

การออกแบบเพื่อหาความเหมาะสมของแผ่นรวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลว

DESIGN OPTIMIZATION OF LIQUID LUMINESCENCE SOLAR
CONCENTRATORS

ตรีทเศศ ถนอมทรัพย์

THREETASES THANOMSUB

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-SC-M-030-075

การออกแบบเพื่อหาความเหมาะสมของแผ่นรวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลว

DESIGN OPTIMIZATION OF LIQUID LUMINESCENCE SOLAR
CONCENTRATORS

ตรีทเศศ ถนอมทรัพย์
THREETASES THANOMSUB

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562

KMITL-2019-SC-M-030-075

DESIGN OPTIMIZATION OF LIQUID LUMINESCENCE SOLAR
CONCENTRATORS

THREETASES THANOMSUB

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

KMITL-2019-SC-M-030-075

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบเพื่อหาความเหมาะสมของแผ่นรวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลว
ชื่อนักศึกษา	นายตรีทศศ ถนอมทรัพย์
รหัสประจำตัว	58605067
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้สืบค้นความเป็นไปได้ในการใช้วิธีการตอบสนองแบบพื้นผิว (RSM) เพื่อเป็นเครื่องมือเชิงสถิติในการออกแบบความเหมาะสมของสิ่งประดิษฐ์รวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลว (LSC) ในส่วนแรก แผ่นรวมแสงจะถูกเจือด้วยสารสีย้อมโรดามีน 6 จี (Rhodamine 6G : R6G) เพื่อศึกษาค่าความเหมาะสมของกำลังขยายทางโครงสร้างในช่วงกำลังขยาย (G) และศึกษาค่าความเข้มข้นของ R6G ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แล้วนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และในส่วนที่สอง แผ่นรวมแสงจะถูกเจือด้วยสารสีย้อมที่ถูกผสมมาจากโรดามีน 6 จี และ คูมาริน 6 (Coumarin 6: C6) โดยสารคูมาริน 6 ทำหน้าที่เป็นสารผู้ให้และโรดามีน 6 จีทำหน้าที่เป็นสารผู้รับ เพื่อหาค่าการถ่ายเทพลังงานที่มีผลมาจากความเข้มข้นของสารสีย้อม จากผลการทดลองพบว่าค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและความเข้มข้นของโรดามีน 6 จีมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นตาม ด้วยความสัมพันธ์ของกำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นมีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ โดยได้รับการยืนยันจากกราฟพื้นผิวตอบสนอง และพบว่าความแตกต่างระหว่างการทดสอบกับการคำนวณมีค่าน้อยกว่า 10% และในส่วนที่สองพบว่าค่าความเข้มข้นของโรดามีน 6 จีและคูมาริน 6 ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าการถ่ายเทพลังงานและฟลูออเรสเซนซ์ที่ได้

คำสำคัญ : การถ่ายเทพลังงาน, กำลังขยายโครงสร้าง, แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนต์และพื้นผิวตอบสนอง

Thesis Title	Design Optimization of Liquid Luminescence Solar Concentrators
Student Name	Mr.Threetases Thanomsub
Student ID	58605067
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Applied Physics
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Pattareeya Damrongsak
Thesis Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Prathan Buranasiri

Abstract

This thesis explores the possibilities of employing response surface methodology as a statistical tool for design optimization of liquid luminescence concentrator. In the first part, liquid luminescence concentrators were fabricated from Rhodamine 6G (R6G) dye. The effects of dye concentrations and geometric gain were varied in order to determine the optimal condition for current generated from solar cell and then calculate to current density. In the second part, liquid luminescent concentrators were fabricated by the combination of R6G and Coumarin 6 (C6). The C6 dye is used as a donor and R6G dye is used as an acceptor. The effects of dyes concentrations on the device performance were determined through the energy transfer factor. It was found that result of current density increase following the R6G concentration and geometric gain directly. Therefore, the relation of structural magnification and dye concentration affect to current density by Response Surface curve, and the experimental percentage error from this part between test and calculation is less than 10%. For the result of second part found, the concentrations of R6G and C6 are not related to energy transfer and fluorescence.

Keyword : Energy transfer, Gain, Luminescence concentrator and Response Surface Methodology (RSM)

กิตติกรรมประกาศ

อันดับแรก ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ภทรียา ดำรงค์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ระดับชั้นปริญญาโท และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาในระดับชั้นปริญญาตรีและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมระดับชั้นปริญญาโท ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าได้เข้ามาศึกษาต่อ ณ ที่แห่งนี้ ทั้งยังให้คำปรึกษาและให้โอกาสที่มีค่ามากมายแก่ข้าพเจ้า และขอขอบพระคุณ นายเอกชัย รัมมะรัตน์ ว่าที่ดร.จากห้องปฏิบัติการ ที่ไม่ได้เป็นแค่รุ่นพี่ที่รักและเคารพเท่านั้น ยังเป็นผู้ที่คอยช่วยเหลือ ให้แนะนำและช่วยแก้ไขปัญหามากมาย

กิตติกรรมประกาศฉบับนี้ ขอกล่าวขอบคุณไปถึง รองศาสตราจารย์ ดร. อภาภรณ์ สกฤตการเวก อาจารย์จากภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการอนุเคราะห์โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยของข้าพเจ้าและแหล่งความรู้ที่เป็นประโยชน์มากมายต่องานวิจัยฉบับนี้

นอกจากนี้ กิตติกรรมประกาศนี้ยังขอมอบให้กับคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้มากมายแก่และขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อนๆ และรุ่นน้องทุกคน สำหรับมิตรภาพที่ดีและการช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้ามอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้แก่ครอบครัวอันเป็นที่รัก ที่สนับสนุนและส่งเสริมข้าพเจ้าในทุกๆ ด้าน ขอขอบคุณที่ให้ความรัก ความเมตตา ขอขอบคุณเพื่อนๆ จากเจตโด่ทิม, เพื่อนๆ ทุกคนจาก Dice & Roll Board Game Club และเพื่อนๆ จากแก๊งค์หนูแดง ที่สร้างเสียงหัวเราะและรอยยิ้มให้แก่ข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้ามีความสุขและมีกำลังใจในการที่จะต่อสู้เพื่อฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขณะทำงานวิจัยไปได้

ตรีทศศ ถนอมทรัพย์

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	5
2.1 แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ชนิดของเหลว.....	5
2.1.1 หลักการทำงานของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์.....	5
2.1.2 ค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง.....	6
2.1.3 สารสีย้อม.....	7
2.1.4 กลไกการเรืองแสงของสารสีย้อม.....	7
2.1.4.1 กระบวนการดูดกลืนแสง.....	7
2.1.4.2 กระบวนการการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ของสารสีย้อม..	8
2.1.4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดแสงฟลูออเรสเซนซ์.....	11
2.2 Fluorescence Resonance Energy Transfer (FRET).....	13
2.3 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง.....	14
2.3.1 Central Composite Design (CCD).....	16
2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย.....	17
2.4.1 ขั้นตอนการตั้งสมมติฐาน.....	17
2.5 ทบทวนวรรณกรรม.....	20
2.5.1 การถ่ายเทพลังงาน	20
2.5.2 การใช้วิธีการพื้นที่ผิวตอบสนอง.....	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
3.1 เครื่องมือและระบบการวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	22
3.1.1 ระบบการวัดสมบัติเชิงแสงลูมิเนสเซนซ์.....	22
3.1.1.1 ระบบวัดสมบัติการดูดกลืนแสง.....	22
3.1.1.2 ระบบการวัดสมบัติการเปล่งแสงลูมิเนสเซนซ์.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 ระบบการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการปลดปล่อย แสงลูมิเนสเซนซ์ของสารละลายลูมิเนสเซนซ์.....	26
3.2 การศึกษาหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มของสารสีย้อมกับค่า กำลังขยายทางโครงสร้าง.....	26
3.2.1 การเตรียมเงื่อนไขสำหรับออกแบบการทดลอง.....	26
3.2.2 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของ สารละลายลูมิเนสเซนซ์.....	28
3.2.3 การวัดคุณสมบัติทางแสงของสารละลายลูมิเนสเซนซ์.....	30
3.2.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างกับค่า ความเข้มข้นของสารละลายเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มแสง	31
3.3 การศึกษาหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้ให้กับ ค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้รับ.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	33
4.1 ผลการทดลองจากการหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่ากำลังขยายทาง โครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสีย้อม.....	33
4.2 ผลการทดลองจากการหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มข้นของสารสี ย้อมผู้ให้และค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้รับ.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	57
5.1 บทสรุป.....	57
5.1.1 การหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่า ความเข้มข้นของสารสีย้อม เพื่อหาค่าความเข้มการเปล่งแสงและ กระแสไฟฟ้า.....	57
5.1.2 การหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้ให้ และค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้รับ เพื่อหาค่าการถ่ายเทพลังงาน..	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	61
ประวัติผู้เขียน.....	90

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของสารสีย้อม.....	1
3.1 เงื่อนไขการทดลองเพื่อหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสีย้อม.....	28
3.2 เงื่อนไขการทดลองเพื่อหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้ให้และค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้รับ.....	32
4.1 เงื่อนไขการทดลองที่ได้จากโปรแกรม Design Expert และผลการวัดค่าความเข้มการเปล่งแสงจากสเปกตรัมและกระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์.....	34
4.2 การวิเคราะห์ผลของค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของการหาค่ากระแสไฟฟ้า.....	34
4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลองซ้ำ.....	36
4.4 การวิเคราะห์ผลของค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของการหาค่าความเข้มการเปล่งแสง.....	37
4.5 ค่าความเข้มการเปล่งแสงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลองซ้ำ.....	38
4.6 การวิเคราะห์ผลของค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของการหาค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6G ผสมกับ C6.....	52
4.7 ค่าการถ่ายเทพลังงานที่เงื่อนไขในแต่ละความเข้มข้น.....	54
4.8 การวิเคราะห์ผลของค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของการหาค่าการถ่ายเทพลังงานของสารสีย้อมผู้ให้ไปยังสารสีย้อมผู้รับ.....	55

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย.....	3
2.1 ภาพแสดงการทำงานของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนต์ (LSC).....	6
2.2 การดูดกลืนแสง.....	7
2.3 แผนภาพแสดงการดูดกลืนและการปลดปล่อยพลังงานรูปแบบต่างๆ.....	8
2.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (สีเขียว) และสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนต์ (สีส้ม) ของ Rhodamine 6G.....	10
2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงลูมิเนสเซนต์กับความเข้มข้นของสารสี ย้อม.....	12
2.6 แผนภาพแสดงการเกิดปรากฏการณ์ Fluorescence Resonance Energy Transfer.....	13
2.7 แผนภาพการซ้อนทับกันของสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารผู้ให้กับสเปกตรัมการดูดกลืนของสารผู้รับ.....	14
2.8 ภาพ 3 มิติของผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว.....	16
2.9 Central Composite Design สำหรับสองตัวแปร.....	17
3.1 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนด์.....	23
3.2 แผนภาพการวัดการดูดกลืนของแสง.....	24
3.3 ระบบการวัดการดูดกลืนแสง.....	24
3.4 แผนภาพการวัดการเปล่งแสงลูมิเนสเซนต์.....	25
3.5 ระบบการวัดการเปล่งแสงลูมิเนสเซนต์.....	25
3.6 ภาวะโพรงแสง.....	26
3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงลูมิเนสเซนต์กับความเข้มข้นของสารสี ย้อม.....	27
3.8 เซลล์แสงอาทิตย์.....	28
3.9 แผนภาพการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของสารละลายลูมิเนสเซนต์.....	29
3.10 ระบบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของสารละลายลูมิเนสเซนต์.....	29
3.11 การวัดกระแสไฟฟ้า.....	29
3.12 แผนภาพการวัดค่าความเข้มแสงของสารละลายลูมิเนสเซนต์.....	30
3.13 ระบบการวัดค่าความเข้มแสงของสารละลายลูมิเนสเซนต์.....	30
3.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของ R6G กับ C6.....	31
4.1 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จริงและค่ากระแสไฟฟ้าที่ถูก คาดการณ์.....	35
4.2 กราฟพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและ ค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมและค่ากระแสไฟฟ้า.....	35
4.3 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มการเปล่งแสงที่วัดได้และค่าความ เข้มการเปล่งแสงที่คำนวณได้.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 13.	51
4.31 กราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6 ผสมกับ C6 ที่วัดได้ กับที่คำนวณได้.....	53
4.32 กราฟพื้นผิวตอบสนองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของ C6 และ ค่าความเข้มข้นของ R6G กับค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6G ผสมกับ C6....	53
4.33 กราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการถ่ายเทพลังงานที่คำนวณจากการทดลองและค่าการถ่ายเทพลังงานที่คำนวณได้จากสมการในโปรแกรม.....	55
4.34 กราฟพื้นผิวตอบสนองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของ C6 และค่าความเข้มข้นของ R6G กับค่าการถ่ายเทพลังงาน.....	56
ก.1 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-3} ถึง 9×10^{-3} โมลาร์.....	62
ก.2 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-4} ถึง 9×10^{-4} โมลาร์.....	62
ก.3 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-5} ถึง 9×10^{-5} โมลาร์.....	63
ก.4 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} ถึง 9×10^{-6} โมลาร์.....	63
ก.5 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-7} ถึง 9×10^{-7} โมลาร์.....	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การแปลงพลังงานแสงให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความสนใจและถูกศึกษามาเป็นระยะเวลายาวนานกว่า 60 ปี เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีข้อดีในหลายด้าน คือ เป็นพลังงานสะอาดที่ไม่มีวันหมด และเซลล์แสงอาทิตย์ทุกขนาดสามารถผลิตพลังงานได้ ในปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่วางจำหน่ายในท้องตลาดโดยส่วนใหญ่จะผลิตมาจากวัสดุซิลิกอน ซึ่งแผงที่มีประสิทธิภาพสูงจะใช้วัสดุซิลิกอนที่มีความเป็นผลึกสูง ส่งผลให้ราคาต้นทุนสูงตามไปด้วย ซึ่งความต้องการที่จะทำให้ราคาของเซลล์แสงอาทิตย์ถูกลงนั้นยังเป็นสิ่งที่กระตุ้นและท้าทายให้นักวิจัยหลายคนพยายามคิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยการลดปริมาณการใช้ซิลิกอนลง แนวคิดหนึ่งที่น่าสนใจถูกนำเสนอโดย Weber และ Lambe ในปี ค.ศ. 1976 คือการนำสิ่งประดิษฐ์ที่เรียกว่า แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence solar concentrator : LSC) มาช่วยในการแปลงพลังงานและเพิ่มความเข้มแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์[1] หลักการทำงานของสิ่งประดิษฐ์นี้อาศัยกลไกในการดูดกลืนและปลดปล่อยแสงโดยอาศัยโมเลกุลของวัสดุลูมิเนสเซนซ์ที่ถูกเจือภายในแผ่น ซึ่งแสงที่โมเลกุลปลดปล่อยออกมาจะถูกกักให้เดินทางอยู่ภายในแผ่นรวมแสงด้วยหลักการสะท้อนกลับภายใน (Total Internal Reflection) จนกระทั่งแสงเดินทางไปถึงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกติดอยู่กับแผ่นรวมแสงนี้

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ (LSC) ถูกสร้างจากการเจือสีย้อมที่คุณสมบัติในการเรืองแสงในแต่ละย่านความยาวคลื่นแสดงดังตารางที่ 1.1 กับวัสดุโพลีเมอร์และนำไปสร้างให้อยู่ในรูปของฟิล์มบางบนกระจกใส หรือการขึ้นรูปเป็นแผ่น

ตาราง 1.1 ค่าการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของสารสีย้อม

สีย้อม	การดูดกลืน(nm)	การเปล่งแสง(nm)
R6G	536	558
RB	543	627
Coumarin6	459	500
Lumogen F orange	525	539
Perylene	437	443

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้สีย้อม Rhodamine 6G (R6G) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการผลิตแผ่นรวมแสงอย่างแพร่หลายทั้งนี้เนื่องจากสีย้อมชนิดนี้มีค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ (Fluorescent quantum yield : FQY) สูง มีความเสถียรภาพสูงและมีราคาถูก[2,3]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ (LSC) ที่ศึกษาผลกระทบของตัวแปร G และค่า C ต่อค่าประสิทธิภาพในการรวมแสง พบว่าผลการทดลองที่ภูคนำเสนอจะถูกนำเสนอโดยการกำหนดตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งให้มีค่าคงที่ในการทดลองและเปลี่ยนแปลงตัวแปรอีกตัวหนึ่ง เพื่อลดลดระยะเวลาและความผิดพลาดจากการเดาสุ่มค่าในการทดลองผู้วิจัยจึงเลือกวิธีวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Design, RSM) ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central composite design, CCD) มาช่วยในการออกแบบเงื่อนไขของการทดลอง ซึ่งผลจากการทดลองนี้จะสามารถนำไปสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นที่มีมากกว่า 1 ตัวแปรที่ส่งผลต่อตัวแปรตามที่เราสนใจได้ ทำให้ลดข้อผิดพลาดจากการเดาสุ่มเงื่อนไขในการทดลองที่นิยมใช้กันในวิธีดั้งเดิมและลดเวลาของการทดลองได้ และนอกจากนี้ในงานวิจัยยังศึกษาถึงความเหมาะสมของสารสีย้อมสองตัวที่จะถูกผสมรวมกันเพื่อศึกษาหาค่าการถ่ายเทพลังงาน (Energy Transfer) โดยมีสารสีย้อมที่จะทำหน้าที่เป็นผู้ส่งถ่ายพลังงานคือ Coumarin6 (C6) และสารสีย้อมที่จะเป็นฝ่ายรับพลังงานคือ R6G

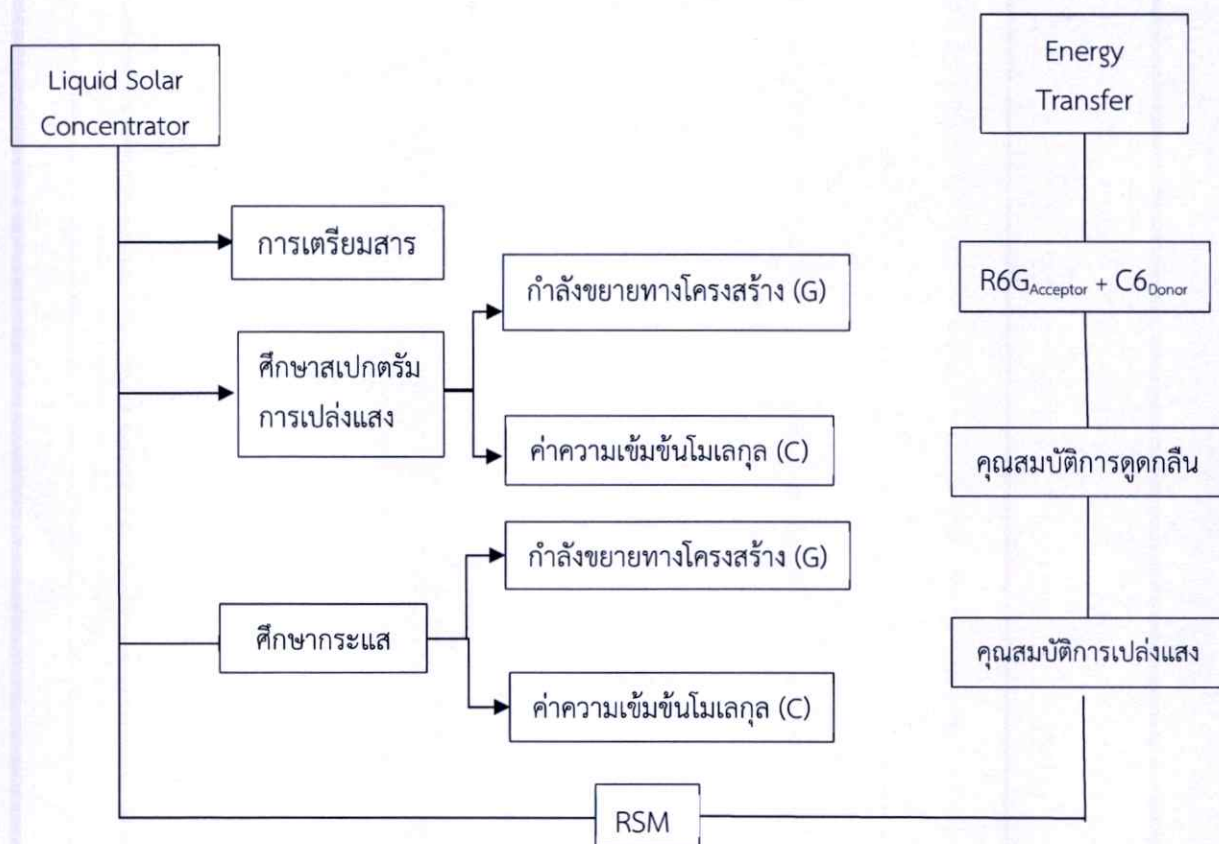
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขการจัดเตรียม LSC ที่มีค่า G และ C ที่เหมาะสม โดยการใช้โปรแกรมทางสถิติเพื่อช่วยในการออกแบบเงื่อนไขการทดลอง
2. หาสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพของ LSC จากค่า G และ C
3. เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขการจัดเตรียมสารสีย้อมแบบผสม 2 ชนิด ตามความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยการใช้โปรแกรมทางสถิติเพื่อช่วยในการออกแบบเงื่อนไขการทดลอง
4. เพื่อศึกษาความสามารถในการถ่ายเทพลังงานของสารสีย้อม C6 ไปยัง R6G

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาค่าการเรืองแสงของสารสีย้อมที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ
2. ศึกษาหลักการการทำงานของโปรแกรมเชิงสถิติ (Design Expert)
3. สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นรวมแสงได้
4. ศึกษาความสัมพันธ์ในการถ่ายเทพลังงานของสารสีย้อมที่ผสมจากสาร 2 ชนิด

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังรูปที่ 1.1 ในส่วนแรกจะเป็นการศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขในการเตรียมแผ่นที่มีค่า G และ C ที่เหมาะสม โดยใช้สาร R6G และในส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขในการเตรียมแผ่นจากวัสดุ R6G และ C6

ขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 1 มีดังนี้

1. ออกแบบเงื่อนไขการทดลองเพื่อหาค่า G และ C เพื่อความเหมาะสม ด้วยโปรแกรม Design Expert
2. เตรียม LSC ของเหลวตามเงื่อนไขที่ออกแบบ
3. วัดสมบัติทางแสงได้แก่ สเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมการเรืองแสง
4. วัดสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์และคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแส

ขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนที่ 2 มีดังนี้

1. ออกแบบเงื่อนไขการทดลองเพื่อหา ค่า C1 และ C2 เพื่อความเหมาะสม ด้วยโปรแกรม Design Expert
2. เตรียม LSC ของเหลมตามเงื่อนไขที่ออกแบบ
3. วัดสมบัติทางแสงได้แก่ สเปกตรัมการดูดกลืนแสง สเปกตรัมการเปล่งแสง
4. คำนวณค่าการถ่ายเทพลังงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนส์โดยสิ้นเปลืองเวลา และทรัพยากรน้อยให้ที่สุด
2. สร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการถ่ายเทพลังงานของสารสีย้อม ที่สามารถเป็นได้ทั้งผู้รับและผู้ให้
3. การนำเอาองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

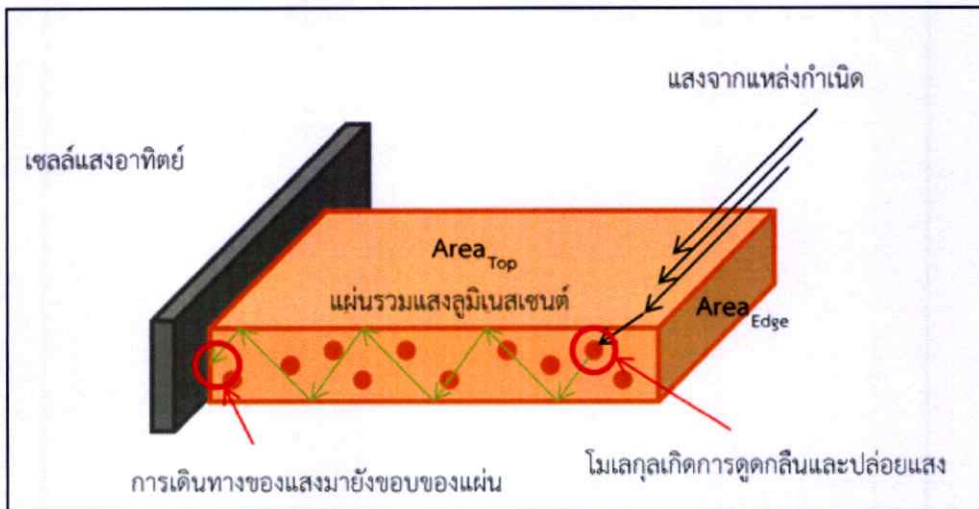
ในปัจจุบันมีสิ่งประดิษฐ์มากมายถูกวิจัยและสร้างสรรค์ออกมาเพื่อทดแทนสิ่งเก่าหรือต่อยอดสิ่งเก่าให้ดียิ่งขึ้นและสิ่งที่ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องก็คือสิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานแสงอาทิตย์ การที่เราจะสามารถนำสิ่งที่มีอยู่ในธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์แทบทุกคนคาดหวัง แต่ด้วยข้อจำกัดหลายๆอย่างทำให้แผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่สามารถไปถึงจุดที่สมบูรณ์แบบได้ จึงได้มีการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ที่ช่วยเพิ่มศักยภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านั้น นั่นก็คือ แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence solar concentrator : LSC) หน้าที่หลักของ LSC นั้นคือการแปลงพลังงานและเพิ่มค่าความเข้มแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ชนิดของเหลวในการทดลอง

2.1 แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ชนิดของเหลว

แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ (LSC) จะถูกสร้างขึ้นจากการใช้สารสีย้อมนำไปเจือลงบนตัวกลางที่มีลักษณะโปร่งแสงและมีความบางหลังจากนั้นจึงนำไปวางบนเซลล์แสงอาทิตย์ แต่แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ชนิดของเหลวจะใช้สารสีย้อมนำไปเจือลงในสารทำละลาย อาทิเช่น น้ำ เอทิลแอลกอฮอล์ เป็นต้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพแผ่นรวมแสงชนิดของเหลว ขึ้นอยู่กับสารสีย้อมที่ใช้และค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมกับค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง

2.1.1 หลักการทำงานของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์

เมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์นอกจากเกิดการสะท้อนออกไปบางส่วน ยังคงมีอีกส่วนที่ทะลุผ่านเข้าสู่แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์จากนั้นจะเกิดการดูดกลืนแสงโดยโมเลกุลของสารสีย้อมและเกิดการปลดปล่อยออกมาทุกทิศทาง จากนั้นจะเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงการทำงานของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ (LSC)

2.1.2 ค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง

ประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ (C) นั้นขึ้นอยู่กับค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง (G) และค่าประสิทธิภาพของแผ่นรวมแสง (η_{opt}) ดังสมการ (2.1)

$$C = G \cdot \eta_{opt} \quad (2.1)$$

ค่ากำลังในการรวมแสงของแผ่น (G) จะมีค่าขึ้นกับพื้นที่รับแสง ($Area_{Top}$) ของแผ่นกับพื้นที่ขอบของแผ่น ($Area_{Edge}$) ดังสมการ [4]

$$G = \frac{Area_{Top}}{Area_{Edge}} \quad (2.2)$$

ในส่วน of ค่าประสิทธิภาพของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ (η_{opt}) ขึ้นอยู่กับค่าต่างๆดังสมการ

$$\eta_{opt} = \eta_{fr} \eta_{trap} \eta_{TIR} \eta_{QY} \eta_{stokes} \eta_{abs} \eta_{host} \eta_{self} \quad (2.3)$$

เมื่อ	η_{opt}	คือ ประสิทธิภาพทางแสงของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์
	η_{fr}	คือ ประสิทธิภาพของเฟรสเนล
	η_{trap}	คือ ประสิทธิภาพของการกักแสง
	η_{TIR}	คือ ประสิทธิภาพการสะท้อนกลับภาพใน
	η_{QY}	คือ ฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์
	η_{stokes}	คือ ประสิทธิภาพการเลื่อนของสโตคส์
	η_{abs}	คือ ประสิทธิภาพการดูดกลืนแสง

η_{host} คือ ประสิทธิภาพการส่งแสงของโฮสต์
 η_{self} คือ ประสิทธิภาพการดูดกลืนซ้ำ

2.1.3 สารสีย้อม

สารสีย้อมเป็นส่วนสำคัญในการสร้างแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งจะเป็นตัวทำให้เกิดกลไกการดูดกลืนแสงและปลดปล่อยแสง หรือกล่าวได้ว่าทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นที่รับมา กลายมาเป็นความยาวคลื่นใหม่ และคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้มีดังนี้

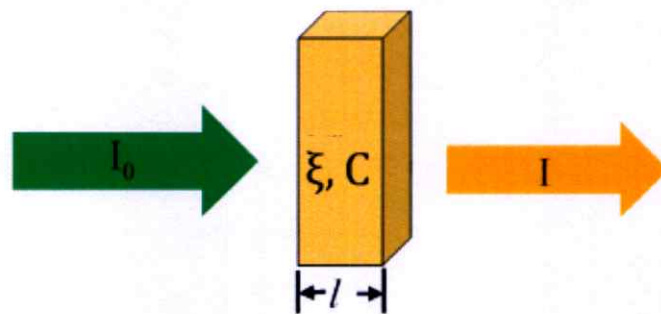
- มีความเสถียรต่อแสง
- มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูง
- มีย่านการดูดกลืนแสงที่กว้าง
- มีค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์ (Fluorescent quantum yield: FQY)¹ ที่สูง [5]
- มีสเปกตรัมการดูดกลืนที่ซ้อนทับกับสเปกตรัมการเปล่งแสงที่น้อย
- มีราคาถูก

2.1.4 กลไกการเรืองแสงของสารสีย้อม

หลักการการทำงานของสารสีย้อมเพื่อใช้ในการแปลงพลังงานมีส่วนสำคัญอยู่ 2 กระบวนการ นั่นคือกระบวนการดูดกลืนแสงและกระบวนการการปลดปล่อยแสงของสารสีย้อม

2.1.4.1 กระบวนการการดูดกลืนแสง

เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงฉายลงบนผิวแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ชนิดของเหลว จะมีแสงบางส่วนที่สองผ่านเข้าสู่ชั้นสารสีย้อม และแสงเหล่านั้นจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของสารสีย้อมในย่านความยาวคลื่นหนึ่ง โดยค่าการดูดกลืน (Absorbance: A) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ Beer-Lambert [6]



รูปที่ 2.2 การดูดกลืนแสง

¹ FQY คือค่าสัดส่วนจำนวนโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยต่อจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืน

$$A(\lambda) = \log\left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}\right) = \xi(\lambda)IC \quad (2.4)$$

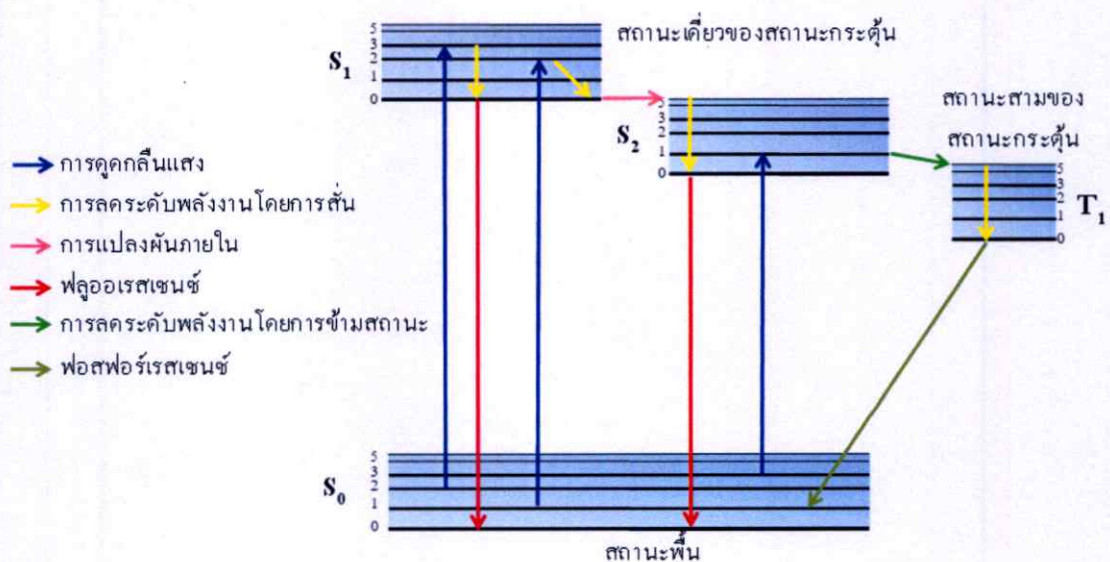
- เมื่อ ξ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสาร (ลิตร/โมล-เซนติเมตร)
 l คือ ระยะทางที่แสงเดินทางผ่าน (ความหนาของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ชนิดของเหลว)
 C คือ ความเข้มข้นของสารสีย้อม (โมลาร์)
 I_0 คือ ความเข้มแสงก่อนผ่านแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ชนิดของเหลว
 I คือ ความเข้มแสงหลังผ่านแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ชนิดของเหลว

จากความสัมพันธ์ของ Beer-Lambert สามารถหาประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง (η_{abs}) ของแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ชนิดของเหลว ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่แสงถูกดูดกลืนจากสารสีย้อมกับแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ

$$\eta_{abs} = \frac{\int_0^\infty I_0(\lambda)[1 - 10^{-A(\lambda)}]d\lambda}{\int_0^\infty I_0(\lambda)d\lambda} \times 100 \quad (2.5)$$

2.1.4.2 กระบวนการการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ของสารสีย้อม

การเกิดแสงลูมิเนสเซนซ์นั้นเกิดได้หลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับกระบวนการเปล่งแสง เช่น เปล่งแสงด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Bioluminescence) , เปล่งแสงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า (Electroluminescence) , เปล่งแสงด้วยกระบวนการทางแสง (Photoluminescence) หรือ เปล่งแสงด้วยกระบวนการทางความร้อน (Thermoluminescence) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการดูดกลืนและการปลดปล่อยพลังงานรูปแบบต่างๆ

สารสีย้อมนั้นอาศัยหลักการการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ประเภท Photoluminescence ซึ่งได้รับพลังงานมาจากแหล่งกำเนิดแสงที่ตกกระทบลงบนผิวแผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ชนิดของเหลว ทำให้เกิดการกระตุ้นโมเลกุลสารสีย้อม สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) และ ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence) โดยมีกระบวนการเกิดแสงลูมิเนสเซนซ์ดังนี้

- กระบวนการกระตุ้น (Excitation)

โมเลกุลโดยทั่วไปแล้วจะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ที่สถานะพื้นหรือสถานะพลังงานต่ำสุดและอยู่กันเป็นคู่อิทธิพลที่หมุนทิศตรงข้ามกัน หลังจากถูกกระตุ้นแล้วอิเล็กตรอนจะถูกส่งขึ้นไปยังชั้นพลังงานที่สูงขึ้น โดยการกระตุ้นนั้นจะมี 2 แบบ คือกระตุ้นไปสถานะเดี่ยวในสถานะถูกกระตุ้น (Excitation singlet state) และสถานะสามในสถานะกระตุ้น (Excitation triplet state) เมื่ออิเล็กตรอนอยู่ในสถานะกระตุ้นในช่วงเวลาหนึ่งก็จะเกิดการลดระดับพลังงานลง เรียกเหตุการณ์นี้ว่าการลดระดับพลังงาน (Deexcitation)

- กระบวนการลดระดับพลังงาน (Deexcitation)

เมื่ออิเล็กตรอนอยู่ในสถานะกระตุ้นในช่วงเวลาหนึ่งแล้วจะต้องทำการลดระดับพลังงานลง โดยสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

