ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนต์แบบพกพา
แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556
ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย
หัวหน้าโครงการวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทรียา กิตติเดชาชาญ
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ร่วมโครงการวิจัย -

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนต์แบบพกพา ส่วนประกอบหลักของระบบจะประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง LED ชนิดให้ความสว่างสูงเพื่อทำหน้าที่เป็นแสงกระตุ้น ไมโครฟลูอิดิกแชนแนล และตัวตรวจวัดแสง ระบบที่ถูกจัดสร้างขึ้นจะถูกนำมาใช้ทดลองวัดแสงฟลูออเรสเซนต์ของสาร Rhodamine 6G ที่มีค่าความเข้มข้น 100 nM to 5 mM ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองต่อแสงของระบบวัดสำหรับสารที่มีค่าความเข้มข้นต่างๆได้ถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับระบบตรวจวัดที่ใช้คิวเวท จากการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ต้นแบบที่ถูกพัฒนาขึ้นมีความสามารถในการตรวจวัดสารในย่านที่กว้างกว่าในคิวเวท ซึ่งในคิวเวทผลการวัดแสดงให้เห็นถึงการลดลงของสัญญาณฟลูออเรสเซนต์เมื่อค่าความเข้มข้นของสารมีค่าสูงกว่า 10^{-5} M ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากปรากฏการณ์ดูดกลืนซ้ำและกลไก self-quenching สามารถเกิดขึ้นได้สูงเมื่อสารมีค่าความเข้มข้นมาก ทำให้ค่าควอนตัมยีลด์ของสารมีค่าลดลง ซึ่งปัญหาดังกล่าวไม่เกิดกับระบบวัดที่ใช้ไมโครฟลูอิดิก

คำสำคัญ : แสงฟลูออเรสเซนต์ ไมโครฟลูอิดิกแชนแนล

Research Title: Development of Portable Fluorometer
Researchers: Asst. Prof. Pattareeya Kittidachachan
Faculty: Science Department: Physics
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

This research 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

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร. สิรพัฒน์ ประโทนเทพ อาจารย์ประจำวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง และ ดร. ศุภนิจ พรธีระภัทร จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (*NECTEC*) ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง Plasma cleaning สำหรับคำชี้แนะในการดำเนินการวิจัย และ

ขอขอบคุณ คุณเจริญชัย เหลืองอ่อน จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความช่วยเหลือและช่วยประสานงานในการใช้เครื่อง Profilometer สำหรับวัดความเรียบของพื้นผิวของไมโครฟลูอิดิก

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทรียา กิตติเดชาชาญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	6
2.1.1 แหล่งกำเนิดแสง	7
2.1.2 อุปกรณ์เลือกความยาวคลื่น (Wavelength selector)	11
2.1.2.1 โมโนโครเมเตอร	11
2.1.2.2 ปริซึม	14
2.1.2.3 เกรตติ้ง	14
2.1.2.4 ช่องให้แสงเข้าและช่องให้แสงออก	15
2.1.2.5 ฟิลเตอร์	15
2.1.3 แท่นวางสารตัวอย่าง	17
2.1.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแสง	19
2.3 การประยุกต์ใช้งานของระบบตรวจวัดฟลูออเรสเซนต์กับไมโครฟลูอิดิก	19
บทที่ 3 การพัฒนาระบบตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนต์	21
3.1 ส่วนประกอบของระบบตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนต์	21
3.2 สมบัติสารสีย้อมที่ใช้การทดลอง	25
3.3 เครื่องมือและระบบการวัดที่เกี่ยวข้อง	28
3.3.1 ระบบการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง	28
3.3.2 ระบบวัดสเปกตรัมแสงฟลูออเรสเซนต์	32
3.3.3 ระบบวัดสมบัติทางไฟฟ้า	34
3.4 การทดลอง	35
3.4.1 การศึกษาและเปรียบเทียบระบบวัดแสงฟลูออเรสเซนต์รูปแบบต่างๆ	35

