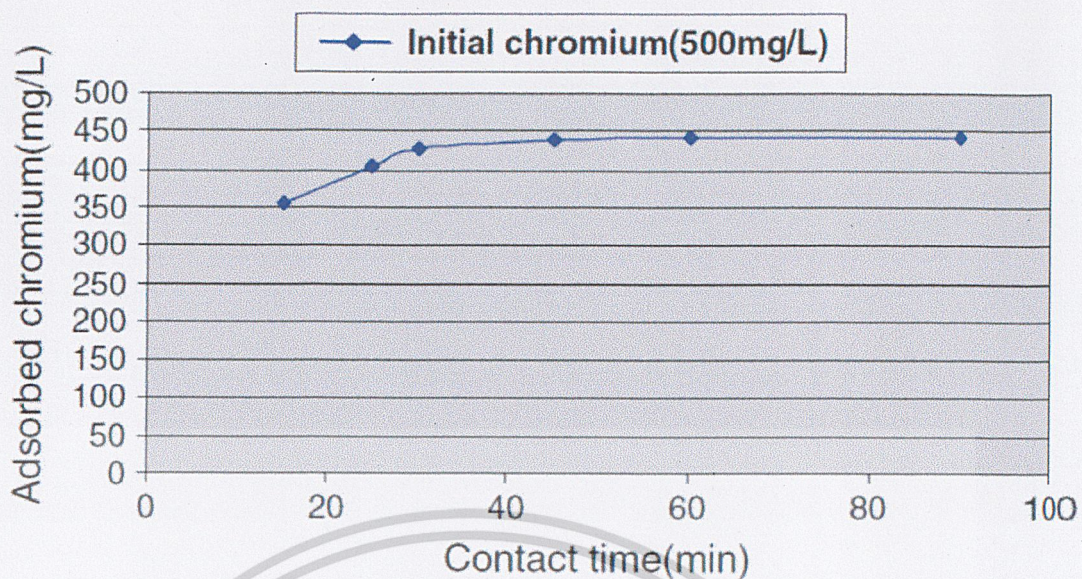
ไดโอดเปล่งแสงไม่ทำงาน จะเห็นได้ว่าเมื่อมีลอจิก 1 และ 0 เข้ามาที่เขาเบสส่งผลให้หลอด ไดโอดเปล่งแสงทำงานและไม่ทำงาน โดยมีอสเฟตทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในการเปิด - ปิด หลอด ไดโอดเปล่งแสง

2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [10]

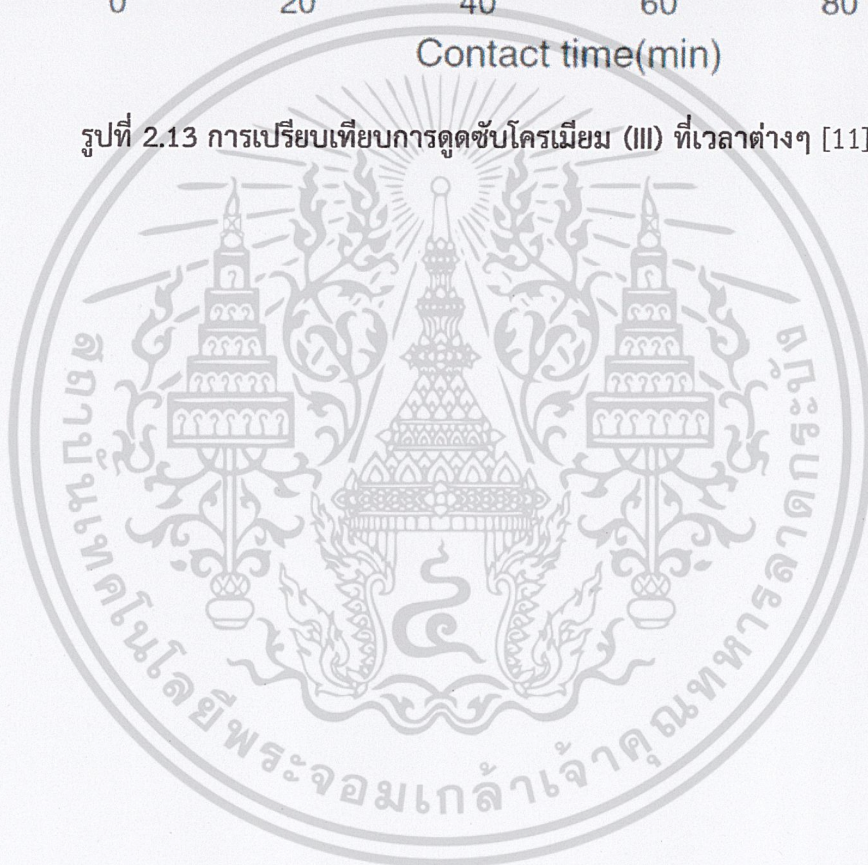
ในปี พ.ศ. 2558 นางสาวพัชรา พสุพงศ์ ได้ศึกษาการสังเคราะห์และตรวจสอบประสิทธิภาพ ตัวเร่งนาโนซีเรียมออกไซด์-โคบอลต์เฟอร์ไรต์ ($\text{Ce}_2\text{O}-\text{CoFe}_2\text{O}_4$) ที่สามารถแยกออกด้วยแม่เหล็กได้ สำหรับใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาคาร์บอน-ไฮโดรเจนแอริลเลชันโดยตรง เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ สารประกอบเฮเทอโรไซคลิก (Heterocycles) ด้วยวิธีโซโนเคมี (Sonochemical method) โดยทำ การสังเคราะห์ตัวรองรับโคบอลต์เฟอร์ไรต์ (CoFe_2O_4) ขึ้นก่อนจากการตกตะกอนร่วมของสารตั้งต้น โคบอลต์ไนเตรท($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และเฟอร์ริกไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ในสารละลายตัวกลาง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วทำการกระจายอนุภาคซีเรียมไนเตรท ($(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$) จากนั้นนำ ตัวเร่งที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ตรวจสอบองค์ประกอบเคมีทางเคมีด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ตรวจสอบโครงสร้างโมเลกุล ของสารด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ตรวจสอบสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น (VSM) ตรวจสอบปริมาณพื้นที่ ผิวดังวิธีของ Brunauer Emmett และ Teller (BET) แล้วทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของตัวเร่ง ที่ได้ ในปฏิกิริยาคาร์บอน-ไฮโดรเจนแอริลเลชันโดยตรง ดดยการใช้สารตั้งต้นเบนซอกซาโซล (Benzoxazole) และไอโอดobenซีน (Iodobenzene) และใช้เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกส์เรโซแนนซ์ (NMR) ในการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์

ในปี ค.ศ. 2014 T. Shahriari และคณะ ได้ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการดูดซับ โครเมียม (III) ไปยังอนุภาคนาโนแม่เหล็กเหล็กออกไซด์ การศึกษาครั้งนี้ใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็กที่มี ขนาด 30 นาโนเมตร จำนวน 0.25 - 1.5 กรัม เพื่อกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ ปนเปื้อนด้วยโครเมียมซัลเฟต จากการพบว่าเมื่อใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็กจำนวน 0.75 กรัม ค่าพีเอช 5.5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเร็วการหมุนของเครื่องกวนแม่เหล็ก 300 รอบต่อนาที ทดลอง เป็นเวลา 90 นาที ค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้นเป็นจากผลของการอิมมersion ของสาร ดังแสดงกราฟการทดลองในรูปที่ 2.13 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบการดูดซับโครเมียม (III) ที่เวลาต่างๆ [11]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงแผนการทดลอง วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมถึงวิธีการคำนวณสารที่ใช้ในการทดลองและวิธีการดำเนินงานทดลอง โดยมีเนื้อหาแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อย่อยดังนี้

- 3.1 แผนการทดลองของงานวิจัย
- 3.2 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
- 3.3 การเตรียมสารเพื่อใช้ในการทดลอง
- 3.4 ระบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องการงานวิจัย
- 3.5 วิธีการทดลองของงานวิจัย

3.1 แผนการทดลองของงานวิจัย

3.1.1 การทดลองที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาเมื่อฉายแสงต่อเนื่อง เพื่อหาแสงที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมไวแสงโรดามีน 6จี ได้ดีที่สุด

3.1.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาเมื่อฉายแสงต่อเนื่องโดยเพิ่มการกวนสาร เพื่อหาแสงที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายโรดามีน 6จี ได้ดีที่สุด

3.1.3 การทดลองที่ 3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาเมื่อฉายแสงต่อเนื่องโดยเพิ่มการกวนสารและการปั่นเหวี่ยงตกตะกอน เพื่อหาแสงที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมไวแสงโรดามีน 6จี ได้ดีที่สุด

3.1.4 การทดลองที่ 4 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับ Duty cycle เมื่อฉายแสงแบบพัลส์ เพื่อหาค่า Duty cycle ที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายโรดามีน 6จี ได้ดีที่สุด

3.1.5 การทดลองที่ 5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับความถี่ เพื่อหาความถี่ที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายโรดามีน 6จี ได้เทียบเท่าการฉายแสงแบบต่อเนื่อง

3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

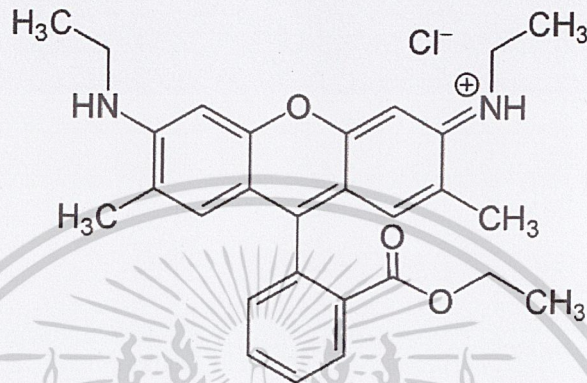
3.2.1 สารเรืองแสงโรดามีน 6จี (Rhodamine 6G : R6G) (รุ่น CAS. 989-38-8 จากบริษัท

SIGMA-ALDRICH)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกศึกษาสีย้อมไวแสงโรดามีน 6จี เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมซึ่งสีย้อมไวแสงโรดามีน 6จี เป็นสารเรืองแสงตระกูลโรดามีนอยู่ในกลุ่มสารอินทรีย์ (Organic dyes) เพราะมีสมบัติการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) สูงสามารถตรวจจับได้ง่ายและมีราคาถูก มีความเป็นพิษต่ำและสามารถละลายในน้ำได้ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกและสมบัติพื้นฐาน ดังรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.1 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของสารเรืองแสงโรดามีน 6จี [12]

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสมบัติพื้นฐานของสารเรืองแสงโรดามีน 6จี [12]

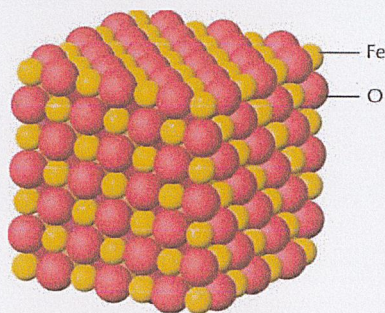
สมบัติ	สารเรืองแสงโรดามีน 6จี
สูตรเคมี	$C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$
มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	497.02
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.26
การละลายในน้ำ (กรัมต่อลิตร) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	20
ความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน (นาโนเมตร)	527

3.2.2 อนุภาคเหล็กออกไซด์ (Iron oxide : Fe_3O_4) (รุ่น CAS. 1317-61-9 จากบริษัท SIGMA-ALDRICH)

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกศึกษาอนุภาคเหล็กออกไซด์ เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมื่อนำไปผสมกับสารละลายโรดามีน 6จี ซึ่งอนุภาคเหล็กออกไซด์เป็นเหล็กบริสุทธิ์ที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาและเป็นสนิมเร็วมากในทางการค้าจึงไม่เป็นที่นิยม แต่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่โดยมีพื้นที่ผิวมากกว่าเหล็กปกติประมาณ 10-100 เท่า จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อม เนื่องจากอนุภาคเหล็กออกไซด์จะช่วยรีดิวซ์สารอินทรีย์ที่มีสี ทำให้โมเลกุลของสีมีขนาดเล็กลงหรือทำให้สารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นอันตรายเกิดปฏิกิริยาได้เป็นสารประกอบที่กำจัดได้ง่ายขึ้น อนุภาคเหล็กออกไซด์มี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 2.12 อิเล็กตรอนโวลต์ [13] ซึ่งมีโครงสร้างผลึกและสมบัติพื้นฐาน ดังรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างผลึกของเหล็กออกไซด์ [13]

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงสมบัติพื้นฐานของเหล็กออกไซด์

สมบัติ	อนุภาคเหล็กออกไซด์
ชื่อทางเคมี	Iron(III) oxide
สูตรเคมี	Fe_3O_4
มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	231.53
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิเมตร)	4.8-5.1
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	1538
ขนาดของอนุภาค (นาโนเมตร)	50-100

3.2.3 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water : DI)

น้ำปราศจากไอออนหรือเรียกกันว่าน้ำ DI เป็นน้ำที่ผ่านการกรองไอออน ใช้เรซินเป็นตัวกรองโดยการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เพื่อจับทั้งไอออนบวกและไอออนลบออกจากน้ำ จึงทำให้ได้น้ำที่ไม่มีไอออนหลงเหลืออยู่ จึงเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงอย่างแท้จริง เพราะโมเลกุลที่เหลืออยู่จะมีเพียงโมเลกุลของน้ำ H_2O เท่านั้น [14] จึงเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวทำละลายในสารสีย้อมไวแสง

3.2.4 แหล่งกำเนิดแสงทันสเดน (จากบริษัท Schott Megalight 100)

ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 0.9 แอมแปร์ ให้แสงในย่านความยาวคลื่น 400-900 นาโนเมตร ในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงทันสเดนในการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลายโรดามีน 6จี

3.2.5 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (รุ่น ULS2048XL-EVO จากบริษัท Avaspec)

ใช้วัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง โดยสามารถวัดสเปกตรัมของแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 - 1100 นาโนเมตร พร้อมสาย USB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 สายใยแก้วนำแสง

สายใยแก้วนำแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร สำหรับนำแสงจะแหล่งกำเนิดแสง ทั้งสแตนด์บายสารละลาย

สายใยแก้วนำแสงขนาด 600 ไมโครเมตร สำหรับนำแสงที่ออกจากสารละลายเข้าสู่เครื่อง สเปกโตรมิเตอร์

3.2.6 เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) (รุ่น C-MAG HS4 จากบริษัท Fisher scientific)

ใช้แรงดันไฟฟ้า 230 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 2.7 แอมแปร์ สำหรับปั่นกวนสารละลาย โรตารีมิน 6จี กับอนุภาคเหล็กออกไซด์ให้เกิดการดูดซับสารละลายเข้าไปในอนุภาคเหล็กออกไซด์

3.2.7 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic stirrer bar) (จากบริษัท Fisher scientific)

ขนาด 30 เซนติเมตร สำหรับเป็นตัวปั่นกวนสารละลายโดยใช้งานร่วมกับเครื่องกวน สารละลาย

3.2.8 ปีกเกอร์ (Beaker)

ชนิดแก้วใส ขนาด 150 มิลลิลิตร สำหรับบรรจุสารละลายและใส่แท่งแม่เหล็กกวนสารเพื่อ การปั่นกวนสารละลาย

3.2.9 เครื่องหมุนเหวี่ยงตกตะกอน (Centrifuge) (รุ่น Force 1418)

สำหรับแยกอนุภาคเหล็กออกไซด์ออกจากสารละลายโรตารีมิน 6จี เครื่องหมุนเหวี่ยง ตกตะกอนจะสร้างแรงหนีศูนย์กลางหรือแรงหมุนเหวี่ยงขึ้นเพื่อเร่งให้อนุภาคตกตะกอนเร็วขึ้น ภายใต้ สนามของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง อนุภาคจะตกตะกอนในอัตราเร็วที่ไม่เท่ากัน การหมุนเหวี่ยง ตกตะกอนจึงต้องใช้เวลาานพอเพียงที่จะทำให้อนุภาคขนาดเล็กนอนกันหมด ใช้แรงดันไฟฟ้า 230 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 0.6 แอมแปร์ [15]

3.2.10 หลอดไมโครเซนติฟิว (Micro centrifuge tube) (รุ่น TUBE-200-C จากบริษัท Extregene) ขนาด 2 มิลลิลิตร ใช้งานร่วมกับเครื่องหมุนเหวี่ยงตกตะกอน

3.2.11 ไมโครคิวเวทท์ (Macro Cuvette) (จากบริษัท ซีทีไอ แอนด์ ซายน์ จำกัด)

ใช้สำหรับบรรจุสารละลายเพื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง มีความยาวคลื่นในช่วง 340-900 นาโนเมตร ปริมาตร 2.5 - 4.5 มิลลิลิตร

3.2.12 ขวดแก้วใส่ปากแคบ (จากบริษัท ซีทีไอ แอนด์ ซายน์ จำกัด) สำหรับบรรจุสารเพื่อ เตรียมไว้ใช้งาน มีขนาด 10 มิลลิลิตร พร้อมจุกในและฝาดำ

3.2.13 เครื่องชั่งดิจิตอล (รุ่น OHAUS Pioneer Series จากบริษัท OHAUS) ใช้สำหรับชั่ง สาร

3.2.14 ซ้อนตักสารเคมีสแตนเลส ขนาด 20 เซนติเมตร

3.2.15 ไมโครปิเปตต์ (Micropipette) ใช้สำหรับถ่ายเทของเหลวอย่างละเอียดและมี ปริมาตรน้อยๆ ช่วงการวัด 100 – 1000 ไมโครลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.16 ปิเปตต์ทิป (Pipette Tips) (จากบริษัท ซีทีไอ แอนด์ ซายน์ จำกัด) ใช้สำหรับดูดจ่ายสารตามปริมาตรที่ต้องการ โดยใช้งานร่วมกับไมโครปิเปตต์

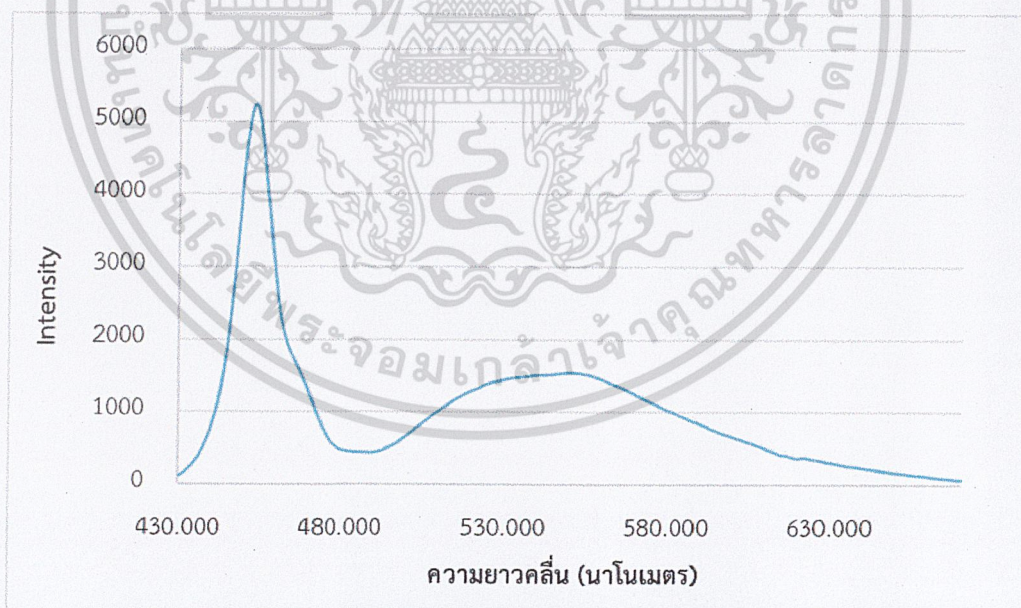
3.2.17 เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner) (รุ่น CMT-50 จากบริษัท โปรโพรนิคส์ อินเตอร์เทรด จำกัด)

มีขนาดความจุ 2.11 ลิตร ตั้งเวลาได้ 30 นาที หรือต่อเนื่อง ให้ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต อุณหภูมิสูงสุด 90 องศาเซลเซียส เครื่องอัลตราโซนิกมีความสามารถในการทำความสะอาดอุปกรณ์ที่ปนเปื้อนสารละลายและยังมีความสามารถในการทำให้สารละลายแตกตัวได้อีกด้วย ในงานวิจัยนี้จึงใช้สำหรับเขย่าสารละลาย

3.2.18 คอมพิวเตอร์ (Computer) สำหรับการประมวลผลค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้โปรแกรม Avasoft 8.1

3.2.19 หลอดไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode : LED)

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงที่ให้แสงสีขาวย โดยไดโอดเปล่งแสงสีขาวยกเกิดจากไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินถูกเคลือบด้วยสารเรืองแสงฟอสเฟอร์ [16] ขนาดกำลังไฟฟ้า 1.5 วัตต์ให้ความยาวคลื่นในช่วง 430 – 630 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

