



โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ อุปกรณ์ตรวจวัดโลหะด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงสี
Paper-Based Device for Colorimetric Detection of Metals

ชื่อนิสิต นาย อาทิตย์ แก้วอำไพ

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุปกรณ์กระดาษตรวจวัดโลหะด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงสี
Paper-Based Device for Colorimetric Detection of Metals



โดย

นาย อาทิตย์ แก้วอำไพ

ภาควิชาเคมี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

เรื่อง อุปกรณ์กระตาดตรวจวัดโลหะทรานซิชันด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงสี

โดย นาย อาทิตย์ แก้วอำไพ

ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

.....*ไสวดี ไชยอนันต์สุจริต*.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสวดี ไชยอนันต์สุจริต)

.....*บุษยรัตน์ ธรรมพัฒน์*.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุษยรัตน์ ธรรมพัฒน์)

.....*ภัสสรพล งามอุโฆษ*.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ภัสสรพล งามอุโฆษ)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

วันที่ เดือน พ.ศ.

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ

ดีมาก

ดี

พอใช้

ชื่อโครงการ อุปกรณ์กระดาศตรวจวัดโลหะด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงสี

ชื่อนิสิตในโครงการ นาย อาทิตย์ แก้วอำไพ เลขประจำตัว 5533174923

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. บุษยรัตน์ ธรรมพัฒน์กิจ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการตรวจวัดโลหะไอออนด้วยอุปกรณ์กระดาศ 3 มิติ ร่วมกับเทคนิคเปลี่ยนแปลงสี โดยใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์เพียงมือถือในกล่องควบคุมแสงแล้วถ่ายภาพดูค่า R G B ด้วยโปรแกรม image J ซึ่งเป็นการเฉลี่ยสีบนอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และตัวอุปกรณ์กระดาศแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งเป็นส่วนเคลือบไซท์ที่เป็นส่วนไฮโดรโฟบิกและ อีกส่วนเป็น กระดาศธรรมดาซึ่งเป็นส่วนไฮโดรฟิลิก การไหลของสารละลายจะไหลไปตามทางที่ออกแบบโดยอาศัยปัจจัยต่างๆดังนี้ การแพร่ แรงโน้มถ่วง และ แรงคาปิลลารี ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบหาความเลือกจำเพาะของสารสีย้อมกับ ไอออนโลหะบนกระดาศหลากหลายชนิดได้แก่ Rhodamine B derivative 1 (Rho_B 1), Rhodamine B derivative 2 (Rho_B 2), Dimethylglyoxime (DMG), Carminic acid (CA) and Eriochrome black T (EBT) โดยได้เลือกสารสีย้อม CA และ EBT เพราะสีย้อมทั้ง 2 สามารถเปลี่ยนแปลงสีของไอออนโลหะได้แตกต่างกัน ในการตรวจสอบไอออนของโลหะโดยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงสีพบว่าให้ค่า R G B ที่แตกต่างกันกับไอออนโลหะแต่ละชนิด จึงได้นำค่าที่ได้มาประยุกต์กับหลักการวิเคราะห์ข้อมูลสำคัญของ PCA ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ พบว่าสารสีย้อม CA และ EBT ให้ประสิทธิภาพสูงในการแยกโลหะ Al^{3+} Zn^{2+} Ni^{2+} Fe^{3+} Mn^{2+} และ Pb^{2+} ได้

คำสำคัญ : หลักการวิเคราะห์ข้อมูลสำคัญ, เทคนิคการเปลี่ยนแปลงสี, อุปกรณ์กระดาศ, ตรวจวัดไอออนโลหะ, สีย้อม

Title Paper-Based Device for Colorimetric Detection of Metals

Student name Mister Atid Kaewomphai

Student ID 5533174923

Advisor name Assist. Professor Dr. Boosayarat Tomapatanaget

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic year 2015

Abstract

In this study, metal cation detection by using 3 dimension paper-based devices with colorimetric technique was investigated. This method utilized only a mobile phone device in light control box. Metal cations were analyzed by using image J program providing the R G B values of the picture. Paper based device consists of two parts. One is hydrophobic part which is coated by wax and another is clean paper. Direction of flow solution is based on diffusion, gravity force and capillary force. Among the Rhodamine B derivative 1 (**Rho_B 1**), Rhodamine B derivative 2 (**Rho_B 2**), Dimethylglyoxime (**DMG**), Carminic acid (**CA**) and Eriochrome black T (**EBT**) dyes, **CA** and **EBT** were selected as dyes for detection of metal cations in this experiment due to its ability to change the color in various metal cation. The color changes of **CA** and **EBT** dyes with various metal cations giving different R G B values can be applied to discriminate among metal cations by using principle component analysis (PCA). The results indicated that **CA** and **EBT** offer effective discrimination of Al^{3+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} and Pb^{2+} .

Keywords : Principle component analysis, Colorimetric detection, paper-based device, Metal cation detection ,Dyes

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุษยรัตน์ ธรรมพัฒน์กิจ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความรู้ ความเมตตา และ แนวทางในการทำงานวิจัย ทั้งยังเสียสละเวลาในการให้ความช่วยเหลือในการตรวจ เล่ม ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณศ วงษ์ระวี ที่ช่วยสอนการวิเคราะห์ข้อมูล R G B โดยการใช้ หลักการวิเคราะห์ข้อมูลสำคัญ PCA และให้คำแนะนำต่างๆในการทำข้อมูล

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภณวิไล ไซยอนันต์สุจริต และ อาจารย์ ดร.ภัสสรณ์พล งามอุโฆษ ที่เสียสละเวลาอันมีค่าในการตรวจทานและแก้ไขรายงาน ตลอดทั้งให้คำชี้แนะ และให้เกียรติเป็นคณะกรรมการในการ สอบวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ พี่ๆในหน่วยวิจัย SCRUI ที่ให้ความรู้ในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีชนิดต่างๆพร้อมทั้ง คำปรึกษา คำแนะนำ ในการทำงานวิจัย และช่วยในการให้คำแนะนำในการเขียนเล่มงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ โครงการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ที่ให้อุปกรณ์และสารเคมีที่จำเป็น ทำให้งานวิจัยสำเร็จผ่านไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอระลึกในความกรุณาของทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	ค
Abstract	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2 การสืบค้นข้อมูล	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	6
2.1 เคมีซูพราโมเลกุลาร์ (supramolecular chemistry).....	6
2.2 ตัวรับรู้ทางเคมี (Chemical sensor)	7
2.3 สีย้อม (Dyes).....	8
2.4 ทฤษฎีแสง	10
2.5 เทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสี (Colorimetric technique).....	10
2.6 การวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญ (principle component analysis ; PCA).....	11

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 การทดลอง.....	14
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	14
3.1.1 เครื่องมือ.....	14
3.1.2 อุปกรณ์.....	14
3.2 สารเคมี.....	14
3.3 วิธีการทดลอง.....	16
3.3.1 การเตรียมสารละลาย.....	16
3.3.2 การออกแบบกระดาษ.....	18
3.3.3 การผลิตอุปกรณ์กระดาษ.....	21
3.3.4 สภาพที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.3.5 การถ่ายภาพที่ได้จากการทดลอง.....	26
3.3.6 วิธีการวิเคราะห์ค่า R G B ทำโดยการใช้โปรแกรม image j.....	26
3.3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล R G B ด้วยเทคนิค PCA.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	31
4.1 การหาความเลือกจำเพาะของสารสีย้อมชนิดต่างๆ โดยใช้อุปกรณ์กระดาษแบบที่ 1.....	31
4.1.1 ความเลือกจำเพาะของ EBT ที่ pH ต่างๆ.....	31
4.1.2 ความเลือกจำเพาะของ CA.....	33
4.1.3 ความเลือกจำเพาะของ DMG.....	34
4.1.4 Selectivity ของ Rho_B 1.....	35
4.1.5 ความเลือกจำเพาะของ Rho_B 2.....	36
4.2 การทดลองกับอุปกรณ์กระดาษแบบที่ 2.....	37
4.2.1 ผลการทดลองของ DMG กับ Ni^{2+}	37
4.2.2 ผลการทดลองของ Rho_B 1 กับ Cu^{2+} , Co^{2+} และ Ni^{2+}	37

4.3 การทดลองกับอุปกรณ์กระดาษแบบที่ 3.....	38
4.3.1 การทดลองหาปริมาณของโลหะที่จะใช้ในกระดาษแบบที่ 3	38
4.3.2 การทดลองสลับตำแหน่งของสีของ EBT และ CA.....	38
4.3.3 ผลการทดลองการไหลระหว่างชั้นของสีของ CA และ EBT	39
4.4 การทดลองกับอุปกรณ์กระดาษแบบที่ 4.....	39
4.4.1 ผลการทดลองของกระดาษแบบที่ 4	39
4.4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า R G B ด้วย โปรแกรม image J.....	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	47
เอกสารอ้างอิง.....	48
ประวัติผู้วิจัย.....	1



ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.2.1 แสดงการตัดแปรพื้นผิวของ ซิลิกาเจลด้วย EBT	2
รูปที่ 1.2.2 แสดงการไหลของสารละลายในการตรวจวัดด้วยเครื่อง precipitation-spectrophotometer	2
รูปที่ 1.2.3 แสดงโครงสร้าง Compound 4	3
รูปที่ 1.2.4 แสดงการเกิดสีของ L^3 กับโลหะ Al^{3+} โดยการเปิดวง Spirolactam	3
รูปที่ 1.2.5 แสดงส่วนต่างๆของอุปกรณ์กระดาษ	4
รูปที่ 1.2.6 แสดงการเกิดแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ DNA ที่ติดสาย Cys5 กับโลหะ Ag^+ และ Hg^{2+}	4
รูปที่ 2.2.1 แสดงส่วนประกอบของตัวรับรู้ทางเคมี	7
รูปที่ 2.3.1 แสดงรูปแบบในการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นกับโมเลกุลอินทรีย์	8
รูปที่ 2.3.2 แสดงปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงของส่วนที่เกิดสี	9
รูปที่ 2.4.1 แสดงแสงสีต่างๆที่เกิดจากการผสมของแม่แสงสี	10
รูปที่ 2.6.1 แสดงกระบวนการวิเคราะห์ด้วยหลักการของการวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญ (PCA)	12
รูปที่ 2.6.2 แสดง PCA ในการลดตัวแปรของข้อมูลเปลี่ยนเป็นเวกเตอร์ของสกออร์	12
รูปที่ 2.6.3 แสดงตัวอย่างในการทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย PCA	13
รูปที่ 3.3.2.1.1 แสดงกระดาษรูปแบบที่ 1	18
รูปที่ 3.3.2.2.1 แสดงกระดาษรูปแบบที่ 2	19
รูปที่ 3.3.2.3.1 แสดงกระดาษรูปแบบที่ 3	20
รูปที่ 3.3.2.4.1 แสดงกระดาษรูปแบบที่ 4	21
รูปที่ 3.3.4.2.1.1 แสดงการใส่สารในชั้นต่างๆของกระดาษแบบที่ 2 สีย้อม DMG	22
รูปที่ 3.3.4.2.1.2 แสดงการใส่สารในชั้นต่างๆของกระดาษแบบที่ 2 สีย้อม Rho_B 1	23
รูปที่ 3.3.3.3.1 แสดงการใส่สารในชั้นตรวจวัดของกระดาษแบบที่ 3 จากการหาปริมาณของโลหะที่ใช้	24
รูปที่ 3.3.4.3.1 แสดงกระดาษการทดลองการไหลระหว่างชั้นของสีย้อม	24
รูปที่ 3.3.4.4 แสดงถึงตำแหน่งต่างๆที่หยดสารละลายในการทดลองของกระดาษแบบที่ 4	25
รูปที่ 3.3.5.1 แสดงรูปกล่องควบคุมแสง	26
รูปที่ 3.3.6.1 แสดงโปรแกรม Image J	26
รูปที่ 3.3.6.2 แสดงการล้อมรอบตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัดสี	27
รูปที่ 3.3.6.3 แสดงการใช้คำสั่งในการหาค่า R G B ของพื้นที่ที่ต้องการตรวจวัด	27
รูปที่ 3.3.6.4 แสดงตารางค่าสีที่ทำการวัด	27
รูปที่ 3.4.5.2 แสดงการเริ่มใช้งานโปรแกรม multibase	28
รูปที่ 3.4.5.3 แสดงการเตรียมข้อมูลของโปรแกรม multibase	28
รูปที่ 3.4.5.4 แสดงเตรียมข้อมูลของโปรแกรม multibase	29
รูปที่ 3.4.5.5 แสดงข้อมูลที่ได้จากการเตรียมโดยโปรแกรม multibase	29

รูปที่ 3.4.5.6	แสดงการใช้โปรแกรม mutibase	30
รูปที่ 3.4.5.7	แสดงการเลือกจำนวนแกน PC	30
รูปที่ 4.1.1	แสดงการเกิดสารประกอบระหว่าง EBT กับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ	32
รูปที่ 4.1.2	แสดงการเกิดสารประกอบระหว่าง CA กับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ	33
รูปที่ 4.1.3	แสดงการเกิดสารประกอบระหว่าง DMG กับ Ni^{2+}	34
รูปที่ 4.1.4	แสดงการเกิดสารประกอบระหว่าง Rho_B 1 กับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ	35
รูปที่ 4.1.5	แสดงการปิดวง spiriolactam ของสารเชิงซ้อนบนอุปกรณ์กระดาษแบบที่ 1	36
รูปที่ 4.2.2.1	แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเมื่อใส่ Cu^{2+}	37
รูปที่ 4.3.2	แสดงผลการทดลองจากการสลับตำแหน่งของ EBT กับ CA	38
รูปที่ 4.3.3.1	แสดงผลการทดลองการไหลย้อนกับระหว่างชั้นของสารสีย้อมในชั้นต่างๆ	39
รูปที่ 4.4.2.1	แสดงผลจากการวิเคราะห์ PCA ของสารสีย้อม CA	40
รูปที่ 4.4.2.2	แสดงผลจากการวิเคราะห์ PCA ของสารสีย้อม EBT	41
รูปที่ 4.4.2.3	แสดงผลจากการวิเคราะห์ PCA ของสารสีย้อม CA และ EBT	42

