

การตรวจวัดปรอทบนกระดาษด้วยเทคนิคสเปกโตรฟลูออโรเมตรี

DETECTION OF MERCURY (II) ON PAPER
BY SPECTROFLUOROMETRY

นางสาวรุ่งนภา อิงกลาง

นางสาววราภรณ์ พุดภักดี

นางสาวตโรษา เพ็งบุบผา

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การตรวจวัดปรอทบนกระดาษด้วยเทคนิคสเปกโตรฟลูออโรเมทรี

DETECTION OF MERCURY (II) ON PAPER

BY SPECTROFLUOROMETRY

นางสาวรุ่งนภา

อิงกลาง

นางสาววราภรณ์

พุดกั๊กดี

นางสาวสโรชา

เพ็งบุบผา

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556




**DETECTION OF MERCURY (II) ON PAPER
BY SPECTROFLUOROMETRY**

MISS. ROONGNAPA	INGKLANG
MISS. WARAPORN	POONPAKDEE
MISS. SAROCHA	PENGBUBPHA

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ	การตรวจวัดปรอทบนกระดาษด้วยเทคนิคสเปกโตรฟลูออโรเมทรี		
	Detection of Mercury (II) on Paper by Spectrofluorometry		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวรุ่งนภา	อิงกลาง	53050325
	นางสาววราภรณ์	พูลภักดี	53050336
	นางสาวสโรชา	เพ็ญบุผา	53050366
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ณัฐวุฒิ เชิงชั้น		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ	
ดร.เสาวภาคย์ ชีราทรง	
ดร.ณัฐวุฒิ เชิงชั้น	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การตรวจวัดปรอทบนกระดาษด้วยเทคนิคสเปกโตรฟลูออโรเมทรี	
	Detection of Mercury (II) on Paper by Spectrofluorometry	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวรุ่งนภา	อิงกลาง
	นางสาววารภรณ์	พูลภักดี
	นางสาวสโรชา	เพ็งบุบผา
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ณัฐวุฒิ เจริงชั้น	

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการตรวจวัดปรอท (II) บนกระดาษโดยใช้เทคนิคสเปกโตรฟลูออโรเมทรี ปฏิบัติการในการตรวจวัด อาศัยปรากฏการณ์แควนซิงของไอออนของปรอท (II) ที่มีต่อการเรืองแสงของ สารอนุพันธ์ฟลูออเรสซินซึ่งใช้เป็นสารฟลูออโรฟอร์ วิธีการทดลองทำโดยหยดสารละลายฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เตรียมในเมทานอล และปรอท (II) ปริมาตรอย่างละ 40.0 และ 10.0 ไมโครลิตร ตามลำดับ ลงบนกระดาษกรอง เบอร์ 2 ยี่ห้อ Advantec™ ซึ่งตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร หลังจากหยดสารละลายทั้งสองเป็นเวลา 4 นาที นำกระดาษนี้ไปวางในที่บรรจุสารตัวอย่างในเครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ ซึ่งที่บรรจุสารตัวอย่างนี้ มีรูปร่างเป็นวงกลม ใช้สำหรับตรวจวัดตัวอย่างของแข็ง ทำการติดตามค่าความเข้มการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ โดยใช้ความยาวคลื่นในการกระตุ้น (λ_{ex}) ที่ 450 นาโนเมตร และความยาวคลื่นในการเรืองแสง (λ_{em}) ที่ 515 นาโนเมตร ผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของปรอท (II) เพิ่มขึ้น ค่าความเข้มการเรืองแสงจะลดลงอย่างเป็นเส้นตรง และมีความสอดคล้องเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Stern-Volmer โดยพบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงจนถึงความเข้มข้นของปรอท (II) เท่ากับ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความเป็นเส้นตรงที่ยอมรับได้ ($I/I_0 = 0.0007[Hg(II)] + 1.1386$, $R^2 = 0.9736$) ยังพบด้วยว่า วิธีนี้มีความเที่ยงสูง (RSD = 0.6 - 0.9 %) จึงกล่าวได้ว่า สามารถพัฒนาวิธีการตรวจวัดปรอท (II) บนกระดาษโดยใช้เทคนิคสเปกโตรฟลูออโรเมทรีได้เป็นผลสำเร็จ

คำสำคัญ: ปรอท (II), ปรากฏการณ์แควนซิง, การเรืองแสงฟลูออเรสเซน, การตรวจวัดบนกระดาษ

Special Project Title	Detection of Mercury (II) on Paper by Spectrofluorometry	
Students	Roongnapa	Ingklang
	Waraporn	Poonpakdee
	Sarocho	Pengbubpha
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Industrial Chemistry	
Academic Year	2013	
Advisor	Dr. Nathawut Choengchan	

ABSTRACT

The method for detection of mercury (II) on paper by spectrofluorometry was presented in this work. Detection reaction is based on quenching effect of mercury (II) on the fluorescence of fluorescein derivative using as fluorophore. Aliquots of 4 mg/l fluorophore in methanol (40.0 μ l) and mercury (II) (10.0 μ l) were dropped onto a 2 cm-diameter filter paper (AdvantecTM No.2). After dropping for 4 min, the paper was then put into a circle-shaped solid sample holder in a spectrofluorometer. Fluorescence intensity (FL) was monitored ($\lambda_{ex} = 450$ nm and $\lambda_{em} = 515$ nm). As the concentration of mercury (II) was increased, the FL was decreased. Linear calibration according to the Stern-Volmer's relationship in the concentration upto 2000 mg Hg (II) / l with acceptable linearity was accomplished ($I/I_0 = 0.0007[\text{Hg(II)}] + 1.1386$, $R^2 = 0.9736$). The method also gave high precision (RSD = 0.6 - 0.9 %). This indicates that the method for the mercury (II) detection on paper can be developed.

Keywords: Mercury (II), Quenching effect, Fluorescence, Detection on paper

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ
ดร.ณัฐวุฒิ เจริญชัย อาจารย์สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด อีกทั้งยังเสนอแนว
ทางการแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้โครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ และ ดร.เสาวภาคย์ ชีราทรง อาจารย์ประจำ
สาขาวิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะกรรมการการสอบที่ให้
ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบแก้ไข เพิ่มความสมบูรณ์ให้กับโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ภานุมาศ ทองอยู่ และคณะ จากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่เอื้อเพื่อนำสาร
ฟลูออโรฟอร์ มาใช้ในโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ประจำสาขาวิชาเคมี รวมทั้ง
เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือบริการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก
ในการทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่ได้ให้ความ
ช่วยเหลือทุกๆด้าน รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำโครงการพิเศษนี้

นางสาวรุ่งนภา	อิงกลาง
นางสาววรารัตน์	พูลภักดี
นางสาวสโรชา	เพ็งบุบผา

สารบัญเนื้อหา

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญเนื้อหา	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎี	3
2.1.1 แหล่งที่มาของปรอท	3
2.1.2 อันตรายจากการปนเปื้อนของปรอท	4
2.1.3 ผลกระทบของปรอท	4
2.1.4 ค่ามาตรฐานความปลอดภัยของปรอท	6
2.1.5 หลักการเซ็นเซอร์ทางเคมี (Chemical Sensor)	8
2.1.6 สมการ Stern - Volmer	14
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	19
3.1 สารเคมี	19
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	19
3.3 วิธีการทดลอง	20

สารบัญเนื้อหา (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟลูออโรฟอร์	20
3.3.2 ศึกษาสเปกตรัมการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์	20
3.3.3 ศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางสถานะต่างๆ แล้วตรวจวัดบนกระดาษ	21
3.3.3.1 ตัวกลางที่เป็นของเหลว	21
3.3.3.2 ตัวกลางที่เป็นกระดาษ	22
3.3.4 การประเมินความเที่ยงของวิธี	22
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	23
4.1 ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟลูออโรฟอร์	23
4.2 ศึกษาสเปกตรัมการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์	24
4.3 ศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางสถานะต่างๆ แล้วตรวจวัดบนกระดาษ	27
4.3.1 ตัวกลางที่เป็นของเหลว	27
4.3.2 ตัวกลางที่เป็นกระดาษ	29
4.4 การประเมินความเที่ยงของวิธี	31
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	32
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	32
5.2 ข้อเสนอแนะ	32
เอกสารอ้างอิง	33
ภาคผนวก	35
ภาคผนวก ก การเตรียมฟลูออโรฟอร์ สารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้นต่างๆ และศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัด	36

สารบัญเนื้อหา (ต่อ)

	หน้า
1. การเตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้นต่างๆ	36
2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้นต่างๆ	37
3. วิธีการทดลองการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์เมื่อ Quenching ด้วยปรอท	38
ภาคผนวก ข ค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ เมื่อ Quenching ด้วยปรอทในตัวกลางต่างๆ	39
1. ศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นของเหลวแล้วตรวจวัดบนกระดาษ	39
2. ศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นกระดาษแล้วตรวจวัดบนกระดาษ	42
ภาคผนวก ค การศึกษาตัวทำลายที่เหมาะสมของฟลูออโรฟอร์และการทดสอบความสามารถในการตรวจวัดตัวอย่างชนิดของแข็งด้วยเครื่อง Spectrofluorometer	45
1. ศึกษาตัวทำลายที่เหมาะสมของฟลูออโรฟอร์และตรวจวัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ เมื่อ Quenching ด้วยปรอท	45
1.1 ตัวทำลายที่เป็นเมทานอล	45
1.2 ตัวทำลายที่เป็นน้ำ	47
2. การทดสอบความสามารถในการตรวจวัดค่าการเรืองแสงของเครื่อง Spectrofluoro meter ด้วยสารละลายควินิน	49
2.1 เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสารตัวอย่างชนิดของเหลว	49
2.2 เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสารตัวอย่างชนิดของแข็ง	50
ภาคผนวก ง Solgel และ Hydrogel	51
1. กระบวนการโซล-เจล (Sol - gel process)	51
2. ไฮโดรเจล (Hydrogels)	55
ภาคผนวก จ เครื่อง Fluorometer และ Solid Sample Holder	58

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1.4 แสดงค่ามาตรฐานความปลอดภัยของปรอท	6
2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ปริมาณปรอท	18
4.1 ตารางแสดงข้อมูลการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟออร์ เมื่อ Quenching ด้วยปรอท	26
4.2 ตารางแสดงข้อมูลการศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นของเหลวแล้วตรวจวัดบนกระดาษ	28
4.3 ตารางแสดงข้อมูลการศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นกระดาษแล้วตรวจวัดบนกระดาษ	30
4.4 ตารางแสดงค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟออร์เมื่อทำการ Quenching ด้วยปรอท	31
ข.1 ตารางแสดงข้อมูลการศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นของเหลวแล้วตรวจวัดบนกระดาษ	41
ข.2 ตารางแสดงข้อมูลการศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นกระดาษแล้วตรวจวัดบนกระดาษ	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.1 ฟลูออโรฟอร์	36
ข.1 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นของเหลว	40
ข.2 แสดงกราฟ Stern – Volmer ของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นของเหลว	41
ข.3 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นกระดาษ	43
ข.4 แสดงกราฟ Stern – Volmer ของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท	44
ก.1 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล เมื่อ Quenching ด้วยปรอท	46
ก.2 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ ความเข้มข้น 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำ เมื่อ Quenching ด้วยปรอท	48
ก.3 กราฟแสดงค่าการเรืองแสงของควินิน ความเข้มข้น 0.25 – 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร	49
ก.4 กราฟแสดงค่าการเรืองแสงของควินิน ความเข้มข้น 0.25 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	50
ง.1 การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล	51
ง.2 กระบวนการโซลเจล	53
ง.3 ตัวอย่างเฟสไดอะแกรม 3 ภูมิภาคของเตตระเอทิลออลโทซิลิเกต น้ำ และ 95% แอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	54
ง.4 ผลของค่า pH ต่ออัตราการละลายและเวลาในการเกิดเจล	55
ง.5 โครงสร้างทางเคมีของตัวเชื่อมต่อยาโซ (1) <i>N,N'</i> -methylene-bis-acrylamide, NMBA และ (2) ethyleneglycol dimethacrylate, EGDM	56
จ.1 ภาพแสดง Solid Sample Holder	58
จ.2 ภาพแสดงส่วนประกอบของ Solid Sample Holder	58
จ.3 ภาพแสดงขนาดกระดาษกรองที่ตัดไว้สำหรับใส่ Solid Sample Holder	59
จ.4 ภาพแสดงการวาง Solid Sample Holder สำหรับการตรวจวัดการเรืองแสง	59

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แหล่งกำเนิดของปรอทจากกิจกรรมของมนุษย์และทางเข้าสู่แหล่งน้ำ	3
2.2 กระบวนการ Methylation ในแหล่งน้ำ	6
2.3 โครโมฟอร์ที่นิยมนำมาใช้เป็นหน่วยให้สัญญาณในโมเลกุลของโครโมจีนิกเซ็นเซอร์ (ก) ไนโตรเบนซีน (ข) เอโซเบนซิล (ค) แอนทราควิโนนและ (ง) สารประกอบโคออร์ดิเนชันของรูทีเนียม (II)	9
2.4 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของกรดไซยานูริก	10
2.5 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของกรดไซยานูริกและเมลามีน	10
2.6 Photoinduced Charge Transfer Processes (PCT) ก่อนการดักจับไอออนโลหะ (ซ่าย) และภายหลังการดักจับไอออนโลหะ (ขวา)	12
2.7 โครงสร้างของ Dansyl sulfonamide เซ็นเซอร์ ก่อนและหลังการดักจับไอออนสังกะสี	12
2.8 โครงสร้างของ NBD-เซ็นเซอร์ (a) การดูดกลืนแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิล (b) การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ก่อนและหลังการดักจับปรอท	13
2.9 กราฟสมการ Stern – Volmer	14
4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	23
4.2 สเปกตรัมการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	24
4.3 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท	25
4.4 แสดงกราฟ Stern–Volmer ของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท	26
4.5 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นของเหลว	27
4.6 แสดงกราฟ Stern–Volmer ของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นของเหลว	28
4.7 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นกระดาษ	29
4.8 แสดงกราฟ Stern–Volmer ของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นกระดาษ	30

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมเจริญก้าวหน้า ควบคู่กับการเพิ่มจำนวนประชากรอย่างรวดเร็ว เนื่องจากต้องผลิตสิ่งจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิต จะพบว่าในความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีนี้แฝงไปด้วยอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมมากมาย โดยเฉพาะปรอท (Mercury) ที่เป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูง ซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องวัดอุณหภูมิและความดัน การผลิตเยื่อกระดาษ พลาสติก เมทัลลิกซ์ อุปกรณ์ไฟฟ้า สารฆ่าแมลง เป็นต้น จึงทำให้มีการปลดปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อมมากด้วยเช่นกัน ส่งผลให้ปรอทอาจปนเปื้อนออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ในอากาศ ดิน และแหล่งน้ำ ซึ่งหากแหล่งน้ำมีการปนเปื้อนของปรอท สัตว์น้ำที่อยู่ในบริเวณแหล่งน้ำนั้นก็จะมีปรอทตามไปด้วย ทำให้เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ส่งผลเสียต่อสุขภาพมนุษย์และระบบนิเวศ แม้จะมีการปนเปื้อนในปริมาณที่ต่ำมากก็ตาม ดังนั้น การตรวจวัดปริมาณปรอทในแหล่งน้ำ จึงมีความสำคัญต่อการเฝ้าระวังมลพิษทางน้ำ

ปัจจุบันวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณปรอท (II) ในแหล่งน้ำมีหลายวิธี แต่ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญในการใช้งาน การเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์มีความยุ่งยาก ทำให้มีต้นทุนการวิเคราะห์สูง อีกทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดใหญ่ ไม่สามารถพกพาไปใช้นอกห้องปฏิบัติการได้ จึงไม่สามารถนำไปตรวจวัด ณ บริเวณแหล่งน้ำที่ต้องการตรวจวัดตัวอย่างน้ำได้

เพื่อเป็นการพัฒนาวิธีการตรวจวัดปริมาณการปนเปื้อนของปรอท (II) ในแหล่งน้ำ ให้มีความง่ายต่อการวิเคราะห์ ช่วยลดขั้นตอนที่ยุ่งยาก ทำให้ได้ผลรวดเร็ว ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาพัฒนาและออกแบบวิธีวิเคราะห์อย่างง่ายขึ้นมาใหม่ โดยการหยดสารละลายสี่อิมอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นเอง และหยดสารละลายตัวอย่างลงบนกระดาษกรองแล้วทำการตรวจวัดการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ลดลงด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบการตรวจวัดปรอทบนกระดาษด้วยเทคนิคสเปกโตรฟลูออโรเมทรี โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างปรอทและสี่อ้อมอินทรีย์

1.2.2 เพื่อนำวิธีที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณการปนเปื้อนของปรอท (II) ในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ ศึกษาหลักการพัฒนาและออกแบบการตรวจวัดปรอทบนกระดาษด้วยเทคนิคสเปกโตรฟลูออโรเมทรี โดยจะติดตามการเปลี่ยนสีของสี่อ้อมอินทรีย์เมื่อสี่อ้อมทำปฏิกิริยากับปรอท โดยเริ่มสืบค้นและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ปรอท จากนั้นศึกษารูปแบบและสถานะที่เหมาะสมในการตรวจวัด แล้วจึงศึกษาช่วงการใช้งานรวมถึงคุณลักษณะอื่นๆ และทำการทดสอบความสามารถ ประสิทธิภาพพร้อมทั้งประเมินความแม่นยำในการตรวจวัดปรอท และท้ายที่สุดก็จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปวิเคราะห์กับตัวอย่างแหล่งน้ำต่อไป

ขั้นตอนการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

1.3.1 สืบค้นข้อมูลต่างๆ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 ศึกษาหลักการตรวจวัดปรอท โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างปรอทและสี่อ้อมอินทรีย์

1.3.3 ศึกษาช่วงการใช้งานรวมถึงคุณลักษณะอื่นๆ

1.3.4 ศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพพร้อมทั้งประเมินความแม่นยำในการตรวจวัดปรอท

1.3.5 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปวิเคราะห์กับตัวอย่างแหล่งน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้การตรวจวัดปรอทบนกระดาษด้วยเทคนิคสเปกโตรฟลูออโรเมทรี

1.4.2 สามารถประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นกับการตรวจวัดปริมาณปรอทปนเปื้อนในแหล่งน้ำ

บทที่ 2

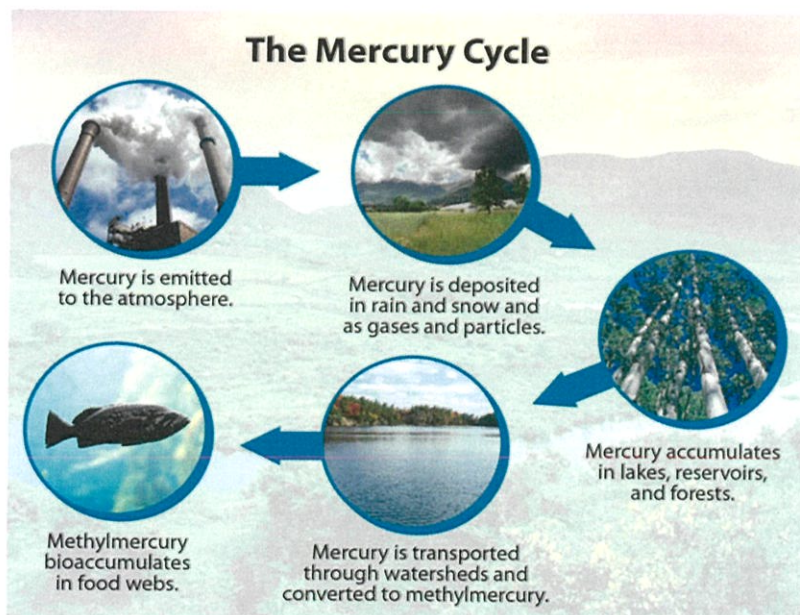
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ทฤษฎี