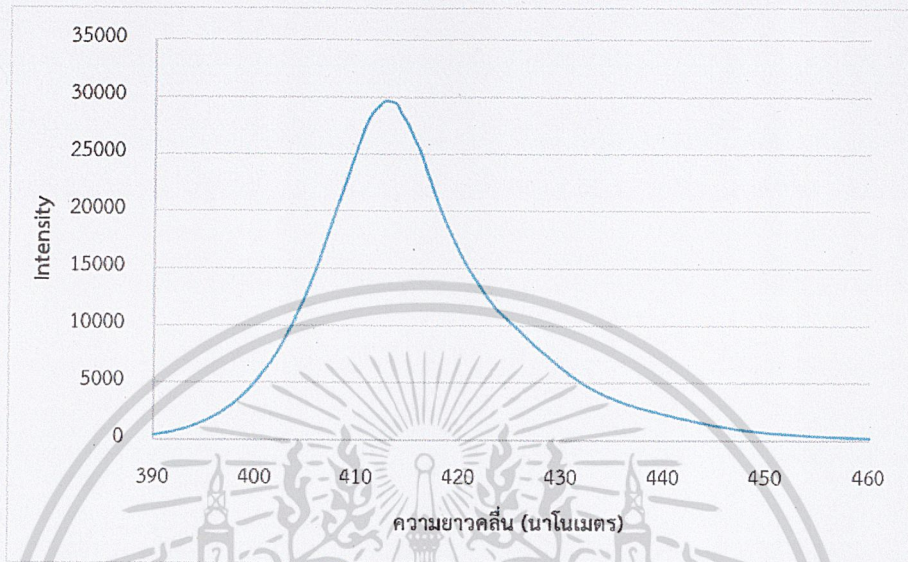


รูปที่ 3.3 กราฟแสดงสเปกตรัมของแสงสีขาวย ที่ความเข้มแสง 50 ลักซ์

3.2.20 หลอดไดโอดเปล่งแสงพลังงานสูง (High power Light Emitting Diode : High power LEDs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้หลอดไอโอดเปล่งแสงพลังงานสูงที่ให้แสงในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ความยาวคลื่น 390 - 460 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เป็นแสงสีม่วงถึงม่วงเข้ม ขนาดกำลังไฟฟ้า 3 วัตต์



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงสเปกตรัมของแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่ความเข้มแสง 50 ลักซ์

3.2.21 แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply)

แหล่งจ่ายไฟที่เปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนเข้าสู่โหลดสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เอาต์พุตให้มีค่าคงที่ได้ ใช้สำหรับจ่ายไฟกระแสตรงให้กับวงจร

3.2.22 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) (Keysight รุ่น N2140A)

เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแสดงผลออกมาเป็นกราฟสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ความถี่ เฟสของสัญญาณและคาบเวลา อีกทั้งยังมีฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function Generator) ให้ความถี่สูงสุด 100 เมกะเฮิร์ต พร้อมสายจับสัญญาณ 2 เส้น สำหรับวัดสัญญาณตกรวมตลอดไดโอดเปล่งแสงสีขาวยและแสงอัลตราไวโอเล็ต เพื่อใช้คำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของตัวหลอดเอง

3.2.23 วงจรไฟฟ้า (แสดงหลักการทำงานและภาพวงจรในบทที่ 2 หัวข้อ 2.5)

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้วงจรไฟฟ้าเพื่อให้หลอดไดโอดเปล่งแสงสีขาวยและหลอดอัลตราไวโอเล็ตทำงานโดยมีการฉายแสงแบบพัลส์

3.2.24 แท่นวางคิ่วเวทท์ ใช้สำหรับวางใช้สำหรับวางไมโครคิ่วเวทท์เพื่อวัดการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.25 ลักซ์มิเตอร์ (Lux meter) (รุ่น UT380 Series)

คือ เครื่องวัดปริมาณของแสงที่มองเห็นในพื้นที่ที่กำหนดทดสอบความสว่าง จะแสดงในหน่วยของ LUX เป็นหน่วยมาตรฐานของการวัดความเข้มของแสง 1 ลักซ์ มีค่าเท่ากับความสว่างของพื้นผิวหนึ่งเมตร ในงานวิจัยนี้ใช้ลักซ์มิเตอร์ในการวัดความเข้มแสงของหลอดไดโอดเปล่งแสงและหลอดไดโอดเปล่งแสงพลังงานสูง

3.3 การเตรียมสารเพื่อใช้ในงานวิจัย

เนื่องจากการทดลองใช้ความเข้มข้นของโรดามีน 6จี 10^{-6} โมลาร์ ผสมกับอนุภาคเหล็กออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงต้องเตรียมสารละลายโรดามีน 6จี และอนุภาคเหล็กออกไซด์ให้สูงกว่าที่ต้องการเพราะเมื่อเรานำมาผสมกันจะได้ความเข้มข้นที่เราต้องการ

3.3.1 วิธีการคำนวณสารละลายตั้งต้นโรดามีน 6 จี
เตรียมสารละลายที่ความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ ต่อน้ำ 10 มิลลิลิตร (ใช้น้ำปราศจากไอออน)
คำนวณได้จาก

$$g = (N_1 \times V_1 \times MW) \times 1000 \quad (3.1)$$

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

ดังนั้น จาก (3.1) ปริมาณสารโรดามีน 6จี ที่ต้องชั่งเท่ากับ 0.0047 กรัม

จากการคำนวณจะได้สารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยต้องชั่งสารโรดามีน 6จี 0.0047 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร

3.3.2 วิธีการคำนวณสารละลายที่ต้องการเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ
คำนวณได้จากสมการ

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2 \quad (3.2)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หวังสัน อภิศร หามมเหตต์ แปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 2×10^{-6} โมลาร์ ที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ จากสมการที่ (3.2) นำสารละลายโรดามีนที่ความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เจือจางให้ได้ความเข้มข้น 2×10^{-6} โมลาร์ (เพื่อใช้ในการทดลอง)

ปริมาตรที่ต้องการแบ่งมา

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

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

$$V_1 = 0.02 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นนำสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ มา 0.02 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 9.8 มิลลิลิตร จะได้สารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 2×10^{-6} โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

3.3.3 วิธีคำนวณปริมาณสารเหล็กออกไซด์ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

ดังนั้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร = 0.002 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร

เพราะฉะนั้นปริมาณสารเหล็กออกไซด์ ที่ต้องการซึ่งเท่ากับ 0.002 กรัม ผสมน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร จะได้อนุภาคเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.3.4 การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม (Dye removal)

การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

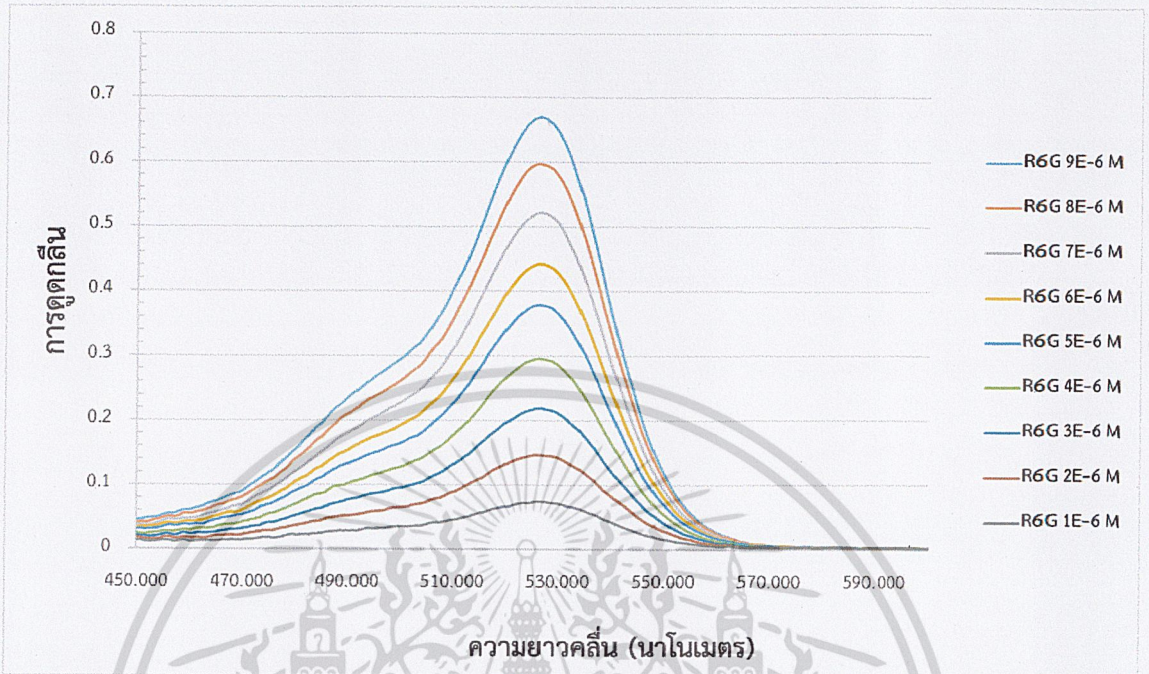
$$((C_0 - C_e) \div C_0) \times 100 \% \quad (3.3)$$

เมื่อ

C_0 คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่เริ่มต้น

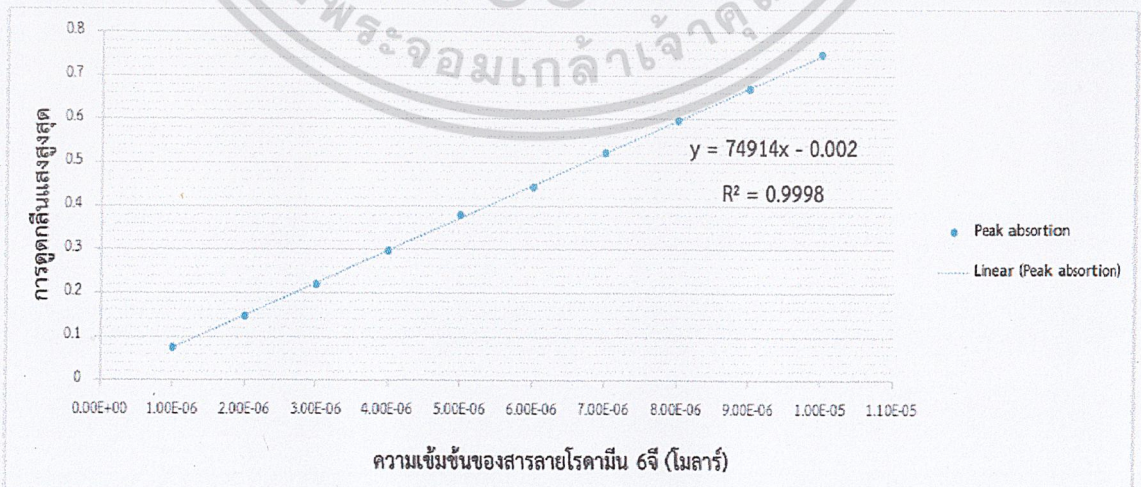
C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ ภาวะสมดุล

จากสมการที่ 3.2 สามารถหาความความเข้มข้นของตัวถูกทำลายในสารละลายที่เริ่มต้นได้จากรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นของสารละลายโรดามีน 6จี

จากรูปที่ 3.5 แสดงสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งเป็นความความเข้มข้นของตัวถูกทำลายในสารละลายที่เริ่มต้น และเมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของความเข้มข้นต่างๆ มาพล็อตกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (Peak) กับความเข้มข้นของสารละลายจะได้กราฟดังรูปที่ 3.6.



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงสูงสุดกับความเข้มข้นของสารละลายโรดามีน 6จี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโรดามีน 6จี แปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายโรดามีน 6จี จึงสามารถหาความสัมพันธ์พันธ์ได้จากสมการ 3.4

$$x = (y + 0.002) \div 74914 \quad (3.4)$$

เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลือนอยู่ในสารละลาย ณ ภาวะสมดุล
 y คือ ค่าการดูดกลืนของตัวถูกละลายที่เหลือนอยู่ในสารละลาย ณ ภาวะสมดุล

จากสมการที่ 3.3 และ 3.4 พบว่าสามารถหาค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้โดยการนำสารละลายที่ถือว่าอยู่ในสภาวะสมดุลแล้วมาวัดค่าการดูดกลืนแสงตามสมการที่ 3.4 จากนั้นจะได้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลือนอยู่ในสารละลาย ณ ภาวะสมดุล นำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้จากสมการที่ 3.3

3.4 ระบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

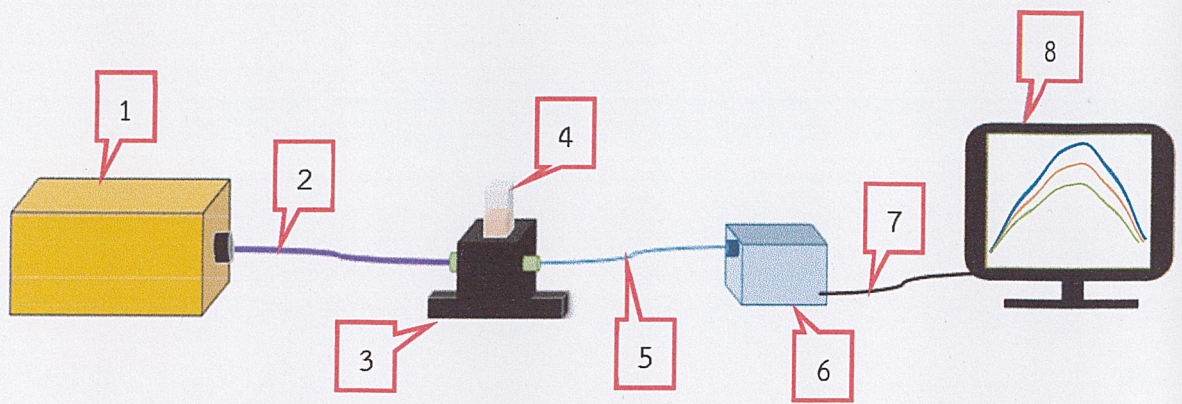
ในงานวิจัยนี้มีระบบต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ระบบวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย ระบบการปั่นกววนสารละลาย และระบบการฉายแสงรวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ ดังแสดงตามหัวข้อต่อไปนี้

3.4.1 ระบบวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย

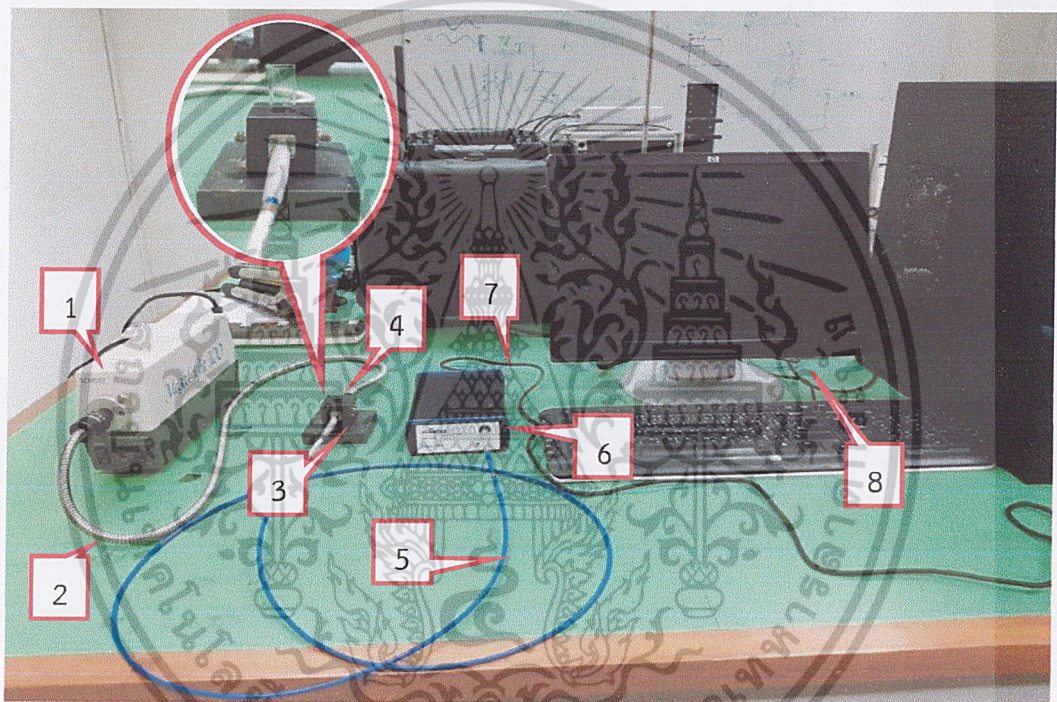
เพื่อศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลาย มีอุปกรณ์ที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 3.7

- 1) แหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน
- 2) สายใยแก้วนำแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร
- 3) แท่นวางคิวเวทท์
- 4) ไมโครคิวเวทท์
- 5) สายใยแก้วนำแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 ไมโครเมตร
- 6) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์
- 7) สายยูเอสบี
- 8) คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

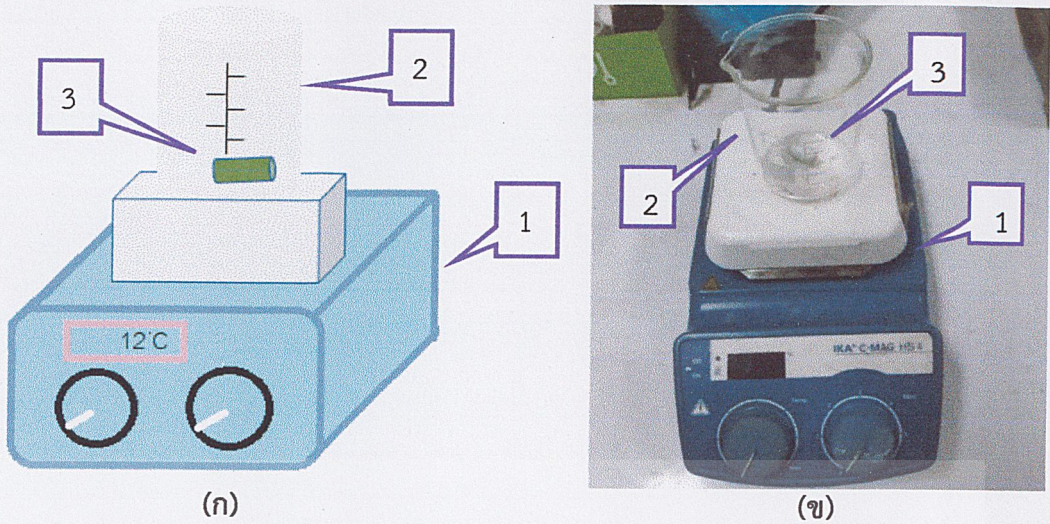
รูปที่ 3.7 แสดงระบบวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย (ก) แผนภาพจำลอง (ข) แผนภาพจริง

3.4.2 ระบบการกวนสารละลาย

เพื่อกวนสารละลายให้สารละลายโรดามีน 6จี ถูกดูดซับด้วยอนุภาคเหล็กออกไซด์ มีอุปกรณ์ที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 3.8

- 1) เครื่องกวนสารละลาย
- 2) ปีกเกอร์
- 3) แท่งแม่เหล็กกวนสารขนาด 1.5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

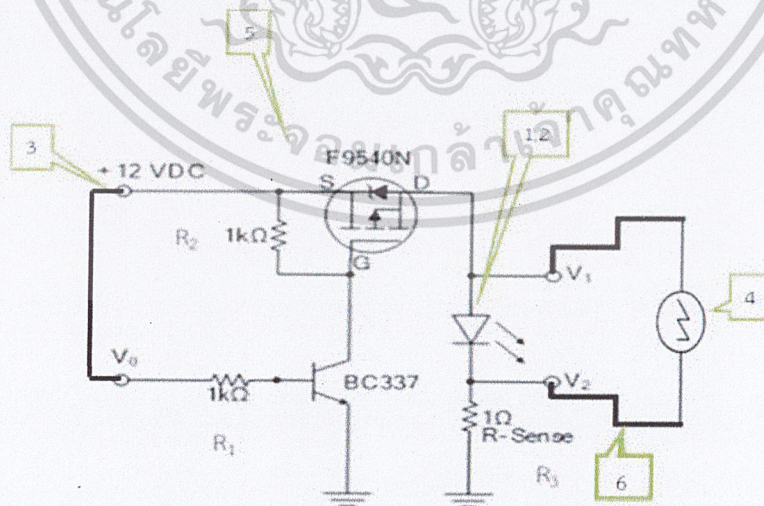


รูปที่ 3.8 แสดงระบบการกวนสารละลาย (ก) แผนภาพจำลอง (ข) แผนภาพจริง

3.4.3 ระบบการฉายแสงแบบต่อเนื่อง

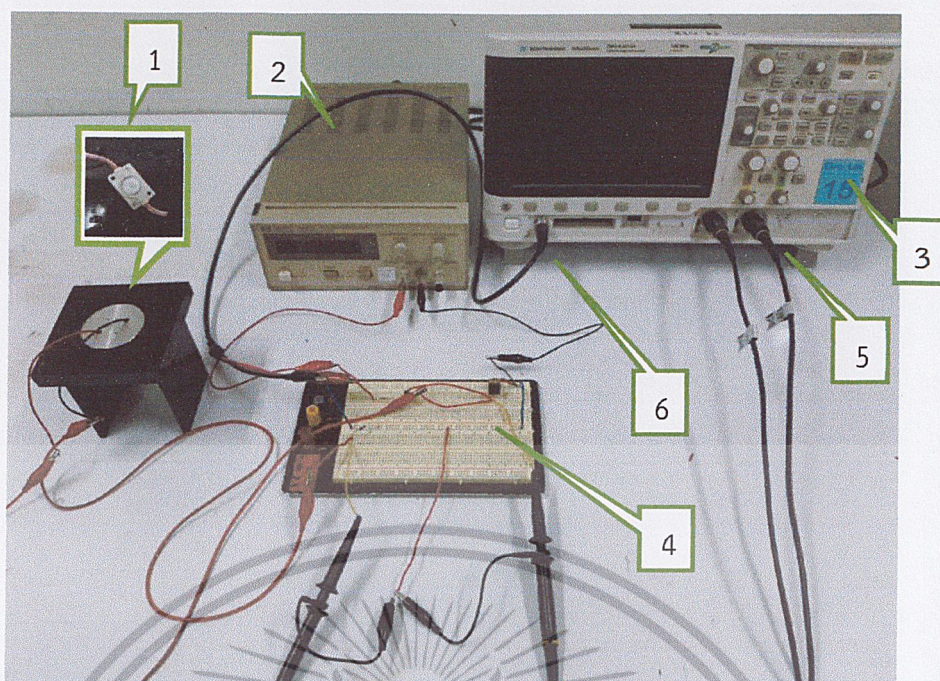
เพื่อฉายแสงให้สารละลายโรดามีน 6จี ที่ถูกดูดซับด้วยอนุภาคเหล็กออกไซด์ให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก มีอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.9