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.2.1 แสดงการวิเคราะห์ของโลหะ Fe^{2+} Cu^{2+} Ni^{2+} และ Cr^{6+}	4
ตารางที่ 3.2.6.1 โครงสร้าง สูตรโมเลกุลและมวลโมเลกุลของสีย้อมที่ใช้ในการศึกษา	15
ตารางที่ 3.3.1.3 แสดงปริมาณของโลหะชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	17
ตารางที่ 3.3.1.5 แสดงวิธีการเตรียมสีย้อมชนิดต่างๆ.....	18
ตารางที่ 3.3.4.1 แสดงปริมาณการใช้สีย้อมชนิดต่างๆในการหาความเลือกจำเพาะ	22
ตารางที่ 4.1.1 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงสีของ EBT กับ ไอออนของโลหะ ที่ pH ต่างๆ	16
ตารางที่ 4.1.2.1 แสดงการเลือกจำเพาะของ CA ที่ความเข้มข้น 1 mg/mL ต่อไอออนของโลหะ	33
ตารางที่ 4.1.3.1 แสดงการเลือกจำเพาะของ DMG ที่ความเข้มข้น 1 mg/mL ต่อไอออนของโลหะ.....	34
ตารางที่ 4.1.4.1 แสดงการเลือกจำเพาะของ Rho_B 1 ที่ความเข้มข้น 1 mg/mL ต่อไอออนของโลหะ.....	35
ตารางที่ 4.1.4.2 แสดงการเลือกจำเพาะของ Rho_B 1 ที่ความเข้มข้น 0.1 mg/mL ต่อไอออนของโลหะ	35
ตารางที่ 4.1.5.1 แสดงการเลือกจำเพาะของ Rho_B 2 ที่ความเข้มข้น 1 mg/mL ต่อไอออนของโลหะ.....	36
ตารางที่ 4.2.2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเมื่อใส่ Co^{2+} Cu^{2+} และ Ni^{2+}	37
ตารางที่ 4.3.1.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของไอออนโลหะชนิดต่างๆ โดยใช้ปริมาณแตกต่างกัน.....	38
ตารางที่ 4.4.1 แสดงผลการทดลองของกระดาษแบบที่ 4 กับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ กับ CA และ EBT	39

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาคผนวก

หน้า

ตารางที่ ก-1 แสดงผลการวิเคราะห์ค่า R G B ด้วยโปรแกรม image J.....50



ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ในปัจจุบันอุปกรณ์ต่างๆทางเคมีได้ถูกพัฒนาให้สามารถพกพาไปวิเคราะห์สารเคมีตามแหล่งต่างๆของสารตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ปริมาณของโลหะจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งอุปกรณ์กระดาษเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์สารเคมีได้ง่ายขึ้น เนื่องจากอุปกรณ์กระดาษสามารถผลิตได้ง่าย มีราคาถูก ย่อยสลายได้ไม่รบกวนต่อสิ่งแวดล้อม วิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว และในการวิเคราะห์จะใช้ปริมาณของสารตัวอย่างที่น้อยในระดับไมโครสเกล

ในปัจจุบันมีการใช้โลหะต่างๆในอุตสาหกรรมหากหลายชนิดเพื่อสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ การที่อุตสาหกรรมต่างๆใช้โลหะในปริมาณสูงทำให้มีโลหะบางส่วนรั่วไหลเข้าสู่สิ่งแวดล้อม โลหะหลากหลายชนิด ทำให้เป็นปัญหาใหญ่ต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์เนื่องจากโลหะหนักสามารถทำให้เกิดโรคต่างๆ ได้เช่น โรคในกลุ่มของโรกระบบประสาทและระบบการสืบพันธุ์ผิดปกติ ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิดและสามารถแทนที่โลหะสำคัญของเอนไซม์ทำให้เอนไซม์ทำงานได้น้อยลงหรือไม่ได้เลยและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชีวโมเลกุลในร่างกาย โดยกรมควบคุมมลพิษมีการกำหนดปริมาณของโลหะน้ำที่จากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมดังต่อไปนี้¹

1. สังกะสี Zn(II) ไม่เกิน 5.0 mg/L
2. เฮกซะวาเลนต์โครเมียม Cr(VI) ไม่เกิน 0.25 mg/L
3. ไตรวาเลนต์โครเมียม Cr(III) ไม่เกิน 0.75 mg/L
4. ทองแดง Cu(II) ไม่เกิน 2.0 mg/L
5. แคดเมียม Cd(II) ไม่เกิน 0.03 mg/L
6. แบเรียม Ba(II) ไม่เกิน 1.0 mg/L
7. ตะกั่ว Pb(II) ไม่เกิน 0.2 mg/L
8. นิกเกิล Ni(II) ไม่เกิน 1.0 mg/L
9. แมงกานีส Mn(II) ไม่เกิน 5.0 mg/L
10. อาร์เซนิก As(III) ไม่เกิน 0.25 mg/L
11. เซเลเนียม (Se) ไม่เกิน 0.02 mg/L
12. ปรอท (Hg) ไม่เกิน 0.005 mg/L

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

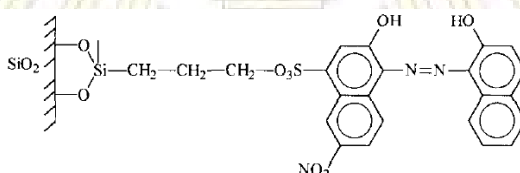
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเปลี่ยนแปลงสีเป็นเทคนิคหนึ่งในการตรวจวัดโลหะมีข้อดีคือสามารถวัดได้ง่ายทั้งพลาอุปกรณ์ต่างๆน้อย และมีค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่ำ ซึ่งเทคนิคการเปลี่ยนแปลงสีจะสามารถวัดสีได้ด้วย UV-Vis spectrophotometer ในการตรวจวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ หรือใช้การถ่ายภาพในกล่องควบคุมแสงแล้วนำไปหาค่า R G B ในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม image J

1.2 การสืบค้นข้อมูล

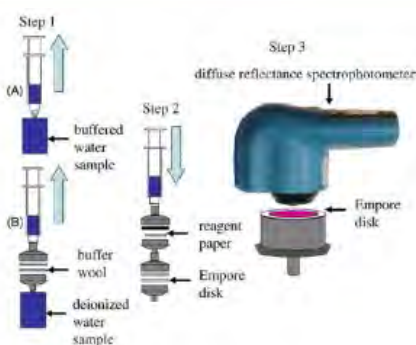
ในงานวิจัยก่อนหน้ามีการวิเคราะห์โลหะหนักโดยใช้ตัวตรวจวัดที่มีการเลือกจำเพาะกับโลหะหนักต่างๆในการตรวจวัดโลหะหนัก เช่น

ปี 1997 Mahmoud และคณะ² ได้ออกแบบและดัดแปรพื้นผิวของซิลิกาเจลด้วย Eriochrome Black T เพื่อใช้ในการแยกโลหะชนิดต่างๆ (Zn^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+}) ในการแยกสารละลายที่มีโลหะผสม 2 ชนิดออกจากกันได้ (Zn และ Mg) โดยการใช้ batch equilibrium technique



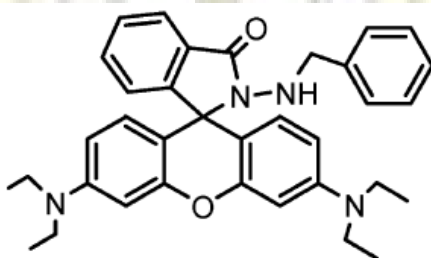
รูปที่ 1.2.1 แสดงการดัดแปรพื้นผิวของ ซิลิกาเจลด้วย EBT

ปี 2004 Gazda และคณะ³ ได้ตรวจวัดปริมาณของโลหะนิกเกิล (Ni^{2+}) ในน้ำดื่ม โดยการใช้การสกัดโลหะนิกเกิลไอออน ด้วยเฟสของแข็ง (solid phase extraction) โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Ni^{2+} และ Dimethylglyoxime ซึ่งจะเปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีชมพูและจากผลการทดลองสามารถวิเคราะห์หาปริมาณของ Ni^{2+} ได้ในช่วงความเข้มข้น 0.5 – 5.0 ppm ซึ่งใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 40 วินาที



รูปที่ 1.2.2 แสดงการไหลของสารละลายในการตรวจวัดด้วยเครื่อง precipitation-spectrophotometer

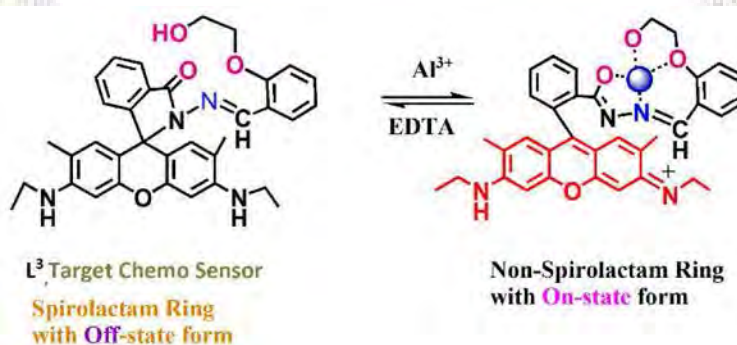
ปี 2009 Zhao และคณะ⁴ ได้สังเคราะห์ Compound 4 ที่มีฐานเป็นฟลูออเรสซินแบบปิดวง เพื่อใช้ศึกษาการตรวจจับโลหะไอออนชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลและฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโคปี ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า Compound 4 มีการเลือกจำเพาะเจาะจงต่อ Cu^{2+} ซึ่งจะมีเปลี่ยนสีของสารละลายจากไม่มีสีเป็นสีชมพูและให้ฟลูออเรสเซนซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Cu^{2+} เข้าไปจับและทำให้เกิดการเปิดวง spirolactam ทำให้ได้สารละลายสีชมพู และนอกจากนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ Cu^{2+} ได้ในช่วงความเข้มข้น $8.0 \times 10^{-7} - 1.0 \times 10^{-5}$ M โดยมีความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้คือ 3.0×10^{-7} M



รูปที่ 1.2.3 แสดงโครงสร้าง Compound 4

ปี 2011 Wang และคณะ⁵ ได้ศึกษาการตรวจจับไอออนโลหะด้วยวิธีฟลูออเรสเซนซ์ของ Carminic acid กับโลหะ lanthanum (III) ใน CTAB ไมเซลล์ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ของ Carminic acid ทำให้สามารถตรวจวัด Carminic acid ได้ในช่วง $0.01-12.31 \mu\text{g mL}^{-1}$ และมีความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้คือ 10.92 ng mL^{-1}

ปี 2014 Mahammad และคณะ⁶ ได้สังเคราะห์ L^3 ที่มีฐานเป็นโรดามีนที่อยู่ในรูปของ spirolactam ซึ่งมีการเลือกจำเพาะต่อ Al^{3+} ในสารละลาย โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายจากไม่มีสีเป็นสีชมพู และสามารถวิเคราะห์ Al^{3+} ได้โดยวิธีทางฟลูออเรสเซนซ์ และพบว่าความเข้มข้นต่ำสุดของ Al^{3+} ที่สามารถวัดได้คือ 24.8 pM

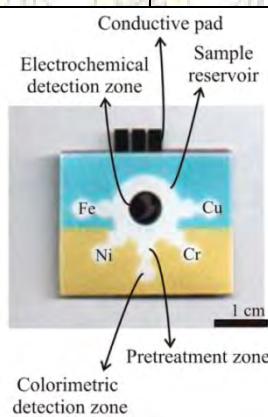


รูปที่ 1.2.4 แสดงการเกิดสีของ L^3 กับโลหะ Al^{3+} โดยการเปิดวง Spirolactam

ปี 2014 มี Rattanarat และคณะ⁷ ได้ทำอุปกรณ์กระดาษในการตรวจวัดโลหะ Fe^{2+} Cu^{2+} Ni^{2+} และ Cr^{6+} โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดและสีย้อมในการเปลี่ยนแปลงสี ในการวิเคราะห์โลหะด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงสีใช้สารสีย้อม ซึ่งมีช่วงในการวิเคราะห์และน้ำหนักต่ำสุดที่สามารถวัดได้ดังตาราง 1.2.1

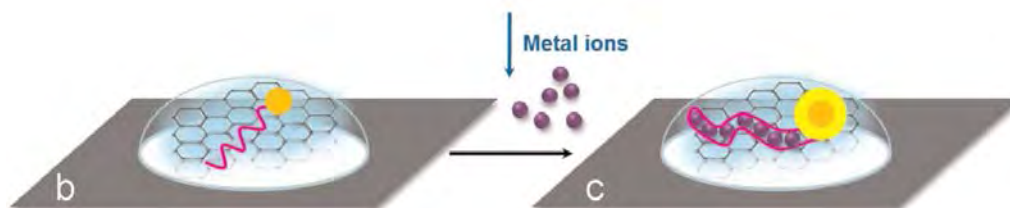
ตารางที่ 1.2.1 แสดงการใช้สารสีย้อม ช่วงการวิเคราะห์ และ น้ำหนักต่ำสุดที่สามารถวัดได้ของโลหะ Fe^{2+} Cu^{2+} Ni^{2+} และ Cr^{6+}

โลหะ	สารสีย้อม	ช่วงในการวิเคราะห์ (μg)	น้ำหนักต่ำสุดที่ สามารถวัดได้ (μg)
Fe^{2+}	1,10-phenanthroline	1.5-15.0	0.75
Cu^{2+}	Dimethylglyoxime	3.0-15.0	0.75
Ni^{2+}	Hydroxylamine	1.5-15.0	0.75
Cr^{6+}	Diphenylcarbazide	0.38-6.0	0.12