1. กระบวนการลดระดับพลังงานแบบไม่เกิดแสง

- การลดระดับพลังงานการสั่นของโมเลกุล (Vibrational Relaxation)

อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปสู่สถานะกระตุ้น ซึ่งจะมีระดับพลังงานการสั่นหลายค่า กระบวนการนี้ขึ้นในโมเลกุลที่อยู่ในรูปแบบของสารละลายและอิเล็กตรอนนั้นเกิดการสูญเสียพลังงานออกมาในรูปของความร้อนที่เกิดจากการสั่นและชนกับสารทำละลาย

- การแปลงผันภายใน (Internal conversion)

กระบวนการนี้จะไม่เกิดการคายพลังงานแสงหรือความร้อนออกมาแต่จะเกิดการส่งผ่านพลังงานระหว่างโมเลกุลเท่านั้น โดยโมเลกุลที่ส่งผ่านกันจะมีค่าพลังงานที่สถานะกระตุ้นต่างกันไม่มากนัก หรือมีช่วงระดับพลังงานที่ซ้อนทับกัน

- การลดระดับพลังงานข้ามสถานะ (Intersystem crossing)

กระบวนการนี้เกิดจากอิเล็กตรอนของโมเลกุลในสถานะกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนทิศทางการหมุน ซึ่งการที่อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนทิศทางการหมุนได้ก็ต่อเมื่อระดับพลังงานการสั่นของสถานะเดี่ยวและสถานะสามตรงกัน หรือส่งผ่านจะสถานะเดี่ยวที่ขึ้นต่ำสุดไปสู่สถานะสามที่มีระดับชั้นสูงกว่า

2. กระบวนการลดระดับพลังงานแบบเกิดแสง

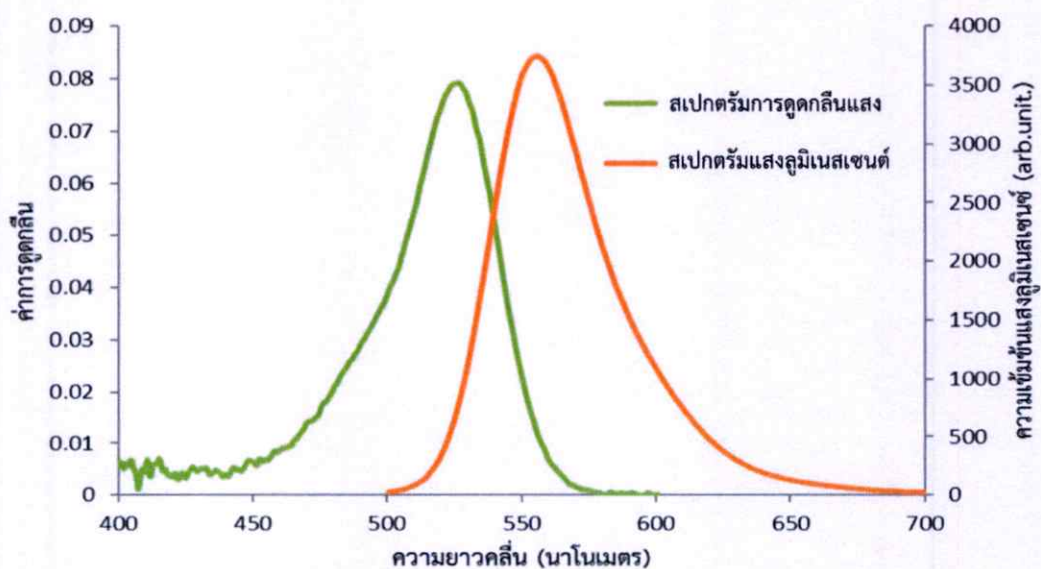
- ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence)

อิเล็กตรอนในโมเลกุลที่มีการลดระดับพลังงานจนมาอยู่ที่จุดต่ำสุดของสถานะกระตุ้น โมเลกุลนั้นอาจเลือกที่จะกลับสู่สถานะพื้นโดยคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปแบบพลังงานแสง เราจะเรียกกระบวนการนี้ว่าฟลูออเรสเซนซ์

- ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence)

การคายพลังงานของกระบวนการนี้มีความคล้ายกับกระบวนการคายพลังงานของฟลูออเรสเซนซ์เล็กน้อย เนื่องมาจากกระบวนการฟลูออเรสเซนซ์นั้นลดระดับพลังงานกลับสู่สถานะพื้นจากสถานะเดี่ยวในสถานะถูกกระตุ้น (Singlet Excited State) แต่กระบวนการคายพลังงานของฟอสฟอเรสเซนซ์นั้นลดระดับพลังงานกลับสู่สถานะพื้นจากสถานะสามในสถานะถูกกระตุ้น (Triplet Excited State)

กระบวนการการคายพลังงานที่ปลดปล่อยแสงทั้งสองชนิดนี้จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในย่านความยาวคลื่นใหม่ ที่ยาวกว่าความยาวคลื่นเดิมที่มากกระตุ้นโมเลกุล โดยมีตัวอย่างการดูดกลืนและการเปล่งแสงลูมิเนสเซนซ์ของสารสีย้อม Rhodamine 6G (R6G) ที่แสดงดังรูป 2.1 และจากรูปนี้จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมของแสงลูมิเนสเซนซ์มีการเลื่อนออกมาจากสเปกตรัมการดูดกลืน ซึ่งเหตุการณ์นี้เรียกว่า Stoke shift มีนิยามคือ ระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนซ์ในการเกิดฟอสฟอเรสเซนซ์ ระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดสองจุดของสเปกตรัมจะมีมากกว่าการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ [7]



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (สีเขียว) และสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนซ์ (สีส้ม) ของ Rhodamine 6G [8]

2.1.4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดแสงฟลูออเรสเซนซ์

- การมีสารเคมีอื่นมาเจือปน

การมีสารเคมีชนิดอื่นผสมอยู่ในสารสีย้อมนั้นหมายถึงจะมีโมเลกุลตัวอื่น ซึ่งอาจจะมียานการดูดกลืนความยาวคลื่นใกล้เคียงกับยานการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารสีย้อม ทำให้สารสีย้อมเปล่งฟลูออเรสเซนซ์ออกมาได้ไม่เต็มที่ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Inner-filter effect

- ค่าควอนตัมยิลด์ของสาร

ค่าควอนตัมยิลด์เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสารสีย้อม เนื่องจากเป็นการหาอัตราส่วนระหว่างโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากสารสีย้อมต่อจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืน ซึ่งหมายความว่า ถ้าควอนตัมยิลด์มีค่าเข้าใกล้ 1 สารสีย้อมนั้นก็จะสามารถปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ได้ดี

- อุณหภูมิภายนอกที่กระทำต่อสารทำลาย

เมื่อสารทำลายมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ทั้งๆที่อยู่ในสถานะพื้น จนสามารถมาชนกับโมเลกุลที่สถานะกระตุ้น ทำให้เกิด Internal conversion อันเป็นเหตุให้ฟลูออเรสเซนซ์ลดลง

- ปริมาณความเข้มข้นของสารสีย้อม

การเกิดแสงฟลูออเรสเซนซ์นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณโฟตอนที่ดูดกลืนได้ และยิ่งสารสีย้อมมีปริมาณโมเลกุลมากขึ้น ก็จะทำให้เกิดการกระตุ้นได้มากขึ้น ดังสมการ

$$I_F \propto (I_0 - I) \quad (2.6)$$

$$I_F = \phi_F (I_0 - I) \quad (2.7)$$

เมื่อ I_F คือความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนซ์

ϕ_F คือฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยิลด์

จากความสัมพันธ์ของ Beer - Lambert

$$I = I_0 \times 10^{-\xi lc} = I_0 \times e^{-2.303\xi lc} \quad (2.8)$$

นำสมการที่ (2.8) ไปแทนที่ (2.7)

$$I_F = \phi_F I_0 (1 - e^{-2.303\xi lc}) \quad (2.9)$$

แล้วนำไปแทนในอนุกรม

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} \quad (2.10)$$

ได้เป็น

$$I_F = \phi_F I_0 \left(1 - 1 + 2.303 \xi l c - \frac{(2.303 \xi l c)^2}{2!} + \frac{(2.303 \xi l c)^3}{3!} + \dots \right)$$

$$I_F = \phi_F I_0 \left(2.303 \xi l c - \frac{(2.303 \xi l c)^2}{2} + \frac{(2.303 \xi l c)^3}{6} + \dots \right) \quad (2.11)$$

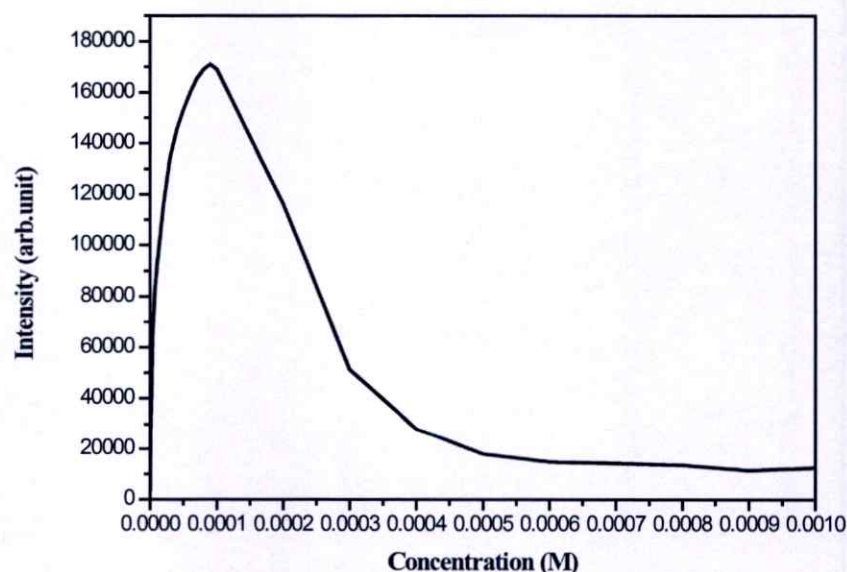
ถ้าหากสารสีย้อมมีความเข้มข้นต่ำจะส่งผลให้เทอมต่อไปของอนุกรมมีค่าน้อยลงไปด้วย จึงได้เป็นความสัมพันธ์ใหม่คือ

$$I_F = \phi_F I_0 2.303 \xi l c \quad (2.12)$$

หากเขียนในง่ายขึ้นจะได้ว่า

$$I_F = Kc \quad (2.13)$$

โดยที่ K นั้นคือค่าคงที่ $\phi_F I_0 2.303 \xi l$ และจากสมการควรส่งผลให้ค่าความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนซ์แปรผันตรงกับค่าความเข้มข้นของสารสีย้อม แต่เมื่อนำค่าความเข้มสูงสุดของแสงฟลูออเรสเซนซ์ในแต่ละความเข้มข้นของสารสีย้อม R6G มาเขียนกราฟ จะมีส่วนของที่ค่าความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนซ์นั้นลด ดังแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงลูมิเนสเซนซ์กับความเข้มข้นของสารสีย้อม

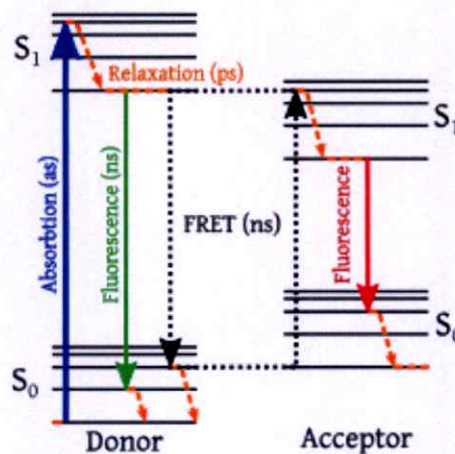
- Quenching

เป็นปรากฏการณ์การลดลงของค่าความเข้มการฟลูออเรสเซนซ์ ที่เกิดจากสารสีย้อมเอง หรือสารอื่นที่มาผสมและอาจรวมถึงสารตัวทำลายด้วย สามารถแบ่งได้ 2 กรณี

1. Self quenching เกิดจากการชนกันของโมเลกุลที่สถานะกระตุ้น จนเกิดการสูญเสียพลังงาน
2. Self absorption เกิดขึ้นจากความยาวคลื่นแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาถูกดูดกลืนกลับโดยโมเลกุลของสารสีย้อมเอง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สารสีย้อมมีความเข้มข้นที่สูงมากขึ้น

2.2 Fluorescence resonance energy transfer (FRET)

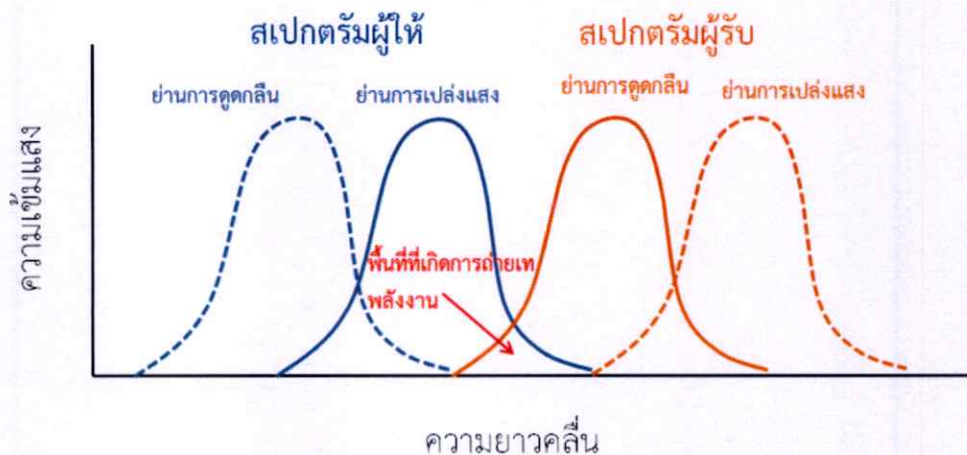
เป็นปรากฏการณ์ที่ถูกค้นพบโดย Forster ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่พลังงานฟลูออเรสเซนซ์ถูกกระตุ้นจากโมเลกุลหนึ่งแล้วถ่ายเทพลังงานไปยังโมเลกุลใกล้เคียง กล่าวคือหลังจากที่โมเลกุลตัวแรกถูกกระตุ้นแล้วทำการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์ของตัวเองออกมา หากมีโมเลกุลที่อยู่ในระยะเฉือนซึ่งคือน้อยกว่า 10 นาโนเมตร โมเลกุลตัวแรกจะกลายเป็น Donor ทำการส่งผ่านพลังงานไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งที่จะกลายเป็น Acceptor แล้วจะปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์ออกมา ดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการเกิดปรากฏการณ์ Fluorescence resonance energy transfer

โดยที่เงื่อนไขในการจะเกิดปรากฏการณ์นี้มีอยู่ 2 ข้อคือ

- ระยะห่างของโมเลกุลทั้งสองจะต้องน้อยกว่า 10 นาโนเมตร
- ย่านความยาวคลื่นสเปกตรัมแสงฟลูออเรสเซนซ์ Donor จะต้องมีส่วนซ้อนทับกับย่านความยาวคลื่นสเปกตรัมการดูดกลืนของ Acceptor ดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพการซ้อนทับกันของสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารผู้ให้ กับสเปกตรัมการดูดกลืนของสารผู้รับ

และมีความสัมพันธ์ดังสมการ 2.14

$$ET = \frac{Ab_{acceptor} (\lambda_{donor}^{excite})}{Ab_{donor} (\lambda_{donor}^{excite})} \left[\frac{Flu_{mix} (\lambda_{acceptor}^{emiss})}{Flu_{acceptor} (\lambda_{acceptor}^{emiss})} - 1 \right] \quad (2.14)$$

เมื่อ	ET	คือ ค่าการถ่ายเทพลังงาน
	$Ab_{acceptor}$	คือ ค่าการดูดกลืนของสารผู้รับ
	Ab_{donor}	คือ ค่าการดูดกลืนของสารผู้ให้
	$Flu_{acceptor}$	คือ ค่าความเข้มการเปล่งแสงของสารผู้รับ
	Flu_{mix}	คือ ค่าความเข้มการเปล่งแสงของสารผู้ให้
	λ_{donor}^{excite}	คือ ความยาวคลื่นที่สารผู้ให้ถูกกระตุ้น
	$\lambda_{acceptor}^{emiss}$	คือ ความยาวคลื่นที่สารผู้รับปลดปล่อยแสง

2.3 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง(Response Surface Methodology : RSM) เป็นวิธีที่รวมหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติมาประยุกต์ใช้เข้าด้วยกัน เพื่อนำมาสร้างแบบแผนวิธีการ รวมถึงการวิเคราะห์ปัญหาในกรณีที่ผลตอบสนองมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระเพื่อหาผลตอบสนองที่มีค่าที่ดีที่สุด จึงได้เรียกหลักการออกแบบการทดลองลักษณะนี้ว่า การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design: RSD) [8,9]

ทั้งนี้การออกแบบวิธีการทดลองก็ยังมีด้วยกันหลากหลายวิธีได้แก่ Factorial Design, Mixture Design, Central Composite Design และ Plackett & Burman Design โดยที่ระดับของตัวแปรอิสระนั้นต้องผันแปรและครอบคลุมขอบเขตที่จะศึกษา จากนั้นจึงนำข้อมูลของตัวแปร

อิสระแต่ละตัว มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม แล้วจึงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบต่าง แล้วนำเอาแบบจำลองเหล่านั้นมาสร้างเป็นภาพสามมิติ หรือที่เรียกกันว่าพื้นผิวผลตอบแทน ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสามารถอธิบายได้โดย ดังสมการถดถอยนี้ (2.15)

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.15)$$

$$E(y) = f(x_1, x_2) = \eta \quad (2.16)$$

โดยที่ ε คือ ตัวแทนของสิ่งทีอาจจะรบกวนต่อผลการทดลองหรือข้อผิดพลาดที่อาจเกิดจากการทดลอง
 y คือ พื้นผิวตอบสนอง

ปัญหาของวิธีการพื้นผิวตอบสนองส่วนมากเกิดจากความไม่รู้ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่เราศึกษากับตัวแปรอิสระเพราะฉะนั้นเราจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองก่อนว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ หากสิ่งที่เราศึกษาและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์ต่อกันไม่ว่าจะเป็นในเชิงใดก็ตาม จะทำให้ได้รูปแบบสมการออกมาตามความสัมพันธ์นั้นๆ เช่น

รูปแบบสมการเชิงเส้น (Linear model)

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i \quad (2.17)$$

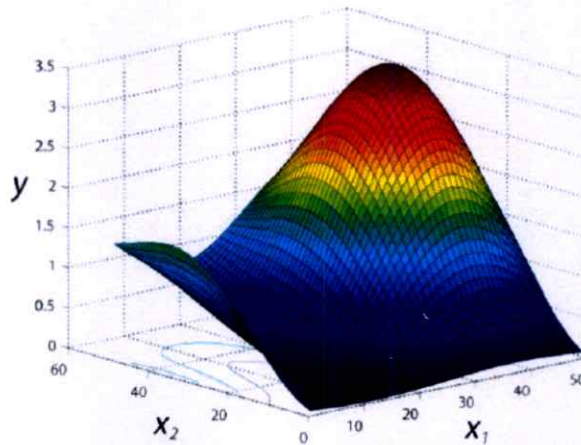
รูปแบบสมการที่มี 2 ปัจจัยร่วมกัน (two-factor interaction)

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^p \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.18)$$

รูปแบบสมการกำลังสอง (quadratic model)

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^p \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^p \beta_{ii} x_i^2 \quad (2.19)$$

เมื่อ $E(y)$ คือค่าคาดการณ์, β_0 คือค่าคงที่ตัวแปรเชิงเส้น, β_{ii} คือค่าคงที่ Quadratic, β_{ji} คือค่าคงที่ Interaction, x_i และ x_j คือตัวแปรอิสระ



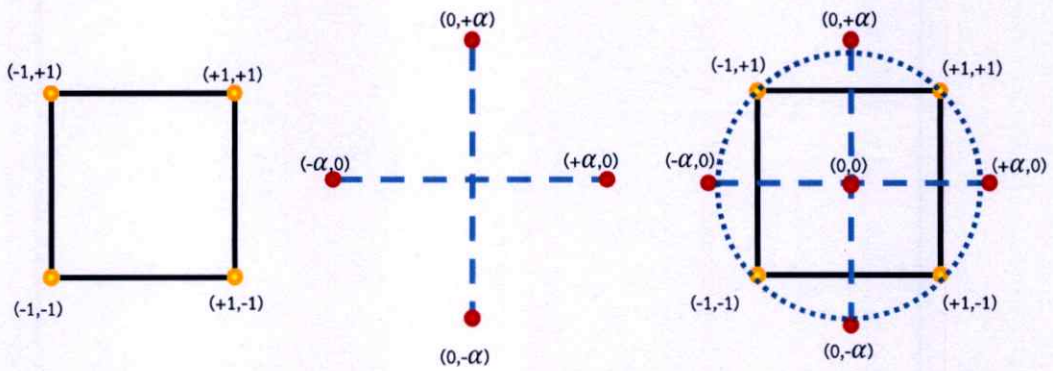
รูปที่ 2.8 ภาพ 3 มิติของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว

2.3.1 Central Composite Design (CCD)

การออกแบบพื้นผิวดตอบสนองมีวิธีการนำมาใช้หลายวิธี ทั้งวิธีกำลังสองน้อยที่สุด(Least square), การออกแบบแบบจำลองลำดับที่หนึ่ง (First-order model) หรือการออกแบบแบบจำลองอันดับที่สอง (Second-order model) ซึ่งการออกแบบแบบจำลองอันดับสองเน้นไปที่การสร้างแบบจำลอง Quadratic ของผลตอบสนอง โดยมีวิธีการ 2 วิธีการคือ (Central Composite Design : CCD) และ Box-Behnken Design โดยที่ในงานวิจัยนี้เราได้เลือกใช้วิธีการ CCD มาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [10,11]

วิธีการ Central Composite Design หรือมีอีกชื่อเรียกหนึ่งคือ Box-Wilson Design เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติโดยที่ไม่สิ้นเปลืองทรัพยากรมากเกินไป [12] การออกแบบการทดลองที่มี 3 ระดับ นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ $-1, 0, +1$ หรือกล่าวคือ เป็นการออกแบบให้ข้อมูลครอบคลุมทั้งหมด โดยจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนคือ

1. ตำแหน่งการทดลองของ 2^n Factorial Design โดย n คือจำนวนตัวแปรอิสระ จะได้รูปแบบออกมาเป็น Factorial point ซึ่งค่า -1 และ $+1$ หมายถึงขอบเขตต่ำสุดและขอบเขตสูงสุดของตัวแปรอิสระ ตามลำดับ
2. ตำแหน่งการทดลอง Axis point เป็นการปรับค่าตัวแปรหนึ่ง และ Fix ค่าอีกตัวแปรหนึ่งไว้ ซึ่งค่า 0 หมายถึงค่ากึ่งกลางของขอบเขตตัวแปรอิสระและ $-\alpha$ กับ $+\alpha$ หมายถึง ค่าที่อยู่ต่ำกว่าขอบเขตต่ำสุดและค่าที่อยู่สูงกว่าขอบเขตสูงสุดของตัวแปรอิสระตามลำดับ
3. ตำแหน่งกึ่งกลางของขอบเขตตัวแปรอิสระทั้งหมด พร้อมทั้งทำซ้ำอีก 4 ครั้ง



รูปที่ 2.9 Central Composite Design สำหรับสองตัวแปร

2.4. การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย ประกอบด้วยการใช้สถิติ 2 องค์ประกอบใหญ่ ๆ ได้แก่ สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) โดยค่าสถิติต่างๆที่คำนวณได้จากข้อมูลตัวอย่างที่ศึกษา และสถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) โดยนำเสนอในลักษณะของช่วงเชื่อมั่น : Confidence Interval ; CI เป็นค่าการประมาณช่วงเชื่อมั่นของค่าพารามิเตอร์จากค่าสถิติที่ได้จากข้อมูลตัวอย่างที่ศึกษา และค่า p-value ที่เป็นผลจากการทดสอบสมมติฐานเพื่ออธิบายหรือสรุปลักษณะของประชากร โดยอาศัยค่าสถิติที่ได้จากข้อมูลตัวอย่าง สรุปว่ามีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ) ในงานวิจัยควรมีครบทั้งสถิติเชิงพรรณนาและช่วงเชื่อมั่น ส่วน ค่า p-value จะมีเฉพาะงานวิจัยที่มีการทดสอบสมมติฐานเท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้เรามุ่งเน้นไปที่การทดสอบสมมติฐานทำให้เราสนใจค่า p-value เป็นหลัก

2.4.1 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

2.4.1.1 การตั้งสมมติฐานในการทดสอบ

สมมติฐาน (Hypothesis) คือ ข้อสมมติเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานทางสถิติจะเริ่มต้นโดยการน าสมมติฐานของการวิจัย (Research Hypothesis) มากำหนดเป็นสมมติฐานทางสถิติ(Statistical Hypothesis)

1. สมมติฐานของการวิจัย (Research Hypothesis)

สมมติฐานของการวิจัย คือ คำตอบที่ผู้วิจัยสงสัยและคาดคะเนไว้ล่วงหน้าอย่างมีเหตุผลโดยเขียนเป็นประโยคข้อความที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรเป็นข้อความที่สามารถทดสอบได้

2. สมมติฐานทางสถิติ (Statistical Hypothesis)

เป็นสมมติฐานที่กล่าวถึงลักษณะที่สนใจในประชากรอาจเขียนในรูปแบบของข้อความหรือในรูปแบบของสัญลักษณ์ของค่าพารามิเตอร์สมมติฐานทางสถิติแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1) สมมติฐานของการทดสอบ (Null Hypothesis : H_0)

สมมติฐานของการทดสอบหรือสมมติฐานกลางหรือสมมติฐานว่างหรือสมมติฐานหลัก เป็นสมมติฐานที่ตั้งว่า "ไม่มีความแตกต่าง (No Difference)" หรือ "ไม่มีความสัมพันธ์ (No Association)" ของลักษณะที่สนใจในประชากร เป็นสมมติฐานของความไม่แตกต่าง หรือ สมมติฐานของความเท่ากับ ตั้งให้เป็นกลางไว้ก่อน

2) สมมติฐานทางเลือก (Alternative Hypothesis : H_A)

สมมติฐานทางเลือกหรือสมมติฐานรอง เป็นสมมติฐานที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้สรุปเมื่อผลการทดสอบพบว่าปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ซึ่งจะตั้งให้สอดคล้องกับสมมติฐานของการวิจัย ซึ่งตั้งได้ 2 แบบ คือ สมมติฐานทางเลือกแบบทางเดียว (One Tail Alternative Hypothesis) เป็นสมมติฐานที่ตั้งในลักษณะความมากกว่าหรือน้อยกว่าในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น และ สมมติฐานทางเลือกแบบสองทาง (Two - Tail Alternative Hypothesis) เป็นสมมติฐานที่ตั้งในลักษณะความแตกต่างกัน โดยไม่คำนึงว่าจะต้องอยู่ในทิศทางใด

3) การกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ(ความผิดพลาดของการทดสอบ Alpha : α)

เกณฑ์ที่ใช้ตัดสินใจว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐาน H_0 คือ ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (Significance Level) นิยมเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ α (Alpha) คือ ความน่าจะเป็นสูงสุดของการปฏิเสธสมมติฐาน H_0 เมื่อ H_0 เป็นจริงซึ่งผู้วิจัยยอมให้เกิดขึ้นได้ การกำหนดค่า α ไม่มีเกณฑ์มาตรฐานใด ๆ ระบุว่าต้องมีค่าเท่าใด ผู้วิจัยเป็นผู้กำหนดเองว่าต้องการให้มีโอกาสหรือความน่าจะเป็น ในการตัดสินใจหรือสรุปผิดพลาดมากน้อยแค่ไหน โดยทั่ว ๆ ไปนิยมกำหนดไว้ให้เท่ากับ 0.05 หรือ 0.01 ถ้ากำหนดให้ $\alpha = 0.05$ จะมีความหมายว่า โอกาสที่จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ H_0 เป็นจริงมีได้ไม่เกิน 5 ครั้ง ใน 100 ครั้ง

ความผิดพลาดในการตัดสินใจในการทดสอบสมมติฐาน ผลลัพธ์ที่ได้จากการตัดสินใจ ไม่ว่าจะพบว่า มีนัยสำคัญทางสถิติ (ปฏิเสธ สมมติฐาน H_0) หรือไม่พบนัยสำคัญทางสถิติ (ยอมรับสมมติฐาน H_0) ย่อมมีโอกาสเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ เสมอเนื่องจาก สมมติฐาน H_0 ที่กำหนดขึ้นอาจเป็นจริงหรือไม่จริง ความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานและสถานการณ์จริง ของสมมติฐาน H_0 ซึ่งในการตัดสินใจไม่ว่าจะยอมรับที่ปฏิเสธ สมมติฐาน H_0 ก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น ซึ่งความผิดพลาดจะมี 2 ชนิด คือ Type I Error (α Error) และ Type II Error (β Error)

ความผิดพลาดในการตัดสินใจ ประกอบด้วย 2 แบบ

1.) Type I error : α -error : ความผิดพลาดในการปฏิเสธ H_0 ที่เป็นจริง โดย ตัดสินใจสรุปว่า แตกต่าง ในสถานการณ์จริงไม่แตกต่าง , ส่วนกลับ $1-\alpha$ = ความเชื่อมั่น > ใช้ในการประมาณค่าช่วงเชื่อมั่น

2.) Type II error : β -error : ความผิดพลาดในการยอมรับ H_0 ที่เป็นเท็จ โดยตัดสินใจสรุปว่า ไม่แตกต่าง ในสถานการณ์จริงแตกต่าง, ส่วนกลับ $1-\beta$ = อำนาจการทดสอบ (Power of test) > ใช้ในการคำนวณขนาดตัวอย่าง

4) การเลือกสถิติในการทดสอบ

การเลือกสถิติทดสอบเป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญของการทดสอบสมมติฐาน ซึ่ง การที่จะเลือกสถิติใดเป็นสถิติทดสอบให้เหมาะสมกับข้อมูลนั้นต้องพิจารณาหลายอย่าง เช่น วัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ระดับการวัดของข้อมูลหรือตัวแปรที่ศึกษา จำนวนกลุ่มที่ศึกษา การเลือกสถิติเพื่อทดสอบสมมติฐานที่อาศัยข้อกำหนดหรือข้อตกลงเบื้องต้น (Assumption) เกี่ยวกับการแจกแจง เรียกว่า Parametric Statistics แต่ถ้าข้อมูลที่ศึกษามีการแจกแจง ไม่เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้น การใช้ Parametric Statistics จะมีความผิดพลาด จึงต้องใช้สถิติที่ไม่มี ข้อกำหนดหรือข้อตกลงเบื้องต้นดังกล่าว ซึ่งเรียกว่า Non-Parametric Statistics

5) การคำนวณค่าสถิติทดสอบ หรือการใช้คำสั่งในการวิเคราะห์สถิติทดสอบโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

การคำนวณค่าสถิติทดสอบหรือการวิเคราะห์สถิติทดสอบโดยใช้คำสั่งในโปรแกรมสำเร็จรูป เป็นการหาค่าวิกฤต (Critical Value) หรือ p value บนการแจกแจงทางทฤษฎีของค่าสถิติ จาก ข้อมูลตัวอย่างที่ศึกษาภายใต้ข้อสมมติว่า H_0 ที่กำหนดเป็นจริง เพื่อนำค่านี้ไปเปรียบเทียบกับระดับ นัยสำคัญที่ตั้งเป็นเกณฑ์ว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานทดสอบ การคำนวณค่าสถิติทดสอบ อาจใช้การคำนวณด้วยมือจากสูตรของสถิติทดสอบ หรืออาจ ใช้การคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการวิเคราะห์เพราะมี ความสะดวก รวดเร็วและถูกต้อง หากคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป โปรแกรมจะคำนวณค่า p value (Sig.) มาพร้อม แต่ถ้าใช้วิธีการคำนวณด้วยมือจากสูตร ผู้วิจัยต้องนำค่าสถิติที่ได้จากการคำนวณไปเปิด ตารางสถิติเพื่อหาค่าวิกฤตหรือค่า p value ไม่สะดวก ยุ่งยาก อาจเกิดความผิดพลาดได้

6) ตัดสินใจและสรุปผลการทดสอบ

เป็นขั้นตอนของการเปรียบเทียบค่า p value ที่ได้จากการคำนวณจาก ข้อมูลที่เราศึกษาแล้วนำมาเปรียบเทียบกับระดับนัยสำคัญทางสถิติ (α) ที่เราตั้งไว้เป็นเกณฑ์เพื่อจะสรุปว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานในการทดสอบ (H_0) โดยคำนึงถึงสมมติฐาน H_A ด้วยว่าเป็นแบบ ทางเดียวหรือสองทาง ซึ่งเกณฑ์การตัดสินใจ มีหลักเกณฑ์ดังนี้

กรณี สมมติฐานเลือก (H_A) เป็นแบบทางเดียว (One Tail Hypothesis)

จะปฏิเสธสมมติฐานในการทดสอบ (H_0) เมื่อค่า p - value $< \alpha$

สรุปว่า มีความแตกต่าง (มีความสัมพันธ์) กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Significance)

จะยอมรับสมมติฐานในการทดสอบ (H_0) เมื่อค่า p - value $\geq \alpha$

สรุปว่า มีความแตกต่าง (มีความสัมพันธ์) กันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (Non-Significance)

กรณี สมมติฐานเลือก (H_A) เป็นแบบสองทาง (Two Tail Hypothesis)

จะปฏิเสธสมมติฐานในการทดสอบ (H_0) เมื่อค่า p - value $< \alpha / 2$

สรุปว่า มีความแตกต่าง (มีความสัมพันธ์) กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Significance)

จะยอมรับสมมติฐานในการทดสอบ (H_0) เมื่อค่า p - value $\geq \alpha / 2$

สรุปว่า มีความแตกต่าง (มีความสัมพันธ์) กันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (Non-Significance)

2.5 ทบทวนวรรณกรรม

2.5.1 การถ่ายเทพลังงานของสารสีย้อมสองชนิด

ค.ศ. 1987 S.Gangopadhyay, และ คณะ [13] ได้ศึกษาการถ่ายเทพลังงานแบบไม่แผ่รังสีจากสารคูมาริน 460 ไปยัง โรดามีน 6 จี ในเงื่อนไขที่ความเข้มข้นของสารผู้รับมีความเข้มข้นต่ำผลที่ได้คือค่าฟลูออเรสเซนซ์ของคูมาริน 460 มีค่าลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ค่าการถ่ายเทพลังงานจลน์ถูกตรวจพบว่าลดลงอย่างคงที่ด้วยขนาดรัศมีการถ่ายเทพลังงานวิกฤต (5.46 ± 10) นาโนเมตร

ค.ศ. 2005 Debabrata Seth และคณะ [14] ได้ศึกษาเรื่องการถ่ายเทพลังงานด้วยการใช้สารสีย้อม 7-อมิโน คูมาริน เป็นผู้ให้ และมี โรดามีน 6จี เป็นสารผู้รับ ถูกศึกษาในเมทานอลและเอซีโตนโดยใช้สถานะคงที่และเวลาวัดสเปกตรัมการเปล่งแสง สำหรับทั้งสารผู้ให้และผู้รับมีส่วนที่ซ้อนทับกันสูงมาก $J(\lambda)$ โดยมีระยะห่างฟอสเตอร์ที่สูง ถึงแม้ว่าจะมีค่าส่วนซ้อนทับกันที่สูง แต่อัตราการถ่ายเทพลังงานคงที่ของทั้งระบบมีค่าน้อย คู่ของสารผสมระหว่างคูมาริน 153 กับ โรดามีน 6จี เป็นคู่ที่มีประสิทธิภาพของสารผู้ให้สารผู้รับสูงที่สุด ค่าคงที่ของอัตราการถ่ายเทพลังงานที่แตกต่างกันเกิดจากสารผู้ให้ที่ต่างกันซึ่งบ่งชี้ถึงการพึ่งพาโครงสร้างการถ่ายเทพลังงานของสารผู้ให้