- 1) หลอดไดโอดเปล่งแสงสีขาว
- 2) หลอดอัลตราไวโอเล็ต
- 3) แหล่งจ่ายไฟ
- 4) ออสซิลโลสโคป
- 5) วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (หลักการทํางานแสดงในบทที่ 2 หัวข้อ 2.5)
- 6) สายจับสัญญาณจากออสซิลโลสโคป



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3.10 แสดงระบบการฉายแสงแบบพัลส์ (ก) แผนภาพจำลอง (ข) แผนภาพจริง

3.5 วิธีการทดลองของงานวิจัย

3.5.1 วิธีการทดลองของการทดลองที่ 1

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาเมื่อฉายแสงต่อเนื่องของโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์ ผสมกับอนุภาคเหล็กออกไซด์ 100 มิลลิกรัม ต่อลิตร มีวิธีการทดลองดังนี้

3.5.1.1 เตรียมสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 2×10^{-6} โมลาร์ ใส่ขวดแก้วปากแคบ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัลตราโซนิคเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้สารรวมตัวกับตัวทำละลาย

3.5.1.2 เตรียมอนุภาคเหล็กออกไซด์ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ขวดแก้วปากแคบ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัลตราโซนิค 30 นาที เพื่อให้อนุภาคแตกตัว เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในกับอนุภาคเหล็กออกไซด์

3.5.1.3 นำสารละลายโรดามีน 6จี ที่เตรียมไว้ในข้อที่ 3.5.1.1 มาผสมกับอนุภาคเหล็กออกไซด์ในข้อที่ 3.5.1.2 จากนั้นใส่ในไมโครคิวเวทในอัตราส่วน 1:1 (สารละลายโรดามีน 6จี 1 มิลลิลิตร ต่อ อนุภาคเหล็กออกไซด์ 1 มิลลิลิตร)

3.5.1.4 นำไมโครคิวเวทจากข้อที่ 3.5.1.3 มาตั้งทิ้งไว้ 150 นาที โดยทุกๆ 30 นาที จะนำมาเอกซเรย์วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยระบบวัดการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 3.7 ไม่นานพอให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1.5 เตรียมสารตามข้อ 3.5.1.1 - 3.5.1.3 จากนั้นนำมาฉายแสงขาวต่อเนื่องด้วยระบบการฉายแสงแบบต่อเนื่องดังรูปที่ 3.9 (วัดความเข้มแสงก่อนนำระบบฉายแสงมาใช้งาน) เป็นเวลา 150 นาที โดยทุกๆ 30 นาที จะนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยระบบวัดการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 3.7

3.5.1.6 ทำการทดลองตามข้อที่ 3.5.1.5 โดยเปลี่ยนการฉายแสงขาวต่อเนื่องเป็นการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อเนื่องด้วยระบบการฉายแสงต่อเนื่องดังรูปที่ 3.9 (วัดความเข้มแสงก่อนนำระบบฉายแสงมาใช้งาน)

3.5.1.7 คำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยใช้สมการที่ 3.3 เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง

3.5.2 วิธีการทดลองของการทดลองที่ 2

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดของสีย้อมกับเวลาเมื่อฉายแสงต่อเนื่องโดยเพิ่มการกวนสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์ ผสมกับอนุภาคเหล็กออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.5.2.1 เตรียมสารละลายโรดามีน 6จี และอนุภาคเหล็กออกไซด์ตามข้อที่ 3.5.1.1 และ 3.5.1.2

3.5.2.2 นำสารละลายโรดามีน 6จี ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และอนุภาคเหล็กออกไซด์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร มาใส่บีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร

3.5.2.3 นำบีกเกอร์ในข้อที่ 3.5.2.2 มาวางบนเครื่องกวนสารละลาย แล้วนำแท่งแม่เหล็กกวนสารมาใส่ในบีกเกอร์ และให้ความเร็วรอบการปั่นกวนที่ 1500 รอบต่อนาที โดยใช้ระบบการกวนสารละลายดังรูปที่ 3.8

3.5.2.4 จากข้อที่ 3.5.2.3 ทำการกวนสารละลายด้วยระบบกวนสารละลายดังรูปที่ 3.8 เป็นเวลา 150 นาที โดยทุกๆ 30 นาที จะทำการดูดสารละลาย 2 มิลลิลิตร มาใส่ไมโครคิวเวทแล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยระบบวัดการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 3.7

3.5.2.5 ทำการทดลองตามข้อ 3.5.2.1 - 3.5.2.3 จากนั้นฉายแสงขาวต่อเนื่องลงบนบีกเกอร์ด้วยระบบฉายแสงต่อเนื่องดังรูปที่ 3.7 (วัดความเข้มแสงก่อนนำระบบฉายแสงมาใช้งาน) จากนั้นทำการกวนสารละลายและฉายแสงต่อเนื่องเป็นเวลา 150 นาที โดยทุกๆ 30 นาที จะดูดสารละลาย 2 มิลลิลิตร ใส่ไมโครคิวเวทแล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยระบบวัดการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 3.7

3.5.2.6 ทำการทดลองตามข้อที่ 3.5.2.5 แต่เปลี่ยนจากการฉายแสงขาวต่อเนื่องเป็นการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อเนื่องโดยใช้ระบบการฉายแสงต่อเนื่องดังรูปที่ 3.9 (วัดความเข้มแสงก่อนนำระบบฉายแสงมาใช้งาน)

3.5.2.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยใช้สมการที่ 3.3 เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาที่ใช้ในการทดลองโดยเพิ่มการกวนสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 วิธีการทดลองของการทดลองที่ 3

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาเมื่อฉายแสงต่อเนื่องโดยเพิ่มการหมุนเหวี่ยงของโรตารีมิน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์ ผสมกับอนุภาคเหล็กออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.5.3.1 เตรียมสารละลายโรตารีมิน 6จี และอนุภาคเหล็กออกไซด์ตามข้อ 3.5.1.1 และ 3.5.1.2

3.5.3.2 นำสารละลายโรตารีมิน 6จี ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และอนุภาคเหล็กออกไซด์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร มาใส่บีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร

3.5.3.3 นำบีกเกอร์ในข้อที่ 3.5.3.2 มาวางบนเครื่องกวนสารละลาย แล้วนำแท่งแม่เหล็กกวนสารมาใส่ในบีกเกอร์ และให้ความเร็วรอบการปั่นกวน 1500 รอบต่อนาที โดยใช้ระบบกวนสารละลายดังรูปที่ 3.8

3.5.3.4 นำบีกเกอร์ในข้อที่ 3.5.3.3 มาทำการกวนสารละลายเป็นเวลา 150 นาที โดยทุกๆ 30 นาที จะดูดสารละลาย 2 มิลลิลิตร ใส่หลอดไมโครเซนติพีวาแล้วนำไปใส่เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที

3.5.3.5 ทำการทดลองตามข้อที่ 3.5.3.1 - 3.5.3.3 โดยฉายแสงขาวต่อเนื่องลงบนบีกเกอร์ด้วยระบบฉายแสงต่อเนื่องดังรูปที่ 3.9 (วัดความเข้มแสงก่อนนำระบบฉายแสงมาใช้งาน) จากนั้นทำการกวนสารละลายและฉายแสงขาวต่อเนื่องเป็นเวลา 150 นาที โดยทุกๆ 30 นาที จะดูดสารละลาย 2 มิลลิลิตร ใส่ไมโครเซนติพีวาแล้วนำไปใส่เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที หลังจากนั้นดูดสารละลายจากไมโครเซนติพีวา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในไมโครคิวเวทแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยระบบวัดการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 3.7

3.5.3.6 ทำการทดลองตามข้อที่ 3.5.3.5 แต่เปลี่ยนจากการฉายแสงขาวต่อเนื่องเป็นการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อเนื่องด้วยระบบการฉายแสงต่อเนื่องดังรูปที่ 3.9 (วัดความเข้มแสงก่อนนำระบบฉายแสงมาใช้งาน)

3.5.3.7 ทำการคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยใช้สมการที่ 3.3 เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาที่ใช้ในการทดลองโดยการเพิ่มการเหวี่ยงตกตะกอนและคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและพลังงานสูงสุด

3.5.4 วิธีการทดลองการทดลองที่ 4

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับ Duty cycle เมื่อฉายแสงแบบพัลส์โดยปรับค่า Duty Cycle ให้มีค่า 25 50 75 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตของสารละลายโรตารีมิน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์ ผสมกับอนุภาคเหล็กออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4.1 เตรียมสารละลายโรดามีน 6จี และอนุภาคเหล็กออกไซด์ตามข้อที่ 3.5.1.1 และ 3.5.1.2

3.5.4.2 นำสารละลายโรดามีน 6จี ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และอนุภาคเหล็กออกไซด์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร มาใส่บีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร

3.5.4.3 นำบีกเกอร์ในข้อที่ 3.5.4.2 มาวางบนเครื่องกวนสารละลาย แล้วนำแท่งแม่เหล็กกวนสารมาใส่ในบีกเกอร์ และให้ความเร็วรอบการปั่นกวน 1500 รอบต่อนาที โดยใช้ระบบกวนสารละลายดังรูปที่ 3.8

3.5.4.4 ทำการทดลองตามข้อที่ 3.5.4.1 - 3.5.4.3 โดยฉายแสงขาลงบีกเกอร์แล้วปรับ Duty Cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต ด้วยระบบฉายแสงแบบพัลส์ดังรูปที่ 3.10 (วัดความเข้มแสงก่อนนำระบบฉายแสงมาใช้งาน) จากนั้นทำการกวนสารละลายด้วยระบบการกวนสารละลายดังรูปที่ 3.8 เป็นเวลา 150 นาที โดยทุกๆ 30 นาที จะดูดสารละลายขึ้นมาใส่หลอดไมโครเซนติฟิว 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปใส่เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน เป็นเวลา 15 นาที ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที หลังจากนั้นดูดสารละลายจากหลอดไมโครเซนติฟิวมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในไมโครคิวเวทท์และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยระบบวัดการดูดกลืนแสงรูปที่ 3.7

3.5.4.5 ทำการทดลองตามข้อที่ 3.5.4.4 แต่เปลี่ยนค่า Duty Cycle จาก 25 เป็น 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่คงที่ 1 กิโลเฮิร์ต

3.5.4.6 จากข้อที่ 3.5.4.4 และ 3.5.4.5 ทำการคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยใช้สมการที่ 3.3 เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับ Duty Cycle ต่างๆ ที่เวลาเริ่มต้นถึง 150 นาที และคำนวณหากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยและพลังงานเฉลี่ยที่หลอดไอโอดีนเปล่งแสงใช้ในการทดลอง

3.5.5 วิธีทำการทดลองของการทดลองที่ 5

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาเมื่อฉายแสงแบบพัลส์ที่ Duty Cycle 25 เปอร์เซ็นต์ โดยปรับความถี่จนกว่าจะมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจะเท่ากับการฉายแสงแบบ Duty Cycle 100 เปอร์เซ็นต์ของสารละลายโรดามีน 6จี ที่ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์ ผสมกับอนุภาคเหล็กออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.5.5.1 เตรียมสารละลายโรดามีน 6จี และอนุภาคเหล็กออกไซด์ตามข้อที่ 3.5.1.1 และ 3.5.1.2

3.5.5.2 นำสารละลายโรดามีน 6จี ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และอนุภาคเหล็กออกไซด์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร มาใส่บีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร

3.5.5.3 นำบีกเกอร์ในข้อที่ 3.5.5.2 มาวางบนเครื่องกวนสารละลาย แล้วนำแท่งแม่เหล็กกวนสารมาใส่ในบีกเกอร์ และให้ความเร็วรอบการปั่นกวน 1500 รอบต่อนาที โดยใช้ระบบกวนสารเป็นเอกสารที่สมบูรณ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าสารละลายดังรูปที่ 3.8

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5.4 นำปิกเกอร์ในข้อที่ 3.5.5.3 มาฉายแสงโดยปรับ Duty Cycle 25 เปอร์เซ็นต์ และเปลี่ยนความถี่เป็น 10 กิโลเฮิร์ต โดยใช้ระบบการฉายแสงแบบพัลส์ตั้งรูปที่ 3.10 (วัดความเข้มแสงก่อนนำระบบฉายแสงมาใช้งาน) จากนั้นทำการกวาดสารละลายเป็นเวลา 150 นาที โดยทุกๆ 30 นาที จะดูดสารละลายขึ้นมาใส่หลอดไมโครเซนติพิวและนำไปใส่เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน ที่เวลา 15 นาที ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที หลังจากนั้นดูดสารละลายจากหลอดไมโครเซนติพิวมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในไมโครคิวเวทท์และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยระบบวัดการดูดกลืนแสงรูปที่ 3.7

3.5.5.5 ทำการทดลองตามข้อที่ 3.5.5.4 โดยเปลี่ยนความถี่เป็น 0.5, 20, 30, 40 กิโลเฮิร์ตตามลำดับ

3.5.5.6 ทำการคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสี้อมโดยใช้สมการที่ 3.3 เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสี้อมกับความถี่ต่างๆ ที่เวลาเริ่มต้นถึง 150 นาที และคำนวณหากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยและพลังงานเฉลี่ย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมไวแสงโรดามีน 6จี และศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยการฉายแสงแบบต่อเนื่อง แบบพัลส์และความถี่ของพัลส์ ของแสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ต รวมถึงศึกษาพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการทำงานของแสงขาว และแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยมีการศึกษาแบ่งเป็น 3 หัวข้อดังนี้

4.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาเมื่อฉายแสงต่อเนื่อง

4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับ Duty cycle เมื่อฉายแสงขาวแบบพัลส์

4.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดของสีย้อมกับความถี่เมื่อฉายแสงขาวด้วย Duty cycle คงที่ 25 เปอร์เซ็นต์

4.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาเมื่อฉายแสงต่อเนื่อง

จากการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาเมื่อฉายแสงต่อเนื่องโดยอาศัยหัวข้อการทดลองที่ 3.5.1 - 3.5.3 เพื่อพิจารณาเงื่อนไขในการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงหัวข้อการทดลองกับเงื่อนไขการทดลอง

หัวข้อการทดลอง	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง
3.5.1	ไม่ปั่นกววนสารละลาย ไม่ปั่นเหวี่ยงตกตะกอน
3.5.2	ปั่นกววนสารละลาย ไม่ปั่นเหวี่ยงตกตะกอน
3.5.3	ปั่นกววนสารละลาย ปั่นเหวี่ยงตกตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองโดยอาศัยหัวข้อที่ 3.51 ได้ผลดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาของสารละลายโรดามีน 6จี ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์ ผสมอนุภาคเหล็กออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่การฉายแสงต่างๆ อย่างต่อเนื่องของเงื่อนไขหัวข้อการทดลองที่ 3.5.1

จากรูปที่ 4.1 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมแบบไม่ฉายแสง ฉายแสงขาวและฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 30 นาทีแรก และเริ่มมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 30 -150 นาที เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจะเห็นว่าแสงขาวให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงกว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตและไม่ฉายแสง โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของแสงขาวแตกต่างจากแสงอัลตราไวโอเล็ตและไม่ฉายแสงอยู่ที่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สาเหตุที่ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรกเกิดจากอนุภาคเหล็กออกไซด์ที่ถูกผสมลงกับสารละลายโรดามีน 6จี ในช่วงแรกจะดูดซับสารละลายโรดามีน 6จี และได้รับพลังงานจากแสงทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอนกับโฮล โดยโฮลจะรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\text{OH}\cdot$) และอิเล็กตรอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ($\text{O}_2\cdot^-$) ซึ่งทั้งสองตัวจะจับกับสีย้อมทำให้เกิดการย่อยสลายสีย้อม แต่เนื่องจากการผสมเกิดขึ้นแค่ช่วงเวลาแรกทำให้อนุภาคเหล็กบางส่วนตกตะกอนเนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคเหล็กออกไซด์ที่มากกว่าสารละลายโรดามีน 6จี ทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกต่อได้ แต่ในส่วนขาวแสงยังสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้เนื่องจากแสงขาวสามารถให้พลังงาน

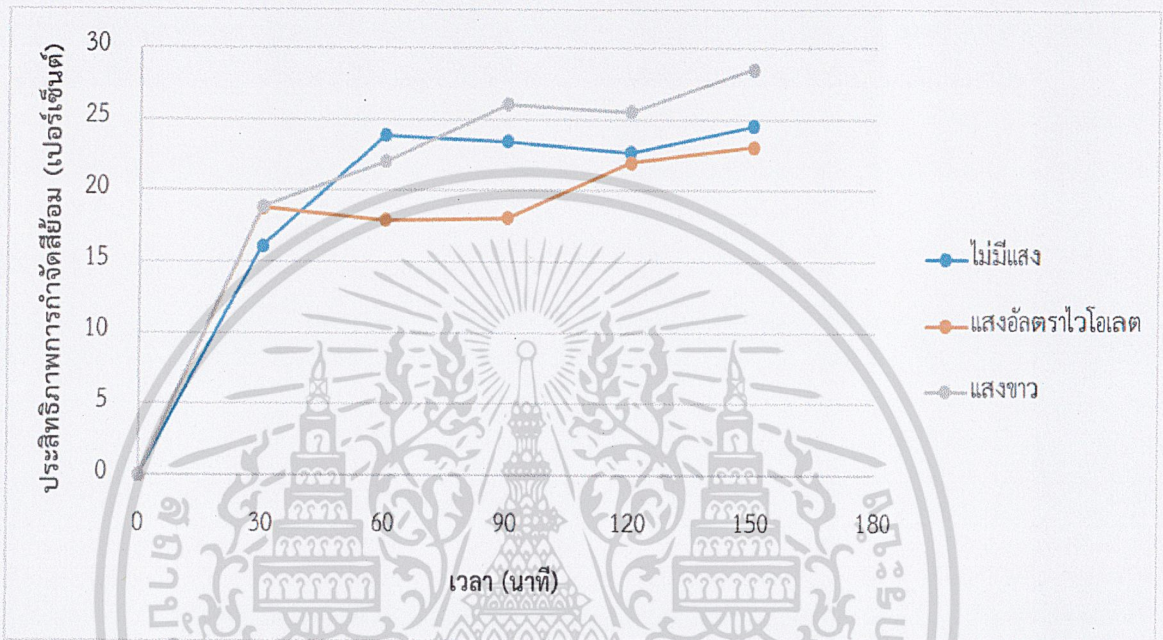
ในช่วงที่สารละลายโรดามีน 6จี สามารถดูดกลืนแสงได้ จึงทำให้สีย้อมได้รับพลังงานและเกิดคู่พาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เช่นเดียวกับคือโฮลจะรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลและอิเล็กตรอนก็ไปจับออกซิเจนเกิด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

เป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล ทำให้เกิดการย่อยสายตัวเอง เป็นสาเหตุว่าแสงขาวสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้สูงกว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตในระดับหนึ่ง

จากการทดลองโดยอาศัยหัวข้อที่ 3.5.2 เพิ่มการปั่นกววนสารละลาย แต่ไม่ปั่นเหวี่ยง ตกตะกอนเพื่อให้เกิดการดูดซับระหว่างอนุภาคเหล็กออกไซด์กับสารละลายโรดามีน 6จี ได้ผลดังรูปที่ 4.2

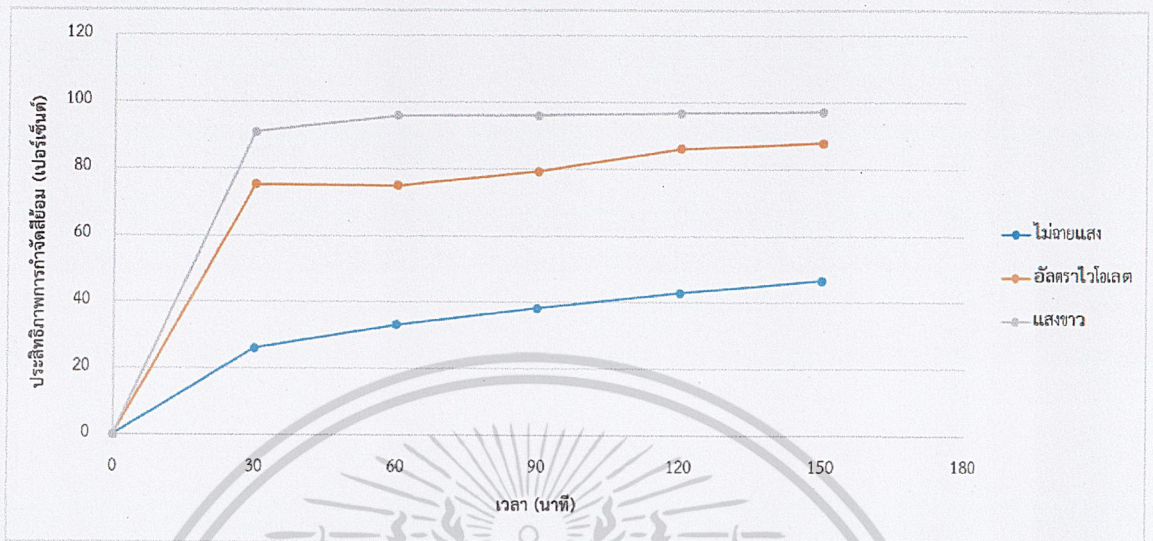


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาของสารละลายโรดามีน 6จี ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์ ผสมอนุภาคเหล็กออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่การฉายแสงต่างๆ อย่างต่อเนื่องของเงื่อนไขหัวข้อการทดลองที่ 3.5.2