รูปที่ 1.2.5 แสดงส่วนต่างๆของอุปกรณ์กระดาษ

ปี 2015 Zhang และคณะ⁸ ได้ออกแบบอุปกรณ์กระดาษในการตรวจวัดสิ่งปนเปื้อนในอาหาร โดยใช้ดีเอ็นเอสายเดี่ยวติดด้วย Cys5 ซึ่งสามารถตรวจวัดไอออนของโลหะได้ 2 ชนิด อย่างจำเพาะเจาะจงคือ Hg^{2+} และ Ag^+ ได้โดยการวัดฟลูออเรสเซนซ์ และ Hg^{2+} มีความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้เท่ากับ 121 nM มีช่วงในการวัดอยู่ในช่วง 0-3 μM และ Ag^+ มีความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้คือ 47 nM มีช่วงในการวัดอยู่ในช่วง 0-1.75 μM



รูปที่ 1.2.6 แสดงการเกิด

แสงฟลูออเรสเซนซ์ของ DNA ที่ติดสาย Cys5 กับโลหะ Ag^+ และ Hg^{2+}

1.3 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบอุปกรณ์กระดาศสำหรับตรวจวัดโลหะหนัก
2. สามารถนำอุปกรณ์กระดาศที่สร้างได้ตรวจวัดโลหะหนักชนิดต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้อุปกรณ์กระดาศสำหรับตรวจวัดโลหะหนัก



ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เคมีซูพราโมเลกุลาร์ (supramolecular chemistry)⁹

เคมีซูพราโมเลกุลาร์ เป็นวิชาแขนงหนึ่งที่มีเนื้อหาที่น่าสนใจในหน่วยที่ใหญ่กว่าหน่วยของโมเลกุลโดยเคมีซูพราโมเลกุลาร์เป็นการศึกษาแรงกระทำระหว่างโมเลกุลแบบนอนโควาเลนต์ (non-covalent) ซึ่งมีหลากหลายชนิดดังต่อไปนี้ คือ อันตรกิริยาไอออน-ไอออน (ion-ion interactions) อันตรกิริยาไอออน-ขั้วคู่ (ion-dipole interactions) อันตรกิริยาไอออน-ขั้วคู่เหนี่ยวนำ (ion-induced dipole interactions) อันตรกิริยาขั้วคู่-ขั้วคู่เหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole interactions) อันตรกิริยาขั้วคู่-ขั้วคู่ (dipole-dipole interactions) พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) พันธะฮาโลเจน (halogen bond) แรงแผ่กระจายลอนดอน (London dispersion forces) หรืออันตรกิริยาขั้วคู่เหนี่ยวนำ-ขั้วคู่เหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole interactions) อันตรกิริยาไพ-ไพ (pi-pi interactions) โดยใช้เป็นหลักการสำคัญในการอธิบายหลักการของซูพราโมเลกุลาร์ เช่น การรวมตัวกันเองของโมเลกุล (molecular self-assembly) การพับของโมเลกุล (folding) เคมีของโมเลกุลเป้าหมายและโมเลกุลโฮสต์ (host-guest chemistry)

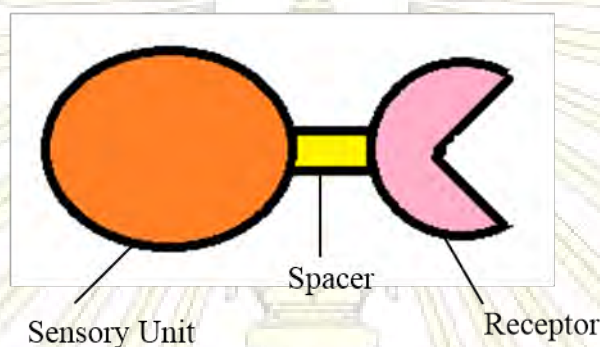
ซึ่งเคมีซูพราโมเลกุลาร์มีประโยชน์ในหลากหลายแขนงวิชา เช่น สาขาเคมี สาขาชีวเคมี สาขาฟิสิกส์ สาขาการแพทย์ สาขาวิศวกรรมศาสตร์ เนื่องจากเคมีซูพราโมเลกุลาร์เป็นวิชาที่มีพื้นฐานโดยการลอกเลียนแบบโมเลกุลจากธรรมชาติ จึงสามารถนำไปใช้ได้หลากหลายในงานทางด้านวิชาเคมี ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆได้ เช่น ด้านตัวรับรู้ทางเคมี การพัฒนายา การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา และด้านการศึกษากระบวนการทางชีววิทยา

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 ตัวรับรู้ทางเคมี (Chemical sensor)

ตัวรับรู้ทางเคมีเป็นหน้าที่ทำหน้าที่ในการตรวจวัดโมเลกุลเป้าหมาย โดยทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณให้สามารถตรวจวัดได้โดยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ โดยการวัดในเชิงปริมาณ (quantitative) และ เชิงคุณภาพวิเคราะห์ (qualitative)

ตัวรับรู้ทางเคมีประกอบด้วย 3 ส่วน คือ



รูปที่ 2.2.1 แสดงส่วนประกอบของตัวรับรู้ทางเคมี

1. ส่วนที่ใช้จับโมเลกุล (receptor) เป็นส่วนที่ถูกออกแบบให้จำเพาะเจาะจงกับโมเลกุลเป้าหมาย
2. ส่วนให้สัญญาณ (sensory unit) เป็นส่วนที่แปลงสัญญาณเมื่อเกิดการจับกันระหว่างโมเลกุลเป้าหมายและตัวรับรู้ทางเคมี ทำให้เกิดเป็นสัญญาณขึ้นมาในรูปของสัญญาณที่สามารถวัดได้
3. ส่วนเชื่อมต่อ (spacer) เป็นส่วนเชื่อมระหว่าง ส่วนให้สัญญาณและส่วนที่ใช้จับโมเลกุลเป้าหมาย

สมบัติของตัวรับรู้ทางเคมีประกอบด้วย

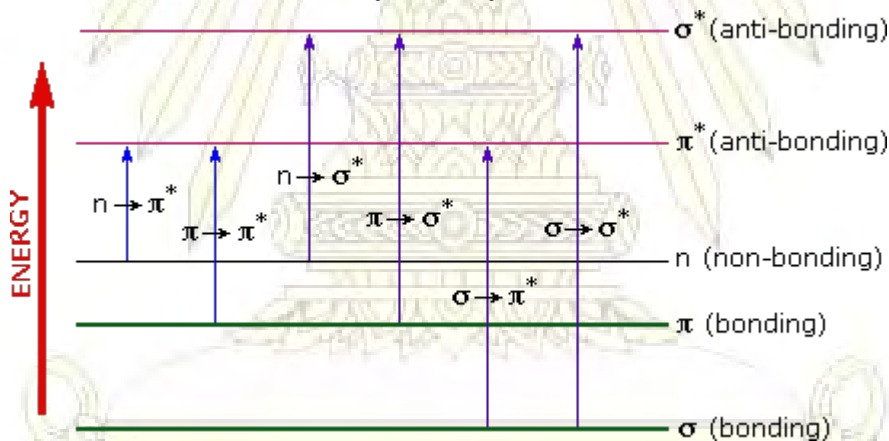
1. ประสิทธิภาพในการแปลงสัญญาณทางเคมีเป็นสัญญาณที่ตรวจวัด
2. ความจำเพาะเจาะจง
3. ความไวในการตรวจวัด

ตัวรับรู้ทางเคมีในการตรวจวัดไอออนของโลหะ

ในปัจจุบันการคัดเลือกและการตรวจวัดไอออนโลหะโดยใช้ตัวรับรู้ทางเคมีได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อตรวจวัดไอออนของโลหะหลากหลายชนิดที่เป็นพิษแก่สิ่งแวดล้อมและมนุษย์ ในงานวิจัยก่อนหน้ามีเป้าหมายในการออกแบบและพัฒนาโมเลกุลตรวจวัดให้สามารถตรวจวัดโลหะไอออนได้อย่างจำเพาะเจาะจงโดยมีทั้งงานวิจัยที่วิเคราะห์โลหะโดยใช้ฟลูออเรสเซนซ์ และการเปลี่ยนแปลงสี

2.3 สีย้อม (Dyes).¹⁰

สีย้อมเป็นโมเลกุลของสารอินทรีย์ซึ่งในโมเลกุลประกอบไปด้วย pi-electrons หรือ non-bonding electron ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต หรือช่วงความยาวคลื่นของแสงขาวที่สามารถมองเห็นได้ โดยโครงสร้างของโมเลกุลจะแสดงจำนวนช่วงความยาวคลื่นที่สอดคล้องกัน โครงสร้างของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันจะสามารถดูดกลืนแสงได้ที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน โมเลกุลของสารอินทรีย์หลากหลายโมเลกุลจะมีระบบไพคอนจูเกต (Pi-Conjugate system) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอน การมีระบบไพคอนจูเกตที่ต่างกันจะใช้พลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนไปยังสถานะกระตุ้นไม่เท่ากัน โดยอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากพลังงานในระดับชั้นบนสุดที่มีอิเล็กตรอนอยู่ (Highest Occupied Molecular Orbital : HOMO) ไปยังระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ (Lowest Unoccupied Molecular Orbital : LUMO) ของโมเลกุล โดยอิเล็กตรอนของโมเลกุลได้รับพลังงาน อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) การดูดกลืนแสงของโมเลกุลสามารถปลดปล่อยพลังงานออกมาได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การหมุน การสั่น ฯลฯ โดยการดูดกลืนแสงของโมเลกุลที่มีระบบไพคอนจูเกตจะมีการดูดกลืนแสงสูง (strong absorptions) เมื่อพิจารณาจากระดับชั้นพลังงานในการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอน การเคลื่อนย้ายระหว่างระดับชั้นพลังของอิเล็กตรอนของสารประกอบอินทรีย์มีได้หลากหลายรูปแบบดังรูป 2.3.1

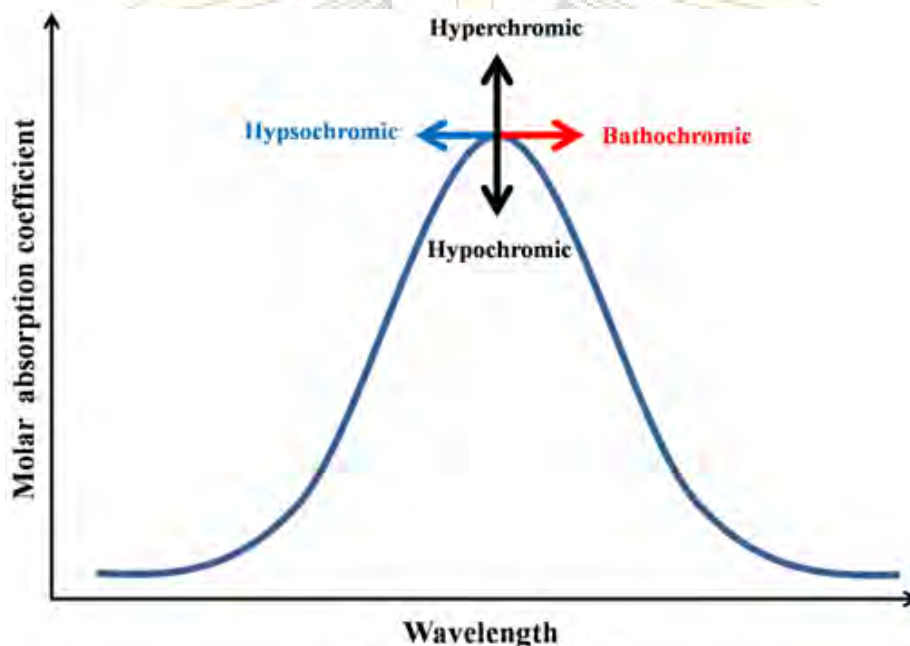


รูปที่ 2.3.1 แสดงรูปแบบในการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นกับโมเลกุลอินทรีย์

จากการศึกษาโมเลกุลที่มีระบบไพคอนจูเกตเมื่อมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน หรือ หมู่รับอิเล็กตรอน จะเกิดการถ่ายโอนประจุ (charge transfer) โดยอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยแสง และเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากส่วนให้อิเล็กตรอนไปยังส่วนที่รับอิเล็กตรอน ในการดูดกลืนแสงเป็นผลมาจากส่วนที่ให้สีที่เรียกว่าโครโมฟอร์ (Chromophore)

ปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงของส่วนที่เกิดสีมีลักษณะที่เกิดขึ้น 4 รูปแบบ

- Bathochromic (red) shift คือการที่สเปกตรัมเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น
- Hypsochromic (blue) shift คือการที่สเปกตรัมเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นลดลง
- Hyperchromic shift คือ การดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น ($\epsilon_{\max \text{ up}}$)
- Hypochromic shift คือ การดูดกลืนแสงลดลง ($\epsilon_{\max \text{ down}}$)



รูปที่ 2.3.2 แสดงปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงของส่วนที่เกิดสี

ในส่วนของสารอินทรีย์เกิดการดูดกลืนแสงแบบการถ่ายโอนประจุ (charge transfer absorption) เรียกว่าสารที่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า charge transfer complex การอธิบายพฤติกรรมของ charge transfer complex เกิดจากส่วนประกอบต่างๆ หนึ่งในส่วนประกอบของ charge transfer complex จะมีส่วนที่ให้อิเล็กตรอนและส่วนรับอิเล็กตรอน การดูดกลืนแสงเกิดจากการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนจากส่วนที่ให้อิเล็กตรอนไปยังส่วนที่รับอิเล็กตรอน นอกจากนี้ส่วนของระบบคอนจูเกตมีส่วนสำคัญในการออกแบบของสารเคมีที่จะทำให้เกิดสีเมื่อทำปฏิกิริยากับโมเลกุลเป้าหมายแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของโมเลกุล

2.4 ทฤษฎีแสง¹¹

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) โดยสามารถแบ่งตามความยาวคลื่นได้หลายชนิด แสงที่สามารถมองเห็นได้มีความยาวคลื่นในช่วง 400-700 นาโนเมตร มนุษย์สามารถตอบสนองกับแสงได้โดยการวิเคราะห์ของสมอง ซึ่งจะสามารถรับรู้ตำแหน่ง ทิศทาง และ ความเข้มของแสง แม่แสงจะมีอยู่ 3 แสง คือแสงสีแดง แสงสีน้ำเงิน และแสงสีเขียว