2.5.2 การใช้วิธีการพื้นที่ผิวตอบสนอง (RSM)

ค.ศ. 2009 Shahin G. และคณะ [15] ได้ประยุกต์ใช้วิธีตอบสนองพื้นผิว (RSM) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการตกตะกอนของในการบำบัดน้ำชะขยะโดยใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) และสารส้มโดยทำการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับ ปริมาณ PAC และค่า pH กับปริมาณสารส้มที่มีผลต่อการบำบัดน้ำชะขยะโดยได้ทำการศึกษาทั้งหมดสี่อย่างคือ 1.ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD) 2.ความขุ่นของน้ำ (turbidity) 3.สีของน้ำ (color) และ 4.สารแขวนลอยทั้งหมด (TSS) จากการศึกษาพบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับปริมาณของ PAC เมื่อนำไปวิเคราะห์ ANOVA พบว่าให้ค่า R^2 ของตัวแปรที่ศึกษาทั้งสี่ตัวแปรเป็นดังนี้ 0.8061 0.9717 0.9720 และ 0.9499 และ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับปริมาณของสารส้ม เมื่อนำไปวิเคราะห์ ANOVA พบว่าให้ค่า R^2 ของตัวแปรที่ศึกษาทั้งสี่ตัวแปรเป็นดังนี้ 0.9186 0.7240 0.8801 และ 0.7926

ค.ศ. 2010 Keshani S. และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาเพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของการรักษากระบวนการที่มีผลต่อความเข้มข้นของน้ำส้มโอโดยใช้ RSM โดยได้ศึกษาตัวแปรสามตัวแปรที่มีผลต่อความเข้มข้นน้ำส้มโอคือ ความเร็วรอบของเครื่องปั่น ระยะเวลา และอุณหภูมิ จากการศึกษาพบว่าถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นระยะเวลาเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความเข้มข้นของน้ำส้มโอมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ ANOVA พบว่าสมการความสัมพันธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือเนื่องจากให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9808 และมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05

ค.ศ. 2015 Adewale Olusegun OMOLOLA และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกล้วยสองชนิดโดยใช้ทฤษฎี RSM โดยกล้วยทั้งสองชนิดคือ Luvhele และ Mabonde ซึ่งได้ทำการศึกษาตัวแปรของระยะเวลาในการอบกับกำลังไฟฟ้าในการอบโดยทำการศึกษาว่ามีผลต่อสีของกล้วยหรือไม่โดยทำการหั่นกล้วยเป็นชิ้นบางๆหนา 5 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบเพื่อศึกษาสีและความแข็งของกล้วยจากการศึกษาพบว่าระยะเวลาในการอบกับกำลังไฟฟ้ามีผลต่อสีของกล้วยและความแข็งของกล้วยทั้งสองชนิดเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย ANOVA พบว่ากล้วยชนิด Luvhele มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อความแข็งเนื่องจากให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.0001 และให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.97 ในส่วนของสีนั้นพบว่ามีค่า p-value น้อยกว่า 0.0001 แต่ค่า R^2 มีค่า 0.64 ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับทางสถิติ สำหรับกล้วยชนิด Mabonde นั้นพบว่าการศึกษาความแข็งมีค่า p-value น้อยกว่า 0.0001 แต่ค่า R^2 มีค่า 0.88 ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับทางสถิติ แต่ในส่วนของสีนั้นพบว่ามีค่า p-value น้อยกว่า 0.0001 และให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.97

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของสารสีย้อมโดยใช้โปรแกรมทางสถิติเข้ามาเพื่อช่วยในการออกแบบการทดลองและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของตัวแปรที่จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสารสีย้อมเพื่อลดการสูญเสียทรัพยากร โดยผู้วิจัยได้แบ่งแนวทางการศึกษาออกเป็น 2 แนวทางคือ

1. การทดลองใช้โปรแกรมทางสถิติในการวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์รวมแสงฟลูออเรสเซนต์ในรูปของของเหลว ที่มีค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง (Gain) และความเข้มข้นของสารสีย้อมที่ส่งผลให้ค่ากระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้มีค่าสูงสุด
2. การทดลองใช้โปรแกรมทางสถิติในการวิเคราะห์หาเงื่อนไขความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์รวมแสงฟลูออเรสเซนต์ในรูปของของเหลวที่สร้างจากสารสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ สารสีย้อม R6G และสารสีย้อม C6 โดยจะทำการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารที่ส่งผลให้ค่าการส่งผ่านพลังงานระหว่างสารทั้ง 2 ชนิดและค่ากระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้มีค่าสูงสุด

3.1 เครื่องมือและระบบการวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ผู้วิจัยได้ออกแบบและจัดเตรียมระบบเพื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารสีย้อมดังนี้

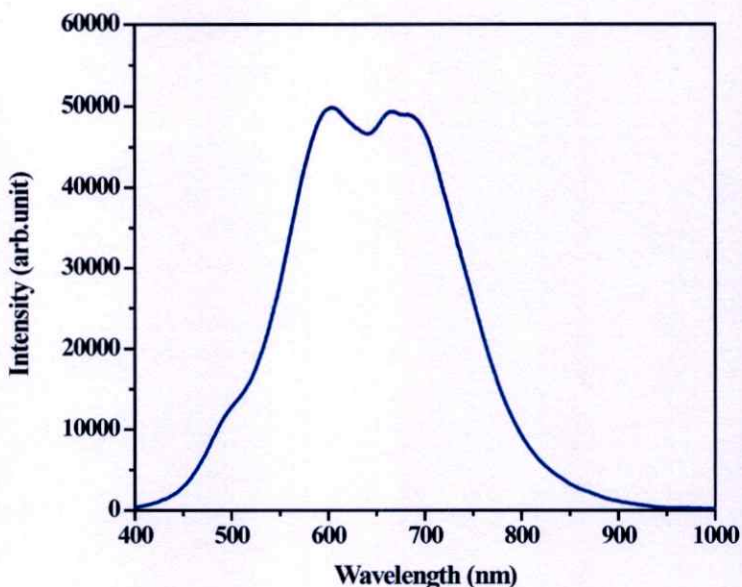
3.1.1 ระบบการวัดสเปกตรัมแสงลูมิเนสเซนซ์

สมบัติเชิงแสงที่สำคัญที่จะมาใช้ในการวัดสารสีย้อมคือสมบัติการดูดกลืนแสงและสมบัติการเปล่งแสงลูมิเนสเซนซ์

3.1.1.1 ระบบวัดสมบัติการดูดกลืนแสง

ระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของสารสีย้อมมีส่วนประกอบการวัดดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้สำหรับวัดการดูดกลืนในงานวิจัยนี้เป็นหลอดไฟทั้งสแตน (Schott Megalight 100) ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 0.19 แอมแปร์ ซึ่งสเปกตรัมแสงที่ได้จากการวัดเป็นดังรูปที่ 3.1 ให้แสงในย่าน 400-900 นาโนเมตร



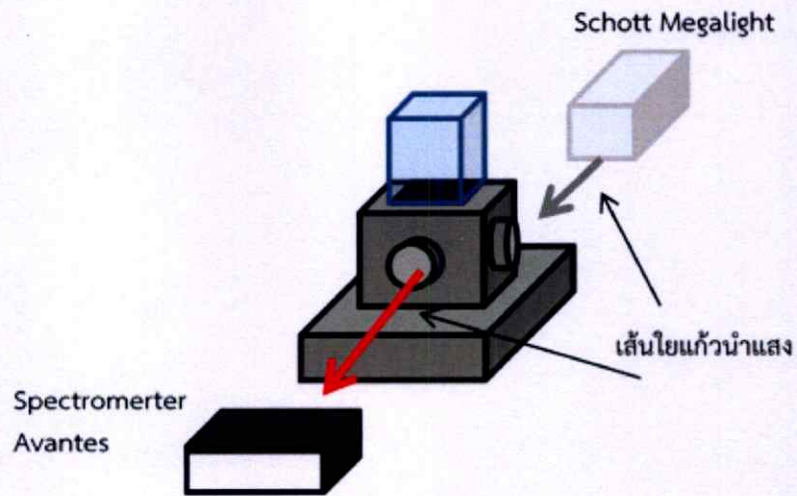
รูปที่ 3.1 สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน

2. เส้นใยแก้วนำแสงสำหรับส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังสารสีย้อม มีลักษณะดังรูปที่ 3.2 โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดมัดรวมกันมีขนาด 8 มิลลิเมตร

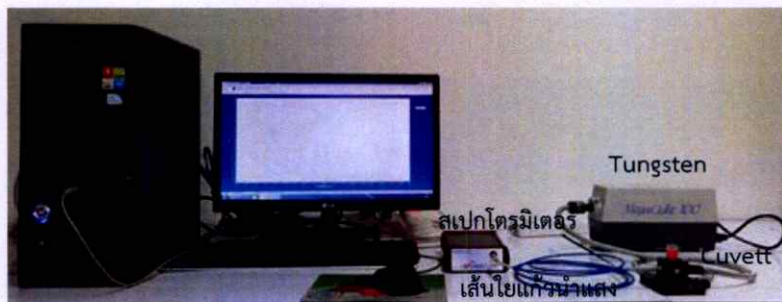
3. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (UV-Vis spectromerter Avantes avaspec-EDU) พร้อมสายใยแก้วนำแสง (Avantes FC-UV200-2) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ทำหน้าที่ในการวัดแสงซึ่งสามารถวัดแสงได้ในย่านความยาวคลื่น 200 – 1100 นาโนเมตร และสายใยแก้วนำแสงทำหน้าที่ส่งแสงไปยังสารสีย้อม

4. อุปกรณ์จับยึด ทำหน้าที่ในการยึดภาชนะ (Cuvett) ที่ใส่สารสีย้อมเอาไว้ พร้อมทั้งมีส่วนสำหรับจับยึดเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 เส้นไว้

จากส่วนประกอบทั้งหมดข้างต้น จะถูกนำมาจัดเป็นระบบการวัดการดูดกลืนแสงดังแผนภาพรูปที่ 3.2 เริ่มจากแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเดินทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสงตกกระทบภาชนะที่บรรจุสารสีย้อมไว้ จากนั้นจึงเดินทางผ่านสารสีย้อมแล้วทะลุผ่านไปยังเส้นใยแก้วนำแสงอีกสายหนึ่งเข้าสู่สเปกโตรมิเตอร์ จากนั้นแสงที่ส่งผ่านเข้ามายังสเปกโตรมิเตอร์นั้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่ออยู่กับสเปกโตรมิเตอร์ผ่านสาย USB และทำการประมวลผลข้อมูลการดูดกลืนแสงด้วยโปรแกรม Avasoft รุ่น 7.4 ดังสมการ 2.4



รูปที่ 3.2 แผนภาพการวัดการดูดกลืนของแสง



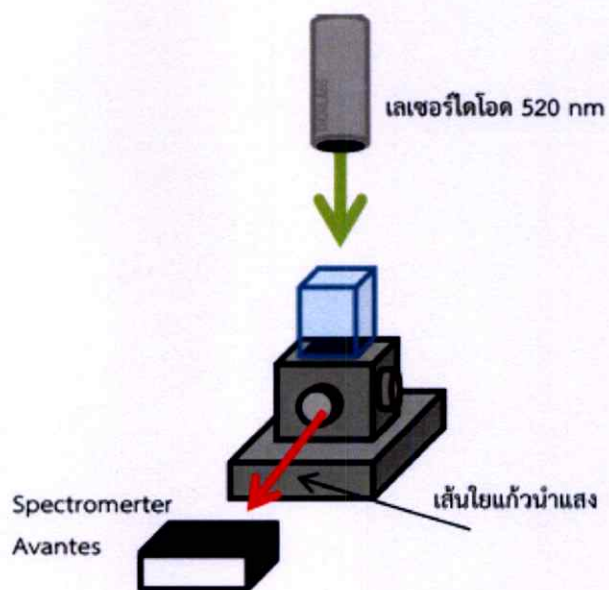
รูปที่ 3.3 ระบบการวัดการดูดกลืนแสง

3.1.1.2 ระบบการวัดสมบัติการเปล่งแสงลูมิเนสเซนซ์

ระบบการวัดการเปล่งแสงลูมิเนสเซนซ์มีการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ในการวัดจากคุณสมบัติอื่นดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้สำหรับกระตุ้นสารสีย้อม ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ เลเซอร์ไดโอด THORLABS รุ่น CPS520 C170922-215 ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ใช้กำลังไฟขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิวัตต์ และ รุ่น CPS450 C180310-210 ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ใช้กำลังไฟขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิวัตต์

การวัดสมบัติการเปล่งแสงลูมิเนสเซนซ์จะถูกจัดวางดังรูปที่ 3.4 โดยแสงจากเลเซอร์ไดโอดจะต้องตั้งฉากกับเส้นใยแก้วนำแสง



รูปที่ 3.4 แผนภาพการวัดการเปล่งแสงลูมิเนสเซนซ์

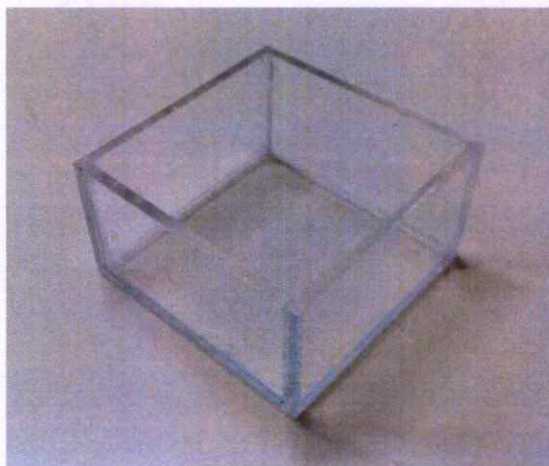


รูปที่ 3.5 ระบบการวัดการเปล่งแสงลูมิเนสเซนซ์

3.1.2 ระบบการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนซ์ของสารละลายลูมิเนสเซนซ์

ในการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายลูมิเนสเซนซ์ ถูกจัดวางในลักษณะเดียวกับการวัดคุณสมบัติเชิงแสงของสารสีย้อม และเนื่องจากจำเป็นต้องศึกษาเงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนค่ากำลังขยายทางโครงสร้างจึงต้องเพิ่มภาชนะพิเศษเพื่อมาใช้แทนคิวเวทจากรูป 3.5 โดยมีอุปกรณ์ดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน
2. เลเซอร์ THORLABS ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร
3. เครื่องสเปคโตรมิเตอร์
4. เส้นใยแก้วนำแสง
5. แท่นใส่คิวเวท
6. คิวเวทสำหรับใส่สารละลายที่มีขนาด กว้างxยาวxสูง 1x1x4.5 เซนติเมตร ตามลำดับ
7. ภาชนะพิเศษสำหรับใส่สารละลายที่มีขนาด กว้างxยาวxสูง 3.5x3.5x2.5 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยภาชนะดังกล่าวทำจากพลาสติกโปร่งแสงหนา 2.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ภาชนะโปร่งแสง

3.2 การศึกษาหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มของสารสีย้อมกับค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง

3.2.1 การเตรียมเงื่อนไขสำหรับออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์

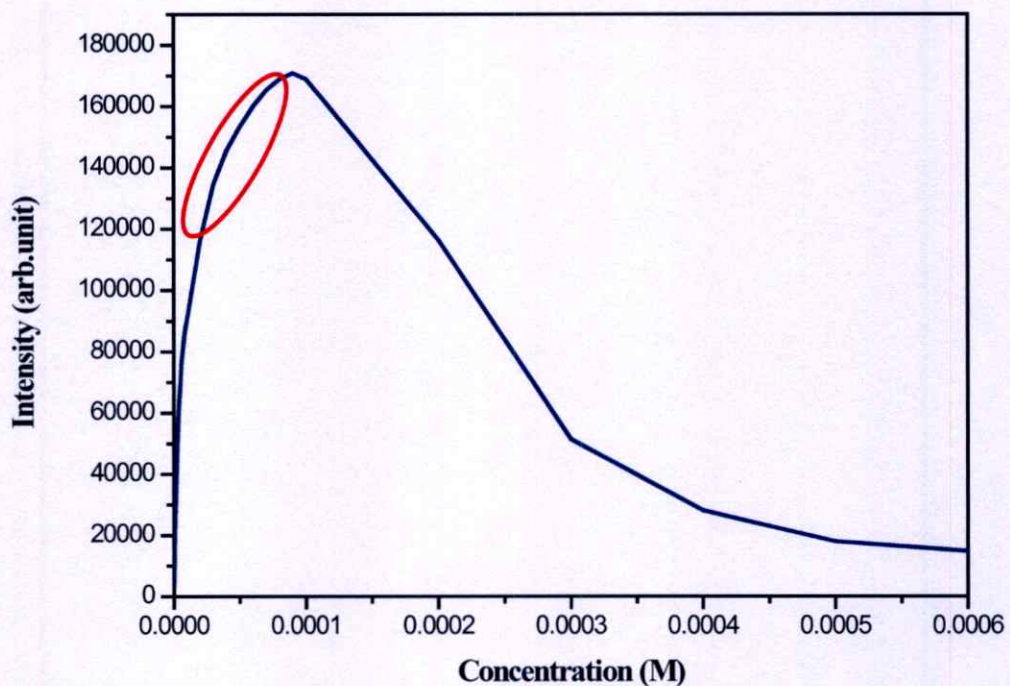
1. เพื่อศึกษาหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มของสารสีย้อมกับค่ากำลังขยายทางโครงสร้างที่จะทำให้เกิดการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุด

2. เพื่อศึกษาหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มข้นของสารสี้อมกับค่ากำลังขยายทางโครงสร้างที่จะทำให้เกิดสเปกตรัมการเปล่งแสงสูงสุด

วิธีการทดลอง

1. ทำการเจือความเข้มข้นของสารสี้อมในความเข้มข้นต่างๆด้วย ตัวทำละลายเอทานอล โดยมีความเข้มข้นของสารละลายลูมิเนสเซนซ์ R6G ตั้งแต่ 1×10^{-7} - 1×10^{-2} โมลาร์

2. วัดค่าสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยเลเซอร์ไดโอด ที่มีความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ได้ออกมาตามรูป 3.7



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงลูมิเนสเซนซ์กับความเข้มข้นของสารสี้อม

3. กำหนดช่วงเงื่อนไขของความเข้มข้นสารละลาย R6G ที่ 3×10^{-5} - 8×10^{-5} M และค่ากำลังขยายทางโครงสร้างของภาชนะด้วยค่า 8-30 เท่า

4. นำขอบเขตเงื่อนไขเข้าโปรแกรมเพื่อประมวลผลทางสถิติได้รูปแบบการทดลอง ดังตารางที่

3.1

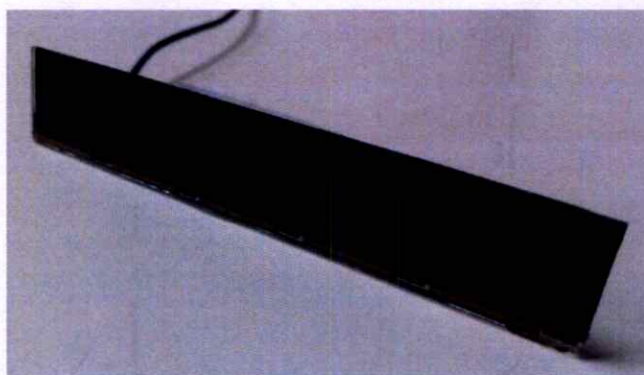
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลองเพื่อหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสีย้อม

เงื่อนไข	ค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง	ค่าความเข้มข้นของสารสีย้อม (โมลาร์)
1	3.44	5.50×10^{-5}
2	8	3.00×10^{-5}
3	8	8.00×10^{-5}
4	19	1.96×10^{-5}
5	19	5.50×10^{-5}
6	19	5.50×10^{-5}
7	19	5.50×10^{-5}
8	19	5.50×10^{-5}
9	19	5.50×10^{-5}
10	19	9.03×10^{-5}
11	30	3.00×10^{-5}
12	30	8.00×10^{-5}
13	34.55	5.50×10^{-5}

3.2.2 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของสารละลายลูมินิสเซนซ์

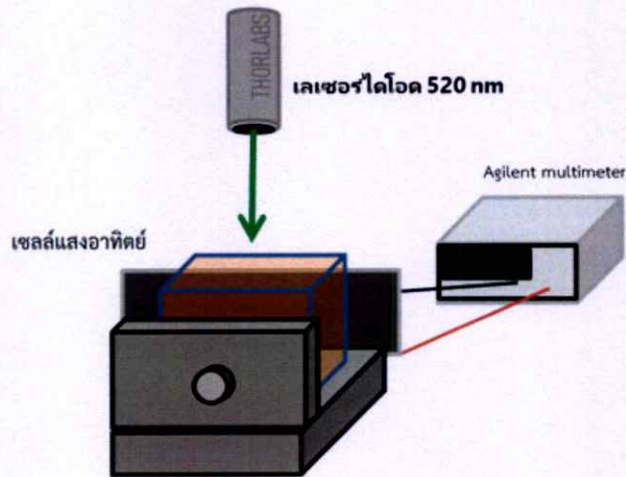
หลังจากออกแบบการทดลองและเตรียมสารละลายที่เงื่อนไขต่างๆแล้ว จึงนำมาวัดหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และทำการจัดวางระบบการวัดดังรูปที่ 3.9

1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส (amorphous) ที่มีขนาดกว้างxยาว 15x100 มิลลิเมตร ตามลำดับ

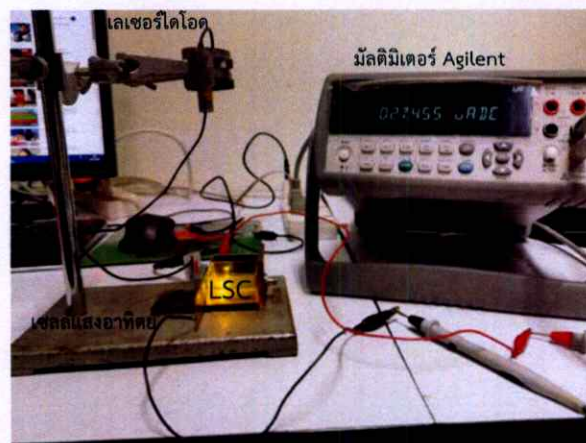


รูปที่ 3.8 เซลล์แสงอาทิตย์

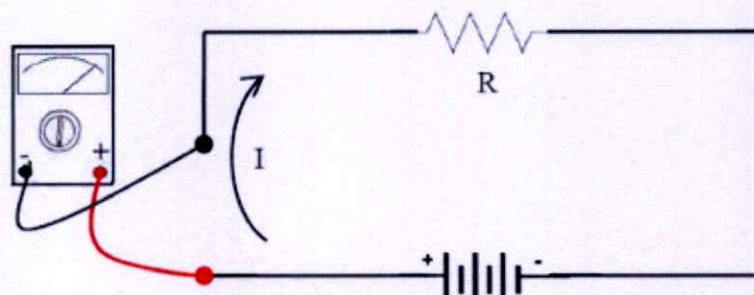
2. เครื่องวัดมัลติมิเตอร์ Agilent 34410A เป็นเครื่องวัดที่สามารถอ่านค่าทัศนียมได้ถึง 6 ตำแหน่งครึ่ง



รูปที่ 3.9 แผนภาพการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของสารละลายลูมิเนสเซนซ์



รูปที่ 3.10 ระบบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของสารละลายลูมิเนสเซนซ์

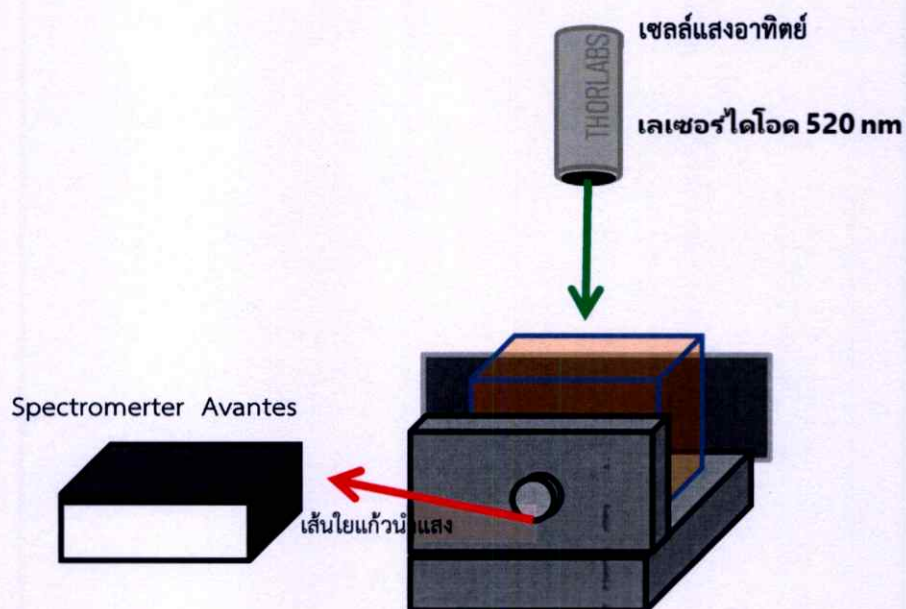


รูปที่ 3.11 การวัดค่ากระแสไฟฟ้า

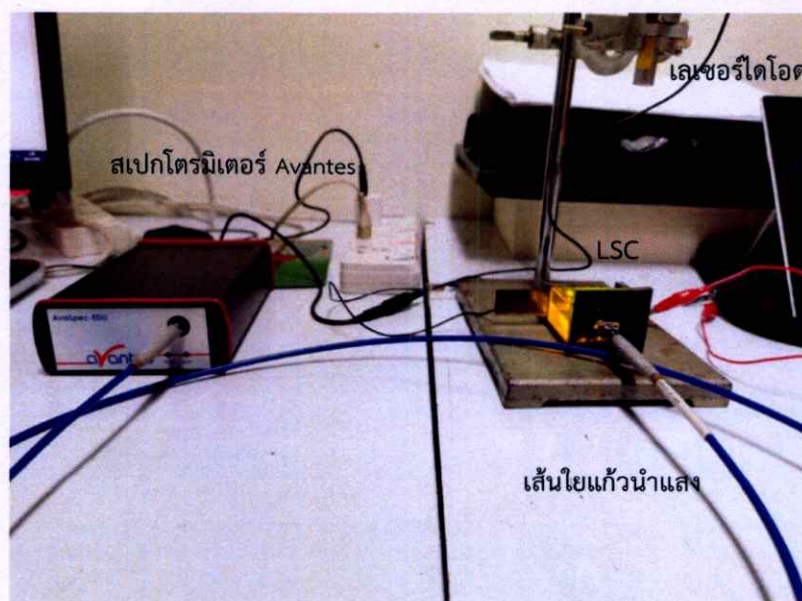
โดยปกติแล้วการวัดหาค่ากระแสไฟฟ้านั้นต้องต่อตามรูปที่ 3.11 ซึ่งจำเป็นต้องมีโหนดแต่ในการทดลองนี้โหนดนั้นอยู่ภายในมัลติมิเตอร์แล้ว

3.2.3 การวัดคุณสมบัติทางแสงของสารละลายลูมิเนสเซนซ์

ในการวัดคุณสมบัติทางแสงของสารละลายลูมิเนสเซนซ์นั้นเป็นการวัดการเปล่งแสงของสารละลายลูมิเนสเซนซ์ในแต่ละเงื่อนไข โดยมีการจัดวางระบบการวัด ในลักษณะดังรูป 3.11



รูปที่ 3.12 แผนภาพการวัดค่าความเข้มแสงของสารละลายลูมิเนสเซนซ์

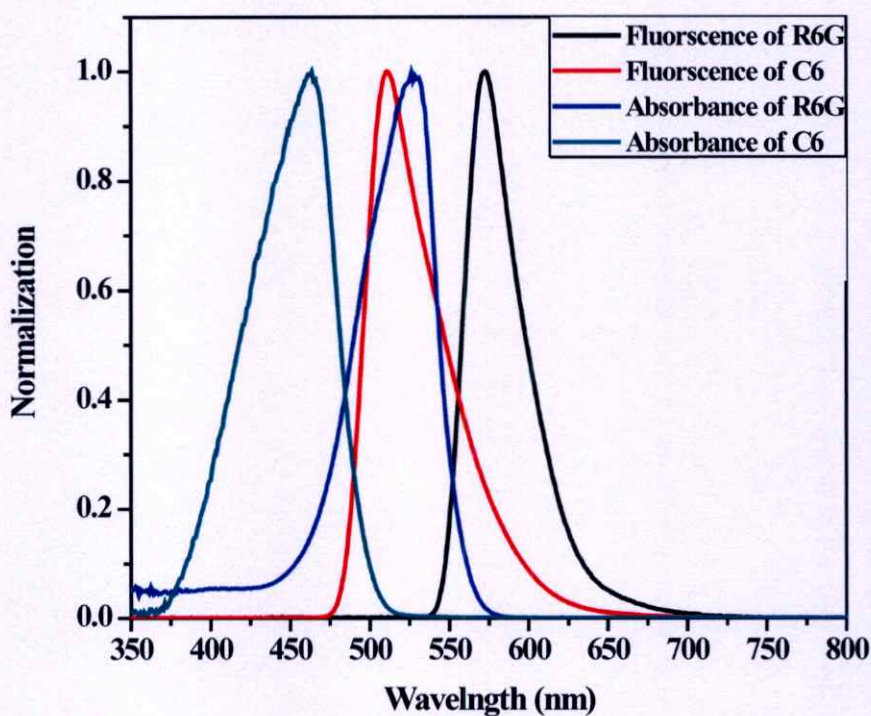


รูปที่ 3.13 ระบบการวัดค่าความเข้มแสงของสารละลายลูมิเนสเซนซ์

3.2.4. การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างกับค่าความเข้มข้นของสารละลายเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มแสง

หลังจากได้ผลการทดลองทั้งค่ากระแสและค่าความเข้มแสงแล้ว นำค่ากระแสมาคำนวณหา ค่าความหนาแน่นกระแสพร้อมผลทั้งหมดกลับไปใส่ในโปรแกรมที่ได้ออกแบบเงื่อนไขการทดลองไว้ เพื่อหาว่า ทั้งสองตัวแปรนี้ มีค่าความสัมพันธ์ในด้านการหาค่าความหนาแน่นกระแส และค่าความสัมพันธ์ในด้านการหาค่าความเข้มแสงหรือไม่

และจากการทดลองแรกผ่านไปผู้วิจัยมีความสนใจว่าหากสิ่งประดิษฐ์รวมแสงนี้สามารถถูกกระตุ้นจากแหล่งกำเนิดแสงได้มากกว่าหนึ่งย่านความยาวคลื่นจะส่งผลอย่างไรกับค่าความหนาแน่นกระแสและความเข้มการเปล่งแสงที่ได้ จึงได้พิจารณาว่าจะนำสารสีย้อมสองชนิดที่ถูกกระตุ้นด้วยความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและต้องมีสเปกตรัมที่สัมพันธ์กันดังรูป 2.7 ซึ่งเป็นเหตุให้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ สาร Coumarin6 (C6) ที่มีสเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ซ้อนทับกับ สเปกตรัมการดูดกลืนของ R6G ที่แสดงดังรูป 3.13



รูปที่ 3.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของ R6G กับ C6

3.3 การวิเคราะห์หาเงื่อนไขความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์รวมแสงฟลูออเรสเซนซ์ในรูปของของเหลวที่สร้างจากสารสีย้อม 2 ชนิด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหาค่าการถ่ายเทพลังงานของสารสีย้อมผู้ให้ ไปยังสารสีย้อมผู้รับ

วิธีการทดลอง

1. กำหนดขอบเขตเงื่อนไขของความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้ให้ (C6) ที่ 1.00×10^{-5} - 3.0×10^{-5} โมลาร์ และสารสีย้อมผู้รับ (R6G) ที่ 3.00×10^{-5} - 7.00×10^{-5} โมลาร์ แล้วใช้โปรแกรมทางสถิติเพื่อออกแบบการทดลอง ซึ่งได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลองเพื่อหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้ให้ และค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้รับ

เงื่อนไข	ค่าความเข้มข้นของ C6 (โมลาร์)	ค่าความเข้มข้น R6G (โมลาร์)
1	2.17×10^{-5}	2.00×10^{-5}
2	3.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}
3	3.00×10^{-5}	3.00×10^{-5}
4	5.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}
5	5.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}
6	5.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}
7	5.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}
8	5.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}
9	5.00×10^{-5}	3.41×10^{-5}
10	5.00×10^{-5}	5.85×10^{-6}
11	7.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}
12	7.00×10^{-5}	3.00×10^{-5}
13	7.82×10^{-5}	2.00×10^{-5}

1. นำสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นตามเงื่อนไขข้างต้นมาวัดหาค่าการดูดกลืนด้วยระบบการวัด ดังรูป 3.5
2. วัดหาค่าการเปล่งแสงด้วยระบบการวัด ดังรูป 3.12 โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดที่มีค่าความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร เพื่อกระตุ้นสาร C6
3. นำผลที่วัดได้มาคำนวณหาค่าการส่งถ่ายพลังงานโดยใช้สมการที่ 2.14
4. นำผลที่คำนวณได้ในข้อ 4 ไปป้อนกลับในโปรแกรม เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้ให้ (C6) และ ค่าความเข้มข้นสารสีย้อมผู้รับ (R6G) ที่เหมาะสม

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากบทที่ผ่านมา ได้ทำการออกแบบเงื่อนไขการทดลองและทดลองโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งในบทนี้จะทำการวิเคราะห์ผลในแต่ละส่วน อันได้แก่ 1. ความเหมาะสมของค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมซึ่งจะส่งผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มการเปล่งแสง 2. ความเหมาะสมของค่าความเข้มข้นสารสีย้อมผู้ให้ (C6) และค่าความเข้มข้นสารสีย้อมผู้รับ (R6G) มีผลต่อการส่งผ่านพลังงานหรือไม่ ซึ่งจะแสดงรายละเอียด ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองจากการหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสีย้อม

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายและค่ากำลังขยายทางโครงสร้างที่มีต่อการผลิตกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์และค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัดสเปกโตรมิเตอร์ ได้ผลดังตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลาย R6G และค่ากำลังขยายทางโครงสร้างจะส่งผลต่อความเข้มแสงและค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้าไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเมื่อดูผลจากการคำนวณในเงื่อนไขที่มีการซ้ำกันถึง 5 ครั้ง ในเงื่อนไขที่ 5-9 มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยซึ่งถือว่าข้อมูลนี้ยอมรับได้

เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าได้สมการ 4.1

$$J = 3.47169 + (0.45439 \times G) - (40815.74100 \times C) + (8258.18182 \times G \times C) - (0.015393 \times G^2) - (4.9358 \times 10^8 \times C^2) \quad (4.1)$$

เมื่อ J คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมแปร์/เซนติเมตร²)

G คือ กำลังขยายทางโครงสร้างของสาร

C คือ ค่าความเข้มข้นของสาร (โมลาร์)

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดลองที่ได้จากโปรแกรม Design Expert และผลการวัดค่าความเข้มข้น
เปล่งแสงจากสเปกตรัมและกระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์

