

การพัฒนาาระบบวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์สำหรับไมโครฟลูอิดิก
DEVELOPMENT OF MICROFLUIDIC FLUORESCENCE
DETECTOR SYSTEM



นายปวีรยศ เหล่าวงโคตร

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

การพัฒนาระบบวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์สำหรับไมโครฟลูอิดิก
DEVELOPMENT OF MICROFLUIDIC FLUORESCENCE
DETECTOR SYSTEM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

**DEVELOPMENT OF MIROFLUIDIC FLUORESENCE
DETECTOR SYSTEM**



Mr. Pariwat Laowongkhot

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN PHYSICS**

FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่ **KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

ACADEMIC YEAR 2012

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาระบบวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์สำหรับไมโครฟลูอิดิก

Development of Microfluidic Fluorescence Detector System

ชื่อนักศึกษา นายปวิวรรต เหล่าวง โคนคร

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ภัทรียา กิตติเดชาชาญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ภัทรียา กิตติเดชาชาญ	
ดร. อาภาภรณ์ สุกุลการะเวก	
ดร. เจริญญา รัตนพันธ์	
รศ. สาหรัย เล็กชะอุ่ม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาระบบวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์สำหรับไมโครฟลูอิดิก
ชื่อนักศึกษา	นายปวิวรรต เหล่าวงโคตร
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทริยา กิตติเดชาชาญ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องต้นแบบของระบบวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์สำหรับไมโครฟลูอิดิก โดยระบบจะประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ เช่น แหล่งกำเนิดแสง LED ไมโครฟลูอิดิกแซนแนล และ ซิลิกอนโฟโตไดโอด เป็นต้น โดยในการทดลองจะเป็นการพัฒนา ระบบตรวจวัดแสงโดยใช้สารสีย้อมไวแสง ซึ่งสารที่ใช้ในการทดลองนี้คือ สาร Rhodamine 6G ที่มีค่าความเข้มข้น ตั้งแต่ 100 nM ถึง 5 mM โดยสารสีย้อมไวแสงที่ค่าความเข้มข้นต่างๆจะถูกนำมาตรวจวัดการตอบสนองทางแสงในระบบไมโครฟลูอิดิก ผลการทดลองดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับการวัดผลในคิวเวทท์ จากผลการทดลองพบว่าในระบบไมโครฟลูอิดิกสามารถให้ช่วงความเข้มข้นที่วัดได้มีความถูกต้องมากกว่าที่วัดผลในคิวเวทท์ โดยการวัดในคิวเวทท์พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนของสารละลายที่ค่าความเข้มข้นสูงกว่า 0.01 mM จะไม่สอดคล้องกับเส้นสเปกตรัมอ้างอิง เพราะเกิดจากปรากฏการณ์การดูดกลืนซ้ำและการสูญเสียพลังงานของโมเลกุลจากการชนกันในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวจะไม่ถูกพบในการวัดด้วยระบบไมโครฟลูอิดิก

คำสำคัญ : ไมโครฟลูอิดิก แสงฟลูออเรสเซนซ์ สาร Rhodamine 6G ซิลิกอนโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	DEVELOPMENT OF MIROFLUIDIC FLUORESENCE DETECTOR SYSTEM
Students	Mr. Pariwat Laowongkhot
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Applied Physics
Academic Year	2012
Advisor	Assist.Prof DR. Pattareeya Kittidachachan

ABSTRACT

This special project aims to develop a prototype microfluidic system for fluorescence detection. The system consists of several components, i.e., a high power LED as excitation light source, a polymer-based microfluidic channel and an optical detector. Experiments are conducted to demonstrate use of the developed system for fluorescence detection in chemical applications. A Rhodamine 6G fluorescent dye with different concentrations ranging from 100 nM to 5 mM is used as the analyte in the experiments. Relationship between the photoresponse of the microfluidic system and concentration of fluorescent dyes is investigated. The results are compared to that obtained from a bulk system where the analyte under test is dispensed into a standard-size cuvette. The results obtained from the prototype microfluidic system show higher dynamic range than that of the bulk system. In the bulk system, we found a decrease in the fluorescence signal when dye concentration is higher than 10⁻⁵ M. This is probably due to the re-absorption and self-quenching phenomena which result in low quantum yield of fluorescent dyes at high concentration. However, such problem is not found in the microfluidic system that has a low detection volume.

Keywords : Microfluidic, Fluorescence, Rhodamine 6G, Photodiode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ โดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างดีจาก ผศ.ดร.ภัทธรียา กิตติเดชาชาญ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ และคณะอาจารย์สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้โครงการพิเศษเล่มนี้ถูกต้องและสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวที่มีส่วนในการให้กำลังใจและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่เล่ พี่ฝน ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำวิธีการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง รวมถึงการสอนเทคนิคต่างๆ มาโดยตลอดจนโครงการพิเศษเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ พี่อมร พี่หนึ่ง ที่ให้ยืมอุปกรณ์ต่างๆ ในการสร้างชิ้นงาน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่น 28 ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้คำปรึกษาแนะนำการทดลองการทำงานวิจัย

นายปวิวรรต เหล่าวงโคตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของ โครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 หลักการพื้นฐานของไมโครฟลูอิดิก	4
2.2 ฟิสิกส์ของของไหล	5
2.2.1 ของไหล	5
2.2.2 ของไหลอุดมคติ	5
2.2.3 สมการความต่อเนื่อง	6
2.2.4 การไหลภายในท่อ	8
2.2.5 ความตึงผิว	9
2.2.6 สภาพรูลอดเด็กหรือสภาพกะปิลารี	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาที่ออกการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น 8 คำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง 2.2.5 ความตึงผิว อ้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ 9

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3 หลักการพื้นฐานของฟลูออเรสเซนซ์	13
2.3.1 การวาวแสงและการเรืองแสงของโมเลกุล	13
2.3.2 ชนิดของการเปล่งแสง	14
2.3.3 หลักการของโฟโตลูมิเนสเซนซ์	14
2.3.4 เครื่องฟลูออโรมิเตอร์	16
2.4 กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)	20
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	22
3.1 การศึกษาการสร้างไมโครฟลูอิดิกเซนแนล	24
3.1.1 กระบวนการชูนิกเกิล	25
3.2 การทดสอบสารสี้อมที่ใช้ในระบบ	29
3.3 การจัดชุดอุปกรณ์การตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์	30
3.3.1 การจัดชุดอุปกรณ์การตรวจวัดทางแสง	30
3.3.1.1 แหล่งกำเนิดแสง LED	31
3.3.1.2 เลนส์รวมแสง	31
3.3.1.3 ฟิลเตอร์กรองแสง	32
3.3.1.4 แท่นจับยึดไมโครฟลูอิดิกเซนแนล	33
3.3.1.5 สเปกโตรมิเตอร์	34
3.3.2 การจัดชุดอุปกรณ์การตรวจวัดทางไฟฟ้า	34
3.3.2.1 ซีลิกอนโฟโตไดโอด	36
3.3.2.2 วงจรขยายสัญญาณ	36
3.4 การวัดสมบัติทางแสง	37
3.4.1 การวัดการดูดกลืนแสงในคิวเวทท์	37
3.4.2 การวัดการดูดกลืนแสงในคิวเวทท์	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 3.4.1 การวัดการดูดกลืนแสงในคิวเวทท์

3.4.2 การวัดการดูดกลืนแสงในคิวเวทท์ 37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.3 การวัดการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงในไมโครฟลูอิดิก	38
3.4.4 การวัดสัญญาณไฟฟ้า	39
3.5 การออกแบบเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 การชูนิกเกิลบนแผ่นไมโครฟลูอิดิก	41
4.2 ผลการวัดสมบัติทางแสงของสาร Rhodamine 6G	44
4.2.1 ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนในคิวเวทท์	44
4.2.2 ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงในคิวเวทท์	46
4.2.3 ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนในไมโครฟลูอิดิก	47
4.2.4 ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงในไมโครฟลูอิดิก	48
4.3 ผลการวัดสัญญาณไฟฟ้าของระบบไมโครฟลูอิดิกเซนแนล	50
4.4 การพัฒนาระบบวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์	51
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลวิจัย	53
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย	3
3.1 ตารางแสดงขนาดเซนแนลของไมโครฟลูอิดิก	26
4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองการชุบโลหะ	41
4.2 ตารางบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เทคโนโลยีระบบของไหลแบบจุลภาค	4
2.2 การไหลของของไหลอุดมคติ (ไม่มีความหนืด)	6
2.3 a) เส้นที่ลากสัมผัสกับทิศทางการไหลทุกๆจุด คือเส้นสายธาร	6
2.3 b) แสดงหลอดของการไหล อัตราการไหลจะเท่ากันที่ภาคตัดขวางใดๆ	6
2.4 แสดงเส้นสายธารที่ไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงต่างๆ	7
2.5 แสดงการไหลเข้าและออกภายในหลอดของการไหล	7
2.6 แรงลัพธ์ที่กระทำต่อโมเลกุลที่อยู่ใกล้ผิวของของเหลว ทำให้เกิดความตึงผิว	9
2.7 (a) ฟิล์มของน้ำสบู่บนวงลวดโดยมีบ่วงด้ายอยู่อย่างอิสระ	11
2.7 (b) เมื่อทำให้ฟิล์มภายในบ่วงด้ายขาด บ่วงจะถูกแรงดึงออกรอบตัวเป็นวงกลม	11
2.8 ของเหลวในรูหลอดแก้วเล็กๆ	12
2.9 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน Jablonski	16
2.10 การทำงานของเครื่อง Fluorometer	19
2.11 การดูตกئينแสง	20
2.11 การดูตกئينแสงผ่านควิวเวทท์	21
3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	22
3.2 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกเซนแนล	23
3.3 ระบบการซุบนิกเกิด	24
3.4 ชุดการทดลองซุบนิกเกิด	25
3.5 น้ำยาซุบนิกเกิด	25
3.6 ชิ้นงานที่ต้องการซุบ	26
3.7 แท่งนิกเกิด	26
3.8 เทอร์โมมิเตอร์ยี่ห้อ Fluke รุ่น 51 K/J	27
3.9 มัลติมิเตอร์ดิจิตอลยี่ห้อ UNI-T รุ่น UT55	27
3.10 เครื่องให้ความร้อน	27
3.11 แหล่งจ่ายไฟ	28

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 ไมโครมิเตอร์	28
3.13 สเปกตรัมการดูดกลืนและการเปล่งแสงของ Rhodamine 6 G	29
3.14 ระบบการตรวจวัดทางแสง	30
3.15 หลอดไฟโอดเปล่งแสง LED	31
3.16 เลนส์รวมแสง	31
3.17 ฟิลเตอร์ชนิด long pass (ซ้าย) และ ชนิด band pass (ขวา)	32
3.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของทั้งสแตนและสเปกตรัมทั้งสแตนเมื่อส่องผ่านฟิลเตอร์	32
3.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมสีเขียวและสเปกตรัมสีเหลืองเมื่อส่องผ่านฟิลเตอร์	33
3.20 แท่นจับยึดไมโครฟลูอิดิกเซนแนล	33
3.21 สเปกโตรมิเตอร์	34
3.22 ระบบการตรวจวัดทางไฟฟ้า	34
3.23 แผนภาพระบบการตรวจวัดทางไฟฟ้า	35
3.24 ระบบแสดงผล	35
3.25 โฟโตไดโอดชนิดซิลิกอน	36
3.26 วงจรขยายสัญญาณ	36
3.27 ชุดการทดลองการวัดการดูดกลืนแสงในคิวเวทท์	37
3.28 ชุดการทดลองการวัดการเปล่งแสงในคิวเวทท์	38
3.29 ชุดการทดลองวัดการดูดกลืนและการเปล่งแสงในไมโครฟลูอิดิกเซนแนล	38
3.30 ชุดการทดลองวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ทางไฟฟ้า	39
3.31 เครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์แบบพกพา	40
4.1 ตัวอย่างแผ่นไมโครฟลูอิดิกที่ผ่านกระบวนการชุบนิเกิล	42
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาทีก) และความหนา (ไมโครเมตร)	42
4.3 กราฟแสดงความหนาที่เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าต่างกัน	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ตัวอย่างแผ่นไมโครฟลูอิดิกที่มีผิวหน้างานไม่เรียบ	44
4.5 (a) สเปกตรัมการดูดกลืนของสาร Rhodamine 6G ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ	45
4.5 (b) สเปกตรัมการดูดกลืนของสาร Rhodamine 6G จากโปรแกรม PhotoChemCAD	45
4.6 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ	46
4.7 (a) กราฟแสดงการเปล่งแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ	47
4.7 (b) สเปกตรัมการดูดกลืนของสาร Rhodamine 6G จากโปรแกรมและการทดลอง	48
4.8 (a) กราฟแสดงการเปล่งแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ	49
4.8 (b) กราฟแสดงค่าสูงสุดของแต่ละความเข้มข้น	49
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับ แรงดันไฟฟ้า (mV)	51
4.10 เครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์แบบพกพา	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อและสัญลักษณ์

ความหมาย

1. LED	Light Emitting Diode
2. PCB	Print Circuit Board
3. $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
4. $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
5. $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	นิวตันต่อตารางเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในการตรวจวัดปริมาณสารทางชีวภาพในปัจจุบันนี้ พัฒนาการของโลกจะมุ่งไปสู่อุปกรณ์ต่างๆ ที่มีขนาดเล็กลง เพื่อให้สามารถสะดวกต่อการพกพาไปใช้งานในสถานที่ต่างๆ จึงทำให้เกิดเทคโนโลยี ไมโครฟลูอิดิก ซึ่งไมโครฟลูอิดิกเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยท่อที่มีขนาดระดับไมโครเมตร สามารถควบคุมปริมาณของของเหลวในระดับไมโครลิตร ระบบไมโครฟลูอิดิกจึงเป็นการย่อส่วนของระบบของไหลให้เราสามารถใส่ปริมาณสารในระดับต่ำมากและเมื่อใส่สารปริมาณน้อยจึงสามารถควบคุมปริมาณได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังใช้เวลาสั้นเนื่องจากกระบวนการจะเกิดขึ้นเร็วกว่า ระบบไมโครฟลูอิดิกจึงประโยชน์ต่อหลากหลายวงการ เช่น ทางด้านการแพทย์ และทางด้านชีววิทยา เป็นต้น เทคโนโลยีไมโครฟลูอิดิก จึงมีความเหมาะสมที่จะถูกนำมาใช้งานร่วมกับเครื่องมือวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์แบบพกพา ซึ่งเทคโนโลยีของแหล่งกำเนิดแสงในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทำให้มีแหล่งกำเนิดแสงแอลอีดี (LED) ที่มีขนาดเล็ก ให้ความสว่างสูง และใช้กำลังไฟฟ้าน้อย แหล่งกำเนิดแสงชนิดนี้ยังมีราคาถูกเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นๆ ที่ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดเช่น ซีนอน และเลเซอร์ เป็นต้น ดังนั้นการประยุกต์ใช้แหล่งกำเนิดแสง LED เพื่อกระตุ้นสสารจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาเครื่องมือวัดที่มีขนาดเล็กและกินไฟน้อย อีกทั้งยังทำให้สะดวกต่อการพกพาในการนำไปวัดปริมาณสาร ในสถานที่ต่างๆ การใช้ประโยชน์ฟลูออเรสเซนซ์เป็นเทคนิคที่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ให้สภาพไวสูง มีความเที่ยง ความแม่นยำสูง และเป็นงานวิเคราะห์สารที่มีปริมาณน้อยๆ ฟลูออเรสเซนซ์เป็นเทคนิคที่ถือได้ว่ามีสภาพความไวสูงกว่าสเปกโตรเมตริกเทคนิคประมาณ 1-3 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ขนาดพกพาโดยใช้แหล่งกำเนิดแสง LED

1.2.2 เพื่อนำเครื่องที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้เครื่องกับงานวิเคราะห์ปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์
ทั้งในและนอกห้องปฏิบัติการ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิก

1.3.2 ศึกษาขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

1.3.3 ศึกษาการทฤษฎีของเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์

1.3.4 จัดสร้างเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์แบบพกพา

1.3.5 สรุปและอภิปรายผลการดำเนินงาน

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีของ ไมโครฟลูอิดิกและการสร้าง ไมโครฟลูอิดิก

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาทฤษฎีของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 3 จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการชุบโลหะ

ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาการวัดของระบบ ไมโครฟลูอิดิก

ขั้นตอนที่ 5 ทดลองสร้างเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์แบบพกพา

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบการทำงานของเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์

ขั้นตอนที่ 7 จัดทำรายงานผลการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
ขั้นตอนที่ 1										
ขั้นตอนที่ 2										
ขั้นตอนที่ 3										
ขั้นตอนที่ 4										
ขั้นตอนที่ 5										
ขั้นตอนที่ 6										
ขั้นตอนที่ 7										

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีไมโครฟลูอิดิกและการหุบโลหะ
- 1.5.2 มีความรู้และความเข้าใจในหลักการสร้างไมโครฟลูอิดิก
- 1.5.3 มีความรู้และความเข้าใจในหลักการสร้างเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์
- 1.5.4 ทำให้รู้ประโยชน์ของแสงฟลูออเรสเซนซ์ในการนำมาใช้วัดสาร
- 1.5.5 สามารถสร้างเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์แบบพกพาได้

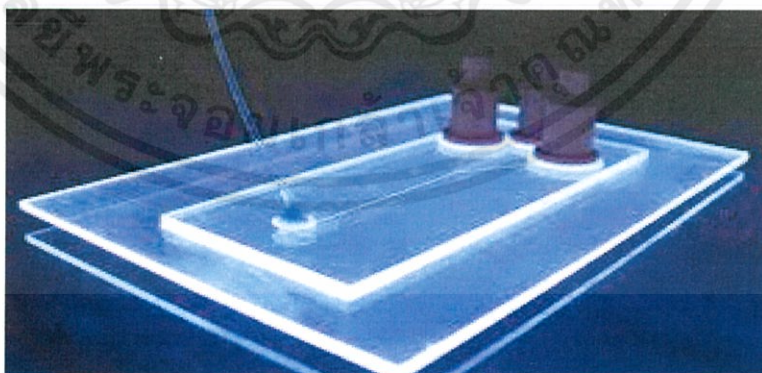
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐานของไมโครฟลูอิดิก

ไมโครฟลูอิดิก (microfluidic) เทคโนโลยีของการศึกษาและประยุกต์ใช้งานระบบการจัดการของไหล (fluid) เช่น ของเหลว หรือ ก๊าซ ที่มีปริมาณน้อยมากที่ไหลผ่านร่องหรือท่อที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร (เส้นผมของมนุษย์มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 17-181 ไมโครเมตร) ท่อที่เล็กมากซึ่งเป็นโครงข่ายลำเลียงการไหลของอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์ (microfluidic device) จะถูกสร้างขึ้นด้วย micro-fabrication techniques ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนา อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์ถูกสร้างขึ้นจากวัสดุฐานรองเช่น ซิลิกอน และแก้ว ด้วยวิธีการสร้างลายวงจรด้วยแสง (photolithography) และแกะสลัก (etching) ซึ่งดัดแปลงมาจากอุตสาหกรรมการออกแบบและพัฒนางานจไฟฟ้าขนาดเล็ก (microelectronic industry) แต่กระบวนการผลิตมีราคาสูงและไม่ยืดหยุ่นจึงเป็นแรงผลักดันให้ปัจจุบันนักวิจัยส่วนใหญ่หันมาสนใจสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ ไมโครฟลูอิดิกในพอลิเมอร์แทน เนื่องจาก ใช้เวลาในการผลิตน้อย เหมาะสมกับการตรวจวัดทางชีวภาพ อีกทั้งยังมีราคาถูกจึงสามารถใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งได้ ด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี soft lithography ที่อยู่บนรากฐานของการพิมพ์แบบ (printing) และหล่อแบบ (molding) จากแม่แบบต่างๆ โดยที่แม่แบบสามารถสร้างได้จากเทคนิคต่างๆ



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีระบบของไหลแบบจุดภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ฟิสิกส์ของของไหล

2.2.1 ของไหล

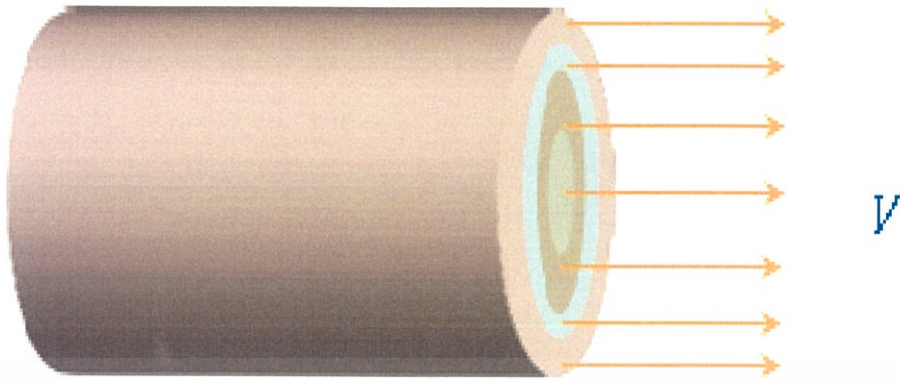
ของไหล หมายถึงสสารซึ่งสามารถไหลได้มีรูปร่างไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับภาชนะที่บรรจุได้แก่ ของเหลวและก๊าซ การศึกษากฎเกณฑ์เบื้องต้นเกี่ยวกับของไหล ได้แก่ของไหลที่อยู่นิ่ง ซึ่งเรียกว่า อุทกสถิตศาสตร์ (hydrostatics) อันมีความดันในของไหล หลักของพาสคัล หลักของ อาร์คิมิดีส และความตึงผิว ส่วนการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับของไหลเคลื่อนที่ซึ่งเรียกว่า อุทกพลศาสตร์ (hydrodynamics) จะศึกษา สมการการต่อเนื่อง สมการของแบร์นูลี และความหนืดอุทกสถิตศาสตร์ ของไหลที่อยู่นิ่งจะไม่มีแรงสัมผัส(tangential force) กระทำ เพราะแรงนี้จะมีผลให้ ชั้นของของไหลเลื่อนผ่านชั้นอื่นๆต่อกันไป ก็จะเกิดการไหลนั่นเอง ดังนั้นสำหรับของไหลที่อยู่นิ่งจะมีแรงกระทำตั้งฉากกับผิวของไหลเท่านั้น เรียกขนาดของแรงกระทำตั้งฉากนี้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวว่า ความดัน(pressure) ความดันนี้จะส่งต่อไปยังส่วนต่างๆของของไหลและถึงผิวภาชนะในทิศตั้งฉาก

2.2.2 ของไหลอุดมคติ

ของไหลอุดมคติ คือของไหลที่ไม่มีแรงเสียดทานระหว่างสายกระแสหรือ ไม่มีความหนืด ซึ่งคุณสมบัติของของไหลอุดมคติดังนี้

1. มีการไหลอย่างสม่ำเสมอ (Steady Flow) หมายถึง ความเร็วของทุกอนุภาค ณ ตำแหน่งบนพื้นที่หน้าตัดเดียวกันในของไหลมีค่าคงตัว
- 2.เป็นการไหลโดยไม่หมุน (Irrotational flow) คือ ในบริเวณโดยรอบจุดหนึ่งๆ ในของไหลจะไม่มีอนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเชิงมุมรอบจุดนั้นๆ เลย
- 3.เป็นการไหลที่ไม่มีแรงต้านเนื่องจากความหนืด (Nonviscous flow) ไม่มีแรงต้านใดๆ ภายในเนื้อของไหลมากระทำต่ออนุภาคของไหล
- 4.ไม่สามารถอัดได้ (Incompressible flow) ในทุกๆส่วนของของไหลมีความหนาแน่นคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การไหลของของไหลอุดมคติ (ไม่มีความหนืด)

2.2.3 สมการความต่อเนื่อง

เส้นสายธารของการไหล (stream line) หรือฟลักซ์ของการไหล คือเส้นที่ลากสัมผัสกับทิศทางการไหลที่ทุกๆจุดในสนามการไหลในขณะใดขณะหนึ่ง

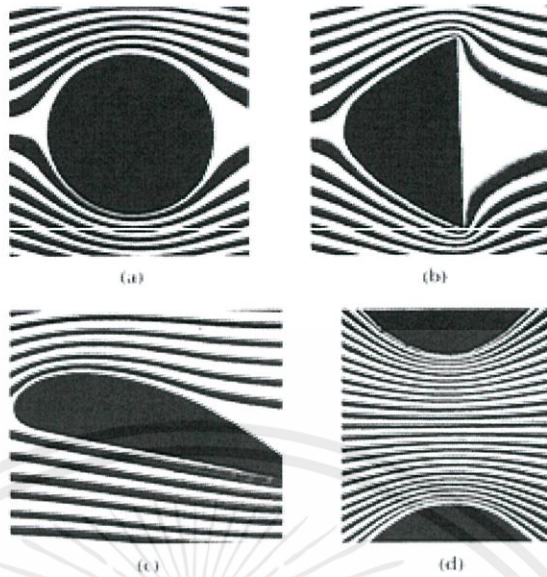


รูปที่ 2.3 a) เส้นที่ลากสัมผัสกับทิศทางการไหลทุกๆจุด คือเส้นสายธาร

b) แสดงหลอดของการไหล อัตราการไหลจะเท่ากันที่ภาคตัดขวางใดๆ

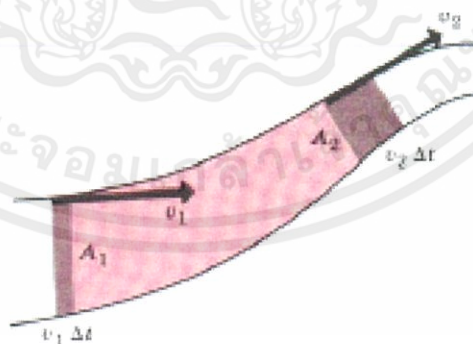
ของไหลที่มีการไหลแบบสม่ำเสมอคงตัว สามารถสร้างเป็นเส้นสายธารจำนวนหนึ่ง หรือมัดหนึ่งซึ่งประกอบกันเป็นท่อหรือหลอด เราเรียกส่วนมีรูปร่างเป็นท่อนว่า หลอดของการไหล (tube of flow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 (a),(b) และ (c) แสดงเส้นสายธารที่ไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงต่างๆ ส่วน (d) ไหลในช่องทางที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางแคบลง

พิจารณาหลอดของการไหล ซึ่งของไหลไหลเข้าผ่านพื้นที่หน้าตัด A_1 ด้วยความเร็ว v_1 และไหลออก ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_2 ด้วยความเร็ว v_2 ดังรูปที่ 2.5 ปริมาตรของไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A_1 ในช่วงเวลา dt คือ $A_1 v_1 dt$ ถ้าให้ความหนาแน่นของของไหลคือ ρ มวลของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่ A_1 ในเวลา dt คือ $\rho A_1 v_1 dt$ ในทำนองเดียวกัน มวลของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่ A_2 ในช่วงเวลาเดียวกันคือ $\rho A_2 v_2 dt$ ถ้าเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ มวลที่ไหลเข้าจะเท่ากับมวลที่ไหลออก



รูปที่ 2.5 แสดงการไหลเข้าและออกภายในหลอดของการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ดังนั้น $\rho A_1 v_1 dt = \rho A_2 v_2 dt$
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

เรียกว่า สมการของความต่อเนื่อง (equation of continuity) แสดงให้เห็นว่าความเร็ว ของของไหลในท่อแปรผกผันกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อ ผลคูณของพื้นที่หน้าตัดกับความเร็ว (A_v) คือ อัตราการไหลแทนด้วย Q

2.2.4 การไหลภายในท่อ

คุณสมบัติทางฟิสิกส์บางประการของของไหล ได้แก่ ความดัน ความหนาแน่น ความเร็ว จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds' number) ค่าเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์ต่อการไหลซึ่งจะกล่าวต่อไป

2.2.4.1 ความดัน เนื่องจากความดันมีความสัมพันธ์กับแรงต่อพื้นที่หน้าตัด ดังนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดจะทำให้ค่าความดันเปลี่ยนแปลงไปด้วย เราสามารถนำหลักการนี้ไปใช้เพื่อคำนวณหาความเร็วการไหลของของไหลได้จากสมการของ Bernoulli ซึ่งเป็นการสำหรับการไหลของ Steady, incompressible, in viscid และใช้ได้ตามเฉพาะการไหล

2.2.4.2 ความหนาแน่น ใช้ในการคำนวณหาความดันของของไหล ณ จุดใดๆ โดยความหนาแน่นบ่งบอกถึง มวลต่อปริมาตร

2.2.4.3 ความเร็ว จะเป็นค่าตัวแปรที่กำหนดพฤติกรรมการไหลของของไหลว่าจะเป็นไปในลักษณะใด กล่าวคือ เมื่อความเร็วเฉลี่ยของของไหลเป็นไปอย่างช้าๆ เราจะเรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) แสดงดังรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าในบริเวณใกล้กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความเร็วของการไหลจะมีค่ามากกว่าบริเวณที่ห่างออกไป และหากความเร็วมีค่ามากขึ้นถึงระดับหนึ่งจะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) แสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งการไหลแบบหลังนี้จะพบเห็นกันเป็นส่วนมาก อนึ่งการไหลแบบปั่นป่วนนี้จะเป็นการไหลที่มีรูปแบบไม่แน่นอน

2.2.4.4 จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) เป็นเลขดัชนีที่บ่งบอกสภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหล ซึ่งเป็นสัดส่วนของ inertia/viscous จำนวนเลขเรย์โนลด์จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็ว การไหล ความหนืด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และความหนาแน่นของของไหล เราอาจเขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

เมื่อ $Re =$ จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)

$V =$ ความเร็วการไหล m/s

$D =$ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ m

$\rho =$ ความหนาแน่นของของไหล kg/m^3

$\mu =$ ความหนืดของของไหล $kg/m \cdot s$

จำนวนเลขเรย์โนลด์ไม่มีหน่วย และมีความสำคัญอย่างมาก กล่าวคือจำนวนเลขนี้ใช้เป็นตัวกำหนดรูปแบบการไหลของของไหลว่าเป็นแบบใด เช่น

Re อยู่ในช่วง 0 - 2000 สภาพการไหลเป็นแบบ Laminar Flow

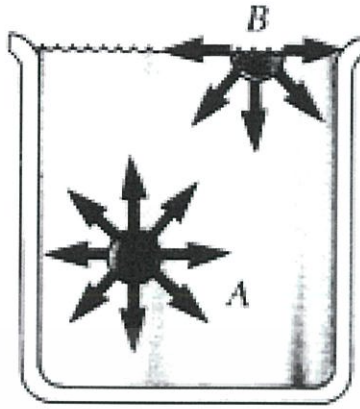
Re อยู่ในช่วง 2001 - 4000 สภาพการไหลเป็นแบบ Transition คือ มีการไหล 2 แบบ คือ Laminar + Turbulent

Re มากกว่า 4000 สภาพการไหลเป็นแบบ Turbulent Flow

2.2.5 ความตึงผิว

แรงตึงผิว หมายถึง แรงที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของของเหลว เป็นผลรวมของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของเหลวด้วยกัน หรือเป็นผลรวมของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับโมเลกุลของภาชนะหรือของไหลชนิดอื่นที่มันสัมผัส แรงตึงผิวจะอยู่ในแนวขนานกับผิวหน้าของของเหลวเสมอ แรงนี้พยายามทำให้พื้นที่ผิวของของเหลวมีขนาดน้อยที่สุด

จากรูปที่ 2.6 โมเลกุลของของเหลวแต่ละ โมเลกุลจะถูกแรงกระทำเนื่องจากโมเลกุลอื่นที่อยู่รอบ ๆ ผลคือทำให้แรงรวมดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ แต่โมเลกุลที่อยู่บริเวณใกล้ ๆ ผิวของของเหลวถูกแรงดึงลงมีขนาดมากกว่าแรงดึงขึ้น แรงลัพธ์ที่ดึงโมเลกุลดังกล่าวมีทิศทางเข้าไปภายในของเหลว ทำให้ผิวของของเหลวมีลักษณะเสมือนกับเป็นเยื่อบาง ๆ ที่ถูกขึงให้ตึง ปกติการนี้เรียกว่า ความตึงผิว (Surface Tension)

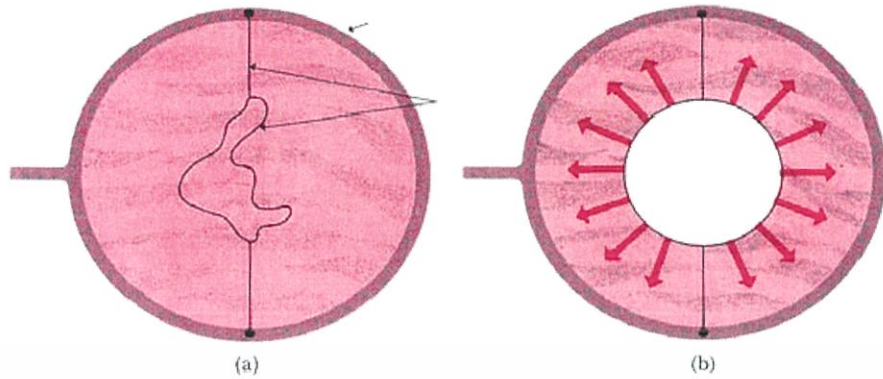


รูปที่ 2.6 แรงลัพธ์ที่กระทำต่อโมเลกุลที่อยู่ใกล้ผิวของของเหลว ทำให้เกิดความตึงผิว

ปรากฏการณ์ในชีวิตประจำวันที่เกี่ยวข้องกับแรงตึงผิวเช่น ของเหลวไหลจะไหลลดหยดเป็นหยด ๆ ไม่ไหลเป็นทาง เพราะว่ามีแรงเกิดขึ้นระหว่างผิวโมเลกุลของของเหลว ทำให้รวมตัวเป็นปริมาตรเล็ก ๆ โดยมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด การวางเข็มเย็บผ้าเล็ก ๆ ลงบนผิวน้ำ เข็มจะลอยอยู่ได้ หรือ แมลงสามารถเดินบนผิวน้ำได้ เพราะผิวของของเหลวทำหน้าที่เสมือนกับเป็นเชือกที่ขึงตึงสามารถรับน้ำหนักได้พอสมควร การจุ่มหลอดแก้วที่มีรูหลอดเล็ก ๆ ลงในแก้วน้ำ น้ำจะขึ้นไปในหลอดและมีความสูงกว่าระดับน้ำในแก้ว แต่ถ้าจุ่มหลอดแก้วเล็ก ๆ นี้ลงในอ่างปรอท ระดับปรอทในหลอดแก้วจะต่ำกว่าระดับปรอทในอ่าง ปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนแต่มีความเกี่ยวข้องกับ ความตึงผิว