รูปที่ 2.4.1 แสดงแสงสีต่างๆที่เกิดจากการผสมของแม่แสงสี

โดยที่

แสงสีแดง ผสมกับแสงสีน้ำเงิน	จะได้แสงสีม่วง
แสงสีแดง ผสมกับแสงสีเขียว	จะได้แสงสีน้ำตาล
แสงสีน้ำเงิน ผสมกับแสงสีเขียว	จะได้แสงสีเขียวอ่อน
แสงสีแดงผสมแสงสีน้ำเงินผสมกับแสงสีเขียว	จะได้แสงสีขาว

2.5 เทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสี (Colorimetric technique)¹²

เป็นเทคนิคในการตรวจสอบสารเคมีจากการเปลี่ยนแปลงของสีซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพสามารถทำได้โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของสีสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณสามารถทำได้โดยการวัดความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนมีการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นตรงตามความเข้มข้น สำหรับเทคนิคการตรวจวัดโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสีมีข้อดีคือ ง่ายต่อการวิเคราะห์ รวดเร็ว และราคาถูก

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 การวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญ (principle component analysis ; PCA)¹³

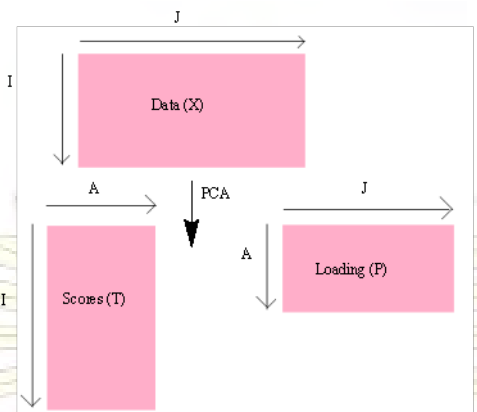
หลักการของการวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญคือการดำเนินการทางด้านสถิติในการลดข้อมูลในหลากหลายมิติโดยการวิเคราะห์จากหลากหลายปัจจัยระหว่างข้อมูล เมื่อเรีวี่นี้มีก็นำหลักการของการวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายแขนง เช่น การจดจำใบหน้า และการจดจำสีทางเคมี หลักการของการวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญเป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้กันอย่างมากในเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีและได้รับการยกย่องว่าเป็นเทคนิคที่เปลี่ยนแปลงการวิเคราะห์ข้อมูลทางเคมี เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่ายที่จะสกัดข้อมูลที่มีประโยชน์จากข้อมูลเริ่มต้นเมื่อถูกลดข้อมูลลง หนึ่งในเป้าหมายของเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีคือการได้รับ การทำนายข้อมูล หลังจากนำข้อมูลทั้งหมดมาดำเนินการด้วย หลักการของการวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญ เช่น ไอออนของโลหะในสารละลายที่ให้สี R G B ที่แตกต่างกัน สามารถสร้างความสัมพันธ์กันโดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญ โดยการนำกระบวนการการเปลี่ยนแปลงทางคณิตศาสตร์ principle component (PC) มาใช้ PC คือ เซตของตัวแปรที่ขยายจำนวนมากที่สุดของตัวแปรในข้อมูลและทุก PC ของข้อมูลจะตั้งฉากกัน ในเมทริกทอมสามารถเขียนได้ดังนี้

$$X=T \cdot P + E$$

เมื่อ

- X คือ เมทริกของข้อมูลเริ่มต้น
- T คือ สกอร์เมทริกซ์ (score matrix)
- P คือ โหลดดิ่งเมทริกซ์ (loading matrix)
- E คือ เมทริกซ์ของความคลาดเคลื่อน

ในการคำนวณสกอร์และโหลดดิ่ง เมทริกซ์ ถ้าเมทริกข้อมูลเริ่มต้นมีจำนวน I ตัวอย่าง และ J ตัวแปร PCs คือ การคำนวณข้อมูลทำให้ปริมาณของตัวแปรเพียงพอในการอธิบาย ซึ่งถ้าจำนวนของ PCs แสดงด้วย A ดังนั้น จำนวน component ที่สูงที่สุดจะเท่ากับ I ถ้า J มากกว่า I แต่ในกรณี I มากกว่า J จำนวนมิติของ T จะเป็น IXJ จำนวนมิติของ P จะเป็น AXJ เมื่อเมทริก: N T และ P คือ ส่วนรวมของหลากหลายเวกเตอร์ที่เป็นส่วนหนึ่งของ PC โดย เวกเตอร์สกอร์ และ เวกเตอร์โหลดดิ่งแรก เรียกว่า ไอแกนเวกเตอร์ (eigenvector) ของ PC แรก



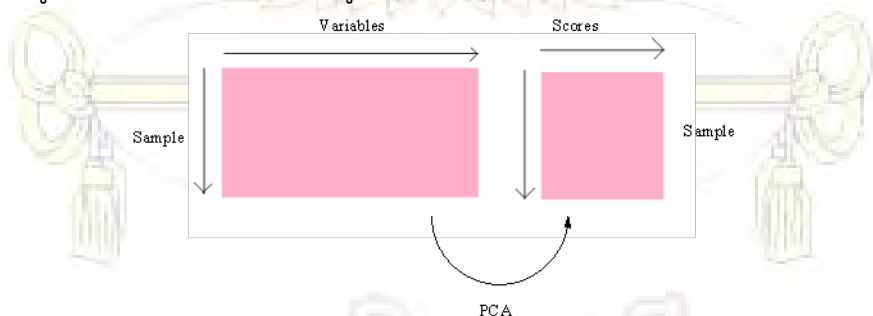
รูปที่ 2.6.1 แสดงกระบวนการวิเคราะห์ด้วยหลักการของการวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญ (PCA)

จำนวนของลักษณะของ สกอร์ และ โหลดตั้ง สำคัญในการจดจำลักษณะที่เป็นจุดมุ่งหมายของ หลักการของการวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญในการหาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องโดยบรรจุสมบัติที่แน่นอน ซึ่งสามารถสัมพันธ์กับปัจจัยทางเคมี และตัว PCs คือเอกลักษณ์ที่เป็นนามธรรมของคณิตศาสตร์

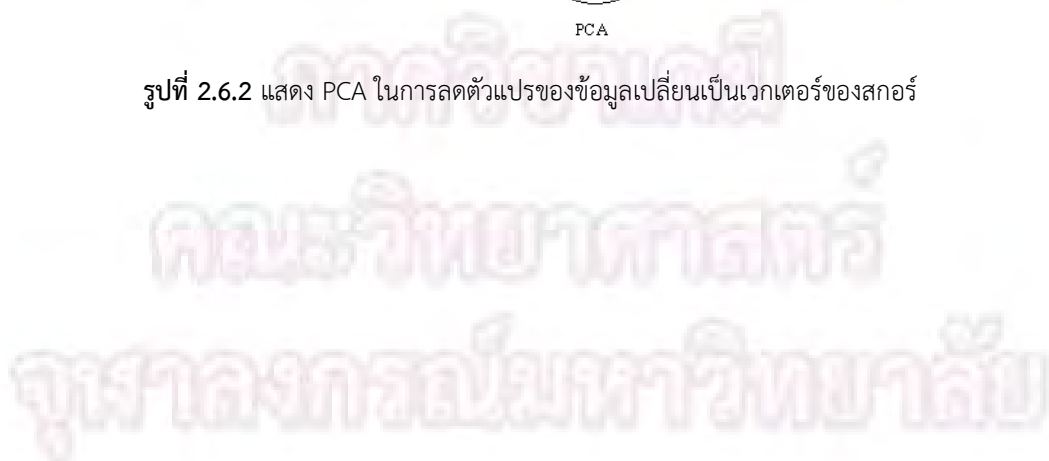
ทุกเวกเตอร์ สกอร์ และ โหลดตั้ง มีสมบัติหลากหลายดังนี้

1. ความเป็นเส้นตรง
2. ตัวแปรขนาดใหญ่มีความสำคัญในโครงสร้าง
3. PC แต่ละ PC ตั้งฉากกัน

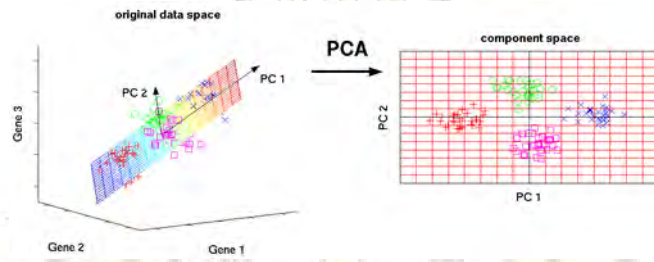
หลังจากวิเคราะห์ข้อมูลด้วยหลักการของการวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญ ตัวแปรเริ่มต้นจะลดจำนวน PC ลงแสดงว่า PCA สามารถใช้ในการลดตัวแปร การลดตัวแปรขนาดใหญ่ของเซตข้อมูลเริ่มต้นเป็นข้อมูลที่เล็กลงและสามารถจัดการเซตข้อมูลให้ง่ายต่อการแปรผลตามรูปที่ 2.6.2



รูปที่ 2.6.2 แสดง PCA ในการลดตัวแปรของข้อมูลเปลี่ยนเป็นเวกเตอร์ของสกอร์



ตัวอย่างของ PC ของข้อมูลในรูปที่ 2.6.3 จะเห็นได้ว่าในความแปรปรวนของข้อมูลจะขนานกับ PC1 และมี PC2 ที่ตั้งฉากกับ PC1 เสมอ



รูปที่ 2.6.3 แสดงตัวอย่างในการทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย PCA



ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องมือ

3.1.1.1 เครื่องพิมพ์สี Xerox ColorQube 8570DN

3.1.1.2 เครื่องตัดเลเซอร์ Ohm laser cutting

3.1.1.3 ตู้อบ Memmert

3.1.1.4 เครื่องวัด pH

3.1.1.5 มือถือ Samsung galaxy j2

3.1.1.6 เครื่องชั่ง 5 ตำแหน่ง

3.1.1.7 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง

3.1.2 อุปกรณ์

3.1.2.1 ไมโครปิเปต ขนาด 20 μ L, 200 μ L, 1000 μ L และ 5000 μ L

3.1.2.2 ปีกเกอร์ขนาด 50 mL

3.1.2.3 กระดาษกรอง

3.1.2.4 กล่องควบคุมแสง

3.1.2.5 ขวดสีขาขนาดเล็ก

3.1.2.6 ขวดใสขนาดเล็ก (Vial)

3.2 สารเคมี

3.2.1 บัฟเฟอร์ ชนิดต่างๆ ความเข้มข้น 10 mM

3.2.2.1 Citrate buffer pH= 3.01

3.2.2.2 HEPS buffer pH= 7.4

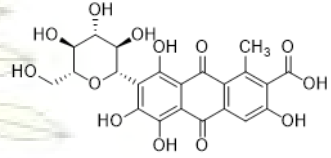
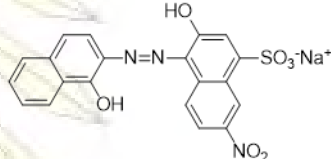
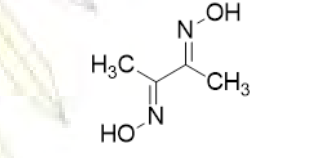
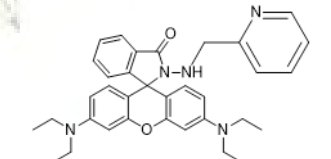
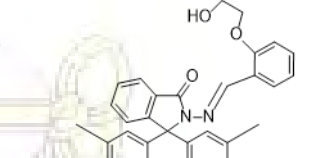
3.2.2.3 $\text{NaH}_2\text{PO}_4/\text{Na}_2\text{HPO}_4$ buffer pH= 10.0 , 11.0 , 12.0

3.2.2 Milli Q.

3.2.3 Ethylenediaminetetraaminoacetate (EDTA)

3.2.4 สีย้อมชนิดต่างๆ

ตารางที่ 3.2.4.1 โครงสร้าง สูตรโมเลกุลและมวลโมเลกุลของสีย้อมที่ใช้ในการศึกษา

No	ชื่อสาร	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (g/mol)	โครงสร้าง
1	Carminic Acid (CA)	$C_{22}H_{26}N_2O_{13}$	466.44	
2	Eriochrome Black T (EBT)	$C_{20}H_{12}N_3NaO_7S$	461.38	
3	Dimethylglyoxime (DMG)	$C_4H_8N_2O_2$	116.12	
4	Rhodamine_B derivative 1 (Rho_B 1)	$C_{28}H_{32}N_4O_2$	456.253	
5	Rhodamine_B derivative 2 (Rho_B 2)	$C_{35}H_{36}N_4O_4$	576.68	

3.2.5 ไอออนโลหะชนิดต่างๆ

- 3.2.7.1 Nickel(II) perchlorate hexahydrate
- 3.2.7.2 Aluminium(III) chloride hexahydrate
- 3.2.7.3. Manganese(II) Perchlorate Hexahydrate
- 3.2.7.4 Cobalt(II) Perchlorate Hexahydrate
- 3.2.7.5 Cadmium(II) Nitrate Tetrahydrate
- 3.2.7.6 Silver(I) nitrate
- 3.2.7.7 Zinc(II) perchlorate hexahydrate
- 3.2.7.8 lead(II) nitrate
- 3.2.7.9 Copper(II) Perchlorate Hexahydrate
- 3.2.7.10 iron(III) chloride
- 3.2.7.11 Chromium(III) nitrate nonahydrate

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารละลาย

3.3.1.2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

3.3.1.2.1 การเตรียมบัฟเฟอร์ citrate pH 3.0 ความเข้มข้น 10 mM

เตรียมโดยการนำ 10 mM citric acid 82.0 mL ผสมกับ 10 mM tri-sodium citrate 18.0 ml แล้ววัด pH ด้วยเครื่องวัด pH