ของสารละลายสีย้อมเรืองแสง
3.4.2 การศึกษาสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้เมื่อบรรจุสารละลายเรืองแสงในคิวเวทและไมโครฟลูอิดิก 37
3.4.3 การศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลายเรืองแสงในไมโครฟลูอิดิกที่มีขนาดต่างๆ 37
3.4.4 การศึกษาการตอบสนองต่อแสงของโฟโตไดโอด 38

บทที่ 4 ผลการทดลอง 39
4.1 ผลการศึกษาและเปรียบเทียบระบบวัดแสงฟลูออเรสเซนต์รูปแบบต่างๆของสารละลายสีย้อมเรืองแสง 39
4.2 ผลการศึกษาสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้เมื่อบรรจุสารละลายเรืองแสงในคิวเวทและไมโครฟลูอิดิก 40
4.2.1 สารละลาย Rhodamine 6 G 40
4.2.2 สารละลาย DCM 44
4.2.3 สารละลาย Coumarin 153 47
4.3 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลายเรืองแสงในไมโครฟลูอิดิกที่มีขนาดของแชนแนลต่างๆ กัน 51
4.3.1 ไมโครฟลูอิดิกแบบที่ 1 51
4.3.2 ไมโครฟลูอิดิกแบบที่ 2 52
4.3.3 ไมโครฟลูอิดิกแบบที่ 3 53
4.4 ผลการศึกษาการตอบสนองต่อแสงของโฟโตไดโอด 54
4.4.1 ผลการวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนต์โดยใช้ซิลิกอนโฟโตไดโอดรุ่น SPD900-9P 54
4.4.2 ผลการวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนต์โดยใช้ซิลิกอนโฟโตไดโอดของบริษัท Thorlabs รุ่น SM05PD1A 55
4.5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง 57
4.5.1 การศึกษาและเปรียบเทียบระบบวัดแสงฟลูออเรสเซนต์รูปแบบต่างๆ ของสารละลายสีย้อมเรืองแสง 57
4.5.2 การศึกษาสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้เมื่อบรรจุสารละลายเรืองแสงในคิวเวทและไมโครฟลูอิดิก 57
4.5.3 การศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารละลายเรืองแสงในไมโครฟลูอิดิกที่มีขนาดของแชนแนลต่างๆ กัน 57
4.5.4 การศึกษาการตอบสนองต่อแสงของโฟโตไดโอด 57

บทที่ 5 บทสรุปและแนวทางการพัฒนา 58
5.1 บทสรุป 58
5.2 แนวทางการพัฒนา 59

เอกสารอ้างอิง 60

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ชนิดของแหล่งกำเนิดแสงและการใช้งาน	3
ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงาน	5
ตารางที่ 3.1 สมบัติพื้นฐานของสารสีย้อมเรืองแสง Rh 6 G DCM และ Coumarin 153	25
ตารางที่ 3.2 รูปทรงและขนาดของลวดลายไมโครฟลูอิดิกที่ใช้ในการทดลอง	37
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ทฤษฎีของสาร Rhodamine 6 G DCM และ Coumarin 153 ด้วยโฟโตไดโอด รุ่น SPD900-9P บริษัท Roithner Laser	55
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ทฤษฎีของสาร Rhodamine 6 G DCM และ Coumarin 153 ด้วยโฟโตไดโอดรุ่น SM05PD1A บริษัท Thorlabs	56