ทิศทางของแรงตึงผิวมีทิศขนานกับผิวหน้าของของเหลว สามารถแสดงให้เห็นได้โดยง่าย ดังนี้ นำเส้นลวดขนาดเป็นวงไม้ไผ่คั่นและมีด้ายเส้นเล็ก ๆ ผูกเป็นบ่วงอยู่ตรงกลางวง นำวงลวดนี้จุ่มลงในน้ำสบู่แล้วยกขึ้นจะได้ฟิล์มสบู่บาง ๆ ในวงลวดโดยที่บ่วงด้ายลอยอยู่ อย่างอิสระ ฟิล์มบางนี้จะอยู่ในสภาพที่ขึงตึงหรืออยู่ในสถานะที่มีความเค้นคือมีแรงตึงอยู่ในระนาบของฟิล์มนี้ (ดูรูปที่ 2.7) ถ้าใช้นิ้วจิ้มทำให้ฟิล์มสบู่ภายในบ่วงด้ายให้ขาด เป็นรู บ่วงด้ายจะขยายตัวออกเป็นวงกลม เนื่องจากฟิล์มจะดึงออกรอบตัวตามแนวรัศมี (หรือกระทำในทิศที่ตั้งฉากต่อเส้นใด ๆ ในฟิล์มและเส้นรอบ ๆ ฟิล์ม) แรงลัพธ์ทั้งหมดที่กระทำต่อทุก ๆ ส่วนของเส้นด้ายจะเท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.7 (a) ฟิล์มของน้ำสุม่บนวงลวดโดยมีบ่วงด้ายอยู่อย่างอิสระ

(b) เมื่อทำให้ฟิล์มภายในบ่วงด้ายขาด บ่วงจะถูกแรงดึงออกรอบตัวเป็นวงกลม

เมื่อพิจารณาผิวหน้าของของเหลว ถ้าลากเส้นสมมติขึ้นมาเส้นหนึ่ง โมเลกุลของของเหลวที่อยู่ทั้งสองด้านของเส้นสมมตินี้ต่างก็มีแรงกระทำซึ่งกันและกันตลอดความยาว L ขนาดของแรงจะเพิ่มมากขึ้นถ้าความยาว L เพิ่มขึ้น นั่นคือ

แรงดึงผิว (F) แปรผันตรงกับความยาวของผิวหน้าของของเหลวที่แรงนั้นกระทำในแนวตั้งฉาก

$$F \propto L$$

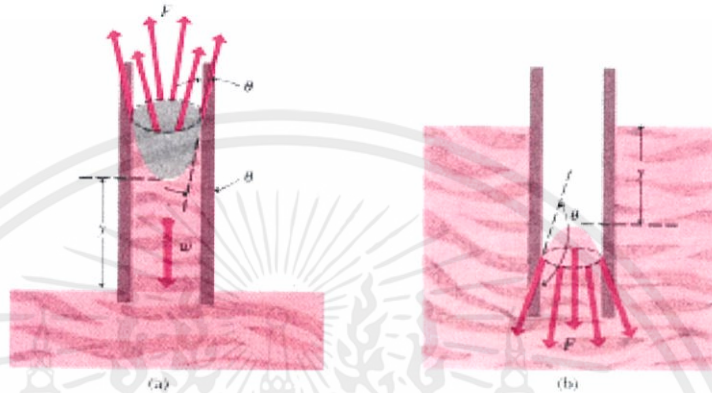
$$F = \gamma L$$

γ (แกมมา) คือ ความดึงผิวหรือสัมประสิทธิ์ความดึงผิว มีหน่วยเป็นนิวตัน/ เมตร เป็นแรงดึงผิวต่อหน่วยความยาว บนผิวหน้าของของเหลวที่แรงดึงผิวกระทำในแนวตั้งฉาก L เป็นความยาวของเส้นที่สัมผัสกับของเหลวหรือขอบของวัตถุที่เปียกของเหลว เช่น นำเข็มยาว d วางบนผิวของของเหลว ความยาว L จะเท่ากับ $2d$ เพราะของเหลวจะสัมผัสกับเข็มทั้งสองด้าน ใบบัวลอยในน้ำ ความยาว L คือเส้นรอบรูปของใบบัวที่เปียกน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 สภาพรูหลอดเล็กหรือสภาพกะปิลารี (Capillary)

เมื่อจุ่มท่อหรือหลอดเล็ก ๆ ลงไปในของเหลว ของเหลวภายในหลอดจะมีระดับสูงหรือต่ำกว่าระดับของเหลวรอบ ๆ ท่อหรือหลอดเล็ก ๆ นั้น ของเหลวตรงส่วนที่ติดกับขอบภาชนะนั้นจะโค้งขึ้น เช่น น้ำในหลอดแก้วหรือ โค้งลง เช่น ปรอทในหลอดแก้ว



รูปที่ 2.8 ของเหลวในรูหลอดแก้วเล็ก ๆ

ของเหลวเกาะหลอดแก้วเป็นรูปร่างกลม ตรงเส้นรอบวงนี้ผิวของของเหลวทำมุม θ กับหลอดแก้ว เรียกมุมนี้ว่า มุมสัมผัส (Contact angle) ของเหลวในหลอดแก้วจะสูงขึ้นเท่ากับ y น้ำหนักของของเหลวที่มีความสูง y นี้จะมีค่าเท่ากับแรงตึงผิวที่แตกแรงออกไปในแนวตั้ง

ให้ γ เป็นความตึงผิว และ r คือรัศมีของหลอดแก้ว ของเหลวทำมุมสัมผัสรอบหลอดแก้ว

ไปตามเส้นรอบวงยาว $= 2\pi r$

แรงดึงขึ้นทั้งหมด

$$F = 2\pi r \gamma \cos \theta$$

แรงดึงลงคือน้ำหนักของของเหลวสูง

$$y = mg = \rho g V = \rho g \pi r^2 y$$

เพราะของเหลวสมดุล

$$\rho g \pi r^2 y = 2\pi r \gamma \cos \theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ γr ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีนี้กับหลอดแก้ว มุมสัมผัสมีค่าเข้าใกล้ 0 องศา กรณีนี้กับหลอดเงิน มุมสัมผัสมีค่า 90 องศา นั่นคือน้ำจะไม่เกาะผิวโลหะเงิน ระดับน้ำภายในหลอดเงินกับภายนอกหลอดจะอยู่ในระดับเดียวกัน มุมสัมผัสระหว่างปรอทกับหลอดแก้วมีค่า 139 องศา ค่า y จะมีค่าติดลบ แสดงว่าระดับปรอทในหลอดแก้วจะต่ำกว่าระดับปรอทภายนอกหลอดแก้ว ถ้ามุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 90 องศาของเหลวจะเปียกภาชนะ ถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า 90 องศาแต่น้อยกว่า 180 องศาของเหลวจะไม่เปียกภาชนะและผิวของของเหลวจะโค้งลง

2.3 หลักการพื้นฐานของฟลูออเรสเซนซ์

2.3.1 การวาวแสงและการเรืองแสงของโมเลกุล

การเปล่งแสง (luminescence) ของสารบางชนิดจัดว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ก่อนข้างพิเศษสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบหรือตรวจพิสูจน์ชนิดของสารนั้นๆ ได้ โดยเฉพาะ ในปัจจุบันนี้ได้กลายเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้อย่างดี ผู้ที่พบปรากฏการณ์การเปล่งแสงนี้เป็นคนแรก คือ นักวิทยาศาสตร์ชาวสเปนชื่อ Nicholas Monardes ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1565 โดยเขาสังเกตเห็นว่าสิ่งที่สกัดได้จากไม้ชื่อ "lignum nephriticum" สามารถเปล่งแสงสีน้ำเงินได้ และเมื่อปี ค.ศ. 1833 Sir David Brewster ได้เคยบันทึกไว้ว่าคลอโรฟิลล์เปล่งแสงสีแดงได้ เช่นเดียวกัน ในปี ค.ศ. 1852 Sir G.G. Stokes นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ เป็นผู้อธิบายถึงกระบวนการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่จะนำไปใช้ในเคมีวิเคราะห์ อันถือได้ว่าเป็นการวางรากฐานทางความคิดที่สืบทอดมาจนถึงปัจจุบันนี้ นอกจากนี้ Stokes ยังเป็นผู้บัญญัติคำว่า ฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) ขึ้นมาใช้ เมื่อเขาพบว่าแร่ฟลูออรัสปาร์ (fluorspar) เปล่งแสงสีน้ำเงินขาวได้ คุณสมบัติเกี่ยวกับการเปล่งแสงของสารนี้ได้นำมาใช้เป็นวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีเป็นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1864 รายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับประวัติของการเปล่งแสง T.C.O. Haver ได้เขียนไว้ใน J. Chem. Ed. 55, 423. 1987 สำหรับฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescence) เป็นคำที่ได้ตั้งขึ้นมาใช้ตั้งแต่ต้นๆ ปี ค.ศ. 1500 หลังจากงานของชาวกรีกที่ได้นำเอาแสงมาใช้บอกทิศทาง ความจริงชื่อธาตุฟอสฟอรัสก็ตั้งขึ้นจากงานของชาวกรีกในปี ค.ศ. 1669 เช่นเดียวกัน เพราะฟอสฟอรัสสามารถทำให้เกิดแสงสว่างจ้าในห้องมืดได้ (แม้น อมรสิทธิ์ และ อัมร เพชรสม, 2539) ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (Luminescence spectroscopy) ได้กลายมาเป็นเทคนิคที่สำคัญและใช้กันอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ทางเคมี เนื่องจากเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่มีสภาพไวสูง มีลักษณะเฉพาะดังจะเห็นได้จากจำนวนผลงาที่ตีพิมพ์ออกมาอย่างมาก แต่เมื่อเทียบกับเทคนิคทางยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-visible Spectroscopy) เทคนิคหลังใช้งานได้ กว้างขวางและนิยมใช้มากกว่า

2.3.2 ชนิดของการเปล่งแสง

การเปล่งแสงมีด้วยกันหลายชนิด ทั้งนี้แล้วแต่แหล่งของพลังงานที่ทำให้โมเลกุล ไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น (excited state) เช่น โมเลกุลที่เกิดอันตรกิริยากับโฟตอนของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิด luminescent molecules เรียกว่า photoluminescence ซึ่งยังแบ่งออกได้เป็นการวามแสง (fluorescence) และการเรืองแสง (phosphorescence) ทั้งสองปรากฏการณ์นี้แตกต่างกันที่กระบวนการกลับมาสู่สถานะพื้นใหม่ ถ้าโมเลกุลของสารนั้นใช้พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาเคมี เรียกว่า chemical luminescence หรือ chemiluminescence และถ้าโมเลกุลได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปเป็น โมเลกุลที่สถานะกระตุ้น เรียกว่า radioluminescence นอกจากนี้ยังมี bioluminescence หรือ thermoluminescence เป็นต้น เฉพาะ photoluminescence เท่านั้นที่นิยมใช้เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ทางเคมีอย่างกว้างขวาง ซึ่งมีข้อได้เปรียบด้านสภาพไวหรือ เซนซิวิตี (sensitivity) มีลักษณะเฉพาะ (selectivity) และวิเคราะห์ได้ในช่วงความเข้มข้นที่กว้าง

2.3.3 หลักการของโฟโตลูมิเนสเซนซ์

โฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นกระบวนการไปสู่สถานะกระตุ้นและการกลับสู่สถานะพื้น (excitation/deexcitation process) โดยมีโฟตอนเขาไปเกี่ยวข้อง คือมีการดูดกลืนโฟตอนและให้โฟตอนออกมา เนื่องจากการะบวนการที่เกิดขึ้นจะต้องแข่งขันกัน ดังนั้น อัตราการเกิดของกระบวนการเหล่านี้จึงมีความสำคัญ

-กระบวนการกระตุ้น (Excitation)

เมื่อ โมเลกุลดูดกลืนรังสีจากการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น (excited state) จะต้องมีกลไกบางอย่างที่จะลดพลังงานที่มากเกินไปลงมาสู่สถานะพื้น (Deexcited state) ไม่ว่าจะเป็นการแผ่รังสีหรือการชนกันกับโมเลกุลอื่น ๆ

state) ถ้าให้มัลติพลิตี (Multiplicity) ของโมเลกุล M ซึ่งแสดงถึง orbital angular momentum ของแต่ละ สถานะ (State) และเกี่ยวกับ spin ดังสมการ

$$M = 2S + 1$$

S = spin quantum number ของโมเลกุลและเป็นผลรวมของ spin ของอิเล็กตรอนในโมเลกุล สำหรับโมเลกุลของสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ $S=0$ เพราะโมเลกุลจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่

$$S = \left(+\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right) = 0$$

$M=2(0) + 1 = 1$ เรียกว่า singlet state (Singlet electronic state) และให้ singlet state พื้น (ground single state) เป็น S_0 ถ้าเป็น S_1 และ S_2 จะหมายถึง singlet state กระตุ้นที่หนึ่งและที่สอง ตามลำดับ (First and second excited singlet states)

ขณะที่โมเลกุลอยู่ในสถานะกระตุ้นอิเล็กตรอนตัวหนึ่งมีโอกาสเปลี่ยน spin กลับทางดั่งนั้น

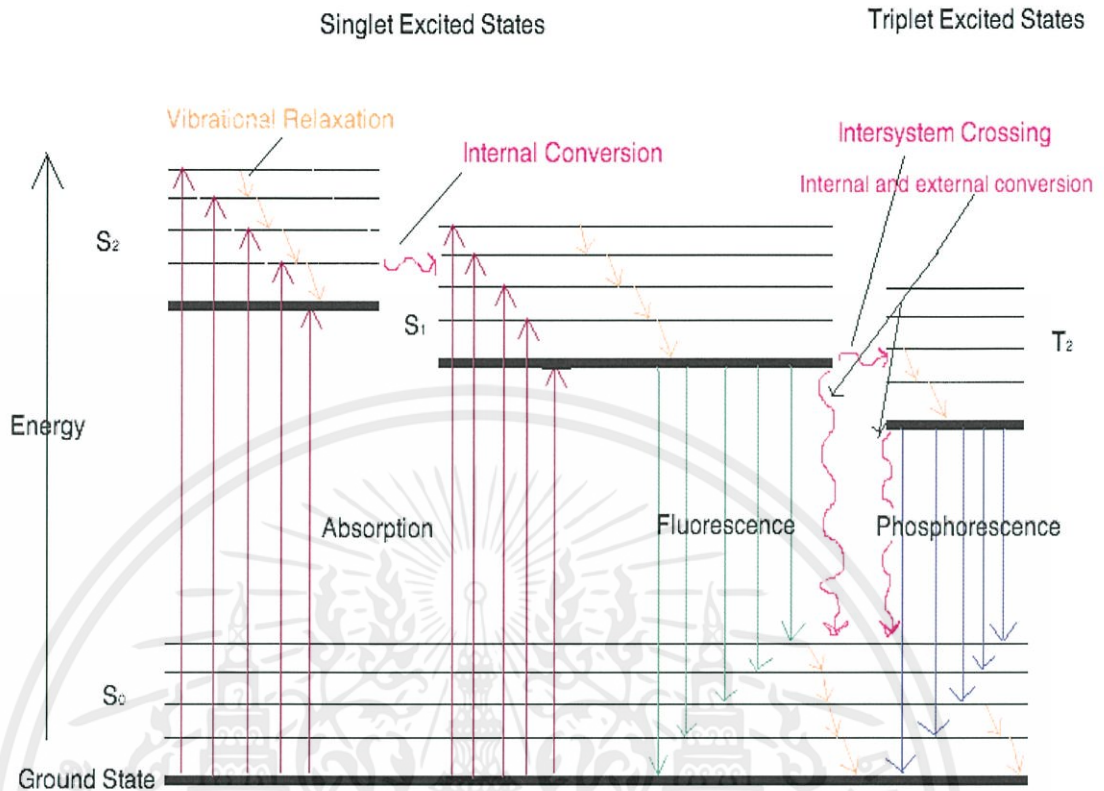
$$S = \left(+\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) = 1$$

$$M = 2(1) + 1 = 3 \text{ เรียก triplet state}$$

และ triplet state ที่มีพลังงานต่ำที่สุดให้เป็น T_1 ดั่งนั้น โมเลกุลใดที่มีอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ ไม่สามารถมี triplet state พื้น (Ground triplet state) เพราะอิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำที่สุดมี spin paired

ดั่งนั้น โมเลกุลที่มีหนึ่ง unpair อิเล็กตรอน (จำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่) จึงมีสถานะเป็น doublet state เช่นพวก free radicals เป็นต้น รูปที่ 2.12 จะแสดงถึงกระบวนการทำให้เกิดการกระตุ้นและการแผ่รังสีออกมาเป็น singlet และ triplet state ของโมเลกุลของสารอินทรีย์ โดยใช้แผนภาพแสดงระดับพลังงาน Jablonski

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงระดับพลังงาน Jablonski เกี่ยวกับการดูดกลืนและการแผ่รังสี

ในแผนภาพนี้แสดงระดับพลังงานให้เห็นเฉพาะ electronic และ vibration energy levels เท่านั้นแต่ rotation energy level จะไม่มีเพราะไม่สามารถวัดและแยกออกได้ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งระดับพลังงานความยาวคลื่นแสงที่ให้ออกมาแตกต่างกันอย่างมากและยังขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ด้วย

2.3.4 เครื่องฟลูออโรมิเตอร์ (Fluorometer) บางครั้งอาจเรียกได้หลายแบบ เช่น

- Luminescence spectrometers
- Fluorimeters
- Fluorescence spectrometers
- Spectrofluorometers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

เครื่อง Fluorometer เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการวิาวแสง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. Filter fluorometer ใช้ฟิลเตอร์ (filter) เป็นตัวกรองแสง เหมาะสำหรับการวัดปริมาณที่ต้องการความไวสำหรับการวัดสารประกอบที่เฉพาะเจาะจง ง่ายในการใช้งานและราคาถูก

2. Spectrofluorometer Filter Fluorometer จะใช้ excitation monochromator แทน excitation filter และ emission monochromator แทน emission filter สามารถเลือกการใช้งานได้ที่ความยาวคลื่นหลายค่า การทำงานจึงสามารถตรวจสอบองค์ประกอบได้ในหลายความยาวคลื่น มีความไว และความจำเพาะระดับปานกลาง มีช่วงความยาวคลื่นในการใช้งานกว้าง (200-1000 นาโนเมตร เครื่องบางรุ่นอาจมี excitation monochromator หรือ emission monochromator เป็นแบบคู่ (dual) ซึ่งจะช่วยให้มีความไวมากขึ้น และลดการเบี่ยงเบนของแสง

ส่วนประกอบของเครื่อง Fluorometer

1. Light Source

ทำหน้าที่ปล่อยแสงที่ความยาวคลื่นหนึ่งออกมาเพื่อกระตุ้นสารประกอบที่สนใจ โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในเครื่องfluorometer มีหลายชนิด ได้แก่

- หลอดไฟซีนอน เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีประโยชน์หลายอย่าง ให้แสงออกมาได้ที่ความยาวคลื่น 190-1200 นาโนเมตร

- หลอด Mercury vapor โดยทั่วไปหลอดชนิดนี้จะให้ความเข้มแสงมากกว่าหลอดซีนอน แต่ความเข้มนี้จะทำได้แค่เพียงแสงที่ออกมาได้ในช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมของปรอทเท่านั้น จึงต้องมีการเคลือบสารจำพวก fluorescent phosphor หลายชนิด บนหลอดเพื่อให้สามารถเปล่งแสงได้ที่ความยาวที่ต้องการได้ โดยทั่วไป หลอดชนิดนี้จะสามารถใช้ได้เป็นเวลานาน

- เลเซอร์ เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้กันมากในงานด้าน spectroscopic เพราะใช้งานได้สะดวก และสามารถเลือกปรับความยาวคลื่นได้ง่าย มีความกว้างของเส้นลำแสงที่แคบ และด้วยความต่อเนื่องในการปรับนี้จึงนำไปสู่ความสามารถในการตรวจวัดที่มีความละเอียดสูงได้ดี

- LED เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่นำมาใช้ในเครื่อง fluorometer หลอด LED มีข้อดีคือให้ความต่อเนื่องของแสงได้ดีกว่าหลอดชนิดอื่น และใช้พลังงานต่ำกว่า และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านใหม่ๆ ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Filter and Monochromator

สเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ โดยทั่วไปจะใช้เกรตติง (grating) เป็นโมโนโครเมเตอร์ ซึ่งสามารถเลือกใช้ความยาวคลื่นที่ต้องการสำหรับทำให้เกิดการกระตุ้น และเลือกใช้ความยาวคลื่นของ ฟลูออเรสเซนซ์ที่จะใช้วัดได้

ลักษณะของฟิลเตอร์และเกรตติงก็เป็นแบบเดียวกันกับที่ใช้ในเครื่องยูวี-วิสิเบิล เพียงแต่ต่างกันที่มีสองโมโนโครเมเตอร์ คือ excitation monochromator และ emission monochromator ซึ่งจะต้องอยู่ในตำแหน่ง 90 องศา ของกันและกัน

3. Sample cell or Cuvette

เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบ (cuvettes) ซึ่งมีรูปร่างต่างๆ กันออกไป แต่โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างภายใน 1 เซนติเมตร สามารถใช้หลอดทดลองเป็น cuvettes ได้ แต่ cuvettes ที่ดีที่สุดนั้นทำมาจากควอร์ตที่มีคุณภาพสูง

4. Detector ตัวตรวจวัดที่ใช้ใน fluorometer มี 2 ชนิด คือ

- Photomultiplier tube (PMT)

ส่วนใหญ่ PMT ที่ใช้ใน fluorometer นั้นจะมีความไวต่อแสง ในช่วง 300-600 นาโนเมตร และอาจมีแบบพิเศษที่มีความไวต่อแสงมากกว่า 600 นาโนเมตร(จำเป็นสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์บางประเภท เช่น การวัดปริมาณคลอโรฟิลล์) PMT เป็นตัวตรวจวัดแสง ซึ่งวัดด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้า โดยจะแปลสัญญาณจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของ PMT นี้ จะช่วยเพิ่มสัญญาณขาออก ทำให้สามารถรับปริมาณแสงให้มากขึ้นได้ ข้อจำกัดอย่างหนึ่งของ PMT คือ อุณหภูมิมีผลต่อการทำงานของ PMT ดังนั้น เมื่อใช้งานติดต่อกันเป็นเวลานาน อาจทำให้ผลการตรวจวัดผิดพลาดได้ จึงจำเป็นต้องพักเครื่องบ้างหากต้องใช้งานติดต่อกัน วิธีแก้ปัญหานี้ อย่างหนึ่งคือ เลือกใช้ closed-loop fluorometer เพราะมี stabilizing reference circuitry อยู่ภายใน ซึ่งสามารถช่วยให้การอ่านผลสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องมากขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

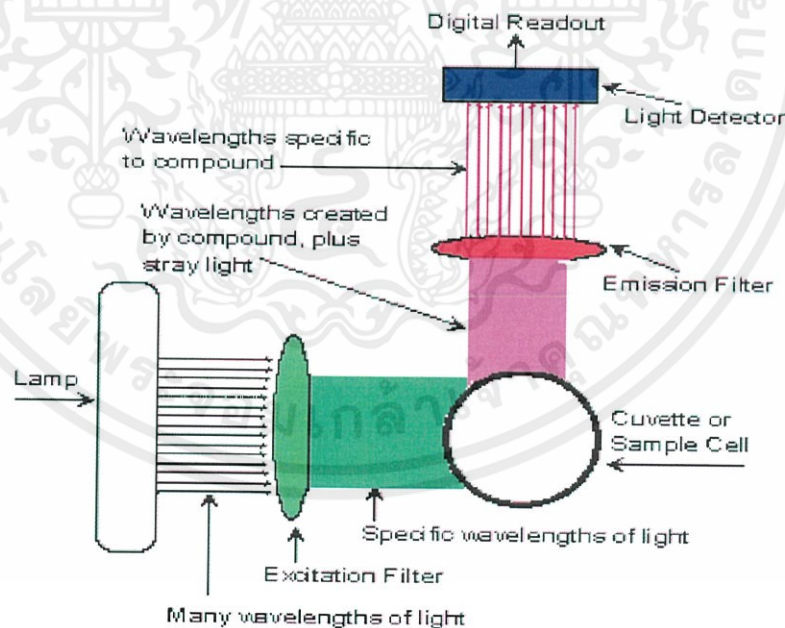
- Photodiode (PD)

ตัววัดชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้ประโยชน์กับระดับแสงที่ต่ำหรือปานกลาง ใช้ได้ทั้งในช่วงอุลตราไวโอเล็ต หรือ near-infrared ตัวตรวจวัด photodiode นี้เป็นอุปกรณ์ประเภท semiconductor ที่ใช้เพื่อตรวจจับแสงและก่อให้เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปมักจะใช้ในการตรวจการกระจายของแสง (forward scatter detection: FSC) และด้วยเหตุที่ ตัวตรวจวัดชนิดนี้มีขนาดเล็ก ทนทาน และใช้พลังงานต่ำ

5. Signal Processor and Data Read Out สัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดจะผ่านเข้ากระบวนการอิเล็กทรอนิกส์แล้วแสดงผลออกมา อาจเป็นอย่างไรอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างก็ได้ต่อไปนี้

- Meter หรือ Digital Meter
- Recorder หรือ Printer
- Computer หรือ Microprocessor

การทำงานของเครื่อง Fluorometer



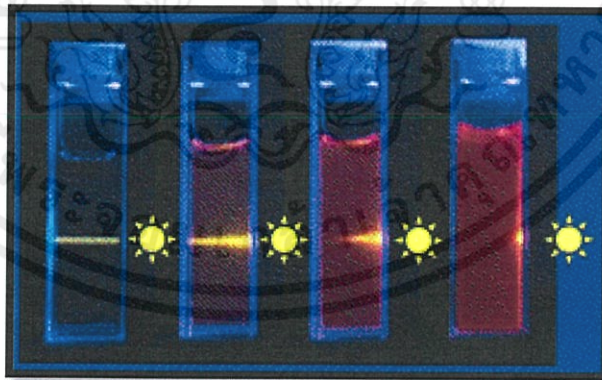
รูปที่ 2.10 การทำงานของเครื่อง Fluorometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่อง Filter fluorometer มีวิธีการทำงานดังนี้คือ แหล่งกำเนิดแสงจะส่องแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งออกมา โดยแสงจะผ่าน excitation filters เพื่อคัดเลือกความยาวคลื่นที่จำเพาะกับสเปกตรัมที่สามารถถูกกระตุ้นได้ของสารประกอบ และปิดกั้นหรือคัดความยาวคลื่นแสงค่าอื่นออก จากนั้น แสงจะผ่านและกระตุ้นตัวอย่างที่อยู่ภายใน cuvette และตัวอย่างจะเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่นอีกค่าหนึ่งออกมา และผ่าน emission filters (ซึ่งอยู่ในตำแหน่งมุมขวาของลำแสงกระตุ้น ทั้งนี้เพื่อลดการกระจายของแสงให้น้อยที่สุด และป้องกันลำแสงกระตุ้นมารบกวนแสงที่เกิดจากการเปล่งแสงของตัวอย่างด้วย) emission filters จะเป็นตัวกรองแสงที่ต้องกาอีกครั้งหนึ่ง จากนั้น แสงที่ถูกปล่อยออกมาจะถูกวัดโดยตัวตรวจจับ และค่าของการวาวแสงที่ได้จะแสดงบนหน้าจอของเครื่อง fluorometer

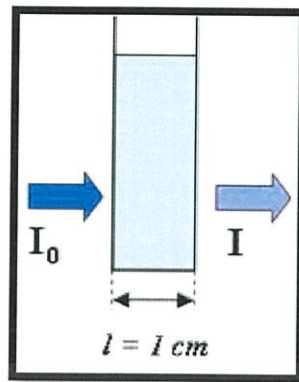
2.4 กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) มีใจความว่า“เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเดี่ยว (monochromatic light) ผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน”



รูปที่ 2.11 การดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การดูดกลืนแสงผ่านคิวเวทท์

ค่าการดูดกลืนแสงของสารมีความสำคัญอย่างยิ่งในเชิงปริมาณวิเคราะห์เนื่องจากการดูดกลืนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ดังสมการ

$$A = cl\varepsilon = \log \frac{I_0}{I}$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)

ε = เป็นสมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่ง
เรียกว่า molar absorptivity ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

l = ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง หรือความกว้างของเซลล์นั่นเอง (cm)

c = ความเข้มข้นเป็น โมล/ลิตร หรือโมลาร์ (M)

I_0 = ค่าความเข้มแสงที่ผ่านเข้าไป

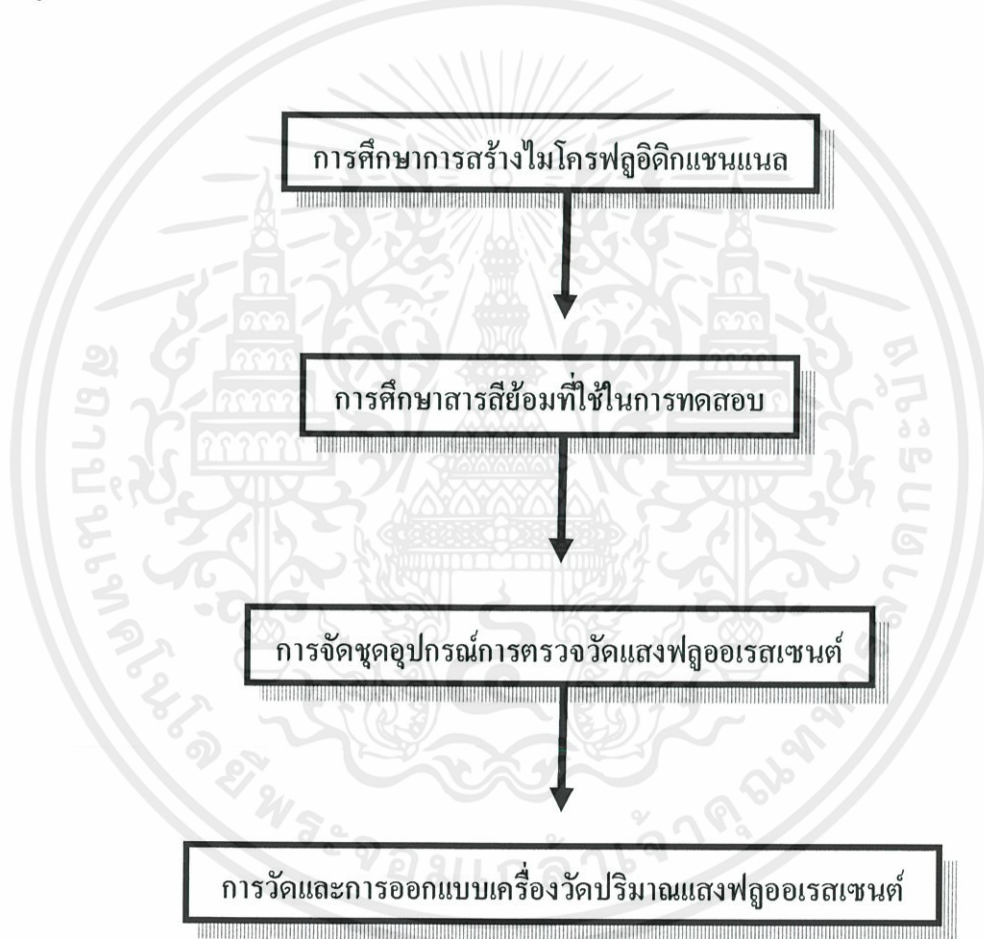
I = ค่าความเข้มแสงที่ผ่านออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยจะทำการศึกษาความรู้พื้นฐานของระบบไมโครฟลูอิดิกที่จะใช้ร่วมกับเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์รวมไปถึงการออกแบบชุดการทดลอง โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอด LED และนำชุดการทดลองไปพัฒนาเป็นเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์แบบพกพา โดยดำเนินการดังแผนภาพต่อไปนี้

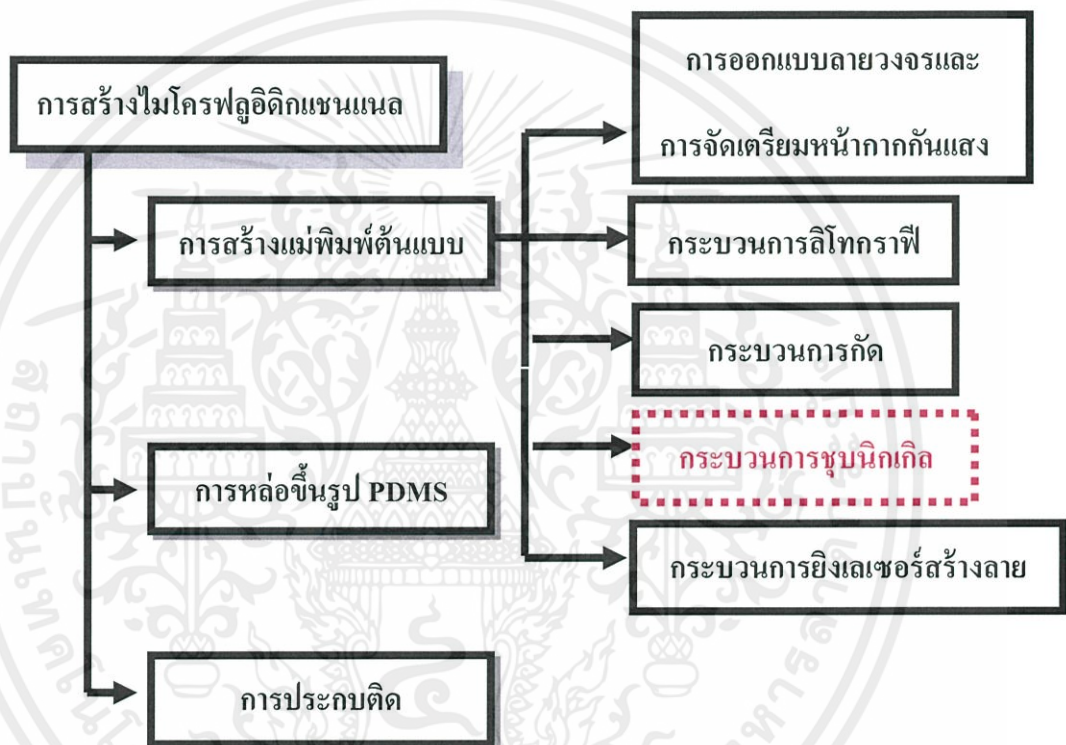


รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การศึกษาการสร้างไมโครฟลูอิดิกเซนแนล

ไมโครฟลูอิดิกเซนแนลเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์แบบพกพา โดยการสร้างไมโครฟลูอิดิกเซนแนลจะมีขั้นตอนดังไดอะแกรมรูปที่ 3.2 ในโครงการพิเศษนี้ผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกเซนแนลและได้จัดเตรียมระบบเพื่อชูนิกเกิลลงบนแผ่น PCB ที่ใช้สำหรับเตรียมแม่พิมพ์สำหรับสร้างไมโครฟลูอิดิก

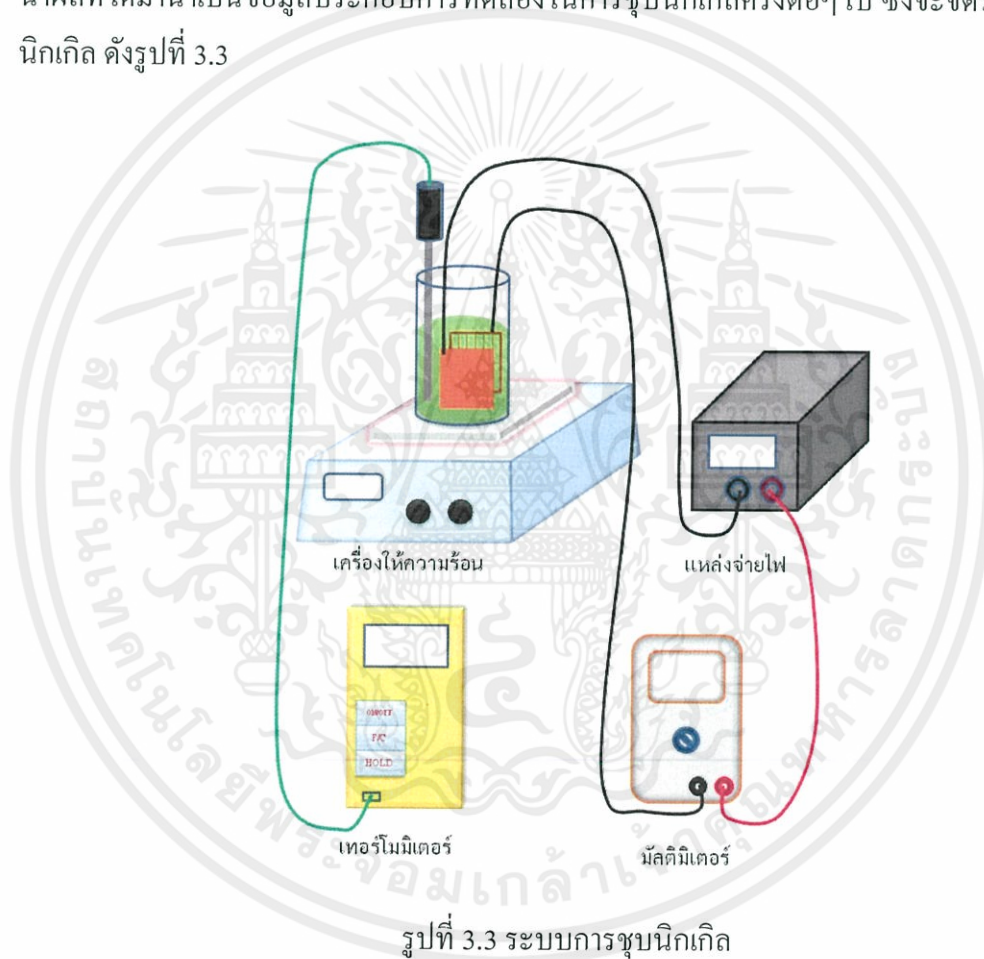


รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกเซนแนล

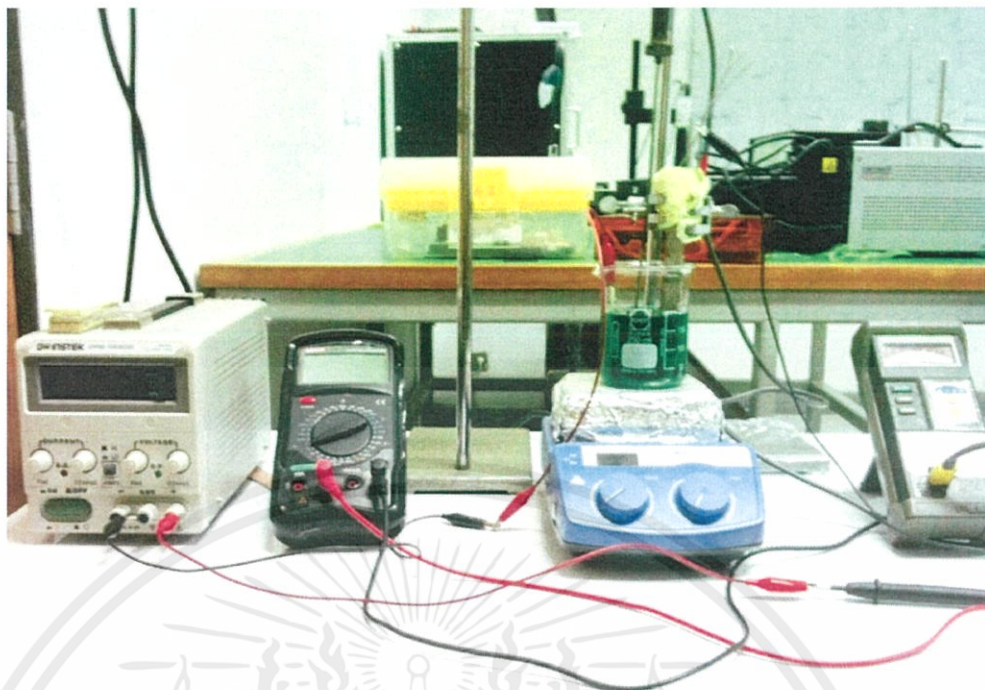
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 กระบวนการชุบนิกเกิล

ในการสร้างไมโครฟลูอิดิกเชลแนล ผู้วิจัยได้ทำการทดลองในขั้นตอนของการชุบนิกเกิล ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้นิกเกิลไปเคลือบติดอยู่กับชิ้นงานตามความต้องการ โดยอาศัยหลักทางเคมี-ไฟฟ้า กระบวนการนี้จะเป็นกระบวนการหนึ่งในการสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบด้วยวิธีการเคลือบวัสดุทรายฟิล์มหลายชั้นร่วมกับการชุบนิกเกิล เพื่อให้ชิ้นงานมีความหนาเพิ่มมากขึ้นในหน่วยไมโครเมตร โดยทำการทดลองในเงื่อนไขที่แตกต่างกันของกระแสไฟฟ้า พร้อมกับนำแผ่นไมโครฟลูอิดิกที่ทำการชุบนิกเกิลขึ้นมาวัดค่าความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ทุกๆ 20 นาที และบันทึกผล เพื่อนำผลที่ได้มานำเป็นข้อมูลประกอบการทดลองในการชุบนิกเกิลครั้งต่อไป ซึ่งจะจัดระบบการชุบนิกเกิล ดังรูปที่ 3.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ชุดการทดลองชุบนิกเกิล

ซึ่งระบบจะมีส่วนประกอบดังนี้

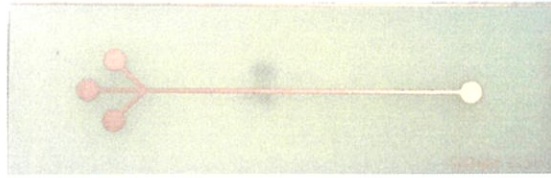
- น้ำยาชุบนิกเกิลทำหน้าที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 3.5 น้ำยาชุบนิกเกิล


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชิ้นงานที่ต้องการชุบทำหน้าที่เป็นขั้วลบ



รูปที่ 3.6 ชิ้นงานที่ต้องการชุบ

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงขนาดแกนแนลของไมโครฟลูอิดิก

รูปทรง	ขนาดของแกนแนล		เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)
	ความกว้าง (μm)	ความยาว (mm)	
	100	50	3
	150		
	250		
	500		
	1000		

- แท่งนิกเกิล ทำหน้าที่เป็นขั้วบวก



รูปที่ 3.7 แท่งนิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิน้ำยาสูบ ในขณะที่การสูบซึ่งต้องให้อยู่ระหว่าง 45-50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.8 เทอร์โมมิเตอร์ยี่ห้อ Fluke รุ่น 51 K/J

- มัลติมิเตอร์ทำหน้าที่วัดค่ากระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 มัลติมิเตอร์ดิจิทัลยี่ห้อ UNI-T รุ่น UT55

- เครื่องให้ความร้อนทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำยาสูบให้มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 45-50 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และรูปที่ 3.10 เครื่องให้ความร้อนอีกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แหล่งจ่ายไฟทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าตรงให้กับระบบ



รูปที่ 3.11 แหล่งจ่ายไฟ

- ไมโครมิเตอร์

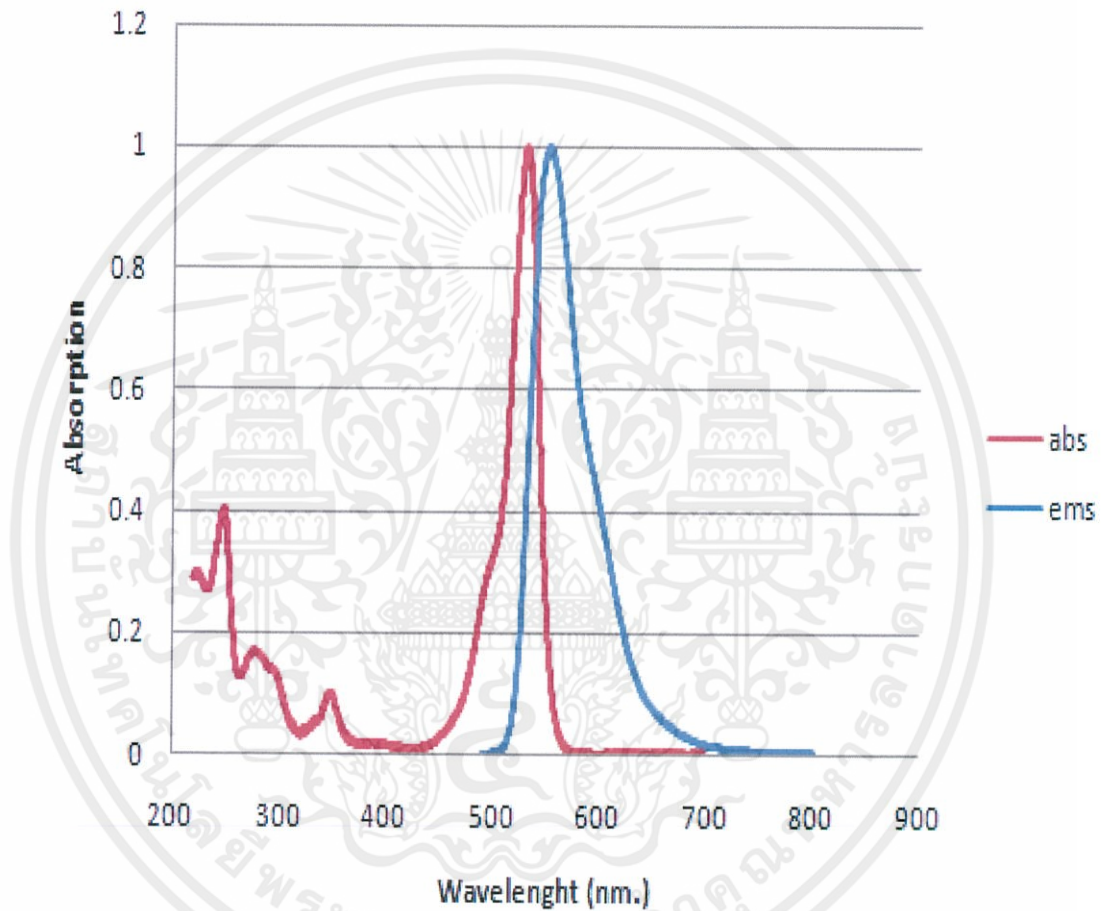


รูปที่ 3.12 ไมโครมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบสารสีย้อมที่ใช้ในระบบ

สารสีย้อมที่ใช้ในระบบ คือ Rhodamine 6 G ซึ่งเป็นสารดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่น 447 – 568 นาโนเมตร และเปล่งแสงในย่านความยาวคลื่น 510 – 680 นาโนเมตร และมีสเปกตรัมการดูดกลืนและการเปล่งแสง ดังรูปที่ 3.13



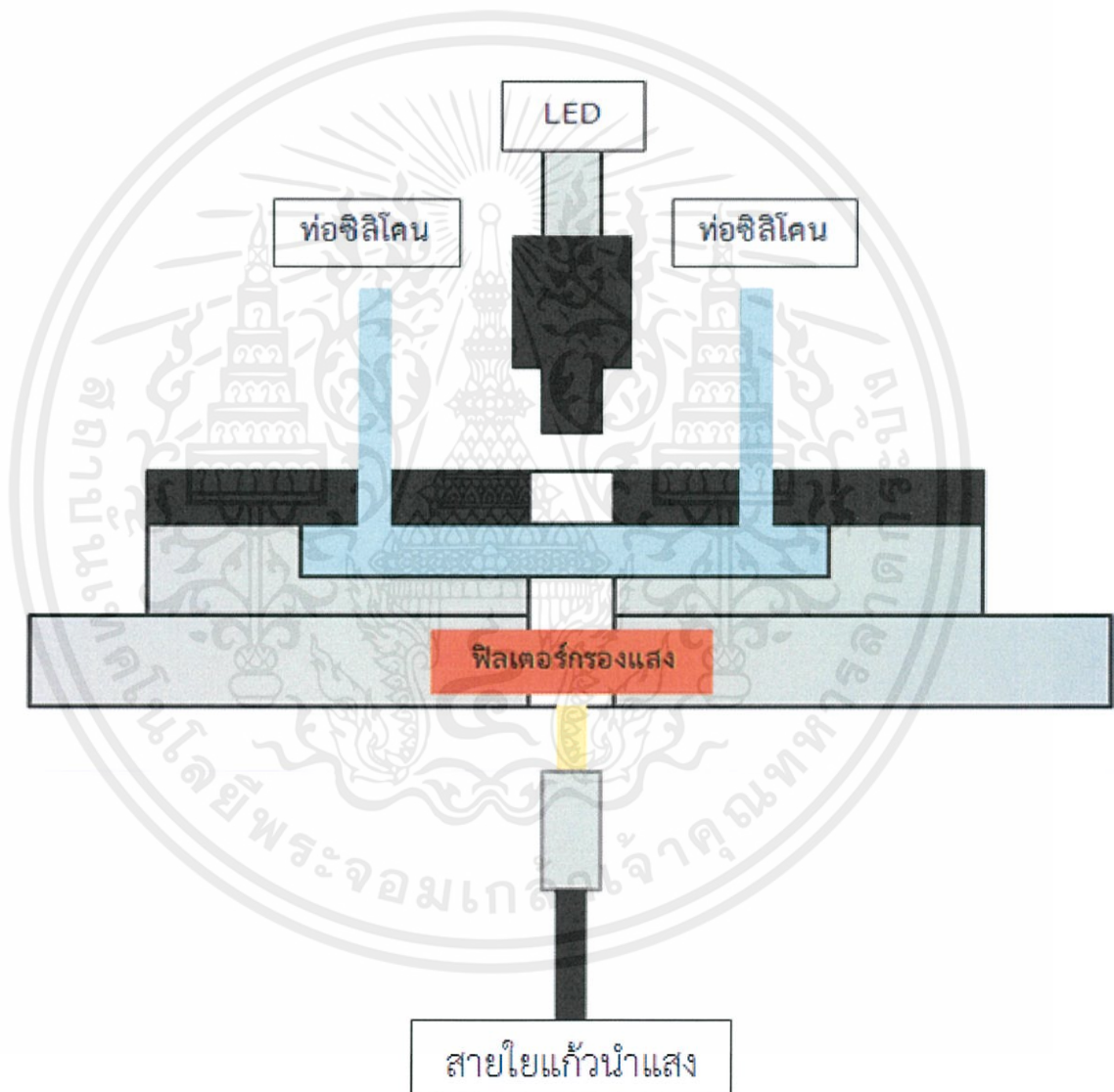
รูปที่ 3.13 สเปกตรัมการดูดกลืนและการเปล่งแสงของ Rhodamine 6 G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การจัดชุดอุปกรณ์การตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์

ไมโครฟลูอิดิกแซนแนลที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสาร Rhodamine 6G โดยผู้วิจัยจะจัดเตรียมระบบเพื่อใช้ในการตรวจวัด 2 ระบบ คือ การตรวจวัดทางแสง และการตรวจวัดทางไฟฟ้า

3.3.1 การจัดชุดอุปกรณ์การตรวจวัดทางแสง



รูปที่ 3.14 ระบบการตรวจวัดทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของระบบจะประกอบไปด้วย

- แหล่งกำเนิดแสง LED
- เลนส์รวมแสง
- ฟิลเตอร์กรองแสง
- แท่นจับยึดไมโครฟลูอิดิกเซนแนล
- สารสีย้อมที่ใช้ในการทดสอบ
- สเปกโตรมิเตอร์

3.3.1.1 แหล่งกำเนิดแสง LED

แหล่งกำเนิดแสง LED ที่กินกำลังไฟ 1 วัตต์ (กินกระแส 150 มิลลิแอมป์) หลอดชนิดนี้จะให้แสงสว่างมาก มีอายุการใช้งานยาวนานและมีราคาถูก จึงถูกเลือกใช้กับระบบวัดที่จัดเตรียมขึ้น รูปทรงของหลอดที่ใช้งานจะมีลักษณะเป็นรูป 6 เหลี่ยมดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 หลอดไดโอดเปล่งแสง LED

3.3.1.2 เลนส์รวมแสง

เลนส์รวมแสงที่ใช้ในระบบจะเป็นเลนส์นูนซึ่งทำหน้าที่รวมแสงจากแหล่งกำเนิดแสง LED ให้อยู่ในพื้นที่ขนาดเล็กๆ จะทำให้ความเข้มแสงมีค่ามากขึ้น จะแสดงในรูปที่ 3.16

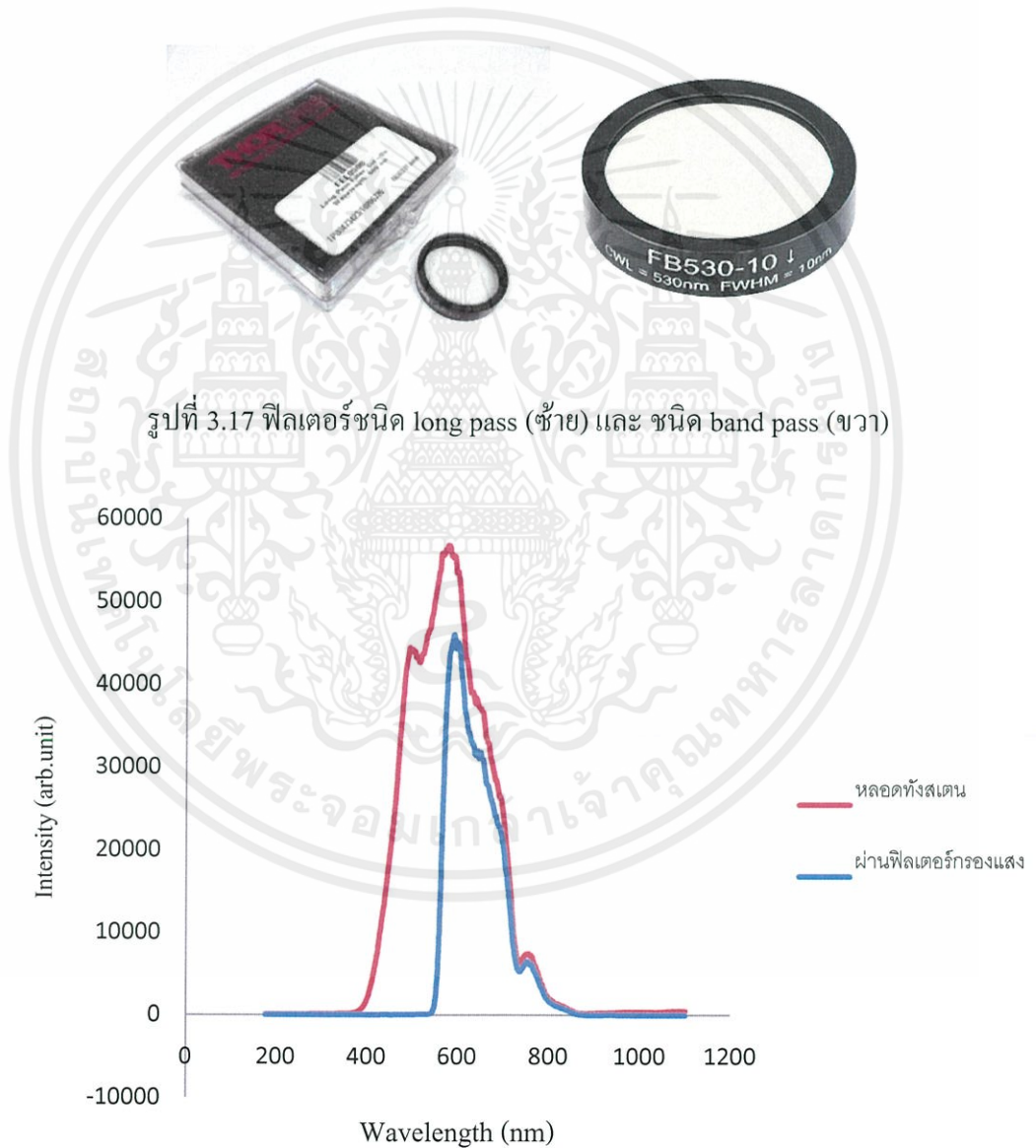


รูปที่ 3.16 เลนส์รวมแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

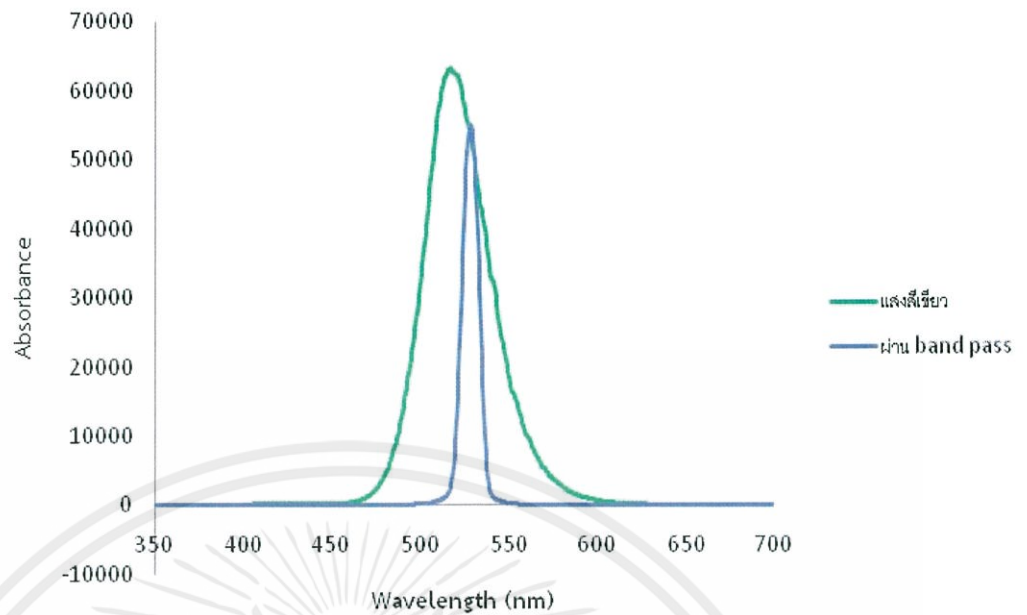
3.3.1.3 ฟิลเตอร์กรองแสง

ฟิลเตอร์กรองแสงที่ถูกนำมาใช้ในระบบวัดที่จัดเตรียมขึ้นคือฟิลเตอร์แสงชนิด long pass (long pass filter) และชนิด band pass (band pass filter) ของบริษัท Thorlabs ที่มี cut-on wavelength สอดคล้องกับสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารสีย้อมที่จะทดสอบ เช่น ชนิด long pass filter ที่มี cut-on wavelength 550 nm คือ ฟิลเตอร์นี้จะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 550 นาโนเมตรขึ้นไปผ่านได้และจะกั้นไม่ให้แสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 550 นาโนเมตรผ่านออกมา และ ชนิด band pass จะนำมากรองแสงที่แหล่งกำเนิดแสงเพื่อทำให้ช่วงของความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงแคบลง ซึ่งการทำงานของฟิลเตอร์ทั้งสองชนิดแสดงดังรูปที่ 3.17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

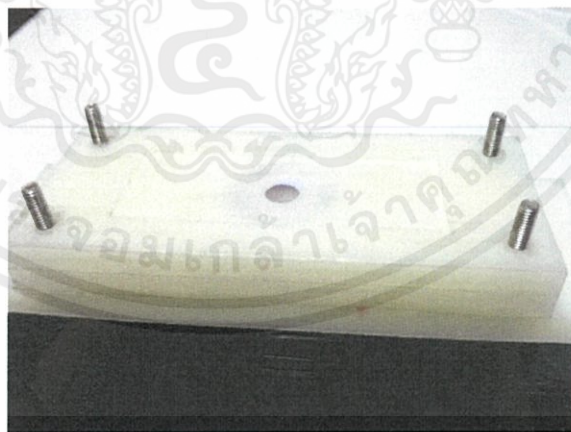
รูปที่ 3.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของทั้งสแตนด์และสเปกตรัมทั้งสแตนด์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเพื่อทำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เมื่อส่องผ่านฟิลเตอร์ชนิด long pass



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมสีเขียวและสเปกตรัมสีเขียว
เมื่อส่องผ่านฟิลเตอร์ชนิด band pass

3.3.1.4 แท่นจับยึดไมโครฟลูอิดิกเซนแนล

แท่นจับยึดไมโครฟลูอิดิกเซนแนลจะทำหน้าที่จับยึดไมโครฟลูอิดิก ซึ่งเป็นช่องที่มี
ขนาดเท่ากับฐานรองของไมโครฟลูอิดิกเซนแนลเท่ากับ 26 x 76 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.20 แท่นจับยึดไมโครฟลูอิดิกเซนแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

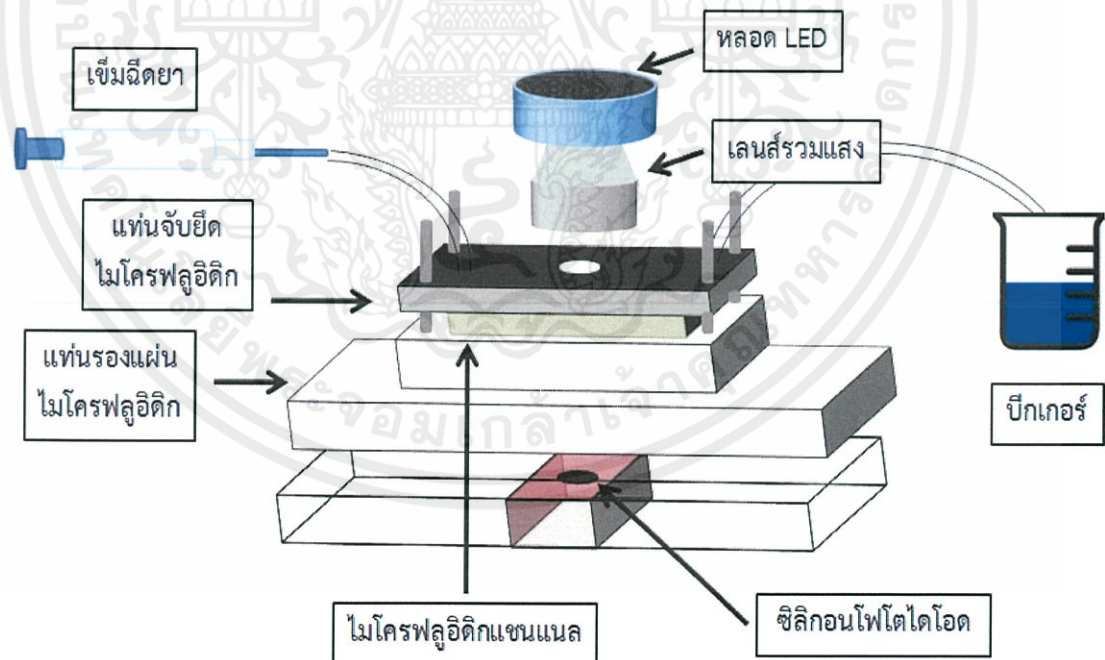
3.3.1.5 สเปกโตรมิเตอร์

เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ AvaSpec-EDU ของบริษัท Avantes



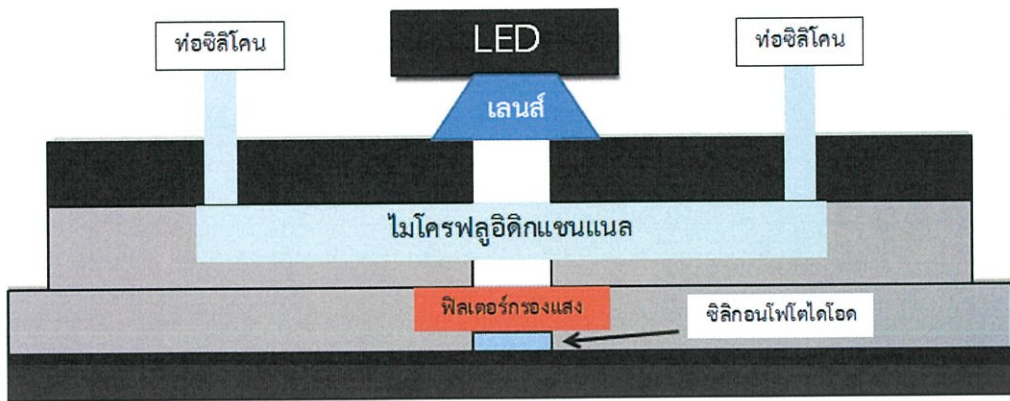
รูปที่ 3.21 สเปกโตรมิเตอร์

3.3.2 การจัดชุดอุปกรณ์การตรวจวัดทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.22 ระบบการตรวจวัดทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

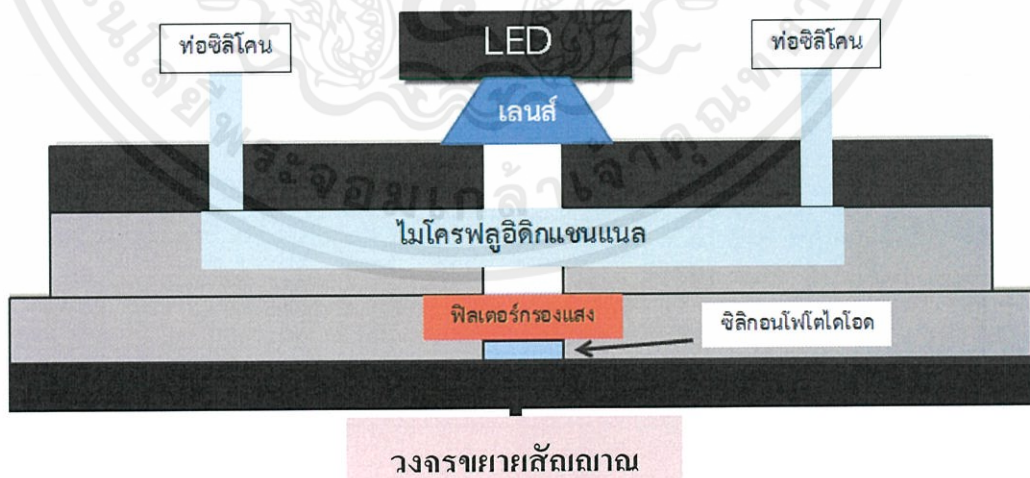


รูปที่ 3.23 แผนภาพระบบการตรวจวัดทางไฟฟ้า

โครงสร้างของระบบจะประกอบไปด้วย

- แหล่งกำเนิดแสง LED
- เลนส์รวมแสง
- ฟิลเตอร์กรองแสง
- แท่นจับยึดไมโครฟลูอิดิกแซนแนล
- สารสีย้อมที่ใช้ในการทดสอบ
- วงจรขยายสัญญาณ
- ระบบแสดงผล

○ ซิลิกอนโฟโตไดโอด → วงจรขยายสัญญาณ → มัลติมิเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ **มัลติมิเตอร์** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ **มัลติมิเตอร์** เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.24 ระบบแสดงผล

ระบบแสดงผล

3.3.2.1 ซิลิกอนโฟโตไดโอด

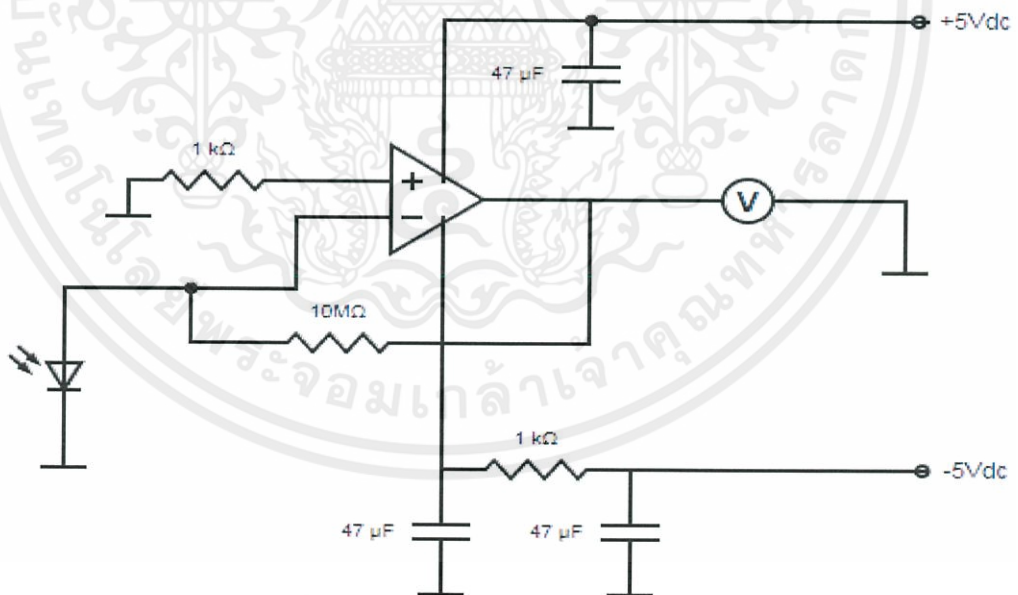
ตัวตรวจวัดแสงจะใช้เป็นโฟโตไดโอดที่ทำมาจากวัสดุซิลิกอน ซึ่งจะทำการตรวจวัดแสงออกมาเป็นกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.25 โฟโตไดโอดชนิดซิลิกอน