3.3.1.2.2 การเตรียมบัฟเฟอร์ HEPES pH 7.4 ความเข้มข้น 10 mM

ชั่ง HEPES และ NaCl ปริมาณ 0.5960 g และ 0.23171 g ตามลำดับ

ละลายของแข็งที่ชั่งมาด้วยน้ำ Milli Q คนตลอดเวลา และปรับ pH สารละลายด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.1 M และวัด pH ด้วย pH meter จน pH เป็น 7.4 แล้วเทลงในขวดกำหนดปริมาตร 250 mL จากนั้นปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำ Milli Q จนถึงขีดกำหนดปริมาตร

3.3.1.2.3 การเตรียมบัฟเฟอร์ $\text{NaH}_2\text{PO}_4/\text{Na}_2\text{HPO}_4$ pH 10 11 และ 12

ความเข้มข้น 10 mM

ชั่ง NaH_2PO_4 1.4195 g และ NaHPO_4 1.340 g ละลายของแข็งที่ชั่งมาด้วยน้ำ Milli Q คนตลอดเวลา และปรับ pH สารละลายด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.1 M และวัด pH ด้วย pH meter จน pH ได้เท่าที่ต้องการแล้วเทลงในขวดกำหนดปริมาตร 100 mL จากนั้นปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำ Milli Q จนถึงขีดกำหนดปริมาตร

3.3.1.3 การเตรียมสารละลายไอออนของโลหะชนิดต่างๆ

เตรียมสารละลายมาตรฐานของโลหะชนิดต่าง ๆ 11 ชนิดได้แก่ Al^{3+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Ag^+ และ Fe^{3+} ให้ได้ความเข้มข้น 50 mM ละลายด้วยน้ำ Milli Q และปรับปริมาตรในขวดกำหนดปริมาตร 5 ml ซึ่งปริมาณของโลหะชนิดต่าง ๆ จะแสดงตามตารางที่ 3.3.1.3

ตารางที่ 3.3.1.3 แสดงปริมาณของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของโลหะ	MW. (g/mol)	น้ำหนัก (mg)
Aluminium(III) chloride hexahydrate $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	241.43	53.608
Cadmium(II) Nitrate Tetrahydrate $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	308.48	77.120
Cobalt(II) Perchlorate Hexahydrate $\text{Co}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	365.93	91.482
Chromium(III) nitrate nonahydrate $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	400.15	100.038
Copper(II) Perchlorate Hexahydrate $\text{Cu}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	370.54	92.635
Lead(II) nitrate $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	331.21	82.802
Manganese(II) Perchlorate Hexahydrate $\text{Mn}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	361.93	90.273
Nickel(II) perchlorate hexahydrate $\text{Ni}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	365.69	91.422
Zinc(II) perchlorate hexahydrate $\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	372.38	93.095
Silver (I) nitrate AgNO_3	169.87	42.468
Iron (III) Chloride hexahydrate $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	270.3	67.58

3.3.1.4. การเตรียม EDTA

เตรียมโดยการนำ EDTA มาละลายในน้ำ Milli Q. ให้ได้ความเข้มข้น 20 mM

3.3.1.5 การเตรียมสารสีย้อม ชนิดต่างๆ โดยเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนทำการทดลอง

การเตรียมสารสีย้อมทำโดยการนำสารสีย้อมชนิดต่างๆมาละลายและนำไปสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที

ตารางที่ 3.3.1.5 แสดงวิธีการเตรียมสีย้อมชนิดต่างๆ

สารสีย้อม	ชนิดของสารละลายที่ใช้	ความเข้มข้น (mg/mL)
EBT	บัฟเฟอร์ที่ pH ต่างๆ	1
CA	Milli Q	1
DMG	Milli Q:เมทานอล 3:7	1
Rho_B 1	Milli Q.:เมทานอล 1:4	1 และ 0.1
Rho_B 2	Milli Q:เมทานอล 2:3	1

3.3.2 การออกแบบกระดาษ

3.3.2.1 กระดาษแบบที่ 1

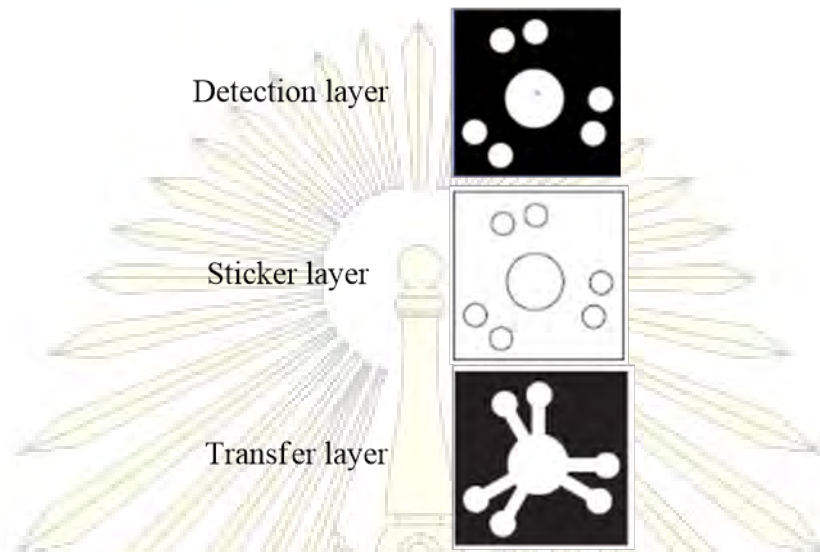
3.3.2.1.1 ชั้นตรวจวัด



รูปที่ 3.3.2.1.1 แสดงกระดาษรูปแบบที่ 1

ออกแบบโดยให้มีช่องสำหรับการตรวจวัดสารจำนวน 4 ช่อง โดยแต่ละช่องจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm เพื่อหาความเลือกจำเพาะของสารสีย้อมชนิดต่างๆ

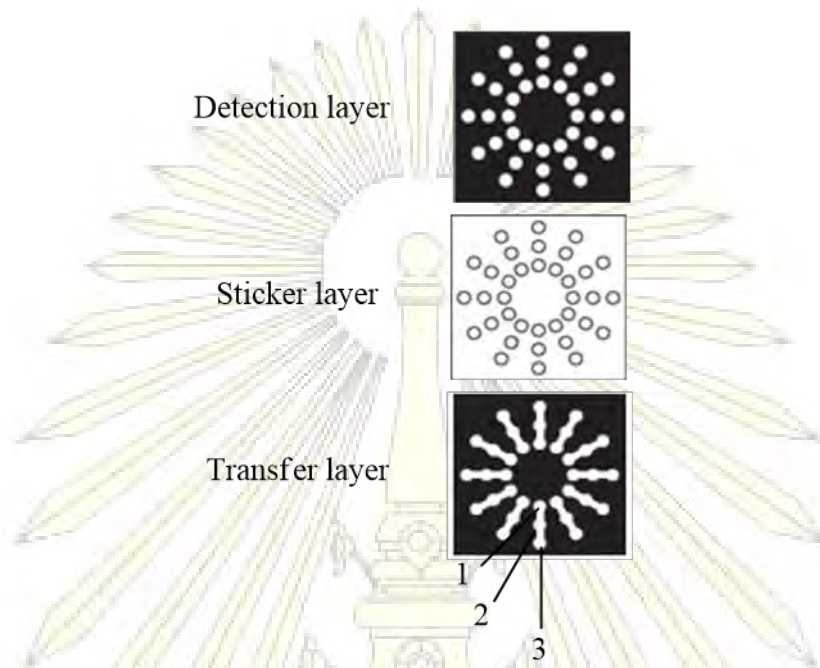
3.3.2.2 กระดาษแบบที่ 2



รูปที่ 3.3.2.2.1 แสดงกระดาษรูปแบบที่ 2

ในการออกแบบกระดาษแบบที่ 2 จะมีลักษณะเป็น 3 มิติ โดยอาศัยการไหลของสารละลายด้วยแรงโน้มถ่วง แรงคาปิลลารี และการแพร่ของสารละลาย ส่งผลให้กระดาษจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ชั้นตรวจวัด ชั้นสติ๊กเกอร์ และชั้น transfer โดยชั้นสติ๊กเกอร์จะทำหน้าที่เชื่อมระหว่างชั้นตรวจวัดและชั้น transfer เข้าด้วยกัน สำหรับชั้นตรวจวัดจะถูกแบ่งเป็น 3 โซน แต่ละโซนจะประกอบด้วยวงกลมขนาดเล็ก 2 วง ซึ่งแต่ละวงช่องว่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 cm เพื่อใช้สำหรับตรวจวัดโลหะชนิดต่างๆ ส่วนวงกลมตรงกลางมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการหยดสารละลายที่ต้องการตรวจวัด ในส่วนของชั้น transfer เป็นส่วนที่มีไว้ให้สารละลายไหลไปยังแต่ละโซนของชั้นตรวจวัดโดยจะมีวงกลมต่างๆ เหมือนชั้นตรวจวัดและมีท่อเชื่อมจากวงกลมใหญ่ตรงกลางไปยังวงกลมเล็กโดยมีความยาว 0.5 cm และมีความกว้าง 0.1 cm โดยมีจุดประสงค์ในการออกแบบนี้เพื่อใช้วิเคราะห์โลหะผสม Ni^{2+} Cu^{2+} และ Mn^{2+}

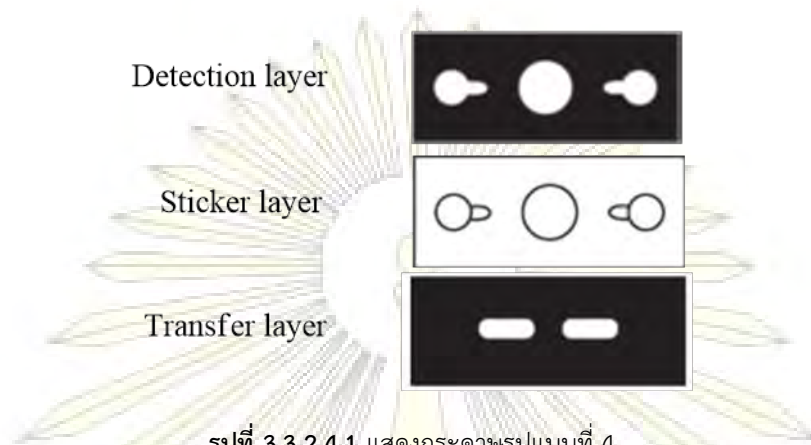
3.3.2.3 กระดาษแบบที่ 3



รูปที่ 3.3.2.3.1 แสดงกระดาษรูปแบบที่ 3

ในการออกแบบกระดาษแบบที่ 3 มีลักษณะเป็น 3 มิติ โดยอาศัยการไหลของสารละลายด้วยแรงโน้มถ่วง แรงคาปิลลารี และการแพร่ของสารละลาย ส่งผลให้กระดาษจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ชั้นตรวจวัด ชั้นสติ๊กเกอร์ และชั้น transfer โดยชั้นสติ๊กเกอร์จะทำหน้าที่เชื่อมระหว่างชั้นตรวจวัดและชั้น transfer เข้าด้วยกัน สำหรับชั้นตรวจวัดจะถูกแบ่งเป็น 12 โซน แต่ละโซนจะประกอบด้วยวงกลมขนาดเล็ก 3 วง ซึ่งแต่ละวงจะมีช่องว่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 cm ซึ่งวงกลมที่ 1 จะมีไว้เป็นช่องใส่สารตัวอย่าง วงกลมที่ 2 และ 3 จะเป็นส่วนที่ใส่สารสีย้อมเพื่อใช้ในการสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงสีสำหรับตรวจวัดโลหะชนิดต่างๆ ในส่วนของชั้น transfer เป็นส่วนที่มีไว้ให้สารละลายไหลจากวงกลมที่ 1 ไปยังวงกลมที่ 2 และ 3 โดยมีวงกลมต่างๆ เหมือนชั้นตรวจวัดและมีท่อเชื่อมไปยังวงกลมเล็กซึ่งมีความยาว 0.2 cm และมีความกว้าง 0.1 cm จุดประสงค์ของการออกแบบนี้ เพื่อใช้ในการตรวจวัดโลหะหลากหลายชนิดภายในกระดาษแผ่นเดียว

3.3.2.4 กระดาษแบบที่ 4



รูปที่ 3.3.2.4.1 แสดงกระดาษรูปแบบที่ 4

ในการออกแบบกระดาษแบบที่ 4 มีลักษณะเป็น 3 มิติ โดยอาศัยการไหลของสารละลายด้วยแรงโน้มถ่วง แรงคาปิลลารี และการแพร่ของสารละลาย ส่งผลให้กระดาษจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือชั้นตรวจวัด ชั้นสติ๊กเกอร์ และชั้น transfer ชั้นสติ๊กเกอร์จะทำหน้าที่เชื่อมระหว่างชั้นตรวจวัดและชั้น transfer เข้าด้วยกัน สำหรับชั้นตรวจวัด จะถูกแบ่งเป็น 2 โซนที่วงกลมขนาดเล็ก โดยแต่ละโซนจะเป็นจุดตรวจวัด ซึ่งแต่ละวงจะมีช่องว่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 cm เพื่อใช้สำหรับตรวจวัดโลหะชนิดต่างๆ ส่วนวงกลมตรงกลางมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการหยดสารละลายที่ต้องการตรวจวัด ในส่วนของชั้น transfer เป็นส่วนที่มีไว้ให้สารละลายไหลไปยังแต่ละโซนของชั้นตรวจวัด โดยมีท่อเชื่อมจากวงกลมใหญ่ตรงกลางไปยังวงกลมเล็ก ท่อมีความยาว 0.2 cm และมีความกว้าง 0.1 cm จุดประสงค์ในการออกแบบนี้คือ ลดการเกิดการไหลย้อนกลับมาระหว่างชั้นของสารสีย้อมและการวิเคราะห์ชนิดต่างๆของโลหะ

3.3.3 การผลิตอุปกรณ์กระดาษ

3.3.3.1 พิมพ์กระดาษตามรูปแบบต่างๆ ด้วยเครื่องพิมพ์สี Xerox Color Qube 8570DN

3.3.3.2 นำกระดาษที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที 20 วินาที