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 หลักการวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนต์ 1
รูปที่ 1.2 กลไกการเกิดแสงฟลูออเรสเซนต์ 2
รูปที่ 1.3 เครื่องฟลูออโรมิเตอร์ชนิดใช้เกรตติ้ง 2
รูปที่ 1.4 เครื่องฟลูออโรมิเตอร์ชนิดใช้ฟิลเตอร์ 3
รูปที่ 1.5 ไดโอดเปล่งแสง 4
รูปที่ 2.1 แผนภาพการทำงานของเครื่องมือ 6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหลอดไฮโดรเจนและหลอดดิวเทอเรียมโดยทั่วไป 7
รูปที่ 2.3 หลอดทังสเตน 8
รูปที่ 2.4 ไดโอดเปล่งแสงแบบ Lamp Type 9
รูปที่ 2.5 ไดโอดเปล่งแสงแบบ Surface Mount Type (SMT) 9
รูปที่ 2.6 แบบจำลองพลังงานที่มี 3 สถานะ 11
รูปที่ 2.7 ปริซึมโมโนโครเมเตอร์ 12
รูปที่ 2.8 เกรตติ้งโมโนโครเมเตอร์ 13
รูปที่ 2.9 สเปกตรัมแสงจากโมโนโครเมเตอร์ 13
รูปที่ 2.10 การกระจายแสงที่เกิดที่ผิวของเกรตติ้ง 14
รูปที่ 2.11 ผลความกว้างของช่องแสงต่อสเปกตรัมของไอเบนซีน 15
รูปที่ 2.12 ฟิลเตอร์ 16
รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบแถบความกว้างสเปกตรัมของฟิลเตอร์แบบดูดกลืนและแบบแทรกสอด 17
รูปที่ 2.14 แท่นวางสารตัวอย่าง 17
รูปที่ 2.15 คิวเวทรูปทรงต่างๆ 18
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างของวัสดุและความยาวคลื่นที่แสงสามารถทะลุผ่านออกมาได้ 18
รูปที่ 2.17 การจัดชุดอุปกรณ์สำหรับวัดความเข้มข้นสารสีย้อม Rhodamine 6 20
รูปที่ 3.1 ระบบตรวจวัดแสงฟลูออเรสเซนต์ 21
รูปที่ 3.2 ลักษณะการยึดไดโอดเปล่งแสงกับอุปกรณ์ระบายความร้อน 21
รูปที่ 3.3 ฟิลเตอร์แสงชนิด long pass ของบริษัท Thorlabs 22
รูปที่ 3.4 แท่นจับยึดไมโครฟลูอิดิกแชนแนล 23
รูปที่ 3.5 โฟโตไดโอดซิลิกอนของบริษัท Roithner Laser 24
รูปที่ 3.6 โฟโตไดโอดและกราฟการตอบสนองต่อแสงกับความยาวคลื่น 24
รูปที่ 3.7 วงจรขยายสัญญาณ 24

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.8 Syringe pumpรุ่น NE-300 Just Infusion 25
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร Rhodamine 6 G 26

รูปที่ 3.10 กราฟแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสง ของสาร DCM 27
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและสเปกตรัมการเปล่งแสง ของสาร Coumarin 153 27
รูปที่ 3.12 (ก) เครื่องฉายแสงจากหลอดไฟทังสเตน (ข) สเปกตรัมแสงของหลอดไฟ ทังสเตน 28
รูปที่ 3.13 สายใยแก้วนำแสงสำหรับนำส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสง ไปยังคิวเวทและไมโครฟลูอิดิก 28
รูปที่ 3.14 (ก) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (ข) สายใยแก้วนำแสง 29
รูปที่ 3.15 (ก) คิวเวทควอทซ์ (ข) อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก 29
รูปที่ 3.16 อุปกรณ์จับยึดยึดสายใยแก้วนำแสงและใส่ที่บรรจุสารละลาย 30
รูปที่ 3.17 ระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของสารสีย้อมเรืองแสงในคิวเวท 31
รูปที่ 3.18 ระบบการวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของสารสีย้อมเรืองแสงในไมโครฟลูอิดิก 31
รูปที่ 3.19 สเปกตรัมแสงของไดโอดเปล่งแสงที่ปลดปล่อยแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด 515.77 นาโนเมตร (เส้นสีเขียว) 451.26 นาโนเมตร (เส้นสีน้ำเงิน) และ 398.63 นาโนเมตร (เส้นสีม่วง) 32
รูปที่ 3.20 ระบบการวัดสมบัติการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ของสารเรืองแสงในคิวเวท 33
รูปที่ 3.21 ระบบวัดสมบัติการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ของสารเรืองแสงในไมโครฟลูอิดิก 33
รูปที่ 3.22 ระบบการวัดสมบัติทางไฟฟ้าในไมโครฟลูอิดิก 34
รูปที่ 3.23 ระบบวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์โดยมีการจัดตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงและตำแหน่งสายใยแก้วนำแสง 3 รูปแบบ 36
รูปที่ 4.1 กราฟสเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร Rhodamine 6 G ที่มีความเข้มข้น 10^{-4} โมลาร์ โดยเปลี่ยนตำแหน่งอุปกรณ์การวัดในรูปแบบต่างๆ 39
รูปที่ 4.2 กราฟนอร์มอลไลซ์สเปกตรัมการเปล่งแสงของสาร Rhodamine 6 G ที่มีความเข้มข้น 10^{-4} โมลาร์ โดยเปลี่ยนตำแหน่งอุปกรณ์การวัดในรูปแบบต่างๆ 40