3.3.2.2 วงจรขยายสัญญาณ

วงจรขยายสัญญาณจะทำหน้าที่แปลงกระแสเป็นแรงดันและเพื่อขยายสัญญาณให้มีค่าสูงขึ้น วงจรขยายสัญญาณที่ใช้จะแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 วงจรขยายสัญญาณ

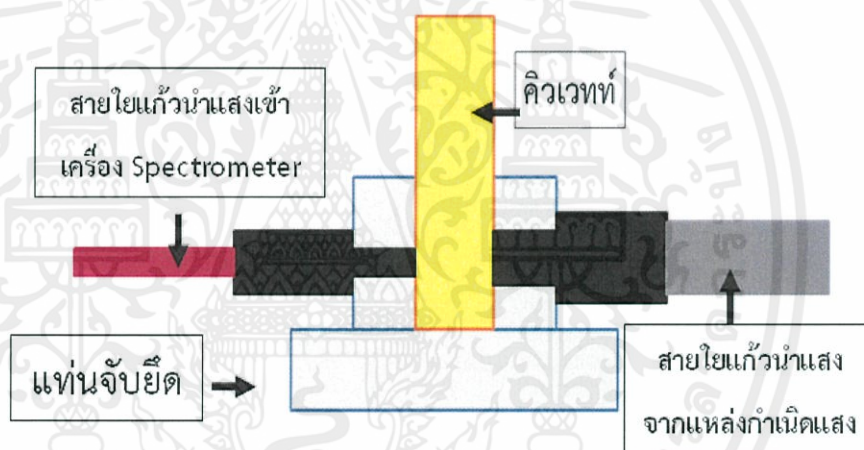
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวัดสมบัติทางแสง

การวัดสมบัติทางแสงของสาร Rhodamine 6G จะทำการวัด 2 แบบ คือการวัดการดูดกลืนแสง และการวัดการเปล่งแสง โดยทดลองวัดทั้งในคิวเวทท์และในไมโครฟลูอิดิกเซนแนล เมื่อสารละลายมีค่าความเข้มข้นตั้งแต่ 100 nM ถึง 5 mM โดยใส่สารละลายที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ AvaSpec-EDU ของบริษัท Avantes ในการตรวจวัดสเปกตรัมและบันทึกผลผ่านโปรแกรม AvaSoft 7.4 for USB2

3.4.1 การวัดการดูดกลืนแสงในคิวเวทท์

การวัดการดูดกลืนแสง จะใช้แสงสีขาวยากลอดทั้งสแตนในการทดสอบ โดยต่อสายใยแก้วนำแสงจากแหล่งกำเนิดแสง และสายใยแก้วนำแสงเข้าเครื่อง Spectrometer เป็นมุม 180 องศา โดยจัดชุดการทดลองดังรูปที่ 3.27

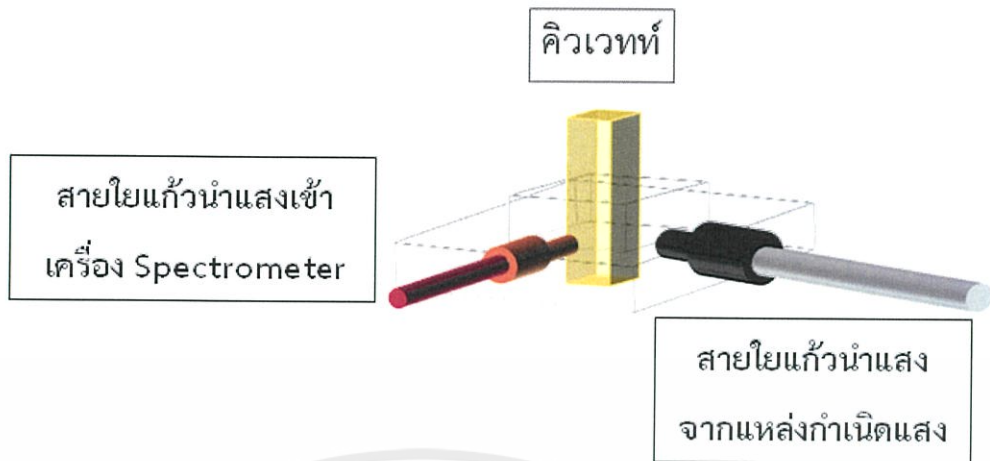


รูปที่ 3.27 ชุดการทดลองการวัดการดูดกลืนแสงในคิวเวทท์

3.4.2 การวัดการดูดกลืนแสงในคิวเวทท์

ในการวัดการเปล่งแสง จะใช้แสงสีเขียวจากหลอด LED ในการทดสอบ โดยต่อสายใยแก้วนำแสงจากแหล่งกำเนิดแสง และสายใยแก้วนำแสงเข้าเครื่อง Spectrometer เป็นมุม 90 องศา โดยจัดชุดการทดลองดังรูปที่ 3.28

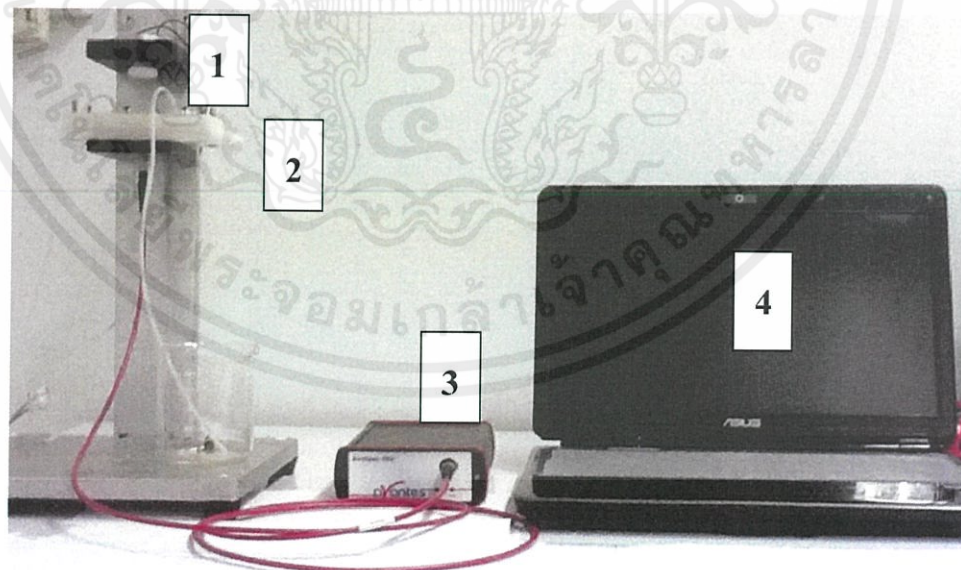
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 ชุดการทดลองการวัดการเปล่งแสงในคิวเวทท์

3.4.3 การวัดการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงในไมโครฟลูอิดิกเซนแนล

การทดลองนี้จะทำการวัดดูดกลืนและการเปล่งแสงของสาร Rhodamine 6G โดยฉีดสารไหลผ่านระบบไมโครฟลูอิดิกเซนแนล ในการวัดการดูดกลืนสารละลายจะถูกกระตุ้นด้วยแสงไฟสีขาวจากหลอดทั้งสแตน แต่ในการวัดการเปล่งแสงสารละลายจะถูกกระตุ้นด้วยแสงไฟจากหลอด LED สีเขียว ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ชุดการทดลองที่ 3.3.1



รูปที่ 3.29 ชุดการทดลองวัดการดูดกลืนและการเปล่งแสงในไมโครฟลูอิดิกเซนแนล

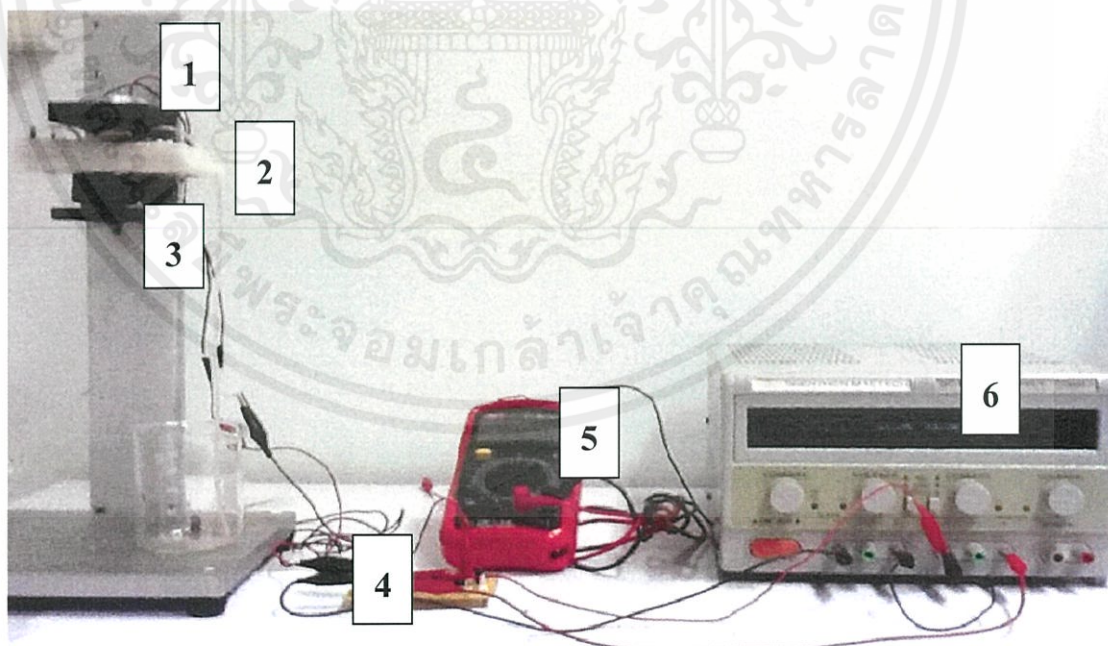
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. หลอด LED สีเขียวในการวัดการเปล่งแสง และ หลอดทั้งสแตน ในการวัดการดูดกลืน
2. ไมโครฟลูอิดิกเซนแนล
3. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ AvaSpec-EDU ของบริษัท Avantes
4. คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกผล

3.4.4 การวัดสัญญาณไฟฟ้า

การทดลองนี้จะใช้ชุดการทดลองในหัวข้อ 3.3.2 ในการทดสอบโดยการผสมสารสีย้อมที่ใช้ในการทดสอบ คือ Rhodamine 6G ที่ค่าความเข้มข้นในย่าน 100 nM ถึง 5 mM โดยจะทำการฉีดสารละลายที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ ผ่านระบบไมโครฟลูอิดิกเซนแนล ซึ่งสารละลายจะถูกกระตุ้นด้วยแสงไฟจากหลอด LED สีเขียว ซึ่งจะทำให้สาร Rhodamine 6G เปล่งแสงและจะถูกตรวจวัดด้วยซิลิกอนโฟโตไดโอด และจะถูกขยายสัญญาณด้วยวงจขยาย แล้วแสดงผลบนมัลติมิเตอร์ ซึ่งจุดประสงค์ของการตรวจวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ คือต้องการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้างดรูปที่ 3.3.2



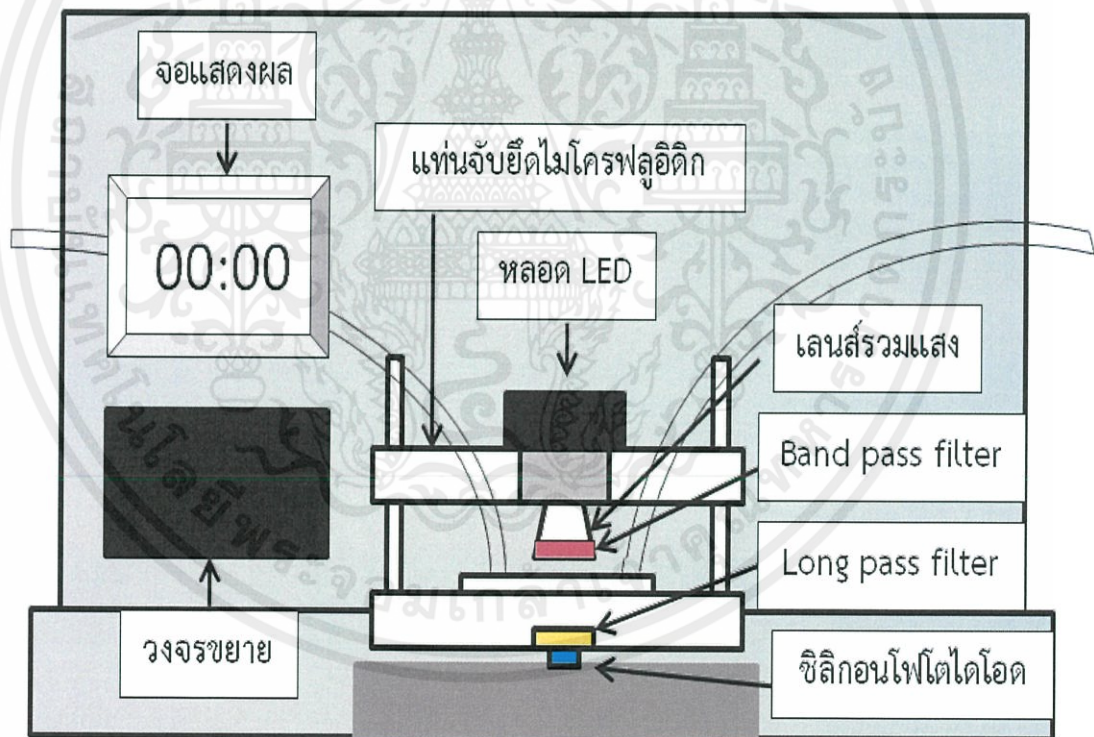
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.30 ชุดการทดลองวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ทางไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. หลอด LED
2. ไมโครฟลูอิดิกเซนแนลขนาด 100 ไมโครเมตร
3. ซีลิกอนโฟโตไดโอด
4. วงจรขยายสัญญาณ (รูป 3.26)
5. Power supply

3.5 การออกแบบเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ให้มีขนาดที่สามารถพกพาได้สะดวก โดยอาศัยข้อมูลพื้นฐานและชุดการทดลองจากการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.2 มาใช้ร่วมในระบบ ซึ่งเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ได้ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 เครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์แบบพกพา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองทั้งหมดจากขั้นตอนการพัฒนาาระบบวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ผู้วิจัยได้ศึกษา ซึ่งจะประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ การชูนิกเกิลลงบนแผ่นไมโครฟลูอิดิก การวัดสมบัติทางแสงของสาร Rhodamine 6G การวัดสเปกตรัมทางแสงของระบบไมโครฟลูอิดิกแซนแนล การวัดทางไฟฟ้าของระบบไมโครฟลูอิดิกแซนแนล และการพัฒนาาระบบวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งจะได้ผลการทดลอง ดังนี้

4.1 การชูนิกเกิลลงบนแผ่นไมโครฟลูอิดิก

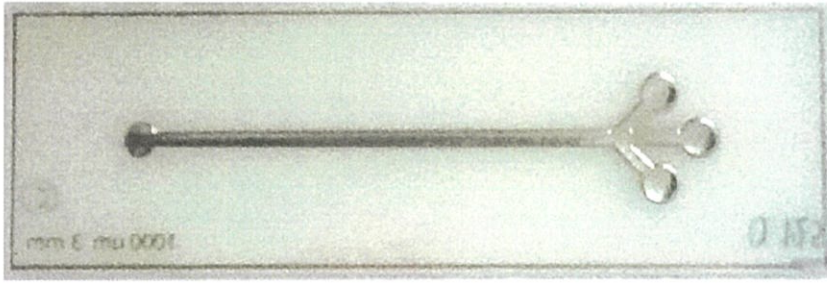
ในการทดลองชูนิกเกิล ผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยอาศัยขั้นตอนในหัวข้อ 3.1.1 โดยมีการเปลี่ยนแปลงกระแสในช่วง 0.100-0.150 A และเวลาที่ใช้ในการชุบในช่วง 0-100 นาที ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยความหนาเฉลี่ย คือ ตำแหน่งในการวัดที่แตกต่างกันบนผิวชิ้นงาน และตัวอย่างแผ่นไมโครฟลูอิดิกที่ผ่านกระบวนการชูนิกเกิลแสดงดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองการชุบโลหะ

กระแส (A)	ความหนาเฉลี่ย (มิลลิเมตร)					
	0	20 นาที	40 นาที	60 นาที	80 นาที	100 นาที
0.100	1.500	1.540	1.560	1.600	1.730	1.780
0.125	1.500	1.570	1.630	1.700	1.750	1.800
0.150	1.500	1.590	1.650	1.730	1.800	1.850

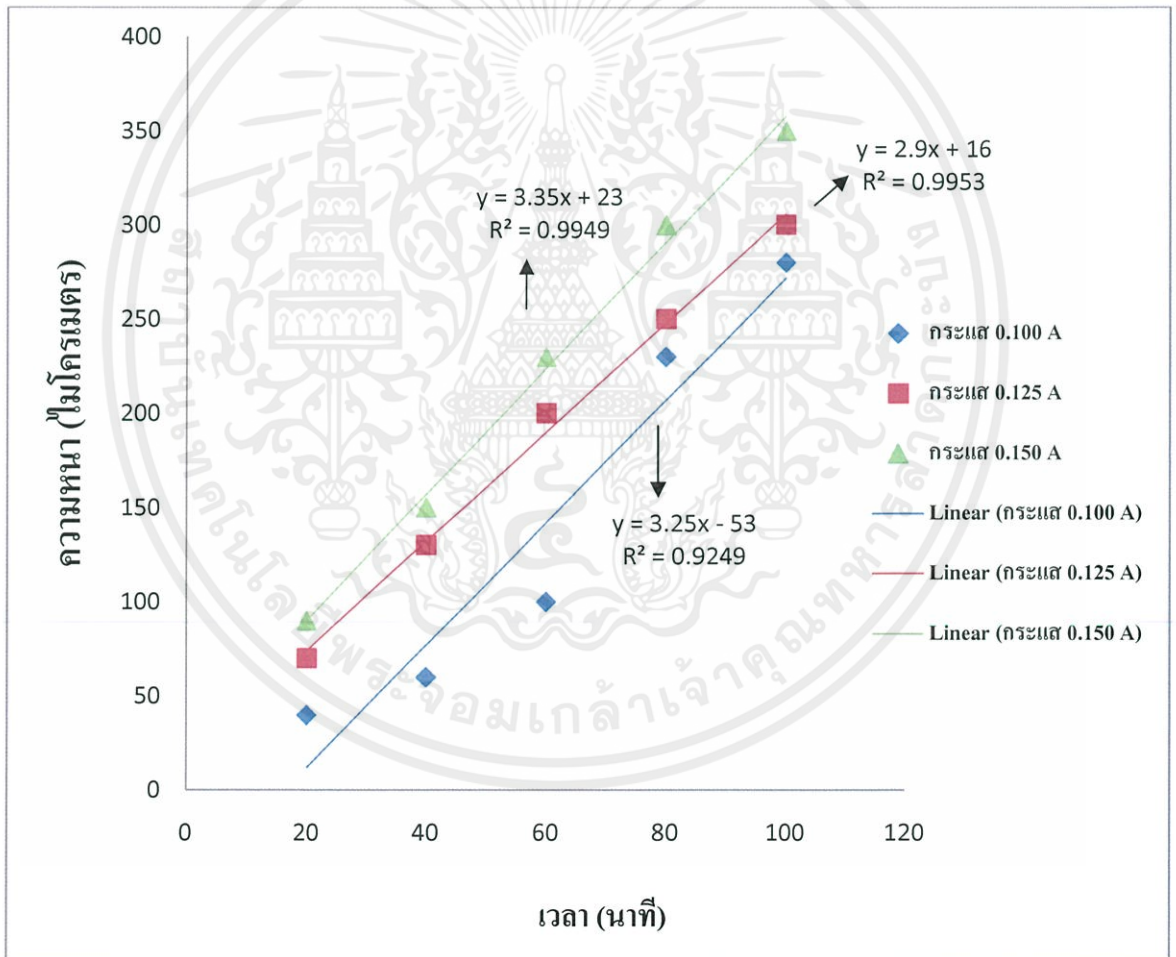
จากข้อมูลในตารางพบว่าค่าความหนานิกเกิลที่เคลือบลงบนผิวหน้าทองแดงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการชุบนานขึ้น และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบพบว่าจะให้ค่าความหนาเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างแผ่นไมโครฟลูอิดิกที่ผ่านกระบวนการชุบนิเกิล

เมื่อนำผลการทดลองในตารางที่ 4.1 มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาทิจ) และความหนา (ไมโครเมตร) จะแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาทิจ) และ ความหนา (ไมโครเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

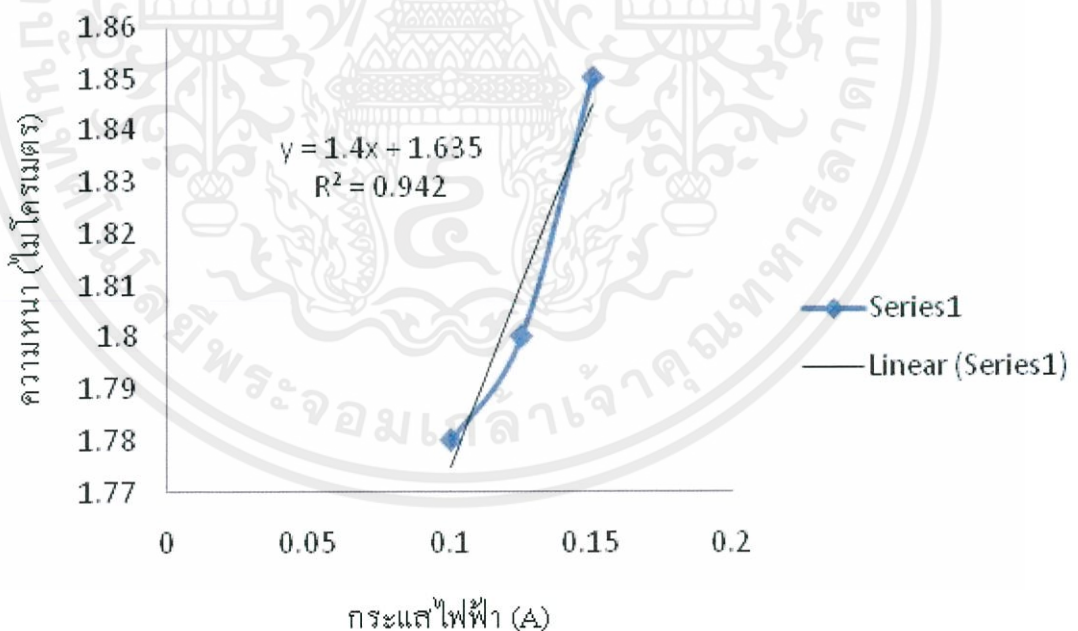
จากกราฟจะเห็นว่าความหนาที่ได้จากการชุบจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการชุบเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ของความหนาและกระแสดังสมการ

$$\text{กระแส } 0.100 \text{ A} \Rightarrow y = 3.25x - 53; R^2 = 0.924$$

$$\text{กระแส } 0.125 \text{ A} \Rightarrow y = 2.9x + 16; R^2 = 0.995$$

$$\text{กระแส } 0.150 \text{ A} \Rightarrow y = 3.35x + 23; R^2 = 0.994$$

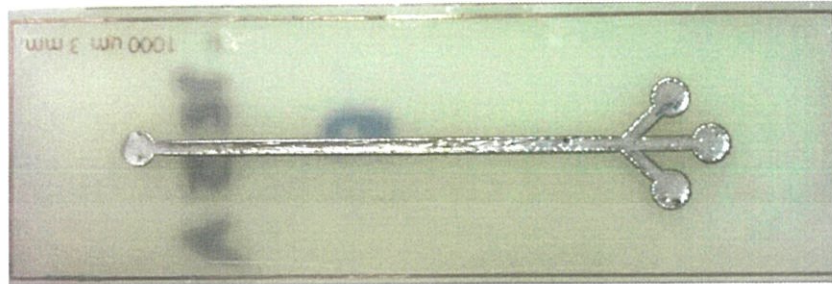
เมื่อ R^2 คือ ค่าที่บอกถึงความเป็นเชิงเส้นของกราฟของข้อมูล 2 ชุด X กับ Y เรียกว่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ถ้าความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ไปในทางเดียวกัน (X สูง Y สูงตาม) จะเป็น “บวก” ถ้าความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ในทางกลับกัน (X สูง Y ต่ำ) จะเป็น “ลบ” คือ ถ้าข้อมูลมีการกระจาย ถ้าความสัมพันธ์สมบูรณ์ที่สุด ค่าจะเป็น 1 จากผลการทดลองนี้ทำให้สามารถคาดคะเนความหนาที่ได้ เมื่อใช้กระแสและเวลาในการชุบตามเงื่อนไขที่แสดง และความสัมพันธ์ในเวลาเดียวกันกับความหนาเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบพบว่าจะให้ค่าความหนาเพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้นด้วย ซึ่งอ้างอิงข้อมูลจาก [1] ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความหนาที่เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าต่างกัน ที่เวลาเท่ากับ 100 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นด้วย กรุณาแจ้งให้ทราบก่อนการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอให้ดัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงเป็นของเอกสารทุกครั้งที่มีกราฟไปใช้
อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองผู้วิจัยยังพบว่าเมื่อเพิ่มกระแสในการชุบเพื่อที่จะทำให้ใช้
เวลาในการชุบสั้นลง จะพบว่าผิวของชิ้นงานที่ชุบจะมีลักษณะที่ไม่เรียบ ดังนั้นเราจึงต้องคำนึงถึง

ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการชุบก็จะเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานที่มีลักษณะที่ใช้งานไม่ได้จะแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างแผ่นไมโครฟลูอิดิกที่มีผิวหน้างานไม่เรียบ

4.2 ผลการวัดสมบัติทางแสงของสาร Rhodamine 6G

ในการทดสอบสมบัติของสาร Rhodamine 6G ผู้วิจัยได้เตรียมสารละลาย Rhodamine 6G ในเอทานอลให้มีความเข้มข้นตั้งแต่ 100 nM ถึง 5 mM และนำสารมาวัดค่าการดูดกลืนแสง และการเปล่งแสง โดยได้ทำการทดสอบสมบัติของสารที่บรรจุใน คิวเวทท์ และใน ไมโครฟลูอิดิกเซนแนล

4.2.1 ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนในคิวเวทท์

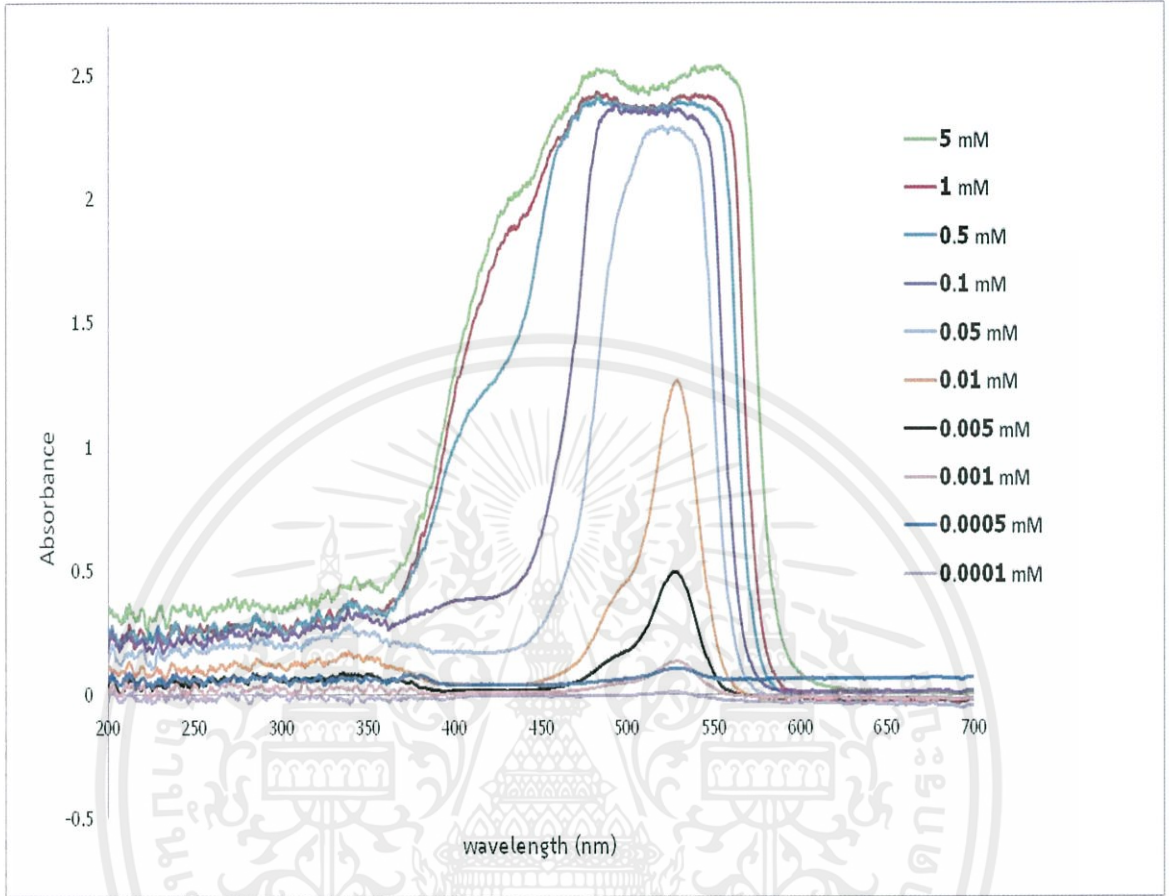
ในการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในคิวเวทท์ ผู้วิจัยได้ทำการวัดโดยอาศัยชุดการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 4.5(a) จากกราฟจะเห็นว่าสารละลาย Rhodamine 6G ที่มีค่าความเข้มข้นในช่วง 0.01 mM - 100 nM จะมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่สอดคล้องกับข้อมูลที่แสดงใน โปรแกรม PhotoChemCAD¹ (ดูรูป 4.5(b)) และมีย่านความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสงประมาณ 400-600 นาโนเมตร มีพีคการดูดกลืนจะอยู่ที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 530 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของสารละลายซึ่งเป็นไปตามกฎของ Beer-Lambert ดังแสดงตามสมการในหัวข้อที่ 2.4

สำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.01 mM จะมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ไม่สอดคล้องกับโปรแกรมทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงๆจะเกิดปรากฏการณ์ inner-filter effect ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

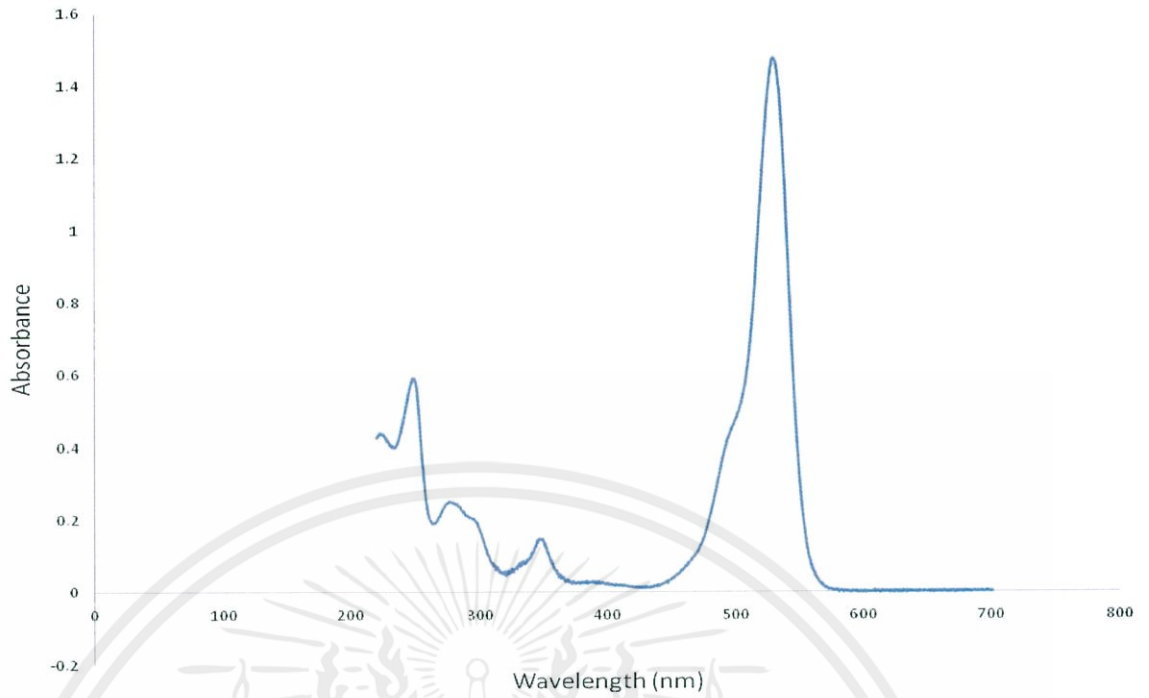
¹ PhotoChemCAD คือ โปรแกรมซึ่งรวบรวมสเปกตรัมการดูดกลืนและการเปล่งแสงของสารชนิดต่างๆ

คือปรากฏการณ์ที่แสงที่ตกกระทบไม่สามารถส่องผ่านสารละลายได้อย่างทั่วถึง เนื่องจากคิวเวทท์ที่ใช้บรรจุสารละลายมีขนาดความหนาจึงทำให้ส่งผลต่อปริมาณแสงที่ตรวจวัดได้จริง



รูปที่ 4.5 (a) สเปกตรัมการดูดกลืนของสาร Rhodamine 6G ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