2.1.1 แหล่งที่มาของปรอท [1]

ปรอท (Mercury, Hg) เป็นธาตุโลหะหนักชนิดหนึ่งที่พบอยู่ตามธรรมชาติในรูปของแร่อิสระหรือในรูปของปรอทซัลไฟด์ (HgS) ปรอทสามารถจำแนกได้เป็น ปรอทในรูปโลหะ (Metallic mercury) ปรอทในรูปสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic mercury) และปรอทในรูปสารประกอบอินทรีย์ (Organic mercury) มีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องมีสีคล้ายเงิน

แม้ว่าปรอทจะถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางแต่ถือว่าปรอทเป็นภัยคุกคามร้ายแรงต่อสิ่งแวดล้อมทั้งมนุษย์และสัตว์ต่างๆ เนื่องจากเป็นสารพิษที่ตกค้างยาวนานในสิ่งแวดล้อม ปรอทสามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ทั้งกระบวนการทางธรรมชาติ ได้แก่ การสีกกร่อนของหินต้นกำเนิดที่มีสารปรอทปะปนอยู่ การระเบิดของภูเขาไฟ เป็นต้น และจากกิจกรรมของมนุษย์ซึ่งถือเป็นแหล่งกำเนิดหลักของปรอท ได้แก่ น้ำเสีย ของเสียอันตราย มลพิษทางอากาศจากโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เตาเผาขยะ และอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมการผลิตหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 แหล่งกำเนิดของปรอทจากกิจกรรมของมนุษย์และทางเข้าสู่แหล่งน้ำ

2.1.2 อันตรายจากการปนเปื้อนของปรอท [2]

การปนเปื้อน (Contamination) ของสารปรอทไปยังอาหารมักเกิดจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมไปยังแหล่งน้ำซึ่งเป็นแหล่งของสัตว์น้ำ เช่น ปลา หอย ปลาหมึก ซึ่งปรอทจะสะสมในอาหารดังกล่าว การรับประทานอาหารปนเปื้อนสารปรอทนั้นผู้บริโภคจะไม่รู้ตัวและไม่มีอาการ จนกระทั่งมีการสะสมปรอทถึงระดับหนึ่งในร่างกายจนเป็นก้อนใหญ่จับตัวกับเนื้อเยื่อในระบบประสาท ดับและไตที่มีหน้าที่ขับของเสีย ไม่สามารถขับสารปรอทออกจากร่างกาย ซึ่งการสะสมของสารปรอทในร่างกายจะมีอันตรายต่อสมองและอวัยวะต่างๆ และส่งผลกระทบต่อระบบประสาท ทำให้สมองฝ่อ แขนขาอ่อนแรง คล้ายคนพิการ การปนเปื้อนของสารปรอทจะมีความคงตัวสูงไม่ว่าจะนำอาหารไปปรุงรสหรือผ่านความร้อนก็ไม่สามารถทำให้สารปรอทหายไป

โรคมินามาตะ (Minamata) เป็นโรคที่เกิดจากพิษสารปรอทที่สะสมในร่างกาย ทำอันตรายต่อระบบประสาทและกล้ามเนื้อ ถ้าสะสมไว้ในปริมาณมากก็จะทำให้ตายได้ พบครั้งแรกที่เมืองมินามาตะ ประเทศญี่ปุ่น เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำเสียที่มีสารปรอทเจือปนลงในอ่าวมินามาตะ สารปรอทจึงเข้าไปสะสมอยู่ในปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ ประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้นนำปลาและสัตว์ทะเลมารับประทาน ทำให้มีอาการปวดท้อง ท้องร่วง ระบบกล้ามเนื้อถูกทำลาย ประสาทตาและหูเสื่อม โดยตรวจพบผู้ป่วยด้วยโรคนี้นายแรกเมื่อปี 2499 และมีผู้เสียชีวิตจากโรคมินามาตะแล้วกว่า 2,000 คน

2.1.3 ผลกระทบของปรอท [1]

1.) ผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน

สารปรอทสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ

1. ทางปากโดยการรับประทานจากอาหารและน้ำดื่มที่มีการปนของสารปรอท
2. ทางการหายใจ โดยสูดเอาผงหรือในรูปไอระเหยของปรอทซึ่งเป็นอันตรายถึงชีวิตมากที่สุด
3. ทางผิวหนัง โดยการดูดซึมไอระเหยหรือฝุ่นละอองของปรอททำให้ผิวหนังเกิดการระคายเคืองก่อให้เกิดอาการภูมิแพ้ หรือโรคผิวหนังได้

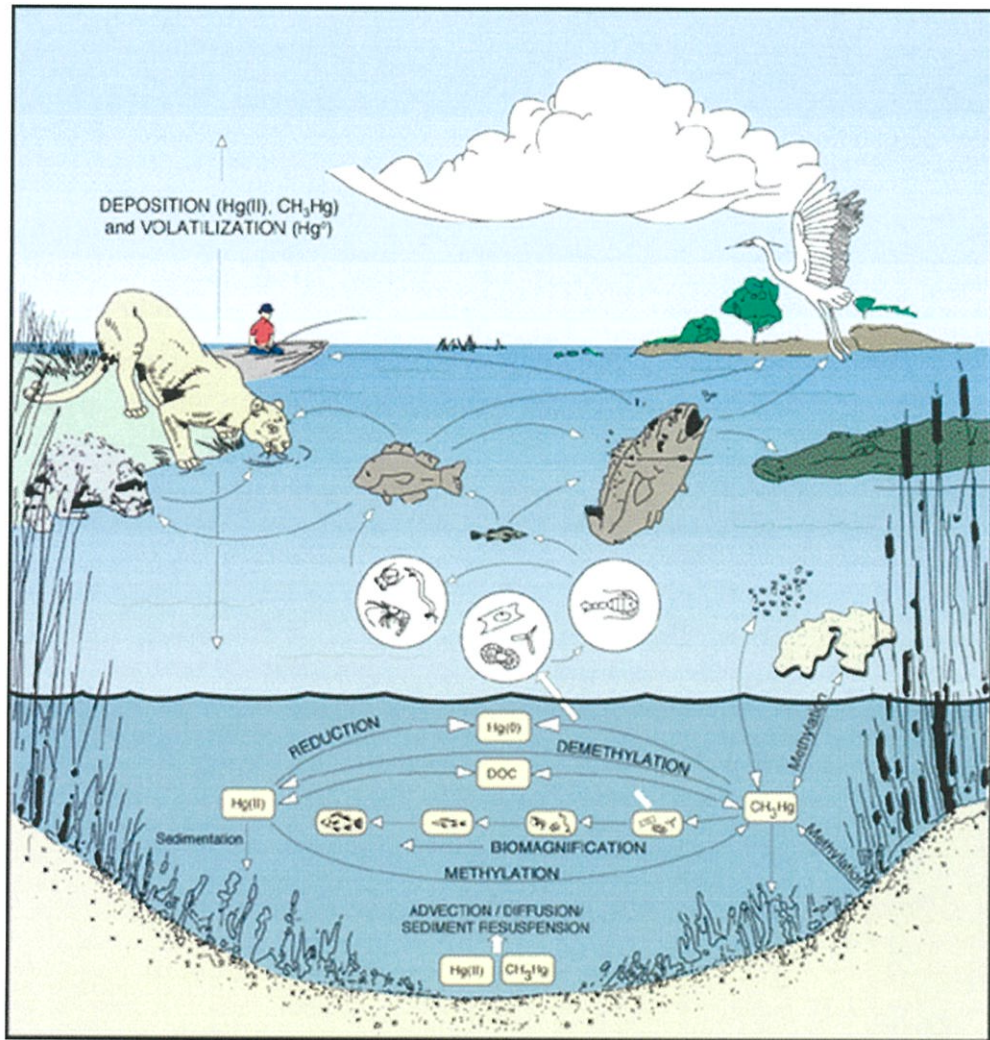
จากการศึกษาพบว่ากว่าร้อยละ 90 ของสารปรอทที่สะสมในร่างกายมนุษย์ คือ ปรอทอินทรีย์หรือเมทิลเมอร์คิวรี (Methylmercury ; CH_3Hg) ซึ่งเป็นรูปที่เป็นพิษมากที่สุด ร่างกายมนุษย์สามารถดูดซึมเมทิลเมอร์คิวรีได้ถึงร้อยละ 95 – 98 โดยส่วนใหญ่มาจากการบริโภคอาหารแม้ว่าจะนำอาหารนั้นไปผ่านความร้อนก็ไม่สามารถทำให้สารปรอทหายไปหรือลดปริมาณลงได้ สารปรอทถูกขับออกจากร่างกายได้น้อยมากสามารถยึดติดกับเซลล์เม็ดเลือดแดงทำให้แพร่กระจายไปได้ทุกส่วนของร่างกาย โดยสามารถสะสมในสมองได้มากถึงร้อยละ 15

การเกิดพิษของสารปรอทมีทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง การเกิดพิษแบบเฉียบพลันมักเกิดจากการกลืนสารปรอทจากอุบัติเหตุ ซึ่งหากได้รับในปริมาณเฉลี่ย 0.02 กรัมก็อาจทำให้เสียชีวิตได้ การเกิดพิษแบบเรื้อรังเกิดจากการสะสมของสารปรอทในร่างกายเป็นจำนวนมาก ซึ่งสารปรอทจะจับตัวกับเนื้อเยื่อในระบบประสาท สมอง ในส่วนของการควบคุมการมองเห็นและความรู้สึก ตับ และไตที่มีหน้าที่ขับของเสียออกจากร่างกาย ทำให้สมองฝ่อ แขนขาอ่อนแรง เสียการควบคุมเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวของร่างกาย เกิดเป็นโรค “มินามาตะ” (Minamata) ซึ่งเป็นโรคที่เกิดพิษของสารปรอทที่สะสมในร่างกายซึ่งไม่สามารถรักษาให้หายเป็นปกติและอาจถึงแก่ชีวิตได้

2.) ผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำ

แหล่งน้ำจืดทั่วไปมีสารปรอทเจือปนอยู่ตามธรรมชาติประมาณ 10 - 50 นาโนกรัม ดังนั้นการปนเปื้อนของสารปรอทลงสู่แหล่งน้ำหรือระบบนิเวศมักเกิดจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารปรอทเป็นสิ่งมีชีวิตในน้ำโดยเฉพาะปลาสามารถรับสารปรอทได้ผ่านทางช่องเหงือกโดยตรง หรือผ่านอาหารที่กินเข้าไปและจากตะกอนท้องน้ำ ซึ่งปลาที่มีขนาดใหญ่จะมีการสะสมของสารปรอทเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าปรอทที่ความเข้มข้น 0.008 - 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำขนาดเล็กตายได้ และที่ความเข้มข้นประมาณ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตรมีผลทำให้ขบวนการสังเคราะห์แสงของพืชหยุดลง นอกจากนี้การที่มีสารปรอทในน้ำในระดับที่สูงพอมีผลในการลดอัตราการฟักตัว อีกทั้งลดการเจริญเติบโตและพัฒนาการของตัวอ่อนของปลา นกน้ำ และนกทะเล ซึ่งมีผลกระทบอย่างรุนแรงต่อประชากรและระบบนิเวศทางน้ำได้

เมื่อสารปรอทที่สะสมอยู่ในตะกอนท้องน้ำหรือปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำสามารถเกิดกระบวนการที่เรียกว่า “เมทิลเลชัน” (Methylation) (รูปที่ 2.2) โดยแบคทีเรียพวกใช้ซัลเฟอร์ (Sulfur-reducing bacteria) ในแหล่งน้ำเปลี่ยนรูปจากปรอทอนินทรีย์ไปเป็นเมทิลเมอร์คิวรี ซึ่งมีความเป็นพิษร้ายแรง สามารถสะสมและมีความคงทนในเนื้อเยื่อของสัตว์น้ำ รวมไปถึงสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตที่สูงขึ้นในห่วงโซ่อาหาร (Biomagnifications) ทำให้ปริมาณปรอทในสิ่งมีชีวิตมีค่าสูงกว่าในน้ำหรือในตะกอนเป็นพันๆ เท่า ซึ่งเมื่อมนุษย์รับประทานปลาหรือสัตว์น้ำเข้าไปก็จะค่อยๆ สะสมและทำให้เกิดความเป็นพิษดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 2.2 กระบวนการ Methylation ในแหล่งน้ำ [3]

2.1.4 ค่ามาตรฐานความปลอดภัยของปรอท [1]

ประเภท	ค่ามาตรฐาน/ค่าที่ยอมรับให้มีได้สูงสุด	ที่มา
น้ำ		
น้ำผิวดิน	ปรอททั้งหมดไม่เกิน 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 8 พ.ศ. 2537

ประเภท	ค่ามาตรฐาน/ค่าที่ยอมรับให้มีได้สูงสุด	ที่มา
น้ำ		
น้ำทะเล	ปรอททั้งหมดไม่เกิน 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 27 พ.ศ. 2549
น้ำใต้ดิน	ต้องไม่เกิน 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 20 พ.ศ. 2543
น้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	ต้องไม่มีเลย/สูงสุด 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2551
น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ยกเว้น โรงงานถลุงสังกะสี ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2539
น้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่มีฝาปิด	สูงสุด 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61 พ.ศ.2524
ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค (น้ำประปา)	ไม่เกิน 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 พ.ศ. 2521
อาหาร		
อาหารทั่วไป	ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 98 พ.ศ.2529
อาหารทะเล	ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	
อากาศและสภาพแวดล้อมในการทำงาน		
ความปลอดภัยในการทำงาน	ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ประกาศกระทรวงมหาดไทย ฉบับที่ 103 พ.ศ.2520
อากาศที่ระบายจากโรงงาน	ไม่เกิน 3 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ออกตาม พรบ. โรงงานฉบับที่ 2 พ.ศ. 2536

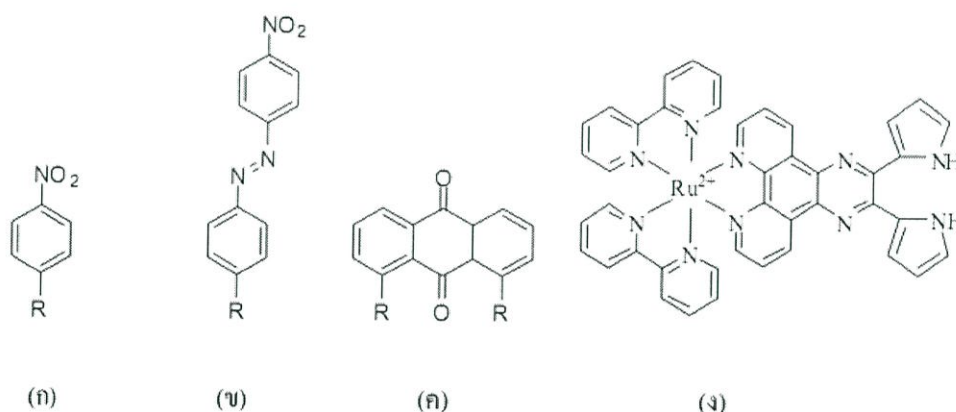
2.1.5 หลักการเซ็นเซอร์ทางเคมี (Chemical Sensor) [4]

เคมีซูปราโมเลกุลเป็นการศึกษาอันตรกิริยาแบบนอนโควาเลนต์ระหว่างโมเลกุลของโฮสต์และเกสต์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำความรู้ทางเคมีซูปราโมเลกุลมาพัฒนาเป็น โมเลกุลที่ใช้เป็นตัวเลือกจับทางเคมี (Chemical receptor) และเซ็นเซอร์ทางเคมี (Chemical sensor) ซึ่งโมเลกุลทั้งสองดังกล่าวนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น การพัฒนายารักษาโรค การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาและการพัฒนาเซ็นเซอร์ทางเคมี เป็นต้น ซึ่งการสร้างเซ็นเซอร์เชิงแสงและเซ็นเซอร์เชิงเคมีไฟฟ้า ที่ให้ความจำเพาะเจาะจงกับการตรวจวัดสารเป้าหมายต่าง ๆ นั้น สามารถนำมาศึกษาประยุกต์ใช้กับสารที่มีประโยชน์และสารพิษในงานวิจัยหลายแขนง ไม่ว่าจะเป็นงานด้านสุขภาพ อาหาร การแพทย์ และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์เคมี เป็นเทคนิคการตรวจวิเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยาก รวดเร็ว และมีราคาถูก แต่มีความแม่นยำ โดยเซ็นเซอร์ทางเคมีประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับ (Receptor) เพื่อใช้ในการเลือกจับกับโมเลกุลของเกสต์ที่เราสนใจ และอีกส่วนคือส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้สัญญาณ (Sensory unit) ซึ่งมีสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันออกไป เช่น ให้สัญญาณทางเคมีไฟฟ้า หรือให้สีที่แตกต่างกัน เมื่อโมเลกุลของเกสต์มาจับกับโมเลกุลของโฮสต์ เกิดอันตรกิริยาที่ตำแหน่งของตัวรับ ก็จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในส่วนที่เป็นตัวให้สัญญาณ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณดังกล่าวสามารถ ตรวจสอบได้โดยใช้เทคนิคทางเคมีวิเคราะห์ เช่น เคมีไฟฟ้า และสเปกโตรโฟเมตรี เป็นต้น

ในการสังเคราะห์โมเลกุลเซนเซอร์นั้นทำได้โดยการนำเอาโมเลกุลของตัวรับมาเชื่อมต่อกับหน่วยให้สัญญาณโดยตรง โดยอาศัยพันธะโควาเลนต์หรืออาจจะนำมาเชื่อมต่อโดยอาศัยอันตรกิริยาที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์ เช่น การเกิดอันตรกิริยาแบบไดโพลของโมเลกุลอินดิเคเตอร์กับโมเลกุลโฮสต์ สีของสารละลายที่เกิดขึ้นจะเป็นสีของสารประกอบของโฮสต์กับอินดิเคเตอร์ และเมื่อมีเกสต์โมเลกุลที่สามารถแทนที่โมเลกุลของอินดิเคเตอร์ได้ โมเลกุลของเกสต์ดังกล่าวจะเข้าไปจับกับโฮสต์ และโมเลกุลของอินดิเคเตอร์จะถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปของอินดิเคเตอร์อิสระ ซึ่งจะเป็นการทำให้สีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีของอินดิเคเตอร์อิสระและเรียกกลไกในการเปลี่ยนแปลงนี้ว่าการแทนที่ของเกสต์โมเลกุล (Displacement of guest molecule) (Wiskur et al., 2001) ทำการแบ่งชนิดของเซ็นเซอร์ทางเคมีได้เป็น 3 ชนิด ตามชนิดของหน่วยที่ให้สัญญาณ คือ โครโมจีนิกเซ็นเซอร์ (Chromogenic sensor) ฟลูออโรจีนิกเซ็นเซอร์ (Fluorogenic sensor) และเซ็นเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical sensor)

โครโมจีนิกเซ็นเซอร์ (Chromogenic Sensor) [5]