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร Rhodamine 6 G ในคิวเวท ที่มีความเข้มข้น 10^{-7}-10^{-3} โมลาร์ 40
รูปที่ 4.4 ค่าพีคการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้น10^{-7}-10^{-3} โมลาร์ของสาร Rhodamine 6 G ในคิวเวท 41
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร Rhodamine 6 G ที่มีความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ ที่วัดในคิวเวทและไมโครฟลูอิดิก 41
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ของสาร Rhodamine 6 G ในคิวเวทที่มีความเข้มข้น 10^{-7}-10^{-3} โมลาร์ 42
รูปที่ 4.7 ค่าพีคการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ที่มีความเข้มข้น 10^{-7}-10^{-3} โมลาร์ 42

ของสาร Rhodamine 6 G ในคิวเวท
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ของสาร Rhodamine 6 G ในไมโครฟลูอิดิกที่มีความเข้มข้น 10^{-7}– $5x10^{-3}$ โมลาร์ 43
รูปที่ 4.9 ค่าพีคการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ที่มีความเข้มข้น 10^{-7}– $5x10^{-3}$ โมลาร์ ของสาร Rhodamine 6 G ในไมโครฟลูอิดิก 43
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร DCM ในคิวเวทที่ความเข้มข้น 10^{-7}-10^{-3} โมลาร์ 44
รูปที่ 4.11 ค่าพีคการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้น 10^{-7}-10^{-3} โมลาร์ ของสาร DCM ในคิวเวท 44
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร DCM ที่ความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ ที่วัดในคิวเวทและไมโครฟลูอิดิก 45
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ของสาร DCM ในคิวเวทที่ความเข้มข้น 10^{-7}– 10^{-3} โมลาร์ 45
รูปที่ 4.14 ค่าพีคการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ที่ความเข้มข้น 10^{-7}-10^{-3} โมลาร์ ของสาร DCM ในคิวเวท 46
รูปที่ 4.15 สเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ของสาร DCM ในไมโครฟลูอิดิกที่ความเข้มข้น 10^{-7}– $5x10^{-3}$ โมลาร์ 46
รูปที่ 4.16 ค่าพีคการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ที่ความเข้มข้น 10^{-7}– $5x10^{-3}$ โมลาร์ ของสาร DCM ในไมโครฟลูอิดิก 47
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร Coumarin 153 ในคิวเวทที่ความเข้มข้น 10^{-7}-10^{-3} โมลาร์ 47