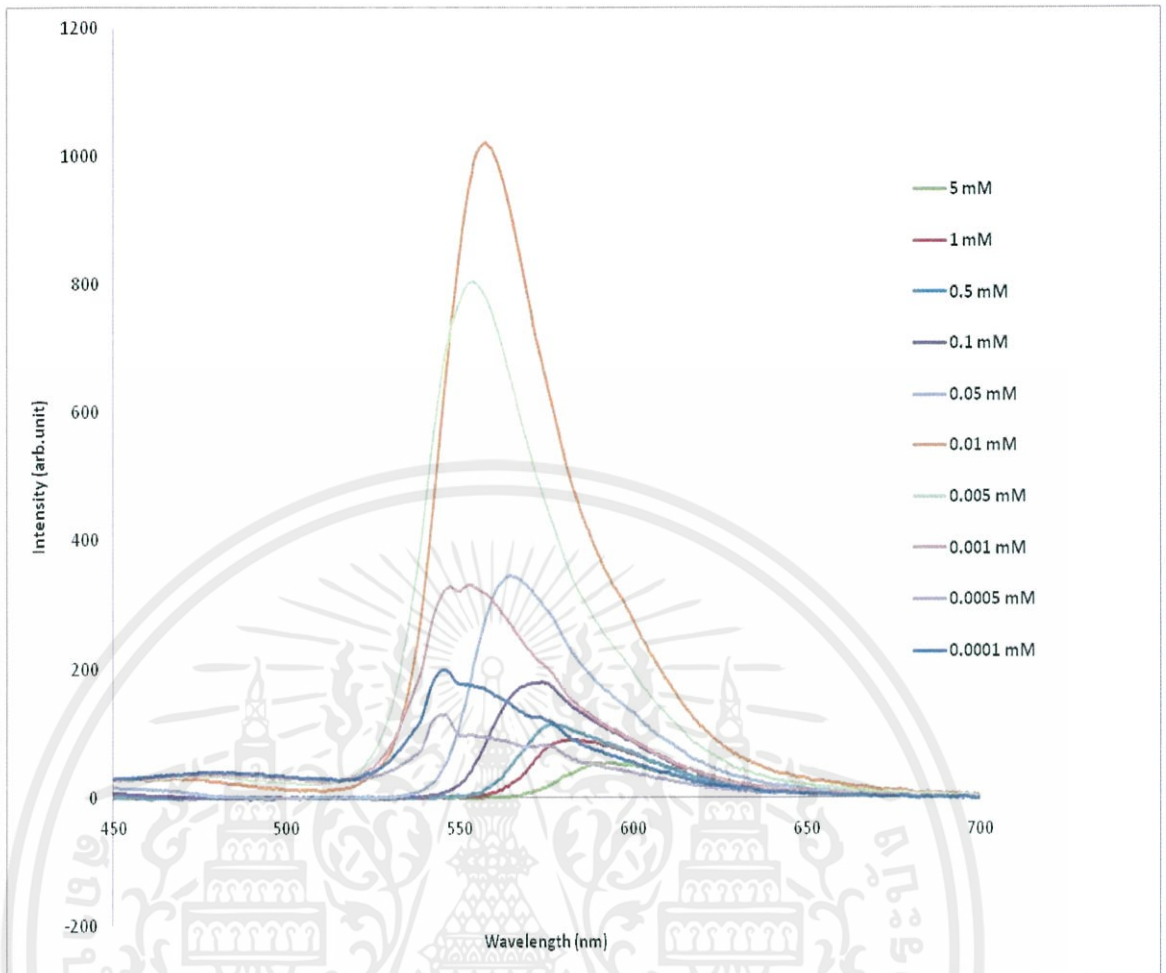


รูปที่ 4.5 (b) สเปกตรัมการดูดกลืนของสาร Rhodamine 6G จากโปรแกรม PhotoChemCAD

4.2.2 ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงในคิวเวทท์

ในการทดลองวัดการเปล่งแสงของสารละลาย Rhodamine 6G ผู้วิจัยได้ทำการวัดโดยอาศัยชุดการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการกระตุ้นสารละลายคือหลอด LED สีเขียวที่ให้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 450-600 นาโนเมตร และมีฟิลเตอร์เปล่งแสงที่ค่าความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร ผลการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



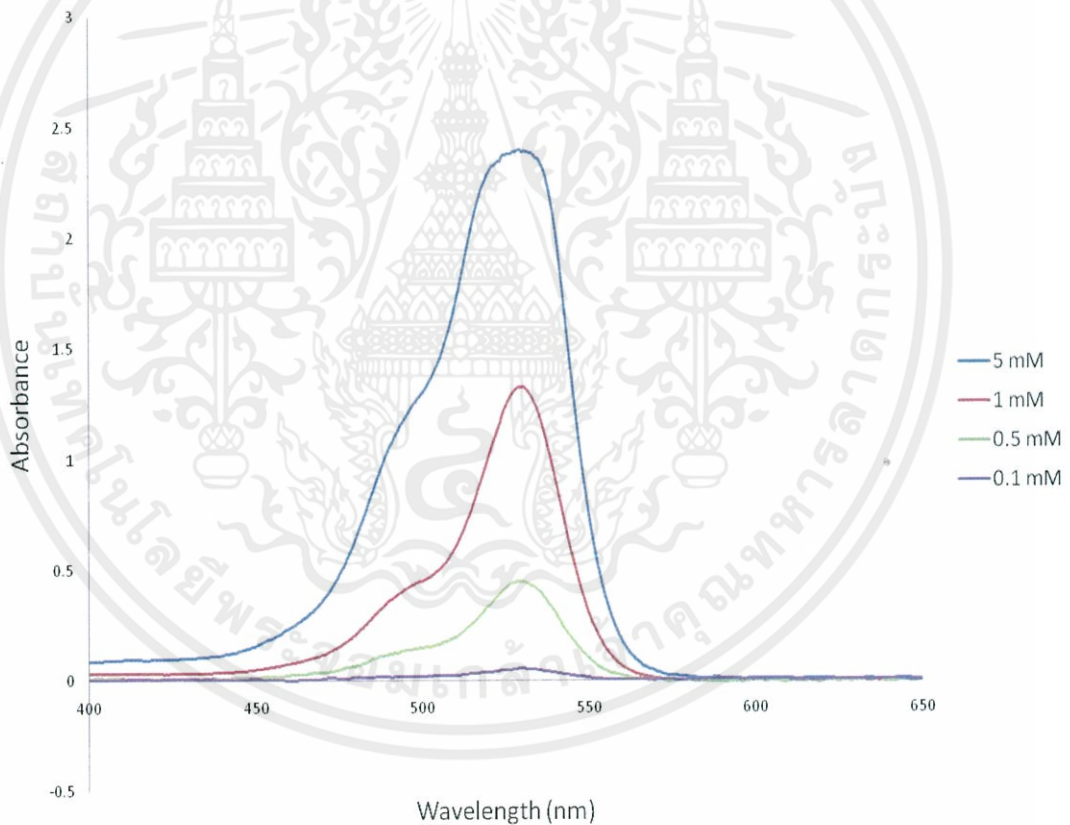
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ

รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงการเปล่งแสงของสารละลาย Rhodamine 6G ที่ถูกบรรจุอยู่ในคิวเวทที่มีค่าความเข้มข้นในช่วง 100 nM ถึง 5 mM ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มของแสงที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นจนถึงค่าประมาณ 0.01 mM และจะมีความเข้มแสงลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารมีค่าเพิ่มมากกว่าค่านี้ เหตุผลที่ค่าความเข้มของแสงที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นนั้นสามารถอธิบายได้จากค่าการดูดกลืนแสงของสารมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นดังแสดงในรูปที่ 4.5(a) แต่ในกรณีที่แสงมีค่าความเข้มลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นนั้นมีสาเหตุจากกลไกการดูดกลืนซ้ำของสาร (re-absorption effect) ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่แสงที่เปล่งออกมามีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับแสงที่ตกกระทบสารเปล่งแสงมาก ทำให้แสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นบางส่วนถูกดูดกลืนไว้ด้วยอะตอมของสารเปล่งแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

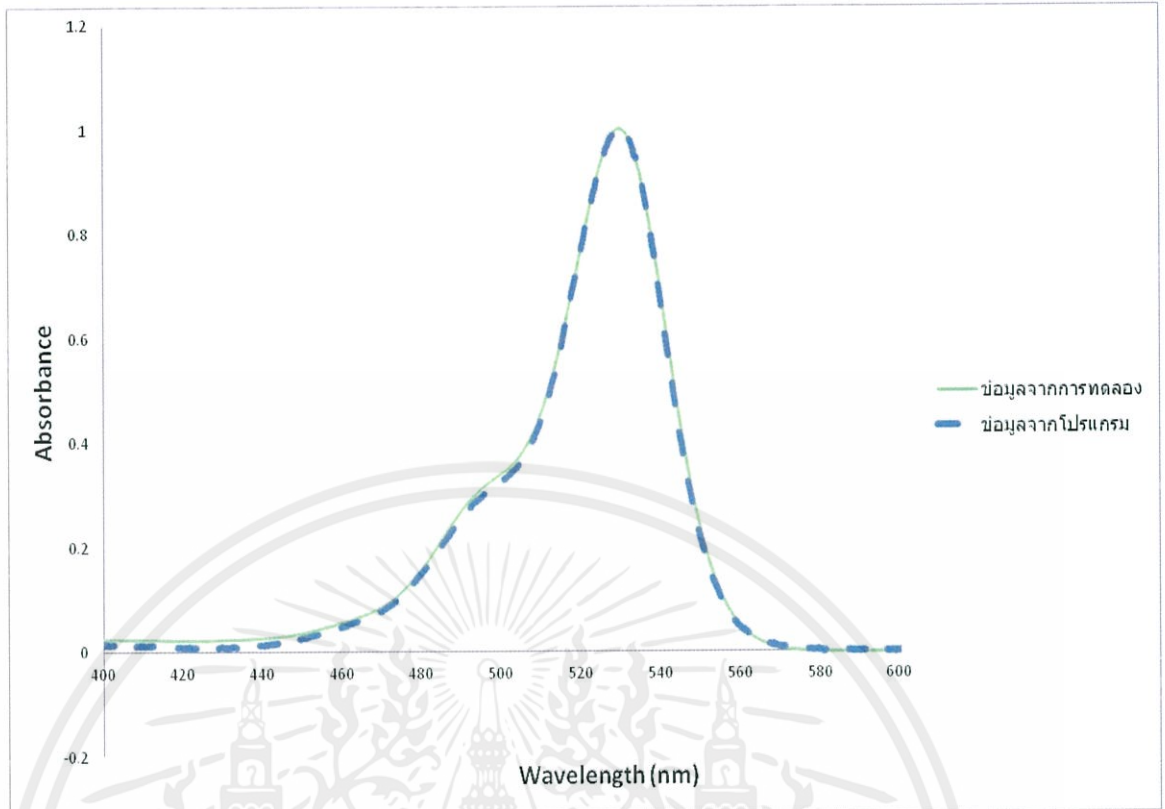
4.2.3 ผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนในไมโครฟลูอิดิก

ในการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในไมโครฟลูอิดิก ผู้วิจัยได้ทดลองวัดโดยอาศัยชุดทดลองในหัวข้อที่ 3.4.1 ในการทดลองได้ทดสอบเฉพาะสารที่มีค่าความเข้มข้นสูงในช่วง 1-0.1 mM ซึ่งเป็นย่านที่สเปกตรัมมีความผิดเพี้ยนไปจากข้อมูลของโปรแกรมที่ใช้อ้างอิง ผลการวัดแสดงดังรูปที่ 4.7(a) จากกราฟจะเห็นว่าสเปกตรัมของสารละลายที่วัดได้เมื่อใช้ระบบไมโครฟลูอิดิก จะมีรูปร่างของสเปกตรัมใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม PhotoChemCAD ทั้งนี้จะมีสาเหตุจากการที่ระยะทางที่แสงเคลื่อนผ่านมีระยะสั้นลงจึงทำให้ ปรากฏการณ์ inner filter effect ลดลง โดยรูปที่ 4.7(b) แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร Rhodamine 6G จากโปรแกรม และจากการทดลอง



รูปที่ 4.7 (a) กราฟแสดงการเปล่งแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

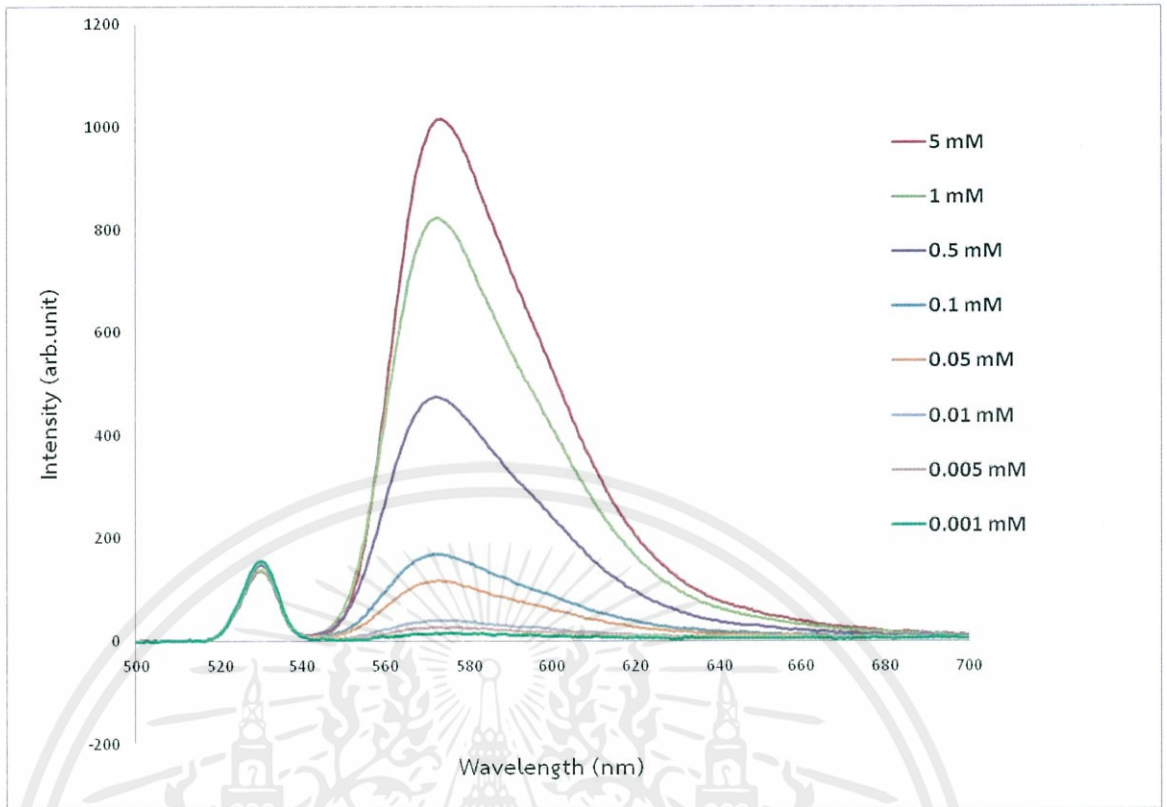


รูปที่ 4.7 (b) สเปกตรัมการดูดกลืนของสาร Rhodamine 6G จากโปรแกรมและจากการทดลอง

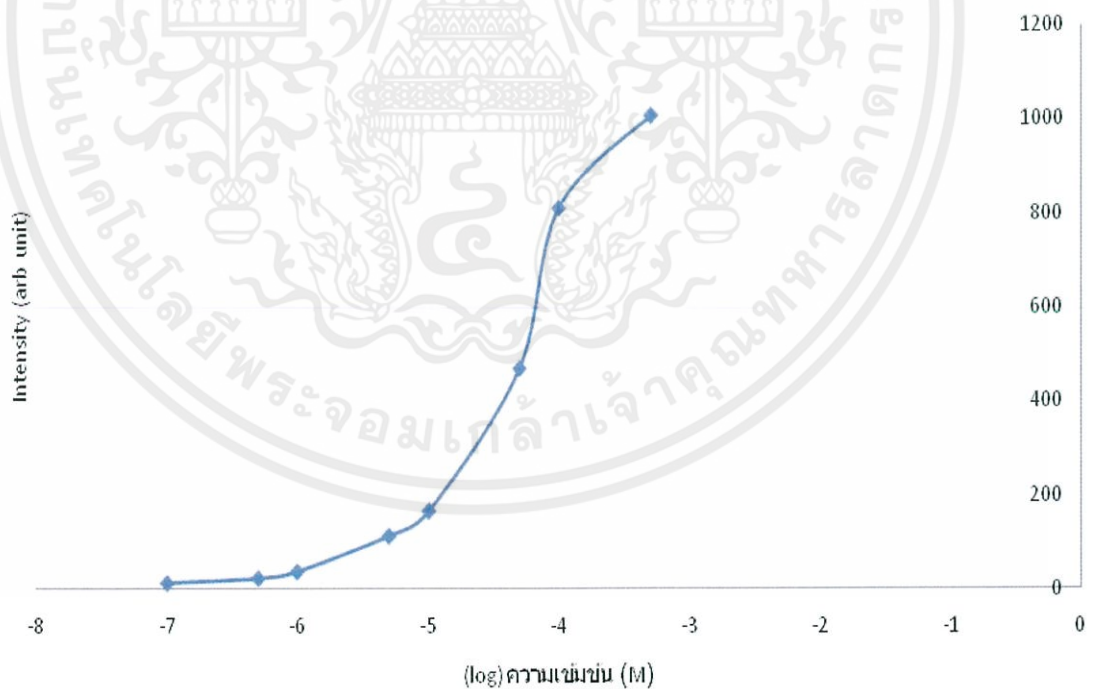
4.2.4 ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงในไมโครฟลูอิดิก

การวัดการเปล่งแสงในไมโครฟลูอิดิก จะอาศัยระบบวัดในหัวข้อ 3.4.1 โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการกระตุ้นสารละลายคือหลอด LED สีเขียวที่ให้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 450-600 นาโนเมตร และมีฟิสิกการเปล่งแสงที่ค่าความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร ผลการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 4.8(a)และ(b) โดยจากรูปที่ 4.8 (a) จะเห็นว่าความเข้มของแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของสารละลาย โดยรูปที่ 4.8 (b) เป็นกราฟที่ได้จากการนำค่าพีคสูงสุดของแต่ละความเข้มข้น โดยความเข้มแสงจะมีค่าเป็นเชิงเส้นที่ค่าความเข้มข้นในช่วง 0.01 mM-100 nM และมีแนวโน้มไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่าสูงกว่า 0.1 mM จากกราฟยังสังเกตเห็นว่าฟิสิกความเข้มแสงจะอยู่ในย่านความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกันซึ่งแตกต่างจากกรณีของการทดสอบด้วยคิวเวทท์ ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุจากทางเดินของสารละลายในไมโครฟลูอิดิกมีขนาดเล็กกว่าคิวเวทท์ถึง 10 เท่า จึงทำให้กลไกการดูดกลืนซ้ำของสาร (re-absorption effect) นั้นลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 (a) กราฟแสดงการเปล่งแสงของสาร Rhodamine 6G ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.8 (b) กราฟแสดงค่าสูงสุดของแต่ละความเข้มข้น ซึ่งประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการวัดสัญญาณไฟฟ้าของระบบไมโครฟลูอิดิกเซนแนล

ในการตรวจวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนในระบบไมโครฟลูอิดิกเซนแนลโดยวัดการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า ผู้วิจัยทำการทดลองโดยอาศัยระบบวัดในหัวข้อที่ 3.4.2 โดยสารละลาย Rhodamine 6G ที่นำมาทดสอบ มีความเข้มข้นตั้งแต่ 100 nM ถึง 5 mM ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อต่อซิลิกอนโฟโตไดโอดผ่านวงจรขยายสัญญาณแสดงดังตารางที่ 4.3 จากข้อมูลที่แสดงพบว่าคุณค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารมีค่าสูงขึ้น และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าแบบไม่เป็นเชิงเส้น (ดูรูป 4.9) และมีความสัมพันธ์ดังสมการ

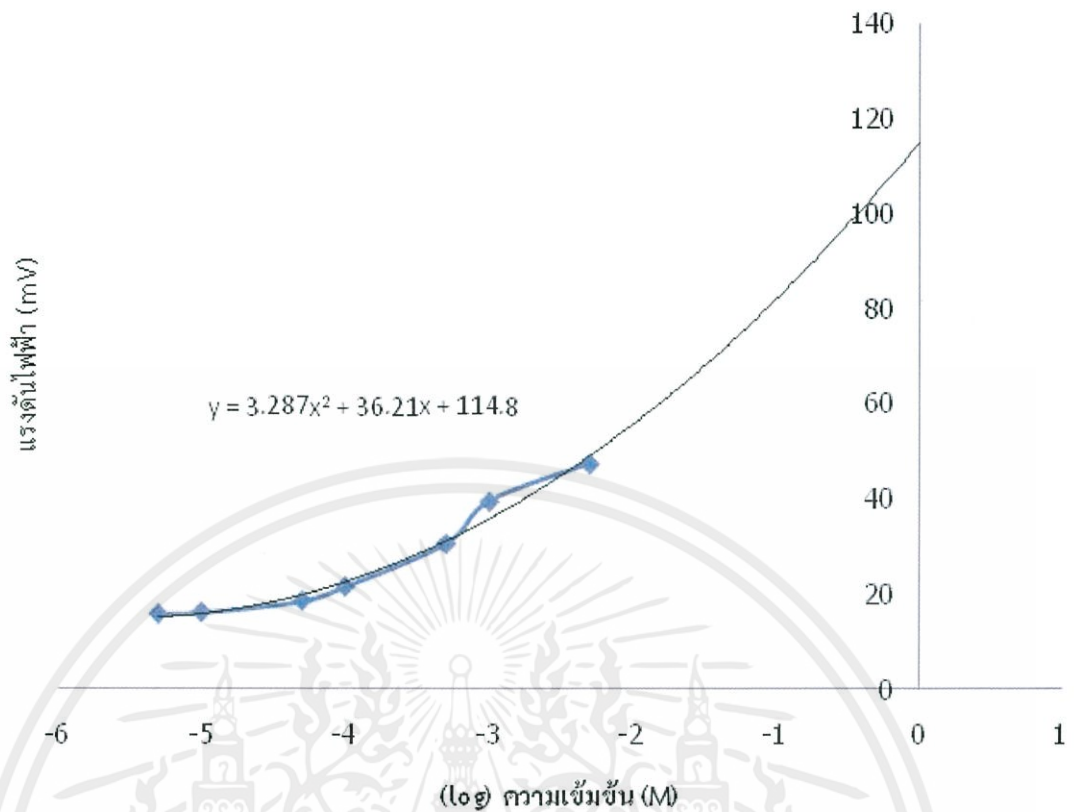
$$y = 3.287x^2 + 36.21x + 114.8$$

จากข้อมูลที่แสดงยังพบว่าระบบไมโครฟลูอิดิกจะสามารถตรวจวัดสารที่มีค่าความเข้มข้นได้ต่ำสุดประมาณ 0.005 mM ซึ่งจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าประมาณ 1 mV การตรวจวัดที่ค่าความเข้มข้นต่ำกว่านี้จะมีข้อจำกัดอยู่ เนื่องจากการเปล่งแสงของสารไม่เพียงพอที่ซิลิกอนโฟโตไดโอดจะตรวจวัดได้ หรืออาจมีสาเหตุจากวงจรตรวจวัดและตัวตรวจวัดแสงที่ออกแบบยังมีความไวไม่สูงพอ

ตารางที่ 4.2 ตารางบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

ความเข้มข้น (M)	แรงดันไฟฟ้า (mV)	ΔV (mV)
เอทานอล	14.8	0
5×10^{-3}	47.3	32.5
10^{-3}	39.4	24.6
5×10^{-4}	30.5	15.7
10^{-4}	21.5	6.7
5×10^{-5}	18.5	3.7
10^{-5}	16.1	1.3
5×10^{-6}	15.8	1.0
10^{-6}	14.8	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับ แรงดันไฟฟ้า (mV)

4.4 การพัฒนาระบบวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์

จากหัวข้อที่ 3.4.3 ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ให้มีระบบการตรวจวัดที่สามารถพกพาได้สะดวก ซึ่งเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ผู้วิจัยได้ออกแบบมาโดยระบบจะประกอบด้วย

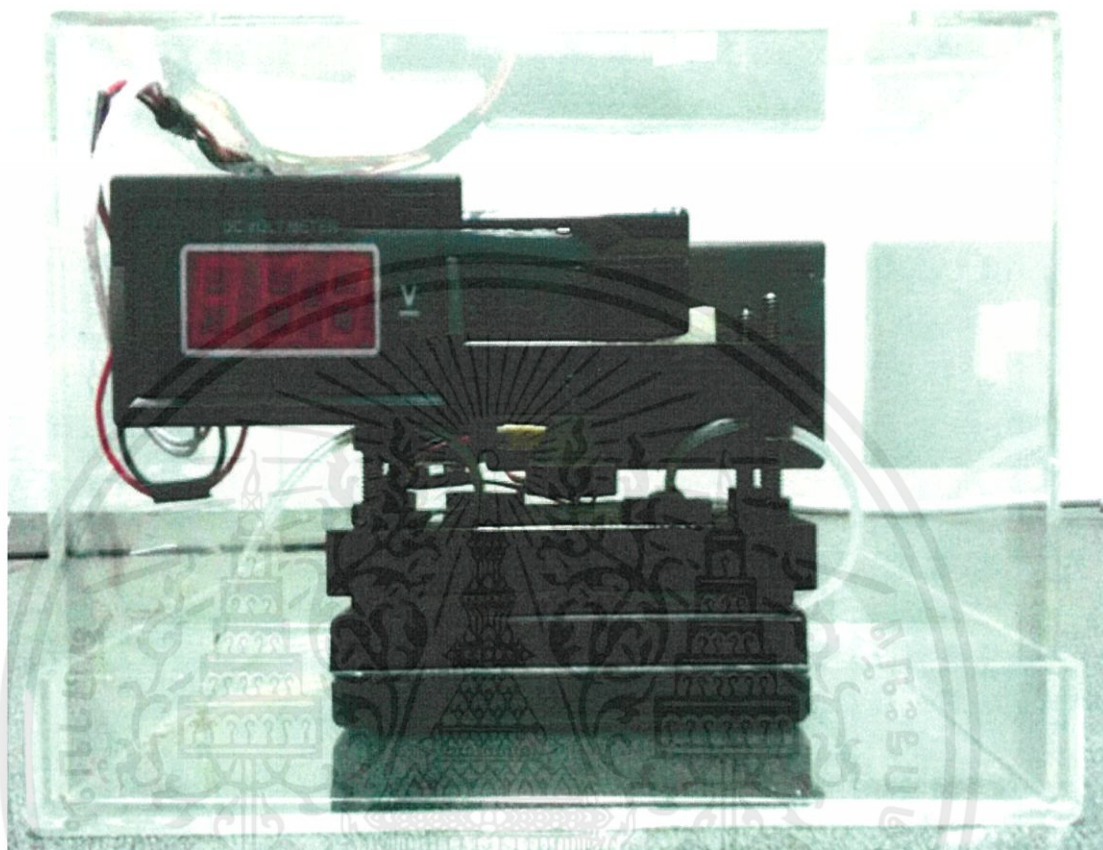
- แหล่งกำเนิดแสงหลอด LED สีเขียว 1 Watt
- เลนส์รวมแสง
- ฟิลเตอร์กรองแสง
 - ชนิด long pass filter 550 นาโนเมตร
 - ชนิด band pass filter 530 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แท่นจับยึดไมโครฟลูอิดิกเซนแนล

- วงจรขยายสัญญาณในหัวข้อ 3.3.2.2
- ระบบแสดงผล DC Voltmeter 9V สามารถแสดงผลได้ตั้งแต่ค่า 0-50 V



รูปที่ 4.10 เครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์แบบพกพา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

โครงการพิเศษนี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาชุดทดลองสำหรับวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์พวกา โดยระบบการวัดจะแสดงผลออกมาในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า ซึ่งมีจุดประสงค์ของการจัดทำความสะดวกต่อการพกพาไปใช้งานในสถานที่ต่างๆ โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและออกแบบชุดทดลองสำหรับวัดสมบัติการเรืองแสงของสาร Rhodamine 6G เป็นหลัก และได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน คือ การศึกษาไมโครฟลูอิดิกแซนแนล การศึกษาสมบัติทางแสงของสาร Rhodamine 6G การสร้างวงจรขยายสัญญาณเพื่อตรวจวัดปริมาณแสง และการพัฒนาชุดทดลองสำหรับวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งในส่วนของไมโครฟลูอิดิกแซนแนลนั้น ผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกแซนแนล และได้ทำการทดลองในขั้นตอนของกระบวนการชุบนิกลึงลงบนแผ่น PCB เพื่อใช้สำหรับการเตรียมแม่พิมพ์ ซึ่งจากผลการทดลองในการชุบนิกลึงลงบนแผ่น PCB ให้ชิ้นงานมีผิวหน้างานที่เรียบนั้น ผู้วิจัยได้พบว่าค่าความหนาของนิกลึงที่เคลือบลงบนผิวหน้าทองแดงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการชุบนานขึ้น และมีความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความหนาแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบพบว่าจะให้ค่าความหนาเพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้นด้วย

ในส่วนของ การวัดสมบัติทางแสงของสาร Rhodamine 6G ผู้วิจัยได้จัดเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 100 nM ถึง 5 mM และได้ศึกษาการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของสารละลายที่ถูกบรรจุในควมวาท์ และในไมโครฟลูอิดิกแซนแนล จากการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายที่บรรจุในควมวาท์ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของสารละลาย โดยสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.01 mM จะมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่มีรูปทรงเพี้ยนไปจากเดิม ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงๆ จะเกิดปรากฏการณ์ inner-filter effect ซึ่งคือปรากฏการณ์ที่แสงที่ตกกระทบไม่สามารถส่องผ่านสารละลายได้อย่างทั่วถึง เนื่องจากควมวาท์ที่ใช้บรรจุสารละลายมีขนาดความหนาจึงทำให้ส่งผลกระทบต่อปริมาณแสงที่ตรวจวัดได้จริง แต่จากการวัดการดูดกลืนแสงในไมโครฟลูอิดิกแซนแนล จะไม่มีความเพี้ยนของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ทั้งนี้

เนื่องจากไมโครฟลูอิดิกแซนแนลมีระยะทางที่แสงเคลื่อนผ่านสั้นลงจึงทำให้ปรากฏการณ์ inner filter effect ลดลง

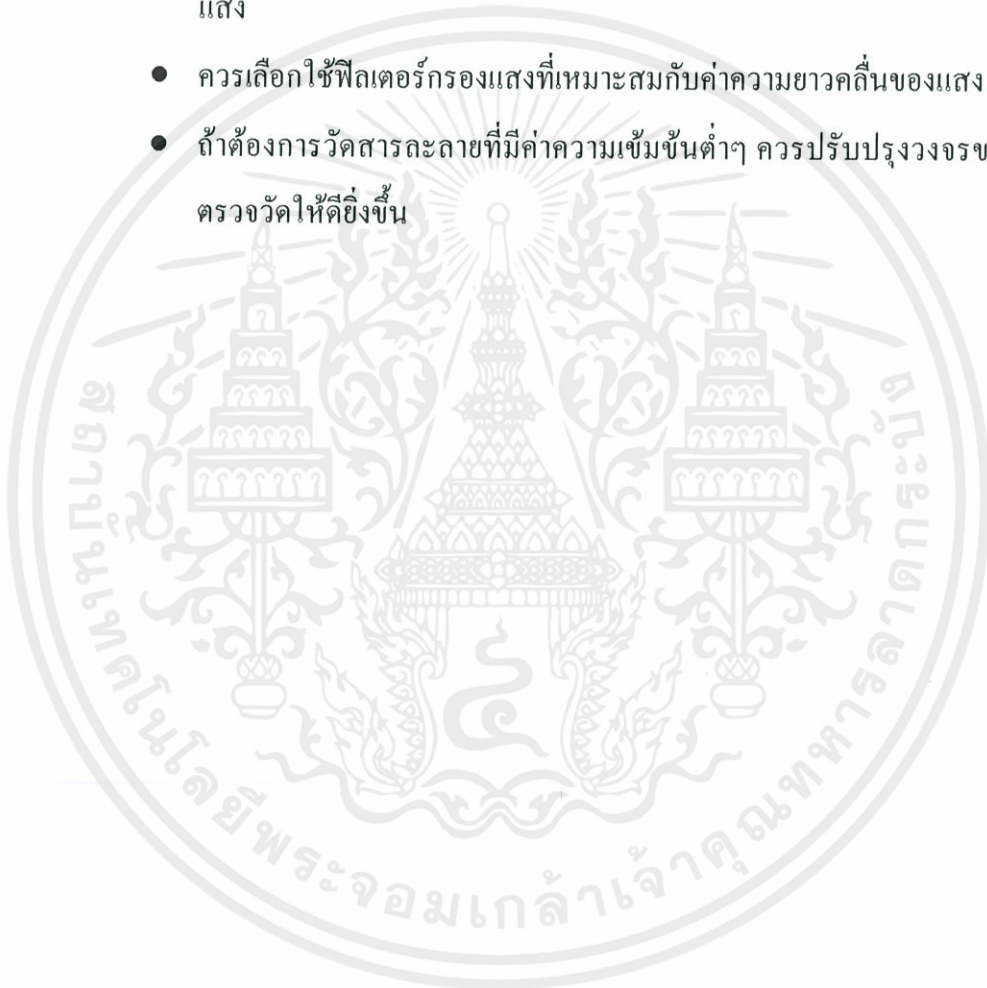
จากการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลายที่บรรจุในควมวาท พบว่าความเข้มของแสงที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นจนถึงค่าประมาณ 0.01 mM และจะมีความเข้มแสงลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารมีค่าเพิ่มมากกว่าค่านี้ ซึ่งในกรณีที่แสงมีค่าความเข้มลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นนั้นมีสาเหตุจากกลไกการดูดกลืนซ้ำของสาร (re-absorption effect) จึงทำให้แสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นบางส่วนถูกดูดกลืนไว้ด้วยอะตอมของสารเปล่งแสง แต่จากการวัดการเปล่งแสงของสารในไมโครฟลูอิดิกแซนแนล พบว่าความเข้มของแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของสารละลาย และว่าพีคความเข้มแสงจะอยู่ในย่านความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากระบบไมโครฟลูอิดิกนั้น ใช้ปริมาณของสารน้อยจึงมีจำนวนโมเลกุลของสารน้อยด้วย จึงส่งผลให้โอกาสในการดูดกลืนซ้ำของสารลดลง

ในส่วนการวัดทางไฟฟ้าด้วยการแสดงผลการวัดออกมาในรูปของค่าแรงดันไฟฟ้า โดยวัดผ่านระบบไมโครฟลูอิดิกแซนแนล ด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 100 nM ถึง 5 mM จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารมีค่าสูงขึ้น และระบบไมโครฟลูอิดิกจะสามารถตรวจวัดสารที่มีค่าความเข้มข้นได้ต่ำสุดประมาณ 0.001 mM ซึ่งจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าประมาณ 1 mV ทั้งนี้การตรวจวัดที่ค่าความเข้มข้นต่ำกว่านี้จะมีข้อจำกัดอยู่ เนื่องจากการเปล่งแสงของสารไม่เพียงพอที่ซิลิกอนโฟโตไดโอดจะตรวจวัดได้ หรืออาจมีสาเหตุจากวงจรตรวจวัดและตัวตรวจวัดแสงที่ออกแบบยังมีความไวไม่สูงพอ ซึ่งต้องได้รับการพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ในกระบวนการชุบน้ำกึ่งเกิด ควรใช้ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการชุบ
- ในการผสมสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ ควรคำนวณปริมาณของสารในการเตรียม และชั่งสารให้ถูกต้อง เพราะอาจทำให้ความเข้มข้นของสารละลายมีความคลาดเคลื่อน
- ในการกระตุ้นสารเรืองแสงควรเลือกใช้สีของหลอด LED ที่เหมาะสมต่อสารเรืองแสง
- ควรเลือกใช้ฟิลเตอร์กรองแสงที่เหมาะสมกับค่าความยาวคลื่นของแสง
- ถ้าต้องการวัดสารละลายที่มีค่าความเข้มข้นต่ำๆ ควรปรับปรุงวงจรขยายในการตรวจวัดให้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Mordechay Schlesinger and Milan Paunovic,2010. ELECTRODEPOSITION OF NICKEL.[ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก

<http://www2.bren.ucsb.edu/~dturney/port/papers/Modern%20Electroplating/03.pdf>

[2] แม้น อมรสิทธิ์, 2552. ฟลูออเรสเซนซ์ ฟอสฟอเรสเซนซ์ และเคมีลูมิเนสเซนซ์ของโมเลกุล. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. หน้า 210-256

[3] ฟิสิกส์ราชมงคล.บทที่ 12 กลศาสตร์ของไหล.[ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก
: <http://www.electron.rmutphysics.com/physics/charud/scibook/electronic-physics1/chap12.pdf>

[4] ฟิสิกส์ราชมงคล.บทที่ 6 กลศาสตร์ของไหล.[ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก
: <http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/nuch/introphysics/6.pdf>

[5] เครื่องมือวิทยาศาสตร์.บทที่ 13 เครื่องวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์.[ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก
: home.kku.ac.th/chuare/12/fluorometer.pdf

[6] สำนักงานกลางศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์. Microfluidics คือ อะไรและมีประโยชน์อย่างไร.[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.thep-center.org/src/qa_read.php?question_id=1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

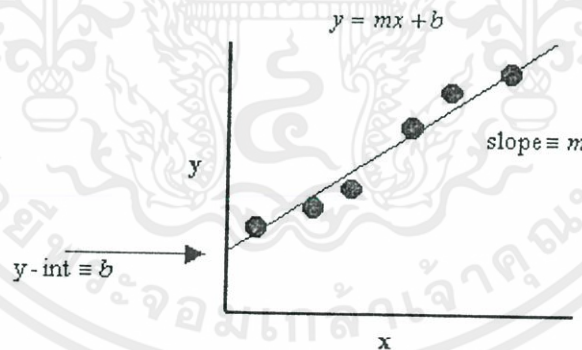
Linear Regression and Excel

(See our Tutorial Page for more information about linear regression methods. You may also wish to take a look at how we analyzed actual experimental data using linear regression techniques.