3.3.3.3 พิมพ์สติ๊กเกอร์ด้วยเครื่อง laser cutting ตามรูปแบบแต่ละชนิด

3.3.3.4 นำชั้น transfer ติดกับกระดาษเอ 4 ด้วยกระดาษกาว 2 หน้า

3.3.3.5 นำสติ๊กเกอร์ที่พิมพ์ไว้มาติดที่ชั้น transfer

3.3.3.6 นำชั้น transfer และชั้นตรวจวัดมาติดเข้าด้วยกัน

3.3.4 สภาพที่ใช้ในการทดลอง

3.3.4.1 กระดาษแบบที่ 1

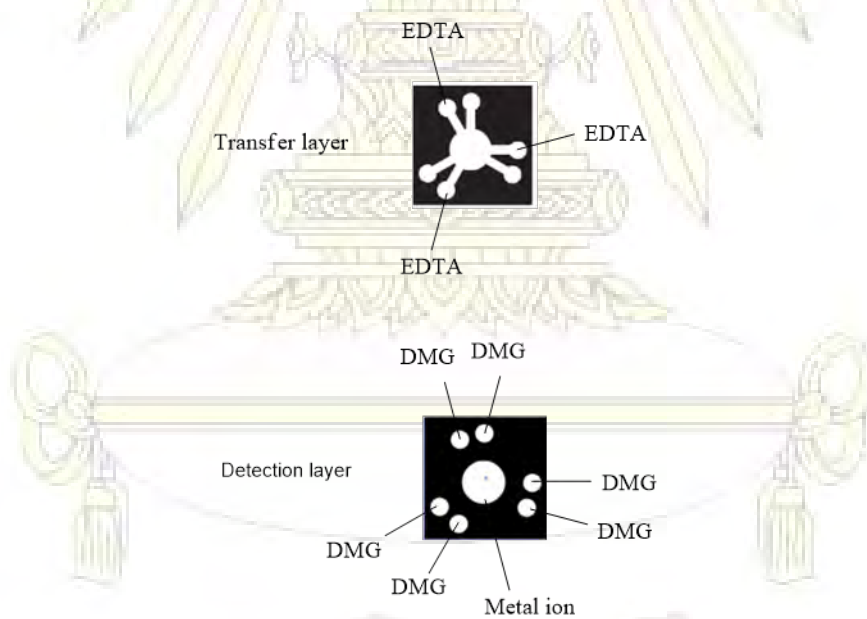
เป็นรูปแบบกระดาษที่ใช้ในการหาความเลือกจำเพาะของสารสีย้อมกับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นของสารสีย้อมเท่ากับ 1 mg/mL โดยใช้ปริมาณตามตารางที่ 3.3.4.1 และ ความเข้มข้นของโลหะเท่ากับ 1 mM ปริมาณ 2 μ L

ตารางที่ 3.3.4.1 แสดงปริมาณการใช้สีย้อมชนิดต่างๆในการหาความเลือกจำเพาะ

สีย้อม	EBT	CA	DMG	Rho_B 1	Rho_B 2
ปริมาณที่ใช้ (μ L)	3	2	2	2	2

3.3.4.2 กระดาษแบบที่ 2

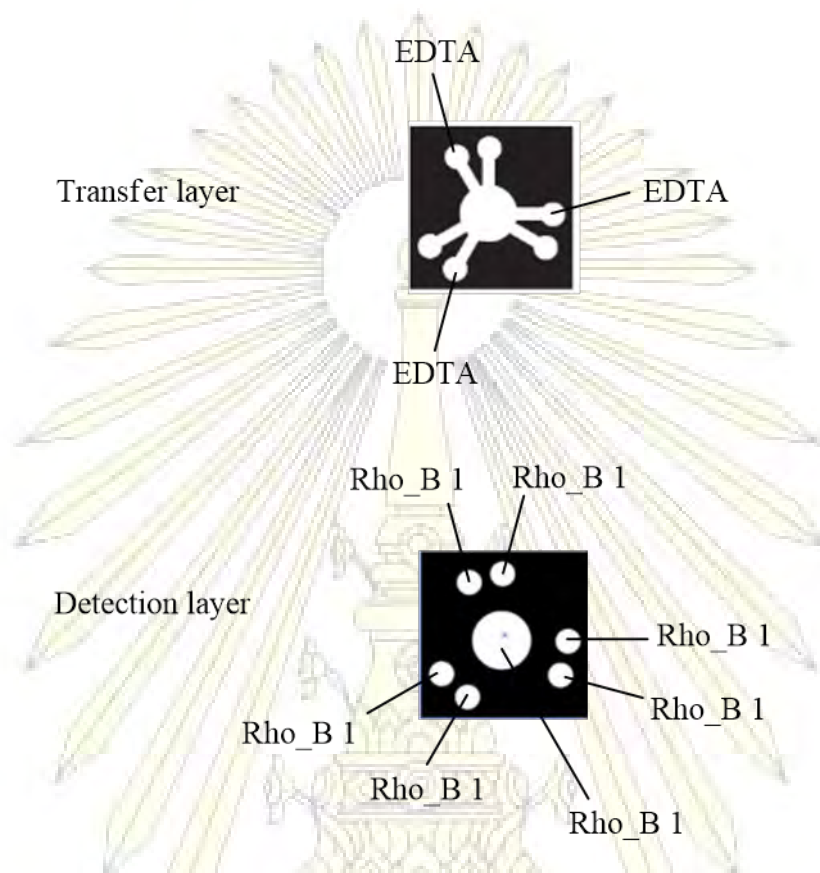
3.3.4.2.1. การทดลองของ DMG กับ Ni^{2+}



รูปที่ 3.3.4.2.1.1 แสดงการใส่สารในชั้นต่างๆของกระดาษแบบที่ 2 ด้วยสารสีย้อม DMG

ในช่องอ้างอิงของชั้น transfer จะใส่ EDTA ความเข้มข้น 100 mM ปริมาณ 2 μ L และในชั้นตรวจวัด จะใส่ DMG ความเข้มข้น 1 mM ปริมาณ 2 μ L และ ช่องตรงกลาง จะใส่ Ni^{2+} ความเข้มข้น 3.5 mM ปริมาณ 70 μ L

3.3.4.2.2. การทดลองของ Rho_B 1 กับ Cu^{2+} , Co^{2+} และ Ni^{2+}

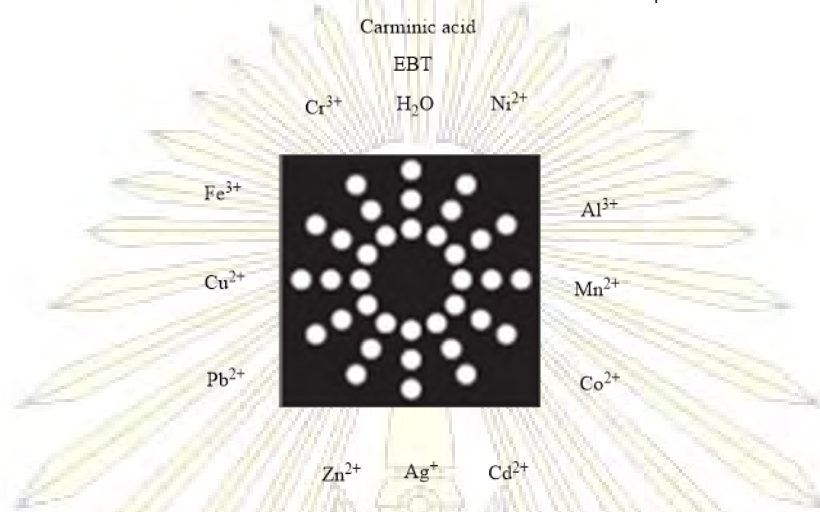


รูปที่ 3.3.4.2.2.1 แสดงการใส่สารในชั้นต่างๆของกระดาษแบบที่ 2 ด้วยสารสีย้อม Rho_B 1

ในช่องอ้างอิงชั้น transfer จะใส่ EDTA ความเข้มข้น 100 mM ปริมาณ 2 μL ส่วนชั้นตรวจวัดจะใส่ Rho_B 1 ความเข้มข้น 2 ความเข้มข้น คือ 0.1 และ 1.0 mM โดยใช้ปริมาณ 2 μL เท่ากัน จากนั้นใส่ไอออนของโลหะเพียงชนิดเดียวโดยทำทั้งหมด 3 โลหะ คือ Ni^{2+} Cu^{2+} และ Co^{2+} ที่มีความเข้มข้น 3.5 mM ปริมาณ 70 μL ในช่องตรงกลาง

3.3.4.3 การทดลองกับอุปกรณ์กระดาษแบบที่ 3

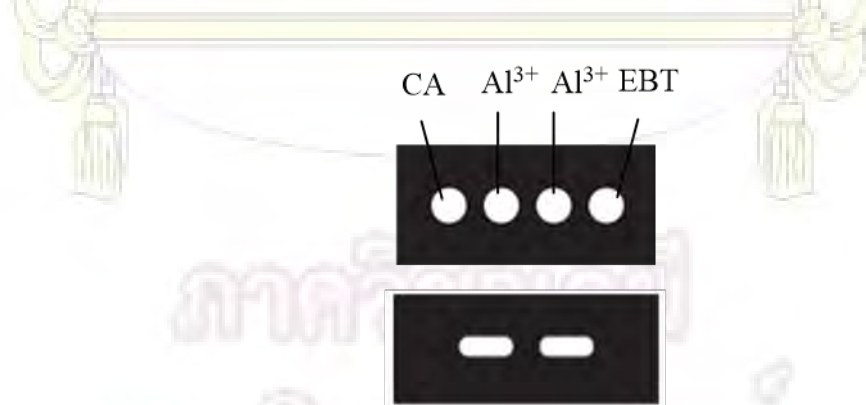
3.3.4.3.1 การตรวจวัดโลหะไอออนที่ใช้ในการทดลองอุปกรณ์กระดาษแบบที่ 3



รูปที่ 3.3.4.3.1 แสดงการใส่สารในชั้นตรวจวัดของกระดาษแบบที่ 3 จากการหาปริมาณของโลหะที่ใช้

โพลีเมอร์สีส้ม EBT ลงในช่องที่อยู่ชั้นกลางทุกช่อง และ โพลีเมอร์สีส้ม CA ลงในช่องที่อยู่ชั้นนอกสุดทุกช่อง ที่ความเข้มข้น 0.5 mg/mL ปริมาณ 2 μ L และ ใส่ไอออนของโลหะที่ต้องการวิเคราะห์แต่ละชนิด ตามที่ระบุไว้ ที่ความเข้มข้น 1 mM ในช่องที่อยู่ชั้นในสุด โดยได้ออกแบบกระดาษแต่ละแผ่นเพื่อตรวจวัดโลหะไอออนที่ปริมาณต่างๆ คือ 2 3 5 และ 10 μ L นอกจากนี้ได้เตรียมกระดาษในลักษณะเดียวกันเพียงแต่สลับตำแหน่งของสารสีส้ม คือ โพลีเมอร์สีส้ม EBT ลงในช่องที่อยู่ชั้นนอกสุดทุกช่อง และ โพลีเมอร์สีส้ม CA ลงในช่องที่อยู่ชั้นกลางทุกช่อง ที่ความเข้มข้นเดียวกัน

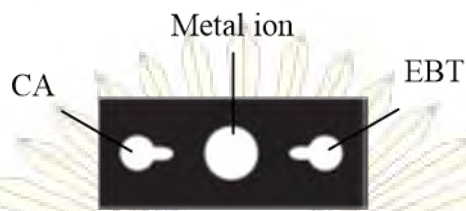
3.3.4.3.2 การทดลองการไหลระหว่างชั้นของ CA และ EBT



รูปที่ 3.3.4.3.2 แสดงกระดาษการทดลองการไหลระหว่างชั้นของสีส้ม

ในการทดลองใช้ [EBT] = 1 mg/mL ปริมาณ 3 μ L และ [EBT] = 1 mg/mL ปริมาณ 2 μ L และใช้ [Al³⁺] = 1 mM ปริมาณ 10 μ L

3.3.4.4 การทดลองกับอุปกรณ์แบบที่ 4



รูปที่ 3.3.4.4 แสดงถึงตำแหน่งต่างๆที่หยดสารละลายในการทดลองของกระดาษแบบที่ 4

สารสีย้อม EBT และ CA จะถูกโคปในกระดาษชั้นตรวจวัด ที่ ความเข้มข้น 0.5 mg/mL ปริมาณ 2.5 μ L ที่ pH =7.4 และ ความเข้มข้น 0.5 mg/mL ปริมาณ 2 μ L ตามลำดับ กระดาษ 1 แผ่นสามารถตรวจวัดไอออนของโลหะชนิดต่างๆ ได้เพียงครั้งละหนึ่งชนิด โดยจะหยดสารละลายไอออนโลหะที่มีความเข้มข้น 2.5 mM ปริมาณ 20 μ L ลงในช่องตรงกลาง

3.3.5 การถ่ายภาพที่ได้จากการทดลอง

3.3.5.1 ทำกล่องควบคุมแสง



รูปที่ 3.3.5.1 แสดงรูปกล่องควบคุมแสง

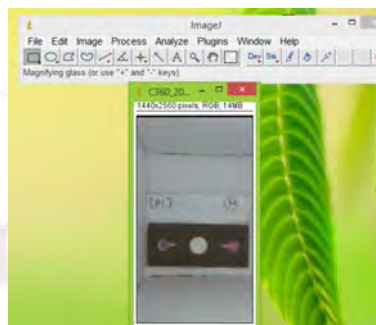
3.3.5.2 เวลาถ่ายภาพรองขึ้นงานสำหรับตรวจวัดด้วยแผ่นกระดาษขาว