โครโมจีนิกเซ็นเซอร์ คือ โมเลกุลเซ็นเซอร์ที่มีโครโมฟอร์เป็นหน่วยให้สัญญาณ ดังนั้น จึงสามารถติดตามอันตรกิริยาระหว่างเซ็นเซอร์และเกสต์โมเลกุลได้จากการเปลี่ยนแปลงสีของโฮสต์ ข้อดีของเซ็นเซอร์ชนิดนี้ คือสามารถตรวจวัดได้ด้วยตาเปล่า (ซึ่งสามารถเรียกเซ็นเซอร์ชนิดนี้ว่า Naked-eye sensor) ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือตรวจวัดที่มีราคาแพง สำหรับโครโมฟอร์ที่นิยมมาใช้สำหรับนำมาเตรียมเป็นโครโมจีนิกเซ็นเซอร์ได้แก่ สารประกอบไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene) และ โมเลกุลของสีย้อมบางชนิด เช่น เอโซเบนซีน (Azobenzene) และแอนทราควิโนน (Anthraquinone) นอกจากการนำเอาสารประกอบอินทรีย์มาใช้เป็นโครโมฟอร์แล้วยังมีการนำเอาสารประกอบโคออร์ดิเนชันมาใช้เป็นโครโมฟอร์ด้วยเช่นกัน เช่น สารประกอบโคออร์ดิเนชันของรูทีเนียม (II) แสดงได้ดังรูปที่ 2.3

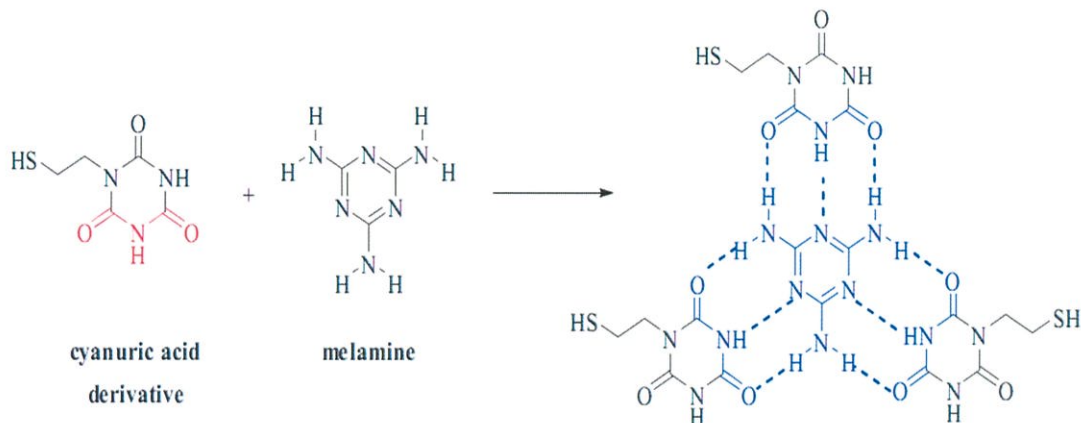


รูปที่ 2.3 โครโมฟอร์ที่นิยมนำมาใช้เป็นหน่วยให้สัญญาณใน โมเลกุลของโครโมจีนิกเซ็นเซอร์

(ก) ไนโตรเบนซีน (ข) เอโซเบนซีน (ค) แอนทราควิโนนและ (ง) สารประกอบโคออร์ดิเนชันของรูทีเนียม (II)

โครโมจีนิกเซ็นเซอร์อีกชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจในขณะนี้ คือ อนุภาคนาโนของทองคำ (Gold nanoparticle) เนื่องจากพบว่า สีของสารละลายแขวนลอยของอนุภาคนาโนของทองคำจะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับค่า refractive index กลุ่มวิจัยของ Ai และคณะ ได้พัฒนาโครโมจีนิกเซ็นเซอร์ที่ยึดติดอยู่บนอนุภาคนาโนของทองคำเพื่อใช้ในการตรวจสอบสารเมลามีนซึ่งเป็นสารปนเปื้อนนมผงเด็กในประเทศจีน โดยอาศัยความรู้พื้นฐานที่ว่าเมลามีนสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับกรดไซยานูริก (Cyanuric acid) ได้เป็นอย่างดี โดยมีอัตราส่วนของเมลามีน:กรดไซยานูริก คือ 1:3 ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จากความรู้ดังกล่าว จึงได้เตรียมอนุภาคนาโนของทองคำที่มี

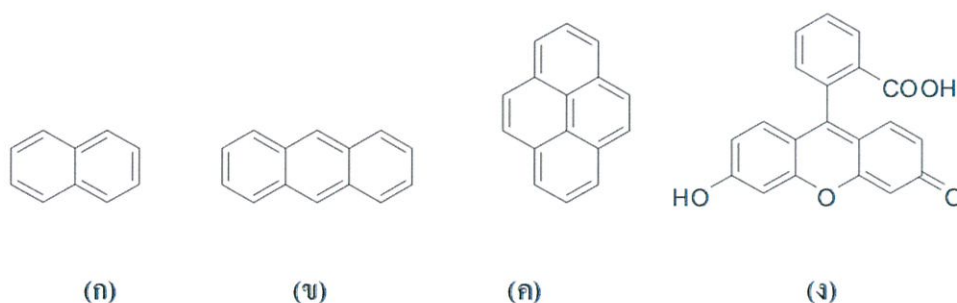
กรดไซยานูริกอยู่บนพื้นผิวขึ้นมาและพบว่า เมื่ออนุภาคดังกล่าวแขวนลอยอยู่ในสารละลายจะได้สารละลายที่มีสีแดง แต่ในสภาวะที่มีเมลามีนอยู่ด้วยสีของสารละลายแขวนลอยจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน โดยที่การเปลี่ยนแปลงสีดังกล่าว เกิดจากการที่เมลามีนเกิดพันธะไฮโดรเจนกับอนุภาคนาโนของทองคำ แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกัน (Aggregate) ของอนุภาคนาโนดังกล่าว



รูปที่ 2.4 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของกรดไซยานูริก

ฟลูออโรจีนิกเซ็นเซอร์ (Fluorogenic Sensor)

ฟลูออโรจีนิกเซ็นเซอร์ คือ โมเลกุลเซ็นเซอร์ที่มีโมเลกุลที่สามารถให้สัญญาณฟลูออเรสเซนส์ (หมู่ฟลูออโรฟอร์) เป็นหน่วยให้สัญญาณ ตัวอย่างของหมู่ฟลูออโรฟอร์ที่นิยมใช้ แสดงรูปที่ 2.5 ซึ่งเราสามารถติดตามอันตรกิริยาระหว่างเซ็นเซอร์และเกสต์โมเลกุลได้จากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณฟลูออเรสเซนส์ที่เกิดขึ้น ข้อดีของเซ็นเซอร์ชนิดนี้ คือ มีขีดจำกัดของการตรวจวัดที่ระดับความเข้มข้นต่ำ

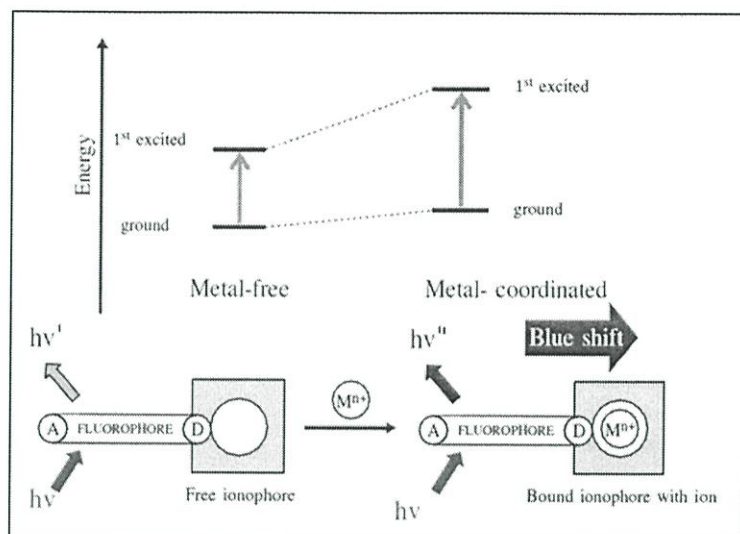


รูปที่ 2.5 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของกรดไซยานูริกและเมลามีน

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนานำเอาฟลูออโรจินิกเซ็นเซอร์มาใช้งานทางด้านทางการแพทย์ เช่น ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณของไอออนของสังกะสี ไอออนโลหะเข้ามา มีบทบาทและหน้าที่สำคัญในระบบชีวภาพและในสิ่งแวดล้อม เช่น แคลเซียม โซเดียม และ สังกะสี ในขณะที่บางชนิดมีความเป็นพิษร้ายแรง เช่น ปรอท แคดเมียม และ ตะกั่ว การนำเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สเปคโทรสโกปีมาใช้ในการตรวจวิเคราะห์ไอออนโลหะเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์นั้นจะทำให้สามารถตรวจสอบไอออนโลหะได้รวดเร็ว และไม่ทำลายสารตัวอย่าง การออกแบบและสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ชนิดใหม่หลายชนิด เพื่อใช้เป็นฟลูออเรสเซนซ์เซ็นเซอร์ เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้สามารถนำมาใช้ตรวจวัดไอออนโลหะได้อย่างมีความจำเพาะเจาะจงและมีสภาพไวในการตรวจวัดสูง การออกแบบเซ็นเซอร์จะคำนึงถึงการเกิดอันตรกิริยาของอะตอมในโมเลกุลเซ็นเซอร์ที่เหมาะสมกับชนิดไอออน ฟลูออเรสเซนซ์เซ็นเซอร์ได้ถูกออกแบบให้ทำงานผ่านกลไกการถ่ายเทอิเล็กตรอน หรือ การถ่ายเทประจุ ดังเช่น กระบวนการ Photoinduced Charge Transfer (PCT)

PCT-เซ็นเซอร์

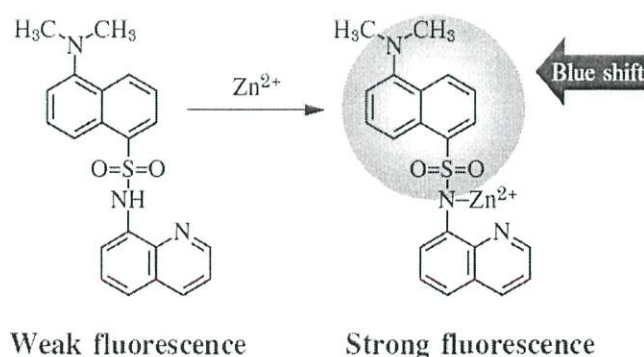
ใน PCT-เซ็นเซอร์นั้น ฟลูออโรฟออร์ของระบบเซ็นเซอร์จะประกอบไปด้วยส่วนที่ให้อิเล็กตรอน (Electron donating group) เช่น หมู่เอมีน ($-NH_2$) และส่วนที่ดึงอิเล็กตรอน (Electron withdrawing group) เช่น หมู่ไนโตร ($-NO_2$) หรือหมู่ Sulfonyl ซึ่งจะทำให้เกิด Internal Charge Transfer (ICT) จากหมู่ให้อิเล็กตรอนไปสู่หมู่ดึงอิเล็กตรอนภายในฟลูออโรฟออร์ได้ เมื่อระบบเซ็นเซอร์เกิดอันตรกิริยากับไอออนจะทำให้สภาวะแวดล้อมเชิงจุลภาค (Microenvironment) ของฟลูออโรฟออร์เปลี่ยนแปลงไป โดยจะทำให้ความเข้มของการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์เปลี่ยนแปลงไปเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไอออนโลหะที่ถูกเซ็นเซอร์ดักจับ และนอกจากนั้นจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของ Spectroscopic band อีกด้วย กลไกและทักษะการทำงานดังกล่าวนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 Photoinduced Charge Transfer Processes (PCT) ก่อนการดักจับไอออนโลหะ (ซ้าย) และภายหลังการดักจับไอออนโลหะ (ขวา) [5]

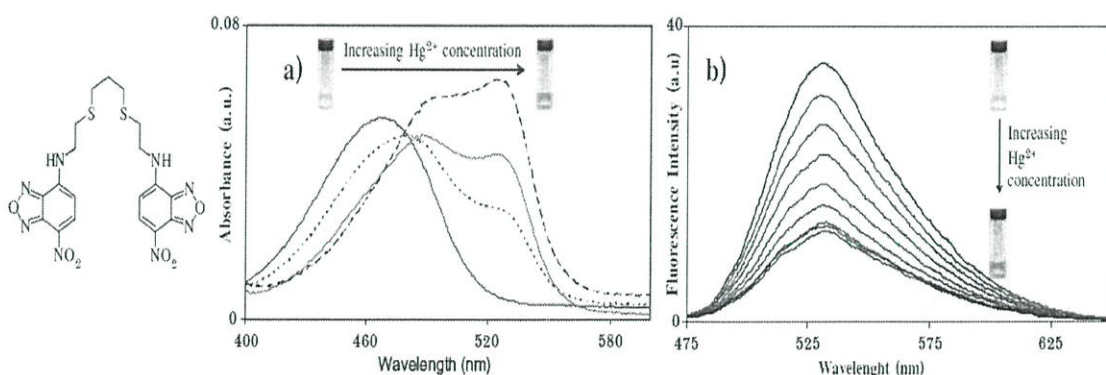
PCT-เซ็นเซอร์ชนิดนี้แสดงให้เห็นว่าภายหลังการดักจับไอออนสังกะสีแล้วจะทำให้สภาวะแวดล้อมเชิงจุลภาคของฟลูออโรฟอร์ชนิด Dansyl เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากหมู่ให้อิเล็กตรอนถูกใช้ในการเกิดอันตรกิริยากับไอออนสังกะสีจึงทำให้เซ็นเซอร์แสดงสมบัติการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ออกมาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของไอออนสังกะสีและสามารถตรวจวัดไอออนสังกะสีเชิงปริมาณวิเคราะห์ได้ นอกจากนั้นในการเกิดอันตรกิริยากับไอออนสังกะสีจะทำให้เซ็นเซอร์มีการดูดกลืนความยาวคลื่นในช่วงความยาวคลื่นที่สั้นลง (Blue shift)

Dansyl sulfonamide



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Dansyl sulfonamide เซ็นเซอร์ ก่อนและหลังการดักจับไอออนสังกะสี [5]

เนื่องจากกลไกการทำงานของ PCT-เซ็นเซอร์ นั้นเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนของเซ็นเซอร์ จึงมีประโยชน์มากถ้าการดักจับไอออนของเซ็นเซอร์ทำให้สารเปลี่ยนสีได้ ดังเช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มากเพียงพอในช่วงความยาวคลื่นในช่วงวิสิเบิล (Visible region) ซึ่งการที่สารเปลี่ยนสีได้ภายหลังการดักจับไอออนในปริมาณต่างๆ จะทำให้สามารถทำการตรวจวัดไอออนเชิงปริมาณวิเคราะห์ได้ทั้งโดยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโกปี เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปี และสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งคุณลักษณะเช่นนี้จะทำให้สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ประโยชน์เป็นชุดตรวจสอบไอออน (strip test) หรือใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดไอออนในภาคสนามได้ด้วยอย่างของ PCT-เซ็นเซอร์ได้ถูกรายงานไว้ ดังเช่นงานวิจัยของ Wanichacheva และคณะ เซ็นเซอร์ดังกล่าวประกอบด้วย 2-(3-(2-aminoethylthio) propylthio) ethanamine ที่นำมาต่อเชื่อมกับฟลูออโรฟอร์ 7-nitrobenzo-2-oxa-1,3-diazolyl (NBD) เพื่อใช้ตรวจวัดไอออนปรอท จากผลการทดลองพบว่าภายหลังเซ็นเซอร์ดักจับไอออนปรอทจะทำให้สภาวะแวดล้อมของฟลูออโรฟอร์ NBD เปลี่ยนแปลงไป และทำให้เซ็นเซอร์แสดงสมบัติการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ลดลงเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณของไอออนปรอทที่เพิ่มขึ้น และทำให้ความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนเปลี่ยนแปลงไป 70 นาโนเมตร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้สารละลายของเซ็นเซอร์เปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีชมพู



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ NBD-เซ็นเซอร์ (a) การดูดกลืนแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิล (b) การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ก่อนและหลังการดักจับปรอท [5]

2.1.6 สมการ Stern – Volmer [6]

Stern – Volmer equation เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Fluorescence intensity กับความเข้มข้นของ Quencher ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{I_f^0}{I_f} = 1 + k_q \tau_0 \cdot [Q]$$

เมื่อ I_f^0 คือ Fluorescence intensity เมื่อไม่มี Quencher

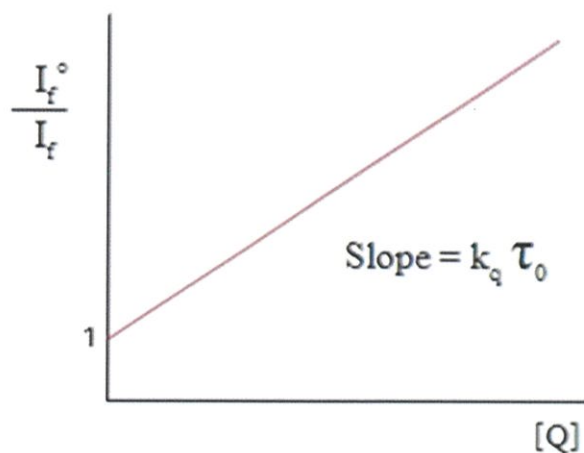
I_f คือ Fluorescence intensity เมื่อมี Quencher

k_q คือ The quencher rate coefficient

τ_0 คือ Fluorescence lifetime ของสาร เมื่อไม่มี Quencher

[Q] คือ ความเข้มข้นของ Quencher

Stern – Volmer เป็นสมการเส้นตรง



รูปที่ 2.9 กราฟสมการ Stern – Volmer [6]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hideyuki Matsunaga และคณะ [7] ได้พัฒนาระบบการตรวจจับสีของไอออนโลหะที่เป็นพิษ ด้วยการสังเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงของโมเลกุล Chromo-ionophore ที่เคลือบอยู่บนแผ่น PVC ด้วยตาเปล่า ซึ่งจะเป็นการแสดงถึงความเป็นไปได้ในการสร้าง Colorimetric Sensor อย่างง่ายที่มีขนาดเล็ก สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีได้ด้วยตาเปล่า โดยการใช้การรวมตัวกันของโมเลกุล Chromo-ionophore ซึ่งยึดติดอยู่บนผิวหน้าของพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) โดยตัว Ion-sensing probe (4-n-dodecyl-6-(2-thiazolylazo)-resorcinol) จะมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อใช้กับแผ่น PVC ในการพัฒนาชุดของการเปลี่ยนแปลงของสี ขณะที่เป้าหมายเป็น Cd^{2+} , Pb^{2+} และ Hg^{2+} ในระดับน้อยๆ ลักษณะของพื้นผิวและโมเลกุลที่ประกอบกันของส่วนที่เป็นของแข็งของ Sensor ที่สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่านั้น จะแสดงลักษณะพิเศษโดยใช้ X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Atomic Force Microscopy (AFM) การเปลี่ยนแปลงความเข้มที่สังเกตได้ด้วยตาของ Sensor และเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อ Analyte ได้รับการติดตามโดย Absorption Spectroscopy