Sample data

x	y
1.0	2.6
2.3	2.8
3.1	3.1
4.8	4.7
5.6	5.1
6.3	5.3

Say we have a set of data, (x_i, y_i) , shown at the left. If we have reason to believe that there exists a **linear relationship** between the variables x and y , we can plot the data and draw a "best-fit" *straight line* through the data. Of course, this relationship is governed by the familiar equation $y = mx + b$. We can then find the **slope**, m , and **y-intercept**, b , for the data, which are shown in the figure below.

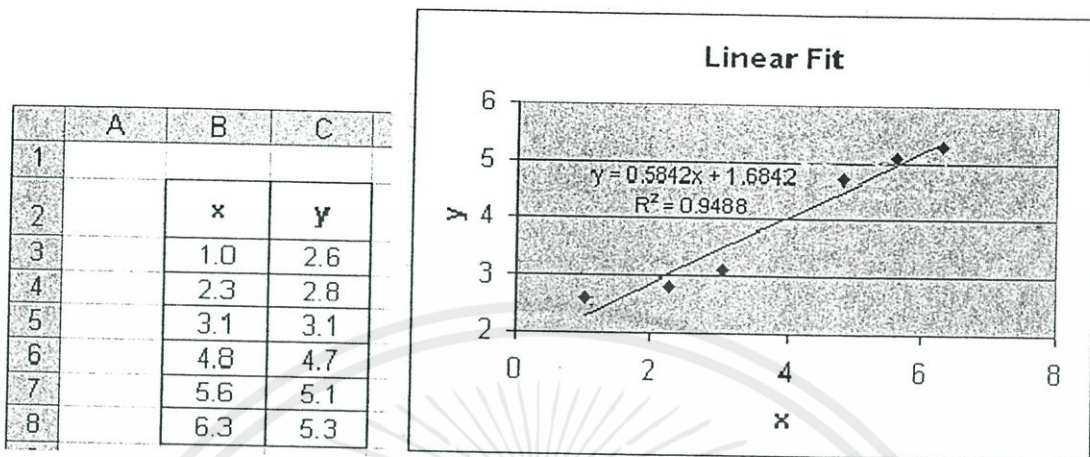


Let's enter the above data into an Excel spread sheet, plot the data, create a trendline and display its slope, y-intercept and R-squared value. Recall that the R-squared value is the square of the correlation coefficient. (Most statistical texts show the correlation coefficient as " r ", but Excel shows the coefficient as " R ". Whether you write is as r or R , the correlation coefficient gives us a measure of the reliability of the linear relationship between

the x and y values. (Values close to 1 indicate excellent linear reliability.))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการที่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Enter your data as we did in columns B and C. The reason for this is strictly cosmetic as you will soon see.



Linear regression equations.

If we expect a set of data to have a linear correlation, it is **not necessary** for us to plot the data in order to determine the constants m (slope) and b (y-intercept) of the equation $y = mx + b$. Instead, we can apply a statistical treatment known as **linear regression** to the data and determine these constants.

Given a set of data (x_i, y_i) with n data points, the slope, y-intercept and correlation coefficient, r , can be determined using the following:

$$m = \frac{n \sum (xy) - \sum x \sum y}{n \sum (x^2) - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{\sum y - m \sum x}{n}$$

$$r = \frac{n \sum (xy) - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum (x^2) - (\sum x)^2][n \sum (y^2) - (\sum y)^2]}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(Note that the limits of the summation, which are i to n , and the summation indices that have been omitted)

on x and y have been omitted.)

Implicitly applying regression to the sample data.

It may appear that the above equations are quite complicated, however upon inspection, we see that their components are nothing more than simple algebraic manipulations of the raw data. We can expand our spread sheet to include these components.

1. First, add three columns that will be used to determine the quantities \bar{xy} , $\bar{x^2}$ and $\bar{y^2}$, for each data point.
2. Next, use Excel to evaluate the following: Sx , Sy , $S(xy)$, $S(x^2)$, $S(y^2)$, $(Sx)^2$, $(Sy)^2$. Recall that the symbol, S , means "summation". Additionally, the term xy is the product of x and y , that is: $x * y$. Also, the term $S(x^2)$ is very different than the term $(Sx)^2$. Be careful with your order of operations!
3. Now use Excel to count the number of data points, n . (To do this, use the Excel COUNT() function. The syntax for COUNT() in this example is: =COUNT(B3:B8) and is shown in the formula bar in the screen shot below.
4. Finally, use the above components and the linear regression equations given in the previous section to calculate the **slope (m)**, **y-intercept (b)** and **correlation coefficient (r)** of the data. If you are careful, your spread sheet should look like ours. Note that our equations for the slope, y-intercept and correlation coefficient are highlighted in yellow.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A11		=COUNT(B3:B8)									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1											
2		x	y	xy	x ²	y ²					
3		1.0	2.6	2.6	1.0	6.8					
4		2.3	2.8	6.44	5.3	7.8					
5		3.1	3.1	9.61	9.6	9.6					
6		4.8	4.7	22.56	23.0	22.09					
7		5.6	5.1	28.56	31.4	26.0					
8		6.3	5.3	33.39	39.7	28.1					
9											
10	n	Σ x	Σ y	Σ (xy)	Σ (x ²)	Σ (y ²)					
11	6	23.1	23.6	103.16	110.0	100.4					
12											
13		(Σ x) ²	(Σ y) ²								
14		533.61	556.96								
15											
16	slope, m =	0.5842		=(A11*D11-B11*C11)/(A11*E11-B14)							
17	y-int, b =	1.6842		=(C11-C16*B11)/A11							
18	r =	0.9741		=(A11*D11-B11*C11)/SQRT((A11*E11-B14)*(A11*F11-C14))							

Linear regression with built-in functions.

It is plain to see that the slope and y-intercept values that were calculated using linear regression techniques are identical to the values of the more familiar trendline from the graph in the first section; namely $m = 0.5842$ and $b = 1.6842$. In addition, Excel can be used to display the R-squared value. Again, $R^2 = r^2$. From the graph, we see that $R^2 = 0.9488$. From our linear regression analysis, we find that $r = 0.9741$, therefore $r^2 = 0.9488$, which is agrees with the graph.

You should now see that the Excel graphing routine uses linear regression to calculate the slope, y-intercept and correlation coefficient.

Excel has three built-in functions that allow for a third method for determining the slope, y-intercept, correlation coefficient, and R-squared values of a set of data. The functions are

SLOPE(), INTERCEPT(), CORREL() and RSQ(), and are also covered in the statistics section of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

this tutorial.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The syntax for each are as follows:

- Slope, m: =SLOPE(known_y's, known_x's)
- y-intercept, b: =INTERCEPT(known_y's, known_x's)
- Correlation Coefficient, r: =CORREL(known_y's, known_x's)
- R-squared, r^2 : =RSQ(known_y's, known_x's)

Here is how we would analyze our data using these built-in Excel functions. Again, the equations for each calculation are highlighted in yellow.

	A	B	C	D	E	F
1						
2		x	y		Slope, m, =	0.5842
3		1.0	2.6		=SLOPE(C3:C8,B3:B8)	
4		2.3	2.8			
5		3.1	3.1		y-intercept, b, =	1.6842
6		4.8	4.7		=INTERCEPT(C3:C8,B3:B8)	
7		5.6	5.1			
8		6.3	5.3		Correlation, r, =	0.9741
9					=CORREL(C3:C8,B3:B8)	

So, to reiterate, we can determine the slope, y-intercept and correlation coefficient of any set of data using three Excel methods:

1. Plot the data and add a trendline
2. Implicitly use linear regression techniques
3. Use Excel's built in functions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Next Generation OP07 Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier

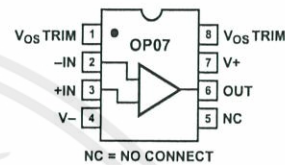
OP77

FEATURES

- Outstanding Gain Linearity
- Ultrahigh Gain 5000 V/mV Min
- Low V_{OS} Over Temperature 60 μV Max
- Excellent TCV_{OS} 0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ Max
- High PSRR 3 $\mu\text{V}/\text{V}$ Max
- Low Power Consumption 60 mW Max
- Fits OP07, 725, 108A/308A, 741 Sockets
- Available in Die Form

PIN CONNECTIONS

Epoxy Mini-Dip (P-Suffix)
8-Pin Hermetic DIP

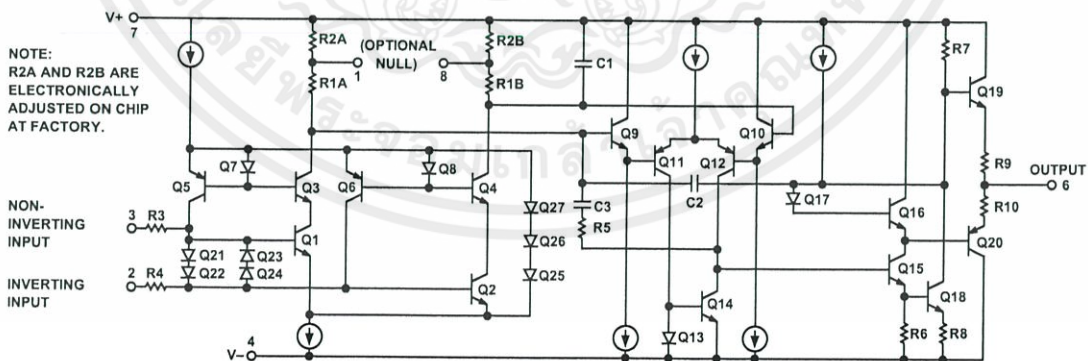
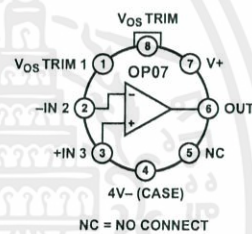


GENERAL DESCRIPTION

The OP77 significantly advances the state-of-the-art in precision op amps. The OP77's outstanding gain of 10,000,000 or more is maintained over the full 10 V output range. This exceptional gain-linearity eliminates in-correctable system nonlinearities common in previous monolithic op amps, and provides superior performance in high closed-loop gain applications. Low initial V_{OS} drift and rapid stabilization time, combined with only 50 mW power consumption, are significant improvements over previous designs. These characteristics, plus the exceptional TCV_{OS} of 0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ maximum and the low V_{OS} of 25 μV maximum, eliminates the need for V_{OS} adjustment and increases system accuracy over temperature.

PSRR of 3 $\mu\text{V}/\text{V}$ (110 dB) and CMRR of 1.0 $\mu\text{V}/\text{V}$ maximum virtually eliminate errors caused by power supply drifts and common-mode signals. This combination of outstanding characteristics makes the OP77 ideally suited for high-resolution instrumentation and other tight error budget systems.

TO-99 (J-Suffix)



REV. C

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781/329-4700
Fax: 781/326-8703

www.analog.com

© Analog Devices, Inc., 2002

OP77–SPECIFICATIONS

ELECTRICAL SPECIFICATIONS (@ $V_S = \pm 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	OP77A			Unit
			Min	Typ	Max	
INPUT OFFSET VOLTAGE	V_{OS}			10	25	μV
LONG-TERM INPUT OFFSET						
VOLTAGE STABILITY ¹	DV_{OS}/Time			0.2		$\mu\text{V}/\text{Mo}$
INPUT OFFSET CURRENT	I_{OS}			0.3		nA
INPUT BIAS CURRENT	I_B		-0.2	1.2	2.0	nA
INPUT NOISE VOLTAGE ²	e_{np-p}	0.1 Hz to 10 Hz		0.35	0.6	$\mu\text{V p-p}$
INPUT NOISE VOLTAGE DENSITY ²	e_n	$f_O = 10\text{ Hz}$ $f_O = 100\text{ Hz}$ $f_O = 1000\text{ Hz}$		10.3 10.0 9.6	18.0 13.0 11.0	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
INPUT NOISE CURRENT ²	i_{np-p}	0.1 Hz to 10 Hz		14	30	pA p-p
INPUT NOISE CURRENT DENSITY ²	i_n	$f_O = 10\text{ Hz}$ $f_O = 100\text{ Hz}$ $f_O = 1000\text{ Hz}$		0.32 0.14 0.12	0.80 0.23 0.17	$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
INPUT RESISTANCE Differential Mode ³ Common Mode	R_{IN} R_{INCM}		26	45 200		MV GV
INPUT VOLTAGE RANGE	IVR		± 13	± 14		V
COMMON-MODE REJECTION RATIO	CMRR	$V_{CM} = \pm 13\text{ V}$		0.1	1.0	$\mu\text{V}/\text{V}$
POWER SUPPLY REJECTION RATIO	PSRR	$V_S = \pm 3\text{ V to } \pm 18\text{ V}$		0.7	3	$\mu\text{V}/\text{V}$
LARGE-SIGNAL VOLTAGE GAIN	A_{VO}	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega \geq V_O = \pm 10\text{V}$	5000	12000		V/mV
OUTPUT VOLTAGE SWING	V_O	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 1\text{ k}\Omega$	± 13.5 ± 12.5 ± 12.0	± 14.0 ± 13.0 ± 12.5		V
SLEW RATE ²	SR	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	0.1	0.3		V/ μs
CLOSED-LOOP BANDWIDTH ²	BW	$A_{VCL} = +1$	0.4	0.6		MHz
OPEN-LOOP OUTPUT RESISTANCE	R_O			60		Ω
POWER CONSUMPTION	P_d	$V_S = \pm 15\text{ V}$, No Load $V_S = \pm 3\text{ V}$, No Load		50 3.5	60 4.5	mW
OFFSET ADJUSTMENT RANGE		$R_p = 20\text{ k}\Omega$		± 3		mV

NOTES

¹Long-Term Input Offset Voltage Stability refers to the averaged trend line of V_{OS} vs. Time over extended periods after the first 30 days of operation. Excluding the initial hour of operation, changes in V_{OS} during the first 30 operating days are typically $2.5\ \mu\text{V}$.

²Sample tested.

³Guaranteed by design.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS

ELECTRICAL SPECIFICATIONS (@ $V_s = \pm 15\text{ V}$, $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq 125^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	Min	OP77A Typ	Max	Unit
INPUT OFFSET VOLTAGE	V_{OS}			25	60	μV
AVERAGE INPUT OFFSET VOLTAGE DRIFT ¹	TCV_{OS}			0.1	0.3	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
INPUT OFFSET CURRENT	I_{OS}			0.5	2.2	nA
AVERAGE INPUT OFFSET CURRENT DRIFT ²	TCI_{OS}			1.5	25	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
INPUT BIAS CURRENT	I_B		-0.2	2.4	4	nA
AVERAGE INPUT BIAS CURRENT DRIFT ²	TCI_B			8	25	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
INPUT VOLTAGE RANGE	IVR		± 13	± 13.5	0.6	V
COMMON-MODE REJECTION RATIO	CMRR	$V_{CM} = \pm 13\text{ V}$		0.1	1.0	$\mu\text{V}/\text{V}$
POWER SUPPLY REJECTION RATIO	PSRR	$V_s = \pm 3\text{ V to } \pm 18\text{ V}$		1	3	$\mu\text{V}/\text{V}$
LARGE-SIGNAL VOLTAGE GAIN	A_{VO}	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega \geq V_O = \pm 10\text{ V}$		2000	6000	V/mV
OUTPUT VOLTAGE SWING	V_O	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	± 12	± 13.0		V
POWER CONSUMPTION	P_d	$V_s = \pm 15\text{ V}$, No Load		60	75	mW

NOTES

¹OP77A: TCV_{CS} is 100% tested.²Guaranteed by design.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OP77–SPECIFICATIONS

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (@ $V_S = \pm 15\text{ V}$, $T_A = 125^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	OP77E			OP77F			Unit
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
INPUT OFFSET VOLTAGE	V _{OS}		10	25		20	60	μV	
LONG-TERM STABILITY ¹	V _{OS} /Time		0.3			0.4		μV/Mo	
INPUT OFFSET CURRENT	I _{OS}		0.3	1.5		0.3	2.8	nA	
INPUT BIAS CURRENT	I _B		-0.2	1.2	2.0	-0.2	1.2	2.8	nA
INPUT NOISE VOLTAGE ²	e _{np-p}	0.1 Hz to 10 Hz	0.35	0.6		0.38	0.65	μV _{p-p}	
INPUT NOISE VOLTAGE DENSITY	e _n	f _O = 10 Hz f _O = 100 Hz ² f _O = 1000 Hz	10.3	18.0		10.5	20.0	nV/√Hz	
INPUT NOISE CURRENT ²	i _{np-p}	0.1 Hz to 10 Hz	14	30		15	35	pA _{p-p}	
INPUT NOISE CURRENT DENSITY	i _n	f _O = 10 Hz f _O = 100 Hz ² f _O = 1000 Hz	0.32	0.80		0.35	0.90	pA/√Hz	
INPUT RESISTANCE Differential Mode ³ Common Mode	R _{IN} R _{INCM}		26	45		18.5	45	MΩ GΩ	
INPUT RESISTANCE Common Mode	R _{INCM}			200			200	GΩ	
INPUT VOLTAGE RANGE	IVR		±13	±14		±13	±14	V	
COMMON-MODE REJECTION RATIO	CMRR	V _{CM} = ±13 V	0.1	1.0		0.1	1.6	μV/V	
POWER SUPPLY REJECTION RATIO	PSRR	V _S = 3 V to 18 V	0.7	3.0		0.7	3.0	μV/V	
LARGE-SIGNAL VOLTAGE GAIN	A _{VO}	R _L ≥ 2 kΩ	5000	12000		2000	6000	V/mV	
OUTPUT VOLTAGE SWING	V _O	R _L ≥ 10 kΩ R _L ≥ 2 kΩ R _L ≥ 1 kΩ	±13.5	±14.0		±13.5	±14.0	V	
SLEW RATE ²	SR	R _L ≥ 2 kΩ	0.1	0.3		0.1	0.3	V/μs	
CLOSED-LOOP BANDWIDTH ²	BW	A _{VCL} 1	0.4	0.6		0.4	0.6	MHz	
OPEN-LOOP OUTPUT RESISTANCE	R _O		60			60		Ω	
POWER CONSUMPTION	P _d	V _S = ±15 V, No Load V _S = ±3 V, No Load	50	60		50	60	mW	
OFFSET ADJUSTMENT RANGE		R _p = 20 kn		±3			±3	mV	

NOTES

¹Long-Term Input Offset Voltage Stability refers to the averaged trend line of V_{OS} vs. Time over extended periods after the first 30 days of operation. Excluding the initial hour of operation, changes in V_{OS} during the first 30 operating days are typically 2.5 μV.

²Sample tested.

³Guaranteed by design.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (@ $V_S = \pm 15\text{ V}$, $-25^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ for OP77E/FJ and OP77E/FZ, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	OP77E			OP77F			Unit
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
INPUT OFFSET VOLTAGE	V	J, Z Packages	10	45	55	20	100	100	μV
AVERAGE INPUT OFFSET VOLTAGE DRIFT ¹	TCV_{OS}	J, Z Packages	0.1	0.3	0.6	0.2	0.6	1.0	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
INPUT OFFSET CURRENT	I_{OS}		0.5	2.2		0.5	4.5		nA
AVERAGE INPUT OFFSET CURRENT DRIFT ²	TCI_{OS}		1.5	4.0		1.5	85		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
INPUT BIAS CURRENT	I_{B}	E, F	-0.2	2.4	4.0	-0.2	2.4	6.0	nA
AVERAGE INPUT BIAS CURRENT DRIFT ²	TCI_{B}		8	40		15	60		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
INPUT VOLTAGE RANGE	IVR		± 13.0	± 13.5		± 13.0	± 13.5		V
COMMON-MODE REJECTION RATIO	CMRR	$V_{\text{CM}} = \pm 13\text{ V}$	0.1	1.0		0.1	3.0		pV/V
POWER SUPPLY REJECTION RATIO	PSRR	$V_S = \pm 3\text{ V to } \pm 18\text{ V}$	1.0	3.0		1.0	5.0		$\mu\text{V}/\text{V}$
LARGE-SIGNAL VOLTAGE GAIN	A_{VO}	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_O = \pm 10\text{ V}$	2000	6000		1000	4000		V/mV
OUTPUT VOLTAGE SWING	V_O	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	± 12	± 13.0		± 12	± 13.0		V
POWER CONSUMPTION	P_d	$V_S = \pm 15\text{ V}$, No Load	60	75		60	75		mW

NOTES

¹OP77E: TCV_{OS} is 100% tested on J and Z packages.²Guaranteed by end-point limits.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OP77–SPECIFICATIONS

WAFER TEST LIMITS (@ $V_s = \pm 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, for OP77N devices, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	OP77N Limit	Unit
INPUT OFFSET VOLTAGE	V_{OS}		40	μV Max
INPUT OFFSET CURRENT	I_{OS}		2.0	nA Max
INPUT BIAS CURRENT	I_B		± 2	nA Max
INPUT RESISTANCE Differential Mode	R_{IN}		26	M Ω Min
INPUT VOLTAGE RANGE	IVR		± 13	V Min
COMMON-MODE REJECTION RATIO	CMRR	$V_{CM} = \pm 13\text{ V}$	1	$\mu\text{V/V}$ Max
POWER SUPPLY REJECTION RATIO	PSRR	$V_S = \pm 3\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$	3	$\mu\text{V/VMax}$
OUTPUT VOLTAGE SWING	V_O	$R_L = 10\text{ k}\Omega$ $R_L = 2\text{ k}\Omega$ $R_L = 1\text{ k}\Omega$	± 13.5 ± 12.5 ± 12.0	V Min
LARGE-SIGNAL VOLTAGE GAIN	A_{VO}	$R_L = 2\text{ k}\Omega$ $V_O = \pm 10\text{ V}$	2000	V/mV Min
DIFFERENTIAL INPUT VOLTAGE			± 30	V Max
POWER CONSUMPTION	P_d	$V_{OUT} = 0\text{ V}$	60	mW Max

NOTES

¹Guaranteed by design.

²Electrical tests are performed at wafer probe to the limits shown. Due to variations in assembly methods and normal yield loss, yield after packaging is not guaranteed for standard product dice. Consult factory to negotiate specifications based on dice lot qualification through sample lot assembly and testing.

TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS (@ $V_s = \pm 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	OP77N Limit	Unit
AVERAGE INPUT OFFSET VOLTAGE DRIFT	TCV_{OS}	$R_S = 50\ \Omega$	0.1	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
NULLED INPUT OFFSET VOLTAGE DRIFT	TCV_{OSn}	$R_S = 50\ \Omega$, $R_p = 20\text{ k}\Omega$	0.1	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
AVERAGE INPUT OFFSET CURRENT DRIFT	TCI_{OS}		0.5	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
SLEW RATE	SR	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	0.3	V/ μs
BANDWIDTH	BW	$A_{VCL} + 1$	0.6	MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS¹

Supply Voltage	±22 V
Differential Input Voltage	±30 V
Input Voltage ²	±22 V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range	
J and Z Packages	-65°C to +150°C
Operating Temperature Range	
OP77A	-55°C to +125°C
OP77E, OPP77F (J, Z)	-25°C to +85°C
Junction Temperature (T _j)	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 60 sec.)	300°C

NOTES

¹Absolute Maximum Ratings apply to both DICE and packaged parts, unless otherwise noted.

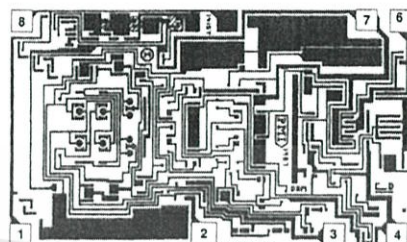
²For supply voltages less than ±22 V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

Package Type	θ_{JA}^*	θ_{JC}	Unit
TO-99 (J)	150	18	°C/W
8-Lead Hermetic DIP (Z)	148	16	°C/W

NOTE

* θ_{JA} is specified for worst-case mounting conditions, i.e., θ_{JA} is specified for device in socket for TO, CERDIP, P-DIP, and PLCC packages; θ_{JA} is specified for device soldered to printed circuit board for SO package.

BONDING DIAGRAM



- 1. BALANCE
- 2. INVERTING INPUT
- 3. NONINVERTING INPUT
- 4. V-
- 6. OUTPUT
- 7. V+
- 8. BALANCE

DIE SIZE 0.093 × 0.057 inch, 5301 sq. mm
(2.36 × 1.45 mm, 3.42 sq. mm)

ORDERING GUIDE

Package Options		Operating Temperature Range
TO-99	CERDIP* 8-Lead	
OP77EJ	OP77AZ	MIL
OP77FJ	OP77EZ	IND
	OP77FZ	IND

*Not for new designs; obsolete April 2002.

For Military processed devices, please refer to the Standard Microcircuit Drawing (SMD) available at www.dscc.dla.mil/programs/milspec/default.asp

SMD Part Number	ADI Equivalent
5962-87738012A	OP77BRCMDA
5962-8773802GA	OP77AJMDA
5962-8773802PA	OP77AZMDA

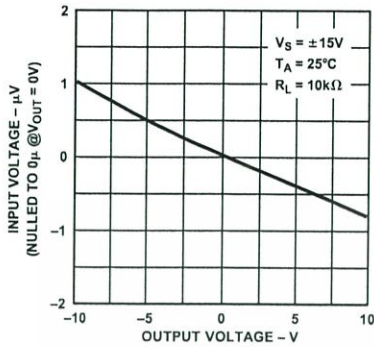
CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the OP77 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high-energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.

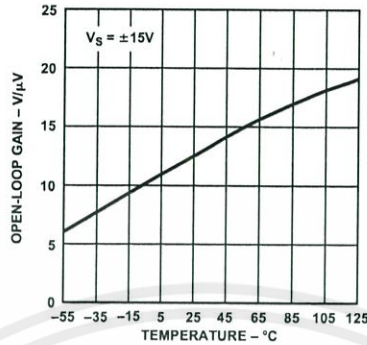


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

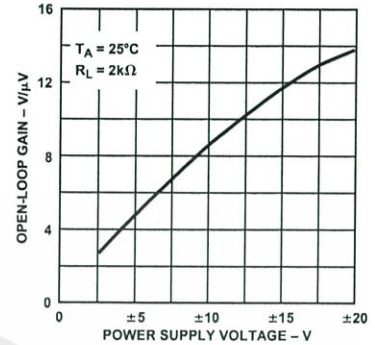
OP77—Typical Performance Characteristics



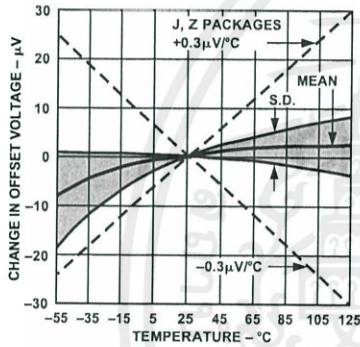
TPC 1. Gain Linearity (Input Voltage vs. Output Voltage)



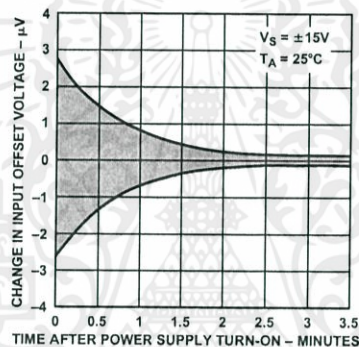
TPC 2. Open-Loop Gain vs. Temperature



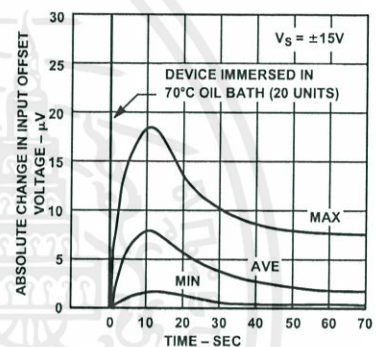
TPC 3. Open-Loop Gain vs. Power Supply Voltage



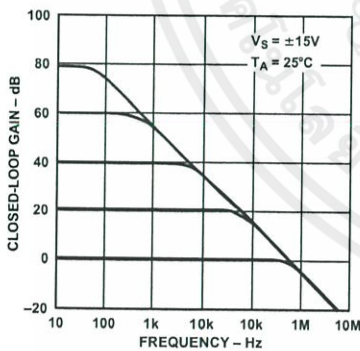
TPC 4. Untrimmed Offset Voltage vs. Temperature



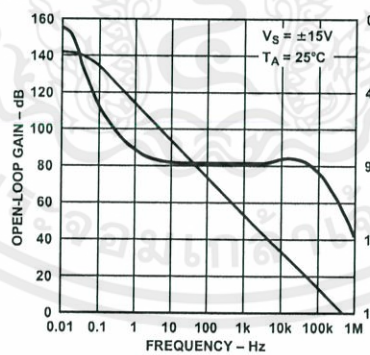
TPC 5. Warm-Up Drift



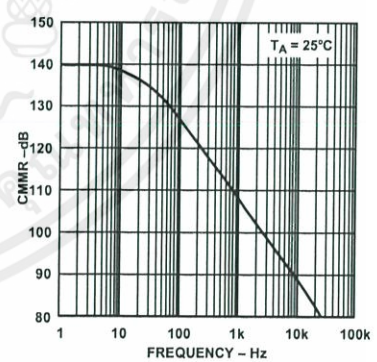
TPC 6. Offset Voltage Change Due to Thermal Shock



TPC 7. Closed-Loop Response for Various Gain Configurations

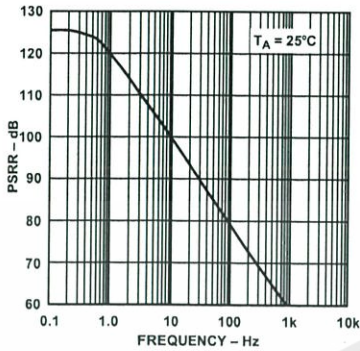


TPC 8. Open-Loop Gain/Phase Response

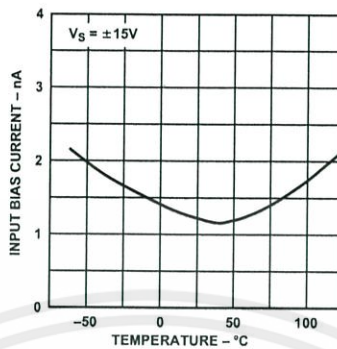


TPC 9. CMRR vs. Frequency

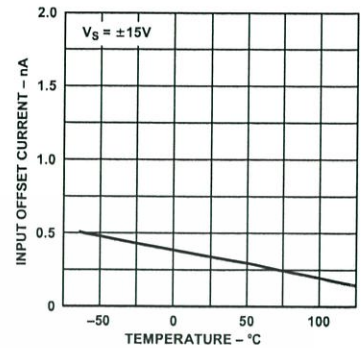
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



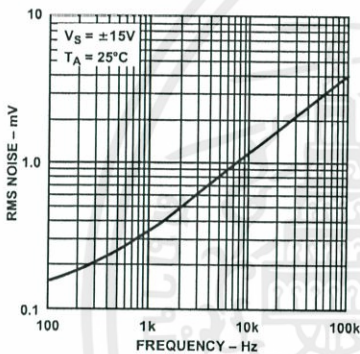
TPC 10. PSRR vs. Frequency



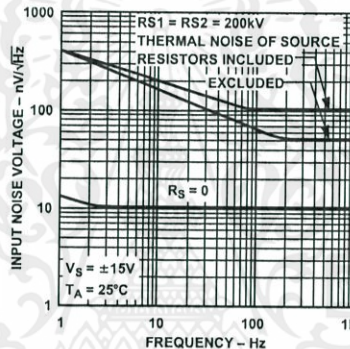
TPC 11. Input Bias Current vs. Temperature



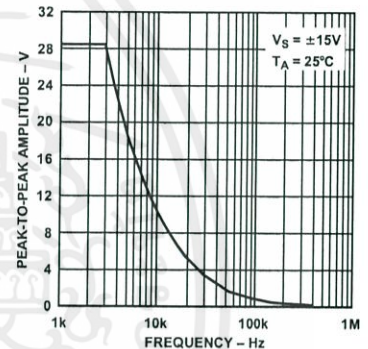
TPC 12. Input Offset Current vs. Temperature



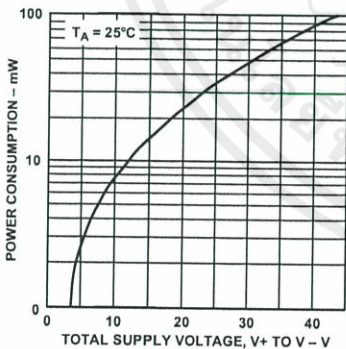
TPC 13. Input Wideband Noise vs. Bandwidth (0.1 Hz to Frequency Indicated)



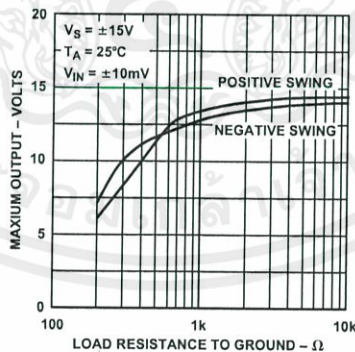
TPC 14. Total Input Noise Voltage vs. Frequency



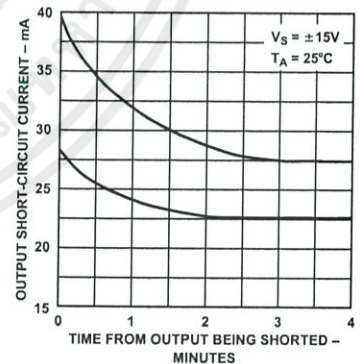
TPC 15. Maximum Output Swing vs. Frequency



TPC 16. Power Consumption vs. Power Supply



TPC 17. Maximum Output Voltage vs. Load Resistance



TPC 18. Output Short-Circuit Current vs. Time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OP77

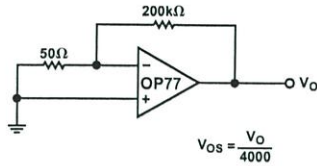


Figure 1. Typical Offset Voltage Test Circuit

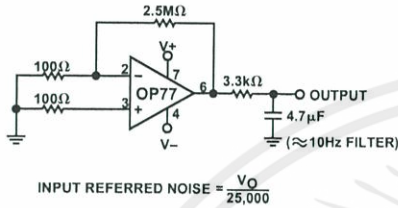


Figure 2. Typical Low-Frequency Noise Test Circuit

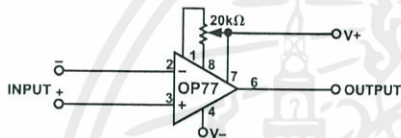


Figure 3. Optional Offset Nulling Circuit

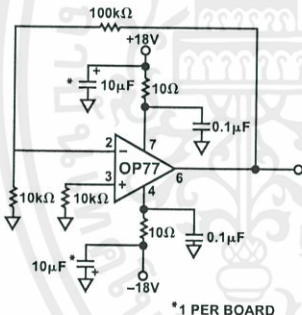
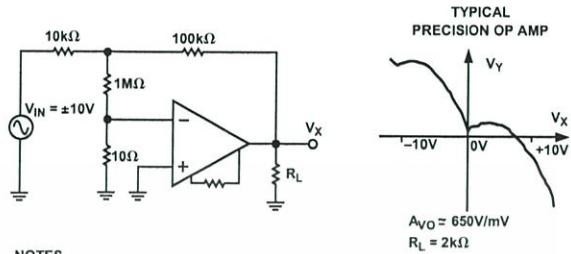


Figure 4. Burn-In Circuit



- NOTES
1. GAIN NOT CONSTANT. CAUSES NONLINEAR ERRORS.
 2. A_{VO} SPEC IS ONLY PART OF THE SOLUTION.
 3. CHECK THE OP AMP PERFORMANCE, ESPECIALLY AT TEMPERATURES.