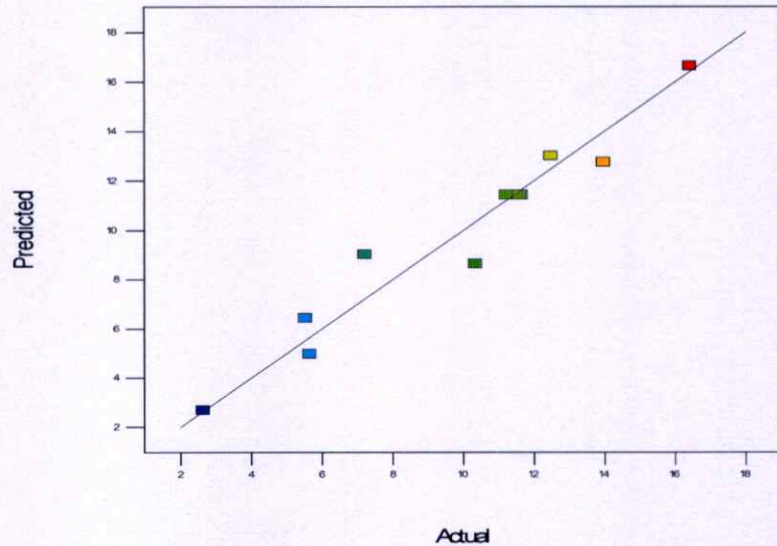
เงื่อนไข	ค่ากำลังขยาย ทางโครงสร้าง	ค่าความเข้มข้น (โมลาร์)	ค่าความเข้มข้น เปล่งแสง (arb.unit)	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมแปร์/เซนติเมตร ²)
1	3.44	5.50×10^{-5}	2,424	2.62
2	8	3.00×10^{-5}	13,753	5.51
3	8	8.00×10^{-5}	13,312	5.64
4	19	1.96×10^{-5}	27,527	10.33
5	19	5.50×10^{-5}	33,336	11.63
6	19	5.50×10^{-5}	33,327	11.59
7	19	5.50×10^{-5}	34,565	11.47
8	19	5.50×10^{-5}	34,498	11.31
9	19	5.50×10^{-5}	33,448	11.20
10	19	9.03×10^{-5}	41,932	12.47
11	30	3.00×10^{-5}	19,792	7.20
12	30	8.00×10^{-5}	43,013	16.41
13	34.55	5.50×10^{-5}	31,874	13.96

จากสมการ 4.1 ที่ได้จากโปรแกรมนั้น จะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าตัวแปรค่ากำลังขยายทาง
โครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหรือไม่
โดยทำการวิเคราะห์สมการที่ได้โดยตารางวิเคราะห์ผลของค่าความแปรปรวน (Anova) ดังตารางที่
4.2 ซึ่งค่าที่บ่งชี้ว่าสมการนี้มีความสัมพันธ์คือค่า p-value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.0001 ซึ่งค่า p-value
(probability value) นี้คือค่าที่บ่งบอกนัยสำคัญของการสมมติฐานในงานวิจัยหากข้อมูลใดมีค่า
p-value น้อยกว่า 0.05 [18] ก็ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับในสมมติฐานได้

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ผลของค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของการหาค่ากระแสไฟฟ้า

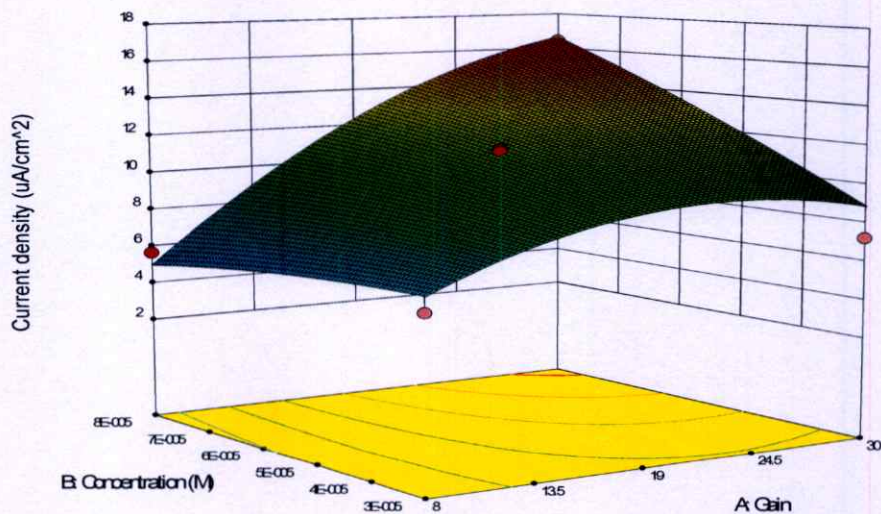
Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value	
Model	165.29	5	33.06	24.68	0.0003	significant
A=gain	101.40	1	101.40	75.70	< 0.0001	
B=concentration	19.09	1	19.09	14.25	0.0069	
AB	20.63	1	20.63	15.40	0.0057	
Residual	24.13	1	24.13	18.02	0.0038	
Lack of fit	0.66	1	0.66	0.49	0.5048	significant
Pure error	9.38	7	1.34			
Cor Total	9.24	3	3.08	90.44	0.0004	

นอกจากตาราง Anova แล้ว สมการยังถูกนำไปสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จริงกับค่าที่ถูกคาดการณ์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ R^2 ดังรูปที่ 4.1 และจากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ R^2 เท่ากับ 0.9463



รูปที่ 4.1 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จริงและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ถูกคาดการณ์

และจากการพิจารณารูปสามมิติในรูปที่ 4.2 พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการจัดเตรียมแผ่นรวมแสงชนิดของเหลวด้วยสาร R6G คือใช้สารละลายที่มีความเข้มข้น 3×10^{-5} M และค่ากำลังขยายทางโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 8 เท่า



รูปที่ 4.2 กราฟพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสี้อมและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

เพื่อทดสอบสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ ผู้วิจัยได้ทดลองจัดเตรียมแผ่นรวมแสงชนิดของเหลวจากตัวแปรตั้งต้นที่มีเงื่อนไขที่แตกต่างจากเดิม โดยที่เงื่อนไขทั้ง 3 นี้อยู่ในขอบเขตของ 13 เงื่อนไขข้างต้น และนำมาทดลองและเก็บผลเพื่อเทียบกับการคำนวณจากสมการที่ได้จากการเข้าโปรแกรม ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลองซ้ำ

ตัวทดสอบ	ค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง	ค่าความเข้มข้นสารสีย้อม (โมลาร์)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมแปร์/เซนติเมตร ²)	ค่าการคำนวณ (ไมโครแอมแปร์/เซนติเมตร ²)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
1	10	4.00×10^{-5}	7.24	7.36	1.61
2	15	5.00×10^{-5}	9.84	9.74	1.03
3	20	6.00×10^{-5}	11.64	12.08	3.83

และจากตารางที่ 4.1 ได้แสดงค่าความเข้มข้นการเปล่งแสงที่เงื่อนไขต่างๆ แล้วพบว่ามีความเข้มข้นการเปล่งแสงและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้นตามค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและมีค่าสูงที่สุดที่เงื่อนไขที่ 12 แม้ว่าจากการบันทึกผลค่ากระแสไฟฟ้าจะแปรผกผันกับค่ากำลังขยายทางโครงสร้างที่ยังมีค่ามากกระแสไฟฟ้าที่ได้กลับลดลงแต่หากคำนวณหาความหนาแน่นกระแสผลที่ได้แปรผันตรงกับค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง

ทั้งนี้เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมกับค่าความเข้มข้นการเปล่งแสงได้จากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าได้สมการ 4.2

$$F = (2588.97550 \times G) - 1777.84099 - (1.18925 \times 10^8 \times C) + (2.15109 \times 10^7 \times G \times C) - (76.12262 \times G^2) - (6.72940 \times 10^{11} \times C^2) \quad (4.2)$$

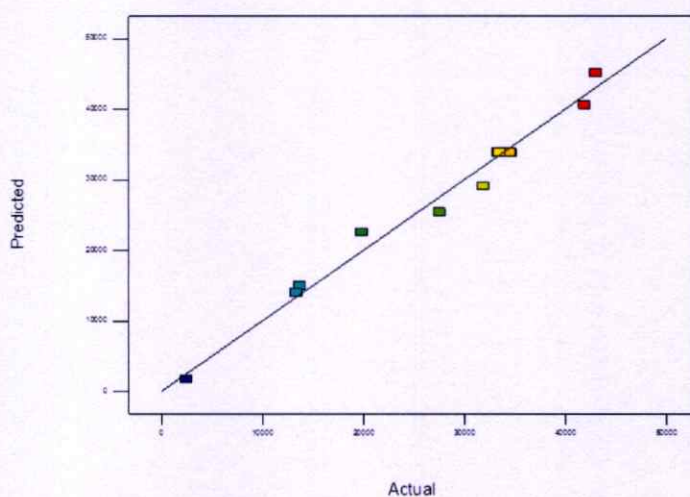
- เมื่อ F คือ ค่าความเข้มข้นการเปล่งแสง
 G คือ กำลังขยายทางโครงสร้างของสาร
 C คือ ค่าความเข้มข้นของสาร

เมื่อได้สมการ 4.2 แล้วจึงนำมาวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนของตัวแปรค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมว่ามีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นการเปล่งแสงหรือไม่ ซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ผลของค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของการหาค่าความเข้มข้นการเปลี่ยนแปลง

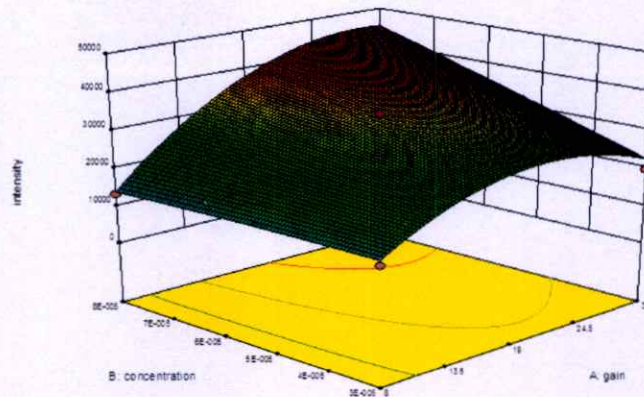
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-value	
Model	1.716×10^9	5	3.432×10^8	77.93	< 0.0001	significant
A=gain	7.486×10^8	1	7.486×10^8	170.01	< 0.0001	
B=concentration	2.328×10^8	1	2.328×10^8	52.86	0.0002	
AB	1.400×10^8	1	1.400×10^8	31.79	0.0008	
A ²	5.902×10^8	1	5.902×10^8	134.03	< 0.0001	
B ²	1.231×10^6	1	1.231×10^6	0.28	0.6134	
Residual	3.082×10^7	7	4.403×10^6			
Lack of Fit	2.919×10^7	3	9.732×10^6	23.89	0.0051	significant
Pure Error	1.629×10^6	4	4.073×10^5			
Cor Total	1.747×10^9	12				

เมื่อนำสมการไปสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จริงกับค่าที่ถูกคาดการณ์ของความเข้มข้นการเปลี่ยนแปลง เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ R^2 ดังรูปที่ 4.3 และจากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ R^2 เท่ากับ 0.9840



รูปที่ 4.3 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นการเปลี่ยนแปลงที่วัดได้และค่าความเข้มข้นการเปลี่ยนแปลงที่คำนวณได้

และจากภาพสามมิติในรูปที่ 4.4 พบว่าแนวโน้มของค่าความเข้มข้นการเปลี่ยนแปลงจะยิ่งสูงขึ้นเมื่อค่ากำลังขยายทางโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.4 กราฟพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสีย้อม และค่าความเข้มการเปล่งแสง

หลังจากนั้น ผู้วิจัยได้ทดลองจัดเตรียมแผ่นรวมแสงชนิดของเหลวจากตัวแปรตั้งต้นที่มีเงื่อนไขเดียวกันกับตารางที่ 4.3 มาทดลองและเก็บผลเพื่อเทียบกับการคำนวณจากสมการที่ได้จากการเข้าโปรแกรม ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.5

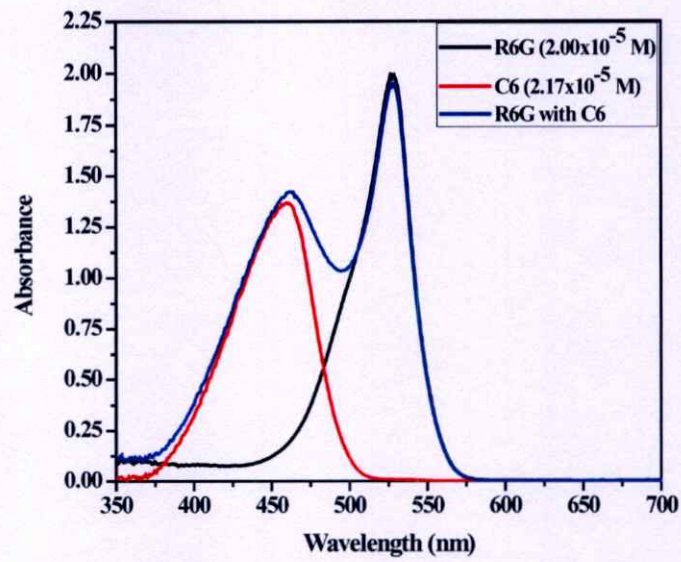
ตารางที่ 4.5 ค่าความเข้มการเปล่งแสงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลองซ้ำ

ตัวทดสอบ	ค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง	ค่าความเข้มข้นสารสีย้อม (โมลาร์)	ความเข้มการเปล่งแสง (arb.unit)	ค่าการคำนวณ (arb.unit)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
1	10	4.00×10^{-5}	19,673	20,310	3.2
2	15	5.00×10^{-5}	28,335	30,125	6.3
3	20	6.00×10^{-5}	37,057	38,224	3.1

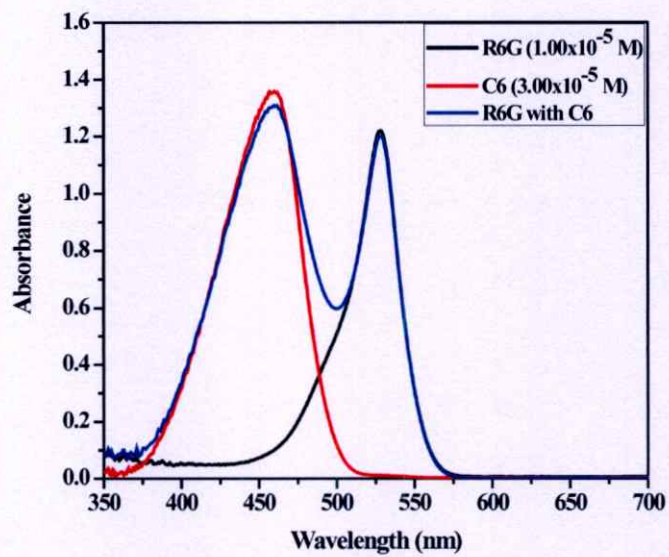
จากผลการทดลองทั้งในการหาค่าความเหมาะสมของค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสีย้อม พบว่ามีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มการเปล่งแสงและการทดลองซ้ำเทียบกับค่าในการคำนวณมีค่าความผิดพลาดที่ยังคงยอมรับได้

4.2 ผลการทดลองจากการหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้ให้และค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้รับ

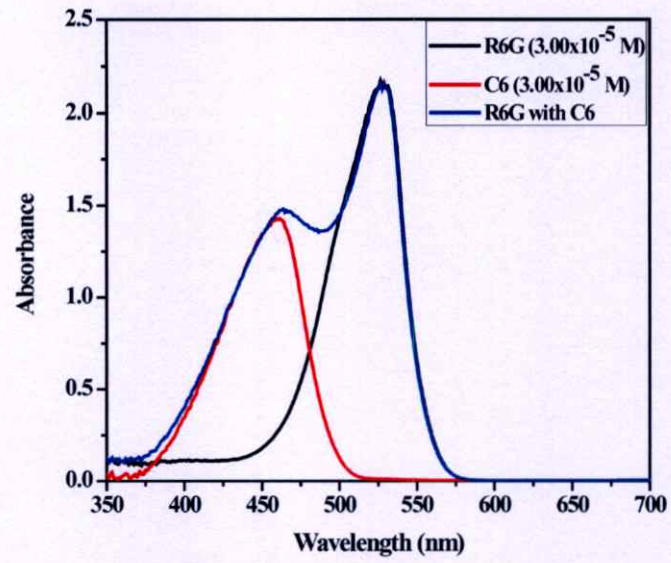
ในการศึกษาเรื่องการหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้ให้ (C6) และค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้รับ (R6G) ที่เตรียมค่าความเข้มข้นดังตารางที่ 3.2 โดยการวัดค่าดูดกลืนแสงได้ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.5-4.17



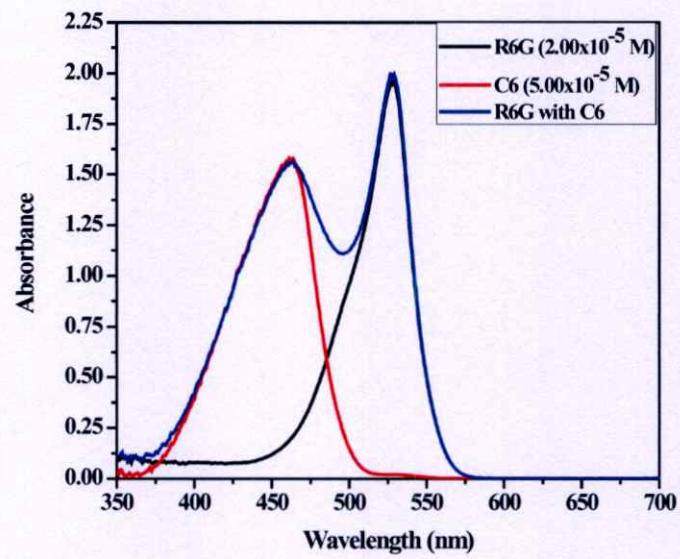
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 1



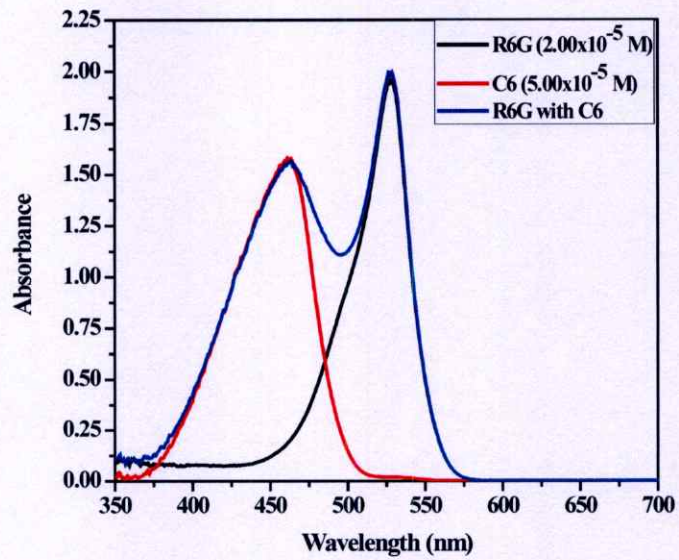
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 2



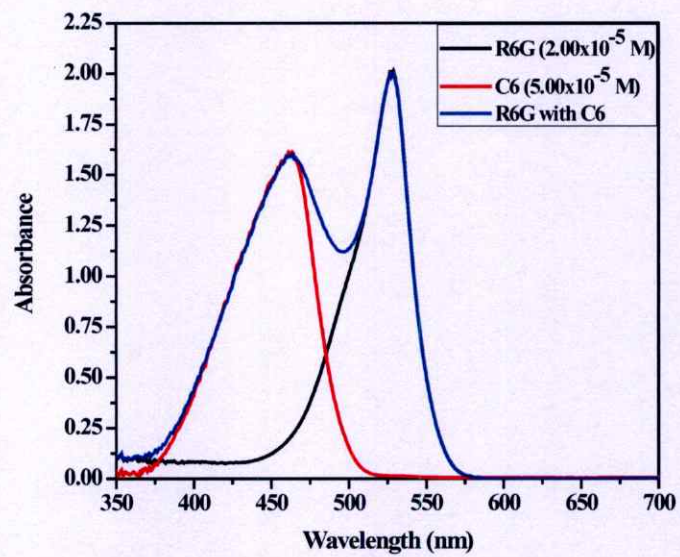
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 3



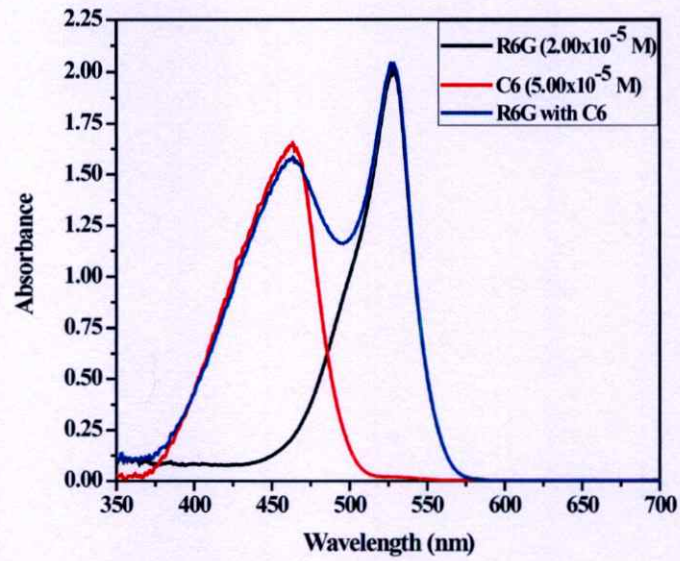
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 4



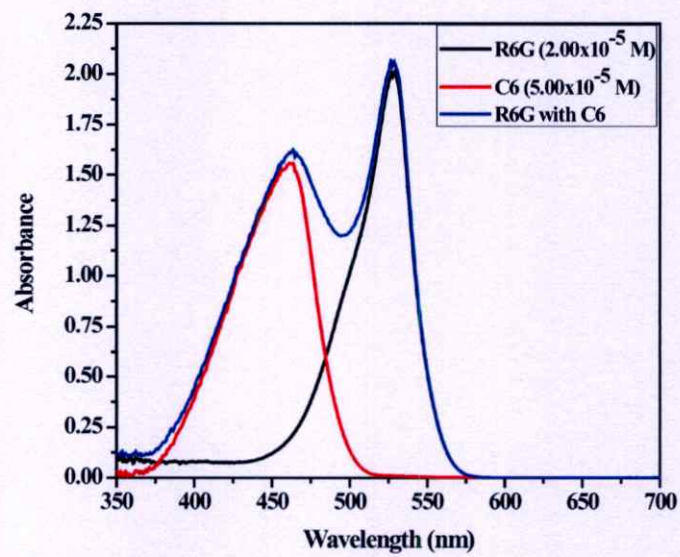
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 5



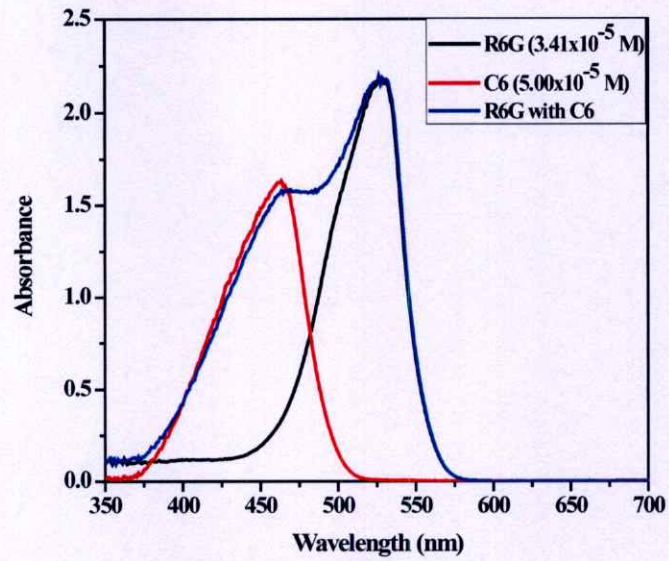
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 6



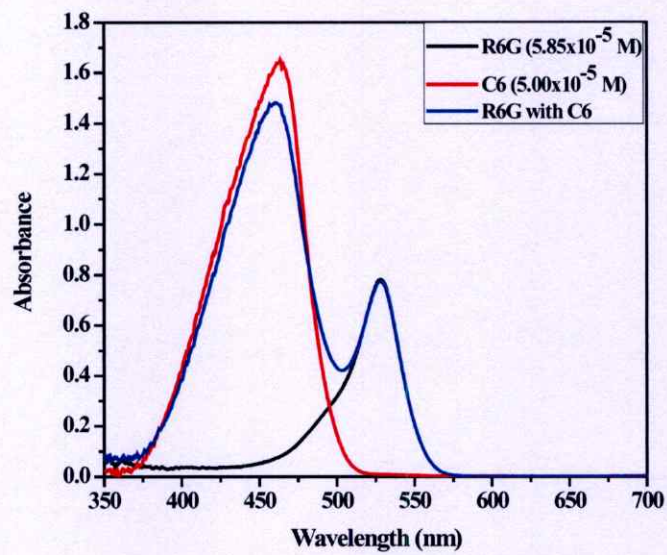
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 7



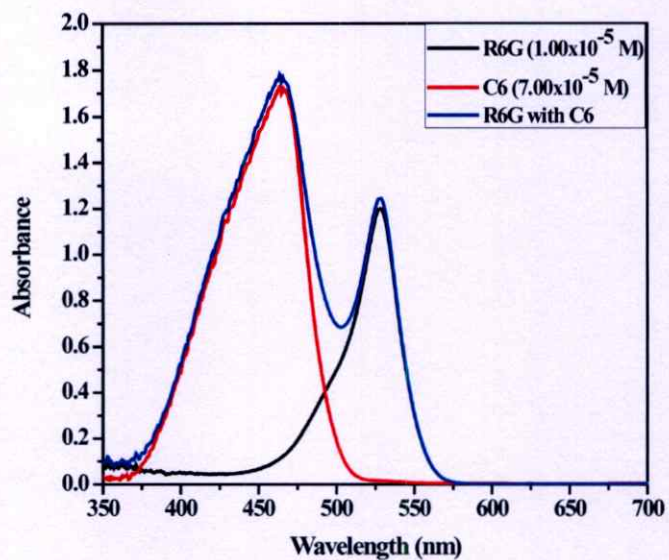
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 8



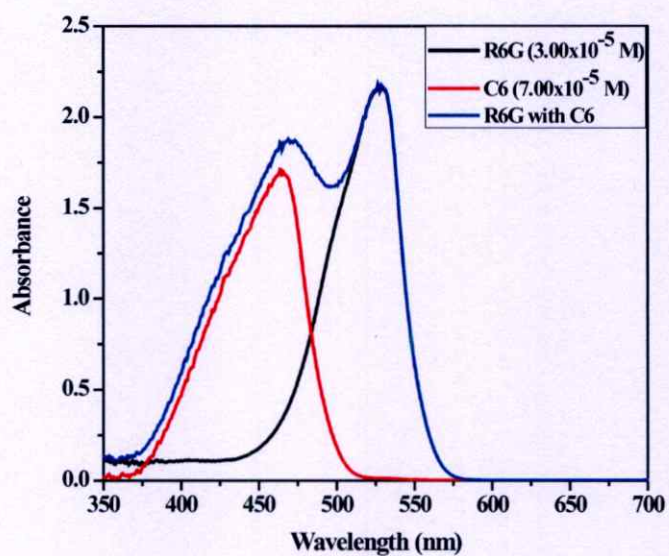
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 9



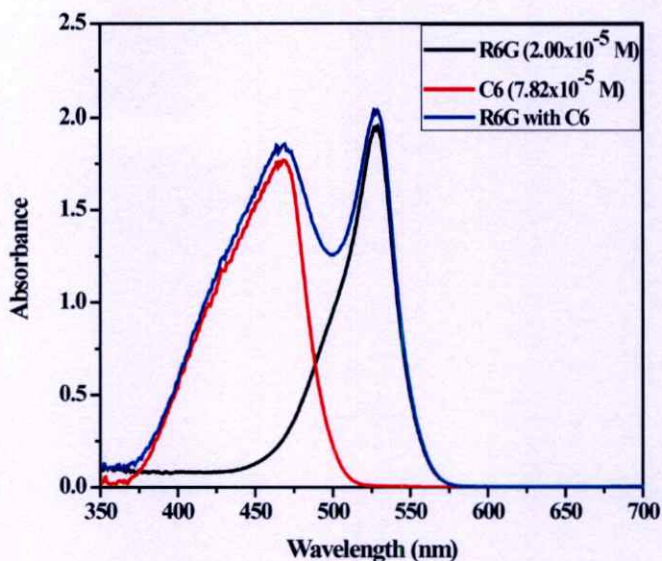
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 10



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 11



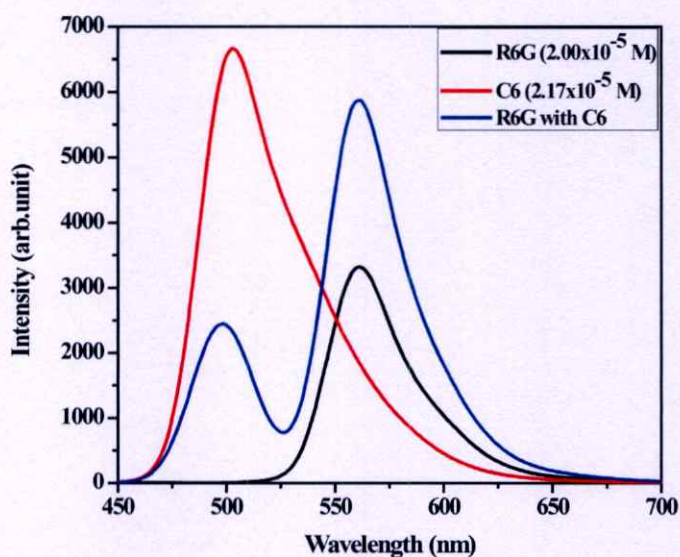
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 12



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 13

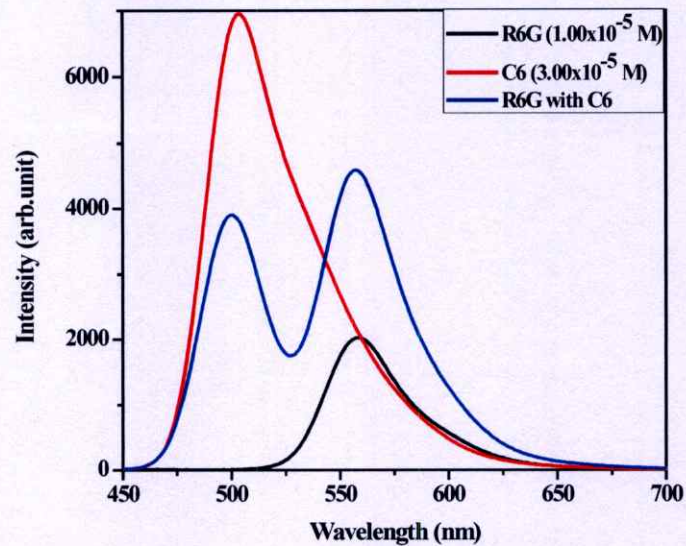
ซึ่งจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ทั้ง 13 เงื่อนไข พบว่ามีแนวโน้มการดูดกลืนในแบบเดียวกันคือหลังจากผสมสารทั้ง R6G และ C6 แล้ว สารผสมมีความสามารถในการดูดกลืนได้ทั้งสองช่วงความยาวคลื่น

จากการวัดการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ทั้ง 13 เงื่อนไข ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.18 – 4.30



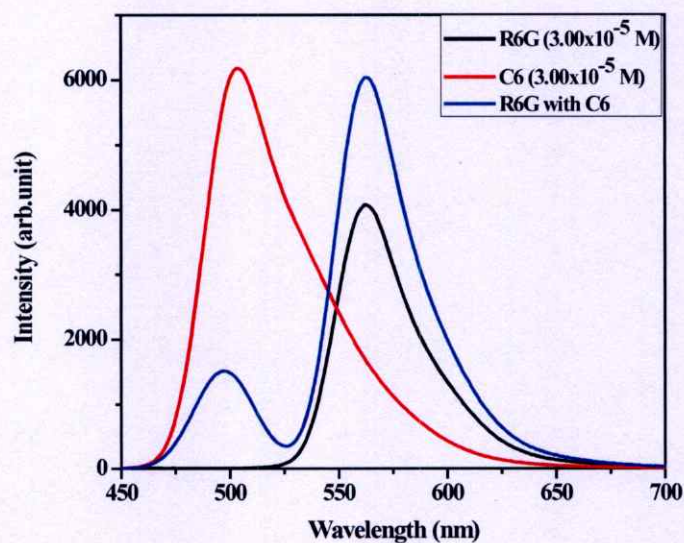
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 1

จากรูป 4.18 จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มการเปล่งแสงของสารผสม R6G กับ C6 มีค่าสูงขึ้นมาถึงเกือบ 6000 จากเดิมของสาร R6G อยู่ที่ประมาณ 3500 นั้นหมายความว่ามีการถ่ายเทพลังงาน



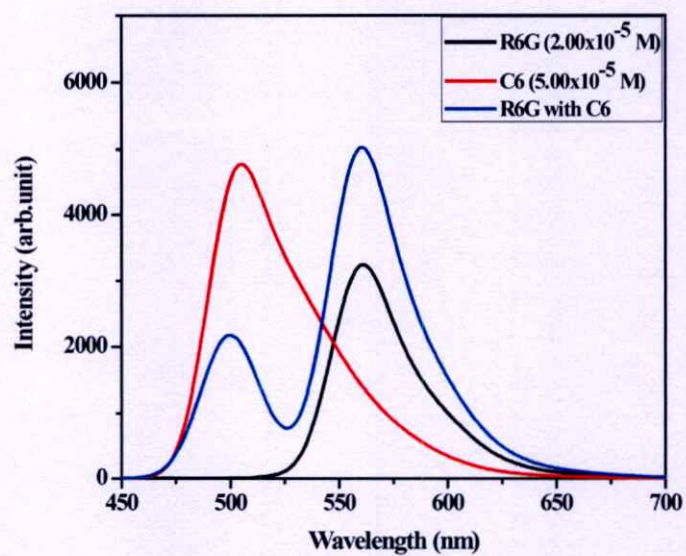
รูปที่ 4.19 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 2

จากรูปที่ 4.19 ค่าความเข้มการเปล่งแสงของ สาร R6G ผสมกับ C6 เริ่มที่จะมีค่ามากกว่าค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6G และมีค่าสูงกว่าค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร C6 ในย่านความยาวคลื่นเดียวกัน ซึ่งอาจมีการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้น

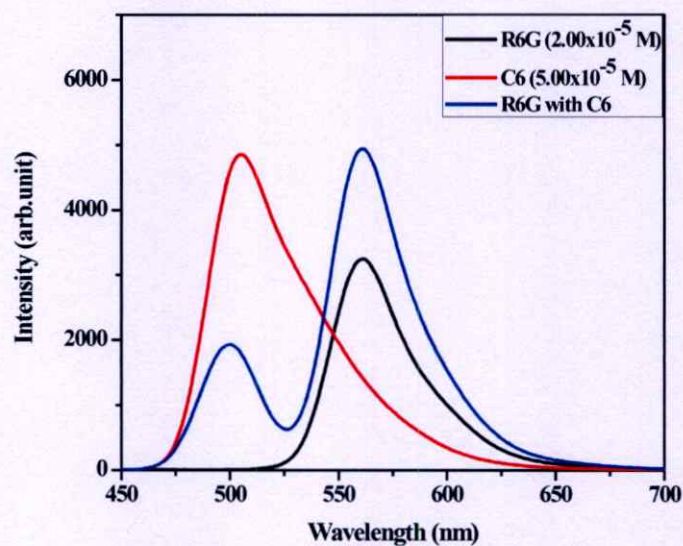


รูปที่ 4.20 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 3

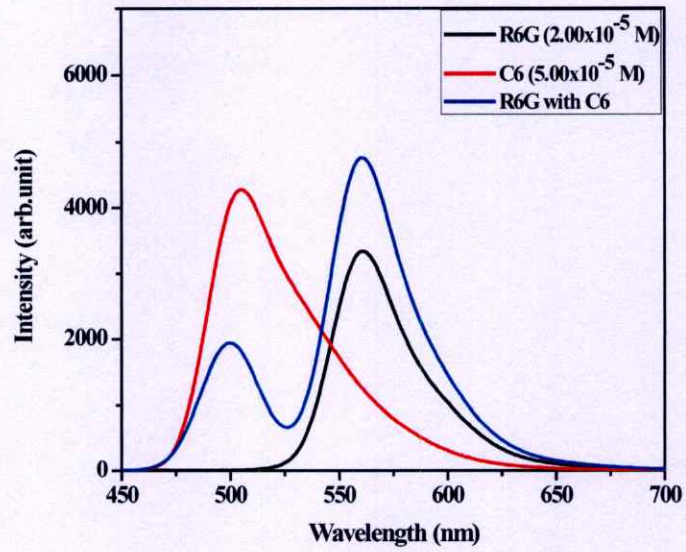
ในรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ชัดเจนเลยว่าเกิดการถ่ายเทพลังงานจากค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร C6 มาสู่สาร R6G ผสมกับ C6 เพราะค่าความเข้มการเปล่งแสงของสารดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นจากค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6G มาก แล้วยังสูงกว่าสารผู้ให้ในความยาวคลื่นย่านเดียวกัน