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.18 ค่าพีคการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้น 10^{-7}-10^{-3} โมลาร์ ของสาร Coumarin 153 ในคิวเวท 48
รูปที่ 4.19 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร Coumarin 153 ที่ความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์ ที่วัดในคิวเวทและไมโครฟลูอิดิก 48
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ของสาร Coumarin 153 ในคิวเวทที่ความเข้มข้น 10^{-7}– 10^{-3} โมลาร์ 49
รูปที่ 4.21 ค่าพีคการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ที่ความเข้มข้น 10^{-7}-10^{-3} โมลาร์ ของสาร Coumarin 153 ในคิวเวท 49
รูปที่ 4.22 สเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ของสาร Coumarin 153 ในไมโครฟลูอิดิกที่ความเข้มข้น 10^{-7}– $5x10^{-3}$ โมลาร์ 50
รูปที่ 4.23 ค่าพีคการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ที่ความเข้มข้น 10^{-7}– $5x10^{-3}$ โมลาร์ ของสาร Coumarin 153 ในไมโครฟลูอิดิก 50
รูปที่ 4.24 ไมโครฟลูอิดิกแบบที่ 1 51
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ที่วัดในไมโครฟลูอิดิกแบบที่ขนาด 250 500 และ 1000 ไมโครเมตร ใช้ฟิลเตอร์ long pass ที่มีความยาวคลื่น 52

cut on เท่ากับ 570 นาโนเมตร
รูปที่ 4.26 ไมโครฟลูอิดิกแบบที่ 2 52
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่าการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ที่วัดในไมโครฟลูอิดิกแบบที่ 2 ขนาด 250 500 และ 1000 ไมโครเมตร ใช้ฟิลเตอร์ long pass ที่มีความยาวคลื่น cut on เท่ากับ 570 นาโนเมตร 52
รูปที่ 4.28 ไมโครฟลูอิดิกแบบที่ 3 53
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่าการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ที่วัดในไมโครฟลูอิดิกแบบที่ 3 ขนาด 250 500 และ 1000 ไมโครเมตร ใช้ฟิลเตอร์ long pass ที่มีความยาวคลื่น cut on เท่ากับ 570 นาโนเมตร 53
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้จากโฟโตไดโอด รุ่น SPD900-9P ของสาร Rhodamine 6 G DCM และ Coumarin 153 ที่มีความเข้มข้น 10^{-7}- 10^{-3} M 54
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าจากทฤษฎีและการทดลองด้วยโฟโตไดโอดรุ่น SPD900-9P ของสาร Rhodamine 6 G DCM และ Coumarin 153 ที่มีความเข้มข้น 10^{-7}- 10^{-3} M 54

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้จากโฟโตไดโอด รุ่น SM05PD1A บริษัท Thorlabs ของสาร Rhodamine 6 G DCM และ Coumarin 153 ที่มีความเข้มข้น 10^{-7}- 10^{-3} โมลาร์ 55
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าจากทฤษฎีและการทดลองด้วยโฟโตไดโอด รุ่น SM05PD1A บริษัท Thorlabs ของสาร Rhodamine 6 G DCM และ Coumarin 153 ที่มีความเข้มข้น 10^{-7}- 10^{-3} โมลาร์ 56

Comment [S1]: สเปกตรัมของ 1000 um และ 500 um มันดูแหม่งๆ ชอบกล เราอธิบายได้ไหมคะทำไมมีเป็นพีคแหลมๆ อ. แนะว่าก่อนสอบ น่าจะลองเชคใหม่ถ้ามีเวลา

Comment [S2]: สเปกตรัมของ 1000 um และ 500 um มันดูแหม่งๆ ชอบกล เราอธิบายได้ไหมคะทำไมมีเป็นพีคแหลมๆ อ. แนะว่าก่อนสอบ น่าจะลองเชคใหม่ถ้ามีเวลา

Comment [S3]: สเปกตรัมของ 1000 um และ 500 um มันดูแหม่งๆ ชอบกล เราอธิบายได้ไหมคะทำไมมีเป็นพีคแหลมๆ อ. แนะว่าก่อนสอบ น่าจะลองเชคใหม่ถ้ามีเวลา