Figure 5. Open-Loop Gain Linearity

Actual open-loop voltage gain can vary greatly at various output voltages. All automated testers use endpoint testing and therefore only show the average gain. This causes errors in high closed-loop gain circuits. Since this is so difficult for manufacturers to test, users should make their own evaluation. This simple test circuit makes it easy. An ideal op amp would show a horizontal scope trace.

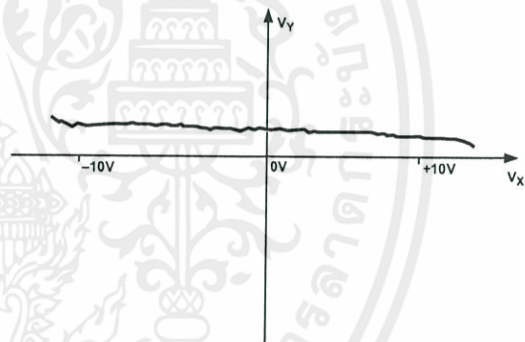


Figure 6. Output Gain Linearity Trace

This is the output gain linearity trace for the new OP77. The output trace is virtually horizontal at all points, assuring extremely high gain accuracy. The average open-loop gain is truly impressive—approximately 10,000,000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATIONS INFORMATION

Bilateral Current Source

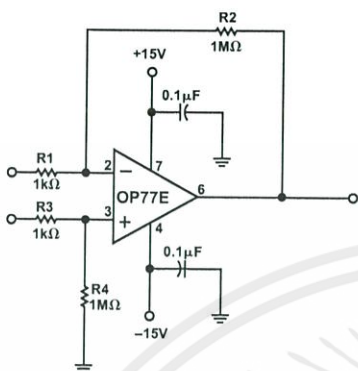


Figure 7. Precision High-Gain Differential Amplifier

The high gain, gain linearity, CMRR, and low TC_{V_o} of the OP77 make it possible to obtain performance not previously available in single-stage very high-gain amplifier applications.

For best CMR, $\frac{R1}{R2}$ must equal $\frac{R3}{R4}$. In this example,

with a 10 mV differential signal, the maximum errors are as listed in Table I.

Table I. Maximum Errors

TYPE	AMOUNT
COMMON-MODE VOLTAGE	0.01%/V
GAIN LINEARITY, WORST CASE	0.02%
TC _{V_o}	0.003%/°C
TC _{I_{OS}}	0.008%/°C

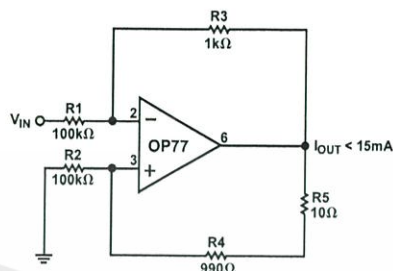


Figure 9. Basic Current Source

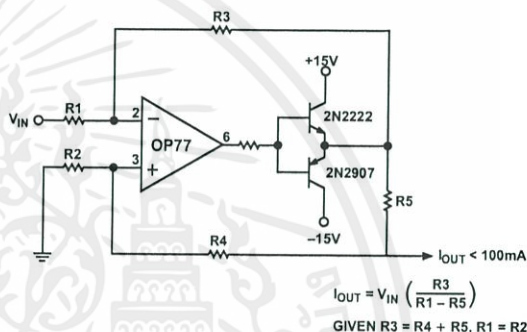


Figure 10. 100 mA Current Source

These current sources will supply both positive and negative current into a grounded load.

Note that $Z_o = \frac{R5 \left(\frac{R4}{R2} + 1 \right)}{\frac{R5 + R4}{R2} \frac{R3}{R1}}$

and that for Z_o to be infinite,

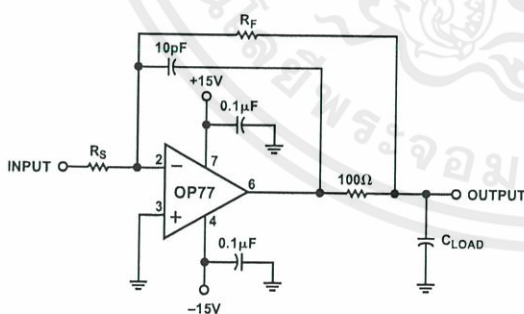


Figure 8. Isolating Large Capacitive Loads

This circuit reduces maximum slew-rate but allows driving capacitive loads of any size without instability. Because the boot resistor is inside the feedback loop, its effect on output impedance is reduced to insignificance by the high open-loop gain of the OP77.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OP77

$$\frac{R5 + R4}{R2} \text{ must} = \frac{R3}{R1}$$

Precision Current Sinks

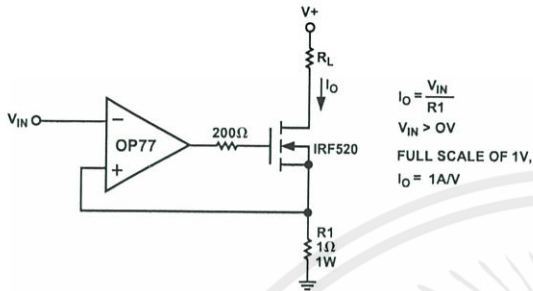


Figure 11. Positive Current Sink

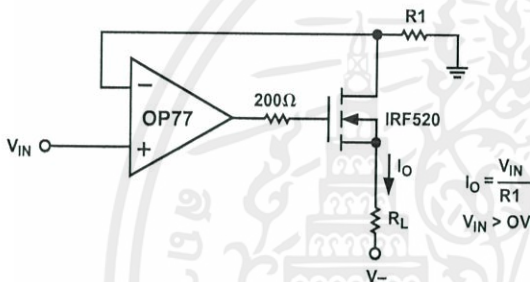


Figure 12. Positive Current Source

These simple high-current sinks require the load to float between the power supply and the sink.

In these circuits, OP77's high gain, high CMRR, and low TCV_{OS} ensure high accuracy.

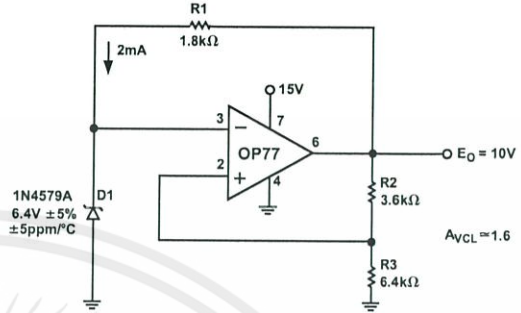


Figure 13. High Stability Voltage Reference

This simple bootstrapped voltage reference provides a precise 10V virtually independent of changes in power supply voltage, ambient temperature and output loading. Correct Zener operating current of exactly 2mA is maintained by R1, a selected 5ppm/°C resistor, connected to the regulated output. Accuracy is primarily determined by three factors; the 5ppm/°C temperature coefficient of D1, 1ppm/°C ratio tracking of R2 and R3, and operational amplifier V_{OS} errors.

V_{OS} errors, amplified by 1.6 (AV_{CL}), appear at the output and can be significant with most monolithic amplifiers. For example, an ordinary amplifier with TCV_{OS} of 5 $\mu V/^\circ C$ contributes 0.8 ppm/°C of output error while the OP77, with TCV_{OS} of 0.3 $\mu V/^\circ C$, contributes but 0.05 ppm/°C of output error, thus effectively eliminating TCV_{OS} as an error consideration.

The high gain and low TCV_{OS} assure accurate operation with inputs from microvolts to volts. In this circuit, the signal always

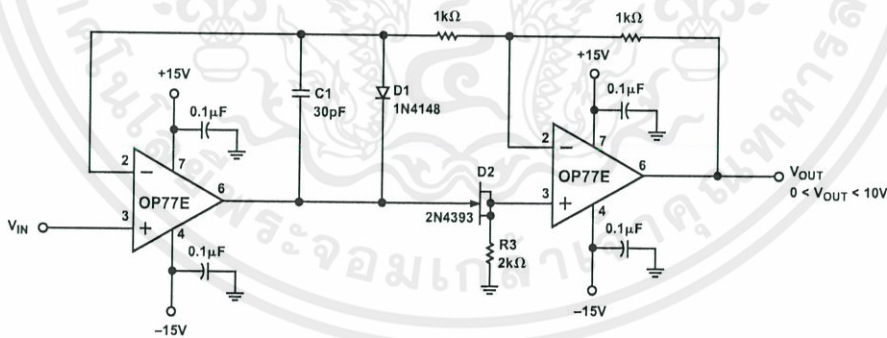


Figure 14. Precision Absolute Value Amplifier

The high gain and low TCV_{OS} assure accurate operation with inputs from microvolts to volts. In this circuit, the signal always

appears as a common-mode signal to the op amps. The OP77E CMRR of 1 $\mu V/V$ assures errors of less than 2 ppm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

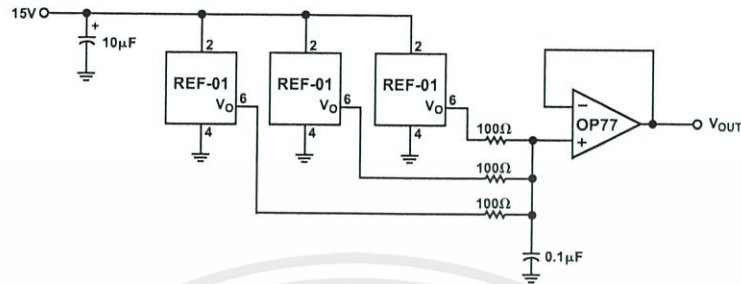


Figure 15. Low Noise Precision Reference

This circuit relies upon OP77's low TCV_{OS} and noise combined with very high CMRR to provide precision buffering of the averaged REF01 voltage outputs.

C_H must be of polystyrene, Teflon*, or polyethylene to minimize dielectric absorption and leakage. The droop rate is determined by the size of C_H and the bias current of the AD820.

*Teflon is a registered trademark of the Dupont Company

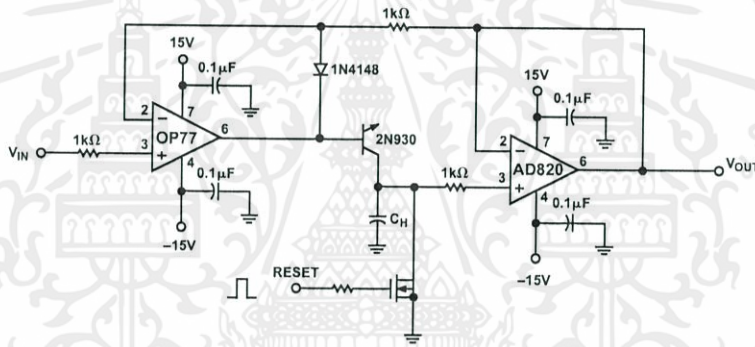


Figure 16. Precision Positive Peak Detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OP77

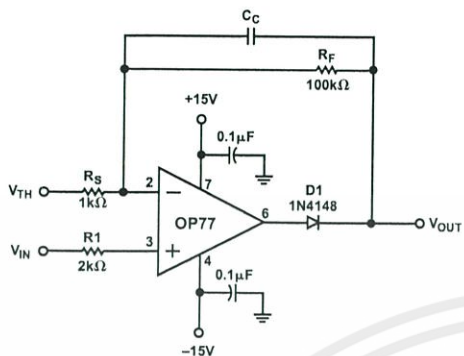


Figure 17. Precision Threshold Detector/Amplifier

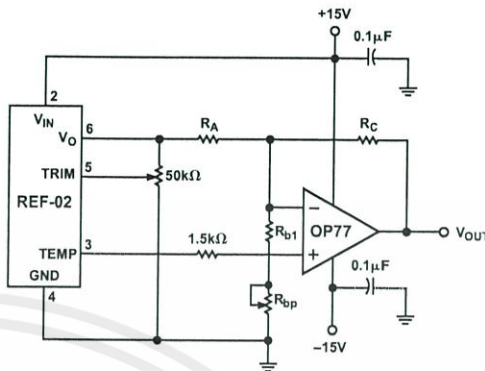


Figure 18. Precision Temperature Sensor

When $V_{IN} < V_{TH}$, amplifier output swings negative, reverse biasing diode D1. $V_{OUT} = V_{TH}$ if $R_L = \infty$ when $V_{IN} > V_{TH}$, the loop closes,

$$V_{OUT} = V_{TH} + (V_{IN} - V_{TH}) \left(1 + \frac{R_F}{R_S} \right)$$

C_C is selected to smooth the response of the loop.

Table II. Resistor Values

TCV _{OUT} SLOPE (S)	10 mV/°C	100 mV/°C	10 mV/°F
TEMPERATURE RANGE	-55°C to +125°C	-55°C to +125°C	-67°F to +257°C
OUTPUT VOLTAGE RANGE	-0.55 V to +1.25 V	-5.5 V to +12.5V	-0.67 V to +2.57V
ZERO-SCALE	0 V @ 0°C	0 V @ 0°C	0 V @ 0°F
R _a (± 1% Resistor)	9.09 kΩ	15 kΩ	7.5 kΩ
R _{b1} (± 1% Resistor)	1.5 kΩ	1.82 kΩ	1.21 kΩ
R _{bp} (Potentiometer)	200 Ω	500 Ω	200 Ω
R _c (± 1% Resistor)	5.11 kΩ	84.5 kΩ	8.25 kΩ

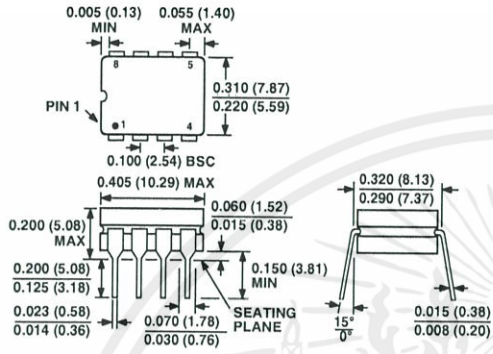
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OUTLINE DIMENSIONS

8-Lead Ceramic Dip – Glass Hermetic Seal [CERDIP]

(Q-8)

Dimensions shown in inches and (millimeters)

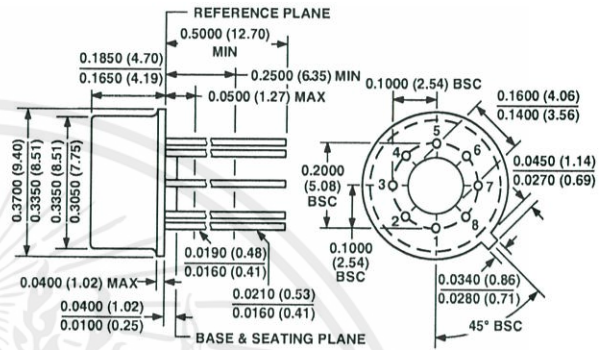


CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN INCH; MILLIMETERS DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF MILLIMETER EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN

8-Lead Metal Can [TO-99]

(H-08)

Dimensions shown in inches and (millimeters)



COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MO-002AK
CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN INCHES; MILLIMETERS DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Revision History

Location	Page
10/02—Data Sheet changed from REV. B to REV. C.	
Edits to SPECIFICATIONS	2
Figure 2 Caption Changed	10
Figure 3 Caption Changed	10
Edits to Figure 10	11
Updated OUTLINE DIMENSIONS	15
2/02—Data Sheet changed from REV. A to REV. B.	
Remove 8-Lead SO PIN CONNECTION DIAGRAM	1
Changes to ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS	2
Remove OP77B column from SPECIFICATIONS	2
Remove OP77B column from ELECTRICAL CHARACTERISTICS	3-5
Remove OP77G column from WAFER TEST LIMITS	6
Remove OP77G column from TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS	6



C00320-0-10/02(C)

PRINTED IN U.S.A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



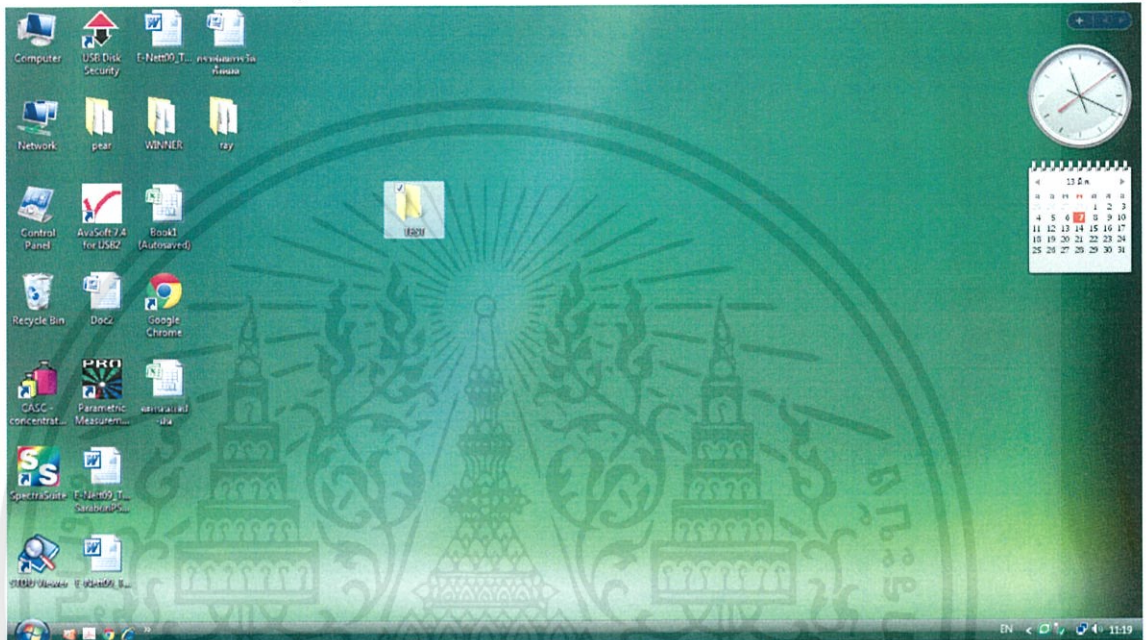
ภาคผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

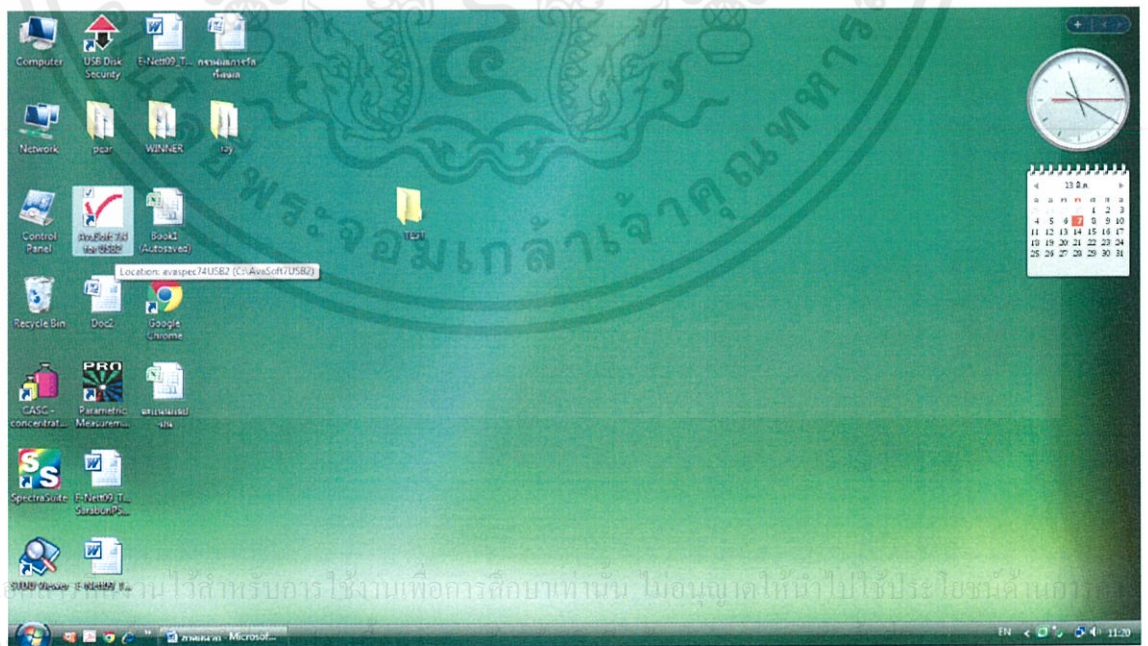
ภาคผนวก ข

วิธีการใช้โปรแกรม Avasoft

1. ตั้งไฟล์สำหรับ save ข้อมูล

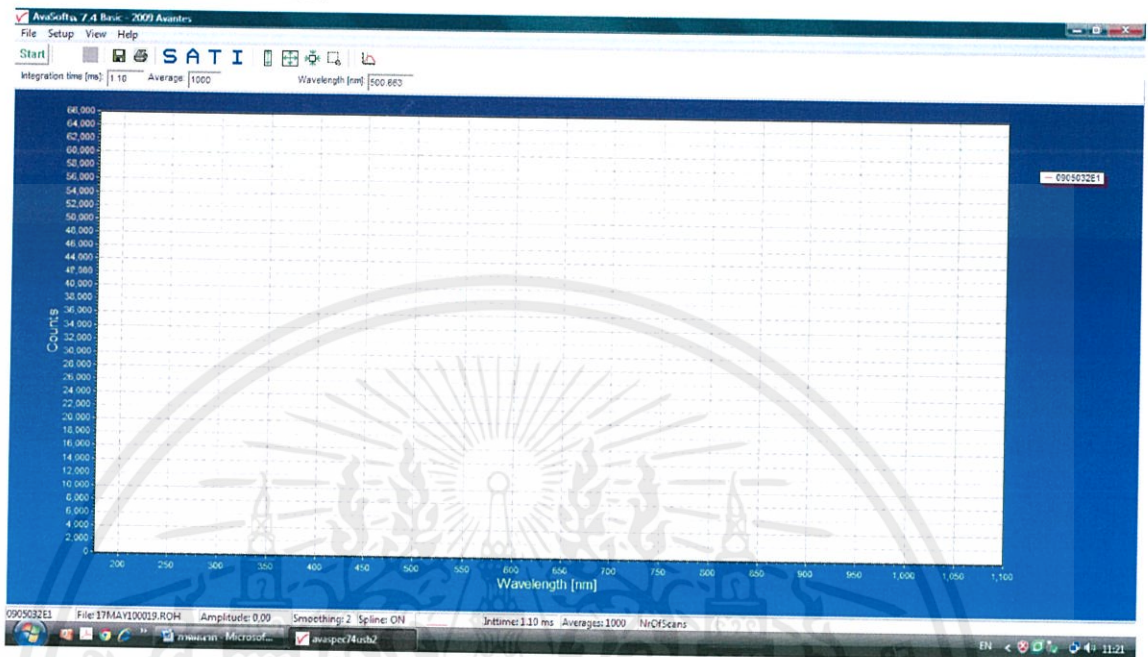


2. เปิดโปรแกรม Avasoft

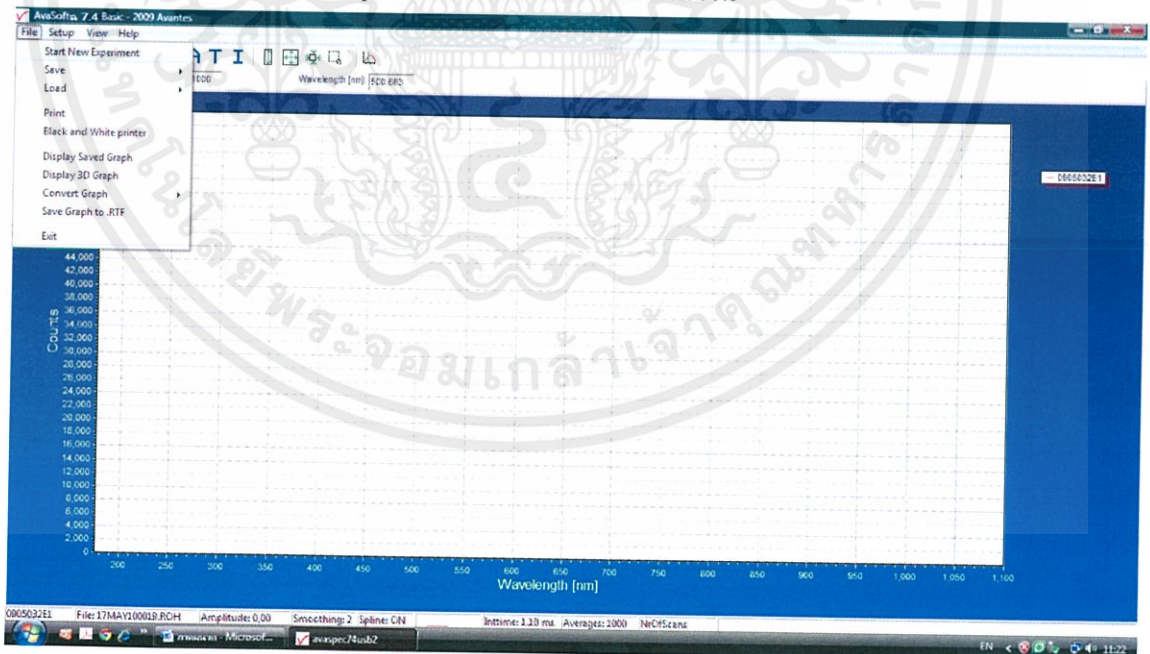


เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรฉีกขาด

3. หน้าจอโปรแกรม Avasoft

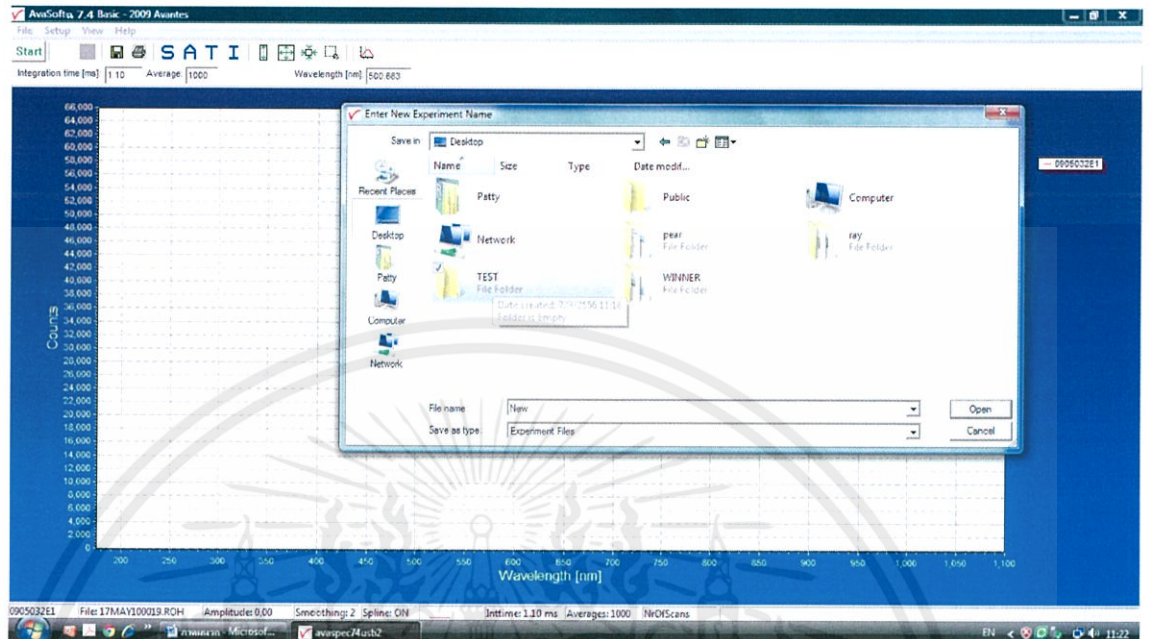


4. คลิกที่ file เลือก Start New Experiment เพื่อทำการตั้งชื่อไฟล์งาน

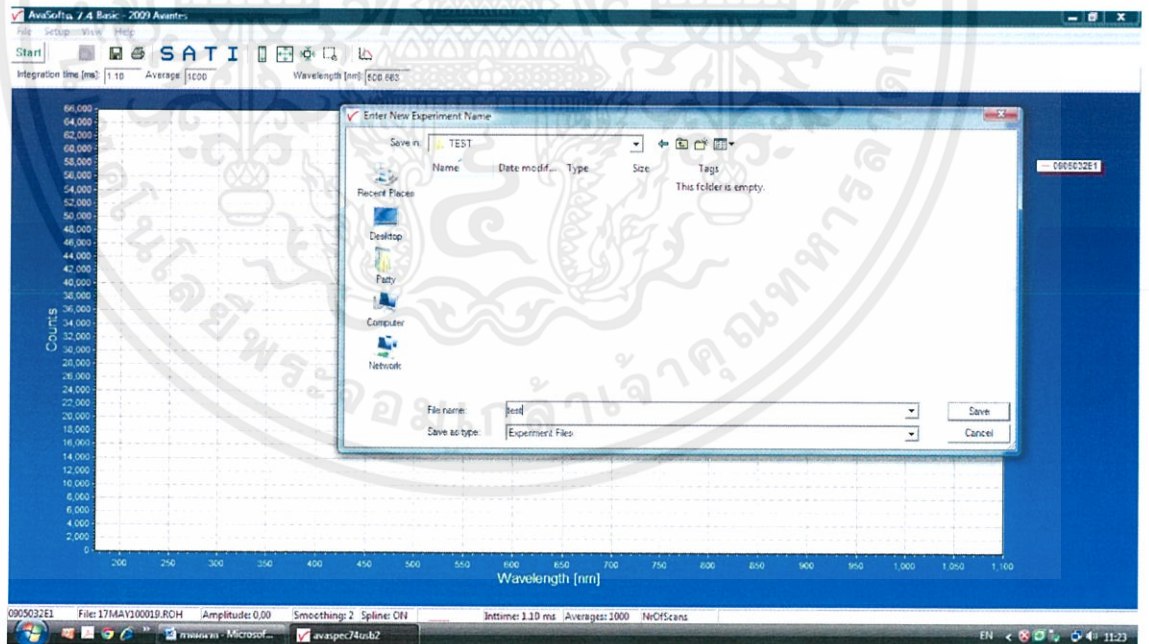


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เลือก Folder ที่เราต้องการกด save เพื่อทำการบันทึก