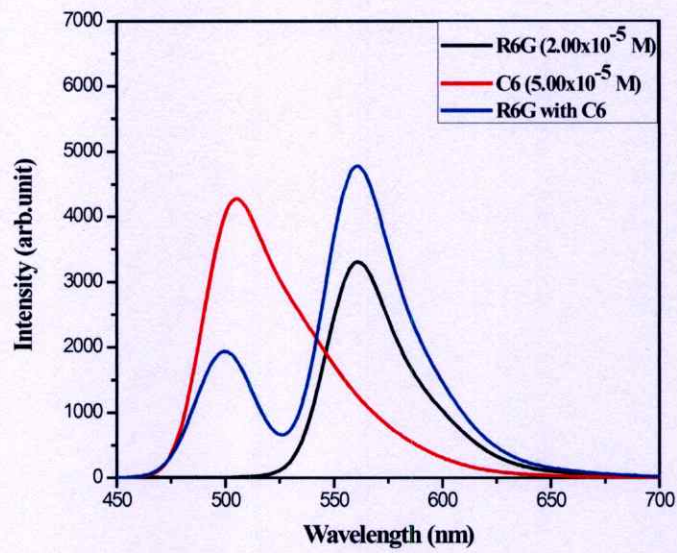
รูปที่ 4.21 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 4



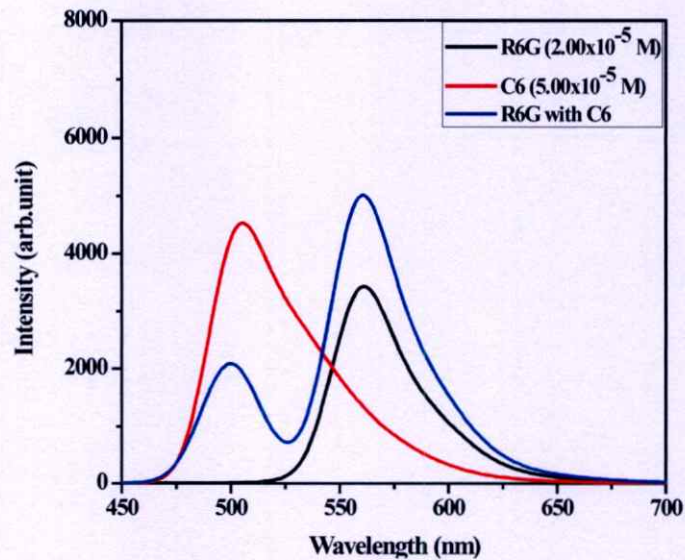
รูปที่ 4.22 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 5



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 6

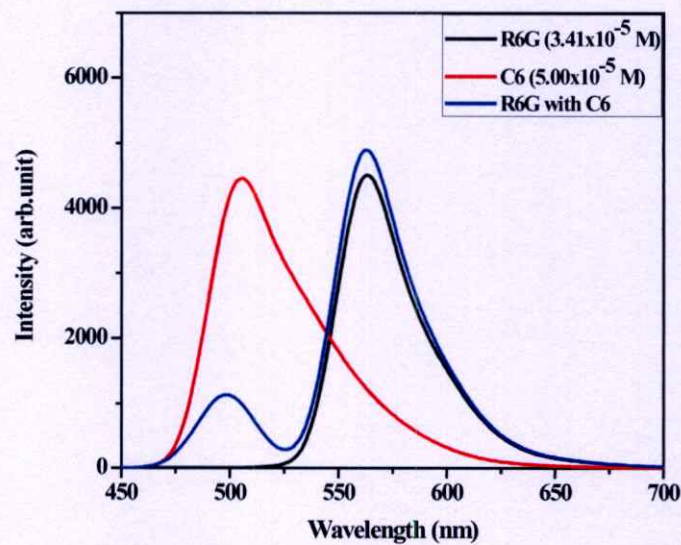


รูปที่ 4.24 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 7



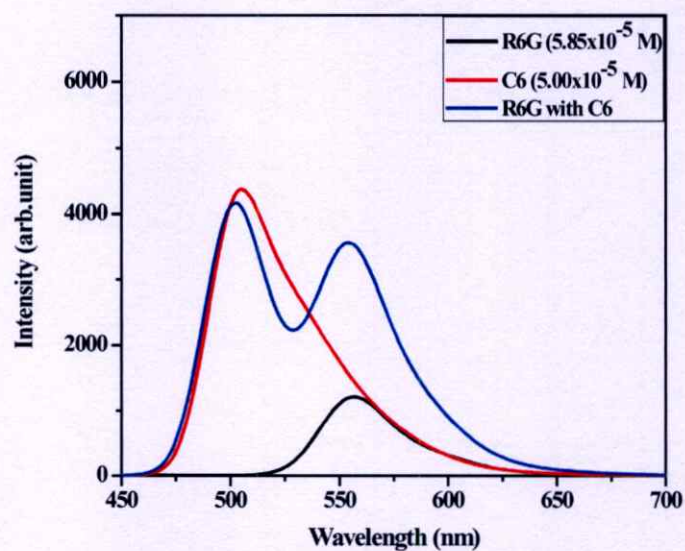
รูปที่ 4.25 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 8

และจากรูปที่ 4.21-4.25 จะเห็นได้ว่าบางเงื่อนไขค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6G ผสมกับ C6 มีค่าสูงกว่าค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6G ก็จริงแต่ก็ไม่ได้สูงกว่าค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร C6 ซึ่งน่าจะมาจากการที่มีการดูดกลืนซ้ำซ้อน

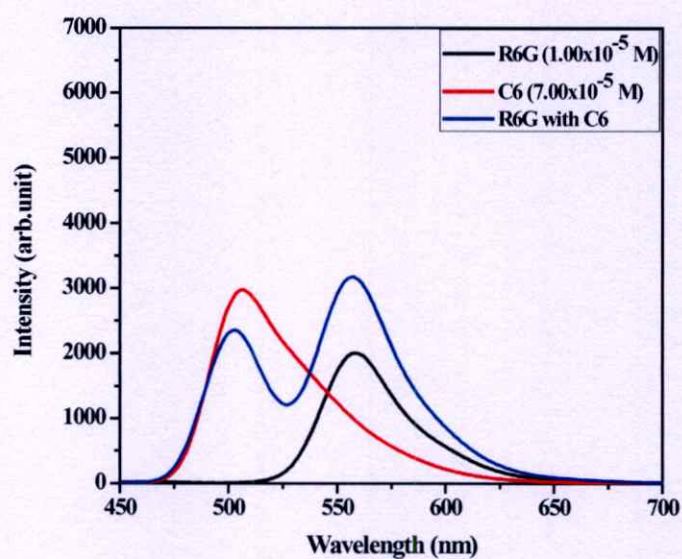


รูปที่ 4.26 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 9

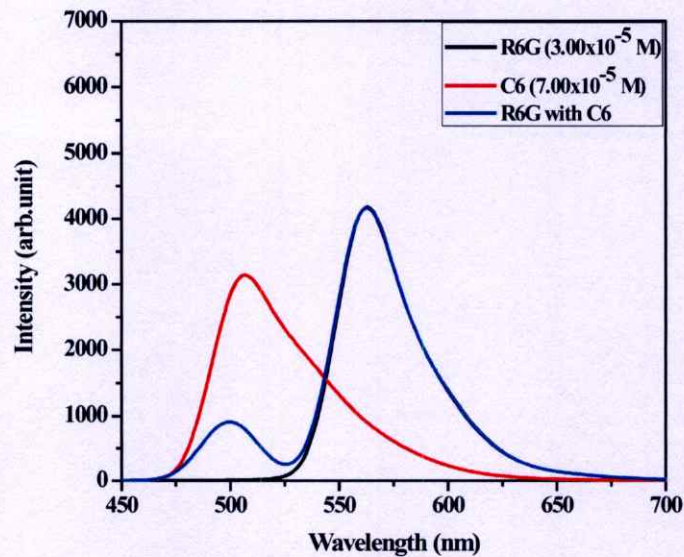
จากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6G ผสมกับ C6 มีการเปล่งแสงในความยาวคลื่นของ C6 ลดต่ำลงแต่มีค่าสูงขึ้นกว่าการเปล่งแสงในความคลื่นของ R6G แสดงว่ามีการถ่ายเทพลังงานให้กัน



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 10

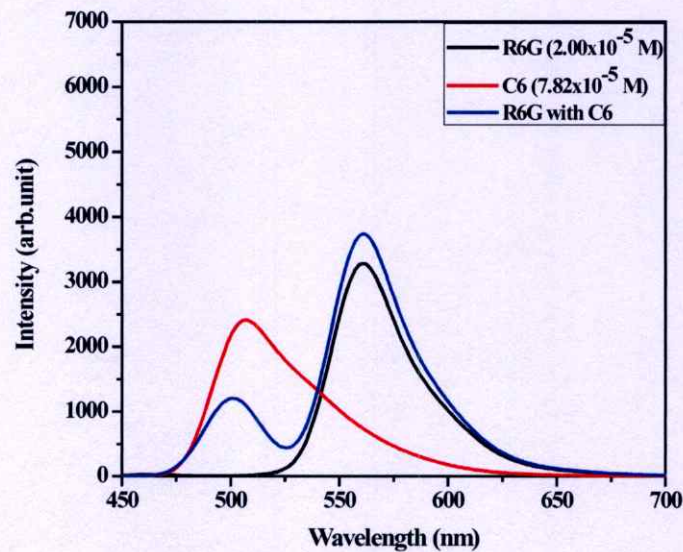


รูปที่ 4.28 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 11



รูปที่ 4.29 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 12

จากรูปที่ 4.29-4.30 เป็นเพียง 2 เงื่อนไขที่ค่าความเข้มข้นการเปล่งแสงของ C6 ต่ำกว่าของ R6G และ R6G ผสมกับ C6 เพราะว่าเป็นช่วงที่มีความเข้มข้นมากเกินไป แต่ในเงื่อนไขที่ 12 นี้ค่าความเข้มข้นการเปล่งแสงของ R6G และ R6G ผสมกับ C6 ใกล้เคียงกันมากอาจทำให้ไม่เกิดการถ่ายเทพลังงาน



รูปที่ 4.30 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G C6 และ R6G ที่ผสมกับ C6 ตามเงื่อนไขที่ 13

จากรูป 4.30 พบว่านี่อาจจะเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษาการถ่ายเทพลังงานของสารสีย้อมผู้ให้ C6 และสารสีย้อมผู้รับ R6G เพราะค่าความเข้มข้นการเปล่งแสงของสาร R6G ผสมกับ C6 มีค่าสูงกว่าค่าความเข้มข้นการเปล่งแสงของสารผู้ให้

และจากการทดลองเมื่อนำเอาค่าความเข้มการเปล่งแสงของทั้ง 13 เงื่อนไข กลับไปใส่ในโปรแกรม Design Expert ทำให้ได้สมการออกมา ดังสมการที่ 4.3

$$F = (1.14387 \times 10^8 \times C_D) - 551.07291 + (8.92706 \times 10^7 \times C_A) - (3.61125 \times 10^{11} \times C_D \times C_A) - (1.14229 \times 10^{12} \times C_D^2) - (1.96442 \times 10^{12} \times C_A^2) \quad (4.3)$$

เมื่อ F คือ ค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6G ผสมกับ C6

C_D คือ ค่าความเข้มข้นของสารผู้ให้ (C6)

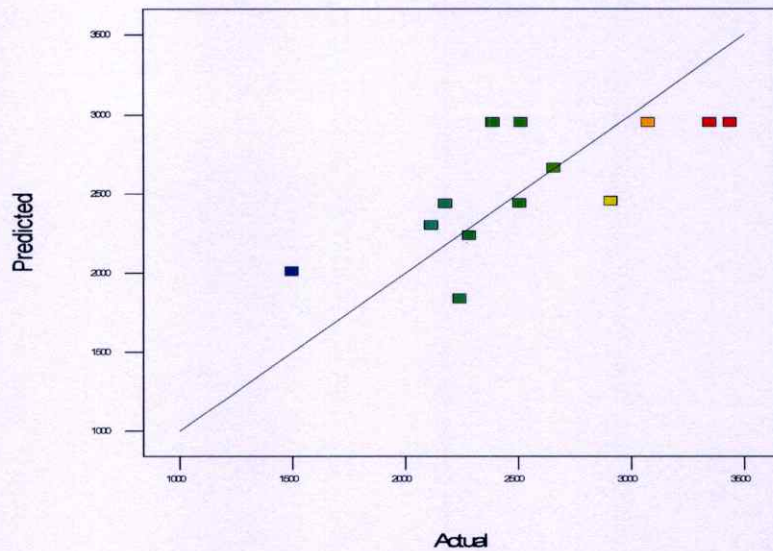
C_A คือ ค่าความเข้มข้นของสารผู้รับ (R6G)

ซึ่งสมการนี้ไม่มีความสัมพันธ์ โดยจะดูได้จากการวิเคราะห์ผลค่าความแปรปรวน (Anova) ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ผลของค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของการหาค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6G ผสมกับ C6

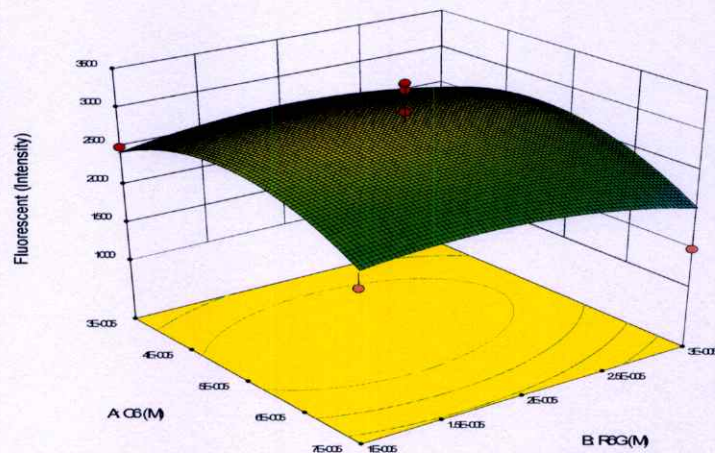
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-value	
Model	1.809×10^6	5	3.618×10^5	1.52	0.2951	not significant
A=C6	1.597×10^5	1	1.597×10^5	0.67	0.4391	
B=R6G	43366.76	1	43366.76	0.18	0.6819	
AB	20865.80	1	20865.80	0.088	0.7755	
A ²	1.452×10^6	1	1.452×10^6	6.12	0.0426	
B ²	2.684×10^5	1	2.684×10^5	1.13	0.3229	
Residual	1.662×10^6	7	2.374×10^5			
Lack of Fit	7.428×10^5	3	2.476×10^5	1.08	0.4533	not significant
Pure Error	9.192×10^5	4	2.298×10^5			
Cor Total	3.471×10^6	12				

โดยที่ในโมเดลนี้มีค่า p-value สูงกว่า 0.05 อันเป็นค่าที่ยอมรับได้ ทำให้ค่าความเข้มข้นของสารผู้ให้ และค่าความเข้มข้นของสารผู้รับ ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มการเปล่งแสงและเมื่อดูการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มการเปล่งแสงจริงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ เพื่อค่าสัมประสิทธิ์ R² ดังรูปที่ 4.31 พบว่าค่า R² มีค่าเพียง 0.5211



รูปที่ 4.31 กราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6G ผสมกับ C6 ที่วัดได้ กับที่คำนวณได้

และภาพสามมิติที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้ให้ (C6) และค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้รับ (R6G) กับค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6G ผสมกับ C6 ดังแสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 กราฟพื้นผิวตอบสนองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของ C6 และค่าความเข้มข้นของ R6G กับค่าความเข้มการเปล่งแสงของสาร R6G ผสมกับ C6

จากการการวัดหาค่าความเข้มการเปล่งแสงจะเห็นได้ว่าการถ่ายเทพลังงานจากสารสีย้อมผู้ให้ไปยังสารสีย้อมผู้รับ เมื่อนำผลจากการทดลองมาคำนวณดังสมการที่ 2.14 ซึ่งจะแสดงในตาราง 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าการถ่ายเทพลังงานที่เงื่อนไขในแต่ละความเข้มข้น

เงื่อนไข	ความเข้มข้น C6 (M)	ความเข้มข้น R6G (M)	ค่าการถ่ายเทพลังงาน	ค่าการแปลงของR6G ผสม C6
1	2.17×10^{-5}	2.00×10^{-5}	52.45×10^{-3}	5871.0
2	3.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	30.34×10^{-3}	4588.3
3	3.00×10^{-5}	3.00×10^{-5}	33.65×10^{-3}	6034.4
4	5.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}	24.68×10^{-3}	5027.2
5	5.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}	23.38×10^{-3}	4938.0
6	5.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}	18.80×10^{-3}	4761.6
7	5.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}	19.71×10^{-3}	4777.0
8	5.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}	26.44×10^{-3}	5011.0
9	5.00×10^{-5}	3.41×10^{-5}	6.77×10^{-3}	4892.0
10	5.00×10^{-5}	5.85×10^{-6}	10.11×10^{-3}	4164.3
11	7.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	10.75×10^{-3}	3176.0
12	7.00×10^{-5}	3.00×10^{-5}	-0.24×10^{-3}	4161.0
13	7.82×10^{-5}	2.00×10^{-5}	6.36×10^{-3}	3736.8

และเมื่อนำค่าการถ่ายเทพลังงานกลับไปวิเคราะห์ในโปรแกรมเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของสารผู้ให้และค่าความเข้มข้นสารผู้รับ กับค่าการถ่ายเทพลังงาน จะได้ออกมาดังสมการที่ 4.4

$$ET = 0.16974 - (1886.06514 \times C_D) - (5853.62338 \times C_A) + (8.2773 \times 10^7 \times C_D \times C_A) \quad (4.4)$$

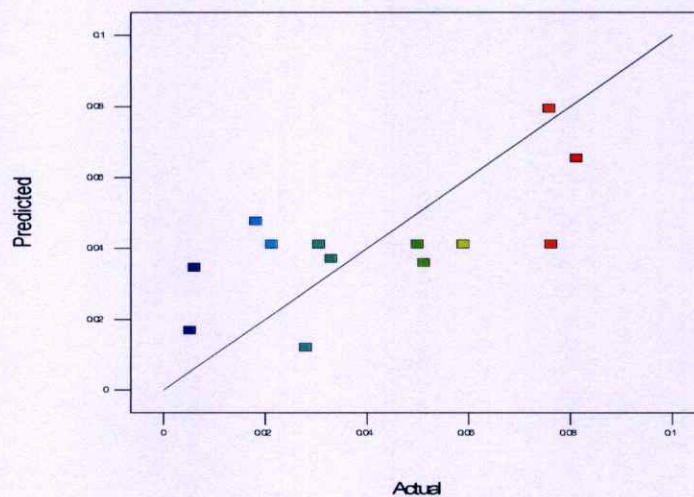
เมื่อ ET คือ ค่าการถ่ายเทพลังงาน
 C_D คือ ค่าความเข้มข้นของสารผู้ให้ (C_6)
 C_A คือ ค่าความเข้มข้นของสารผู้รับ (R_6G)

และในสมการที่ 4.4 นี้ไม่มีความสัมพันธ์โดยจะดูได้จากการวิเคราะห์ผลค่าความแปรปรวน (Anova) ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ผลของค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของการหาค่าการถ่ายเทพลังงานของสารสียอมผู้ให้ไปยังสารสียอมผู้รับ

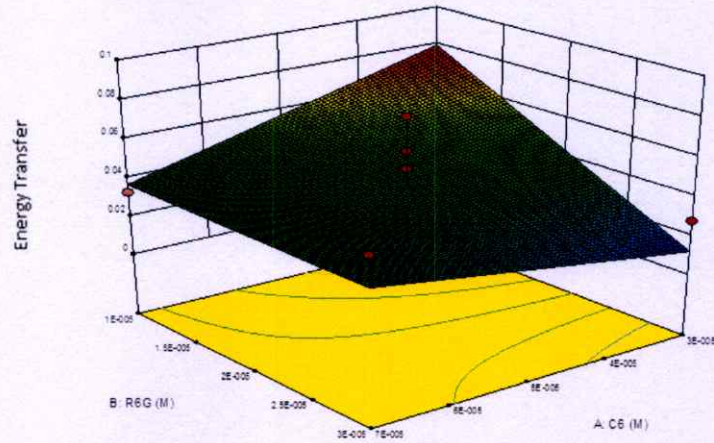
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-value	
Model	3.619×10^3	3	1.206×10^3	2.30	0.1461	not significant
A=C6	1.701×10^4	1	1.701×10^4	0.32	0.5830	
B=R6G	2.353×10^3	1	2.353×10^3	4.48	0.0633	
AB	1.096×10^3	1	1.096×10^3	2.09	0.1823	
Residual	4.724×10^3	9	5.248×10^4			
Lack of Fit	2.782×10^3	5	5.564×10^4	1.15	0.4602	not significant
Pure Error	1.941×10^3	4	4.854×10^4			
Cor Total	8.343×10^3	12				

จะเห็นได้ว่าในโมเดลนี้ ค่า p-value มีค่า 0.1461 ซึ่งมีค่าเกินค่าที่ยอมรับได้ที่ควรจะมีค่าไม่เกิน 0.05 ทำให้การทดลองนี้ไม่มีความสัมพันธ์กัน และเมื่อนำค่าการถ่ายเทพลังงานที่คำนวณได้จากการทดลอง มาเปรียบเทียบกับค่าการถ่ายที่พลังงานที่คำนวณได้จากสมการในโปรแกรม ทำให้ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.4338 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 กราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการถ่ายเทพลังงานที่คำนวณจากการทดลองและค่าการถ่ายเทพลังงานที่คำนวณได้จากสมการในโปรแกรม

และได้ภาพสามมิติที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารผู้ให้และค่าความเข้มข้นของสารผู้รับกับค่าการถ่ายเทพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 กราฟพื้นผิวตอบสนองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของ C6 และค่าความเข้มข้นของ R6G กับค่าการถ่ายเทพลังงาน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาแผ่นรวมแสงชนิดของเหลวในการแปลงพลังงานโดยการใส่สาร R6G เป็นสารสีย้อมหลักซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่การหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างอันเนื่องมาจากภาชนะสำหรับแผ่นรวมแสงชนิดของเหลวกับค่าความเข้มข้นของสาร R6G และการหาค่าความเหมาะสมของสารสีย้อมผู้ให้ C6 และ สารสีย้อมผู้รับ R6G เพื่อหาค่าการถ่ายเทพลังงาน โดยได้ใช้โปรแกรม Design Expert ในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 การหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารสีย้อม เพื่อหาค่าความเข้มข้นการเปล่งแสงและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

1. จากการทดลองพบว่าถ้าต้องการจะให้ค่าความเข้มข้นการเปล่งแสงที่สูง จำเป็นที่จะต้องใช้เงื่อนไขที่มีค่ากำลังขยายทางโครงสร้างสูงตามไปด้วย โดยจากผลที่ได้ทั้งหมดมีค่าความเข้มข้นการเปล่งแสงสูงที่สุดอยู่ที่ 43,013 ในเงื่อนไขของ ค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง 30 เท่า และมีค่าความเข้มข้นของสารสีย้อม 8.00×10^{-5} โมลาร์

2. การหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากการทดลองพบว่า ค่ากำลังขยายทางโครงสร้างที่สูงจะส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้สูงมากขึ้น โดยที่มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ค่า 16.41 ไมโครแอมแปร์/เซนติเมตร² ณ เงื่อนไข ค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง 30 เท่า และมีค่าความเข้มข้นของสารสีย้อม 8.00×10^{-5} โมลาร์ เช่นเดียวกัน

5.1.2 การหาค่าความเหมาะสมระหว่างค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้ให้และค่าความเข้มข้นของสารสีย้อมผู้รับ เพื่อหาค่าการถ่ายเทพลังงาน

ในการหาค่าการถ่ายเทพลังงานจำเป็นที่จะต้องใส่ค่าการเปล่งแสงของสารสีย้อม R6G ที่ผสมกับ C6 ในการคำนวณ จึงได้ทำการทดลองหาค่าความเข้มข้นการเปล่งแสงแล้วลองหาความสัมพันธ์เบื้องต้น ปรากฏว่าตัวแปรต้นทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นการเปล่งแสง

เมื่อคำนวณหาค่าการถ่ายเทพลังงานแล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับตัวแปรต้นทั้งสอง ผลที่ได้คือไม่มีความสัมพันธ์กับค่าการถ่ายเทพลังงาน ซึ่งจากผลการทดลอง เงื่อนไขที่มีการถ่ายเทพลังงานสูงที่สุดที่ความเข้มข้นสารผู้ให้ 2.17×10^{-5} โมลาร์ และ ความเข้มข้นสารผู้รับ 2.00×10^{-5} โมลาร์ ได้ค่าการถ่ายเทพลังงานเท่ากับ 52.45×10^{-3}

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบว่าปัญหาที่เกิดมาจากตัวทำละลายที่เป็นเอทานอลระเหยได้ไว แล้วด้วยเงื่อนไขที่มากทำให้เวลาจะทำการวัดสัญญาณสารบางส่วนอาจจะหายไปจนส่งผลกับค่าความเข้มข้น ซึ่งถ้าเปลี่ยนการทดลองจากสิ่งประดิษฐ์รวมแสงชนิดของเหลวให้กลายเป็นแบบฟิล์มบางก็อาจจะลดปัจจัยเสี่ยงนี้ได้

สำหรับงานที่จะวิจัยในอนาคต อาจจะมีการทดลองในเรื่องการหากระแสไฟฟ้าโดยกำหนดค่ากำลังขยายทางโครงสร้างให้คงที่แล้วปรับเปลี่ยนเพียงค่าความเข้มข้นของสารสีย้อม หรืออาจเปลี่ยนสารสีย้อม

เอกสารอ้างอิง

[1] W. H. Weber and John Lambe. (1976) Luminescent greenhouse collector for solar radiation. *Applied Optics*. Vol. 15, 2299-2300.

[2] Li C. et al., 2018. "Selective and differential detection of Hg^{2+} and Cu^{2+} with use of a single rhodamine hydrazone-type probe in the absence and presence of UV irradiation." *Dyes and Pigments*. 153 : 174-124.

[3] Abimbola O. 2018. "Solvent Effects on the Spectral Properties of Rhodamine 6G: Estimation of Ground and Excited State Dipole Moments." *J Solution Chem*. 47 : 203–219.

[4] Oreane Yasmin Edelenbosch. (2012) Luminescent Solar Concentrator with a Fibre Geometry, Imperial College of London, London, United Kingdom.

[5] Christian Würth, Martín G. González, Reinhard Niessner, Ulrich Panne, Christoph Haisch and Ute Resch Genger. (2012) Determination of the absolute fluorescence quantum yield of rhodamine 6G with optical and photoacoustic methods – Providing the basis for fluorescence quantum yield standards, *Talanta*. Vol.90, 30-37.

[6] แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม (2539). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ, กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์

[7] Amit Nag and Debabrata Goswami (2009) Solvent effect on two-photon absorption and fluorescence of rhodamine dyes, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. Vol.206, 188-197.

[8] Yang Jiao, Baocun Zhu, Jihua Chen and Xiaohong Duan.(2015) Fluorescent Sensing of Fluoride in Cellular System, *Theranostics* . Vol.5, 173-187

[9] Pilaipon Nuthongkum, Aparporn Sakulkalavek and Rachsak Sakdanuphab. (2016) RSM Base Study of the Effect of Argon Gas Flow Rate and Annealing Temperature on the [Bi]:[Te] Ratio and Thermoelectric Properties of Flexible Bi-Te Thin Film, *Electronic Materials*. Vol.46, 2900-2907; doi: 10.1007/s11664-016-5024-1

[10] Frank M. Fabian. (2012) Application of Response Surface Methodology and Central Composite Design for 5p12-Rantes Expression in The pichia pastoris, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, USA.

[11] Marcin Dutka, Mario Ditaranto and Terese Løvås. (2015) Application of a Central Composite Design for the Study of NOx Emission Performance of a Low NOx Burner, *Energies*. Vol.8, 3606-3627; doi:10.3390/en8053606.

[12] จรัล ทรัพย์เสรี (2552), DOE ตอน Central Composite Design [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/FQ145_p72-74.pdf เข้าดูเมื่อวันที่ 4/4/2560.

[13] S.Gangopadhyay, M.W.Pleil and W.L.Borst. (1987) Study of energy transfer in a solution of coumarin 460 and rhodamine 6G by time-resolved laser-induced fluorescence spectroscopy, *Journal of Luminescence*. Vol.39, 105-110 ; doi:10.1016/0022-2313(87)90037-8

[14] Debabrata Seth, Debdeep Chakrabarty, Anjan Chakraborty and NilmoniSarkar. (2005) Study of energy transfer from 7-amino coumarin donors to rhodamine 6G acceptor in non-aqueous reverse micelles, *Chemical Physics Letters* . Vol 401, 546-552; DOI: 10.1016/j.cplett.2004.11.119

[15] Shahin G. et al. 2009. "Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum." *Journal of Hazardous Materials*. 163 : 650–656.

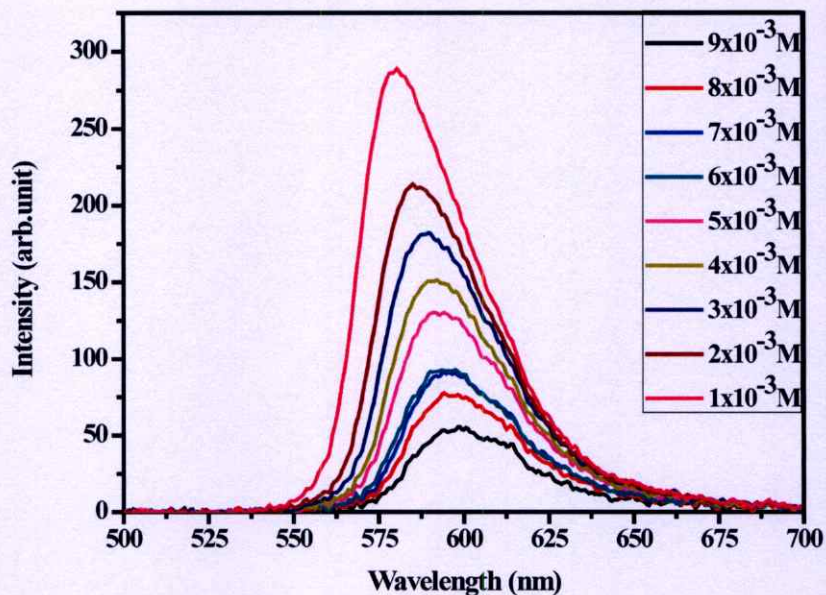
[16] Keshani S. et al. 2010. "Optimization of concentration process on pomelo fruit juice using response surface methodology (RSM)." *International Food Research Journal*. 17: 733-742.

[17] Adewale O. et al. 2015. "Optimization of microwave drying conditions of two banana varieties using response surface methodology." *Food Sci. Technol*. 35(3) : 438-444.

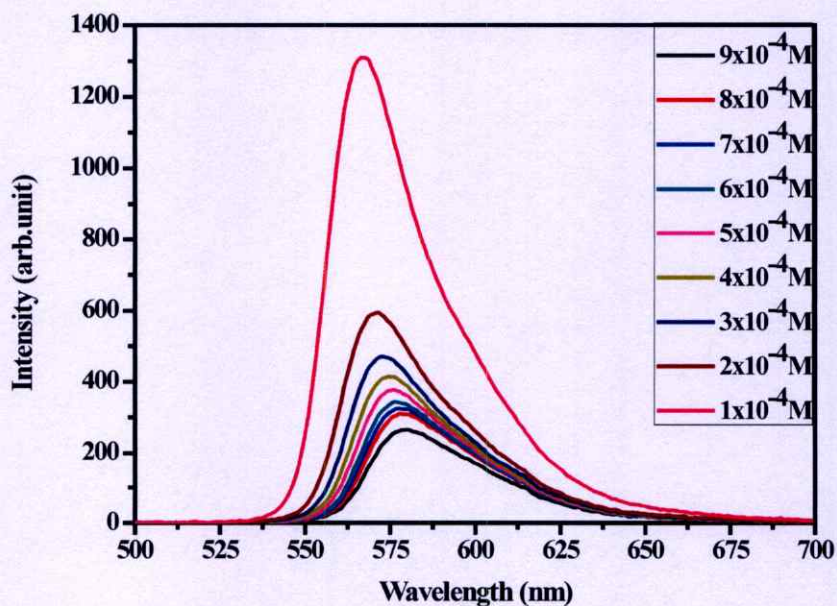
[18] I. Noshadi. et. al. 2012. "Continuous production of biodiesel from waste cooking oil in a reactive distillation column catalyzed by solid heteropolyacid: Optimization using response surface methodology (RSM)." *Fuel* 94 : 156–164.