จากรูปที่ 4.2 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่เวลาต่างๆ ของแบบไม่ฉายแสง ฉายแสงขาวและแบบฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มการปั่นกววนสารละลายทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะอนุภาคเหล็กออกไซด์สามารถจับตัวกับสีย้อมได้ แต่จากกราฟจะเห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีค่าน้อยกว่ามากถึงเท่าตัวถ้าเทียบกับเงื่อนไขของการทดลองที่ 3.5.1 เนื่องจากเงื่อนไขการทดลองที่ 3.5.2 ผู้วิจัยได้นำสารละลายมาวัดค่าการดูดกลืนแสงทันทีหลังจากทำการปั่นกววน ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มีค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคเหล็กออกไซด์ด้วย เมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจึงมีความคลาดเคลื่อนไปเนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่เกิดขึ้นมาจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโรดามีน 6จี ร่วมกับอนุภาคเหล็กออกไซด์ ดังนั้นจึงควรแยกอนุภาคเหล็กออกไซด์ออกจากสารละลายสีย้อมก่อนนำไปวัดการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองโดยอาศัยหัวข้อที่ 3.5.3 เพิ่มการปั่นกววนสารละลาย และเพิ่มการปั่นเหวี่ยง ตกตะกอน เพื่อแยกสารละลายโรดามีน 6จี ออกจากอนุภาคเหล็กออกไซด์ ได้ผลดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาของสารละลายโรดามีน 6จี ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์ ผสมอนุภาคเหล็กออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่การฉายแสงต่างๆ อย่างต่อเนื่องของเงื่อนไขหัวข้อการทดลองที่ 3.5.3

จากรูปที่ 4.3 พบว่าการฉายแสงขาว แสงอัลตราไวโอเล็ตและไม่ฉายแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก เมื่อพิจารณาการฉายแสงขาวกับแสงอัลตราไวโอเล็ตภายหลังเวลา 30 นาที จะเห็นว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลง เมื่อคิดค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงจากเวลา 30 นาที ถึงเวลา 150 นาที พบว่ามีค่าอยู่ที่ 1.55 และ 3.29 ตามลำดับ ถ้าเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการทดลองที่ 3.5.2 พบว่ามีค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้น 2 -3 เท่า ในส่วนกรณีที่ไม่ฉายแสงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นต่อไปอีกเมื่อเวลามากขึ้น ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการที่นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยง ตกตะกอนส่งผลให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงถูกต้องมากขึ้นเพราะเป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโรดามีน 6จี เพียงอย่างเดียวเมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจากค่าการดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้น และจากกราฟแสดงให้เห็นว่าแสงมีผลต่อการกำจัดสีย้อมอย่างมากโดยที่แสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงสุดที่ 97.24 และ 87.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ไม่ฉายแสงมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเพียง 46.66 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างจากการฉายแสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตประมาณ 70.30 และ 60.39 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าพิจารณาความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมระหว่างแสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตพบว่าต่างกันอยู่ที่ 9.98 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแสงที่ใช้ ความเข้มแสง กำลังไฟฟ้าสูงสุด พลังงาน แยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งาน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สูงสุด และประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่เวลา 150 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าที่ความเข้ม ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

แสงเท่ากันของแสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ต แสงขาวมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงกว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่ใช้พลังงานน้อยกว่าถึง 3 เท่า ซึ่งสาเหตุที่แสงขาวสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้สูงกว่า เนื่องจากการฉายแสงขาวให้พลังงานที่อนุภาคเหล็กออกไซด์สามารถนำไปใช้ในการบวนการโฟโตคะตะไลติก ได้โดยอนุภาคเหล็กออกไซด์ต้องการพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ 2.12 อิเล็กตรอนโวลต์หรือช่วงความยาวคลื่นประมาณ 585 นาโนเมตร เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนข้ามผ่านแถบพลังงานจากชั้นวาเลนซ์แบนด์ไปยังชั้นคอนดักชันแบนด์จนเกิดคู่พาหะที่ไปจับกับสีย้อมไวแสงแล้วเกิดการสลายตัว ซึ่งแสงขาวให้พลังงานช่วงความยาวคลื่น 430 - 630 นาโนเมตรหรือ 2.88 - 1.96 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นช่วงของแถบพลังงานที่เหล็กออกไซด์สามารถนำพลังงานไปใช้ได้และในขณะเดียวกันสีย้อมไวแสงก็จะตอบสนองต่อค่าพลังงานที่มีค่าเท่ากับตัวเองหรือเป็นช่วงพลังงานที่สีย้อมเองสามารถดูดกลืนแสงได้ ทำให้เกิดการสลายตัวในขณะที่ได้รับพลังงานในช่วงที่ต้องการ ซึ่งสีย้อมไวแสงโรดามีน 6จี มีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 527 นาโนเมตรหรือ 2.35 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่แสงขาวสามารถให้พลังงานได้ แต่ในทางกลับกันแสงอัลตราไวโอเล็ตมีพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 390 - 460 นาโนเมตรหรือ 2.96 - 3.18 อิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งจะเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเท่านั้น เพราะไม่มีพลังงานในช่วงที่สีย้อมไวแสงสามารถเกิดการสลายตัวได้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของแสงที่ใช้กับความเข้มแสง กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย เวลาที่ใช้ในการทดลอง พลังงานสูงสุด และประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ 150 นาที

ชนิดแสงไฟ	ความเข้มแสง (ลักซ์)	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (วัตต์)	พลังงานสูงสุด (กิโลจูล)	ประสิทธิภาพ การกำจัดสีย้อม (เปอร์เซ็นต์)
แสงขาว	3500	1.25	11.30	97.24
แสงอัลตราไวโอเล็ต	3500	4.28	33.56	87.99
ไม่ฉายแสง	-	-	-	40.66

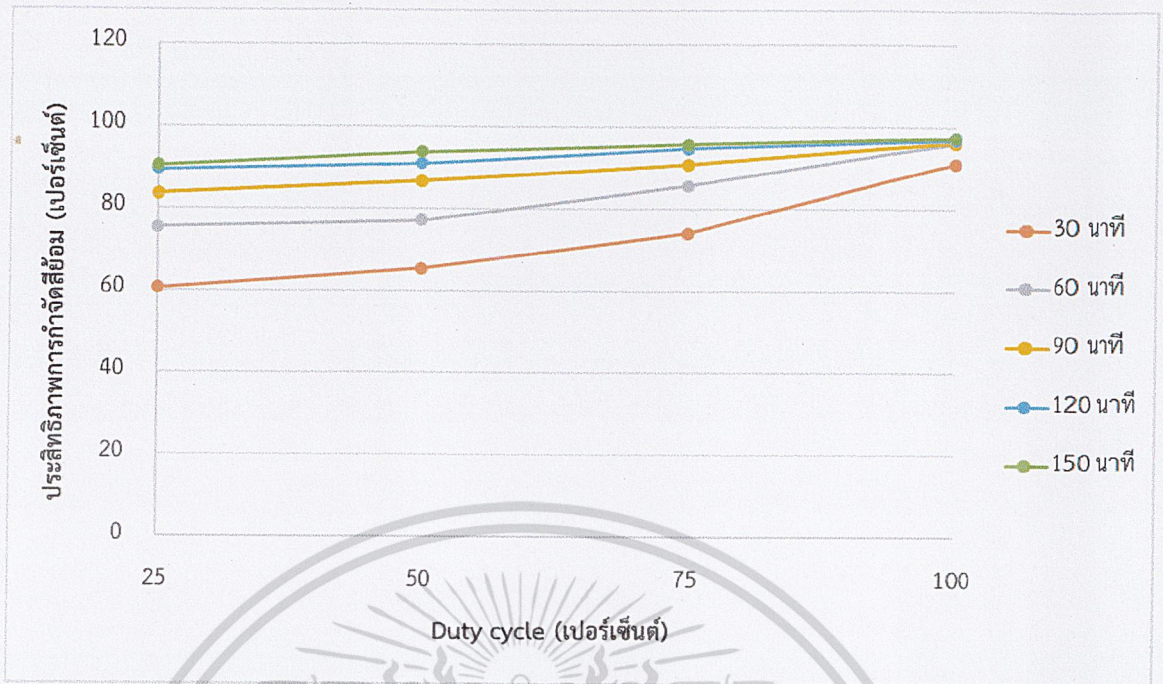
หมายเหตุ การคำนวณกำลังไฟฟ้า และพลังงานสูงสุดอยู่ในภาคผนวก ก

4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับ Duty cycle เมื่อฉายแสงขาวแบบพัลส์

จากการฉายแสงแบบพัลส์โดยปรับค่า Duty cycle ให้มีค่า 25 - 100 เปอร์เซ็นต์ และคงค่าความถี่ที่ 1 กิโลเฮิร์ต โดยอาศัยวิธีการทดลองที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.5.4 ได้ผลดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับ Duty cycle ของสารละลายโรดามีน 6จี ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์ ผสมอนุภาคเหล็กออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่การฉายแสงแบบ Duty cycle ต่างๆ ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต ที่เวลา 30 – 150 นาที

จากรูปที่ 4.4 พบว่าที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Duty cycle สูงขึ้นและเวลายาวขึ้น และจะเห็นว่าในช่วงเวลา 30 นาทีแรก ค่า Duty cycle ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเทียบกับเวลา 90 – 150 นาที ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเริ่มมีค่าคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อย เมื่อพิจารณาที่ 150 นาที การฉายแสงแบบ Duty cycle 100 75 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม 97.24 95.56 93.74 และ 90.36 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมพบว่า Duty cycle 75 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ มีความแตกต่างจาก Duty cycle 100 เปอร์เซ็นต์ อยู่ที่ 1.73 3.66 และ 7.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle กับความเข้มแสง ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม พลังงานสูงสุดเฉลี่ย ที่เวลา 30 - 150 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าการฉายแสงที่ Duty cycle สูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในทำนองเดียวกันเมื่อ Duty cycle มากขึ้นจะทำให้ความเข้มแสงมีค่าสูงขึ้นและค่าพลังงานก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ 90 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปพบว่าที่ Duty cycle 75 เปอร์เซ็นต์ เวลา 90 นาที Duty cycle 50 เปอร์เซ็นต์ เวลา 120 นาที และ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ เวลา 150 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมตามที่ต้องการได้ ในขณะที่ใช้พลังงาน 5.83 6.28 และ 6.23 กิโลจูลตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle ต่างๆ กับความเข้มแสงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมและพลังงานเฉลี่ย ที่เวลา 30-150 นาที ความถี่คงที่ 1 กิโลเฮิร์ต

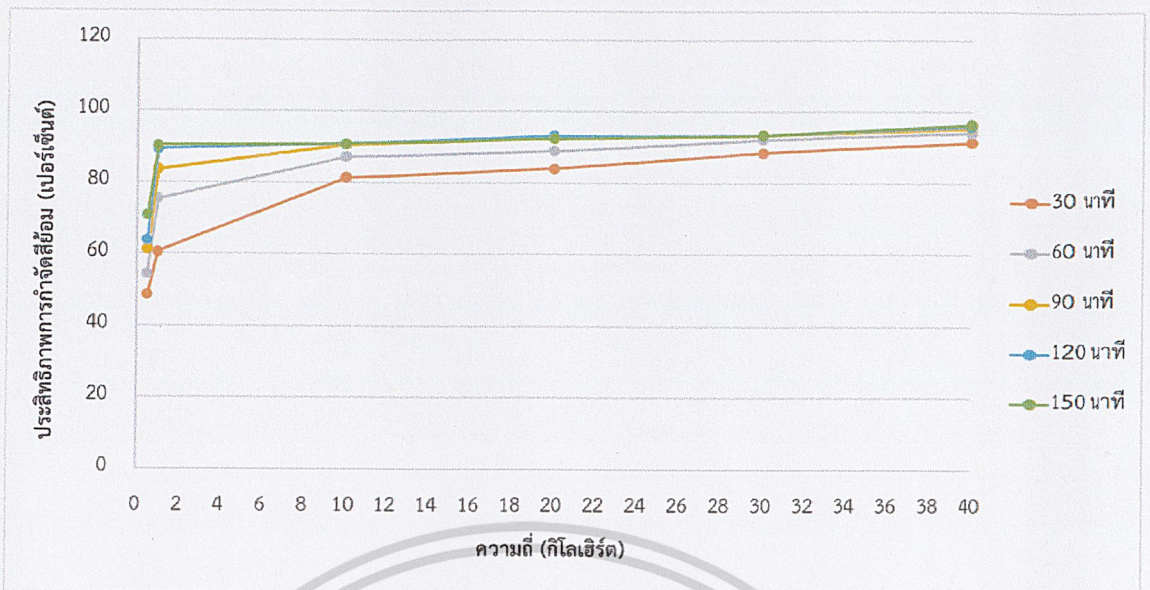
Duty cycle (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มแสง (ลักซ์)	เวลา 150 นาที		เวลา 120 นาที		เวลา 90 นาที		เวลา 60 นาที		เวลา 30 นาที	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
100	3500	97.25	11.35	96.81	9.08	96.15	6.81	95.99	4.54	91.01	2.27
75	2690	95.57	9.73	94.64	7.78	90.79	5.83	85.64	3.89	74.01	1.94
50	1820	93.75	7.86	90.86	6.28	86.58	4.71	77.06	3.14	65.33	1.57
25	940	90.36	6.23	89.28	4.98	83.58	3.73	75.29	2.49	60.61	1.24

หมายเหตุ A แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม (เปอร์เซ็นต์) และ B แสดงพลังงานเฉลี่ย (กิโลจูล) ส่วนการคำนวณพลังงานเฉลี่ยแสดงในภาคผนวก ก

4.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดของสีย้อมกับความถี่เมื่อฉายแสงขาวด้วย Duty cycle คงที่ 25 เปอร์เซ็นต์

จากการทดลองฉายแสงแบบพัลส์โดยกำหนดให้ค่า Duty cycle มีค่าคงที่ 25 เปอร์เซ็นต์ และปรับความถี่เพิ่มขึ้นจนกว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจะมีค่าใกล้เคียงการฉายแสงแบบ Duty cycle 100 เปอร์เซ็นต์หรือการฉายแสงขาวแบบต่อเนื่อง โดยอาศัยการทดลองที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.5.5 ได้ผลดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับความถี่ต่างๆ ของสารละลายโรดามีน 6จี ความเข้มข้น 10^{-6} โมลาร์ ผสมอนุภาคเหล็กออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ Duty cycle คงที่ 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ต่างๆ ที่เวลา 30 - 150 นาที

จากรูปที่ 4.5 พบว่าที่ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่และเวลาเพิ่มขึ้น จากกราฟแสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีค่าใกล้เคียงการฉายแสงแบบต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาที่ 150 นาที การฉายแสงโดยการปรับความถี่ 0.5 1 10 20 30 40 กิโลเฮิร์ต ให้ค่าประสิทธิภาพกำจัดของสีย้อมที่ 70.97 90.36 90.84 92.45 93.44 และ 96.43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมื่อฉายแสงแบบพัลส์ที่มีความถี่ 30 - 40 กิโลเฮิร์ต เทียบกับการฉายแสงแบบต่อเนื่อง พบว่าการฉายแสงแบบพัลส์ด้วยความถี่ 30-40 กิโลเฮิร์ต จะให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมใกล้เคียงกับการฉายแสงแบบต่อเนื่องโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมต่ำกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ต่างๆ กับความเข้มแสง ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมและพลังงานเฉลี่ยที่เวลา 30 - 150 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าการฉายแสง Duty cycle คงที่ 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยเมื่อความถี่มีค่าน้อยประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วย ในขณะที่เดียวกันถ้าความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาความเข้มแสงกับความถี่พบว่าความเข้มแสงมีค่าแปรผันตรงกับความถี่ เพราะเมื่อความถี่มีค่าสูงความเข้มแสงก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วยในทางกลับกันถ้าความถี่ลดลงความเข้มแสงก็จะมีค่าลดลงไปด้วย เมื่อพิจารณาความถี่กับเวลาพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นสิ่งที่เปลี่ยนแปลงคือพลังงานเฉลี่ย โดยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นในขณะที่ความถี่ค่าหนึ่งพบว่าพลังงานที่ใช้สูงขึ้นตามเวลาและส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับเป็นความเห็นไปเชิงประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ พงศน อักษรพิมพ์มีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่มีค่ามากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของการฉายแสงแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ต่างๆ ในตารางที่ 4.4 เทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของการฉายแสงขาวแบบต่อเนื่องพบว่าที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต เวลา 30 นาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม 91.48 เปอร์เซ็นต์ และใช้พลังงาน 1.74 กิโลจูล ซึ่งให้ประสิทธิภาพได้ตามต้องการในขณะที่ใช้พลังงานน้อยกว่าการฉายแสงขาวแบบต่อเนื่องที่ให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกันแต่ใช้พลังงานต่างกัน

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ต่างๆ กับความเข้มแสง ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมและพลังงานเฉลี่ย ที่เวลา 30-150 นาที ของการฉายแสงแบบ Duty cycle ความถี่ต่างๆ

ความถี่ (กิโลเฮิร์ต)	ความ เข้ม แสง (ลักซ์)	เวลา 150 นาที		เวลา 120 นาที		เวลา 90 นาที		เวลา 60 นาที		เวลา 30 นาที	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.5	926	70.97	5.56	63.72	4.45	61.18	3.33	54.58	2.22	48.78	1.11
1	1820	90.36	6.22	89.28	4.98	83.58	3.73	75.29	2.49	60.61	1.24
10	1265	90.84	6.65	90.83	5.32	90.72	3.99	87.11	2.66	81.34	1.33
20	1614	92.45	7.42	93.21	5.93	92.70	4.45	88.88	29.69	83.99	1.48
30	1963	93.44	8.04	93.36	6.43	93.46	4.82	92.25	32.19	88.56	1.6
40	2320	96.43	8.72	95.87	6.97	95.41	5.32	94.13	34.88	91.48	1.74
แสงขาว ต่อเนื่อง	3500	97.24	11.35	96.81	9.08	96.15	6.81	95.99	4.54	91.01	2.27

หมายเหตุ A แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม (เปอร์เซ็นต์) และ B แสดงพลังงานเฉลี่ย (กิโลจูล) ส่วนการคำนวณพลังงานเฉลี่ยแสดงในภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางแสงของอนุภาคแม่เหล็กเหล็กร่วมกับสีย้อมไวแสงโรดามีน 6จี โดยในอนุภาคแม่เหล็กขนาดเล็กระดับนาโนคือ เหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4) เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโรดามีน 6จี โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงคือ แสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ต และมีเงื่อนไขการฉายแสงแบบต่อเนื่อง ฉายแบบพัลส์และความถี่ของพัลส์ ผลการวิจัยสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

5.1.1 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาเมื่อฉายแสงต่อเนื่อง

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมแบบฉายแสงต่อเนื่องโดยมีเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง 3 แบบโดย

แบบที่ 1 ไม่ปั่นกววนสารละลาย ไม่ปั่นเหวี่ยงตกตะกอน ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของการฉายแสงขาว ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตและไม่ฉายแสง อยู่ในช่วง 40 – 70 เปอร์เซ็นต์ โดยแสงขาวให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุด แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือเมื่ออนุภาคเหล็กออกไซด์ตกตะกอนลงทำให้ไม่เกิดการย่อยสลายสีย้อมด้วยแสง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลงหรือเริ่มคงที่ในขณะที่เวลาเพิ่มขึ้น

แบบที่ 2 ปั่นกววนสารละลาย ไม่ปั่นเหวี่ยงตกตะกอน ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ค่อนข้างน้อย เป็นผลมาจากการที่อนุภาคเหล็กออกไซด์ไม่ได้รับการกำจัดออกเมื่อนำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงทำให้ไม่ได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง ส่งผลถึงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ไม่ถูกต้องไปด้วย

แบบที่ 3 ปั่นกววนสารละลาย ปั่นเหวี่ยงตกตะกอน การใช้เงื่อนไขปั่นกววนสารละลาย และปั่นเหวี่ยงตกตะกอน ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ 2 แบบแรกเพราะด้วยการปั่นกววนสารละลายที่ส่งผลให้สารละลายโรดามีน 6จี จับกับอนุภาคเหล็กออกไซด์เพื่อเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก และการปั่นเหวี่ยงตกตะกอนที่แยกอนุภาคเหล็กออกไซด์ออกจากสารละลายโรดามีน 6จี ทำให้สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ถูกต้องตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาผลของแสงที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมพบว่าที่เวลา 150 นาที แสงขาวให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมากที่สุด รองลงมาคือแสงอัลตราไวโอเล็ตและไม่ฉายแสง อยู่ที่ 97.24 87.99 และ 40.66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทำให้เห็นว่าแสงขาวมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมาก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตและไม่ฉายแสงอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาการใช้พลังงานในการฉายแสงขาวเทียบกับแสงอัลตราไวโอเล็ตพบอีกว่าแสงขาวใช้พลังงานในการฉายแสงน้อยกว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตถึง 3 เท่า