อมรา อภิลักษณ์ และคณะ [8] ได้พัฒนาการตรวจวัดปริมาณปรอทอย่างง่าย โดยใช้กระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายซิลเวอร์นาโน 2 ไมโครลิตร เมื่อทดสอบด้วยปรอทจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า และวิธีนี้สามารถที่จะตรวจสอบได้เฉพาะไอออนของ Hg(II) เมื่อเทียบกับไอออนของโลหะอื่นๆ นอกจากนี้ผลที่ได้ยังแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในการวิเคราะห์สัญญาณ Hg(II) เมื่อ Cu(II) ถูกเติมลงในแผ่นซิลเวอร์นาโนตรงบริเวณทดสอบด้วยถ่ายภาพจากกล้องดิจิทัลและกระบวนการซอฟต์แวร์ ซึ่งจะแสดงเพื่อปรับปรุงความสามารถในเชิงปริมาณของเทคนิค งานวิจัยนี้แสดงวิธีการตรวจสอบอย่างรวดเร็ว มีความไวและใช้สำหรับตัวอย่างปรอทในน้ำและเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ในสิ่งแวดล้อม

Abdollah Yari และคณะ [9] ได้พัฒนาเซ็นเซอร์ชนิดใช้แสงสำหรับการตรวจวัดปรอทในสารละลายโดยใช้โซล-เจล ซึ่งเป็นการรายงานเกี่ยวกับความสามารถของเซ็นเซอร์ชนิดใช้แสงโดยการรวมกันของอินดิเคเตอร์ 4-phenyl-2,6-bis(2,3,5,6-tetrahydrobenzo[b][1,4,7]trioxonin-9-yl)pyrylium perchlorate เข้าไปในชั้นโซลเจล เซ็นเซอร์ชนิดใช้แสงที่เสนอนั้นมีความเสถียรรวดเร็ว และมีความสามารถในการเลือกเฉพาะไอออนของปรอท ซึ่งจะแสดงสัญญาณในการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป ด้วยการให้แสงไปที่สารละลายน้ำ (Aqueous Solution) ที่มีปรอทบรรจุอยู่ ฟิล์มตรวจจับสามารถวัดไอออนปรอทในสารละลายในน้ำ ด้วยค่าการเลือกเฉพาะที่สูง การตรวจสอบความถูกต้องของวิธี (Validation) ของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะนี้แสดง

ลักษณะของ Hg^{2+} ได้อย่างดี ซึ่งจะมีความหลากหลายกว่าไอออนโลหะอื่นๆ รวมทั้งมีค่าการเลือกเฉพาะที่ดีด้วยและมีความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) สูง วิธีนี้ใช้สำหรับตรวจวัดไอออนปรอทโดยตรงในตัวอย่างจริง จะให้ผลที่มีค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ที่ดีด้วยโดยข้อมูลที่ได้อาจมาจากการใช้ Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry

นฤชิต ไพโรจน์ [10] ได้พัฒนาชุดทดสอบแบบจุดโดยใช้โซล-เจล เจือออโทพีแนนโทเรติน สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเหล็ก (II) โดยใช้เครื่องสแกนเนอร์เป็นเครื่องมือตรวจวัด สามารถเตรียมได้โดยหยดสารละลายโซล-เจล เจือด้วยออโทพีแนนโทเรตินจำนวน 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรอง นำสารละลายตัวอย่างมาเติมด้วยสารละลายไฮดรอกไซด์ของไฮโดรคลอไรด์ ($NH_2OH \cdot HCl$) แล้วนำสารละลายผสมดังกล่าวจำนวน 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบริเวณจุดทดสอบ จะเกิดสารเชิงซ้อนสีแดงส้มระหว่างไอออนเหล็ก (II) กับออโทพีแนนโทเรติน จากนั้นตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงด้วยเครื่องสแกนเนอร์ ภาพสแกนที่ได้ในระบบดิจิทัลจะบันทึกเป็นค่าความเข้มแสง คือ แสงสีแดง แสงสีเขียวและแสงสีน้ำเงิน (RGB) ประมวลผลความเข้มสีด้วยโปรแกรม Image JTM สร้างกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความเข้มแสง ซึ่งคำนวณจากสมการเชิงเส้นแบบยูคลิด (Euclidean Distance, ED) หรือระหว่างค่าการสะท้อนแสง (Reflectance) เทียบกับระดับความเข้มสีของไอออนเหล็ก (II) ในช่วง 10.00 - 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร วิธีที่ได้รับการพัฒนานี้นำมาทดสอบและประยุกต์ใช้วิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กในตัวอย่างเม็ดยาที่มีธาตุเหล็กเปรียบเทียบความแม่นยำกับวิธีมาตรฐานอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมทรีโดยใช้ T-test

Mustafa Tuzen และคณะ [11] ได้พัฒนาการตรวจวัดปริมาณปรอท (II) และปรอทอินทรีย์ (Methyl mercury) ในน้ำตัวอย่างและตัวอย่างเนื้อปลา โดยใช้การสกัดแบบวัฏภาคของแข็งร่วมกับเทคนิค Cold Vapour Atomic Absorption Spectrometry ใช้คอลัมน์ชนิด Staphylococcus Aureus Loaded Dowex Optipore V-493 สารละลายที่ใช้เป็นตัวชะ จะใช้เป็น กรดไฮโดรคลอริก 0.1 และ 2.0 โมลต่อลิตร สำหรับ ปรอทอินทรีย์ และ ปรอท (II) ตามลำดับ โดยมีช่วง pH ระหว่าง 2 - 6 ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดเป็น 2.5 และ 1.7 นาโนกรัมต่อลิตร สำหรับปรอท (II) และ ปรอทอินทรีย์ ตามลำดับ ซึ่งวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ได้กับการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำตามธรรมชาติ และตัวอย่างเนื้อปลาที่ผ่านการย่อยด้วยไมโครเวฟ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Yanbei Zhu และคณะ [12] ได้พัฒนาวิธีการแยกและการเพิ่มความเข้มข้น ขึ้นอยู่กับเทคนิคการสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็ง (solid-phase extraction) โดยใช้ Sulfoxide เป็นตัวดูดซับ ซึ่งได้รับการพัฒนาสำหรับการตรวจวัดปรอท(II) ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติด้วยเทคนิค ICP-MS โดยใช้ Sulfoxide เป็นตัวดูดซับ ถูกบรรจุลงในคอลัมน์เข็มฉีดยา (ที่มีปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร) ซึ่งสามารถไหลตัวอย่างในการตรวจวัดได้ทั้งแบบ on-line และ off-line สภาพการใช้งานที่เหมาะสม มีดังนี้

สถานะของตัวอย่างสำหรับดูดซับปรอท (II) อยู่ที่ 0.5% HCl , อัตราการบรรจุตัวอย่างอยู่ที่ 10 นาทีต่อมิลลิลิตร การทดสอบโดยใช้สารละลายผสมหลายองค์ประกอบแสดงให้เห็นว่าธาตุส่วนใหญ่อยู่ในน้ำตามธรรมชาติสามารถแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์จากปรอท(II) ยกเว้น บิสมัท

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ปริมาณปรอท

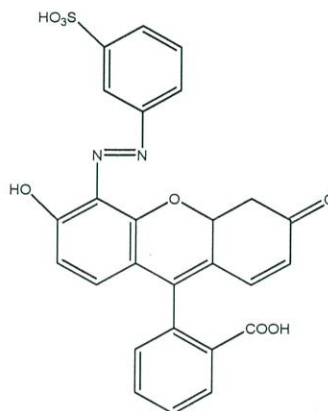
เทคนิค	คุณลักษณะเด่นในการวิเคราะห์ (Analytical performances)						งานวิจัยอ้างอิง
	ช่วงความเป็นเส้นตรง	r^2	LOD	% RSD	% Recovery		
Naked eye detection	0-0.187 μM	0.9921	0.034 μM	< 3.9	-		[7]
	5-75 mg L^{-1}	0.9914	2 $\mu\text{g L}^{-1}$	3.35 – 8.53	90 - 113		[8]
Sol-Gel	1.52×10^{-9} – 1.70×10^{-2} mol L^{-1}	-	1.11×10^{-9} mol L^{-1}	-	-		[9]
	10 - 100 mg L^{-1}	0.9971	-	0.48 - 1.65	-		[10]
CV-AAS	-	-	ปรอท (II) 2.5 ng L^{-1} ปรอทอินทรีย์ 1.7 ng L^{-1}	< 6	94 - 99		[11]
ICP	-	-	1.5 pg mL^{-1}	-	$99.0 \pm 3.2 - 100.7 \pm 4.3$		[12]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี

1. Fluorophore No.1 (จากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ โดย ดร.ภาณุมาศ ทองอยู่ และคณะ) ซึ่งมีโครงสร้าง ดังนี้



(E)-2-(6-hydroxy-3-oxo-5-((3-sulphophenyl)diazenyl)-4,4a-dihydro-3H-xanthen-9-yl)benzoic acid

2. HgCl₂ ยี่ห้อ CARLO ERBA
3. Methanol (AR) ยี่ห้อ CARLO ERBA
4. DI water

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง Spectrofluorometer รุ่น FP6300 ยี่ห้อ JASCO และ Solid Sample Holder สำหรับตัวอย่างที่เป็นของแข็ง
2. เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น UV1800 ยี่ห้อ SHIMADZU
3. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
4. บีกเกอร์
5. ขวดวัดปริมาตร
6. ไมโครปิเปต
7. ไมโครปิเปตทิป
8. ปิเปต

9. หลอดทดลองพร้อมตะแกรง
10. นาฬิกาจับเวลา
11. หลอดหยด
12. กระจกนาฬิกา
13. กระดาษกรอง No.2 ยี่ห้อ Advantec
14. Cuvette สำหรับเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และสำหรับ Spectrofluorometer

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟลูออโรฟอร์

1. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร โดยชั่งสารฟลูออโรฟอร์ 0.0025 กรัม ปรับปริมาตรด้วยเมทานอล
2. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากฟลูออโรฟอร์ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อ 1
3. นำสารที่เตรียมได้ไปตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer โดยสแกนความยาวคลื่นที่ 200 - 800 นาโนเมตร
4. บันทึกผลการทดลองและนำผลการทดลองที่ได้มาสร้าง Absorption spectrum

3.3.2 ศึกษาสเปกตรัมการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์

1. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร โดยชั่งสารฟลูออโรฟอร์ 0.0025 กรัม ปรับปริมาตรด้วยเมทานอล
2. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากฟลูออโรฟอร์ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อ 1
3. วัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ โดยเปิดฟลูออโรฟอร์ ปริมาตร 50 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองแล้วครอบด้วยกระจกนาฬิกา และนำไปตรวจวัด ณ นาฬิกาที่ 4.40
4. บันทึกผลการทดลองและนำผลการทดลองที่ได้มาสร้าง Emission spectrum

หมายเหตุ: การตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องฟลูออโรมิเตอร์ทุกครั้งที่ทำการวัด เป็นดังนี้

Slid width = 5 นาโนเมตร

Excitation wavelength = 450 นาโนเมตร

Detection wavelength = 455 นาโนเมตร

Scan speed = 1000 นาโนเมตรต่อนาที

3.3.3 ศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางสถานะต่างๆ แล้วตรวจวัดบนกระดาษ

3.3.3.1 ตัวกลางที่เป็นของเหลว

1. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตร โดยชั่งสารฟลูออโรฟอร์ 0.0025 กรัม ปรับปริมาตรด้วยเมทานอล

2. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากฟลูออโรฟอร์ ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อ 1

3. นำฟลูออโรฟอร์ที่เตรียมได้มาทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 500, 1000, 1500 และ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำรีเอเจนต์แบลนด์โดยใช้น้ำกลั่นแทนปรอท ดังนี้

3.1 ปิเปตฟลูออโรฟอร์ มา 80 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดทดลอง

3.2 เติมน้ำกลั่น 20 ไมโครลิตร จับเวลาทันที

3.3 เขย่า 1.30 นาที ด้วยเครื่อง Vortex Mixer แล้วหยดลงบนกระดาษกรอง (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร) ปริมาตร 50 ไมโครลิตร หลังจากนั้นนำไปวัดค่าการเรืองแสง ณ นาทีที่ 2.00

3.4 ทำซ้ำข้อ 3.1 - 3.3 โดยเปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นปรอทที่มีความเข้มข้น 500, 1000, 1500 และ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.5 นำผลที่ได้มา Overlay และสร้างกราฟมาตรฐานตามสมการ Stern-Volmer

3.3.3.2 ตัวอย่างที่เป็นกระดาษ

1. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิตร โดยชั่งสารฟลูออโรฟอร์ 0.0025 กรัม ปรับปริมาตรด้วยเมทานอล

2. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิตร โดยทำการเจือจางจากฟลูออโรฟอร์ ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อ 1

3. นำฟลูออโรฟอร์ที่เตรียมได้มาทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 500, 1000, 1500, 2000 และ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำรีเอเจนต์เบลนค์โดยใช้น้ำกลั่นแทนปรอท ดังนี้

3.1 ปิเปตฟลูออโรฟอร์มา 40 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรอง พร้อมกับจับเวลาทันที ทิ้งไว้ 10 วินาที

3.2 หยดน้ำกลั่น 10 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองในข้อ 3.1 แล้วครอบด้วยกระดาษฟิวส์ ทิ้งไว้เป็นเวลา 4 นาที

3.3 นำกระดาษกรองที่หยดฟลูออโรฟอร์และน้ำกลั่น ใส่ Solid Sample Holder แล้วนำไปวัดค่าการเรืองแสง ณ นาทีที่ 4.40

3.4 ทำซ้ำข้อ 3.1 - 3.3 โดยเปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นปรอทที่ความเข้มข้น 500, 1000, 1500, 2000 และ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.5 นำผลที่ได้มา Overlay และสร้างกราฟมาตรฐานตามสมการ Stern-Volmer

3.3.4 การประเมินความเที่ยงของวิธี

1. ทำการวิเคราะห์การเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ เมื่อ Quenching ด้วยปรอทความเข้มข้น 500, 1000, 1500, 2000 และ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซ้ำๆ เป็นจำนวนความเข้มข้นละ 5 ครั้ง โดยหยดสารละลายลงบนกระดาษและตรวจวัดบนกระดาษ

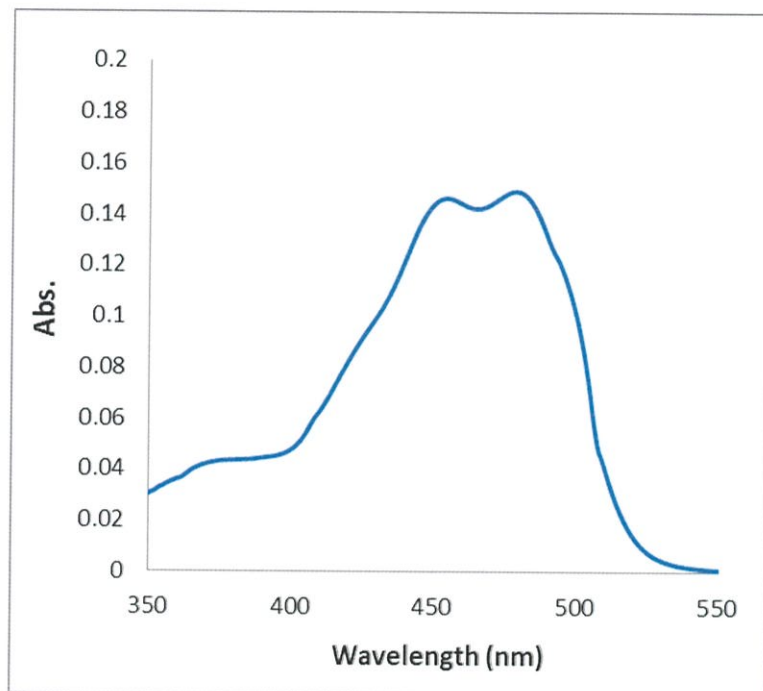
2. คำนวณหาค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ เมื่อ Quenching ด้วยปรอทความเข้มข้นต่างๆ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟลูออโรฟอร์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม สำหรับใช้กระตุ้น เพื่อใช้ในการติดตามปฏิกิริยาการ Quenching ของฟลูออโรฟอร์ด้วยปรอท ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1

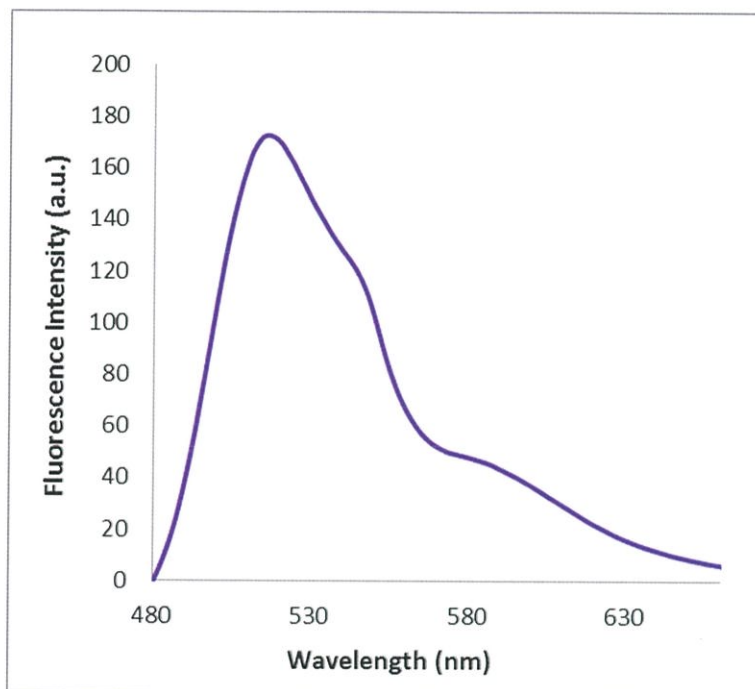


รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ฟลูออโรฟอร์มีค่า Maximum absorption wavelength ที่ 450 นาโนเมตร ซึ่งให้ค่า Absorption สูงสุด ดังนั้นจึงเลือก Maximum absorption wavelength ที่ 450 นาโนเมตร สำหรับกระตุ้น เพื่อใช้ในการติดตามปฏิกิริยา Quenching ของฟลูออโรฟอร์ด้วยปรอทต่อไป

4.2 ศึกษาสเปกตรัมการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าการเรืองแสงสูงสุด เพื่อใช้ในการติดตามปฏิกิริยาการ Quenching ของฟลูออโรฟอร์ด้วยปรอท ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2

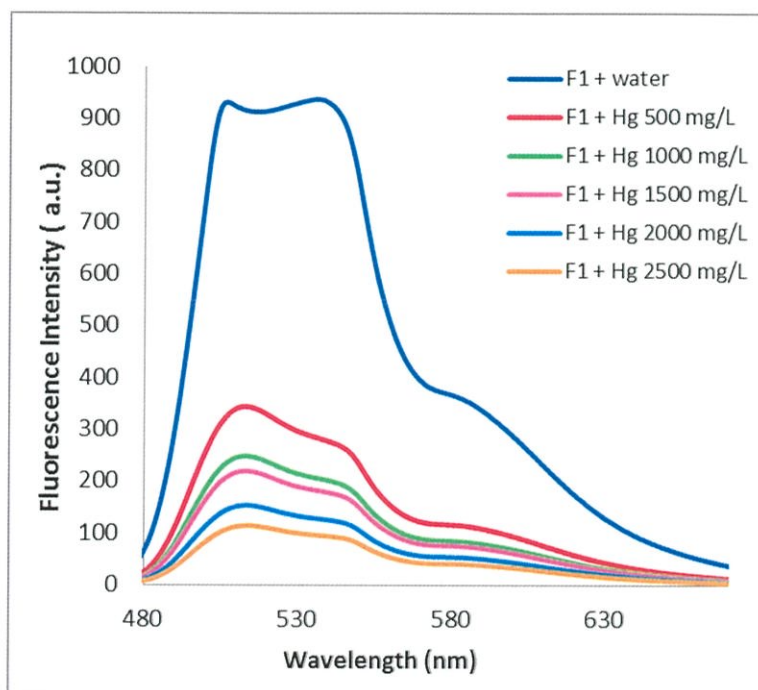


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ฟลูออโรฟอร์มีค่า Maximum emission wavelength ที่ 515 นาโนเมตร ซึ่งให้ค่า Intensity สูงสุด ดังนั้นจึงเลือก Maximum emission wavelength ที่ 515 นาโนเมตร เพื่อใช้ในการติดตามปฏิกิริยา Quenching ของฟลูออโรฟอร์ด้วยปรอทต่อไป

แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากฟลูออโรฟอร์ที่ใช้ นั้น สังเคราะห์ขึ้นเองและยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) ก่อนนำมาใช้ ดังนั้น ยังคงต้องศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์เมื่อ Quenching ด้วยปรอทความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ เพื่อดูความเป็นไปได้ว่าค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ลดลงตามลำดับ เมื่อปริมาณความเข้มข้นของปรอทเพิ่มสูงขึ้นที่ Maximum emission wavelength ที่ 515 นาโนเมตร เพื่อยืนยันว่าฟลูออโรฟอร์ยังคงนำมาใช้ได้

การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์เมื่อ Quenching ด้วยปรอท จะใช้ฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 500, 1000, 1500, 2000 และ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยผสมสารละลายฟลูออโรฟอร์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร กับปรอท ปริมาตร 1 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 4:1) แล้วนำไปตรวจวัดค่าการเรืองแสง ที่ Maximum emission wavelength ที่ 515 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3



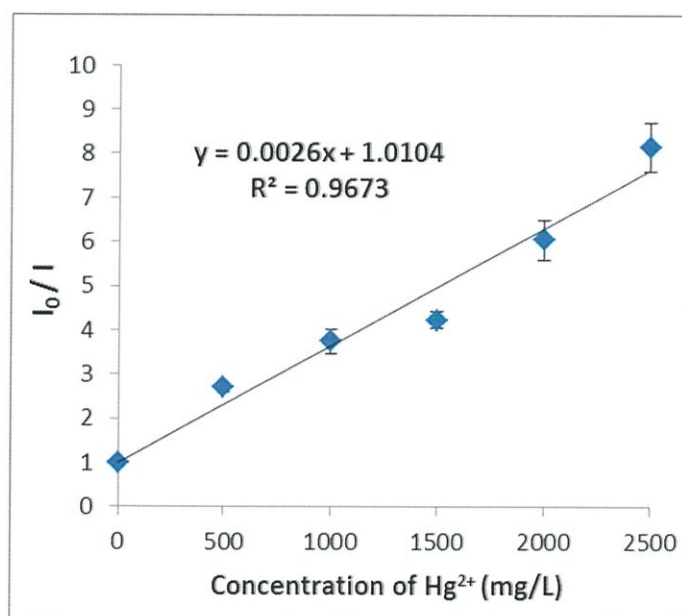
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ในเมทานอลจะลดลงตามลำดับ เมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของปรอท (Quencher) เพิ่มสูงขึ้น (แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.1) แสดงว่า เกิดการ Quenching ด้วยปรอท

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงข้อมูลการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ เมื่อ Quenching ด้วยปรอท

Conc.of Hg ²⁺ (mg/L)	I ₀	I ₁	I ₂	I ₀ /I ₁	I ₀ /I ₂	\bar{x}	SD	%RSD
0	931.36	931.72	930.99	1.00	1.00	1.00	0.00	0.06
500	931.36	353.57	334.81	2.63	2.78	2.71	0.10	3.85
1000	931.36	262.12	235.73	3.55	3.95	3.75	0.28	7.50
1500	931.36	213.16	226.29	4.37	4.12	4.24	0.18	4.23
2000	931.36	162.43	146.00	5.73	6.38	6.06	0.46	7.53
2500	931.36	120.04	108.83	7.76	8.56	8.16	0.57	6.93

นำข้อมูลมาพลอตตามสมการ Stern – Volmer เพื่อดูความเป็นเส้นตรง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4



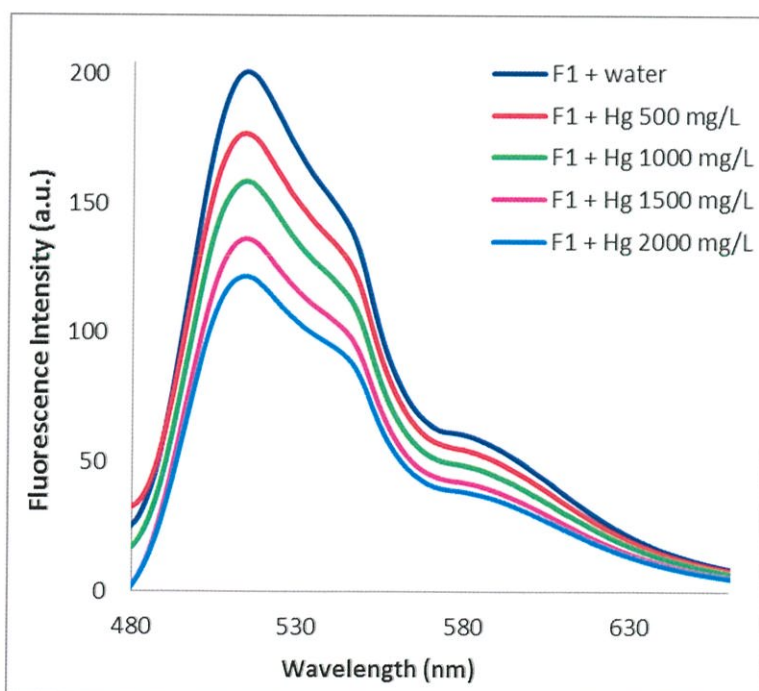
รูปที่ 4.4 แสดงกราฟ Stern–Volmer ของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า Maximum emission wavelength ที่ 515 นาโนเมตร เมื่อความเข้มข้นของปรอทเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ในเมทานอลลดลง และได้กราฟที่มีความเป็นเส้นตรงที่พอใช้ เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2 = 0.9673$) ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าการเกิดปฏิกิริยา Quenching ระหว่างฟลูออโรฟอร์และปรอทมีแนวโน้มเกิดขึ้นได้บนตัวกลางที่เป็นของเหลว

4.3 ศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางสถานะต่างๆ แล้วตรวจวัดบนกระดาษ

4.3.1 ตัวกลางที่เป็นของเหลว

การศึกษการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นของเหลว จะใช้ฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 500, 1000, 1500 และ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยผสมสารละลายฟลูออโรฟอร์ปริมาตร 80 ไมโครลิตร กับปรอทปริมาตร 20 ไมโครลิตร (อัตราส่วน 4:1) ปิเปตมา 50 ไมโครลิตร แล้วหยดลงบนกระดาษ จากนั้นนำไปตรวจวัดค่าการเรืองแสง ที่ Maximum emission wavelength ที่ 515 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5



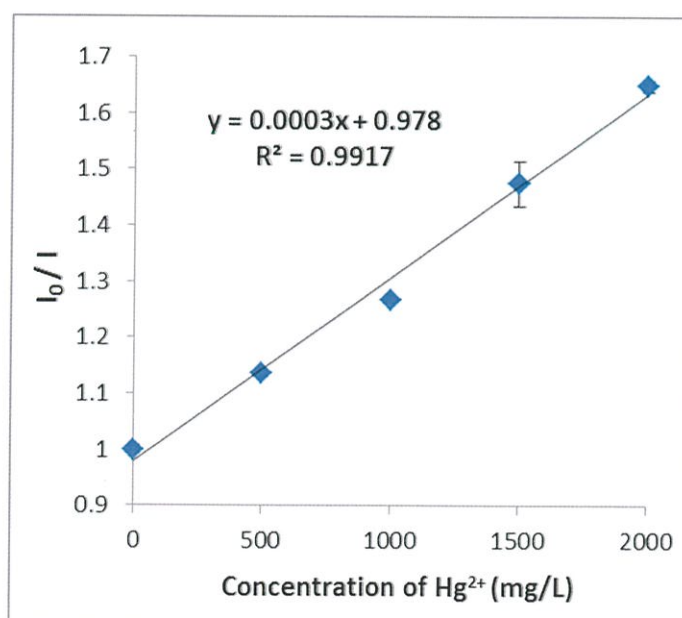
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นของเหลว

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า ค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ในเมทานอลจะลดลงตามลำดับเมื่อมีความเข้มข้นของปรอท (Quencher) เพิ่มสูงขึ้น (แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.2) แสดงว่า เกิดการ Quenching ด้วยปรอทและสามารถตรวจวัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์เมื่อ Quenching ด้วยปรอทบนกระดาษโดยใช้ตัวกลางที่เป็นของเหลวได้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงข้อมูลการศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นของเหลวแล้วตรวจวัดบนกระดาษ

Conc. of Hg^{2+} (mg/L)	I_0	I_1	I_2	I_0/I_1	I_0/I_2	\bar{x}	SD	%RSD
0	201.31	200.15	202.46	1.01	0.99	1.00	0.01	0.81
500	201.31	176.67	177.85	1.14	1.13	1.14	0.01	0.47
1000	201.31	158.46	159.21	1.27	1.26	1.27	0.00	0.33
1500	201.31	139.22	133.90	1.45	1.50	1.47	0.04	2.76
2000	201.31	122.66	121.53	1.64	1.66	1.65	0.01	0.66

นำข้อมูลมาทำการพลอตตามสมการ Stern – Volmer เพื่อดูความเป็นเส้นตรง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6

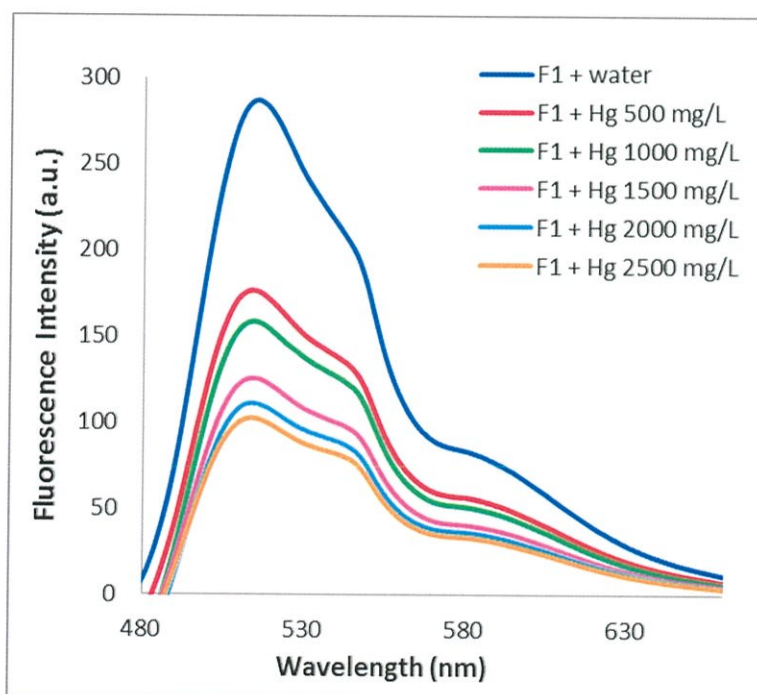


รูปที่ 4.6 แสดงกราฟ Stern-Volmer ของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นของเหลว

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ได้กราฟที่มีความเป็นเส้นตรงที่ดี เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2 = 0.9916$) ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าการเกิดปฏิกิริยา Quenching ระหว่างฟลูออโรฟอร์และปรอทสามารถเกิดขึ้นได้บนตัวกลางที่เป็นของเหลวแล้วตรวจวัดบนกระดาษ

4.3.2 ตัวกลางที่เป็นกระดาษ

การศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นกระดาษ จะใช้ฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 500, 1000, 1500, 2000 และ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยหยดสารละลายฟลูออโรฟอร์ปริมาตร 40 ไมโครลิตร และปรอทปริมาตร 10 ไมโครลิตร (อัตราส่วน 4:1) หยดลงบนกระดาษ แล้วนำไปตรวจวัดค่าการเรืองแสงที่ Maximum emission wavelength ที่ 515 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7



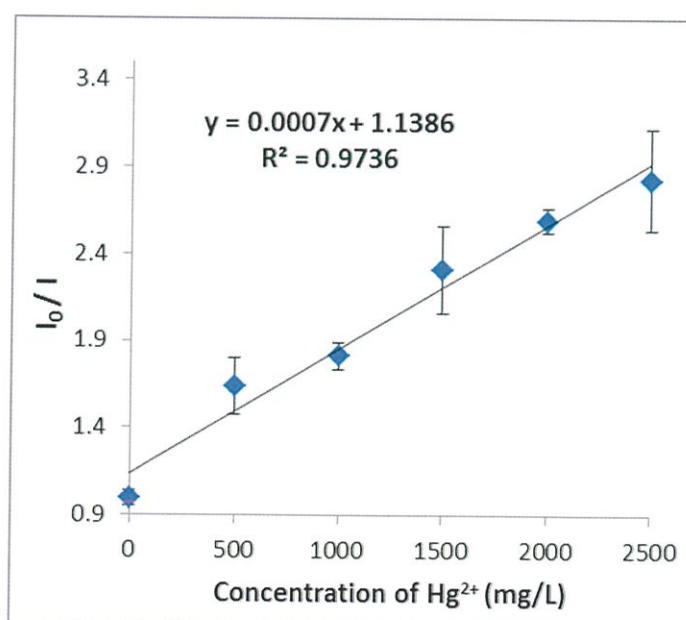
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นกระดาษ

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ในเมทานอลจะลดลงตามลำดับเมื่อมีความเข้มข้นของปรอท (Quencher) เพิ่มขึ้น (แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.3) แสดงว่า เกิดการ Quenching บนกระดาษได้และสามารถตรวจวัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ได้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงข้อมูลการศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นกระดาษแล้วตรวจวัดบนกระดาษ

Conc. of Hg^{2+} (mg/L)	I_0	I_1	I_2	I_0/I_1	I_0/I_2	\bar{x}	SD	%RSD
0	287.20	296.40	278.01	0.97	1.03	1.00	0.05	4.53
500	287.20	163.72	188.64	1.75	1.52	1.64	0.16	10.00
1000	287.20	163.16	153.76	1.76	1.87	1.81	0.08	4.19
1500	287.20	115.66	134.81	2.48	2.13	2.31	0.25	10.81
2000	287.20	113.12	108.84	2.54	2.64	2.59	0.07	2.73
2500	287.20	109.58	94.76	2.62	3.03	2.83	0.29	10.26

นำข้อมูลมาทำการพลอตตามสมการ Stern – Volmer เพื่อดูความเป็นเส้นตรง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟ Stern-Volmer ของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นกระดาษ

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ได้กราฟที่มีความเป็นเส้นตรงที่พอใช้ เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2 = 0.9718$) ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าการเกิดปฏิกิริยา Quenching ระหว่างฟลูออโรฟอร์และปรอทสามารถเกิดขึ้นได้บนตัวกลางที่เป็นกระดาษแล้วตรวจวัดบนกระดาษ

4.4 การประเมินความเที่ยงของวิธี

ในการหาความเที่ยงของวิธี จะพิจารณาจากค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ โดยในการทดลองนี้จะทำการวิเคราะห์การเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์เมื่อ Quenching ด้วยปรอทที่ความเข้มข้น 500, 1000, 1500, 2000 และ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซ้ำๆ เป็นจำนวน 5 ครั้ง จากนั้นหาค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์เมื่อทำการ Quenching ด้วยปรอทความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 4.4

ค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ เมื่อทำการ Quenching ด้วยปรอทความเข้มข้น 500, 1000, 1500, 2000 และ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการวิเคราะห์ซ้ำมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.60, 0.92, 0.79, 0.59, 0.64 และ 0.92 ตามลำดับ ดังนั้น จึงถือได้ว่าวิธีนี้มีความเที่ยง

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์เมื่อทำการ Quenching ด้วยปรอท (n=5)

Conc. of Hg ²⁺ (mg/L)	ค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ เมื่อ Quenching ด้วยปรอท					\bar{x}	SD	%RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5			
0	367.23	367.46	369.35	363.31	366.26	366.72	2.21	0.60
500	260.02	257.22	259.82	257.18	254.23	257.69	2.37	0.92
1000	221.46	217.59	218.59	219.69	221.55	219.77	1.75	0.79
1500	170.08	170.81	168.54	169.16	170.84	169.89	1.017	0.59
2000	153.99	152.71	153.63	151.52	151.34	152.44	0.98	0.64
2500	128.94	131.99	130.16	129.34	130.59	130.21	1.19	0.92

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการออกแบบการตรวจวัดปรอทบนกระดาษด้วยหลักการสเปคโตรฟลูออโรเมทรี โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างปรอทกับสี่อ้อมอินทรีย์ ซึ่งสี่อ้อมอินทรีย์ที่ใช้คือ ฟลูออโรฟอร์ สำหรับการตรวจวัดอาศัยหลักการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ พบว่า การเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์จะลดลงตามลำดับ เมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของปรอทเพิ่มสูงขึ้น จึงสรุปได้ว่า สามารถตรวจวัดการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ เมื่อทำการ Quenching ด้วยปรอทที่หยดลงบนกระดาษได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. Solid Sample Holder ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fluorometer เมื่อทำการวิเคราะห์แล้ว ควรทำการล้างด้วยน้ำกลั่นและเช็ดให้แห้ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสารที่ใช้วิเคราะห์ก่อนหน้า
2. ควรตัดกระดาษให้มีขนาดเท่ากับช่องใส่ตัวอย่างของแข็งใน Solid Sample Holder โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2 เซนติเมตร
3. Solid Sample Holder ควรประกอบทุกชิ้นส่วนให้ครบและปิดให้แน่น เพื่อป้องกันความผิดพลาดของการตรวจวัดค่าการเรืองแสง
4. ในการหยดสารละลายลงบนกระดาษควรหยดให้อยู่บริเวณกึ่งกลางของกระดาษ เพื่อให้สารสามารถกระจายได้ทั่วกระดาษและเป็นการควบคุมวิธีการหยด
5. การทำการวิเคราะห์จะต้องเปิดหลอดที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงของเครื่อง Fluorometer เป็นเวลา 30 นาทีเสมอ
6. ในการเตรียมสารเคมีต่างๆ ควรสวมอุปกรณ์ป้องกันสารเคมีเข้าสู่ร่างกายทั้งจากการสัมผัสและสูดดม เพราะอาจเกิดอันตรายได้ เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์สารที่เป็น โลหะหนัก
7. ควรมีการนำโครงการพิเศษนี้ไปพัฒนาให้สามารถตรวจวัดปรอทในช่วงความเข้มข้นต่ำๆ ได้เพราะในความเป็นจริงปรอทที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมมีความเข้มข้นที่ค่อนข้างต่ำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] แหล่งที่มาของสารปรอท [Online]. http://wqm.pcd.go.th/water/images/stories/inland/journal/water_mercury.pdf; Search: 12 September 2013.
- [2] อันตรายจากการปนเปื้อนของปรอท [Online]. <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2031/mercury>; Search: 12 September 2013.
- [3] **Methylation mercury** [Online]. <http://webcam.srs.fs.fed.us/impacts/mercury/>; Search: 2 October 2013.
- [4] หลักการเซ็นเซอร์ทางเคมี [Online]. Available: http://digital_collect.lib.buu.ac.th/ojs/index.php/science/article/view/1073; Search: 3 October 2013.
- [5] โครโมจีนิคเซ็นเซอร์ [Online]. Available: https://161.246.22.23/tdc/DanaInfo=.a214C6BF8FGJAI+dccheck.php?Int_code=95&RecId=16160&obj_id=125825&showmenu=no&userid=0; Search: 3 October 2013.
- [6] ขนิษฐา จันทรพัฒน์ และคณะ, “การพัฒนาเคมีเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดปรอท” (ปริญญาานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554)
- [7] Deivasigamani Prabhakaran, Hiroshi Nanjo, Hideyuki Matsunaga, 2007. “**Naked eye sensor on polyvinyl chloride platform of chromo-ionophore molecular assemblies: A smart way for the colorimetric sensing of toxic metal ions**” *analytica chimica acta*, 601, 108-117.
- [8] Amara Apilux, WeenaSiangproh, NarongPraphairaksit, OrawonChailapakul, 2012. “**Simple and rapid colorimetric detection of Hg (II) by a paper-based device using silver nanoplates**” *Talanta*, 97, 388-394.
- [9] Abdollah Yari, Hamzeh Adelpour Abdoli, 2010. “**Sol-gel derived highly selective optical sensor for sensitive determination of the mercury (II) ion in solution**” *Journal of Hazardous Materials*, 178, 713-717.