3.3.5.3 ตอนถ่ายภาพให้นำมือถือติดกับกล่องควบคุมแสงและเปิดแฟลชในการถ่าย

3.3.6 วิธีการวิเคราะห์ค่า R G B ทำโดยการใช้โปรแกรม image j

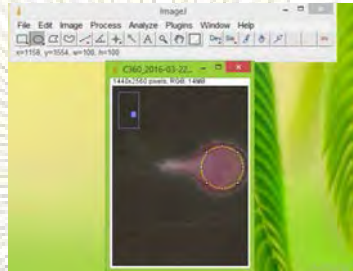
ในการวิเคราะห์ค่า R G B ของภาพถ่ายที่ได้จากการทดลอง จะถูกนำมาหาค่า R G B ด้วยโปรแกรม image J

3.3.6.1 โดยในขั้นตอนแรกเปิดโปรแกรม Image J ขึ้นมา แล้วเปิดรูปที่ต้องการอ่านค่า R G B



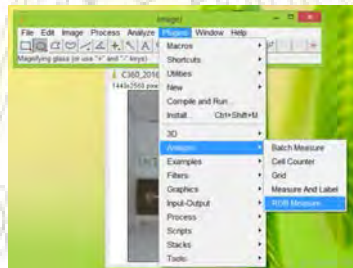
รูปที่ 3.3.6.1 แสดงโปรแกรม Image J

3.3.6.2 นำวงกลมมาล้อมรอบพื้นที่ที่ต้องการวัดสี ซึ่งในการวัดทุกๆรูปจะต้องให้ค่า w และ h เท่ากัน เพื่อเป็นการกำหนดขนาดของวงกลมที่ใช้ในการตรวจวัดให้เท่ากันทุกภาพ



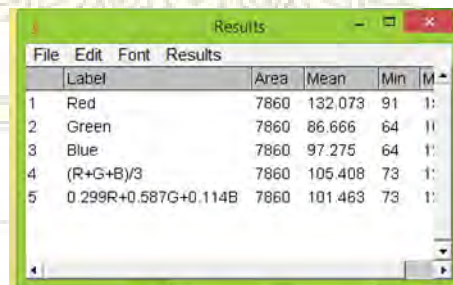
รูปที่ 3.3.6.2 แสดงการล้อมรอบตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัดสี

3.3.6.3 ไปที่ Plugins แล้วเลือกที่ Analyze และเลือก RGB Measure



รูปที่ 3.3.6.3 แสดงการใช้คำสั่งในการหาค่า R G B ของพื้นที่ที่ต้องการตรวจวัด

3.3.6.4 จะได้ตารางที่แสดงค่า R G B ออกมาดังรูป 3.3.6.4



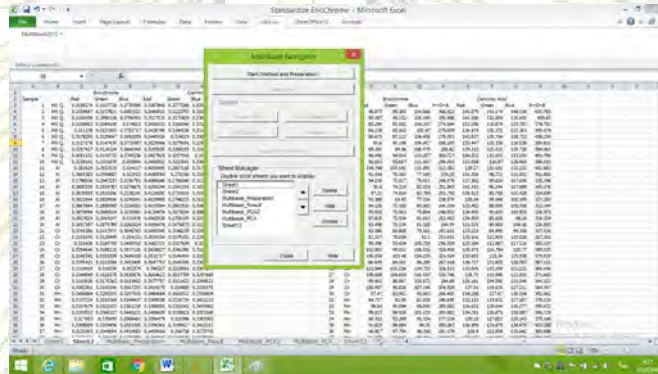
File	Edit	Font	Results	
Label	Area	Mean	Min	M
1 Red	7860	132.073	91	1:
2 Green	7860	86.666	64	1:
3 Blue	7860	97.275	64	1:
4 (R+G+B)/3	7860	105.408	73	1:
5 0.299R+0.587G+0.114B	7860	101.463	73	1:

รูปที่ 3.3.6.4 แสดงตารางค่าสีที่ทำการวัด

3.3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล R G B ด้วยเทคนิค PCA

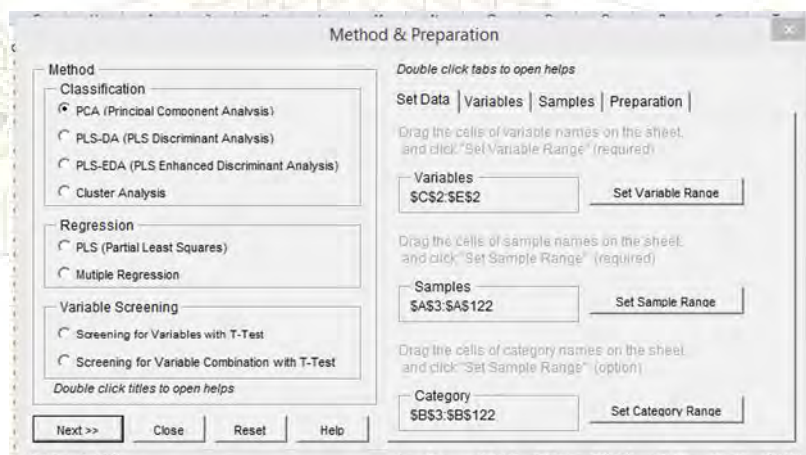
3.4.5.1 นำข้อมูลต่างๆ มาลงใน excel และหาค่า R G B ใหม่ โดยการ นำ R/R+G+B G/R+G+B และ B/R+G+B ซึ่งเป็นการทำ normalization R G B จะได้ข้อมูลตามตารางที่ 4.4.2

3.4.5.2 เมื่อได้ข้อมูล RGB ของ ไอออนของโลหะแต่ละชนิดมาแล้ว ไปที่ add-ins และ multibase แล้วไปที่ Start (method and preparation)



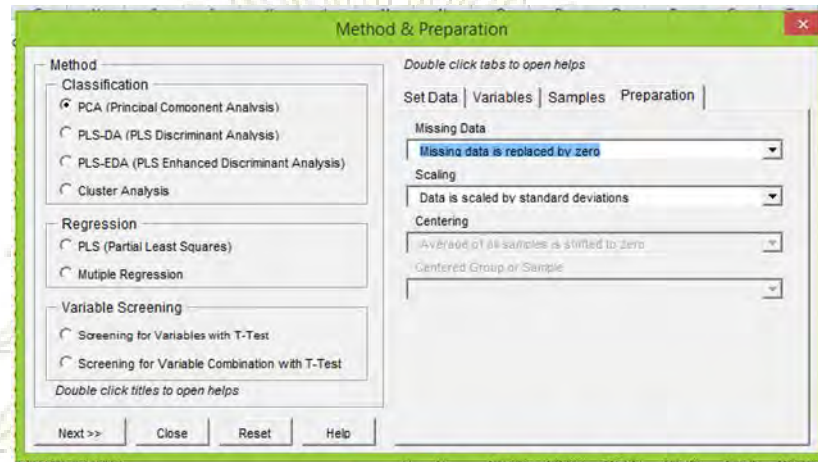
รูปที่ 3.4.5.2 แสดงการเริ่มใช้งานโปรแกรม multibase

3.4.5.3 จากนั้นจะต้องกำหนดค่าโปรแกรมต่างๆใน excel ดังนี้ (1) ปรับให้ Variable เป็น ช่อง R/R+G+B G/R+G+B และ B/R+G+B ใน excel ต่อมา ช่อง (2) Sample ให้เลือกจำนวนข้อมูลจาก 1-120 ข้อมูล (3) ระบุชื่อไอออนของโลหะชนิดต่างๆ



รูปที่ 3.4.5.3 แสดงการเตรียมข้อมูลของโปรแกรม multibase

3.4.5.4 หลังจากนั้นมาที่หน้าต่าง Preparation โดยปรับค่าต่างๆ ที่ช่อง Missing Data เป็น Missing data is replaced by zero และช่อง Scaling เป็น Data is scaled by standard deviations



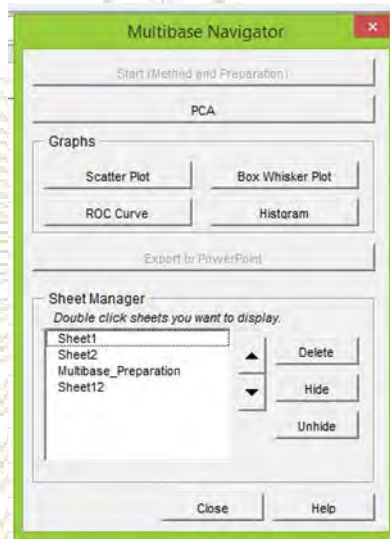
รูปที่ 3.4.5.4 แสดงเตรียมข้อมูลของโปรแกรม multibase

3.4.5.5 จากนั้นจะได้ผลตามรูปที่ 3.4.5.5

			red	green	blue
			X	X	X
2					
3	1	Mil Q.	-1.217608	0.4276133	0.8624155
4	2	Mil Q.	-1.205112	0.695863	0.6228532
5	3	Mil Q.	-1.439978	0.3654313	1.1386216
6	4	Mil Q.	-1.427681	0.6224309	0.9087796
7	5	Mil Q.	-1.409123	0.5656408	0.9381767
8	6	Mil Q.	-1.118372	0.5449928	0.6633079
9	7	Mil Q.	-1.34874	0.6402484	0.8143297
10	8	Mil Q.	-0.987069	0.5266617	0.5467989
11	9	Mil Q.	-1.511192	0.7060961	0.9219489
12	10	Mil Q.	-0.844139	0.931793	0.0602577
13	11	Al	1.802048	-0.510521	-1.379895
14	12	Al	1.9782333	-0.662882	-1.428113
15	13	Al	1.6656047	-0.431836	-1.30929
16	14	Al	1.6850868	-0.552035	-1.227164
17	15	Al	1.8214407	-0.517875	-1.393171
18	16	Al	1.7824573	-0.524569	-1.348309
19	17	Al	1.9885117	-0.695022	-1.411251
20	18	Al	2.0215472	-0.743543	-1.403408
21	19	Al	1.7602849	-0.881851	-1.023677
22	20	Al	-1.942196	-0.792999	-1.281772
23	21	Cr	-0.816447	0.4289172	0.4579563
24	22	Cr	-0.438299	0.544197	-0.019812
25	23	Cr	-0.505052	0.8666027	-0.22552
26	24	Cr	-0.593988	0.8586929	-0.129404
27	25	Cr	-0.816192	0.6557986	0.2657086
28	26	Cr	-0.139811	0.4509405	-0.241018
29	27	Cr	-0.520647	0.7361293	-0.099431
30	28	Cr	-0.348805	0.4953392	-0.068452
31	29	Cr	-0.521022	0.7897958	-0.144467
32	30	Cr	-0.649355	0.6558353	0.0979278
33	31	Mn	-0.088241	1.4315327	-1.122665
34	32	Mn	-0.402096	1.5555989	-0.912079

รูปที่ 3.4.5.5 แสดงข้อมูลที่ได้จากการเตรียมโดยโปรแกรม multibase

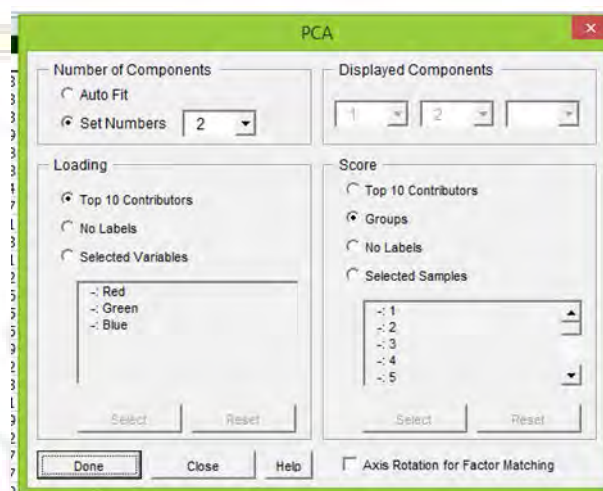
3.4.5.6 จากนั้นไปที่ Add-ins และ mutibase อีกครั้ง และกดปุ่ม PCA



รูปที่ 3.4.5.6 แสดงการใช้โปรแกรม mutibase

3.4.5.7 หลังจากนั้นกด Done ซึ่งเป็นการเสร็จสิ้นการทำรายการ

ในส่วนของ Carminic acid ทำในทำนองเดียวกับ Eriochrome black T แต่ส่วนของการทำ PCA ของค่าที่ได้จากทั้งจาก Carminic acid และ Eriochrome black T ให้เปลี่ยน Variable เป็นของทั้ง 2 ชนิด และเปลี่ยนขั้นสุดท้ายของหน้า PCA ที่ Set Numbers เป็น 3 จะได้ PC จำนวน 3 แกน หลังจากนั้นให้นำข้อมูลไปสร้างกราฟ 3 มิติต่อไป



รูปที่ 3.4.5.7 แสดงการเลือกจำนวนแกน PC







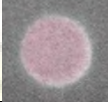




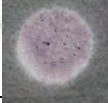















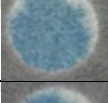
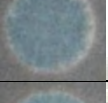
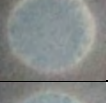


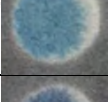
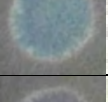


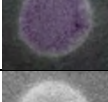

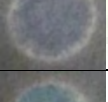



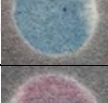
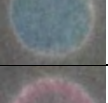


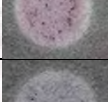
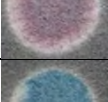
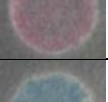









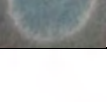

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

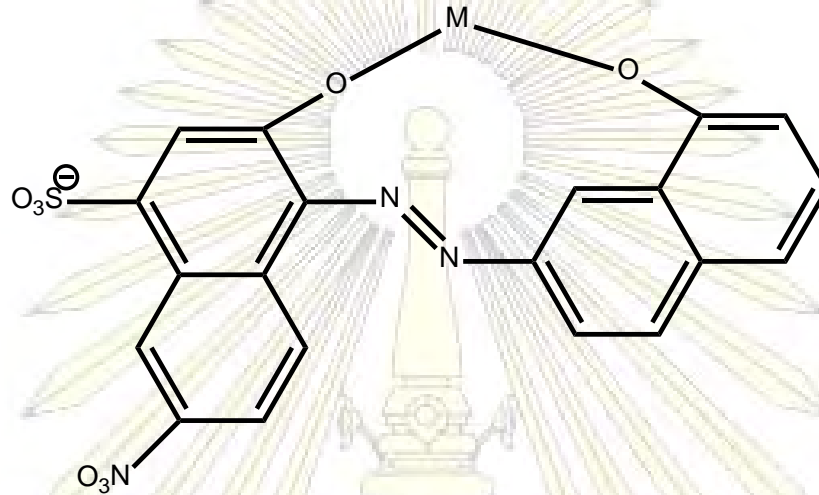
4.1 การหาความเลือกจำเพาะของสารสีย้อมชนิดต่างๆ โดยใช้อุปกรณ์กระดาษแบบที่ 1