5.1.2 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับ Duty cycle เมื่อฉายแสงขาวแบบพัลส์

จากการศึกษาการให้แสงขาวแบบพัลส์โดยปรับค่า Duty cycle ให้มีค่า 25 – 100 เปอร์เซ็นต์ และคงที่ความถี่ที่ 1 กิโลเฮิร์ต พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Duty cycle เพิ่มขึ้นและเวลามากขึ้นโดยประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่เวลา 120 – 150 นาที ของ Duty cycle 25 – 75 เปอร์เซ็นต์ มีค่าใกล้เคียงกับ Duty cycle 100 เปอร์เซ็นต์หรือฉายแสงแบบต่อเนื่องที่เวลาเดียวกัน ในขณะที่ใช้พลังงานน้อยกว่าแบบฉายแสงต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าการให้แสงแบบพัลส์สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ใกล้เคียงกับการฉายแสงแบบต่อเนื่องในขณะที่ใช้พลังงานน้อยกว่า

5.1.3 สรุปผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดของสีย้อมกับความถี่เมื่อฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์

จากการศึกษาการให้แสงขาวแบบ Duty cycle คงที่ 25 เปอร์เซ็นต์ และปรับความถี่เพิ่มขึ้นจนกว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจะใกล้เคียงกับการฉายแสงขาวแบบต่อเนื่อง พบว่าเมื่อเพิ่มความถี่จนถึง 40 กิโลเฮิร์ตให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ใกล้เคียงกับการฉายแสงแบบต่อเนื่อง และถ้าพิจารณาที่ 30 นาทีแรกพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันโดยความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม 91.48 เปอร์เซ็นต์ และใช้พลังงาน 1.74 กิโลจูล ในขณะที่ฉายแสงขาวต่อเนื่องให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม 91.01 เปอร์เซ็นต์ ใช้พลังงาน 2.27 กิโลจูล ซึ่งที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตสามารถให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้สูงใกล้เคียงกันแต่ใช้พลังงานน้อยกว่าซึ่งคิดเป็นผลต่างคือ 0.53 กิโลจูล

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยที่ศึกษาสมบัติทางแสงสารละลายโรดามีน 6จี ร่วมกับอนุภาคเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดระดับนาโนเมตรโดยใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลาย ซึ่งเมื่อผู้ทำการวิจัยได้ทำการทดลองก็พบกับปัญหาในงานวิจัยด้านต่างๆดังนี้

5.2.1 ขณะทำการทดลองต้องอยู่ในสภาวะที่ไม่มีแสงภายในมารบกวน เพราะอาจจะมีผลต่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้ และถ้าไม่ระมัดระวังอาจเป็นอันตรายต่อผู้ทำการทดลองได้

5.2.2 การดูดสารละลายโรดามีน 6จี จากหลอดไมโครเซนติฟิวที่ปั่นเหวี่ยงตกตะกอนมาแล้ว
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ต้องทำด้วยความระมัดระวังและเบามือเพื่อไม่ให้อนุภาคเหล็กออกไซด์ที่จับตัวเป็นก้อนเกิดการแตกตัว
ไม่ว่ากรณีใดๆ หงสน อภทงห้ามมเหตดแบล่งเนอหาและตองอั้งอั้งงงเงาของเอกสารทุกคั้งหมีการนเป็ย

เพื่อป้องกันอนุภาคเหล็กออกไซด์ติดเข้ามาขณะดูดีไมโครคิวเวทท์อาจมีผลต่อการวัดค่าการดูดกลืนของแสงได้

5.2.3 การปั่นกวนสารละลายต้องทำงานร่วมกับแท่งแม่เหล็กกวนสารละลายซึ่งถ้าปั่นเหวี่ยงในจำนวนรอบที่สูงมาก ต้องจัดตำแหน่งของแท่งแม่เหล็กกวนสารให้อยู่ตรงการของเครื่องกวนสารละลาย และตรงกึ่งกลางของภาชนะที่ใส่ด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้แท่งแม่เหล็กกวนสารเกิดการปั่นที่ไม่เสถียร อาจมีผลต่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- [2] ไกรศรี ทองเสมือน. 2551. การดูดซับ. [Online]. Available : <http://digi.library.tu.ac.th/thesis/st/0149/10CHAPTER2.pdf>. (วันที่ค้นข้อมูล : 11 ธันวาคม 2561).
- [3] อ.ดร.วุฒิศาสตร์ โชคเกื้อ และคณะ. 2558. สมดุลการดูดซับ. [Online]. Available : [http://www.clinictech.most.go.th/online/Usermanage/Fina \(Report201612611601.pdf](http://www.clinictech.most.go.th/online/Usermanage/Fina (Report201612611601.pdf). (วันที่ค้นข้อมูล : 11 ธันวาคม 2561).
- [4] สุนีย์ แวมะ. 2560. การตรวจสอบคุณสมบัติในการดูดกลืนแสง. [Online]. Available : [http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473\(51\)/FY473-8.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473(51)/FY473-8.pdf). (วันที่ค้นข้อมูล : 11 พฤษภาคม 2561).
- [5] นางสาวสุจิตรา นาวารัตน. 2553. กระบวนการโฟโตคะตะไลติก. [Online]. Available : <http://digi.library.tu.ac.th/thesis/st/0385/03CHAPTER2.pdf>. (วันที่ค้นข้อมูล : 12 ธันวาคม 2561).
- [6] Wikipedia. 2556. การย่อยสลายด้วยแสง. [Online] Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/การย่อยสลายด้วยแสง>. (วันที่ค้นข้อมูล : 1 พฤษภาคม 2562).
- [7] Pare B., Singh P., and Jonnalagadda S.B. 2008. กระบวนการย่อยสลายด้วยแสงกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม. [Online]. Available : <http://library.dip.go.th/multim6/edoc/18731.pdf>. (วันที่ค้นข้อมูล : 1 พฤษภาคม 2562)
- [8] Wikipedia. 2561. มอสเฟต. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/มอสเฟต>. (วันที่ค้นข้อมูล : 2 พฤษภาคม 2562).
- [9] Commandronestore.com. 2016. ทรานซิสเตอร์. [Online] Available : <https://commandronestore.com/learning/transistor000.php>. (วันที่ค้นข้อมูล : 2 พฤษภาคม 2562).
- [10] พัชรา พสุพงศ์. 2558. “การสังเคราะห์ตัวเร่งนาโนซีเรียมออกไซด์-โคบอลต์เฟอร์ไรต์ที่สามารถแยกออกด้วยแม่เหล็กได้สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอน-ไฮโดรเจนแอริลเลชันโดยตรง”.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [11] T.Shahriari. 2013. Effective parameters for the adsorption of chromium(III) onto iron oxide magnetic nanoparticle. [Online]. Available : <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-013-0315-z>. (วันที่ค้นข้อมูล : 13 มกราคม 2562).
- [12] Wikipedia. 2016. Rhodamine 6G. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Rhodamine_6G. (วันที่ค้นข้อมูล : 11 ธันวาคม 2561).
- [13] Yana Bagbi, Ankur Sarswat, Dinesh Mohan, Arvind Pandey & Pratima R. Solank. 2017. Lead and Charomium Adsorption from Water using L-Cysteine Functionalized Magnetic(Fe₃O₄)Nanoparticles. [Online]. Available : WWW.nature.com/scientificreports. (วันที่ค้นข้อมูล : 13 มกราคม 2562).
- [14] BuyTropicalife.com. 2018. DI WATER. [Online]. Available : <https://buytropicalife.com/di-water-de-ionized-water.html>. (วันที่ค้นข้อมูล : 10 พฤษภาคม 2562)
- [15] รศ.ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. 2534. เครื่องหมุนเหวี่ยง. [Online]. Available : <https://home.kku.ac.th/chuare/12/centrifuge.pdf>. (วันที่ค้นข้อมูล : 10 พฤษภาคม 2562).
- [16] ภูวดล เทศะศิลป์. 2549. LED (Light Emitting Diode). [Online]. Available : http://digi.library.tu.ac.th/thesis/it/0671/10CHAPTER_2.pdf. (วันที่ค้นข้อมูล 10 พฤษภาคม 2562).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



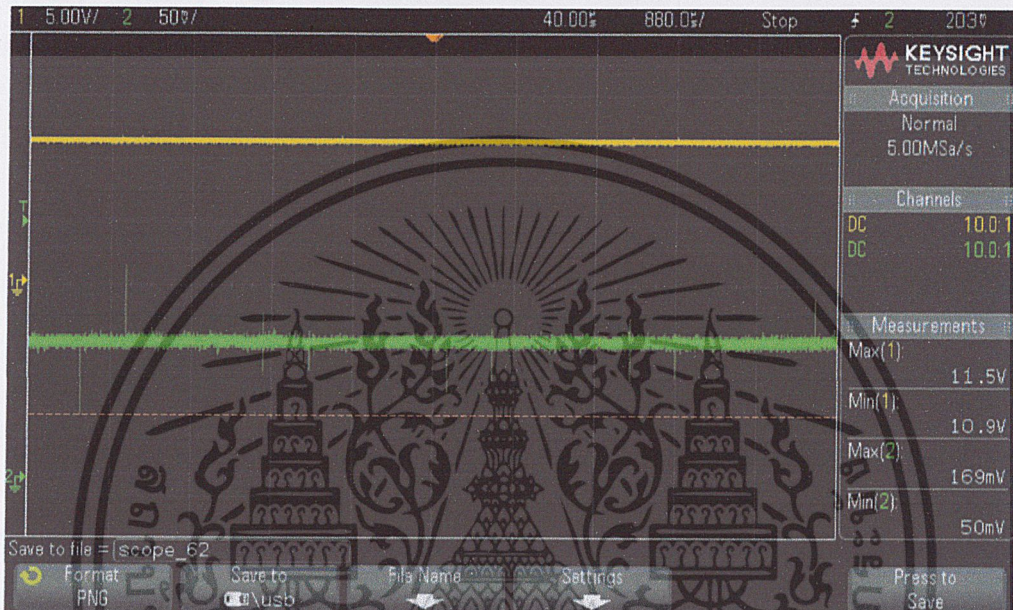
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก แสดงการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการฉายแสง

1. การคำนวณพลังงานที่ใช้ของการฉายแบบต่อเนื่อง

1.1 แสงขาวทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ในออสซิลอโคปดังรูปที่ ก.1 จะให้ไฟล์ excel ตามรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.1 แสดงสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสง (เหลือง) และสัญญาณขาออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง (เขียว)

second	Volt1	Volt2
2	-0.00436	11.14
3	-0.00435	11.14
4	-0.00435	11.14
5	-0.00434	11.14
6	-0.00434	11.2
7	-0.00433	11.14
8	-0.00433	11.3
9	-0.00432	11.14
10	-0.00432	11.2
11	-0.00432	11.2
12	-0.00431	11.14
13	-0.00431	11.14
14	-0.0043	11.2
15	-0.0043	11.2
16	-0.00429	11.14
17	-0.00429	11.3
18	-0.00429	11.14
19	-0.00428	11.14
20	-0.00428	11.14
21	-0.00427	11.35
22	-0.00427	11.2

รูปที่ ก.2 แสดงข้อมูลสัญญาณที่ได้จากการบันทึกค่ามาจากออสซิลอโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ก.2 ช่อง B คือสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสง ช่อง C คือสัญญาณความต่างศักย์หลังจากออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง สามารถทำการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการทดลองได้ดังรูปที่ ก.3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	second	Volt1	Volt2	V (แสงขาว)	I (แสงขาว)	P (แสงขาว)	Pmax (แสงขาว)							
2	-0.00436	11.14	0.1078	11.04	0.1078	1.1895	1.2559							
3	-0.00435	11.14	0.1078	11.04	0.1078	1.1895								
4	-0.00435	11.14	0.1093	11.04	0.1093	1.206								
5	-0.00434	11.14	0.1088	11.04	0.1088	1.2005								
6	-0.00434	11.2	0.1088	11.09	0.1088	1.206								
7	-0.00433	11.14	0.1048	11.04	0.1048	1.1566								
8	-0.00433	11.3	0.1088	11.19	0.1088	1.2169								
9	-0.00432	11.14	0.1058	11.04	0.1058	1.1676								
10	-0.00432	11.2	0.1073	11.09	0.1073	1.1894								
11	-0.00432	11.2	0.1093	11.09	0.1093	1.2115								
12	-0.00431	11.14	0.1068	11.04	0.1068	1.1785								
13	-0.00431	11.14	0.1048	11.04	0.1048	1.1566								
14	-0.0043	11.2	0.1088	11.09	0.1088	1.206								
15	-0.0043	11.2	0.1083	11.09	0.1083	1.2005								
16	-0.00429	11.14	0.1083	11.04	0.1083	1.195								
17	-0.00429	11.3	0.1063	11.19	0.1063	1.1891								
18	-0.00429	11.14	0.1078	11.04	0.1078	1.1895								
19	-0.00428	11.14	0.1103	11.03	0.1103	1.217								
20	-0.00428	11.14	0.1098	11.04	0.1098	1.2115								
21	-0.00427	11.35	0.1068	11.24	0.1068	1.2								
22	-0.00427	11.2	0.1058	11.09	0.1058	1.1729								

รูปที่ ก.3 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการฉายแสงขาวต่อเนื่อง

จากรูปที่ ก.3 ช่อง D คือความต่างศักย์ตกคร่อมหลอดไดโอดเปล่งแสงเกิดจากช่อง B - ช่อง C ช่อง E คือ การแสไฟฟ้าที่หลอดไดโอดเปล่งแสงใช้ในการทำงาน เกิดจากช่อง B × 1 (1 คือค่าตัวต้านทาน) ช่อง F คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของแสงขาว ช่อง G คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แสงขาวใช้ในการทำงาน โดยการเลือกค่าสูงสุดจากช่อง F เมื่อได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง สามารถคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการทำงานได้จากสมการที่ ก.1

$$W = P \times t \quad (\text{ก.1})$$

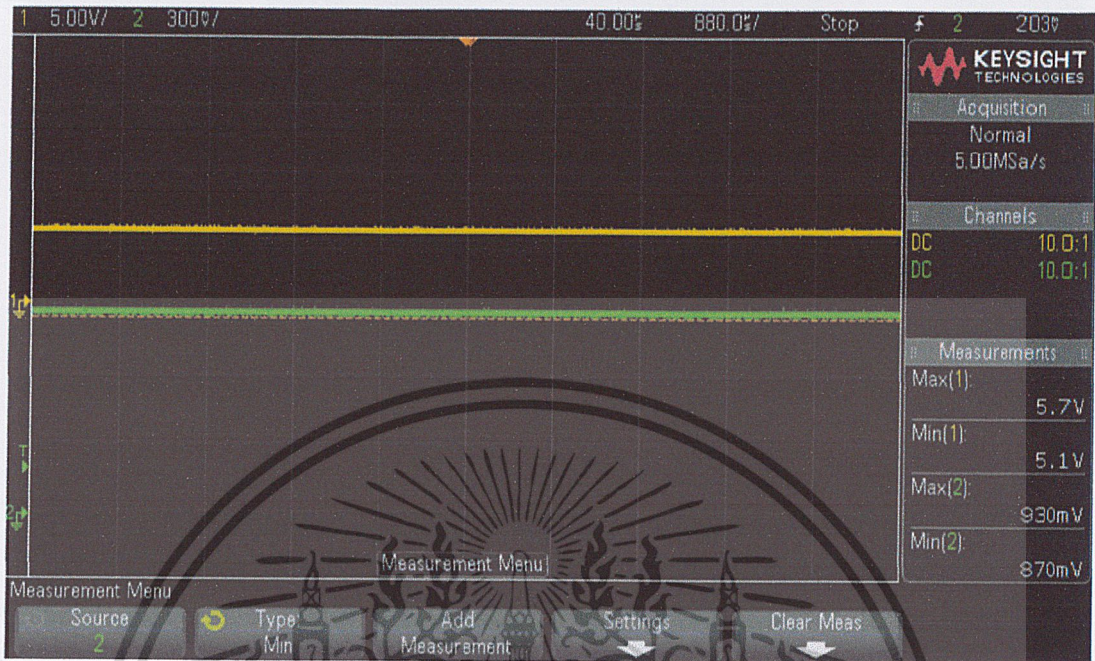
โดยที่ P คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงาน

t คือเวลาที่ใช้ในการทำงาน

เนื่องจากฉายแสงขาวต่อเนื่อง 150 นาที พลังงานที่ใช้จึงเท่ากับ 11.30 กิโลจูล

1.2 แสงอัลตราไวโอเล็ต

ทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ในออสซิลอโคปดังรูปที่ ก.4 จะให้ไฟล์ excel ตามรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.4 แสดงสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสงพลังงานสูง (เหลือง) และสัญญาณขาออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสงพลังงานสูง (เขียว)

T1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	second	Volt1	Volt2								
2	-0.00436	5.52	0.895								
3	-0.00435	5.37	0.904								
4	-0.00435	5.37	0.904								
5	-0.00434	5.52	0.907								
6	-0.00434	5.32	0.898								
7	-0.00433	5.37	0.895								
8	-0.00433	5.32	0.895								
9	-0.00432	5.47	0.898								
10	-0.00432	5.47	0.895								
11	-0.00432	5.52	0.895								
12	-0.00431	5.37	0.895								
13	-0.00431	5.52	0.898								
14	-0.0043	5.47	0.895								
15	-0.0043	5.52	0.895								
16	-0.00429	5.32	0.895								
17	-0.00429	5.37	0.904								
18	-0.00429	5.52	0.904								
19	-0.00428	5.52	0.895								
20	-0.00428	5.52	0.895								
21	-0.00427	5.37	0.895								
22	-0.00427	5.52	0.895								
23	-0.00426	5.52	0.895								

เอกสารนี้เป็นรูปที่ ก.5 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อเนื่อง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ก.5 ช่อง B คือสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสง ช่อง C คือสัญญาณความต่างศักย์หลังจากออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง สามารถทำการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการทดลอง ได้ดังรูปที่ ก.6

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	second	Volt1	Volt2	V (แสงขาว)	I (แสงขาว)	P (แสงขาว)	Pmax (แสงขาว)						
2	-0.00436	5.52	0.895	4.625	0.895	4.1394	4.2853						
3	-0.00435	5.37	0.904	4.466	0.904	4.0373							
4	-0.00435	5.37	0.904	4.466	0.904	4.0373							
5	-0.00434	5.52	0.907	4.613	0.907	4.184							
6	-0.00434	5.32	0.898	4.422	0.898	3.971							
7	-0.00433	5.37	0.895	4.475	0.895	4.0051							
8	-0.00433	5.32	0.895	4.425	0.895	3.9604							
9	-0.00432	5.47	0.898	4.572	0.898	4.1057							
10	-0.00432	5.47	0.895	4.575	0.895	4.0946							
11	-0.00432	5.52	0.895	4.625	0.895	4.1394							
12	-0.00431	5.37	0.895	4.475	0.895	4.0051							
13	-0.00431	5.52	0.898	4.622	0.898	4.1506							
14	-0.0043	5.47	0.895	4.575	0.895	4.0946							
15	-0.0043	5.52	0.895	4.625	0.895	4.1394							
16	-0.00429	5.32	0.895	4.425	0.895	3.9604							
17	-0.00429	5.37	0.904	4.466	0.904	4.0373							
18	-0.00429	5.52	0.904	4.616	0.904	4.1729							
19	-0.00428	5.52	0.895	4.625	0.895	4.1394							
20	-0.00428	5.52	0.895	4.625	0.895	4.1394							
21	-0.00427	5.37	0.895	4.475	0.895	4.0051							
22	-0.00427	5.52	0.895	4.625	0.895	4.1394							
23	-0.00427	5.52	0.895	4.625	0.895	4.1394							

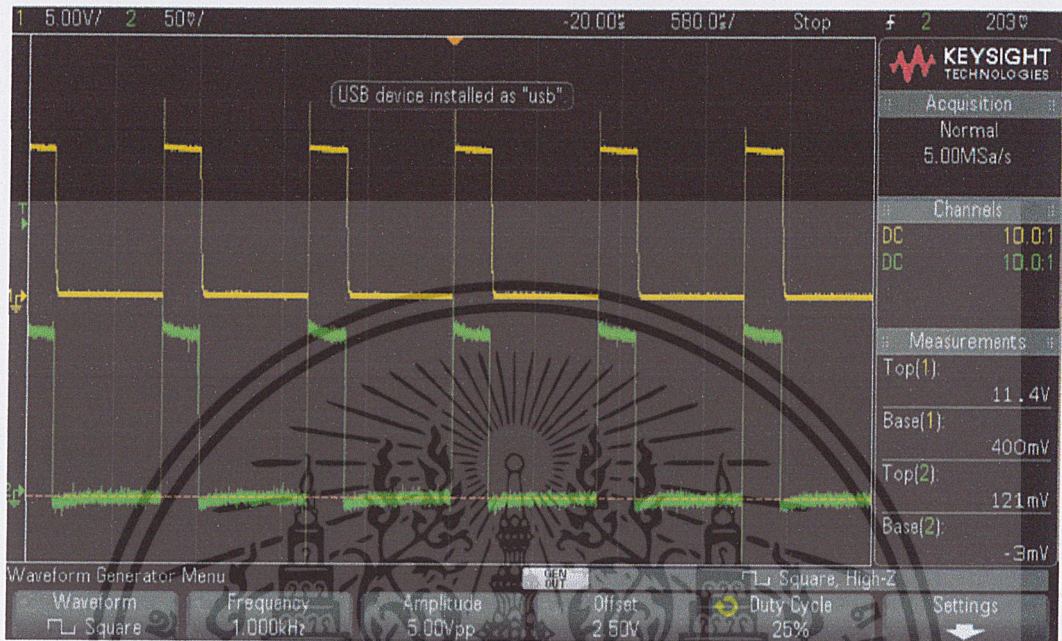
รูปที่ ก.6 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อเนื่อง