- [10] นฤชิต ไพโรจน์, “ชุดทดสอบแบบจุดโดยใช้โซล-เจลเจือออร์โทฟีแนนโทรลีนสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเหล็ก (II)” (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555).
- [11] Mustafa Tuzen, Isa Karaman, Demirhan Citak, Mustafa Soylak, 2009. “**Mercury(II) and methyl mercury determinations in water and fish samples by using solid phase extraction and cold vapour atomic absorption spectrometry combination**” Food and Chemical Toxicology, 47, 1648-1652.
- [12] Yanbei Zhu, Ben Ahmady, Masahiko Numata, and Koichi Chiba, “**Solid Phase Extraction Using a Sulfoxide Adsorbent for Preconcentration and Separation of Hg(II) in Natural Water Followed by ICP-MS Measurements**” Analytical Science, 28, 417-421.

ภาคผนวก

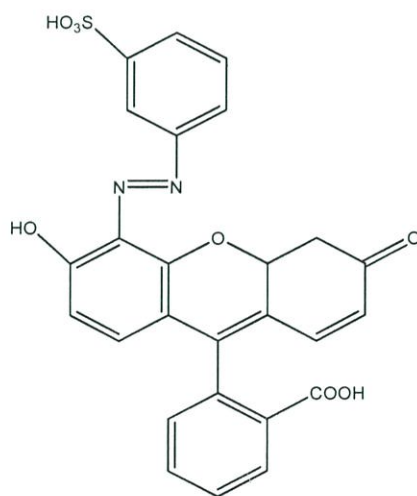
ภาคผนวก ก

การเตรียมฟลูออโรฟอร์ สารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น ต่างๆ และศึกษาความเป็นไปได้ไปในการตรวจวัด

1. การเตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้นต่างๆ

- เตรียมฟลูออโรฟอร์ ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ชั่งฟลูออโรฟอร์ มา 0.0025 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยเมทานอล

- เตรียม ฟลูออโรฟอร์ ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำโดยเปิดฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 8.0 มิลลิลิตรใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยเมทานอล



(*E*)-2-(6-hydroxy-3-oxo-5-((3-sulphophenyl)diazenyl)-4,4a-dihydro-3*H*-xanthen-9-yl)benzoic acid

รูปที่ ก.1 ฟลูออโรฟอร์

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้นต่างๆ

- เตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 4000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
ทำการชั่ง HgCl_2 หนัก 0.5416 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนจากนั้นถ่ายใส่ขวดวัด
ปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน
- เตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
ทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 4000 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 6.25
มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน
- เตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
ทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 4000 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 5 มิลลิลิตร
ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน
- เตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
ทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 4000 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 3.75
มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน
- เตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
ทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 4000 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 2.5
มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน
- เตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
ทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 4000 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 1.25
มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร

3. วิธีการทดลองการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์เมื่อ Quenching ด้วยปรอท

1. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร โดยชั่งสารฟลูออโรฟอร์ 0.0025 กรัม ปรับปริมาตรด้วยเมทานอล

2. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้นเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากฟลูออโรฟอร์ ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อ 1

3. นำฟลูออโรฟอร์ที่เตรียมได้มาทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 500, 1000, 1500, 2000 และ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำรีเอเจนต์แบลด์โดยใช้น้ำกลั่นแทนปรอท ดังนี้

3.1 ปิเปตฟลูออโรฟอร์ มา 4 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง

3.2 เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร จับเวลาทันที

3.3 เขย่า 1.30 นาที ด้วยเครื่อง Vortex Mixer แล้วหยดลงบนกระดาษกรอง (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร) ปริมาตร 50 ไมโครลิตร หลังจากนั้นนำไปวัดค่าการเรืองแสง ณ นาทีที่ 2.00

3.4 ทำซ้ำข้อ 3.1 - 3.3 โดยเปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นปรอทที่ความเข้มข้น 500, 1000, 1500, 2000 และ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.5 นำผลที่ได้มา Overlay และสร้างกราฟมาตรฐานตามสมการ Stern-Volmer

ภาคผนวก ข

ค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ เมื่อ Quenching ด้วยปรอทใน ตัวกลางต่างๆ

1. การศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นของเหลวแล้วตรวจวัดบน กระดาษ

1. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตร
ขนาด 50 มิลลิลิตร โดยชั่งสารฟลูออโรฟอร์ 0.0025 กรัม ปรับปริมาตรด้วยเมทานอล

2. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตร
ขนาด 100 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากฟลูออโรฟอร์ ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จาก
ข้อ 1

3. นำฟลูออโรฟอร์ที่เตรียมได้มาทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 500, 1000, 1500,
2000 และ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำรีเอเจนต์แบลคค์โดยใช้น้ำกลั่นแทนปรอท ดังนี้

3.1 บีบฟลูออโรฟอร์ มา 4 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง

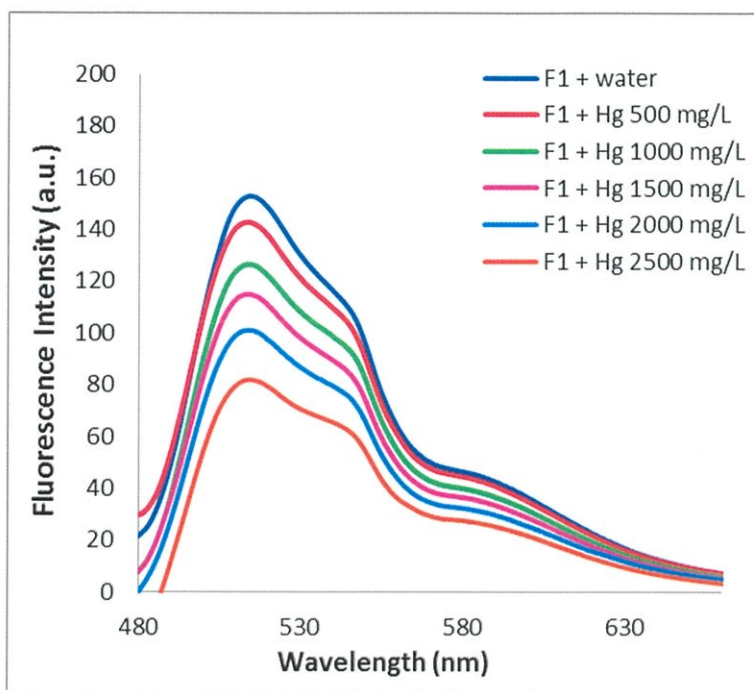
3.2 เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร จับเวลาทันที

3.3 เขย่า 1.30 นาที ด้วยเครื่อง Vortex Mixer แล้วหยดลงบนกระดาษกรอง (ขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร) ปริมาตร 50 ไมโครลิตร หลังจากนั้นนำไปวัดค่าการเรืองแสง ณ
นาฬิกาที่ 2.00

3.4 ทำซ้ำข้อ 3.1 - 3.3 โดยเปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นปรอทที่มีความเข้มข้น 500, 1000,
1500, 2000 และ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.5 นำผลที่ได้มา Overlay และสร้างกราฟมาตรฐานตามสมการ Stern-Volmer

การศึกษานี้จะใช้ฟลูออโรฟอร์ ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยากับปรอทที่
มีความเข้มข้น 500, 1000, 1500, 2000 และ 2500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยผสมสารละลายฟลูออโรฟอร์
4 มิลลิลิตร กับปรอท 1 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 4:1) บีบมา 50 ไมโครลิตร แล้วหยดลงบนกระดาษ
จากนั้นนำไปตรวจวัดค่าการเรืองแสง ที่ Maximum emission wavelength ที่ 515 นาโนเมตร ได้ผล
การทดลองแสดงดังรูปที่ ข.1



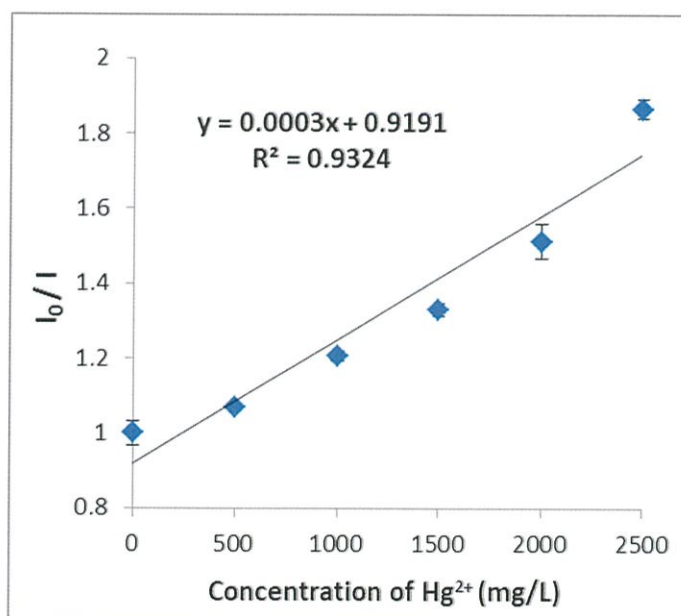
รูปที่ ข.1 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นของเหลว

จากรูปที่ ข.1 จะเห็นได้ว่า ค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ในเมทานอลจะลดลงตามลำดับ เมื่อมีความเข้มข้นของปรอท (Quencher) เพิ่มสูงขึ้น (แสดงข้อมูลดังตารางที่ ข.1) แสดงว่า เกิดการ Quenching ด้วยปรอทและสามารถตรวจวัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์เมื่อ Quenching ด้วยปรอทบนกระดาษ โดยใช้ตัวกลางที่เป็นของเหลวได้

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงข้อมูลการศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นของเหลวแล้วตรวจวัดบนกระดาษ

Conc.of Hg ²⁺ (mg/L)	I ₀	I ₁	I ₂	I ₀ /I ₁	I ₀ /I ₂	\bar{x}	SD	%RSD
0	152.83	156.34	149.33	0.98	1.02	1.00	0.03	3.24
500	152.83	142.82	142.59	1.07	1.07	1.07	0.00	0.11
1000	152.83	127.44	125.42	1.20	1.22	1.21	0.01	0.12
1500	152.83	113.77	115.85	1.34	1.32	1.33	0.02	1.28
2000	152.83	103.18	98.87	1.48	1.55	1.51	0.05	3.02
2500	152.83	81.05	82.72	1.89	1.85	1.87	0.03	1.44

นำข้อมูลมาทำการพล็อตตามสมการ Stern – Volmer เพื่อดูความเป็นเส้นตรง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 แสดงกราฟ Stern – Volmer ของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นของเหลว

จากรูปที่ ข.2 จะเห็นได้ว่า Maximum emission wavelength ที่ 515 นาโนเมตร เมื่อความเข้มข้นของปรอทเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ในเมทานอลลดลง และได้กราฟที่มีความเป็นเส้นตรงที่พอใช้ เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2 = 0.9329$) ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าการเกิดปฏิกิริยา Quenching ระหว่างฟลูออโรฟอร์และปรอทมีแนวโน้มเกิดขึ้นได้บนตัวกลางที่เป็นของเหลว

2. ศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็นกระดาษแล้วตรวจวัดบนกระดาษ

1. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร โดยชั่งสารฟลูออโรฟอร์ 0.0025 กรัม ปรับปริมาตรด้วยเมทานอล

2. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากฟลูออโรฟอร์ ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อ 1

3. นำฟลูออโรฟอร์ที่เตรียมได้มาทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำรีเอเจนต์แบลลงค์โดยใช้น้ำกลั่นแทนปรอท ดังนี้

3.1 ปิเปตฟลูออโรฟอร์มา 40 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรอง พร้อมกับจับเวลาทันที ทิ้งไว้ 10 วินาที

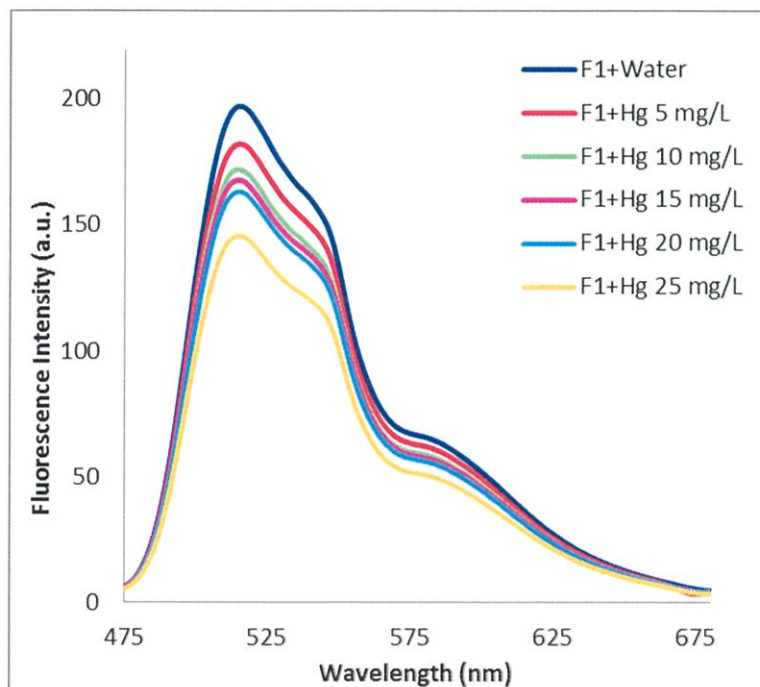
3.2 หยดน้ำกลั่น 10 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองในข้อ 3.1 แล้วครอบด้วยกระดาษฟิลา ทิ้งไว้เป็นเวลา 4 นาที

3.3 นำกระดาษกรองที่หยดฟลูออโรฟอร์และน้ำกลั่น ใส่ Solid Sample Holder แล้วนำไปวัดค่าการเรืองแสง ณ นาทีที่ 4.40

3.4 ทำซ้ำข้อ 3.1 - 3.3 โดยเปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นปรอทที่มีความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.5 นำผลที่ได้มา Overlay และสร้างกราฟมาตรฐานตามสมการ Stern-Volmer

การศึกษานี้จะใช้ฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยหยดสารละลายฟลูออโรฟอร์ปริมาตร 40 ไมโครลิตร และปรอทปริมาตร 10 ไมโครลิตร (อัตราส่วน 4:1) ลงบนกระดาษ แล้วนำไปตรวจวัดค่าการเรืองแสงที่ Maximum emission wavelength ที่ 515 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ ข.3



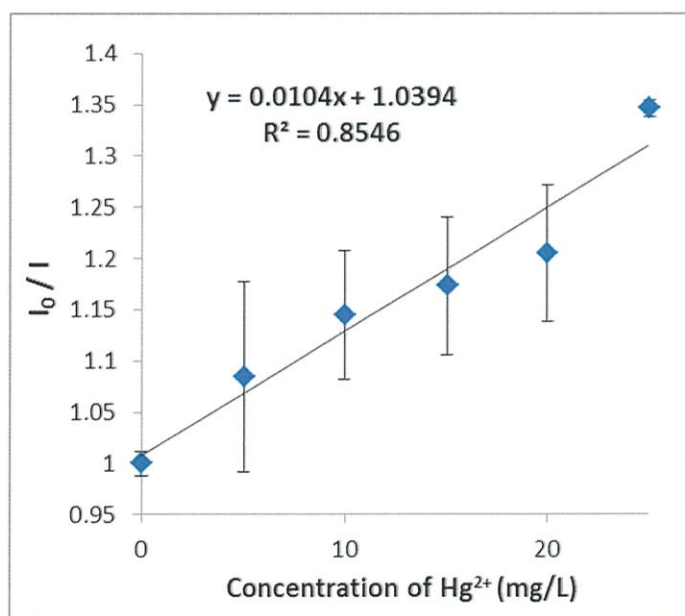
รูปที่ ข.3 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
เมื่อ Quenching ด้วยปรอท ในตัวกลางที่เป็นกระดาษ

จากรูปที่ ข.3 จะเห็นได้ว่า ค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ในเมทานอลจะลดลงตามลำดับ เมื่อมีความเข้มข้นของปรอท (Quencher) เพิ่มสูงขึ้น (แสดงข้อมูลดังตารางที่ ข.2) แสดงว่า เกิดการ Quenching ด้วยปรอทและสามารถตรวจวัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์เมื่อ Quenching ด้วยปรอทบนกระดาษ โดยใช้ตัวกลางที่เป็นกระดาษได้

ตารางที่ ข.2 ตารางแสดงข้อมูลการศึกษาการทำปฏิกิริยา Quenching ในตัวกลางที่เป็น
กระดาษแก้วตรวจวัดบนกระดาษ

Conc. of Hg^{2+} (mg/L)	I_0	I_1	I_2	I_0/I_1	I_0/I_2	\bar{x}	SD	%RSD
0	200.81	199.16	202.47	1.01	0.99	1.00	0.01	1.17
500	200.81	197.07	174.60	1.02	1.15	1.08	0.09	8.55
1000	200.81	168.83	182.39	1.19	1.10	1.15	0.06	5.46
1500	200.81	178.45	164.47	1.13	1.22	1.17	0.07	5.77
2000	200.81	160.37	173.34	1.25	1.16	1.21	0.07	5.50
2500	200.81	148.54	149.75	1.35	1.34	1.35	0.01	0.57

นำข้อมูลมาทำการพลอตตามสมการ Stern – Volmer เพื่อดูความเป็นเส้นตรง ได้ผลการ
ทดลองดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 แสดงกราฟ Stern – Volmer ของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
เมื่อ Quenching ด้วยปรอท

ภาคผนวก ก

การศึกษาตัวทำลายที่เหมาะสมของฟลูออโรฟอร์และการทดสอบ ความสามารถในการตรวจวัดตัวอย่างชนิดของแข็งด้วยเครื่อง Spectrofluorometer

1. ศึกษาตัวทำลายที่เหมาะสมของฟลูออโรฟอร์และตรวจวัดค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ เมื่อ Quenching ด้วยปรอท

1.1 ตัวทำลายที่เป็นเมทานอล

1. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้นเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร โดยชั่งสารฟลูออโรฟอร์ 0.0025 กรัม ปรับปริมาตรด้วยเมทานอล

2. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากฟลูออโรฟอร์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อ 1

3. นำฟลูออโรฟอร์ที่เตรียมได้มาทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 25, 50, 100, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรและทำรีเอเจนต์เบลงค์โดยใช้น้ำกลั่นแทนปรอท

4. ทำการศึกษาความสามารถในการ Quenching ของฟลูออโรฟอร์ ในตัวกลางที่เป็นเมทานอลเมื่อทำปฏิกิริยากับปรอทความเข้มข้นต่างๆ โดย

4.1 ปิเปต 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟลูออโรฟอร์ในเมทานอล มา 4 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง

4.2 เติมน้ำกลั่นจำนวน 1 มิลลิลิตร พร้อมกับจับเวลาทันทีที่เติมลงไป

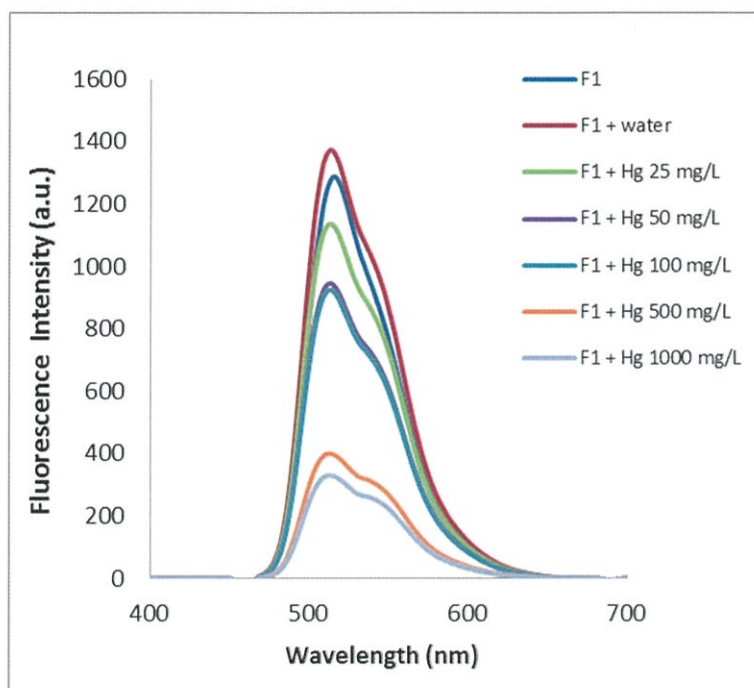
4.3 เขย่า 1.30 นาที ด้วยเครื่อง Vortex Mixer แล้วนำไปวัดค่าการเรืองแสง ณ นาทีที่

2.00

4.4 ทำซ้ำข้อ 4.1 - 4.3 โดยเปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นปรอทที่ความเข้มข้น 25, 50, 100, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

4.5 นำผลที่ได้มา Overlay และสร้างกราฟมาตรฐานตามสมการ Stern-Volmer

การศึกษานี้จะใช้ฟลูออโรฟอร์ในเมทานอล ความเข้มข้น 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 25, 50, 100, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยผสมสารละลายฟลูออโรฟอร์ 4 มิลลิลิตร กับปรอท 1 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 4:1) แล้วนำไปตรวจวัดค่าการเรืองแสงที่ Maximum emission wavelength ที่ 515 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเมทานอล เมื่อ Quenching ด้วยปรอท

จากรูปที่ ค.1 จะเห็นได้ว่า ค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ในเมทานอลจะลดลงตามลำดับ เมื่อมีความเข้มข้นของปรอท (Quencher) เพิ่มสูงขึ้น แสดงว่า เมื่อใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลายสามารถเกิดการ Quenching ของฟลูออโรฟอร์ด้วยปรอทได้

1.2 ตัวทำละลายที่เป็นน้ำ

1. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำ ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร โดยชั่งสารฟลูออโรฟอร์ 0.0025 กรัม ละลายด้วยเมทานอล 3.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำ จะได้ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. เตรียมฟลูออโรฟอร์ความเข้มข้น 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำ ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากฟลูออโรฟอร์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อ 1

3. นำฟลูออโรฟอร์ ที่เตรียมได้มาทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 25, 50, 100, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำรีเอเจนต์แบลนด์โดยใช้น้ำกลั่นแทนปรอท

4. ทำการศึกษาความสามารถในการ Quenching ของฟลูออโรฟอร์ ในตัวกลางที่เป็นน้ำเมื่อทำปฏิกิริยากับปรอทความเข้มข้นต่างๆ โดย

4.1 ปิเปต 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟลูออโรฟอร์ ในน้ำ มา 4 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง

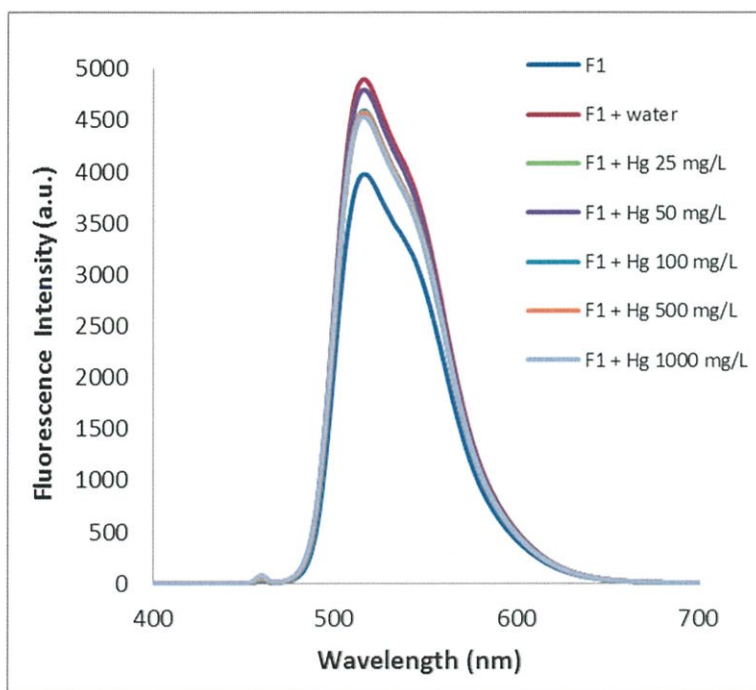
4.2 เติมน้ำกลั่นจำนวน 1 มิลลิลิตร พร้อมกับจับเวลาทันทีที่เติมลงไป

4.3 เขย่า 1.30 นาที ด้วยเครื่อง Vortex Mixer แล้วนำไปวัดค่าการคายแสง ณ นาทีที่ 2.00

4.4 ทำซ้ำข้อ 4.1-4.3 โดยเปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นปรอทที่มีความเข้มข้น 25, 50, 100, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

4.5 นำผลที่ได้มา Overlay และสร้างกราฟมาตรฐานตามสมการ Stern-Volmer

การศึกษานี้จะใช้ฟลูออโรฟอร์ในน้ำ ความเข้มข้น 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยากับปรอทที่มีความเข้มข้น 25, 50, 100, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยผสมสารละลายฟลูออโรฟอร์ 4 มิลลิลิตร กับปรอท 1 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 4:1) แล้วนำไปตรวจวัดค่าการเรืองแสง ที่ Maximum emission wavelength ที่ 515 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 สเปกตรัมแสดงค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ ความเข้มข้น 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำ เมื่อ Quenching ด้วยปรอท

จากรูปที่ ค.2 จะเห็นได้ว่า ค่าการเรืองแสงของฟลูออโรฟอร์ในน้ำจะไม่ลดลงตามลำดับ เมื่อมีความเข้มข้นของปรอท (Quencher) เพิ่มสูงขึ้น แสดงว่า เมื่อใช้น้ำเป็นตัวทำละลายไม่สามารถเกิดการ Quenching ของฟลูออโรฟอร์ด้วยปรอทได้

2. การทดสอบความสามารถในการตรวจวัดค่าการเรืองแสงของเครื่อง Spectrofluorometer ด้วยสารละลายควินิน

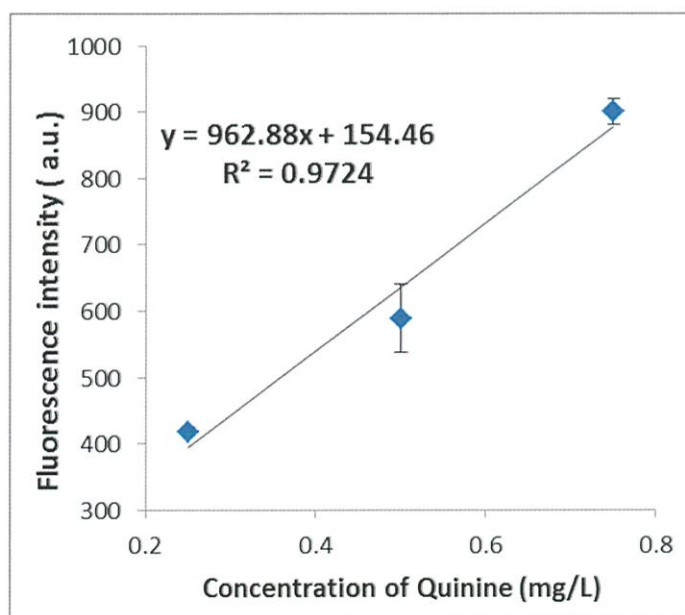
2.1 เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสารตัวอย่างชนิดของเหลว (Cuvette)

1. เตรียมควินินความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกรดซัลฟิวริก ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร โดยชั่งสารควินิน 0.0025 กรัม ปรับปริมาตรด้วยกรดซัลฟิวริก

2. เตรียมควินินความเข้มข้น 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกรดซัลฟิวริก ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากควินินที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อ 1

3. นำควินินที่เตรียมได้มาตรวจวัดค่าการเรืองแสง

การศึกษานี้จะใช้ควินิน ความเข้มข้น 0.25 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปตรวจวัดค่าการเรืองแสง ที่ Maximum emission wavelength ที่ 450 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ ค.3



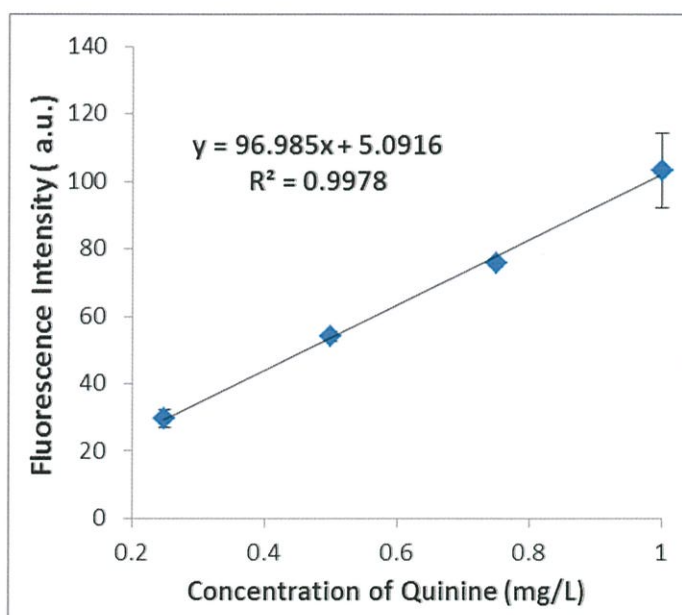
รูปที่ ค.3 กราฟแสดงค่าการเรืองแสงของควินิน ความเข้มข้น 0.25 – 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร (ควินินความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากค่าตกสเกล)

จากรูปที่ ค.3 จะเห็นได้ว่า ค่าการเรืองแสงของควินินเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของควินินเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงว่า เครื่อง Spectrofluorometer สามารถตรวจวัดการเรืองแสงได้

2.2 เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสารตัวอย่างชนิดของแข็ง (Solid Sample Holder)

1. เตรียมควินินความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกรดซัลฟิวริก ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร โดยชั่งสารควินิน 0.0025 กรัม ปรับปริมาตรด้วยกรดซัลฟิวริก
2. เตรียมควินินความเข้มข้น 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกรดซัลฟิวริก ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางจากควินินที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อ 1
3. นำควินินที่เตรียมได้มาตรวจวัดค่าการเรืองแสง โดยหยดควินินปริมาตร 50 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษ

การศึกษานี้จะใช้ควินิน ความเข้มข้น 0.25 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปตรวจวัดค่าการเรืองแสง ที่ Maximum emission wavelength ที่ 450 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ ค.4



รูปที่ ค.4 กราฟแสดงค่าการเรืองแสงของควินิน ความเข้มข้น 0.25 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

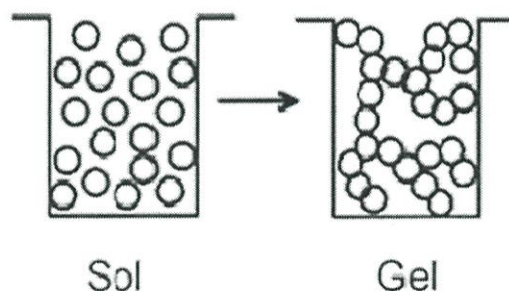
จากรูปที่ ค.4 จะเห็นได้ว่า ค่าการเรืองแสงของควินินเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของควินินเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงว่า เครื่อง Spectrofluorometer สามารถตรวจวัดการเรืองแสงเมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสารตัวอย่างชนิดของแข็ง (Solid Sample Holder) ได้

ภาคผนวก ง

Solgel และ Hydrogel

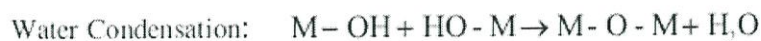
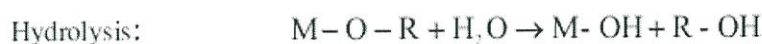
1. กระบวนการโซล-เจล (Sol - gel process)

กระบวนการผลิตโดยวิธีโซลเจลเป็นกระบวนการผลิตที่มีประโยชน์หลายอย่างในการผลิตเซรามิกส์และแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1 - 1 ไมครอน เป็นของเหลวที่เรียกว่า “เจล”



รูปที่ ง.1 การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล

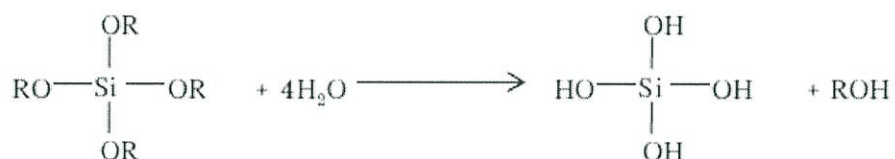
ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ Hydrolysis, Water condensation และ Alcohol condensation ดังสมการ มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสถานะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน



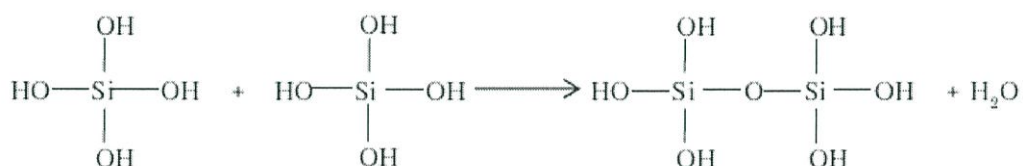
เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ Si, Ti, Al, Sn, Ce และ OR แทน Alkoxy group

ขั้นตอนแรกของการทำโซล-เจล คือ การผสมสารตั้งต้น (Precursor) กับน้ำ สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการ

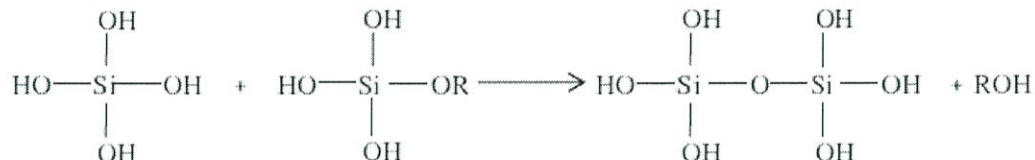
เกิดปฏิกิริยา เช่น Metal Alkoxide เป็นสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เช่น Tetramethoxysilane (TMOS) และ Tetraethoxysilane (TEOS) ส่วน Alkoxide ชนิดอื่น เช่น Aluminate, Titanate และ Borate มีใช้กันแพร่หลายโดยมักจะใช้ร่วมกับ TEOS เช่น $\text{Si}(\text{OR})_4$ ซึ่ง R คือ CH_3 (TMOS) หรือ C_2H_5 จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำ ดังสมการ



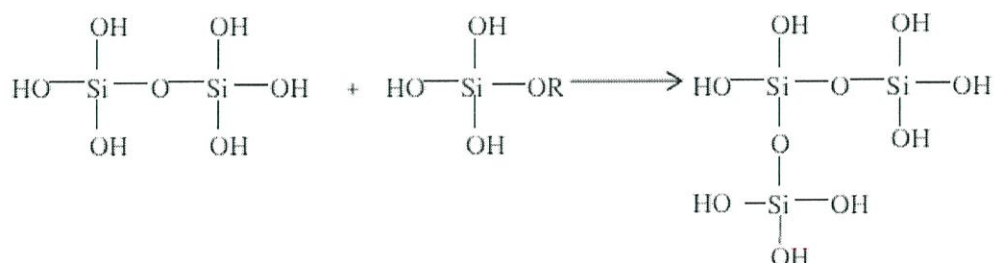
และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยากอนเดนเซชัน : Water Condensation Reaction



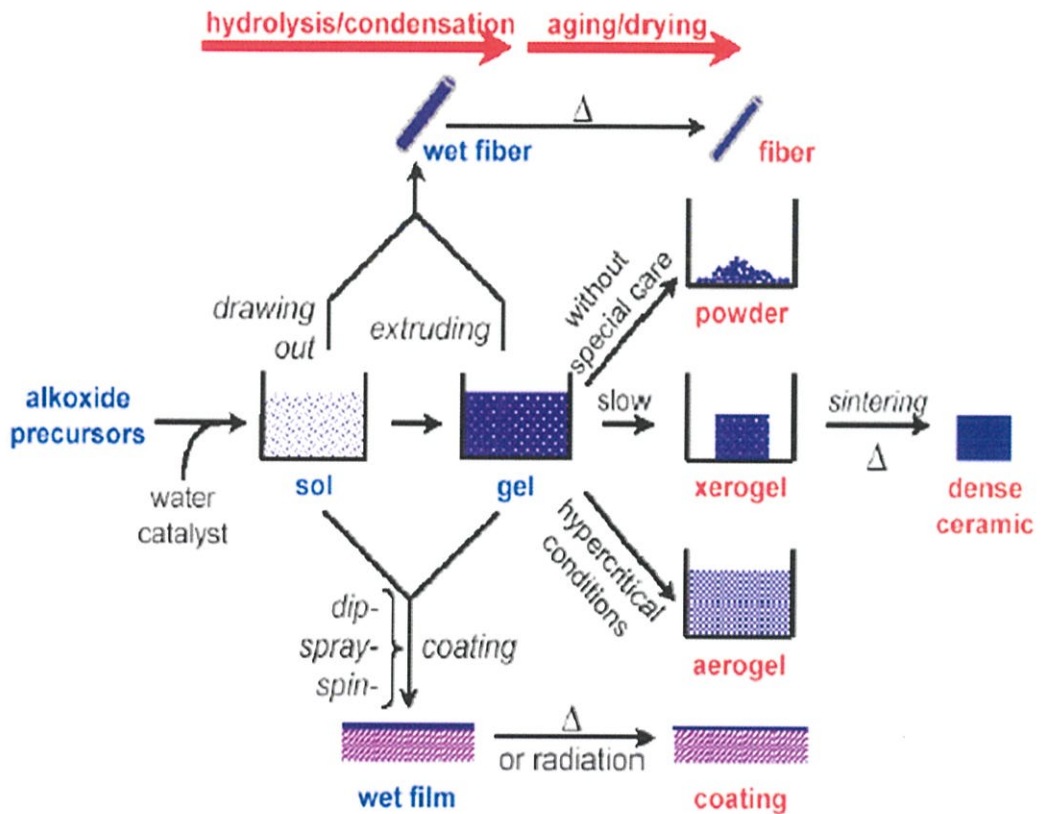
หรือ Alcohol Condensation Reaction



สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยากอนเดนเซชันต่อไปจนกลายเป็น Silica Network อยู่ในสถานะที่เรียกว่า Gel จึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า ปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน



ในกระบวนการผลิตทั้งจากสถานะที่เป็น Sol และ Gel เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น Fiber, Aerogel, Xerogel, Powder และ Oating film เป็นวัสดุฉนวนสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆต่อไป



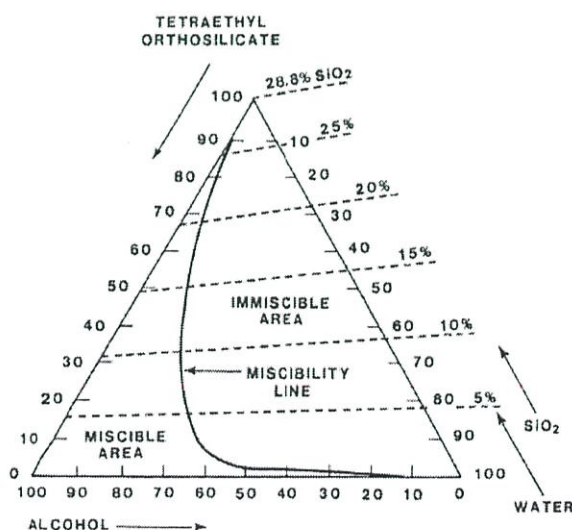
รูปที่ ง.2 กระบวนการโซลเจล

การนำเทคโนโลยีโซลเจล (Sol-Gel Technology) มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น ผงละเอียด ฟิล์มบาง เส้นใย และ วัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆต่อไป เช่น แก้วซิลิกา สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสง และการเกาะติดผิวของน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีโซลเจลจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารหรือวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตัวหรือต้องการความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลทำให้สามารถกำหนดสมบัติต่างๆที่ต้องการได้ง่ายนับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น การนำเทคโนโลยีโซลเจลมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม ยังต้องศึกษาในรายละเอียดเกี่ยวกับสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมและลักษณะหรือสมบัติของสารหรือวัสดุที่ต้องการ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามแนวโน้มการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากกระบวนการโซลเจลเป็นเทคโนโลยีการผลิต

ที่ทำได้ที่อุณหภูมิห้อง สามารถทำได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถสนองความต้องการของผู้บริโภคได้จริง

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

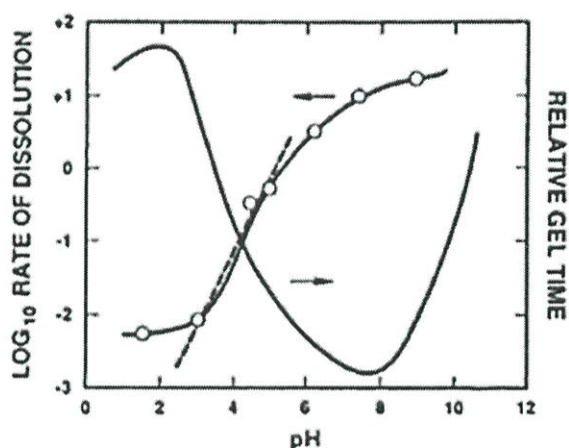
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดขึ้นได้โดยปราศจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) แต่ปฏิกิริยาจะเกิดได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์เมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นโดยทั่วไปที่นิยมใช้คือ กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl) และแอมโมเนีย (Ammonium; NH_4^+) ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ ได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid; CH_3COOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH) หรือโพแทสเซียมฟลูออไรด์ (Potassium fluoride; KF) เป็นต้น โดยความแรงและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยากรดหรือเบส จะมีผลต่ออัตราเร็วและขอบเขตของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส รวมทั้งอัตราส่วนของน้ำต่อซิลิกอน ($\text{H}_2\text{O}:\text{Si}$) มีผลต่อความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากน้ำและอัลคอกไซด์ไม่สามารถรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ (Immiscible) จึงต้องเติมตัวทำละลาย (Solvent) อื่นช่วย (Homogenizing agent) เช่น แอลกอฮอล์ ให้เกิดการรวมตัวได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม เจลสามารถเกิดขึ้นจากการผสมกันของน้ำและอัลคอกไซด์ได้โดยไม่ต้องเติมตัวทำละลายเพราะแอลกอฮอล์สามารถเกิดขึ้นได้จากผลพลอยได้ (By-product) ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอยู่แล้ว ดังนั้น อัตราส่วนของน้ำต่อซิลิกอนนั้นมีอัตราส่วนที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 1 ถึง 50 และ ค่าความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 7.0 โมลาร์ ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้ในการศึกษาและสังเคราะห์จากกระบวนการโซลเจล ตัวอย่างเฟสไดอะแกรม 3 ภูมิภาคของเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต น้ำ และ 95% แอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเฟสไดอะแกรม 3 ภูมิภาคของเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต น้ำ และ 95% แอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ปฏิกิริยาควบแน่น

ปฏิกิริยาควบแน่นเป็นการเชื่อมโยงโมเลกุลเล็กๆ ต่อกันให้ใหญ่ขึ้นด้วยพันธะซิลอกเซน (Siloxane bonding) ในสภาวะเบสจะเกิดเป็นเจลได้เพิ่มขึ้น โดยปฏิกิริยาการควบแน่นจะเกิดอย่างต่อเนื่องที่ค่า pH 2 ถึง 8 การละลาย (Dissolution) จะเพิ่มขึ้น ส่วนการแข็งตัว (Gelation) จะไม่เกิดขึ้นและในช่วงค่า pH > 8 การละลายจะลดลง ส่วนการแข็งตัวเป็นเจลจะเพิ่มขึ้น ผลของค่า pH ที่มีผลต่ออัตราการละลายและเวลาในการเกิดเจลแสดงในรูปที่ ๔.4



รูปที่ ๔.4 ผลของค่า pH ต่ออัตราการละลายและเวลาในการเกิดเจล [5]

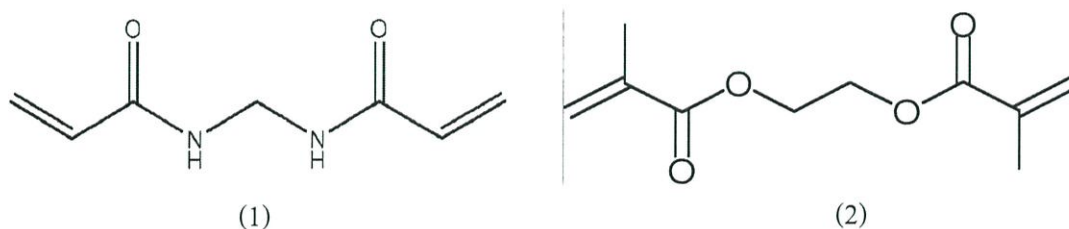
2. ไฮโดรเจล (Hydrogels)

เจลอุ้มน้ำหรือไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงข่าย (Network) มีคุณลักษณะพิเศษคือเมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดการบวมตัวและสามารถยึดนํ้าเอาไว้ในโครงสร้างโดยยังคงรักษาสภาพโครงข่ายสามมิติไว้ได้ Poly(*N*-isopropylacrylamide) เป็นไฮโดรเจลที่เปลี่ยนแปลงขนาดได้ตามอุณหภูมิ มีอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้พอลิเมอร์ไม่รวมตัวกับน้ำ (Lower Critical Solution Temperature; LCST) เท่ากับ 32 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า LCST พอลิเมอร์สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดีกับน้ำจึงแสดงพฤติกรรมการบวมตัว ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่า LCST พอลิเมอร์มีสมบัติไม่ชอบน้ำจึงแสดงพฤติกรรมการหดตัว มีการนำไปใช้งานที่หลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวดูดซับไอออนโลหะหนักเช่นเซอร์ วัสดุควบคุมการปลดปล่อยยา และโครงสร้างวิศวกรรมสำหรับการสร้างเนื้อเยื่อ เป็นต้น และโดยส่วนใหญ่มีการเตรียมเจลอุ้มน้ำผ่านปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระร่วมกับการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง (Free-radical crosslinking copolymerization) ในระบบเอเคียส หรือผ่านปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบเหนียวน้ำ ด้วยรังสีร่วมกับการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง (Radiation-induced simultaneous polymerization and crosslinking) ซึ่งเป็นการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ จึงยากแก่การนำไปขึ้นรูปวัสดุใน

รูปแบบที่หลากหลาย เนื่องจากต้องควบคุมสภาวะการเกิดพอลิเมอร์และการเชื่อมขวางให้อยู่ภายใต้บรรยากาศแก๊สในโตรเจนตลอดเวลาเพื่อกำจัดแก๊สออกซิเจนที่สามารถทำลายการเกิดสายโซ่พอลิเมอร์ได้ ดังนั้นการเตรียมเจลอุ้มน้ำโดยให้ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางเกิดขึ้นหลังจากการเกิดพอลิเมอร์แล้ว จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ โดยมีการใช้สารเชื่อมขวาง ความร้อน ความดัน หรือรังสี ที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ได้ ซึ่งวิธีที่สามารถทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อน คือการใช้ความร้อนทำให้เกิดการเชื่อมขวางด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกกับไฮดรอกซิล เช่น การเตรียมเจลอุ้มน้ำ poly(styrene-co-maleic anhydrides) กับ poly[acrylamide-co-(maleic acid)] ได้จากการเติมสารเชื่อมขวางไดเอทิลีนไกลคอล แล้วให้ความร้อน เป็นต้น

การสังเคราะห์ไฮโดรเจล

มอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจะต้องมีหมู่ที่แสดงความเป็นไฮโดรฟิลิกอยู่ในโครงสร้าง เช่น -OH, -NH₂, -COOH และ -SO₃H เป็นต้น เพื่อที่จะทำให้ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถดูดซับน้ำได้ ตัวอย่างมอนอเมอร์ที่มีการนำไปสังเคราะห์เป็นไฮโดรเจล เช่น 2-ไฮดรอกซีเอทิล เมทาคริเลต อะคริลาไมด์ และ AMPS เป็นต้น ในส่วนของตัวเชื่อมต่อสายโซ่จะต้องมี C=C อย่างน้อยสองตำแหน่งอยู่ในโครงสร้าง เพื่อให้โครงสร้างของไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์เทอร์โมเซต (Thermoset polymer) ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถดูดซับและพองตัวได้ในน้ำ แต่ไม่ละลายในตัว ทำละลายทุกชนิด ตัวอย่างตัวเชื่อมต่อสายโซ่ที่นิยมใช้ เช่น นาโนเมตร BA และ EGDM เป็นต้น



รูปที่ ๓.5 โครงสร้างทางเคมีของตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (1) *N,N'*-methylene-bis-acrylamide, NMBA และ (2) ethyleneglycol dimethacrylate, EGDM

การสังเคราะห์ไฮโดรเจลส่วนใหญ่จะเกิดผ่านปฏิกิริยาฟรีเรดิคัลพอลิเมอไรเซชันในสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่เรดิคัลนั้นจะมี 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation) ขั้นแผ่ขยาย (Propagation) และขั้นสิ้นสุด (Termination) ซึ่งก่อนที่จะเกิดขึ้นเริ่มต้นจะต้องมีตัวริเริ่มเป็นตัวช่วยให้เกิดขึ้นเริ่ม การเกิดฟรีเรดิ

คอลในปฏิกิริยาเคมีอินทรีย์ส่วนใหญ่ซึ่งก่อนที่จะเกิดผลิตภัณฑ์มักจะเกิดผ่านตัวกลางก่อนซึ่งตัวกลางนี้จะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่เรียกว่าฟรีแรดิคอล การทำให้เกิดฟรีแรดิคอลมีหลายวิธีด้วยกัน เช่นการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal initiation) ของสารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ หรือไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ปริมาณตัวริเริ่มที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันน้อยมากเพียง 0.1-1.0% ของน้ำหนักมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มที่ใช้กันทั่วไปมีดังนี้ เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) 2,2'-เอโซบิสไอโซบิวทิลโลไนไตรล์ (Azobisisobutyronitrile, AIBN) และ เปอร์ซัลเฟต (Persulphates) เป็นต้น

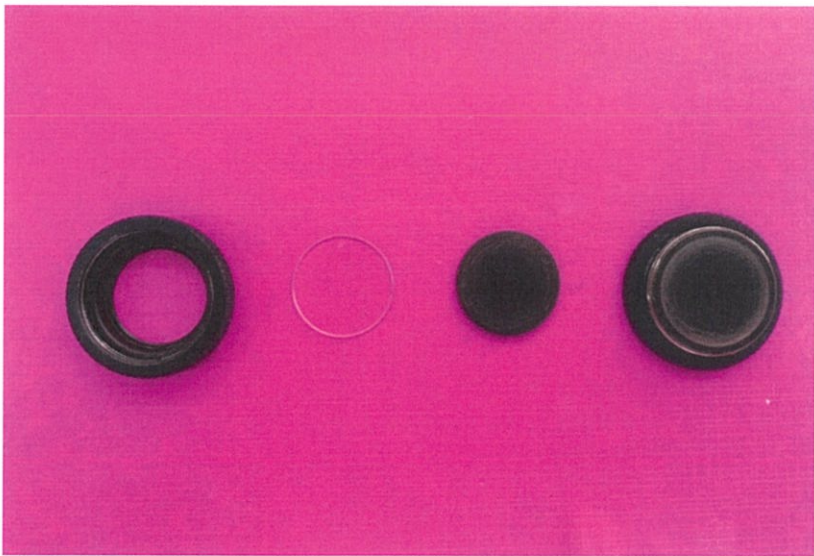
สารประกอบเอโซ (Azo compound) สามารถทำให้สลายตัวได้ทั้งโดยความร้อนและแสง (Photoinitiation) ตัวอย่างตัวริเริ่มที่สามารถแตกตัวได้โดยวิธีนี้คือ AIBN เป็นต้น นอกจากการเกิดฟรีแรดิคอลจะได้อาจจากการสลายตัวทางความร้อนและแสงแล้ว ยังเกิดได้จากปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redoxinitiation) โดยตัวรีดิวซ์ ซึ่งตัวรีดิวซ์ที่ใช้มักจะเป็นพวกเกลือของเหล็กและโลหะอื่นๆ ซึ่งกรณีนี้เรียกว่า Accelerator ใส่งไปร่วมกับตัวริเริ่ม ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และให้ฟรีแรดิคอลไปทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์แล้วได้พอลิเมอร์ ลักษณะพิเศษของปฏิกิริยาที่เกิดเริ่มต้นโดยรีดอกซ์นี้คือจะมีพลังงานกระตุ้นต่ำมาก เพราะฉะนั้นปฏิกิริยาที่เกิดเริ่มต้นโดยรีดอกซ์สามารถทำได้ ที่อุณหภูมิต่ำๆ และวิธีสุดท้ายจะอาศัยพลังงานจากรังสีอิเล็กตรอน (Electroinitiation) ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างออกไปจากการริเริ่มที่ได้อธิบายผ่านมา กล่าวคือในวิธีนี้จะไม่มีการใช้ตัวริเริ่มและตัวเชื่อมต่อยาโซ ซึ่งการเกิดพอลิเมอไรเซชันและการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่จะเกิดขึ้นจากการแตกตัวของ C=C ในมอนอเมอร์เป็นแรดิคอลโดยอาศัยพลังงานจากรังสีอิเล็กตรอน

ภาคผนวก จ

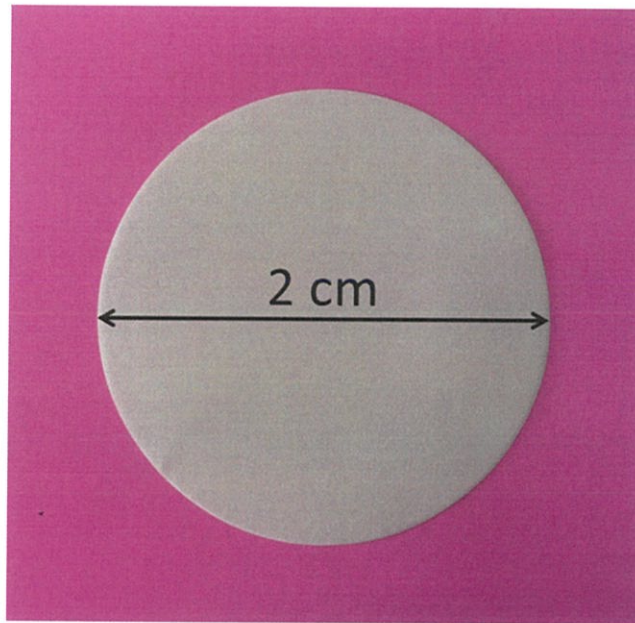
เครื่อง Fluorometer และ Solid Sample Holder



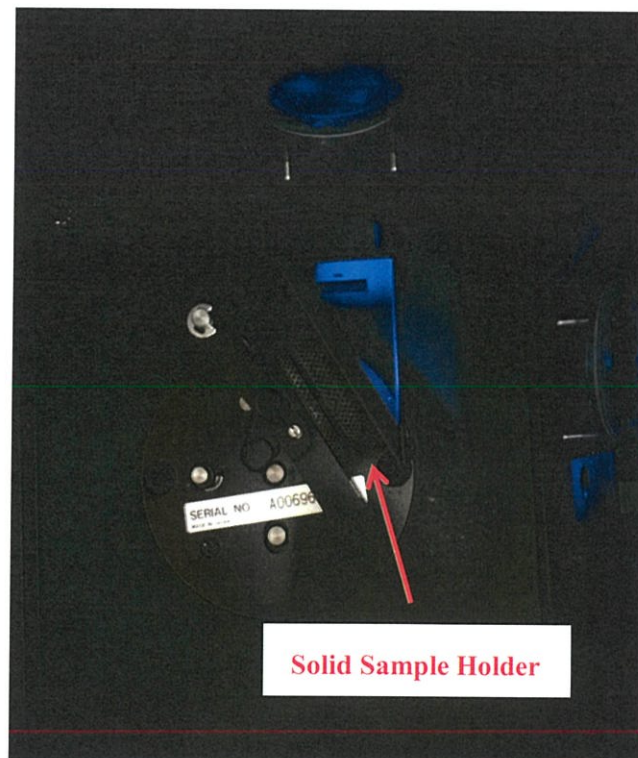
รูปที่ จ.1 ภาพแสดง Solid Sample Holder



รูปที่ จ.2 ภาพแสดงส่วนประกอบของ Solid Sample Holder



รูปที่ จ.3 ภาพแสดงขนาดกระดาษกรองที่ตัดไว้สำหรับใส่ Solid Sample Holder



รูปที่ จ.4 ภาพแสดงการวาง Solid Sample Holder สำหรับการตรวจวัดการเรืองแสง