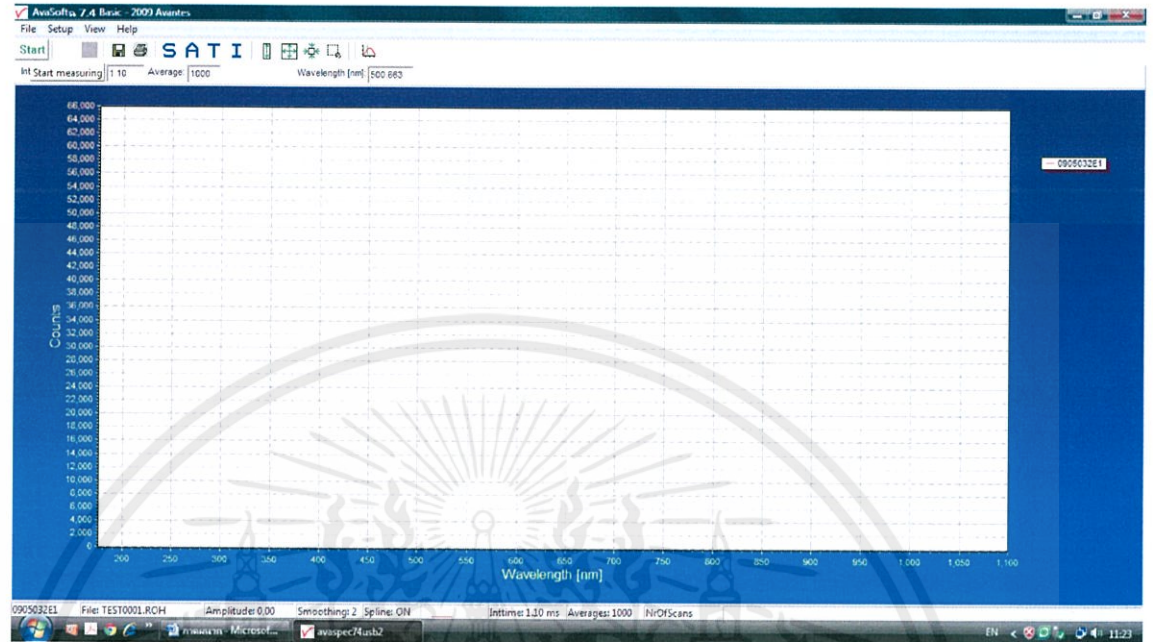


6. ใส่ชื่อไฟล์งานที่เราต้องการกด save เพื่อทำการบันทึก

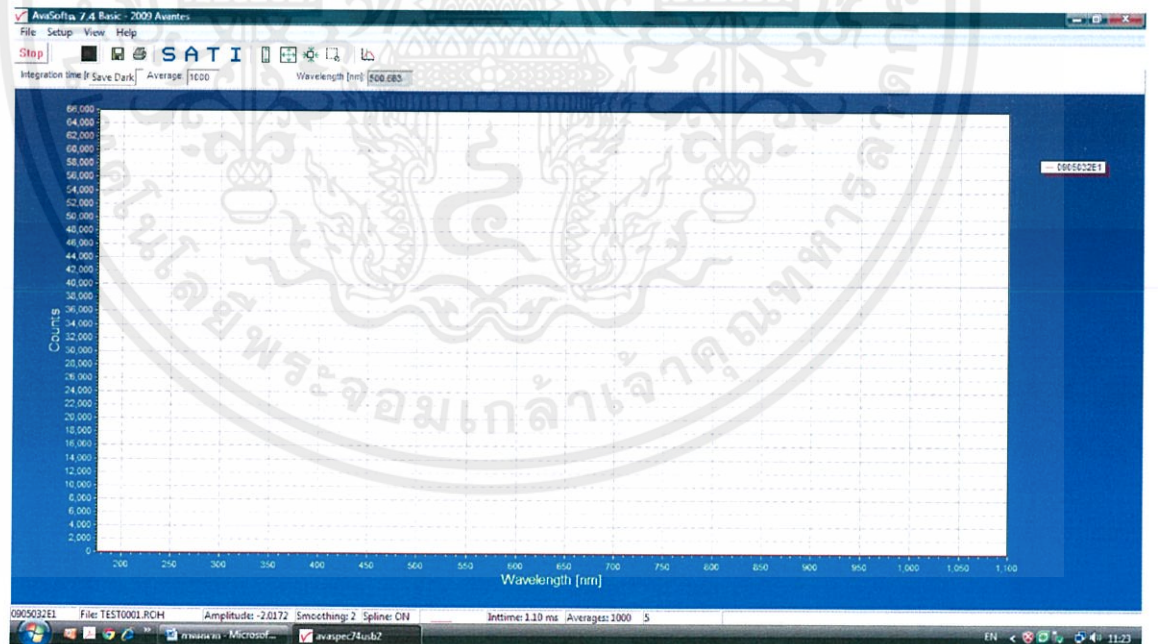


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. คลิก Start measuring เพื่อเริ่มการทำงานของเครื่อง Spectrometer

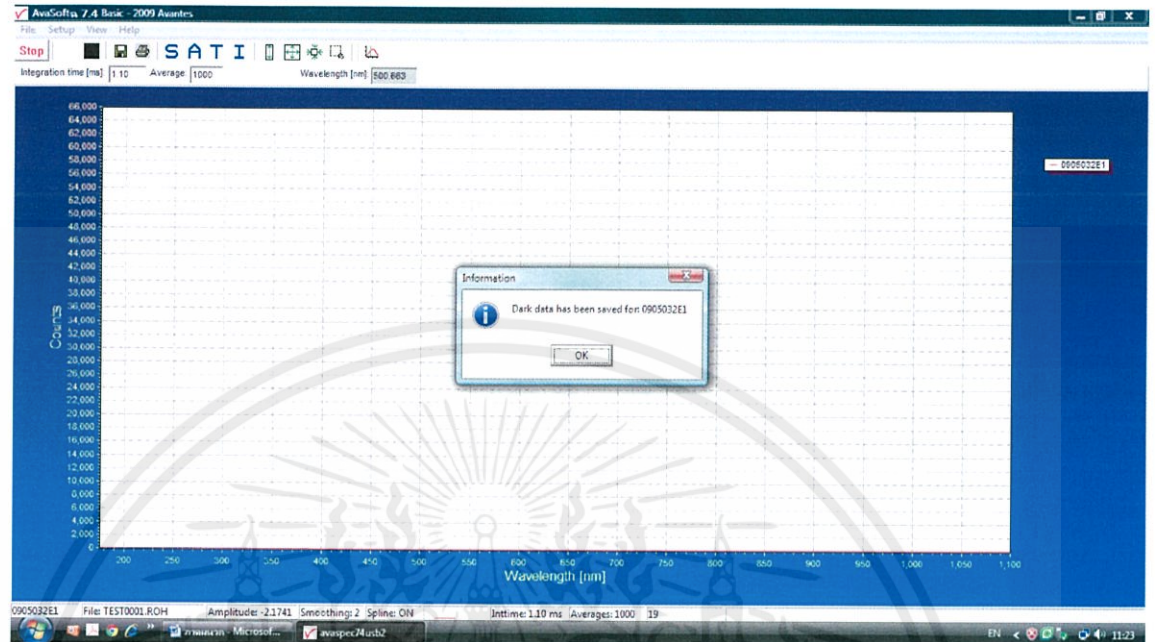


8. คลิกที่ไอคอน Save Dark เพื่อทำการวัดค่า Dark

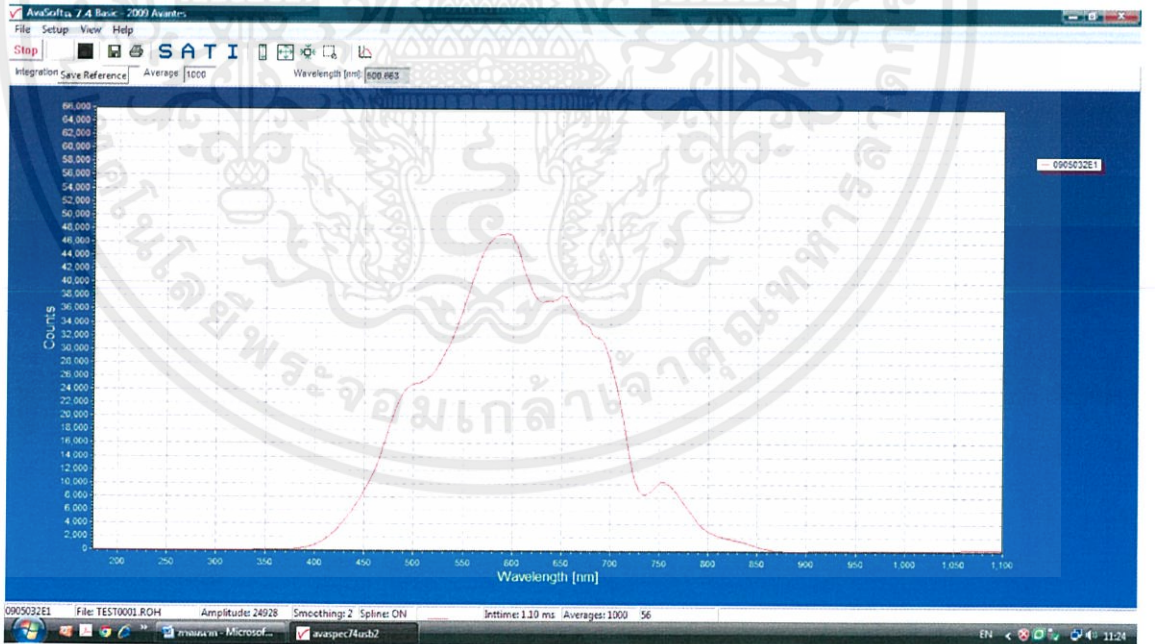


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. คลิก OK เพื่อทำการบันทึกข้อมูลของการวัด Dark

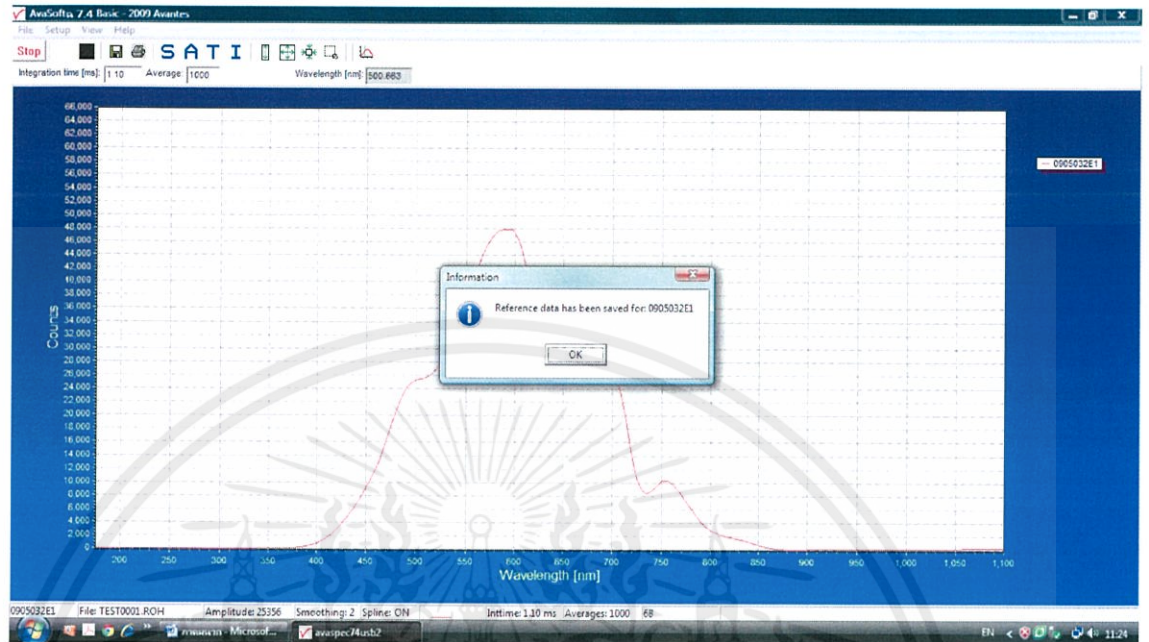


10. คลิกที่ไอคอน Save Reference เพื่อทำการวัดค่า Reference

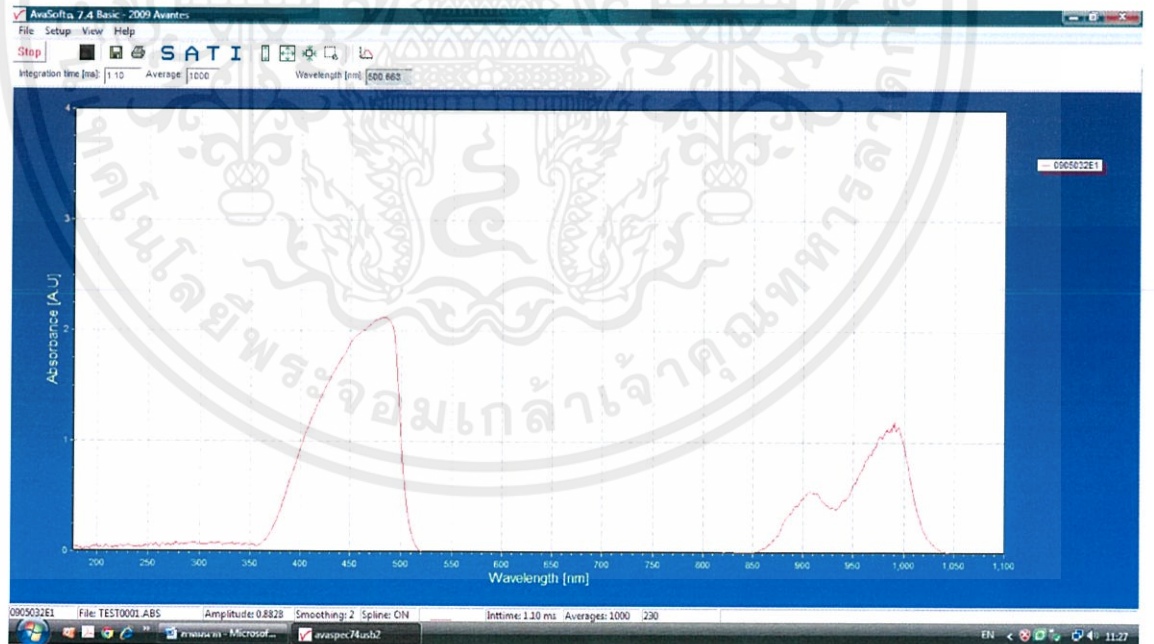


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. คลิก OK เพื่อทำการบันทึกข้อมูลของการวัด Reference

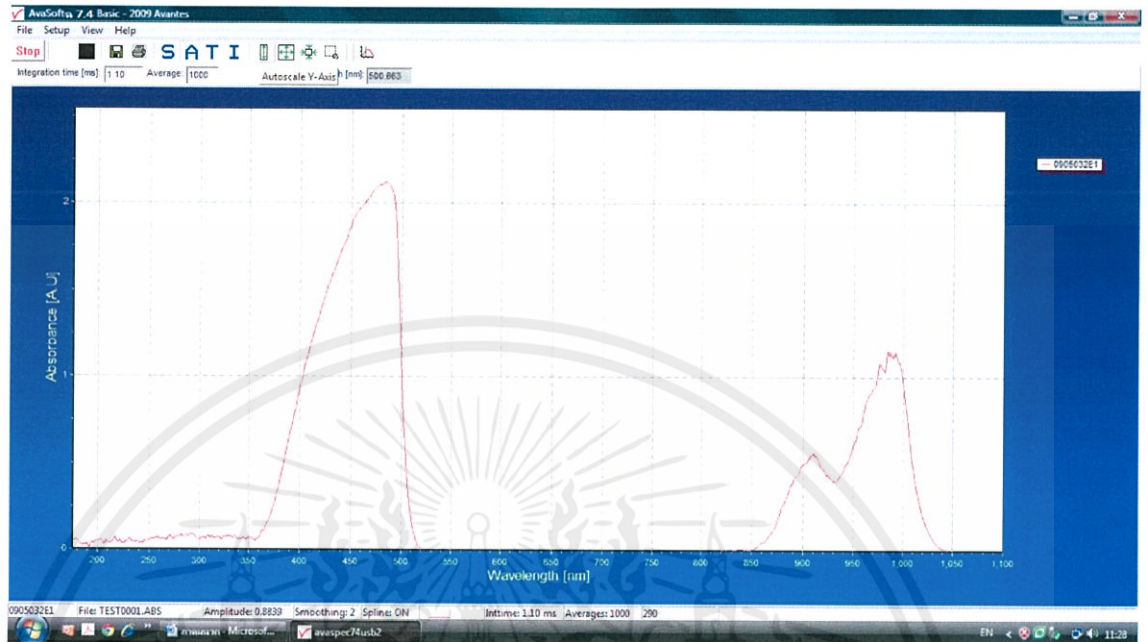


12. คลิกไอคอน Absorbance Mode

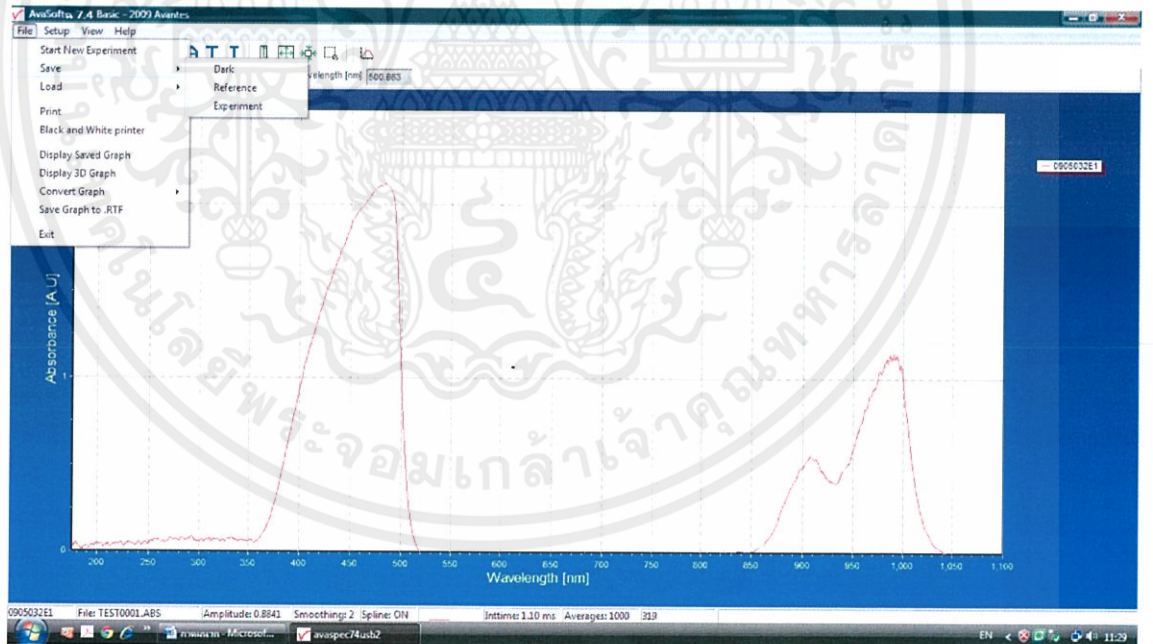


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. คลิกไอคอน Autoscale Y-Axis

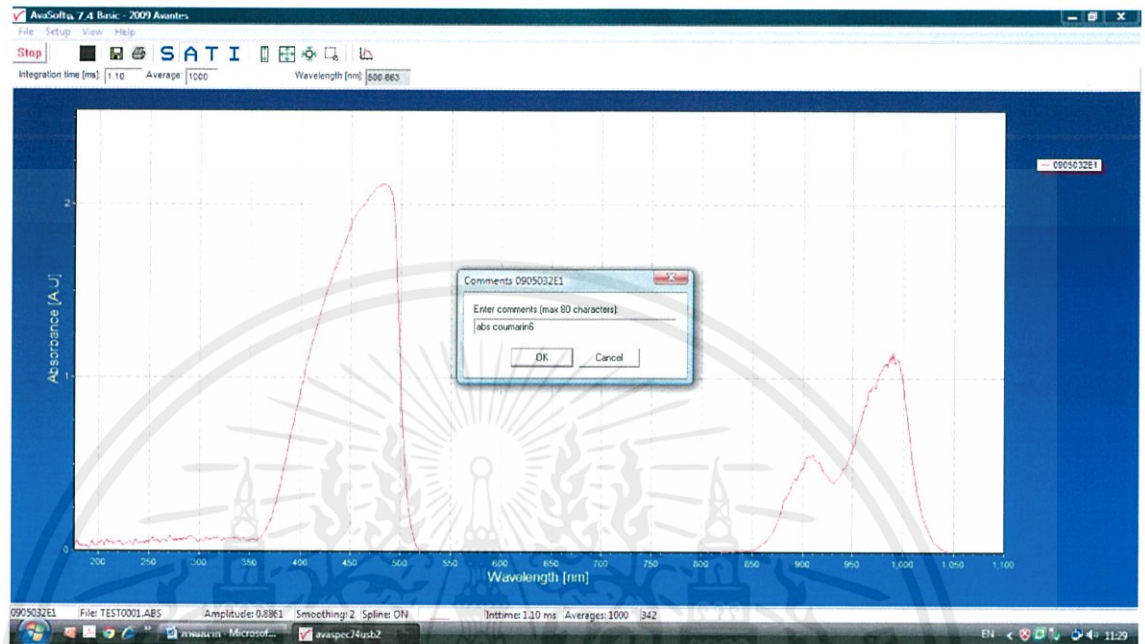


14. คลิกที่ File > Save > Experiment

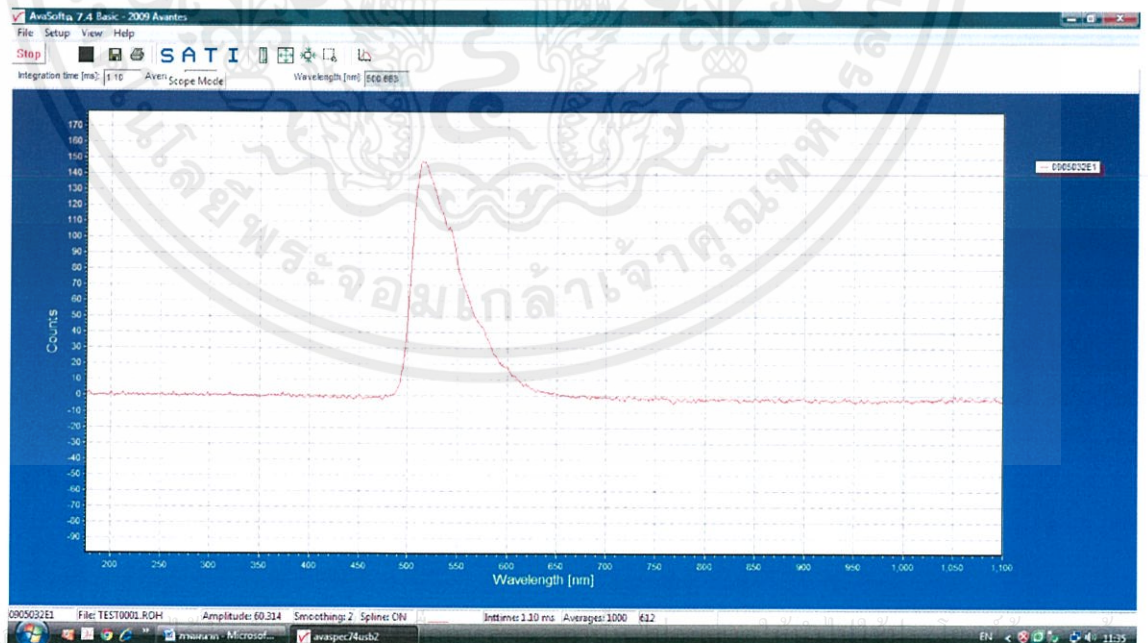


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. ใส่ชื่อสารหรือความเข้มข้นของสารที่นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นคลิก OK เพื่อบันทึกข้อมูลการวัดค่าการดูดกลืนแสง



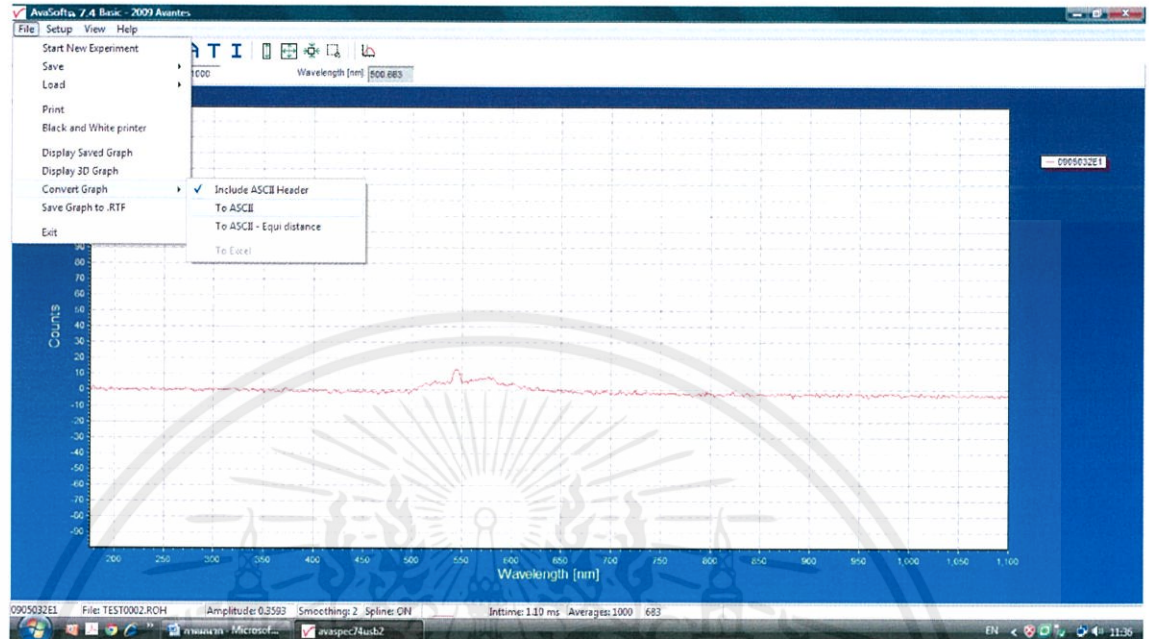
16. คลิกไอคอน Scope Mode แล้วทำการบันทึกข้อมูลการวัดค่าการเปล่งแสงตามขั้นตอนดังข้อที่ 12-14 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็น

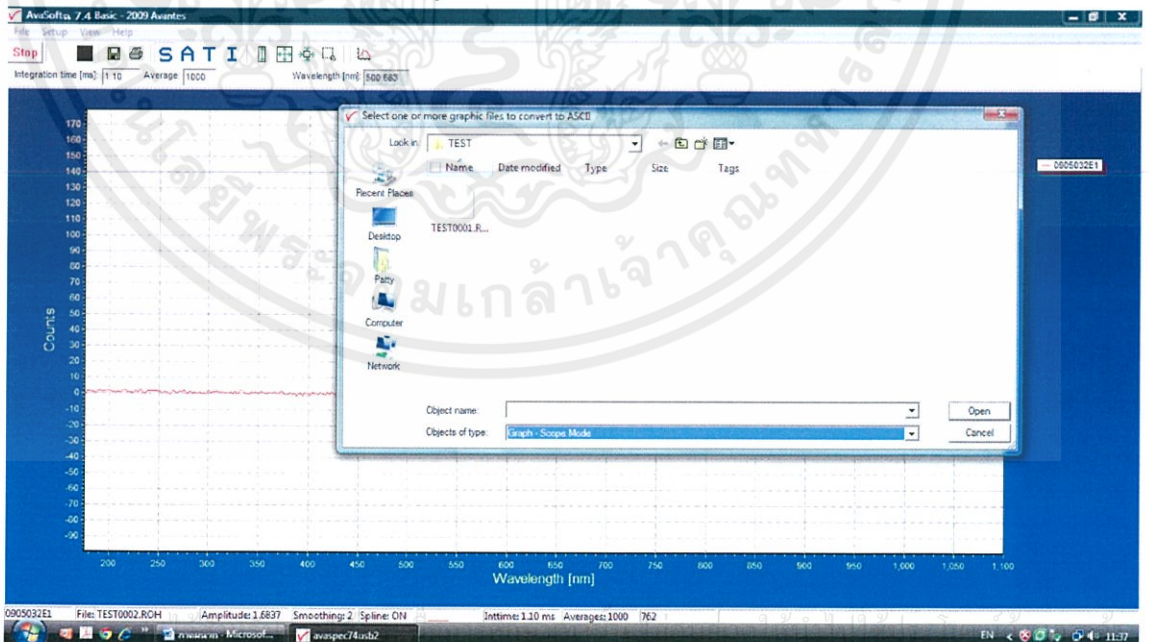
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. คลิกที่ File เลือก Convert Graph เพื่อทำการแปลงไฟล์ให้เป็นหน่วย ASCII



18. คลิกเลือกไฟล์ที่เราต้องการแปลงหน่วยเป็น ASCII จากนั้นเลือกชนิด Mode ของ Graph ที่ Object of type หลังจากนั้นคลิกปุ่ม Open เพื่อเปิดใช้งานไฟล์นั้น

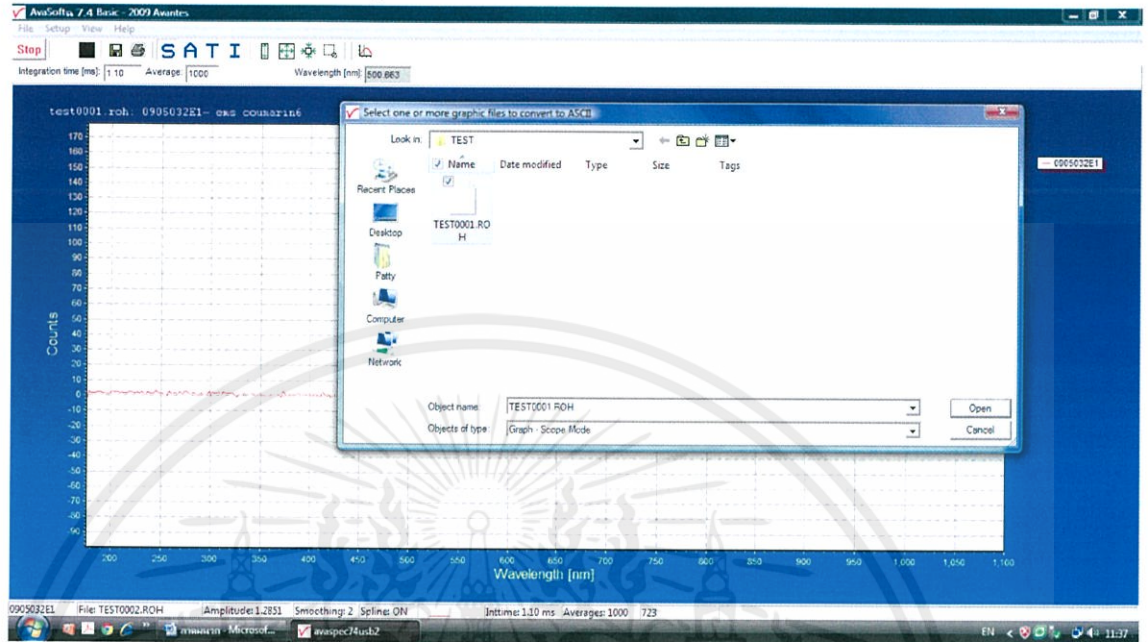
(Graph-Absorbance Mode สำหรับการดูดกลืนแสง)



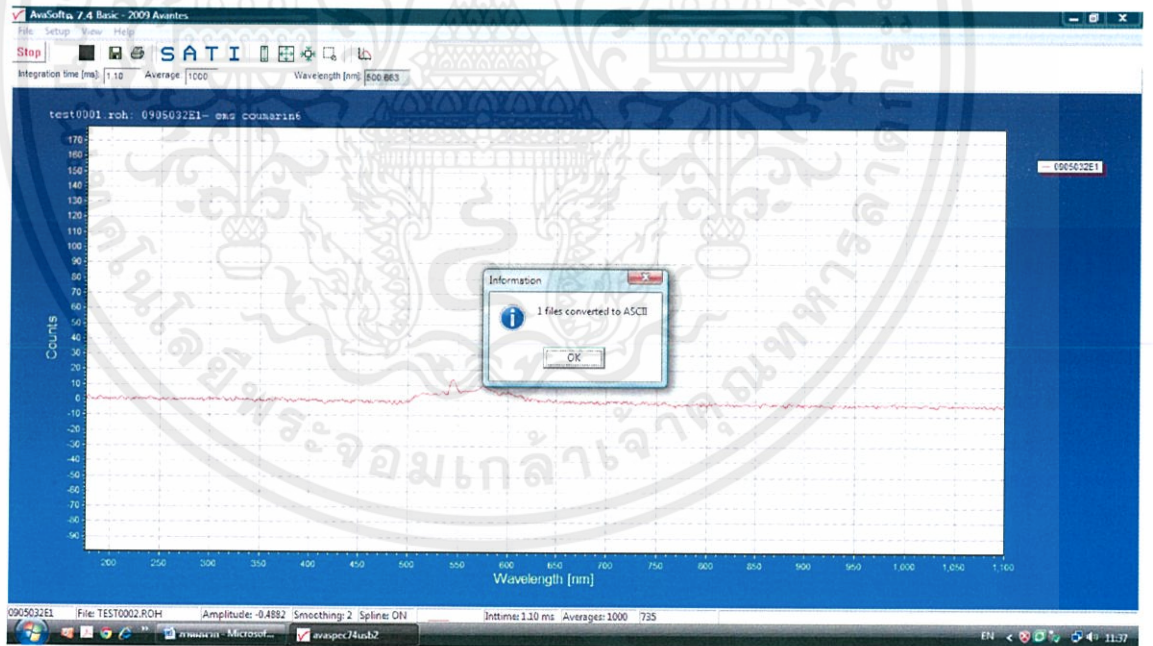
เอกสารนี้เป็น

ไม่ทำกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Graph-Scope Mode สำหรับการดูคลื่นแสง)



19. หลังจากนั้นหน้าจอก็จะแสดงไฟล์ที่ได้รับการแปลงมาแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้