จากรูปที่ ก.6 ช่อง D คือความต่างศักย์ตกคร่อมหลอดไดโอดเปล่งแสงเกิดจากช่อง B - ช่อง C ช่อง E คือ การแסףไฟฟ้าที่หลอดไดโอดเปล่งแสงใช้ในการทำงาน เกิดจากช่อง B \times 1 (1 คือค่าตัวต้านทาน) ช่อง F คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของแสงขาว ช่อง G คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด อัลตราไวโอเล็ตใช้ในการทำงาน โดยการเลือกค่าสูงสุดจากช่อง F เมื่อได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการทดลองสามารถคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการทำงานได้จากสมการที่ ก.1 เนื่องจากฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อเนื่อง 150 นาที พลังงานที่ใช้จึงเท่ากับ 4.28 กิโลจูล

2. การคำนวณพลังงานที่ใช้ของการฉายแบบพัลส์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต

2.1 การฉายแสงขาวด้วย Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์

ทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ในออสซิลอโคปดังรูปที่ ก.7 จะให้ไฟล์ excel ตามรูปที่ ก.8



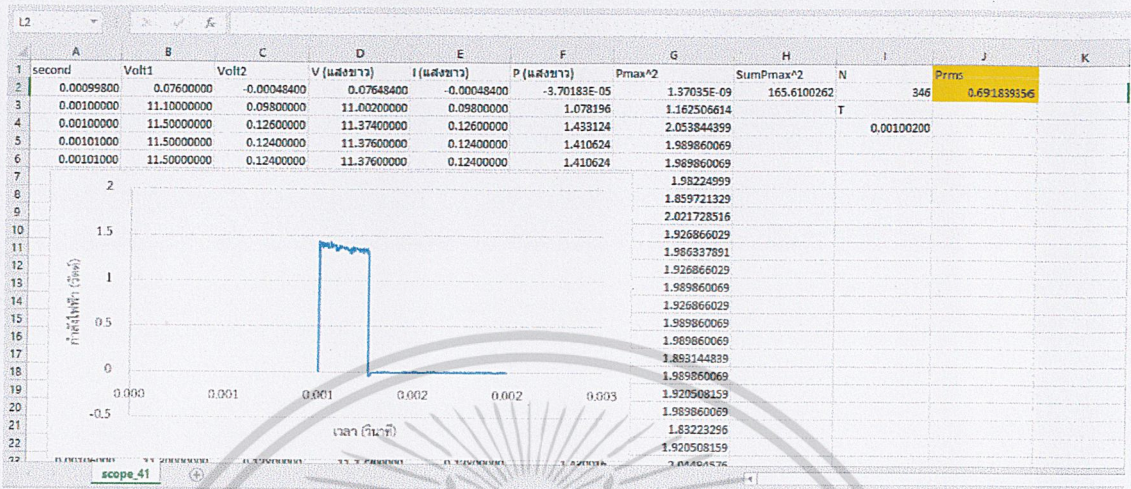
รูปที่ ก.7 แสดงสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสง (เหลือง) และสัญญาณขาออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง (เขียว)

P5												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	second	Volt1	Volt2									
2	0.00099800	0.07600000	-0.00048400									
3	0.00100000	11.10000000	0.09800000									
4	0.00100000	11.50000000	0.12600000									
5	0.00101000	11.50000000	0.12400000									
6	0.00101000	11.50000000	0.12400000									
7	0.00101000	11.30000000	0.12600000									
8	0.00102000	11.30000000	0.12200000									
9	0.00102000	11.50000000	0.12500000									
10	0.00102000	11.50000000	0.12200000									
11	0.00102000	11.40000000	0.12500000									
12	0.00103000	11.50000000	0.12200000									
13	0.00103000	11.50000000	0.12400000									
14	0.00103000	11.50000000	0.12200000									
15	0.00104000	11.50000000	0.12400000									
16	0.00104000	11.50000000	0.12400000									
17	0.00104000	11.40000000	0.12200000									
18	0.00104000	11.50000000	0.12400000									
19	0.00105000	11.30000000	0.12400000									
20	0.00105000	11.50000000	0.12400000									
21	0.00105000	11.40000000	0.12000000									
22	0.00106000	11.30000000	0.12400000									
23	0.00106000	11.20000000	0.12000000									

รูปที่ ก.8 แสดงข้อมูลสัญญาณที่ได้จากการบันทึกค่ามาจากออสซิลอโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ก.8 ช่อง B คือสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสง ช่อง C คือสัญญาณความต่างศักย์หลังจากออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง สามารถทำการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการทดลองได้ดังรูปที่ ก.10

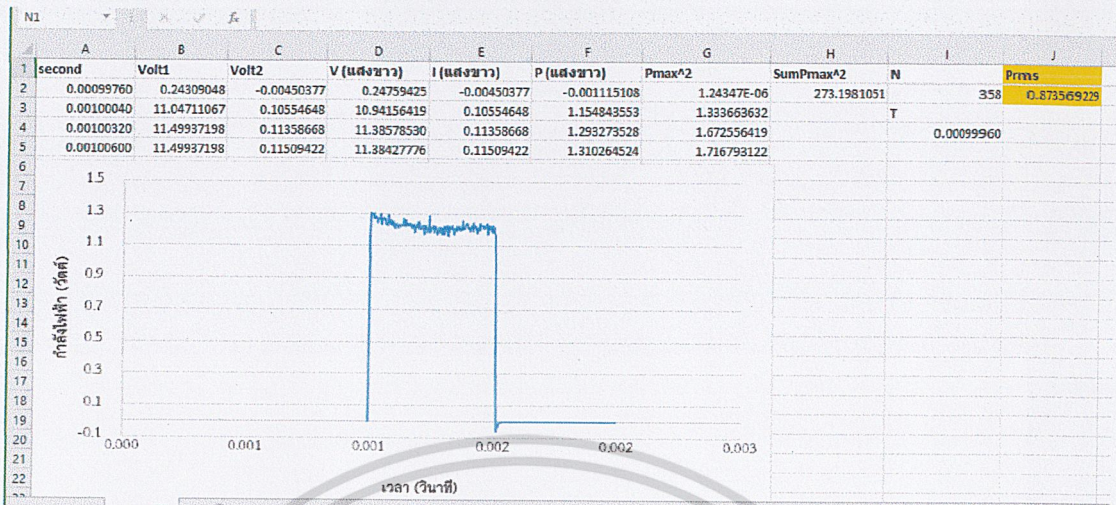


รูปที่ ก.9 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต

จากรูปที่ ก.10 ช่อง D คือความต่างศักย์ตกคร่อมหลอดไดโอดเปล่งแสงเกิดจากช่อง B - ช่อง C ช่อง E คือ การแสไฟฟ้าที่หลอดไดโอดเปล่งแสงใช้ในการทำงาน เกิดจากช่อง B \times 1 (1 คือค่าตัวต้านทาน) ช่อง F คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของแสงขาว ช่อง G คือ กำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง H คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง I คือจำนวนข้อมูลของกำลังไฟฟ้า 1 คาบเวลา ช่อง J คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ใน 1 คาบเวลา (การใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจาก เป็นวัดค่าปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา) จึงสามารถหาพลังงานได้จากสมการที่ ก.1

เนื่องจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 150 นาที พลังงานที่ใช้จึงเท่ากับ 6.23 กิโลจูล

2.2 การฉายแสงขาวด้วย Duty cycle 50 เปอร์เซนต์



รูปที่ ก.10 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 50 เปอร์เซนต์ ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต

จากรูปที่ ก.11 ช่อง D คือความต่างศักย์ตกคร่อมหลอดไดโอดเปล่งแสงเกิดจากช่อง B - ช่อง C ช่อง E คือ การเสไฟฟ้าที่หลอดไดโอดเปล่งแสงใช้ในการทำงาน เกิดจากช่อง B \times 1 (1 คือค่าตัวต้านทาน) ช่อง F คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของแสงขาว ช่อง G คือ กำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง H คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง I คือจำนวนข้อมูลของกำลังไฟฟ้า 1 คาบเวลา ช่อง J คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ใน 1 คาบเวลา (การใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจาก เป็นวัดค่าปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา) จึงสามารถหาพลังงานได้จากสมการที่ ก.1

เนื่องจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 50 เปอร์เซนต์ เป็นเวลา 150 นาที พลังงานที่ใช้จึงเท่ากับ 7.86 กิโลจูล

2.3 การฉายแสงขาวด้วย Duty cycle 75 เปอร์เซ็นต์



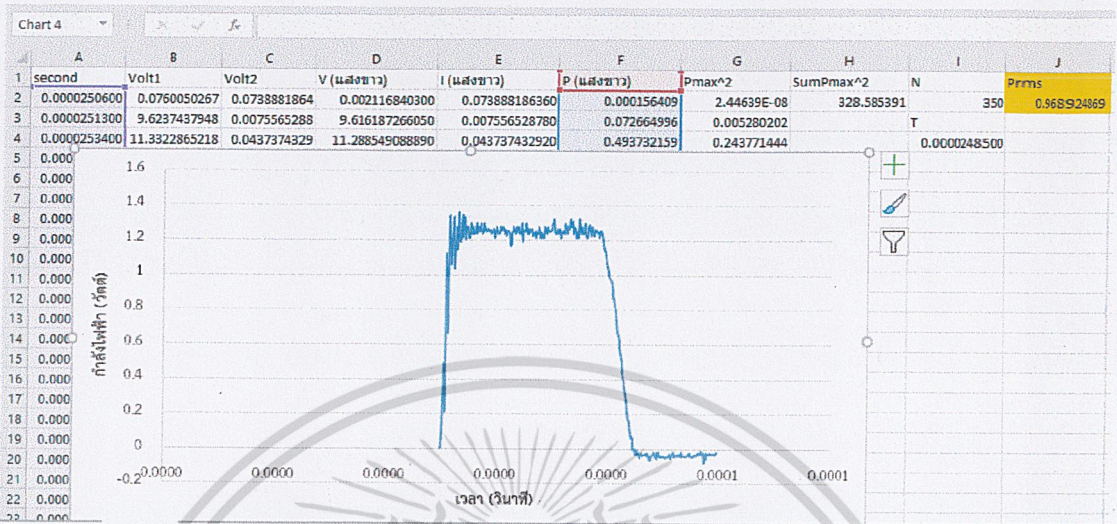
รูปที่ ก.11 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 75 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต

จากรูปที่ ก.12 ช่อง D คือความต่างศักย์ตกคร่อมหลอดไดโอดเปล่งแสงเกิดจากช่อง B - ช่อง C ช่อง E คือ การเสไฟฟ้าที่หลอดไดโอดเปล่งแสงใช้ในการทำงาน เกิดจากช่อง B \times 1 (1 คือค่าตัวต้านทาน) ช่อง F คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของแสงขาว ช่อง G คือ กำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง H คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง I คือจำนวนข้อมูลของกำลังไฟฟ้า 1 คาบเวลา ช่อง J คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ใน 1 คาบเวลา (การใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจาก เป็นวัดค่าปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา) จึงสามารถหาพลังงานได้จากสมการที่ ก.1

เนื่องจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 75 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 150 นาที พลังงานที่ใช้จึงเท่ากับ 9.73 กิโลจูล

3. การคำนวณพลังงานที่ใช้ของการฉายแบบพัลส์คงที่ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มความถี่

3.1 การฉายแสงขาวความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต

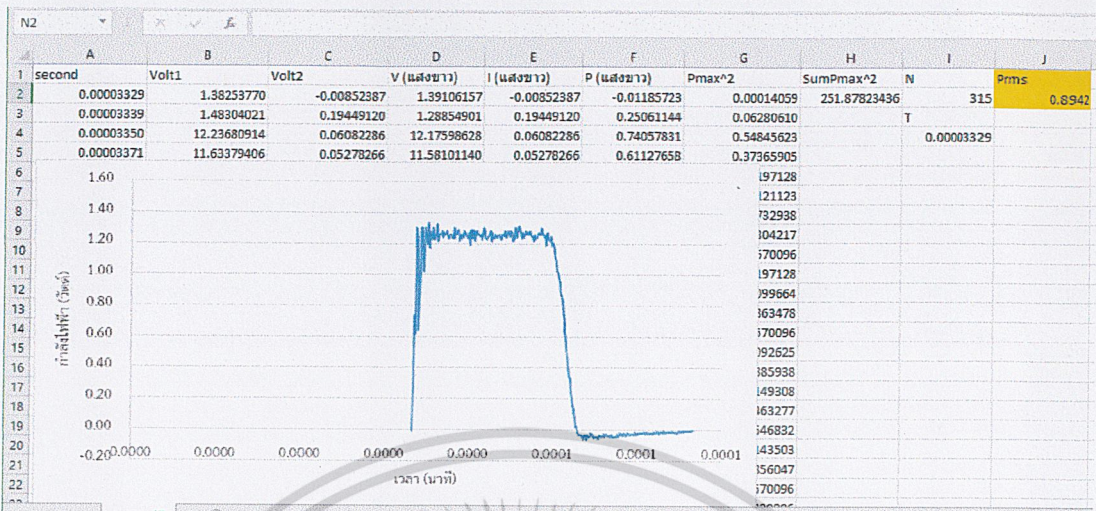


รูปที่ ก.12 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต

จากรูปที่ ก.13 ช่อง D คือความต่างศักย์ตกคร่อมหลอดไดโอดเปล่งแสงเกิดจากช่อง B - ช่อง C ช่อง E คือ การเสไฟฟ้าที่หลอดไดโอดเปล่งแสงใช้ในการทำงาน เกิดจากช่อง B x 1 (1 คือค่าตัวต้านทาน) ช่อง F คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของแสงขาว ช่อง G คือ กำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง H คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง I คือจำนวนข้อมูลของกำลังไฟฟ้า 1 คาบเวลา ช่อง J คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ใน 1 คาบเวลา (การใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจาก เป็นวัดค่าปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา) จึงสามารถหาพลังงานได้จากสมการที่ ก.1

เนื่องจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต เป็นเวลา 150 นาที พลังงานที่ใช้จึงเท่ากับ 8.72 กิโลจูล

3.2 การฉายแสงขาวความถี่ 30 กิโลเฮิร์ต

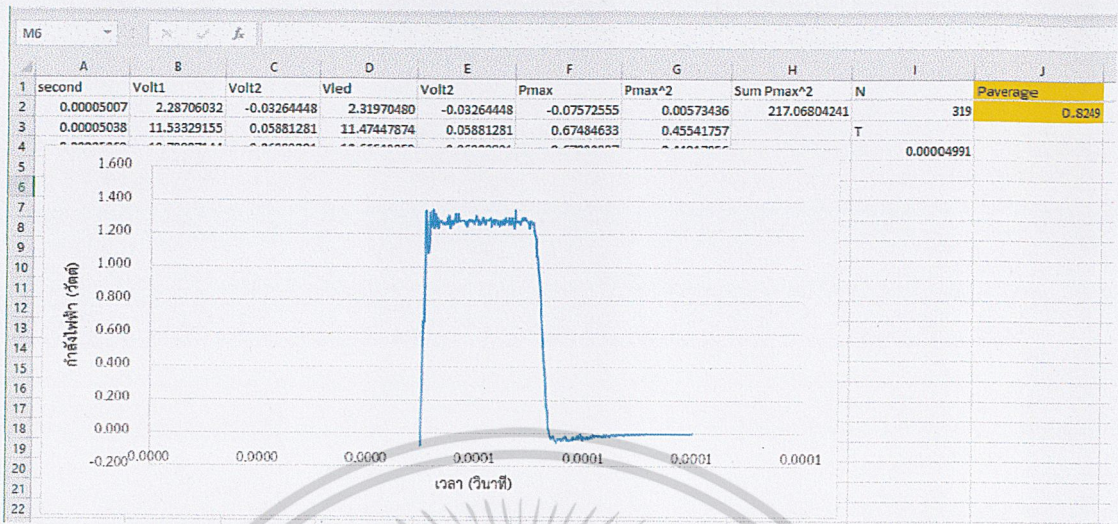


รูปที่ ก.13 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ต

จากรูปที่ ก.14 ช่อง D คือความต่างศักย์ตกคร่อมหลอดไดโอดเปล่งแสงเกิดจากช่อง B - ช่อง C ช่อง E คือ การเสไฟฟ้าที่หลอดไดโอดเปล่งแสงใช้ในการทำงาน เกิดจากช่อง B x 1 (1 คือค่าตัวต้านทาน) ช่อง F คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของแสงขาว ช่อง G คือ กำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง H คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง I คือจำนวนข้อมูลของกำลังไฟฟ้า 1 คาบเวลา ช่อง J คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ใน 1 คาบเวลา (การใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจาก เป็นวัดค่าปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา) จึงสามารถหาพลังงานได้จากสมการที่ ก.1

เนื่องจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ต เป็นเวลา 150 นาที พลังงานที่ใช้จึงเท่ากับ 8.04 กิโลจูล

3.3 การฉายแสงขาวความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต

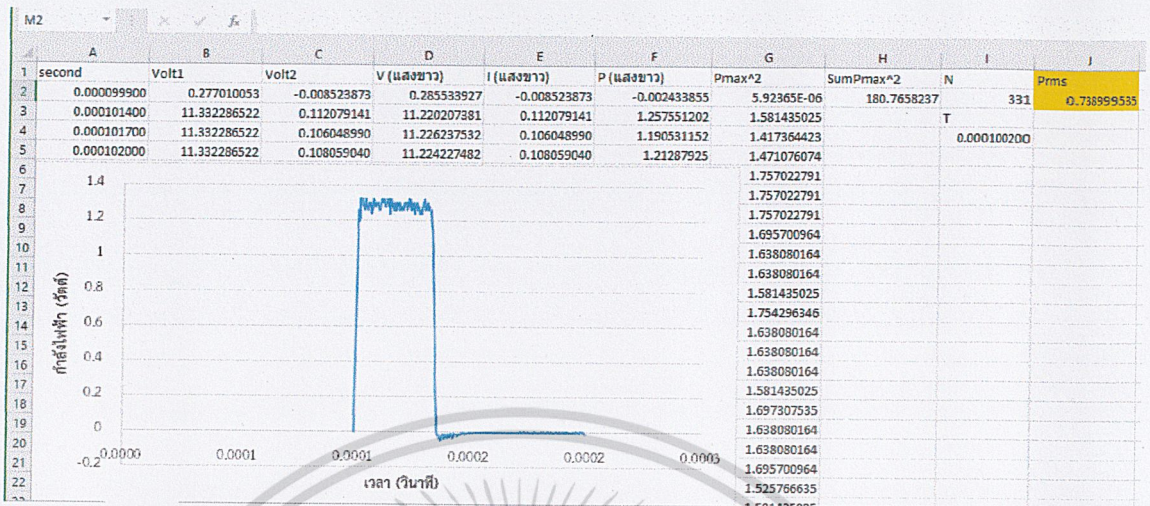


รูปที่ ก.14 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต

จากรูปที่ ก.15 ช่อง D คือความต่างศักย์ตกคร่อมหลอดไดโอดเปล่งแสงเกิดจากช่อง B - ช่อง C ช่อง E คือ การแสไฟฟ้าที่หลอดไดโอดเปล่งแสงใช้ในการทำงาน เกิดจากช่อง B \times 1 (1 คือค่าตัวต้านทาน) ช่อง F คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของแสงขาว ช่อง G คือ กำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง H คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง I คือจำนวนข้อมูลของกำลังไฟฟ้า 1 คาบเวลา ช่อง J คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ใน 1 คาบเวลา (การใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจาก เป็นวัดค่าปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา) จึงสามารถหาพลังงานได้จากสมการที่ ก.1

เนื่องจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต เป็นเวลา 150 นาที พลังงานที่ใช้จึงเท่ากับ 7.42 กิโลจูล

3.4 การฉายแสงขาวความถี่ 10 กิโลเฮิร์ต



รูปที่ ก.15 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ต

จากรูปที่ ก.16 ช่อง D คือความต่างศักย์ตกคร่อมหลอดไดโอดเปล่งแสงเกิดจากช่อง B - ช่อง C ช่อง E คือ การแสไฟฟ้าที่หลอดไดโอดเปล่งแสงใช้ในการทำงาน เกิดจากช่อง B \times 1 (1 คือค่าตัวต้านทาน) ช่อง F คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของแสงขาว ช่อง G คือ กำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง H คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง I คือจำนวนข้อมูลของกำลังไฟฟ้า 1 คาบเวลา ช่อง J คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ใน 1 คาบเวลา (การใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจาก เป็นวัดค่าปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา) จึงสามารถหาพลังงานได้จากสมการที่ ก.1

เนื่องจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ต เป็นเวลา 150 นาที พลังงานที่ใช้จึงเท่ากับ 6.65 กิโลจูล