ภาคผนวก ก

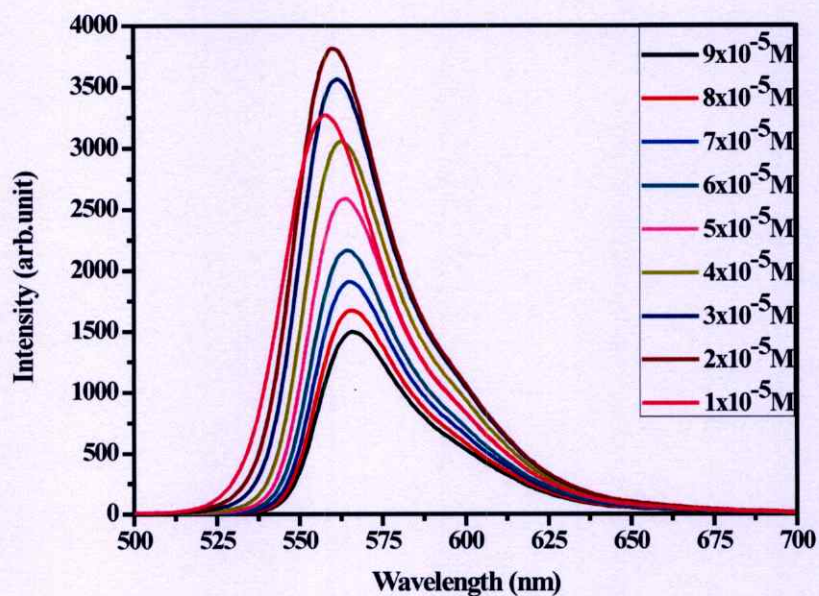
จากการทดลองที่ต้องการกำหนดเงื่อนไขค่าความเข้มข้นของสาร R6G ผู้วิจัยได้ทดลองวัดค่าสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร R6G ที่ค่าความเข้มข้นตั้งแต่ 1×10^{-7} ถึง 9×10^{-3} โมลาร์ ที่แสดงดังรูป ก.1 ถึง ก.5



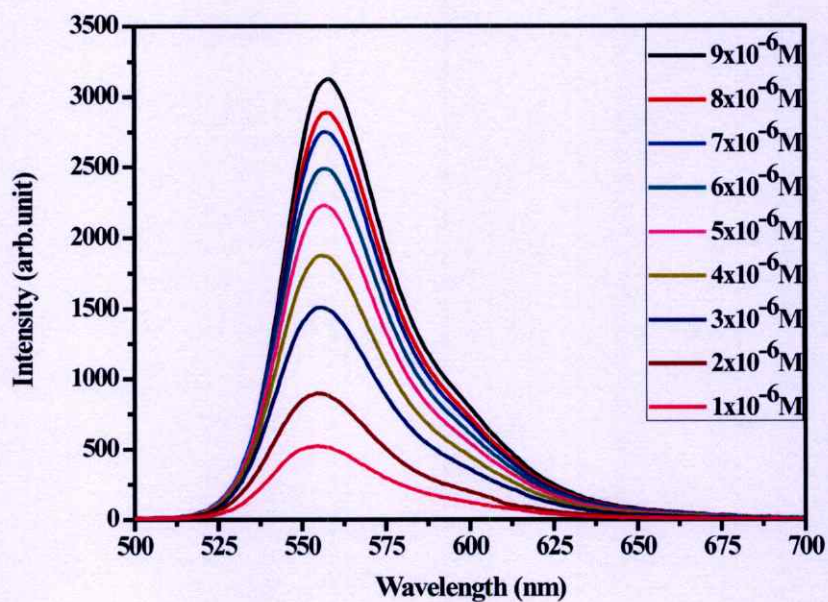
รูปที่ ก.1 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-3} ถึง 9×10^{-3} โมลาร์



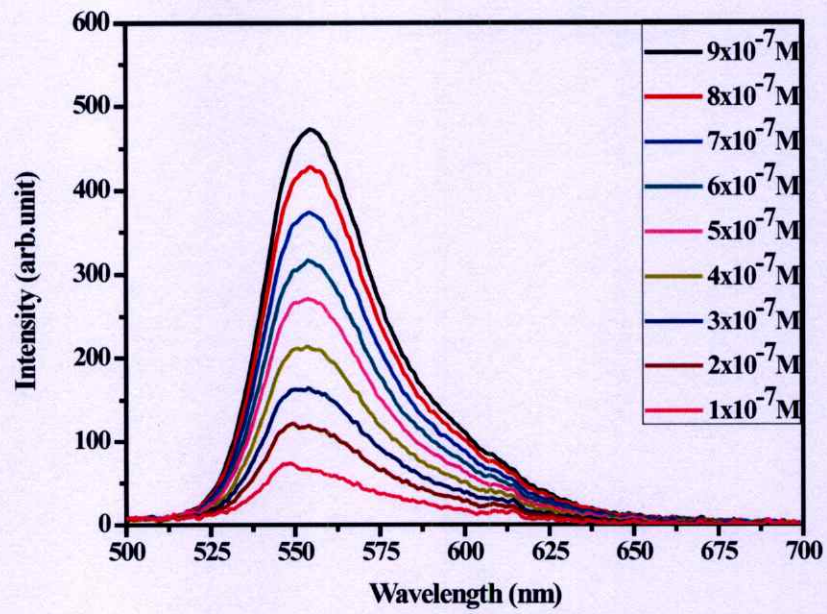
รูปที่ ก.2 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-4} ถึง 9×10^{-4} โมลาร์



รูปที่ ก.3 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-5} ถึง 9×10^{-5} โมลาร์



รูปที่ ก.4 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} ถึง 9×10^{-6} โมลาร์



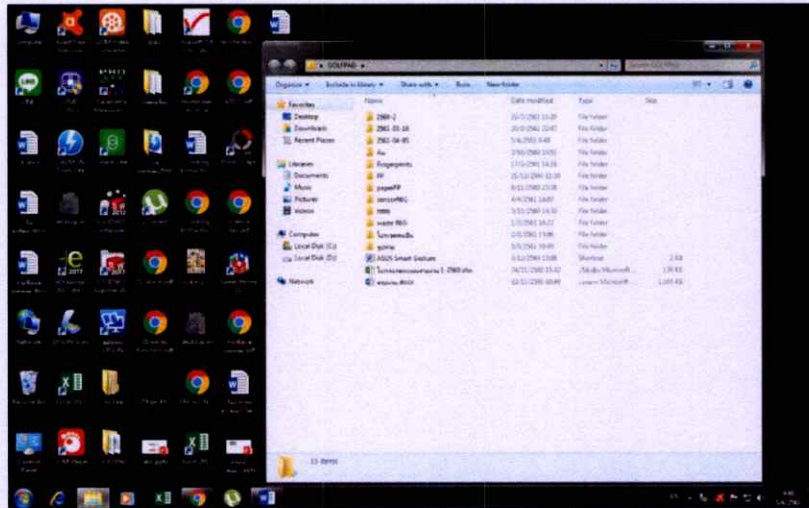
รูปที่ ก.5 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ R6G ที่ความเข้มข้น 1×10^{-7} ถึง 9×10^{-7} โมลาร์

ภาคผนวก ข

การใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น AvaSpec-EDU สำหรับโปรแกรม AvaSoft 7.4 USB 2

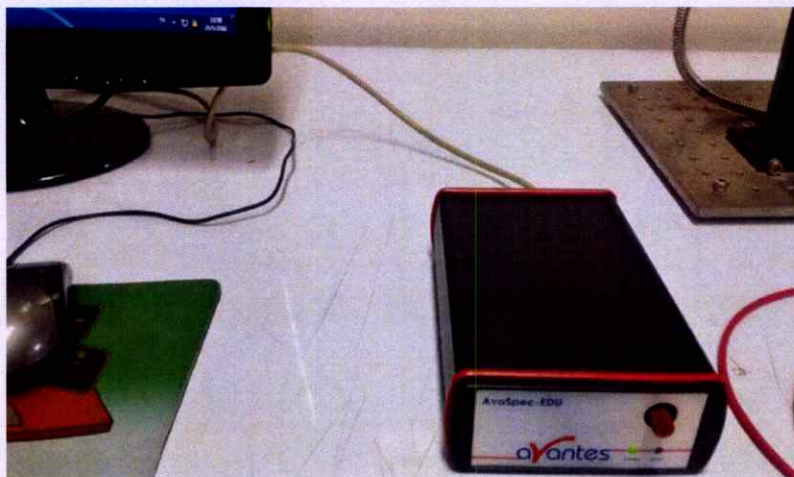
1. ตั้งค่าโปรแกรม AvaSoft 7.4 USB 2

1.1 สร้าง Folder งานที่ต้องการเก็บข้อมูล



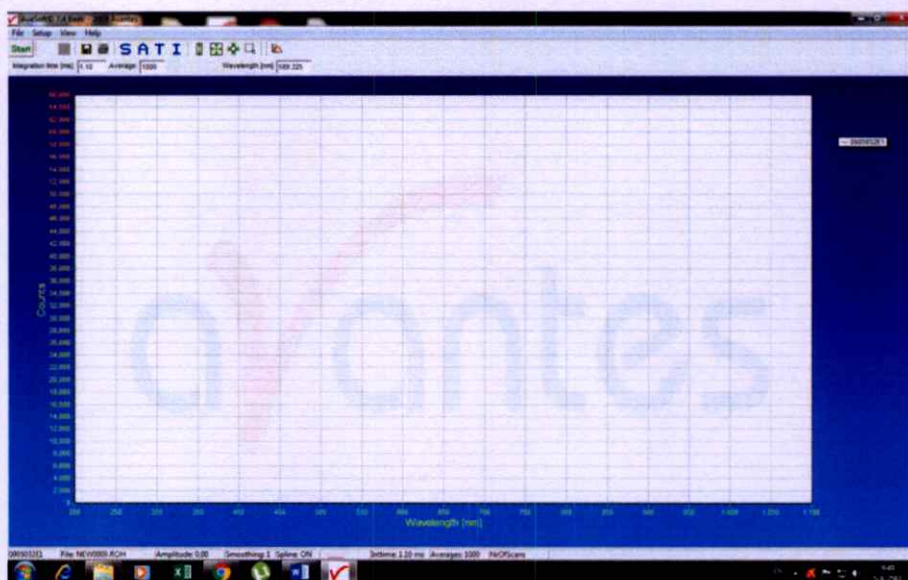
รูปที่ ข.1 โฟลเดอร์ที่ต้องการเก็บข้อมูล

1.2 ต่อสาย USB จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์เข้ากับคอมพิวเตอร์ โดยสาย USB จะต่อทางด้านหลังของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์



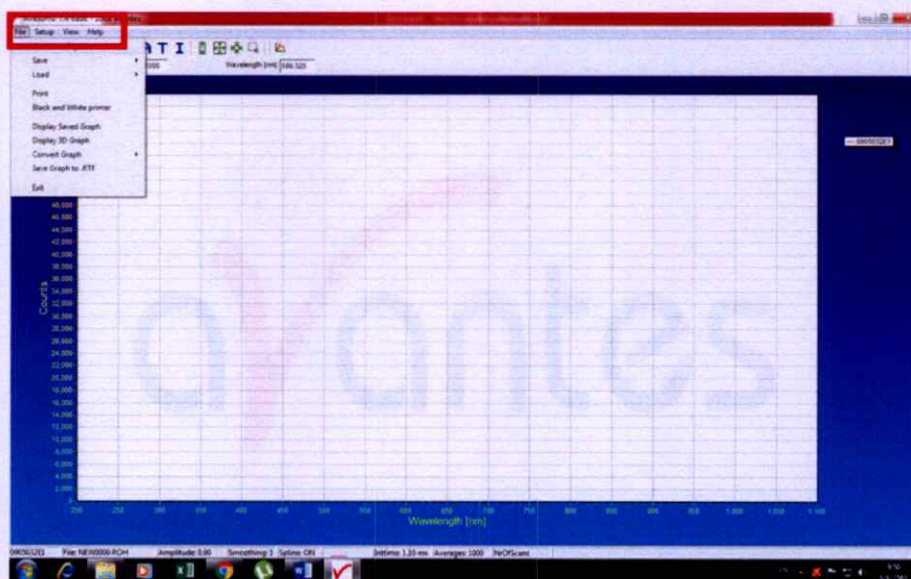
รูปที่ ข.2 การเชื่อมต่อเครื่องสเปกโตรมิเตอร์กับคอมพิวเตอร์

1.3 เปิดโปรแกรม Avasoft 7.4 ขึ้นมา



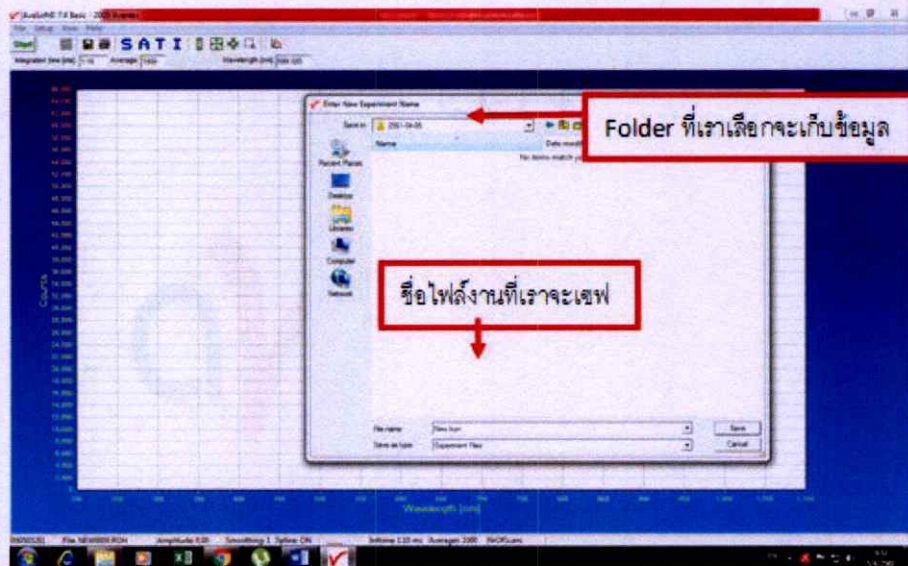
รูปที่ ข.3 หน้าโปรแกรม Avasoft 7.4

1.4 ตั้งค่าเครื่องก่อนโดยการคลิก file > Start New Experiment



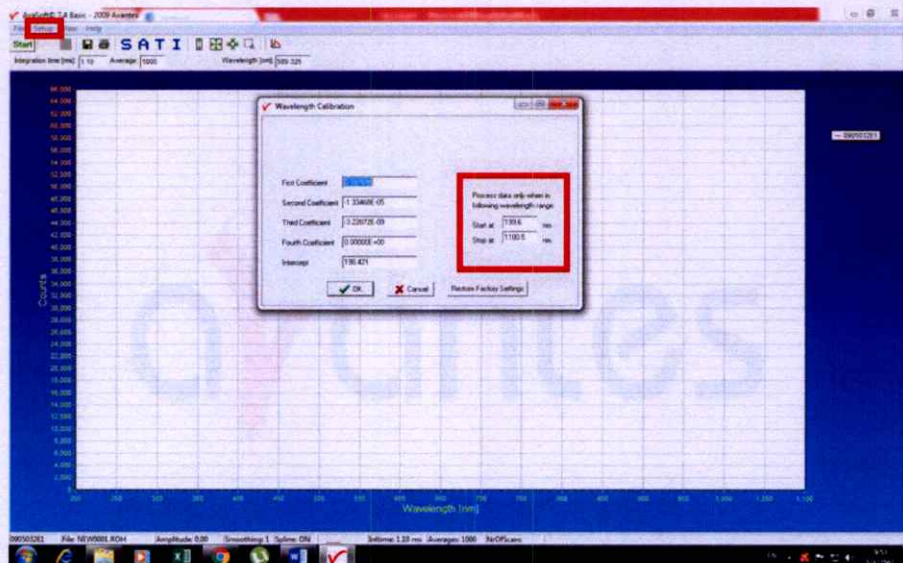
รูปที่ ข.4 การตั้งค่าก่อนเริ่มต้นใช้เครื่องสเปกตรัม

1.5 เลือก Folder ที่เราสร้างไว้ในข้อที่ 1 จากนั้นเลือกชื่อไฟล์งานที่เราต้องการเซฟงาน จากนั้นกด Save



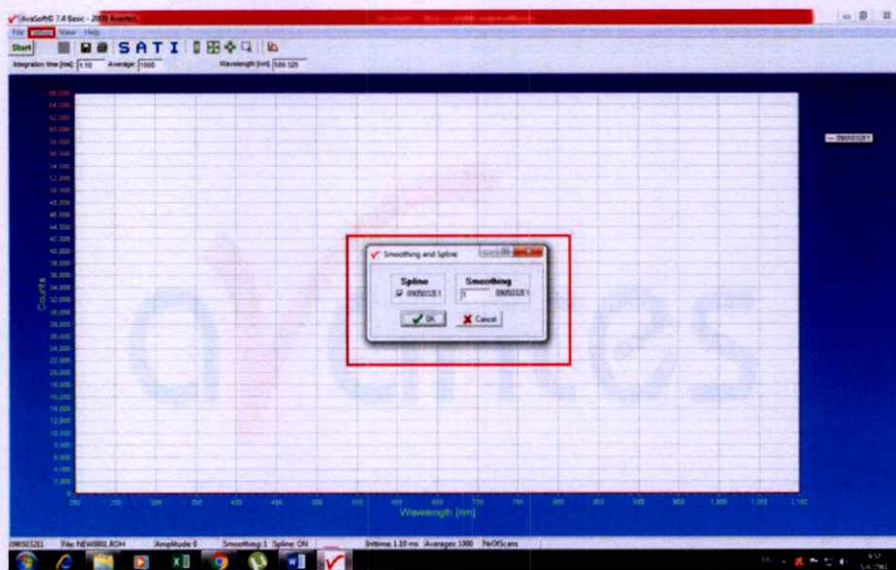
รูปที่ ข.5 ตั้งชื่อไฟล์ที่ต้องการบันทึก

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



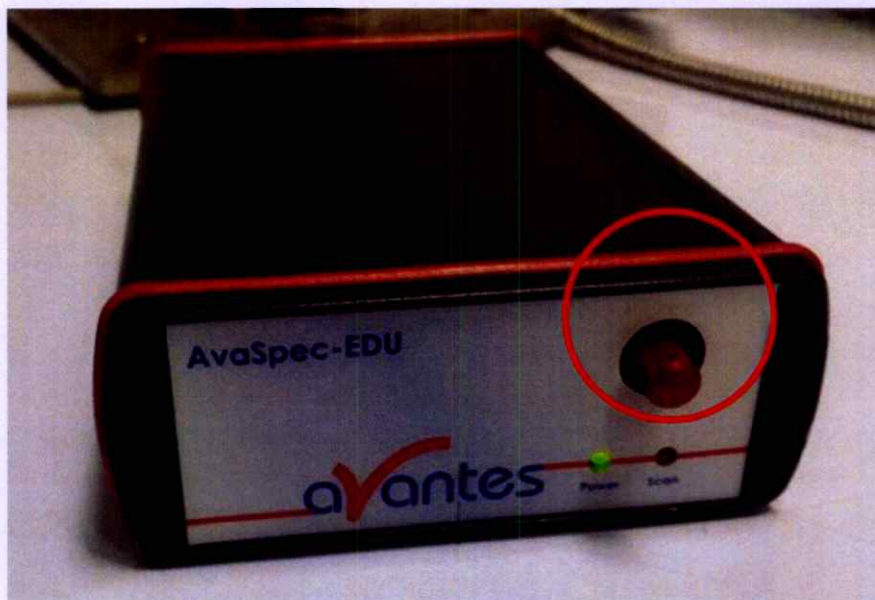
รูปที่ ข.6 การสอบเทียบค่าคงที่ของความยาวคลื่น

1.7 กด Setup > Smoothing and Spline ให้ข้อมูลเป็นดังรูป กด OK



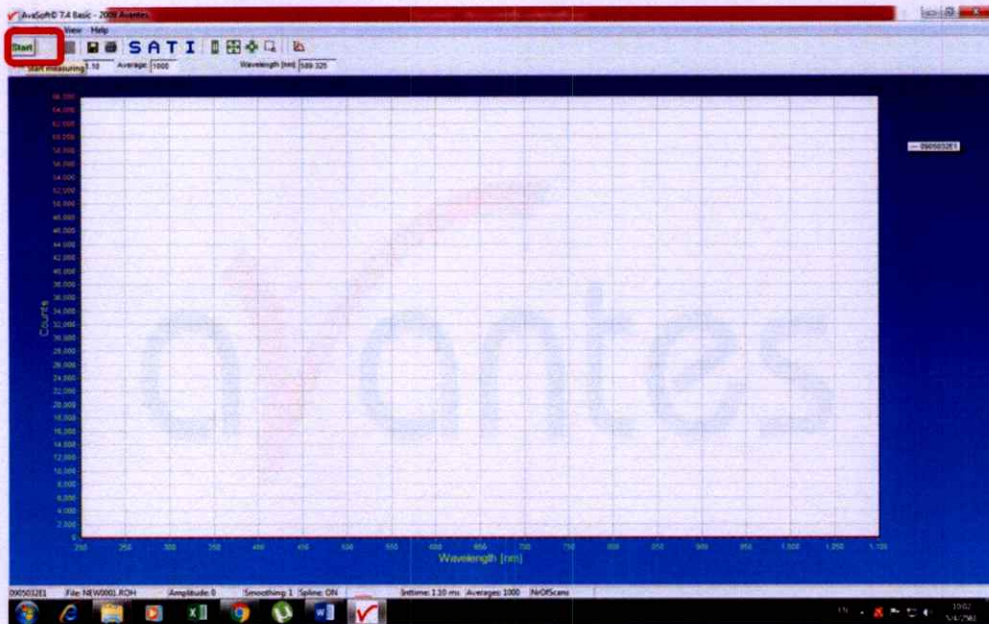
รูปที่ ข.7 การใช้ฟังก์ชัน smoothing และ spline

1.8 ปิดรูรับแสงเพื่อทำการวัด Dark



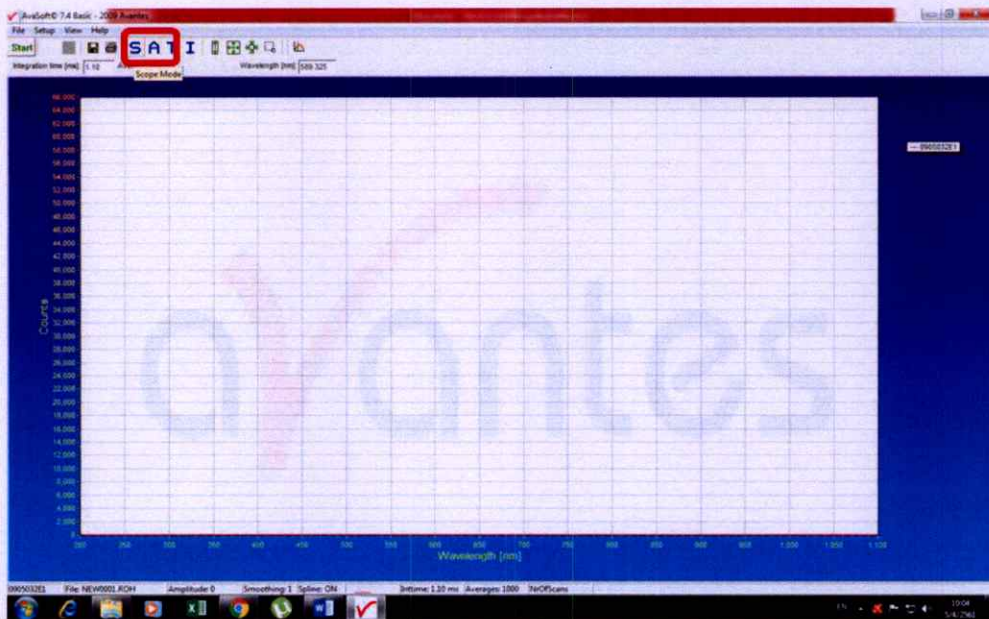
รูปที่ ข.8 การวัด dark

1.9 เริ่มการวัด Dark ด้วยการกด Start



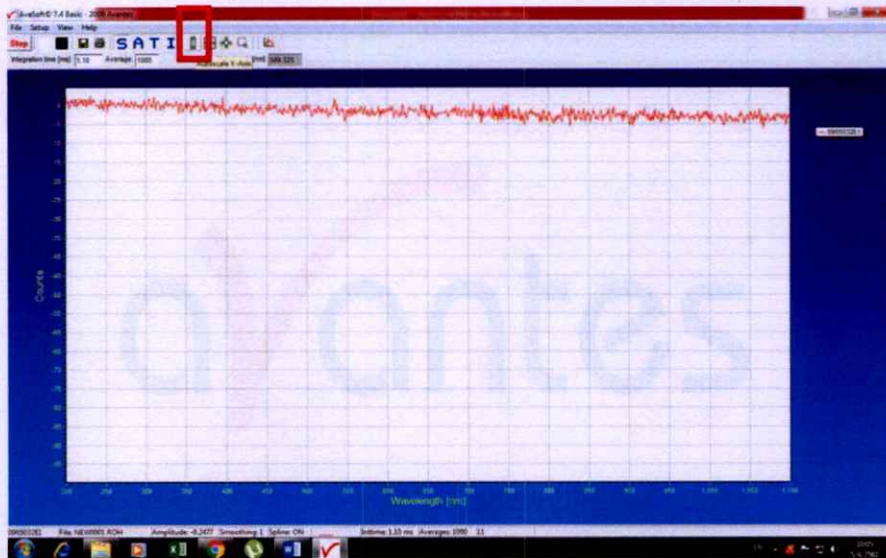
รูปที่ ข.9 การวัด Dark

1.10 กดวัดโหมด S (Scope Mode)



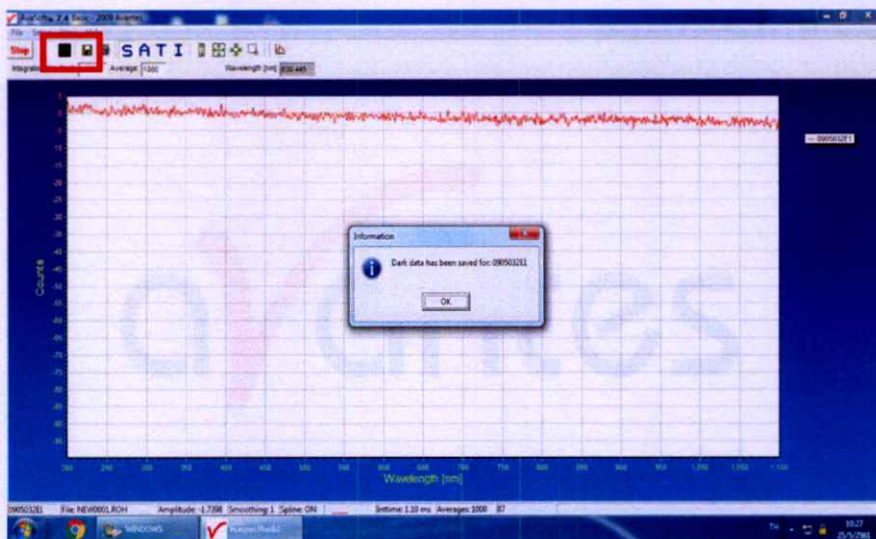
รูปที่ ข.10 การวัดในโหมด Scope

1.11 กดปุ่ม Autoscale Y-Axis จะขึ้นเส้นกราฟสีแดงมีความเป็นเส้นตรงเนื่องจากไม่มีสเปกตรัมแสง



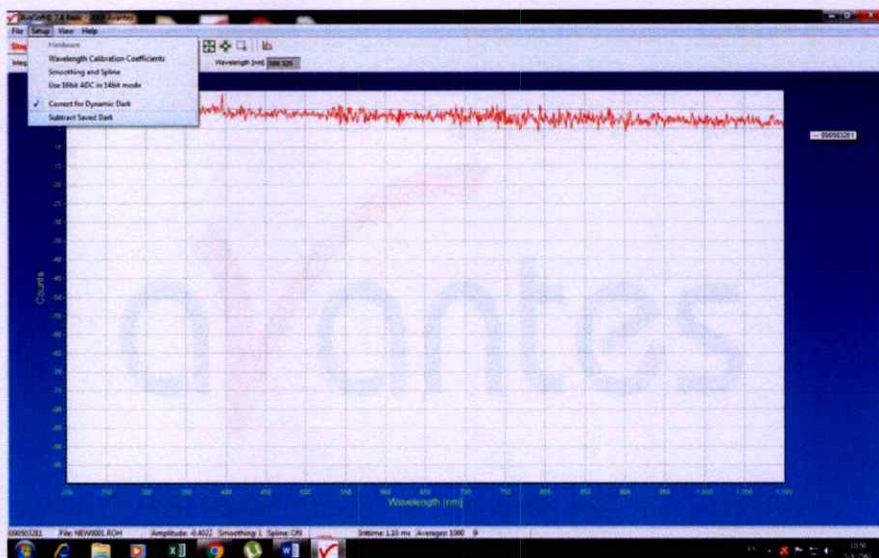
รูปที่ ข.11 การทำปรับสเกลตามแนวแกน Y

1.12 กด Save Dark (สี่เหลี่ยมสีดำ) > OK



รูปที่ ข.12 กดบันทึก Dark

1.13 คลิก Setup > Subtract Saved Dark



รูปที่ ข.13 การบันทึก Subtract Save Dark

2. การวัดค่าต่างๆ

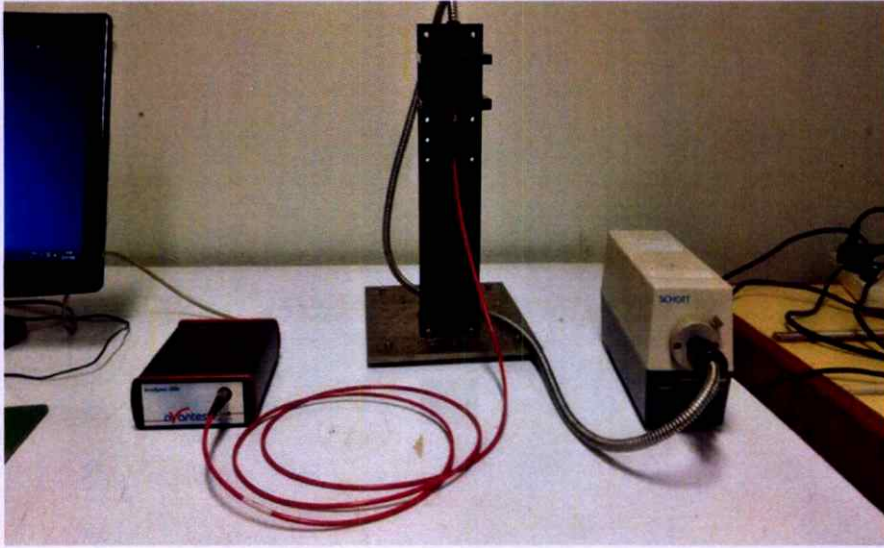
การวัดสเปกตรัมแสงทั่วไป คือต้องการวัดความยาวคลื่นแสงหรือวัดการเปล่งแสงก็ทำการวัดโหมด S

2.1 ต่อสายไฟเบอร์เข้ากับรูรับแสงของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ด้วยความระมัดระวัง



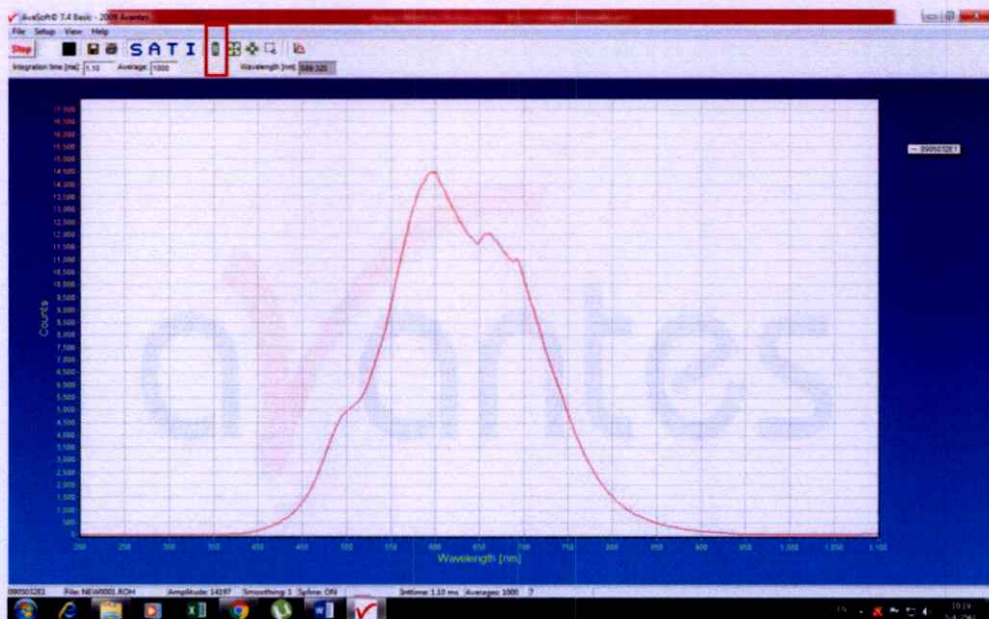
รูปที่ ข.14 ต่อสายไฟเบอร์เข้ากับรูรับแสงของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

2.2 สายไฟเบอร์อีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับแสงที่เราต้องการวัด



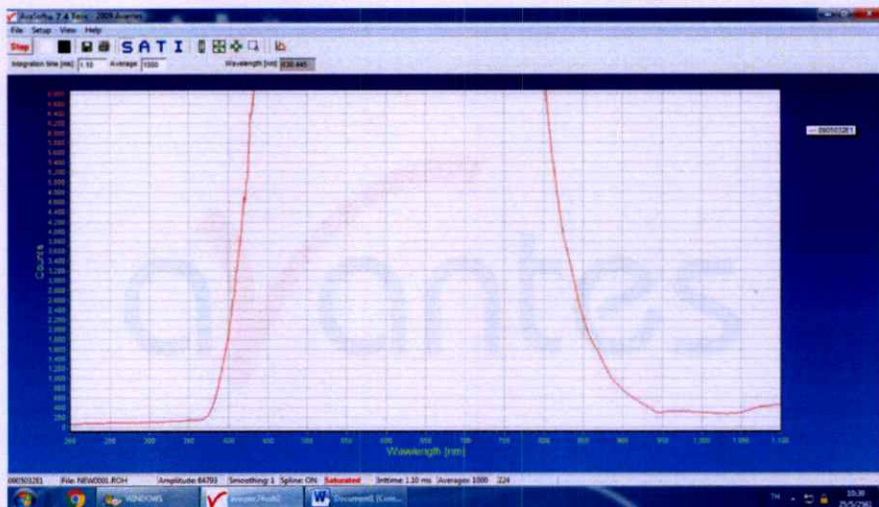
รูปที่ ข.15 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสเปกตรัม

2.3 ได้สเปกตรัมแสงตามรูป แกน X คือความยาวคลื่น (นาโนเมตร) แกน Y คือค่าความเข้ม (a.u.) ถ้าไม่ขึ้นดังรูปให้กด Autoscale Y-Axis



รูปที่ ข.16 สเปกตรัมแสง

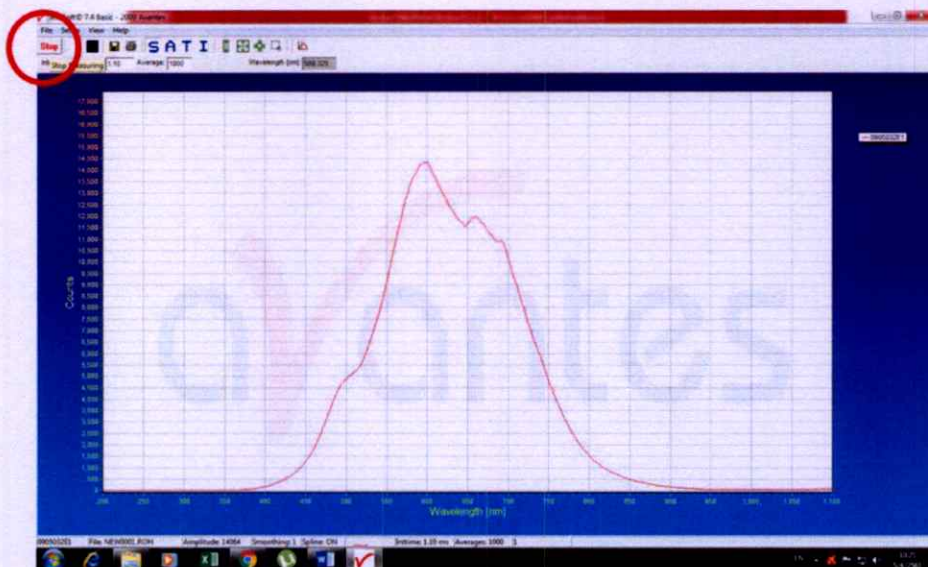
- 2.4 ห้ามให้แสงมีความเข้มมากเกินไปจะทำให้เกิดการ Saturated จะทำให้เครื่องฟังได้แก้ไขโดยการปรับความเข้มแสงลดน้อยลงหรือให้ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับสายไฟเบอร์ที่ต่อกับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์มีระยะห่างกันมากขึ้น