3.5 การฉายแสงขาวความถี่ 500 กิโลเฮิร์ต

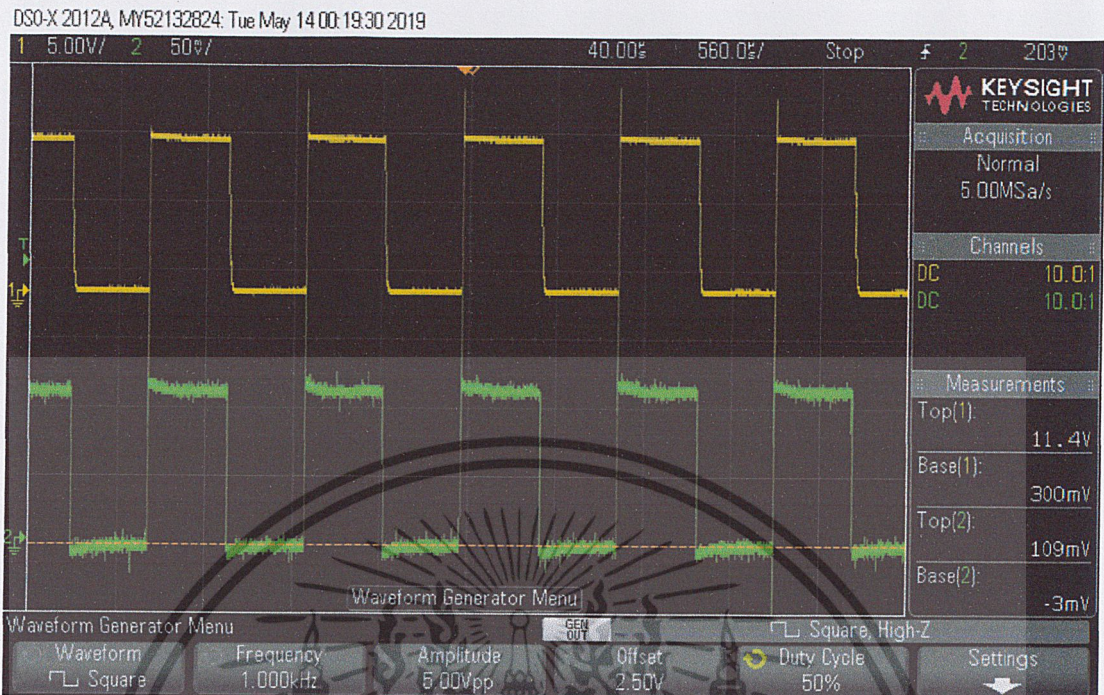


รูปที่ ก.16 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 500 กิโลเฮิร์ต

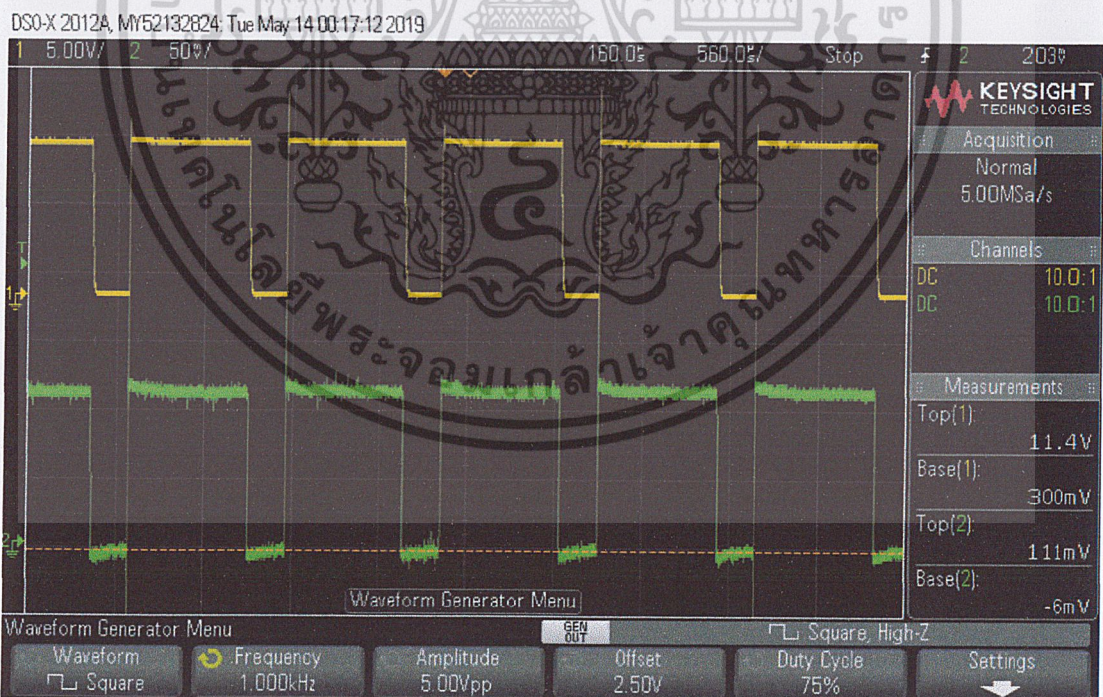
จากรูปที่ ก.17 ช่อง D คือความต่างศักย์ตกคร่อมหลอดไดโอดเปล่งแสงเกิดจากช่อง B - ช่อง C ช่อง E คือ การเสไฟฟ้าที่หลอดไดโอดเปล่งแสงใช้ในการทำงาน เกิดจากช่อง B \times 1 (1 คือค่าตัวต้านทาน) ช่อง F คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของแสงขาว ช่อง G คือ กำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง H คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้ายกกำลังสอง ช่อง I คือจำนวนข้อมูลของกำลังไฟฟ้า 1 คาบเวลา ช่อง J คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ใน 1 คาบเวลา (การใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองเนื่องจาก เป็นวัดค่าปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา) จึงสามารถหาพลังงานได้จากสมการที่ ก.1

เนื่องจากการฉายแสงขาวแบบ Duty cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 500 กิโลเฮิร์ต เป็นเวลา 150 นาที พลังงานที่ใช้จึงเท่ากับ 5.56 กิโลจูล

รูปแสดงความต่างศักย์จากแอสซิโลสโคปของ Duty cycle ต่างๆ และความถี่ต่างๆ



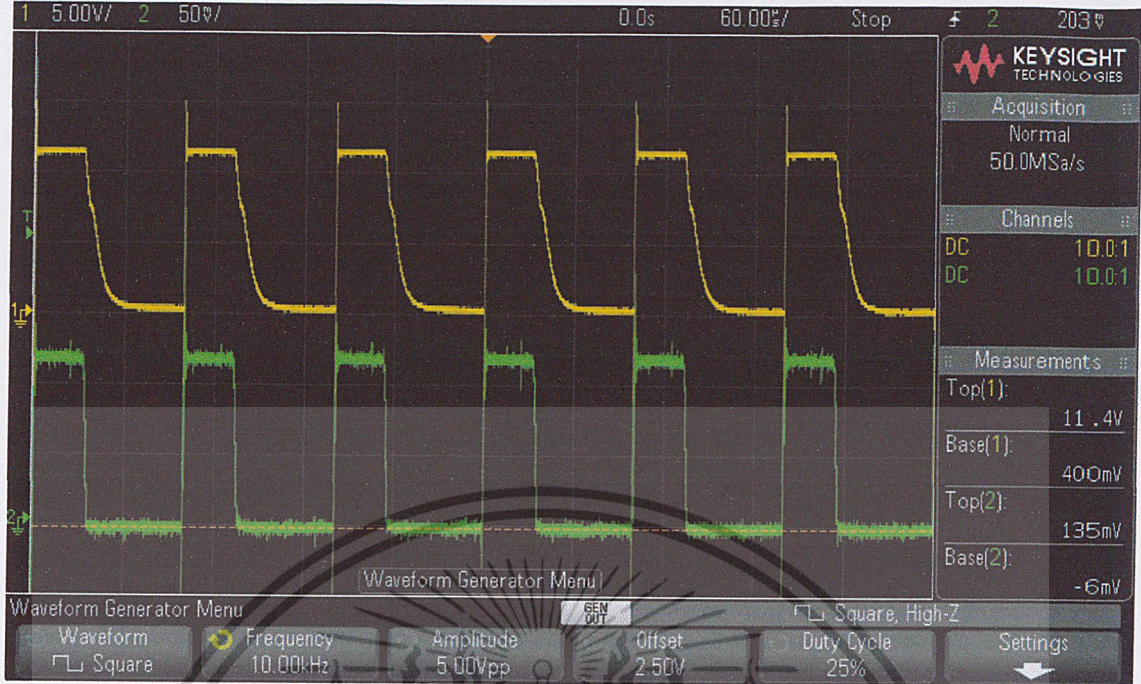
รูปที่ ก.17 แสดงสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสง (เหลือง) และสัญญาณขาออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง (เขียว) ที่ Duty Cycle 50 เปอร์เซ็นต์ ความถี่คงที่ 1 กิโลเฮิร์ต



รูปที่ ก.18 แสดงสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสง (เหลือง) และสัญญาณขาออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง (เขียว) ที่ Duty Cycle 75 เปอร์เซ็นต์ ความถี่คงที่ 1 กิโลเฮิร์ต

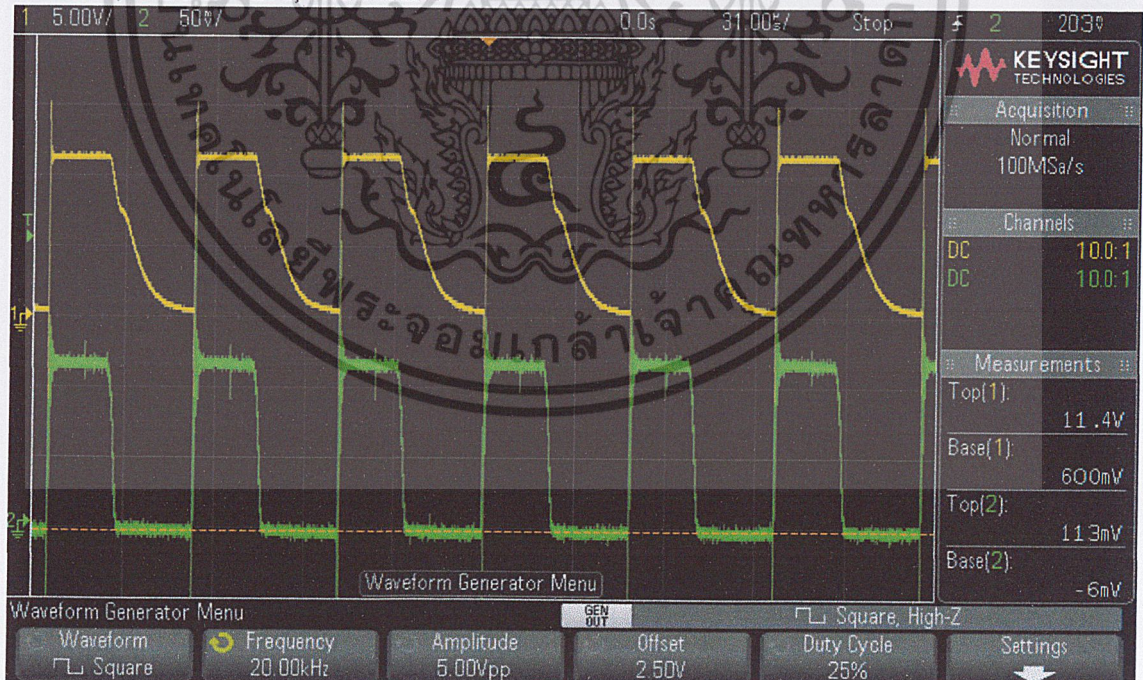
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DSO-X 2012A, MY52132824, Tue May 14 00:05:27 2019



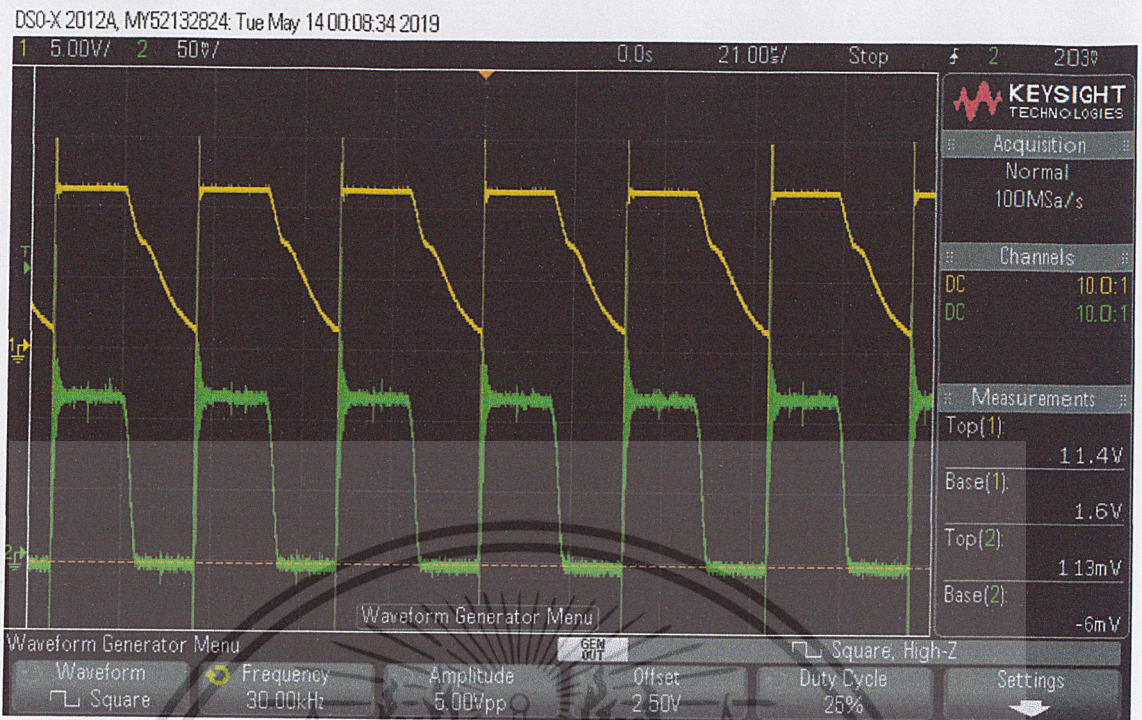
รูปที่ ก.19 แสดงสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสง (เหลือง) และสัญญาณขาออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง (เขียว) ที่ Duty Cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ต

DSO-X 2012A, MY52132824, Tue May 14 00:07:18 2019

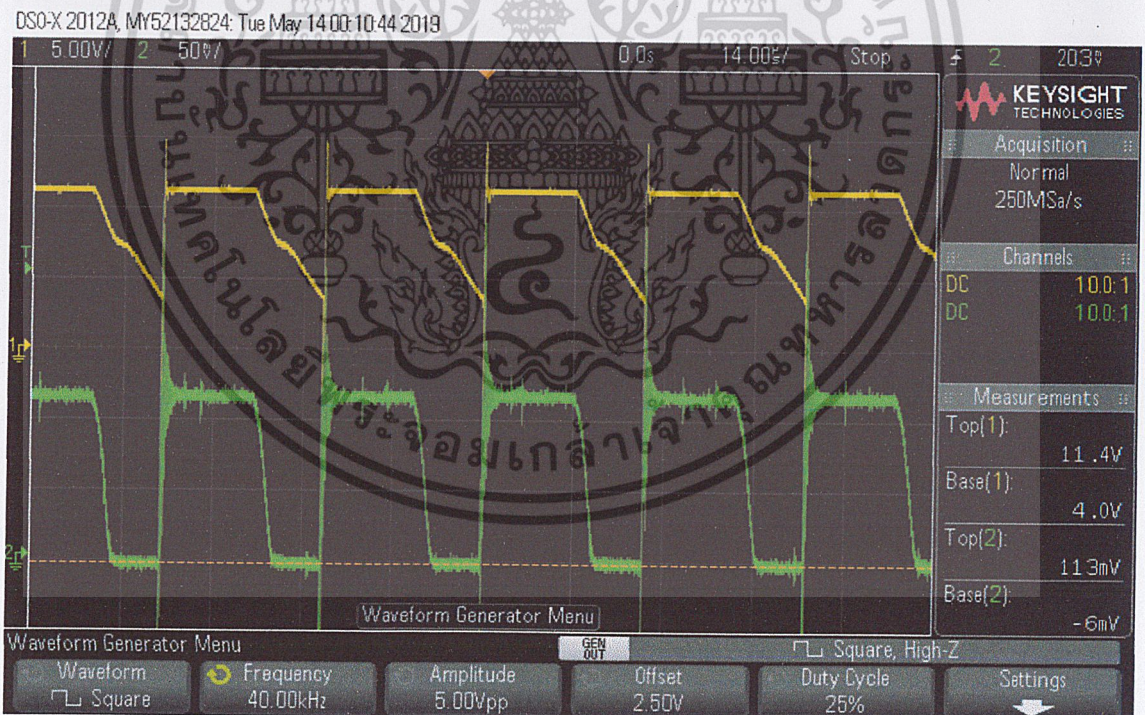


รูปที่ ก.20 แสดงสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสง (เหลือง) และสัญญาณขาออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง (เขียว) ที่ Duty Cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

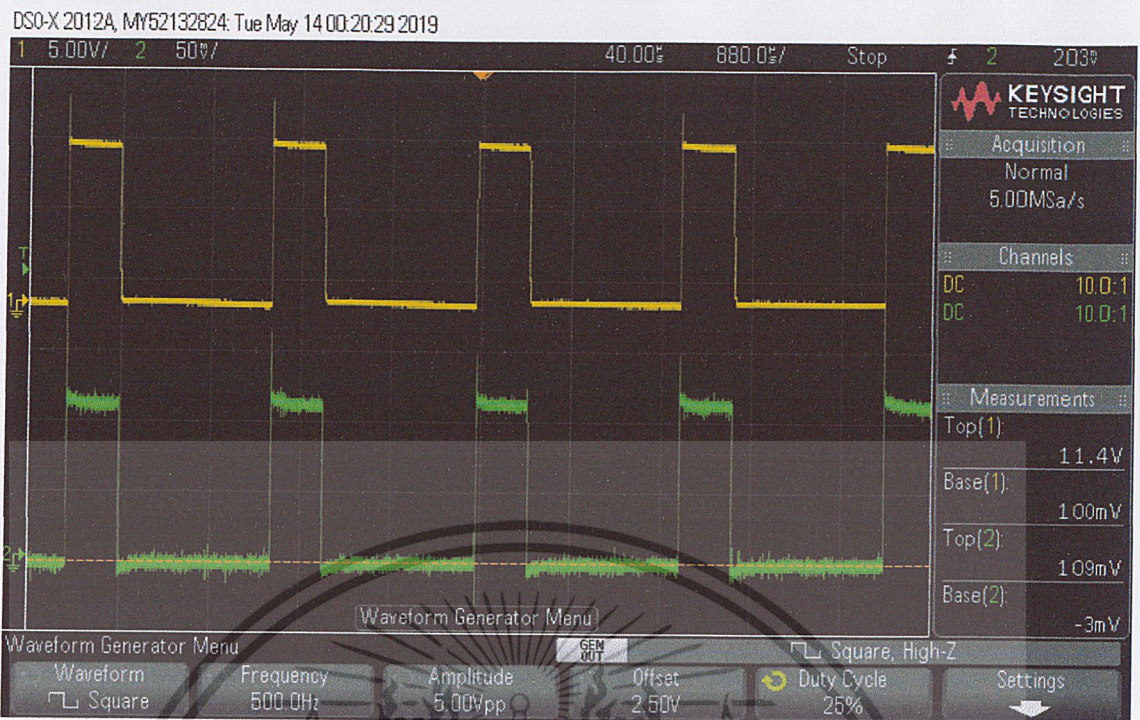


รูปที่ ก.21 แสดงสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสง (เหลือง) และสัญญาณขาออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง (เขียว) ที่ Duty Cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ต



รูปที่ ก.22 แสดงสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสง (เหลือง) และสัญญาณขาออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง (เขียว) ที่ Duty Cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

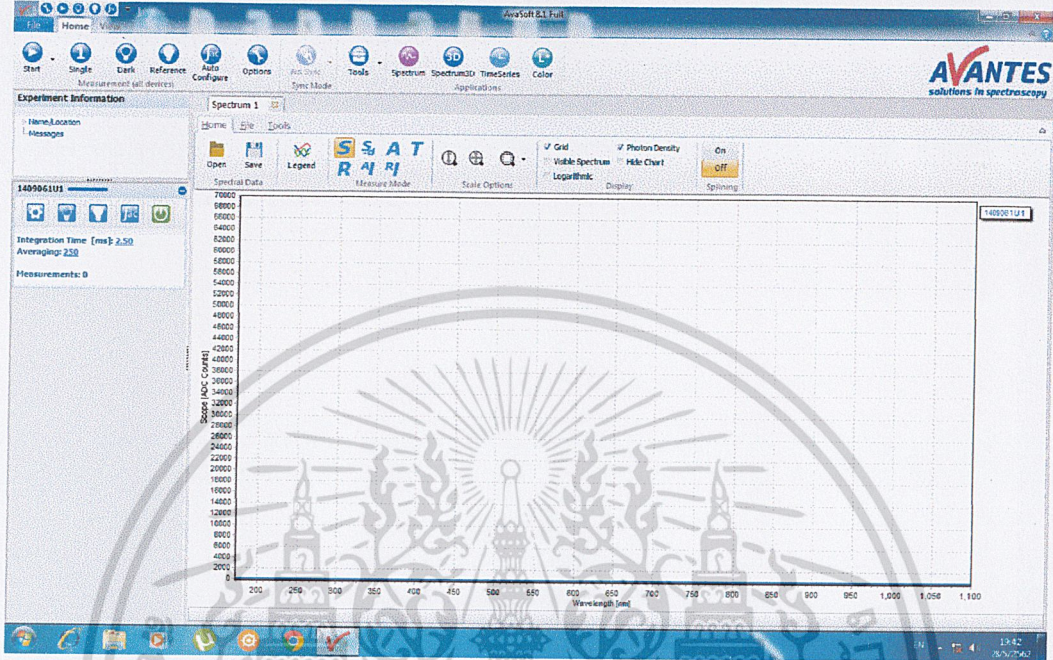


รูปที่ ก.23 แสดงสัญญาณก่อนเข้าหลอดไดโอดเปล่งแสง (เหลือง) และสัญญาณขาออกจากหลอดไดโอดเปล่งแสง (เขียว) ที่ Duty Cycle 25 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 500 เฮิร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

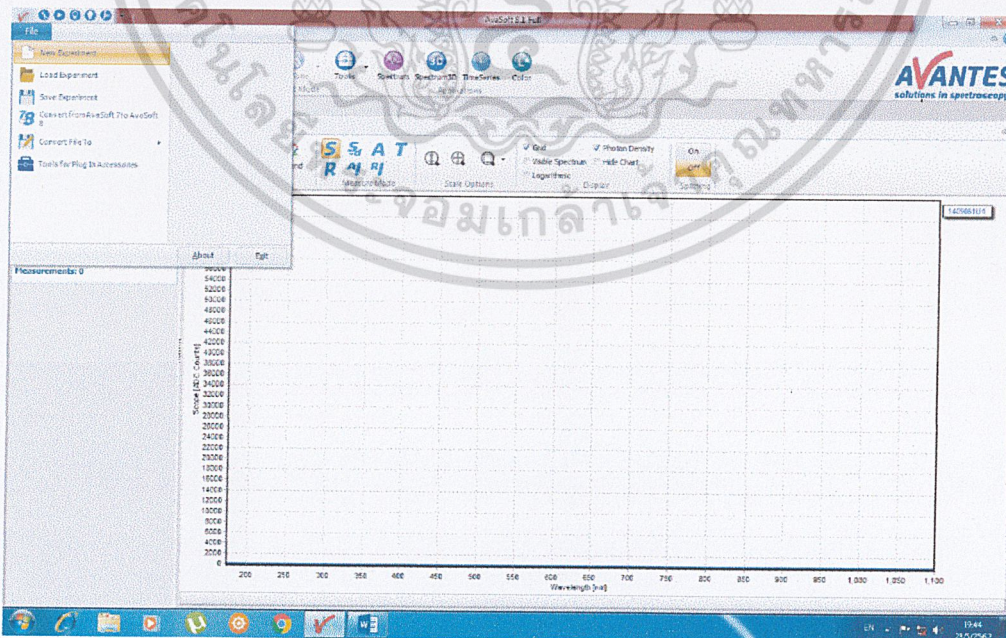
ภาคผนวก ข

การเปิดโปรแกรม Avasorf 8.1 เมื่อคลิกไปที่โปรแกรม Avasorf 8.1 แล้วจะได้หน้าโปรแกรม ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แสดงหน้าแรกของโปรแกรม Avasorf 8.1

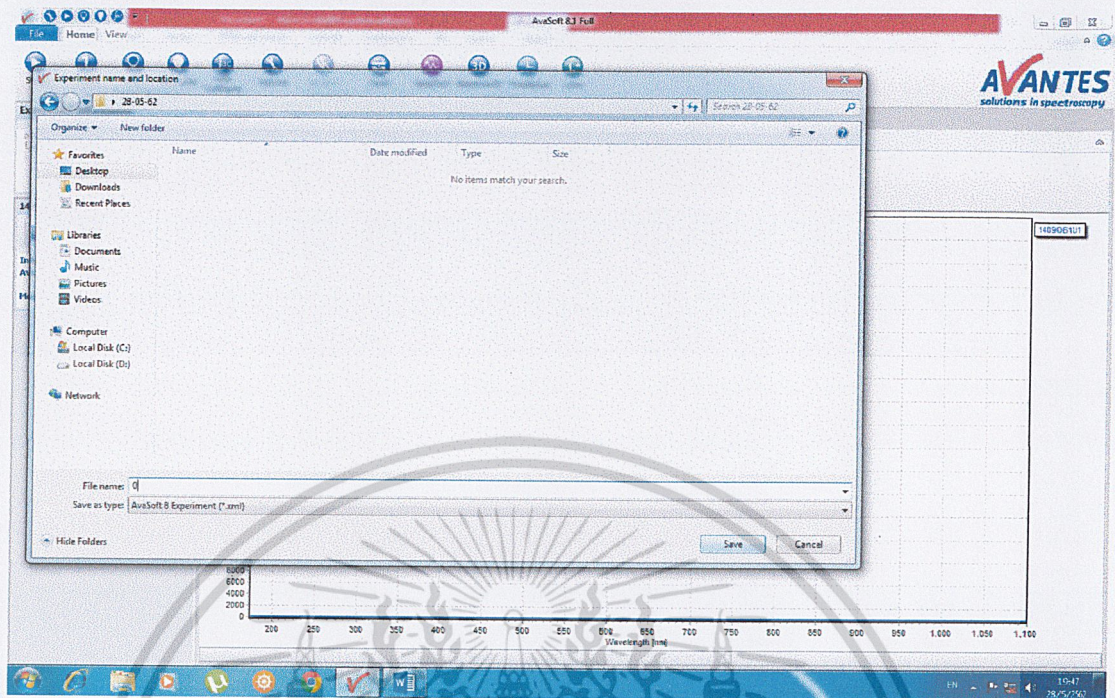
จากนั้น ขั้นตอนที่ 1 คลิกไป File จากนั้นกดไปที่ New Experiment ดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 แสดงการกด New Experiment เพื่อเริ่มการใช้โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานภายในหน่วยงานราชการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 สร้าง Folder แล้วตั้งชื่อไฟล์งานที่จะเซฟแล้วกด Save ดังรูปที่ ข.3



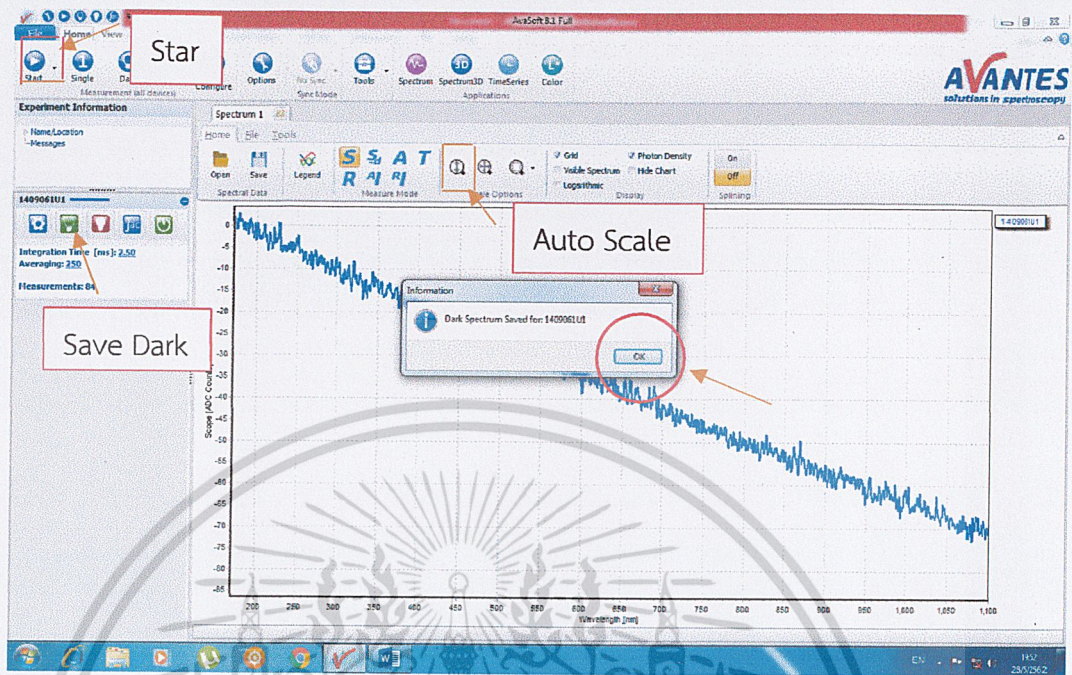
รูปที่ ข.3 แสดงการเปิด Folder

ขั้นตอนที่ 3 ในขณะที่เครื่องปิดรับแสงให้เราทำการวัด Dark ในขั้นตอนต่อมา ดังรูปที่ ข.4



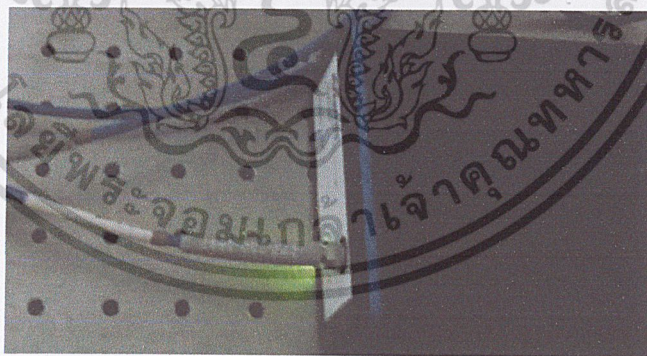
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ ข.4 แสดงการปิดกั้นแสงเพื่อวัด Dark ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4 ปิดทางเดินแสงเข้าสู่สเปกโตรเมเตอร์กด Start จากนั้นกด Save Dark แล้วกด OK ดังรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.5 แสดงการวัด Dark

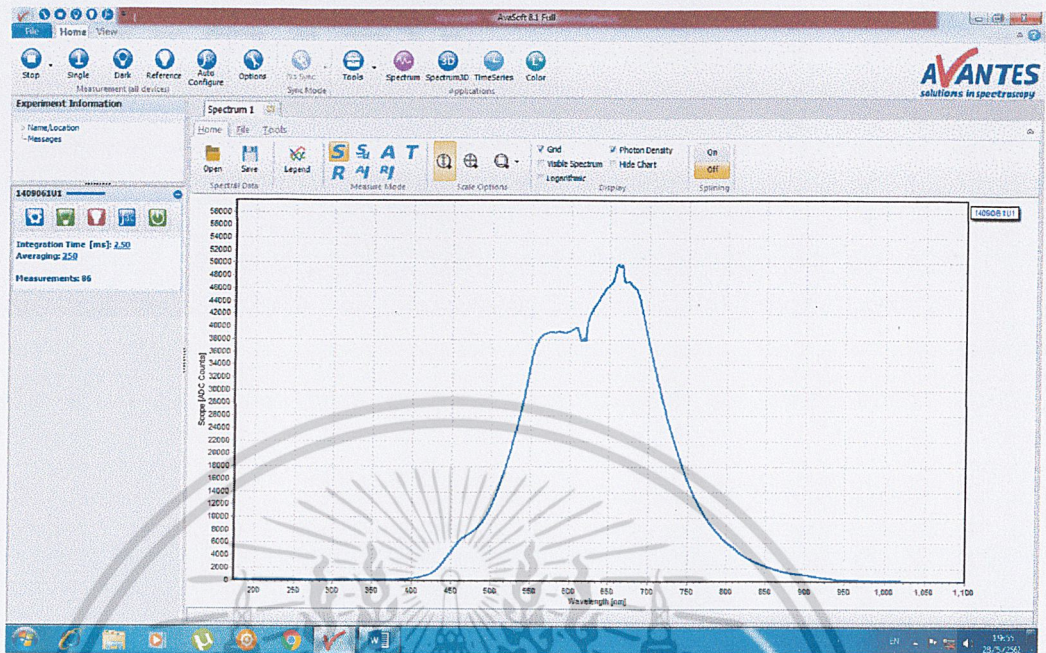
ขั้นตอนที่ 5 จากนั้นต่อสายไฟเบอร์เข้ากับรูรับแสงของเครื่องสเปกโตรเมเตอร์ ดังรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 แสดงการต่อสายไฟเบอร์

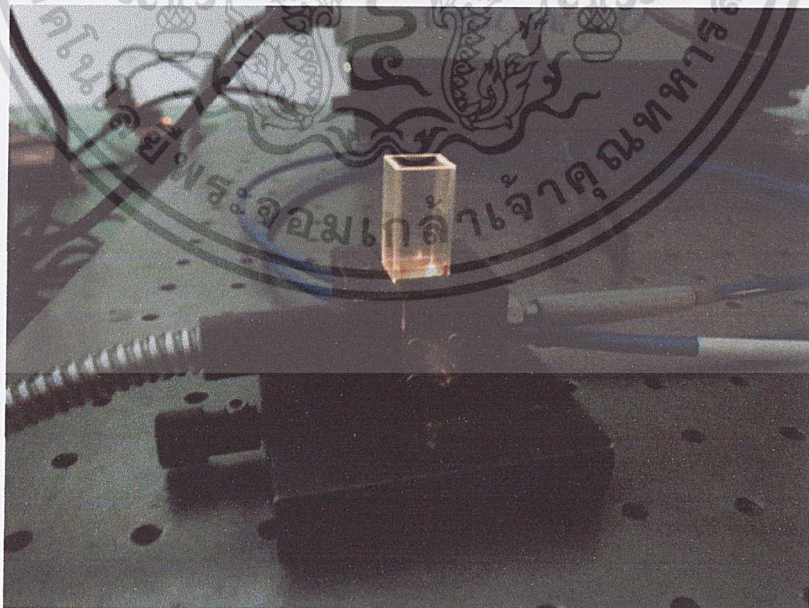
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 6 ปรับความเข้มแสงจากหลอดทั้งสตน จนได้ความเข้มแสงประมาณ 50000 counts ดังรูปที่ ข.7



รูปที่ ข.7 แสดงการปรับค่าความเข้มแสงจากหลอดทั้งสตน 50000 counts

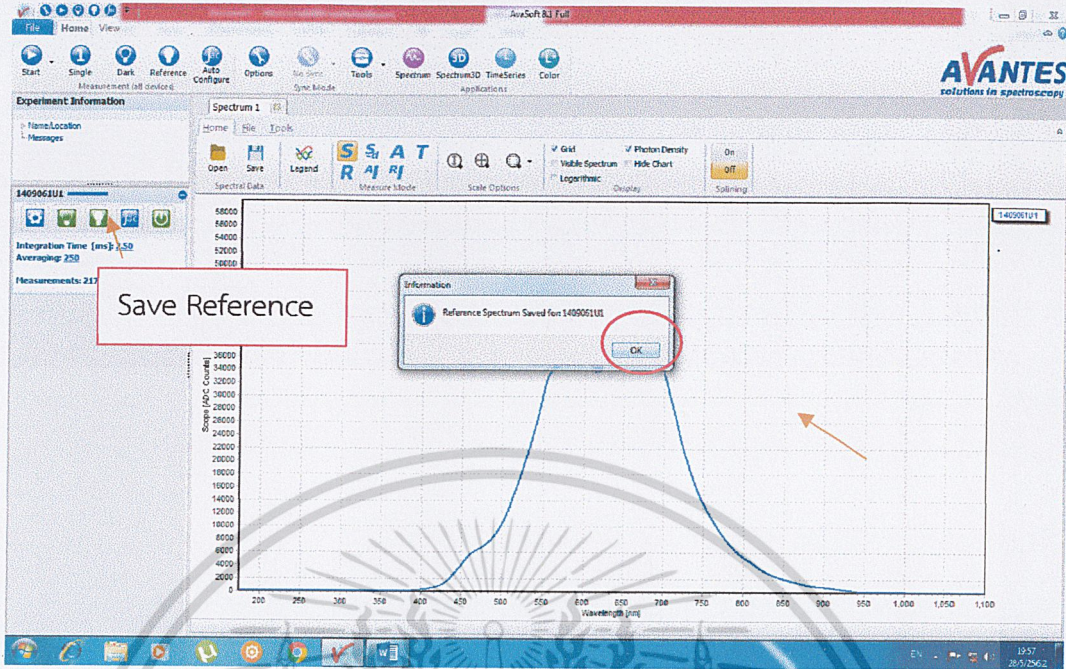
ขั้นตอนที่ 7 นำตัวอย่างที่ไม่มีสารตัวอย่างหรือน้ำบริสุทธิ์มาวางเพื่อเป็นตัว Blank เพื่อวัด White mode ดังรูปที่ ข.8



รูปที่ ข.8 แสดงการวัดสารอ้างอิงหรือน้ำบริสุทธิ์

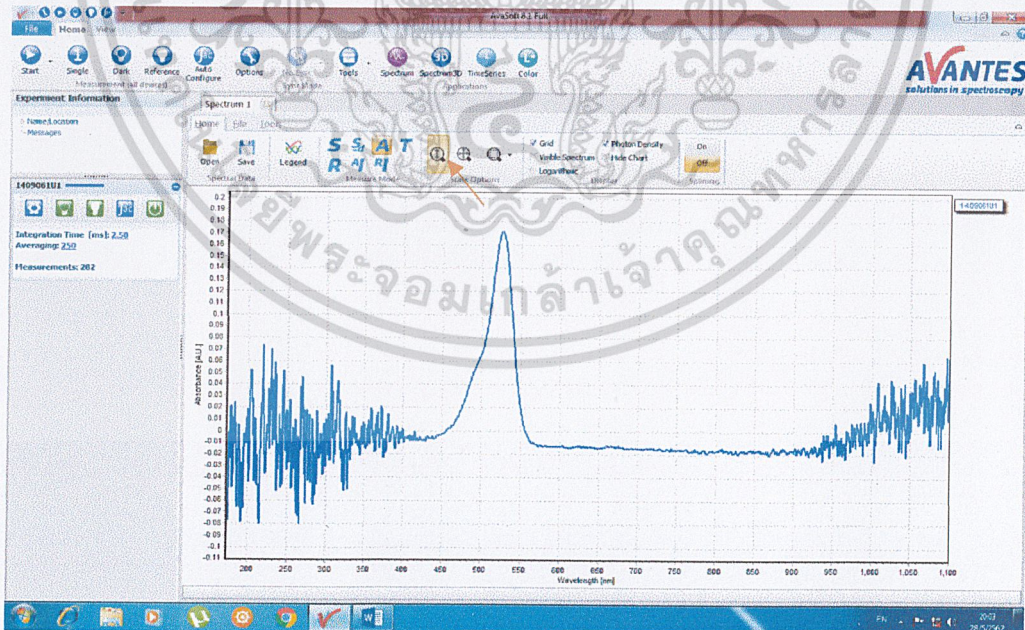
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ ข.9 แสดงการ Save Reference

ขั้นตอนที่ 10 จากนั้นนำสารละลายที่ต้องการวัดมาใส่แทนน้ำบริสุทธิ์ เปลี่ยนโหมดเป็น A แล้วทำการวัด ดังรูปที่ ข.10

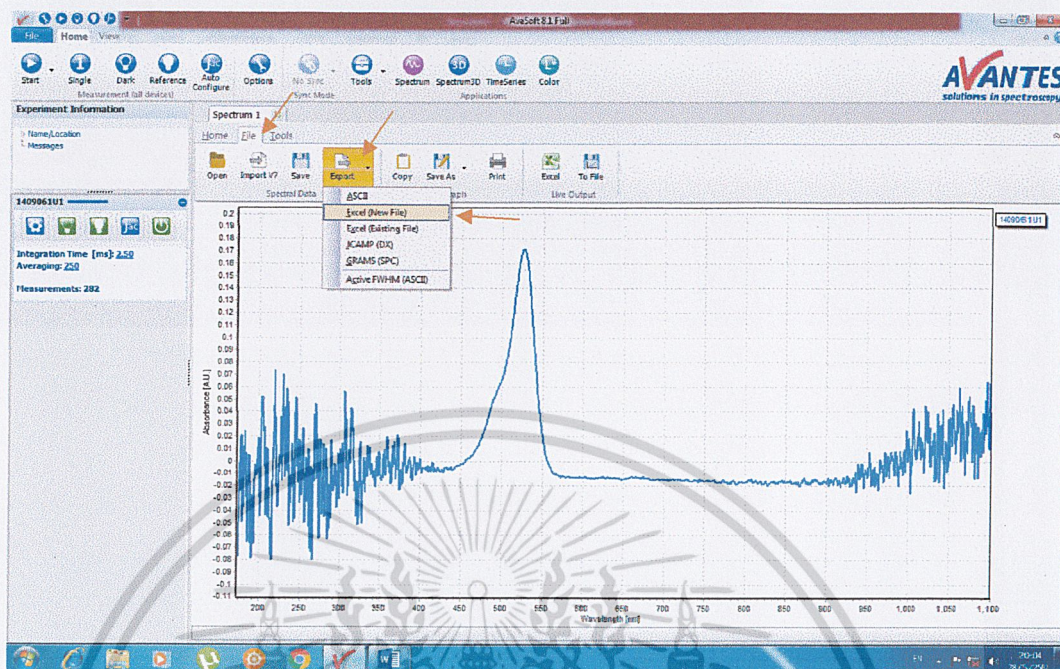


รูปที่ ข.10 แสดงการปรับโหมด A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ข.11



รูปที่ ข.11 แสดงการวัดสารตัวอย่างและ Save ไฟล์เป็น Excel

ขั้นตอนที่ 12 ทำการ Export แล้วเลือก Excel(New File) แล้วกด OK จะได้ค่าที่เป็น Excel ขึ้นมา ดังรูปที่ ข.12

Filename-->	
Mode/Lines-->	
Int.time[ms]-->	2.5
NrOfAverages-->	250
Smoothing-->	1
Wavelength [nm]	
171.405	-0.05910491
172.010	-0.077139836
174.015	-0.077971360
175.220	-0.049169673
175.825	-0.018467828
176.430	-0.001627815
177.035	-0.021144818
177.640	-0.020797759
178.245	0.018235946
178.850	0.021100492
179.454	0.010279639
180.059	-0.04208091
180.664	-0.023971471
181.269	-0.037207211
181.873	0.011788123
182.478	0.008588974
183.083	0.021941751
183.687	-0.01172057
184.292	0.007178912
184.896	-0.022846076
185.501	-0.02307596
186.105	-0.085325553
186.710	-0.030255553

รูปที่ ข.12 แสดงค่าวัดในรูป Excel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้