รูปที่ ข.17 สเปกตรัมของแสงที่เกิดการอิ่มตัวมากเกินไป

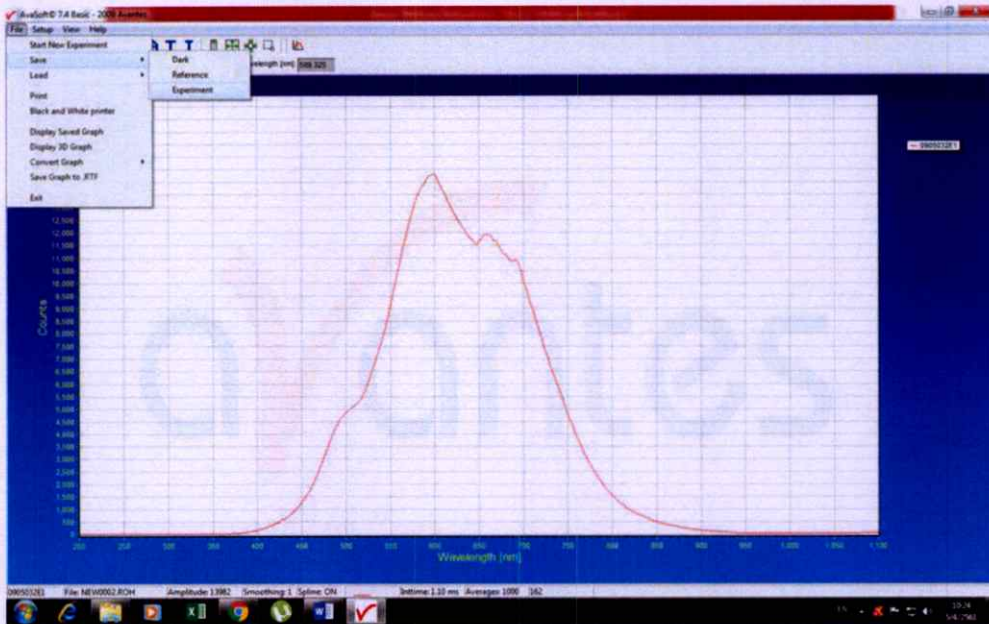
3. การบันทึกงาน

- 3.1 กด Stop มันคืออันเดียวกับ Start



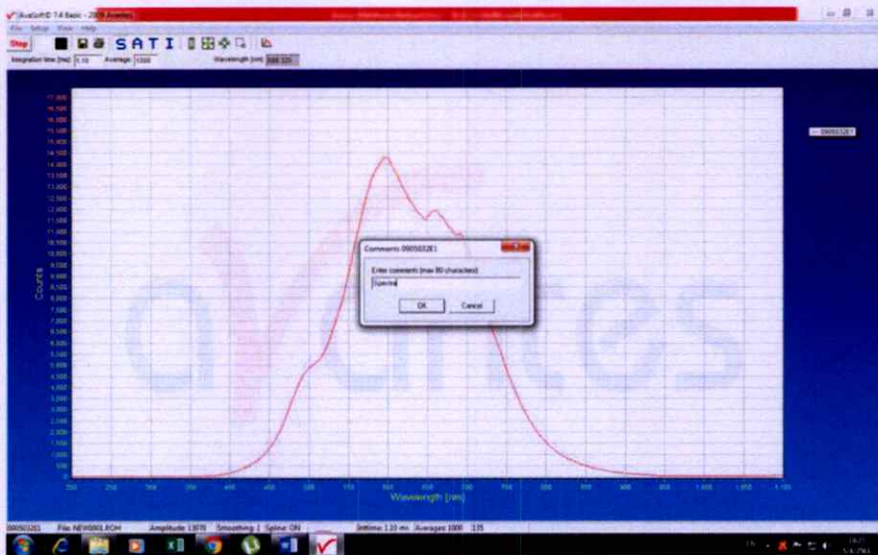
รูปที่ ข.18 การหยุดการวัดสเปกตรัม

3.2 กด File > Save > Experiment



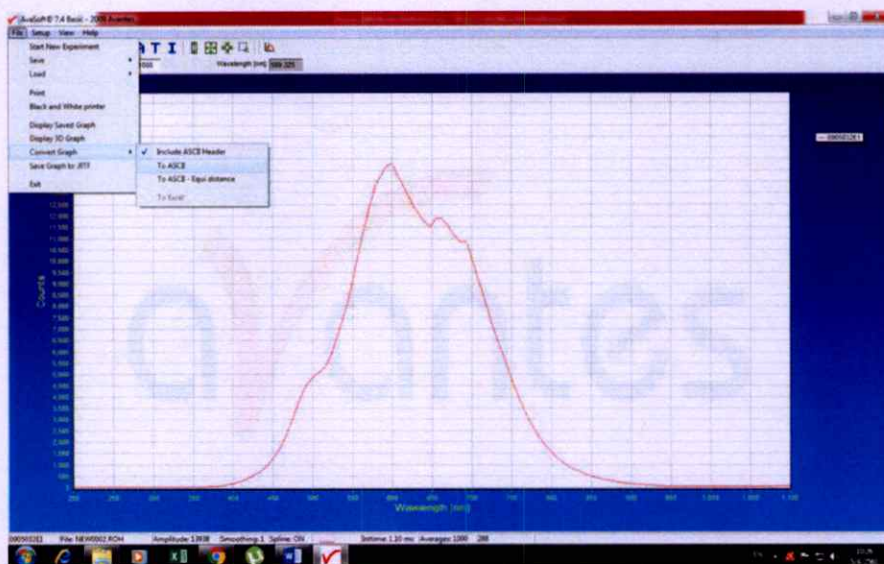
รูปที่ ข.19 การกดบันทึกไฟล์

3.3 จะให้เราใส่ชื่อกราฟที่เราวัดได้ เช่น Spectra จากนั้น คลิก OK



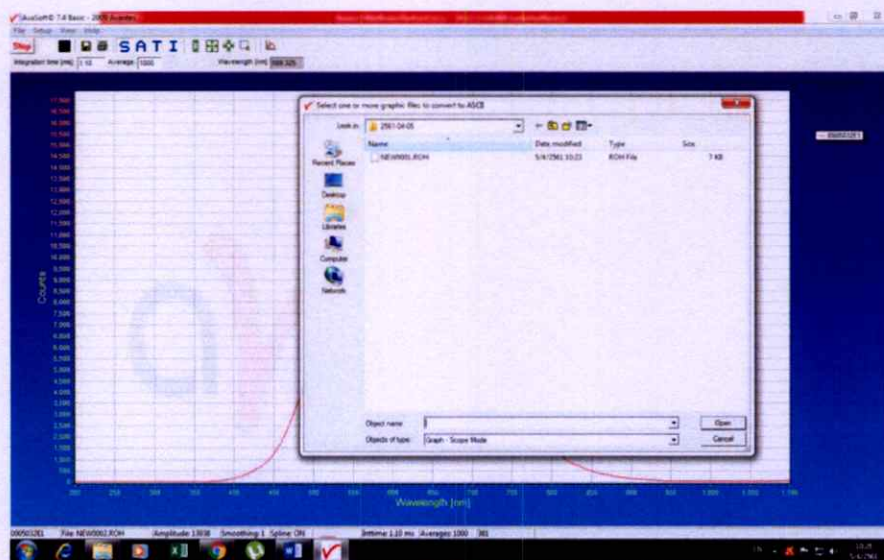
รูปที่ ข.20 การตั้งชื่อสเปกตรัมที่เราวัดได้ในไฟล์

3.4 กดที่ File > Convert Graph > To ASCII



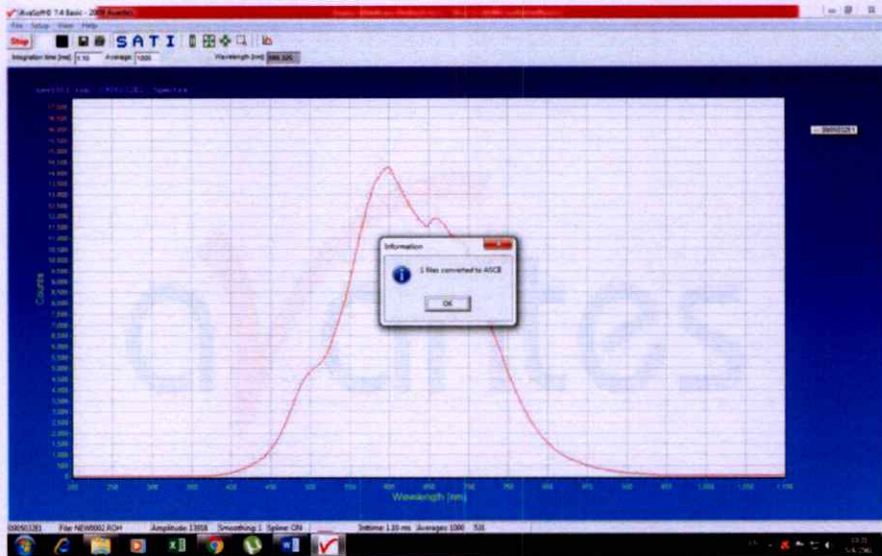
รูปที่ ข.21 การบันทึกแบบ ASCII

3.5 สังเกตความถูกต้องของโพลเดอร์ที่เราสร้างไว้และชื่องานที่เราตั้งชื่อ



รูปที่ ข.22 ตรวจสอบชื่อโพลเดอร์ที่ต้องการบันทึก

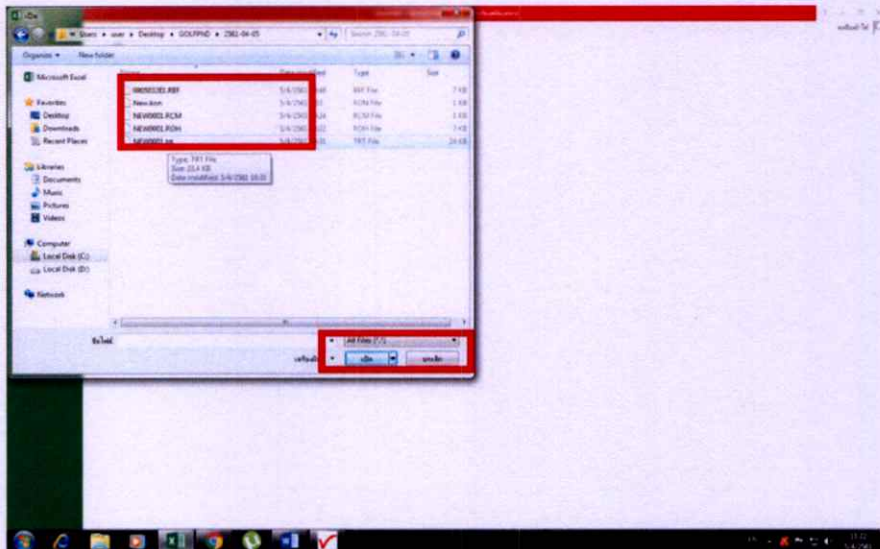
3.6 คลิกที่ไฟล์งานจะเห็นว่ามันจะขึ้นชื่อกราฟที่เราตั้งชื่อไว้ว่า Spectra จากนั้น คลิก Open แล้วกด OK



รูปที่ ข.23 การบันทึกสเปกตรัมที่เสร็จสมบูรณ์

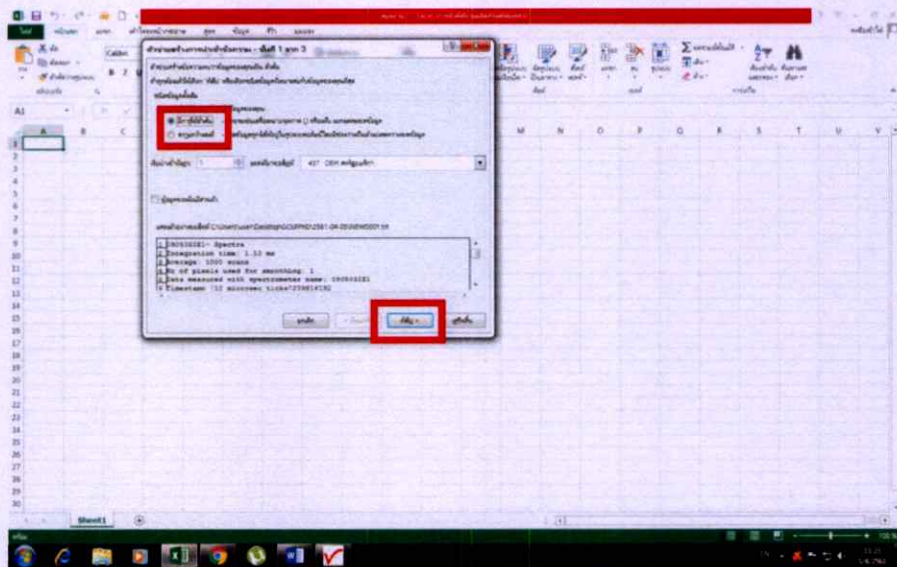
4. การเปิดไฟล์งานใน Excel

4.1 เปิดโปรแกรม Excel จากนั้นกด file > Open จากนั้นเลือก Folder ที่เราเซฟงานไว้ ตั้งแต่ตอนแรก (ข้อ1) เลือก All files จากนั้นเลือกไฟล์ที่เราเซฟไว้ ส่วนใหญ่ไฟล์จะเป็น .trt



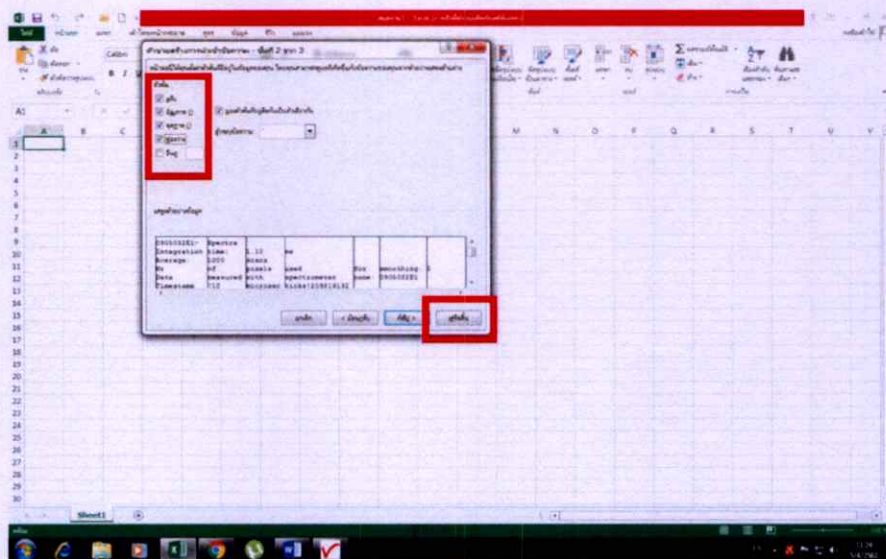
รูปที่ ข.24 การเปิดไฟล์งานด้วยโปรแกรม Excel

4.2 พอเปิดไฟล์มาจะขึ้นดังรูป ให้เราเลือก มีการตั้งค่าเริ่มต้น (เลือกอันบนอันเดียว) กด ถัดไป (Next)



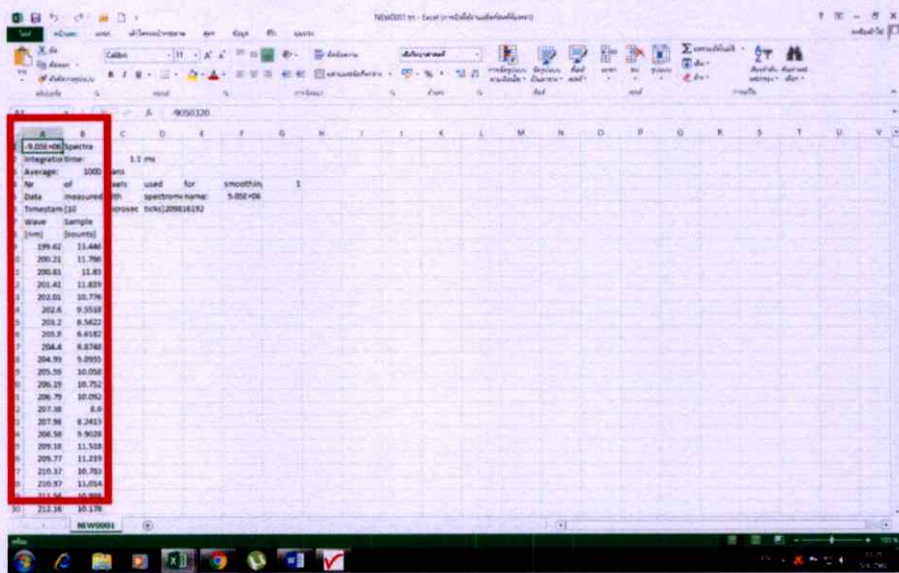
รูปที่ ข.25 การตั้งค่าการเปิดไฟล์งาน

4.3 เลือกข้อมูลดังรูปภาพ จะเลือก 4 อันบน จากนั้นกดเสร็จสิ้นหรือ finish



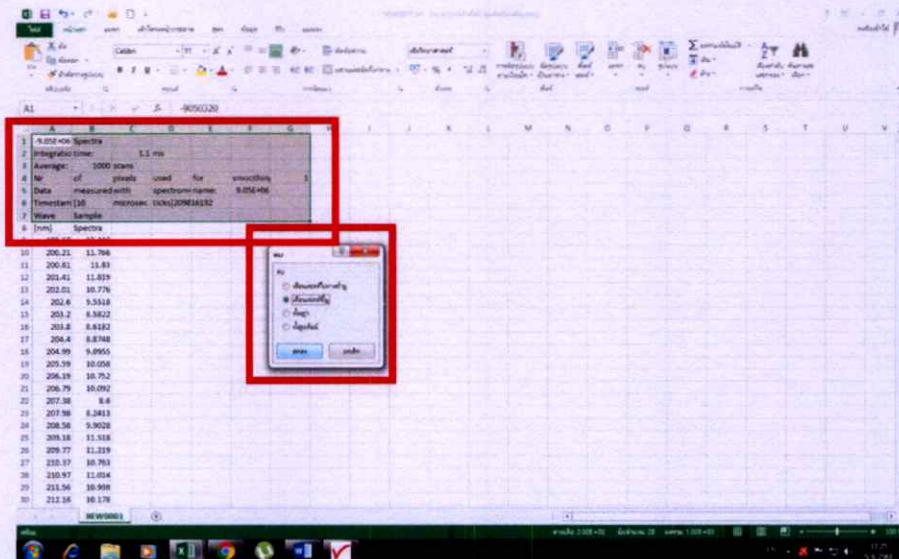
รูปที่ ข.26 การเลือกข้อมูลและประเภทที่ต้องการ

4.4 การวัดสเปกตรัมแสงจะมี 2 คอลัมน์ ช่อง A คือค่าความยาวคลื่น ช่อง B คือ ความเข้ม



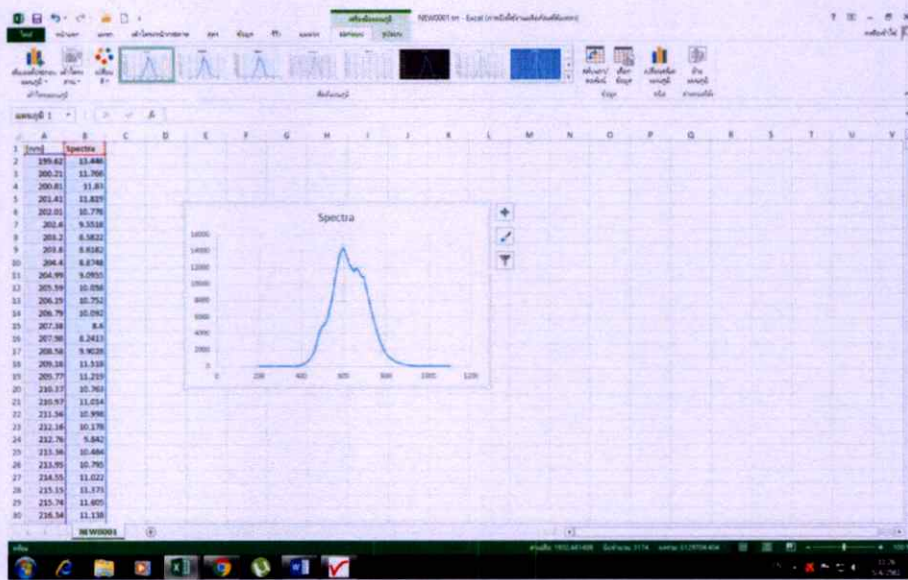
รูปที่ ข.27 ข้อมูลสเปกตรัมทั้งหมดที่ถูกแสดงในตาราง

4.5 ลบข้อความตัวอักษรที่เราไม่ได้ใช้ออก โดยการคลุมทั้งหมด แล้วคลิกเมาท์ข้างขวา เลือก ลบ เลือกเลื่อนเซลล์ขึ้น เลือก



รูปที่ ข.28 ลบข้อมูลที่ไม้ใช้

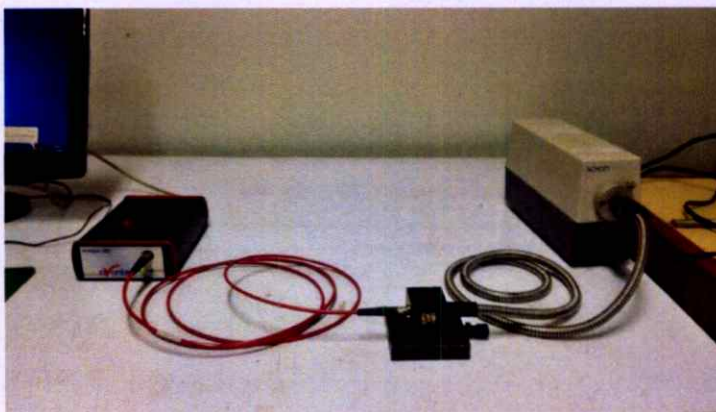
4.6 จะได้คอลัมน์ 2 คอลัมน์ ก็พล็อตกราฟตามปกติ จัดแต่งแกนกราฟให้เกิดความเหมาะสม



รูปที่ ข.29 การเขียนสเปกตรัมจากข้อมูลที่ทำการบันทึก

5. การวัดการดุดกลืน

5.1 ทำให้การตั้งค่าเครื่องตามข้อที่ 1.1 – 1.9 แล้วจัดอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับตัวอย่างที่ต้องการวัดว่าดังรูป



(ก)



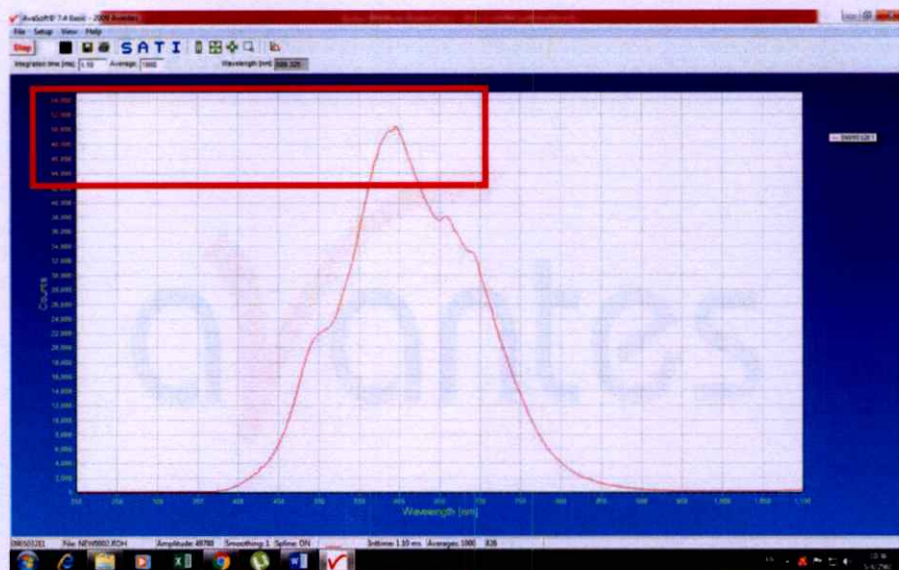
(ข)



(ค)

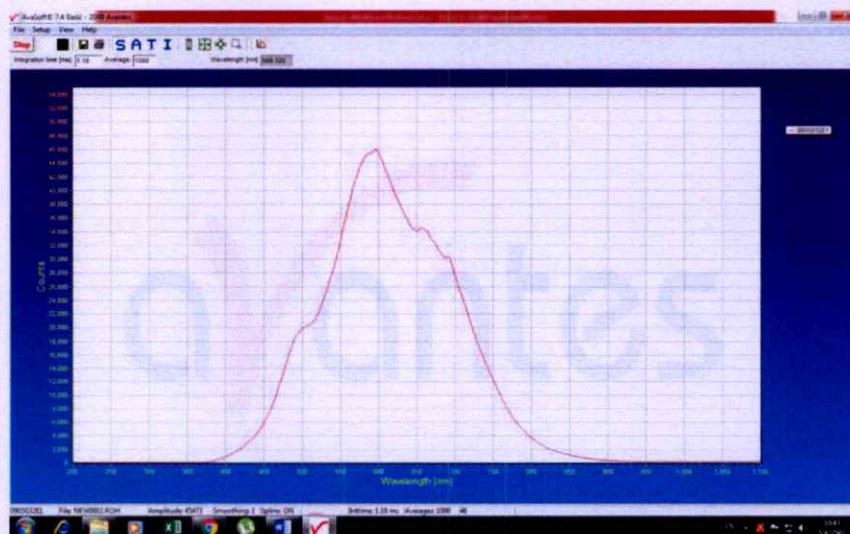
รูปที่ ข.30 (ก) การวัดแสงขาวสำหรับการวัดการดุดกลืนแสงของสารละลายในคิ่วเวท, (ข) การวัดแสงขาวสำหรับการวัดการดุดกลืนแสงของฟิล์มบางรูปแบบที่ 1 และ (ค) การวัดแสงขาวสำหรับการวัดการดุดกลืนแสงของฟิล์มบางรูปแบบที่ 2

5.2 ทำการวัดแสงขาว (วัดโหมด S) ซึ่งในแล็บที่ใช้คือหลอดไฟทั้งสแตน ปรับให้มีความเข้มสูงสุดประมาณ 50000 (ดูที่แกน Y) ดูตัวอย่างการเซ็ตอุปกรณ์ได้ในรูปถัดไป ระวังอย่าให้แสงมีความเข้มมากเกินไปจนเกิดการ Saturated ที่กล่าวไว้ในข้อที่ 2.4



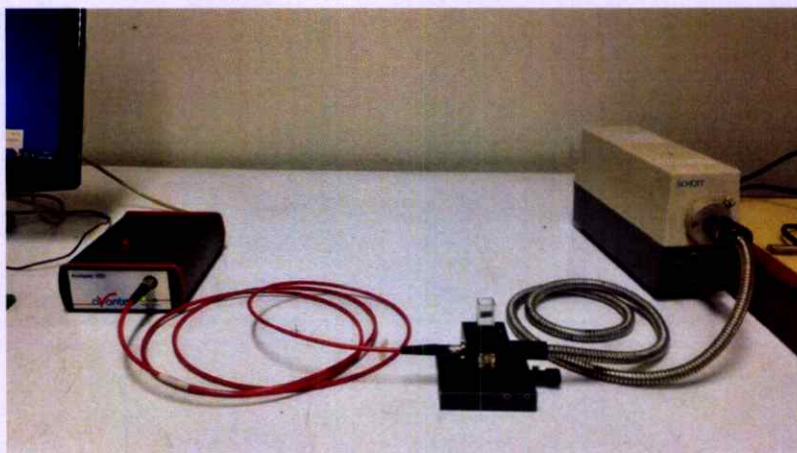
รูปที่ ข.31 ตัวอย่างการปรับความเข้ม

5.3 นำชิ้นงานที่ไม่มีการเจือสารหรือที่เราต้องการวัด blank มาวัด (I₀) เช่นทำฟิล์มบนกระจกสไลด์ blank ที่ต้องวัดก็คือกระจกสไลด์เปล่า หรือทำฟิล์มเคลือบ PMMA ที่ผสมสารต่างๆ blank ก็คือฟิล์มที่มีแค่ PMMA ที่ไม่มีสารเจือ สังเกตได้ว่าเมื่อวัด blank ความเข้มของสเปกตรัมจะเปลี่ยนไป

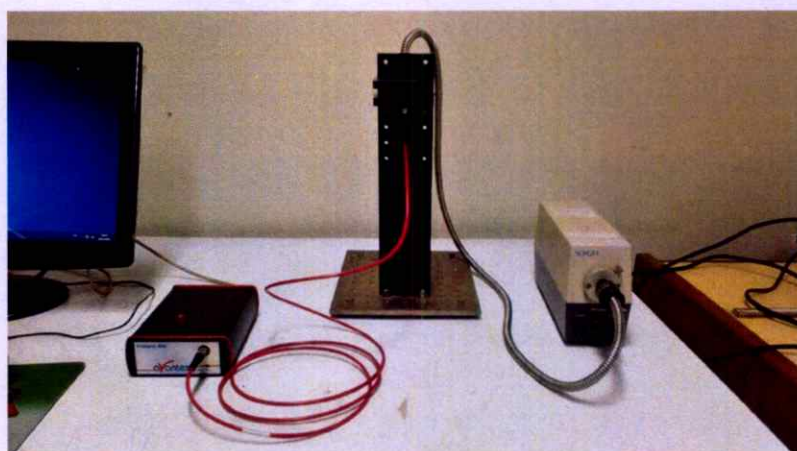


รูปที่ ข.32 สเปกตรัมของแสง

5.4 จัดอุปกรณ์เพื่อทำการวัด blank สำหรับการวัดการดูดกลืนแสงจากตัวอย่างต่างๆดังรูป



(ก)

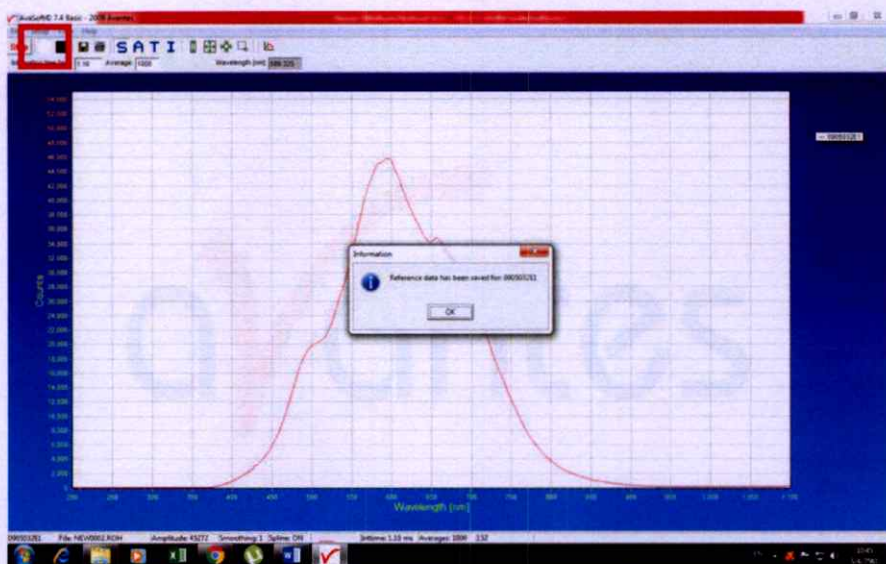


(ข)



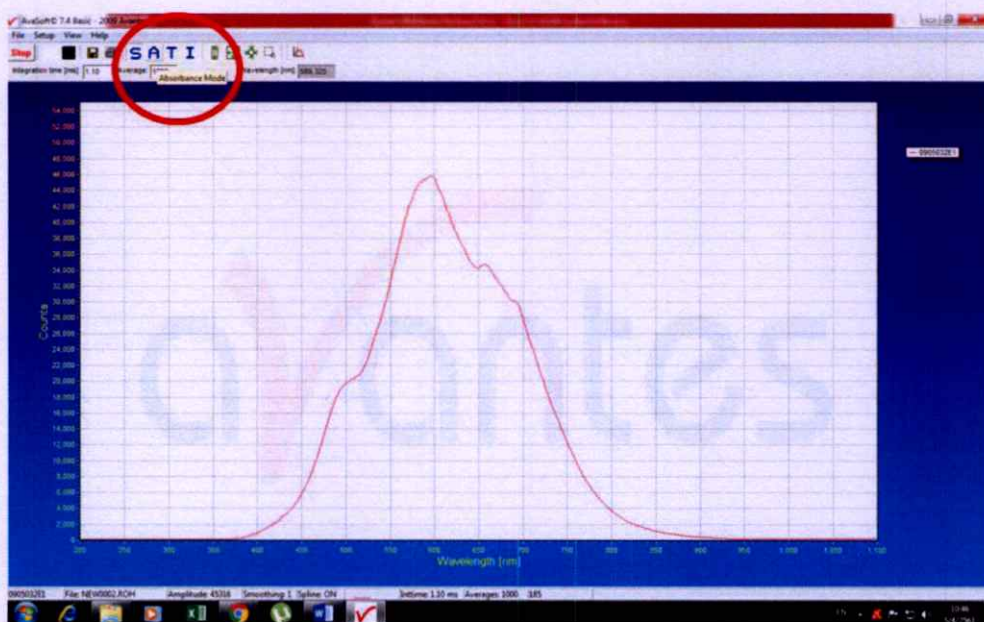
รูปที่ ข.33 การจัดอุปกรณ์เพื่อทำการวัด blank สำหรับการวัดการดูดกลืนแสงของตัวอย่างต่างๆ (ก) วัดการดูดกลืนแสงของสารละลายในคิวเวท, (ข) วัดการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางรูปแบบที่ 1 และ (ค) วัดการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางรูปแบบที่ 2

5.5 คลิก Save Reference (รูปสี่เหลี่ยมสีขาว) คลิก OK



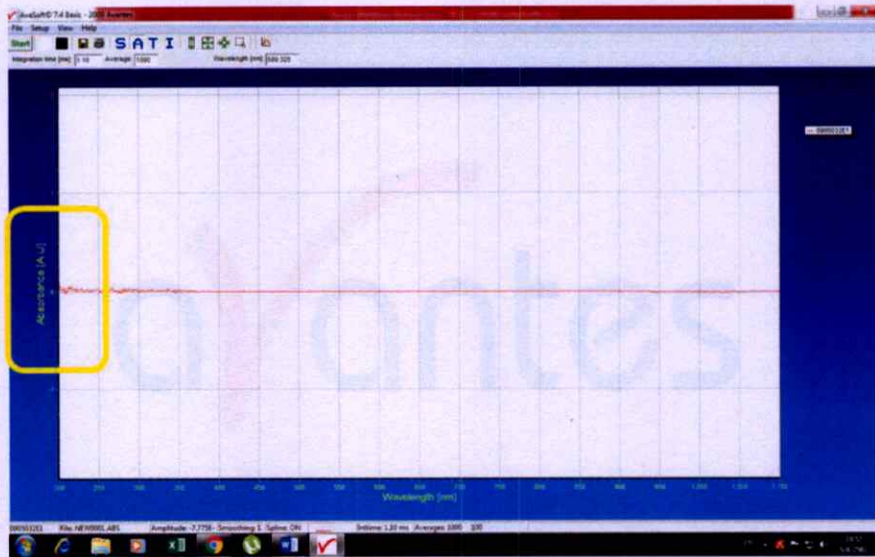
รูปที่ ข.34 การบันทึกแสงอ้างอิง

5.6 คลิกโหมด A (Absorbance Mode)



รูปที่ ข.35 การกดเลือกวัดการดูดกลืนแสง

5.7 จะได้สเปกตรัมที่มีค่าความเข้มเป็น 0



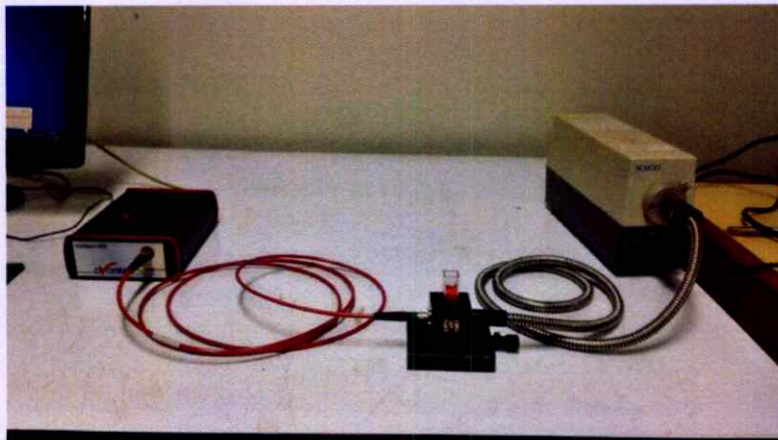
รูปที่ ข.36 สเปกตรัมที่มีค่าความเข้มเท่ากับ 0

5.8 นำตัวอย่างที่เราต้องการวัดไปวัดได้เลย โดยใส่แทน blank จากนั้นสเปกตรัมจะเพิ่มขึ้นมา

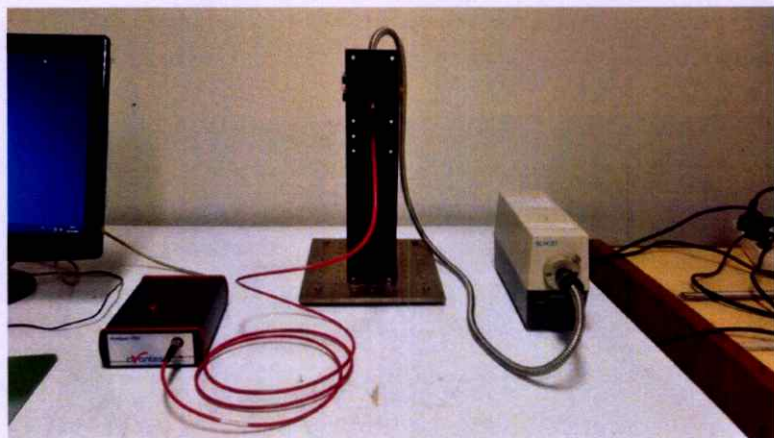


รูปที่ ข.37 สเปกตรัมที่ถูกวางด้วยสารบางอย่าง

5.9 จัดอุปกรณ์เพื่อทำการวัดค่าการดูดกลืนของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ดังรูป จากนั้นทำการบันทึกงานดังข้อที่ 3



(ก)



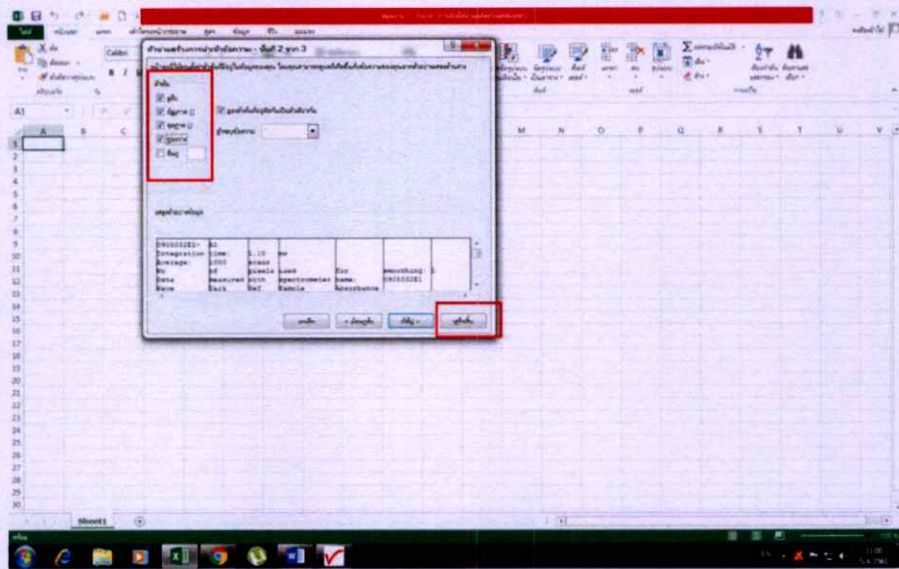
(ข)



(ค)

รูปที่ ข.38 การจัดอุปกรณ์เพื่อทำการวัดการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา (ก) สารละลายในคิวเวท, (ข) फिल्मบางรูปแบบที่ 1 และ (ค) फिल्मบางรูปแบบที่ 2

6.3 เลือกข้อมูลตั้งรูป โดยเลือก 4 อันบน จากนั้นกด เสร็จสิ้น หรือ finish



รูปที่ ข.41 การเลือกการตั้งค่า

6.4 วัดสเปกตรัมการดูดกลืน จะมี 5 คอลัม ช่อง A คือค่าความยาวคลื่น ช่อง E คือ ความเข้มการดูดกลืน แล้วทำการเขียนเส้นกราฟตามอชยาศัย

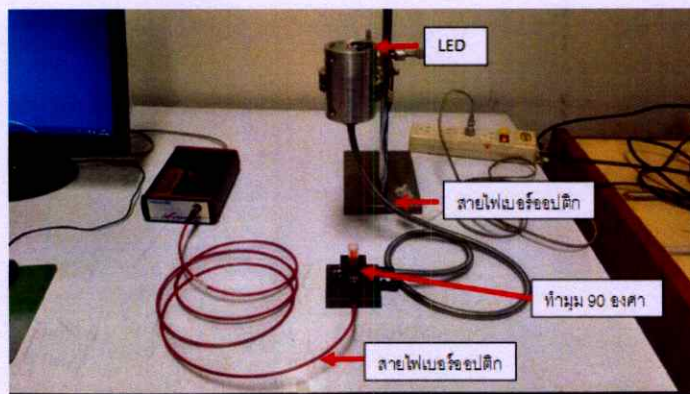
Wavelength (nm)	Counts	Counts	Counts	Absorbance (A.U.)
199.62	5.742	27.204	26.431	0.01071
200.21	1.8287	26.595	23.172	0.07211
200.81	2.2913	25.174	21.519	0.05046
201.41	1.7465	24.473	22.074	0.04986
202.01	1.1752	23.762	21.277	0.05017
202.6	1.1102	22.33	19.418	0.05324
203.2	0.9448	22.371	18.01	0.07851
203.8	0.5658	23.928	17.111	0.1197
204.4	0.9815	24.853	17.311	0.1324
204.99	1.2322	24.45	18.511	0.1218
205.59	1.2743	23.313	20.111	0.0553
206.19	2.0217	23.424	21.411	0.01725
206.79	2.2283	25.107	21.511	0.06331
207.38	0.7458	25.008	21.311	0.07491
207.98	-0.9475	24.053	19.111	0.08125
208.58	-0.6037	24.386	20.511	0.07273
208.18	0.872	23.929	22.111	0.01361
208.77	8.8185	23.199	22.711	0.02146
210.37	-0.252	24.267	21.511	0.05134
210.97	-0.1673	24.581	20.911	0.06217
211.56	1.2533	23.897	19.411	0.09064
212.18	1.8902	23.156	20.111	0.06429
212.76	2.9638	23.653	21.511	0.03295

รูปที่ ข.42 ค่าสเปกตรัมที่ได้จากการวัด

7. การวัดการเปล่งแสง

การวัดการเปล่งแสงนั้นจะทำเหมือนกับการวัดสเปกตรัมแสงทั่วไป (วัดโหมด S) แต่จะแตกต่างกันเพียงระบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ โดยการวัดการเปล่งแสงจะเลือกแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะเจาะจงที่สารตัวอย่างเรานั้นดูดกลืนได้ดีที่สุด เช่น สาร Rhodamine 6G ดูดกลืนได้ดีที่มีความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร จึงใช้ LED ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 530 นาโนเมตร และแสงจาก LED ที่ผ่านสายไฟเบอร์ออปติกมานั้น(สำหรับวัดการเรืองแสงของสารละลายในคิวเวท) จะทำมุม 90 องศา กับสายไฟเบอร์ออปติกที่ต่อเข้ากับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์หรือแสงจาก LED (โดยตรงไม่ผ่านไฟเบอร์ออปติกสำหรับฟิล์มบาง) จะทำมุม 90 องศา กับสายไฟเบอร์ออปติกที่ต่อเข้ากับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

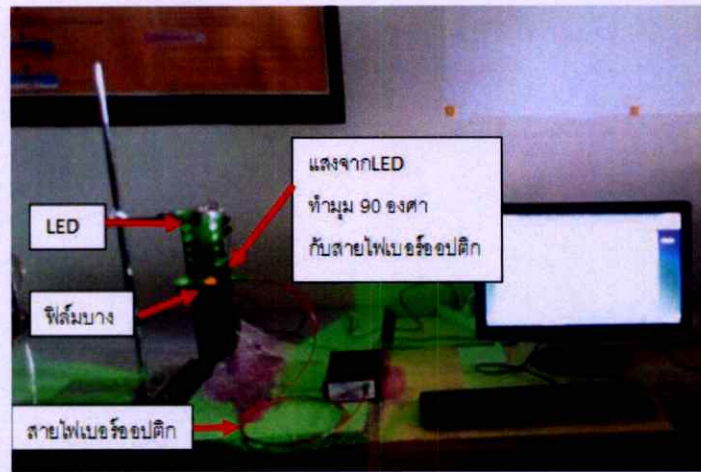
7.1 จัดอุปกรณ์เพื่อทำการวัดการเปล่งแสงให้สอดคล้องเหมาะสมกับตัวอย่างที่ต้องการศึกษา จากนั้นทำการบันทึกและเปิดไฟล์งานตามขั้นตอนที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ ข.43 การจัดอุปกรณ์เพื่อทำการวัดการเปล่งแสงของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา (ก) สารละลายในคิวเวทรูปแบบที่ 1, (ข) สารละลายในคิวเวทรูปแบบที่ 2 และ (ค) ฟิล์มบาง

สิ่งประดิษฐ์รวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลว: การหาค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและความเข้มข้นของสีย้อม ที่เหมาะสมโดยใช้วิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง

Liquid Solar Concentrators: Optimization of Geometric Gain and Dye Concentration using Response Surface Methodology

ตรีเทศ ถนนทรัพย์, เอกชัย รัมมรัตน์, ประธาน บุณศิริ และ ภัทธริยา ดำรงค์ศักดิ์*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 ประเทศไทย

*E-mail: pattareeya.da@kmitl.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 02-329-8400, เบอร์โทรสาร 02-329-8412

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการประยุกต์หลักการออกแบบการทดลองร่วมกับวิธีพื้นที่ผิวตอบสนองเพื่อศึกษาสมบัติในการรวมแสงของสิ่งประดิษฐ์รวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลว โดยตัวแปร 2 ตัวแปร ได้แก่ ค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสีย้อมโรดามีน 6 จี ซึ่งมีผลต่อสมบัติการรวมแสงและกระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอน ได้ถูกศึกษาโดยอาศัยโปรแกรม Design Expert เวอร์ชัน 9.0.3. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสิ่งประดิษฐ์รวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลวที่มีค่ากำลังขยายทางโครงสร้างเท่ากับ 8 เท่าและค่าความเข้มข้นของสารละลายของสารโรดามีน 6 จี เท่ากับ 3×10^{-5} โมลาร์ จะให้ค่ากระแสที่ผลิตได้มีค่าสูงสุด ซึ่งสูงกว่าสิ่งประดิษฐ์รวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลวที่มีค่ากำลังขยายทางโครงสร้างเท่ากับ 30 เท่าและค่าความเข้มข้นของสารละลายของสารโรดามีน 6 จี เท่ากับ 3×10^{-5} โมลาร์ ที่มีค่ากระแสที่ผลิตได้ต่ำสุด ถึง 3 เท่า

คำหลัก: สิ่งประดิษฐ์รวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลว ค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง วิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง โรดามีน 6 จี

Abstract

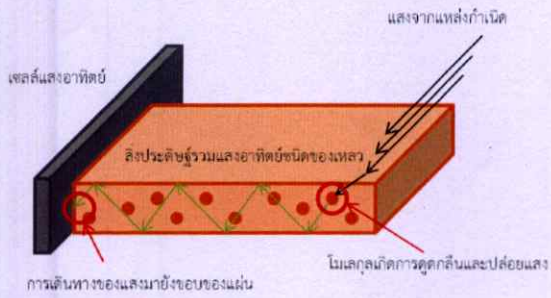
The research was conducted by applying experimental design based on response surface methodology to study light concentration performance of liquid solar concentrator (LSC). The effect of geometric gain and Rhodamine 6G (Rh6G) concentration on light intensity and photo-current of a silicon solar cell was studied using Design Expert version 9.0.3 The experimental results suggested that the LSC with geometric gain of 8 and Rh6G concentration of 3×10^{-5} M generated a maximum photocurrent has higher than the LSC with geometric gain of 30 and Rh6G concentration of 3×10^{-5} M generated a minimum photocurrent 3 times.

Keywords: Liquid solar concentrator, Geometric gain, Response surface methodology, Rhodamine 6G.

1. บทนำ

ถึงแม้ว่าการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนจะได้รับความสนใจและถูกนำมาใช้งานกันหลายด้านแล้วก็ตาม ความต้องการที่จะทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีราคาที่ถูกลงก็ยังเป็นแนวคิดที่กระตุ้นให้นักวิจัยพยายามคิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยีในการลดต้นทุนการผลิตเป็นที่ทราบกันดีว่าราคาของต้นทุนในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยหลักจะเกี่ยวข้องกับวัสดุตั้งต้นซึ่งก็คือซิลิกอน ดังนั้นหากสามารถลดปริมาณการใช้ซิลิกอนได้ก็จะทำให้ต้นทุนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลงได้ แนวคิดหนึ่งที่น่าสนใจซึ่งถูกนำเสนอโดย Weber และ Lambe ในปี ค.ศ. 1976 คือการนำสิ่งประดิษฐ์ที่เรียกว่า แผ่นรวมแสงลูมิเนสเซนซ์ มาช่วยในการแปลงพลังงานและเพิ่มความเข้มแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ [1]

โครงสร้างโดยทั่วไปของสิ่งประดิษฐ์จะประกอบด้วยวัสดุที่ทำหน้าที่รวมแสงที่ถูกออกแบบให้มีรูปทรงเป็นแผ่นบางและเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกนำมาประกบติดบริเวณขอบของแผ่นดังรูปที่ 1 หลักการแปลงพลังงานและรวมแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์จะเกี่ยวข้องกับกลไก 4 กลไกคือ 1. การดูดกลืนแสงโดยอาศัยวัสดุลูมิเนสเซนซ์ 2. การปลดปล่อยแสงจากวัสดุจากกระบวนการโฟโตลูมิเนสเซนซ์ 3. การส่งผ่านแสงมายังบริเวณขอบของแผ่นโดยกลไกการสะท้อนกลับภายใน (total internal reflection) และ 4. การแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยกลไกโฟโตโวลตาอิก



รูปที่ 1 โครงสร้างของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์

ความสามารถในการดูดกลืนแสงของแผ่นจะสามารถพิจารณาได้จากค่าการดูดกลืนแสง (A) ซึ่งมีค่าขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงของวัสดุ (E) ค่าความเข้มข้นของวัสดุที่เจือในแผ่น (c) และความหนาของแผ่น (l) ดังสมการ [2]

$$A = \epsilon cl \quad (1)$$

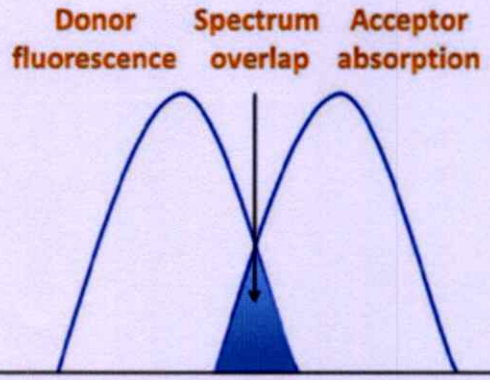
และความสามารถในการรวมแสงของแผ่นให้กับเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นกับค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง (Geometric gain: G) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของแผ่นดังสมการ (2) [3]

$$G = A_f/A_e \quad (2)$$

เมื่อ A_f คือพื้นที่ผิวรับแสงด้านบน (ตารางเซนติเมตร)

A_e คือพื้นที่ผิวด้านข้าง (ตารางเซนติเมตร)

ถึงแม้ว่าแนวคิดในการนำสิ่งประดิษฐ์รวมแสงลูมิเนสเซนตมาช่วยในการแปลงพลังงานและเพิ่มความเข้มแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกนำเสนอมานานถึง 40 ปี แต่การนำสิ่งประดิษฐ์นี้มาใช้จริงยังถูกจำกัดด้วยประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของแผ่น กล่าวคือปริมาณแสงที่ส่งมายังบริเวณขอบของแผ่นรวมแสงเกิดการสูญเสียไปโดยมีสาเหตุจากการที่สมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการดูดกลืนแสงไม่สามารถดูดกลืนและปลดปล่อยแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือวัสดุลูมิเนสเซนตจะมีช่วงสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงซ้อนทับกับสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาดังรูปที่ 2 ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงซ้ำจากวัสดุข้างเคียงส่งผลให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมาลดลง [4]



รูปที่ 2 ตัวอย่างการซ้อนทับกันของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเรืองแสงของวัสดุ [5]

การซ้อนทับกันของสเปกตรัมนี้จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับความเข้มข้นของวัสดุที่เจือภายในแผ่นรวมแสง วัสดุที่มีความเข้มข้นมากจะมีอัตราการซ้อนทับกันของสเปกตรัมที่สูง และวัสดุที่มีความเข้มข้นต่ำจะมีอัตราการซ้อนทับกันของสเปกตรัมที่น้อย ดังนั้นถึงแม้ว่าการเจือสารลูมิเนสเซนตที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงที่สูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็จะส่งผลให้แสงที่ปลดปล่อยออกมามีความเข้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการกลไกการดูดกลืนแสงซ้ำจากโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง หรือในทางตรงกันข้ามการเลือกเจือสารที่มีความเข้มข้นน้อยเพื่อเลี่ยงการสูญเสียปริมาณแสงที่จะถูกดูดกลืนซ้ำ ก็ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลงด้วย

นอกจากประเด็นเรื่องความเข้มข้นของวัสดุที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของแผ่นแล้ว โครงสร้างของแผ่นที่ถูกออกแบบที่มีความหนาหรือบางเกินไปยังส่งผลให้ปริมาณแสงที่ส่งผ่านมายังเซลล์แสงอาทิตย์มีความเข้มลดลงด้วย การออกแบบแผ่นที่ค่ากำลังขยายทางโครงสร้างสูงเพื่อช่วยเพิ่มการรวมแสงอาจส่งผลให้โอกาสการเกิดกลไกการดูดกลืนแสงซ้ำจากโมเลกุลข้างเคียงเพิ่มขึ้นเนื่องจากระยะทางที่แสงต้องเดินทางอยู่ภายในแผ่นนั้นเพิ่มขึ้น หรือการออกแบบให้แผ่นมีค่ากำลังขยายทางโครงสร้างต่ำก็จะส่งผลให้ความสามารถในการรวมแสงลดลง ดังนั้นปริมาณความเข้มข้นและค่ากำลังขยายทางโครงสร้างจะต้องถูกเลือกอย่างเหมาะสมจึงจะทำให้ค่าความเข้มแสงที่ส่งผ่านมายังเซลล์มีค่าสูงสุด

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผลของตัวแปรทั้งสองที่ผ่านมามีพบว่าผลการทดลองที่ได้นำเสนอจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผ่นรวมแสงโดยมีการกำหนดตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งให้มีค่าคงที่และเปลี่ยนแปลงตัวแปรอีกตัวหนึ่ง เช่น Carrascosa และทีม ได้ศึกษาผลของค่า G ที่มีต่อประสิทธิภาพการรวมแสงของแผ่นรวมแสงโดยอาศัยวิธีการจำลองแบบ Monte Carlo โดย

ทำการศึกษากการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังขยายทางโครงสร้างที่มีค่าระหว่าง 1-10 เท่าและพบว่าค่ากำลังขยายที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพการรวมแสงเพิ่มขึ้นด้วย [6] วิชาพรได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Rh6G ที่มีต่อการรวมแสงของแผ่นรวมแสงชนิดฟิล์ม โดยเตรียมฟิล์มจากสาร Rh6G ที่มีความเข้มข้นในช่วง 1.8×10^{-3} - 3.0×10^{-3} โมลาร์ และมีค่ากำลังขยายทางโครงสร้างคงที่เท่ากับ 76 และพบว่าความเข้มข้นของสาร Rh6G เท่ากับ 2.2×10^{-3} โมลาร์ จะให้ความเข้มแสงสูงสุด [7] เป็นต้น

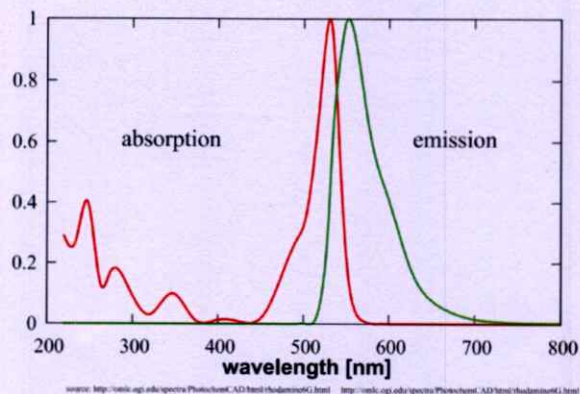
เพื่อที่จะหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการจัดเตรียมแผ่นรวมแสงโดยมีตัวแปรตั้งต้นที่ต้องการศึกษา 2 ตัวแปรคือค่าความเข้มข้นของโมเลกุลเรืองแสงและค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง ผู้วิจัยจึงเลือกวิธีวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Design, RSM) [8,9] ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central composite design, CCD) [9,10] วิธีการวิเคราะห์นี้จะอาศัยหลักการทางสถิติมาช่วยในการออกแบบเงื่อนไขของการทดลอง รวมถึงสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นที่มีมากกว่า 1 ตัวแปรที่ส่งผลต่อตัวแปรตามที่เราสนใจได้ ทำให้ลดข้อผิดพลาดจากการเดาสุ่มเงื่อนไขในการทดลองที่นิยมใช้กันในวิธีดั้งเดิมและลดเวลาของการทดลองได้ [11]

ในการทดสอบผลของตัวแปรที่มีต่อการรวมแสง ผู้วิจัยได้จัดเตรียมสิ่งประดิษฐ์รวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลว (Liquid solar concentrator: LSC) โดยใช้สารสีย้อม Rh6G สารนี้ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยเนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถปลดปล่อยแสงออกมาได้สูง มีค่าฟลูออเรสเซนซ์ควอนตัมยี่ลต์สูงถึง 0.95 [12] สามารถถูกทำลายได้ง่ายในตัวกลางหลายชนิดและมีราคาถูก ในงานวิจัยนี้จะนำสารละลาย Rh6G มาบรรจุในภาชนะอะคลิลิกใส บริเวณขอบด้านหนึ่งของภาชนะจะถูกประกบติดด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนเพื่อทดสอบสมบัติการรวมแสงและแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

สิ่งประดิษฐ์รวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลวถูกจัดเตรียมโดยใช้สารละลาย Rh6G บรรจุในกล่องอะคลิลิกใสที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 3.56 ซม. × 3.56 ซม. สารละลาย Rh6G มีสมบัติการดูดกลืนและการเปล่งแสงแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนและการเปล่งแสงของสารละลาย Rh6G ที่มีความเข้มข้น 1×10^{-3} โมลาร์

2.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีตอบสนองพื้นผิวร่วมกับการออกแบบส่วนผสมกลาง

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G ที่เหมาะสมต่อการจัดเตรียมแผ่นจะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-4} - 10^{-5} M โดยในย่านดังกล่าวจะเป็นย่านที่สารสามารถดูดกลืนแสงได้ดีและมีค่าการเรืองแสงที่สูง สำหรับค่า G ในการรวมแสงที่เหมาะสมกับภาชนะที่ออกแบบจะสามารถเปลี่ยนแปลงในช่วง 1.8-35.6 เท่า ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของตัวแปรตั้งต้น 2 ตัวแปรที่มีต่อปริมาณแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์และกระแสที่ผลิตได้จากเซลล์ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3. เข้ามาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ผล โดยหลักการออกแบบเงื่อนไขการทดลองจะอาศัยวิธีตอบสนองพื้นผิวร่วมกับการออกแบบส่วนผสมกลาง รายละเอียดการออกแบบการทดลองแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรอิสระและระดับของตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปร	ระดับสูง	ระดับต่ำ	หน่วย
G	30	8	-
C	80	30	μM

2.3 การวัดสมบัติการรวมแสงของสิ่งประดิษฐ์รวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลว

ในการวัดสมบัติในการรวมแสงของสิ่งประดิษฐ์รวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลว ผู้วิจัยได้นำเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนชนิดอะมอร์ฟัสขนาด 1.5* 9.8 ซม. ที่หาได้ตามท้องตลาด มาประกบติดบริเวณด้านหนึ่งของกล่องอะคลิลิก และต่อตรงเข้ากับเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ (Agilent 34410A) เพื่อวัดค่ากระแสลัดวงจรที่ผลิตได้จากเซลล์ เนื่องจากกระแสที่ผลิตได้จะมีค่าขึ้นกับปริมาณความเข้มแสงที่ถูกรวมโดยแผ่นรวมแสง ในขณะที่บริเวณของอีกด้านหนึ่งของภาชนะจะมีการนำ

สายใยแก้วนำแสงมาติดตั้งเพื่อตรวจวัดสเปกตรัมแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากสาร Rh6G โดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ (Avantes) ในการตรวจวัด ผู้วิจัยได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดสีเขียว (CPS532, ThorLabs) ที่มีพีการเปล่งแสง 532 นาโนเมตร ในการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากมีความยาวคลื่นอยู่ในย่านที่สารละลายสามารถดูดกลืนแสงได้ดี โครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์รวมแสงชนิดของเหลวแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์รวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลวที่จัดเตรียมในงานวิจัย

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

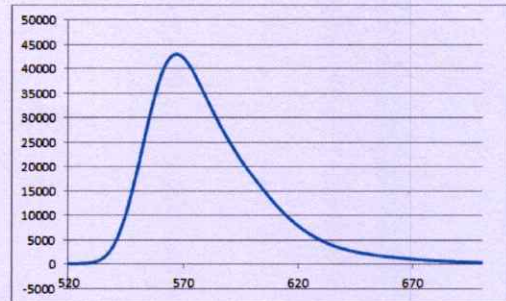
การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายและค่ากำลังขยายทางโครงสร้าง ที่มีต่อการผลิตกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์และค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัดสเปกโตรมิเตอร์ (Avantes Avaspec-EDU) ได้ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้จากโปรแกรม Design

เงื่อนไข	G	C (μM)	ความเข้มแสง (arb.unit)	กระแส (μA)
1	3.44	55	2,424	9.34
2	8	30	43,013	8.64
3	8	80	41,932	8.45
4	19	19.64	27,527	6.66
5	19	55	33,336	7.50
6	19	55	33,327	7.47
7	19	55	34,565	7.40
8	19	55	34,498	7.29
9	19	55	33,448	7.22
10	19	90.36	37,217	8.04
11	30	30	13,753	2.94
12	30	80	28,766	6.70
13	34.55	55	20,179	4.95

Expert และผลการวัดค่าความเข้มแสงจากสเปกตรัมและกระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์

ความเข้มแสงที่แสดงในตารางได้จากจุดพีคของกราฟสเปกตรัมการเรืองแสงที่ส่งผ่านมายังบริเวณขอบของภาชนะที่บรรจุสารละลายที่กราฟแสดงดังตัวอย่างในรูป 5



รูปที่ 5 สเปกตรัมการเรืองแสงของสาร Rh6G ที่มีความเข้มข้น $30 \mu\text{M}$ และมีค่า G เท่ากับ 8

จากตารางที่ 2 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G และค่ากำลังขยายทางโครงสร้างจะส่งผลต่อค่ากระแสที่วัดได้ และเมื่อพิจารณาผลการวัดซ้ำในเงื่อนไขเดียวกัน 5 ครั้งตามเงื่อนไขตั้งแต่เงื่อนไขที่ 5 ถึงเงื่อนไขที่ 9 พบว่าค่ากระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าแตกต่างกันประมาณ 4%

เมื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับค่ากระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าได้สมการดังนี้

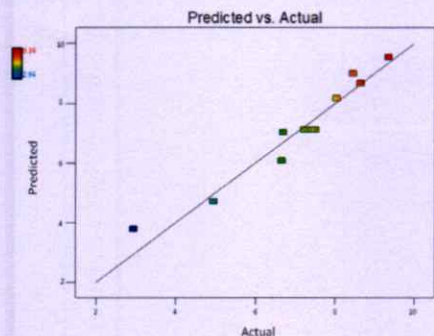
$$I = 11.84061 - (0.33371 \times G) - (32155.56278 \times C) + (3245.45455 \times G \times C) \quad (3)$$

เมื่อ I คือ ค่ากระแส (μA)

G คือ กำลังขยายทางโครงสร้างของแผ่น

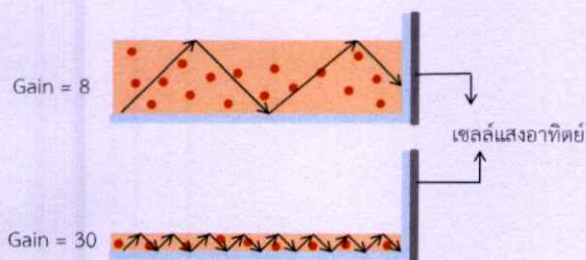
C คือ ค่าความเข้มข้นของสาร (M)

และค่าสัมประสิทธิ์ R^2 ของกราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่วัดได้จริงและค่ากระแสที่คำนวณได้จากโปรแกรมมีค่าเท่ากับ 0.9406 ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของ ค่ากระแสที่วัดได้จริงและค่ากระแสที่ถูกต้องคำนวณ

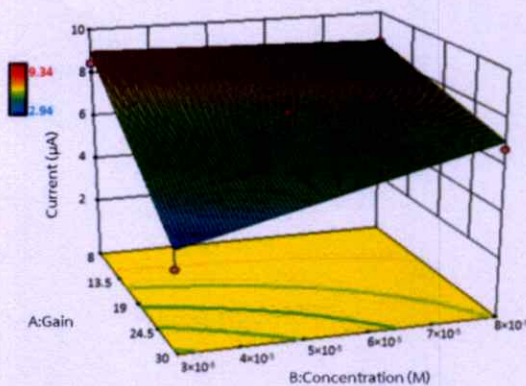
และจากการพิจารณากราฟสามมิติที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย ค่ากำลังขยายทางโครงสร้างของแผ่นและค่าการผลิตกระแสที่ได้ดังในรูปที่ 4 พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการจัดเตรียมสิ่งประดิษฐ์รวมแสงชนิดของเหลวด้วยสาร Rh6G คือใช้สารละลายที่มีค่าความเข้มข้น 30 μM และค่ากำลังขยายทางโครงสร้างมีค่า 8 เท่า กราฟความสัมพันธ์ยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในการลดลงของค่ากระแสที่ผลิตได้เมื่อเพิ่มค่ากำลังขยายหรือการลดความหนาของแผ่น ซึ่งการลดลงของกระแสนี้มีสาเหตุจากการที่ระยะทางของแสงที่ปลดปล่อยจากวัสดุ Rh6G ที่เดินทางโดยการสะท้อนกลับหมดภายในแผ่นจะเพิ่มขึ้นดังนั้น ดังนั้นโอกาสที่แสงจะถูกดูดกลืนซ้ำโดยโมเลกุลแวดล้อมที่เจืออยู่ในแผ่นจะมีสูงขึ้น ดังรูปที่ 7



รูป 7 เส้นทางที่แสงเดินทางโดยการสะท้อนกลับหมดภายในแผ่น

และเมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร Rh6G ในช่วงที่ศึกษาพบว่าความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กระแสมีค่าลดลงเมื่อค่ากำลังขยายทางโครงสร้างของแผ่นมีค่าน้อย (ค่า $G=8$) ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุจากการที่การจำนวนโมเลกุลเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการดูดกลืนซ้ำของแสงเพิ่ม [4] ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาแผ่นรวมแสงที่มีค่ากำลังขยายทางโครงสร้างของแผ่นสูง (ค่า $G=30$) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้น

จะส่งผลให้ค่ากระแสมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นที่มีค่ากำลังขยายทางโครงสร้างสูงจะบางกว่าแผ่นที่มีค่ากำลังขยายทางโครงสร้างต่ำ ดังนั้นความสามารถในการดูดกลืนแสงจะลดลง ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสาร Rh6G จะช่วยชดเชยการสูญเสียปริมาณแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาเนื่องจากแผ่นมีความหนาลดลง ซึ่งการดูดกลืนแสงที่สูงขึ้นจะส่งผลให้แสงที่ปลดปล่อยออกมาสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 8 กราฟพื้นที่ผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างและค่าความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G และค่ากระแส

เพื่อทดสอบสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ ผู้วิจัยได้ทดลองจัดเตรียมสิ่งประดิษฐ์รวมแสงชนิดของเหลวจากตัวแปรตั้งต้นที่มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันที่กำหนดในตารางที่ 2 โดยจะเตรียมตัวอย่างจำนวน 3 ชุด นำมาทดลองและเก็บผลเพื่อเทียบกับการคำนวณจากสมการที่ได้จากการเข้าโปรแกรม ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 3 การวิเคราะห์ผลพบว่าค่ากระแสที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.54 μA มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากสมการที่ (3) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.52 μA และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.2013

ตารางที่ 3 ค่ากระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

G	C(μM)	I(μA)	Calculate	Error
10	40	8.57	8.52	0.59%
		8.73		2.46%
		8.33		2.23%

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนองโดยอาศัยโปรแกรม Design Expert 9.0.3. พบว่าสามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่ากำลังขยายทางโครงสร้างของสาร ค่าความเข้มข้นของสารละลาย Rh6G และค่ากระแสที่ผลิตได้จากสิ่งประดิษฐ์รวมแสงชนิดของเหลว โดยผู้วิจัยพบว่าเงื่อนไขเหมาะสมในการจัดเตรียมสิ่งประดิษฐ์รวมแสงที่ทำให้ได้กระแสที่ผลิตได้ออกมามีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.64 μA ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีค่ากำลังขยายทางโครงสร้างของสาร 8 เท่า และมีค่าความเข้มข้นของสารละลาย 30 μM

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตกระเวก สำหรับการอนุเคราะห์ในการใช้โปรแกรม Design Expert 9.0.3. และคุณ ศุภศักดิ์ คนซื่อ สำหรับคำแนะนำในการใช้โปรแกรม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. H. Weber and John Lambe. (1976) Luminescent greenhouse collector for solar radiation. *Applied Optics*. Vol. 15, 2299-2300.
- [2] แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม (2539). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ, กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์
- [3] Oreane Yasmin Edelenbosch. (2012) Luminescent Solar Concentrator with a Fibre Geometry, Imperial College of London, London, United Kingdom.
- [4] Amit Nag and Debabrata Goswami (2009) Solvent effect on two-photon absorption and fluorescence of rhodamine dyes, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. Vol.206, 188-197.
- [5] Yang Jiao, Baocun Zhu, Jihua Chen and Xiaohong Duan.(2015) Fluorescent Sensing of Fluoride in Cellular System, *Theranostics* . Vol.5, 173-187
- [6] M. Carrascosa, S. Unamuno and F. Agullo-Lopez. (1983) Monte Carlo simulation of the performance of PMMA luminescent solar collect, *Applied Optics*. Vol. 20, 3236-3241.
- [7] วิชญาพร สุญพานิช. (2013) การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสารเรืองแสง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.
- [8] Pilaipon Nuthongkum, Aparporn Sakulalavek and Rachsak Sakdanuphab. (2016) RSM Base Study of the Effect of Argon Gas Flow Rate and Annealing Temperature on the [Bi]:[Te] Ratio and Thermoelectric Properties of Flexible Bi-Te Thin Film, *Electronic Materials*. Vol.46, 2900-2907; doi: 10.1007/s11664-016-5024-1
- [9] Frank M. Fabian. (2012) Application of Response Surface Methodology and Central Composite Design for 5p12-Rantes Expression in The pichia pastoris, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, USA.
- [10] Marcin Dutka, Mario Ditaranto and Terese Løvås. (2015) Application of a Central Composite Design for the Study of NO_x Emission Performance of a Low NO_x Burner, *Energies*. Vol.8, 3606-3627; doi:10.3390/en8053606.
- [11] จรัล ทรัพย์เสรี (2552), DOE ตอน Central Composite Design [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/FQ145_p72-74.pdf เข้าดูเมื่อวันที่ 4/4/2560.
- [12] Christian Würth, Martín G. González, Reinhard Niessner, Ulrich Panne, Christoph Haisch and Ute Resch Genger. (2012) Determination of the absolute fluorescence quantum yield of rhodamine 6G with optical and photoacoustic methods – Providing the basis for fluorescence quantum yield standards, *Talanta*. Vol.90, 30-37.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายตรีทเศศ ถนอมทรัพย์
วัน เดือน ปีเกิด	23 กุมภาพันธ์ 2536
ที่อยู่ปัจจุบัน	62/5 หมู่บ้านพฤษภา 25 ต.บางแม่นาง อ.บางใหญ่ จ.นนทบุรี 11140
ที่อยู่อีเมล	ttdestroyer@gmail.com
ประวัติการศึกษา	2557 จบการศึกษาระดับอุดมศึกษาด้วยปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 2.67 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิชาการ	สิ่งประดิษฐ์รวมแสงอาทิตย์ชนิดของเหลว: การหาค่ากำลังขยายทาง โครงสร้างและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมโดยใช้วิธีพื้นที่ผิว ตอบสนอง Liquid Solar Concentrators: Optimization of Geometric Gain and Dye Concentration using Response Surface Methodology ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่เมื่อวันที่ 31 พฤษภาคม 2560