4.1.1 ความเลือกจำเพาะของ EBT ที่ pH ต่างๆ

ตารางที่ 4.1.1 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงสีของ EBT กับ ไอออนของโลหะ ที่ pH ต่างๆ

น้ำ	pH 3	pH 7.4	pH 10	pH 11	pH 12
Mili Q					
Ni ²⁺					
Al ³⁺					
Mn ²⁺					
Co ²⁺					
Cd ²⁺					
Ag ⁺					
Zn ²⁺					
Pb ²⁺					
Cu ²⁺					
Fe ³⁺					
Cr ³⁺					

จากการทดลองหาการเลือกจำเพาะของ EBT กับไอออนของโลหะชนิดต่างๆที่



รูปที่ 4.1.1 แสดงการเกิดสารประกอบระหว่าง EBT กับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ¹⁴

การเปลี่ยนแปลงสีของ EBT เกิดจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ระหว่าง EBT กับไอออนของโลหะ โดย EBT จะใช้หมู่ออกซิเจนอะตอมที่อยู่ในวงอะโรมาติกทั้ง 2 วงในการจับกับไอออนของโลหะ เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนแปลง pH ของ EBT จะสามารถตรวจวัดไอออนของโลหะได้แตกต่างกันเนื่องจาก ที่ pH ต่ำ EBT จะถูกโปรโตเนต และเมื่อ pH สูงขึ้น ไอออนโลหะหนักจะตกตะกอนไฮดรอกไซด์ ซึ่งได้ทดลองละลาย EBT ที่ pH ต่างๆ ดังนี้

ที่ pH 3 EBT จะมีสีม่วง และจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเมื่อมี Ni^{2+} และ Cu^{2+} และเมื่อเติม Mn^{2+} จะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง นอกจากนี้ EBT จะเปลี่ยนเป็นสีเทา เมื่อเติม Cd^{2+} Ag^{+} Pb^{2+} Fe^{3+} และ Cr^{3+} ส่วนโลหะชนิดอื่นๆ จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี

ที่ pH 7.4 EBT จะมีสีเทา โดยสามารถเปลี่ยนแปลงสีได้เมื่อเติม Ni^{2+} Al^{3+} Zn^{2+} Cu^{2+} ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นสีม่วง และเมื่อเติม Mn^{2+} จะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ส่วนโลหะชนิดอื่นๆ จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงสีของ EBT

ที่ pH 10 จะเห็นได้ว่า EBT มีการเลือกจำเพาะกับ Mn^{2+} Ni^{2+} และ Cu^{2+} โดยที่ Mn^{2+} จะเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำเงินเป็นสีเทา ของ Ni^{2+} จะเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง และของ Cu^{2+} จะเปลี่ยนแปลงสีจากน้ำเงินเป็นสีม่วง ส่วนโลหะชนิดอื่นๆจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี

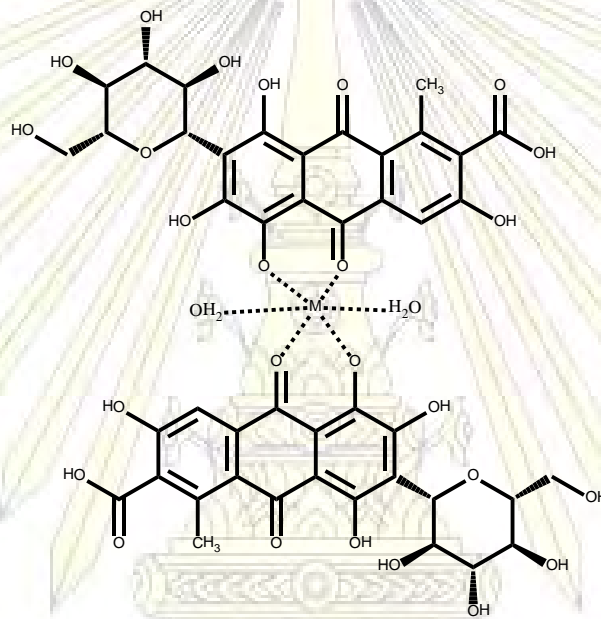
ที่ pH 11 จะเห็นได้ว่า EBT มีการเลือกจำเพาะกับ Mn^{2+} และ Cu^{2+} โดยของ Mn^{2+} จะเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำเงินเป็นสีเทา และของ Cu^{2+} จะเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง ส่วนโลหะชนิดอื่นๆ จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี

ที่ pH 12 จะเห็นได้ว่า EBT มีการเลือกจำเพาะกับ Mn^{2+} โดยเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเป็นสีเทาอย่างชัดเจน ส่วนโลหะชนิดอื่นๆ จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน

4.1.2 ความเลือกจำเพาะของ CA

ตารางที่ 4.1.2.1 แสดงการเลือกจำเพาะของ CA ที่ความเข้มข้น 1 mg/mL ต่อไอออนของโลหะ

น้ำ	Ni^{2+}	Al^{3+}	Mn^{2+}	Co^{2+}	Cd^{2+}	Ag^+	Zn^{2+}	Pb^{2+}	Cu^{2+}	Fe^{3+}	Cr^{3+}
Mili Q											















รูปที่ 4.1.2 แสดงการเกิดสารประกอบระหว่าง CA กับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ^{15,16}

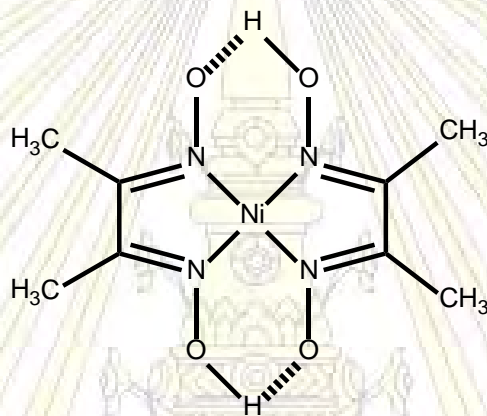
ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง CA และไอออนของโลหะชนิดต่างๆ CA จะจับกับโลหะโดยการใช่มุม OH ในวงอะโรมาติกและอะตอมของออกซิเจนของหมู่ ketone โดยอัตราส่วนการจับกันระหว่าง CA และ โลหะไอออน เป็น 2 ต่อ 1

จากการทดลองเริ่มต้น CA เมื่ออยู่บนกระดาษจะมีสีส้มและเมื่อทดสอบการเลือกจำเพาะต่อโลหะชนิดต่างๆ พบว่า Ni^{2+} จะทำให้กระดาษเปลี่ยนเป็นสีม่วง ส่วน Al^{3+} จะเปลี่ยนเป็นสีชมพูบานเย็น Mn^{2+} เปลี่ยนเป็นสีม่วง Co^{2+} เปลี่ยนเป็นสีเหลือง Cd^{2+} เปลี่ยนเป็นสีม่วง Ag^+ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง Zn^{2+} เปลี่ยนเป็นสีม่วง Pb^{2+} เปลี่ยนเป็นสีม่วง Cu^{2+} เปลี่ยนเป็นสีชมพู Fe^{3+} เปลี่ยนเป็นสีม่วง และ Cr^{3+} เปลี่ยนเป็นสีชมพู

4.1.3 ความเลือกจำเพาะของ DMG

ตารางที่ 4.1.3.1 แสดงการเลือกจำเพาะของ DMG ที่ความเข้มข้น 1 mg/mL ต่อไอออนของโลหะ

น้ำ Mili Q	Ni ²⁺	Al ³⁺	Mn ²⁺	Co ²⁺	Cd ²⁺	Ag ⁺	Zn ²⁺	Pb ²⁺	Cu ²⁺	Fe ³⁺	Cr ³⁺
											















รูปที่ 4.1.3 แสดงการเกิดสารประกอบระหว่าง DMG กับ Ni²⁺

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง DMG และ Ni²⁺ ซึ่ง DMG จะจับกับ Ni²⁺ โดยการใช้ N 2 อะตอมจากหมู่ oxime และสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะมีสัดส่วนระหว่าง DMG กับโลหะไอออน เท่ากับ 2 ต่อ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.1.3













จากการทดลองพบว่าเมื่อเติม Ni²⁺ ลงไป DMG จะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีชมพู ดังแสดงในตารางที่ 4.1.3.1 และไม่พบการเปลี่ยนแปลงสีในไอออนชนิดอื่นๆ ซึ่งแสดงว่า DMG เลือกจำเพาะกับโลหะ Ni²⁺ เท่านั้น

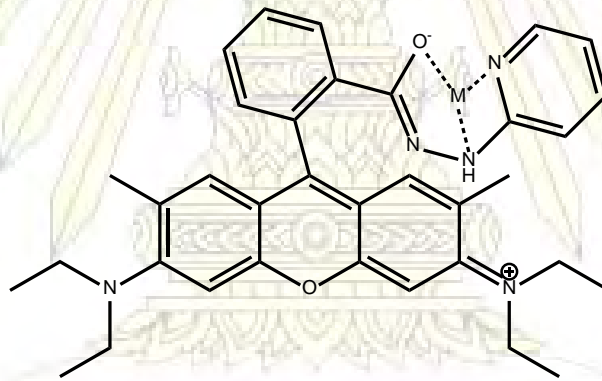
4.1.4 Selectivity ของ Rho_B 1

ตารางที่ 4.1.4.1 แสดงการเลือกจำเพาะของ Rho_B 1 ที่ความเข้มข้น 1 mg/mL ต่อไอออนของโลหะ

น้ำ Mili Q	Ni ²⁺	Al ³⁺	Mn ²⁺	Co ²⁺	Cd ²⁺	Ag ⁺	Zn ²⁺	Pb ²⁺	Cu ²⁺	Fe ³⁺	Cr ³⁺
											

ตารางที่ 4.1.4.2 แสดงการเลือกจำเพาะของ Rho_B 1 ที่ความเข้มข้น 0.1 mg/mL ต่อไอออนของโลหะ

น้ำ Mili Q	Ni ²⁺	Al ³⁺	Mn ²⁺	Co ²⁺	Cd ²⁺	Ag ⁺	Zn ²⁺	Pb ²⁺	Cu ²⁺	Fe ³⁺	Cr ³⁺
											



รูปที่ 4.1.4 แสดงการเกิดสารประกอบระหว่าง Rho_B 1 กับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ⁴

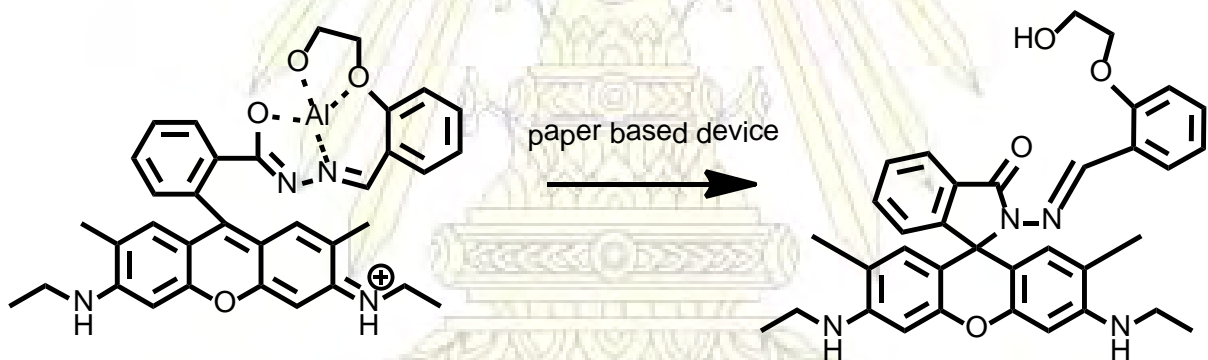
ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Rho_B 1 และไอออนของโลหะชนิดต่าง พบว่า Rho_B 1 จะจับกับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ แล้วเกิดการเปิดวง spiro lactam ทำให้สารละลายเปลี่ยนจากไม่มีสีเปลี่ยนเป็นสีชมพู โดยใช้ส่วนของ O และ N ในการจับไอออนของโลหะดังแสดงในรูปที่ 4.1.4 อัตราส่วนการจับกันระหว่าง Rho_B 1 กับโลหะไอออน เป็น 1 ต่อ 1 จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ Rho_B 1 ความเข้มข้น 1 mg/mL กระดาษจะไม่มีสีเมื่อทดสอบกับโลหะไอออนชนิดต่างๆ พบว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากไม่มีสีเป็นสีชมพู เมื่อเติม Ni²⁺ Co²⁺ และ Cu²⁺ และเมื่อลดความเข้มข้นของ Rho_B 1 ที่ความเข้มข้น 0.1 mg/mL จะเห็นการเปลี่ยนแปลงสี เมื่อเติม Cu²⁺ ลงไปแสดงว่า Rho_B 1 ที่ความเข้มข้นนี้มีความเลือกจำเพาะต่อ Cu²⁺ เพียงชนิดเดียว

4.1.5 ความเลือกจำเพาะของ Rho_B 2

ตารางที่ 4.1.5.1 แสดงการเลือกจำเพาะของ Rho_B 2 ที่ความเข้มข้น 1 mg/mL ต่อไอออนของโลหะ

น้ำ Mili Q	Ni ²⁺	Al ³⁺	Mn ²⁺	Co ²⁺	Cd ²⁺	Ag ⁺	Zn ²⁺	Pb ²⁺	Cu ²⁺	Fe ³⁺	Cr ³⁺

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า Rho_B 2 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของไอออนโลหะชนิดต่างๆ บนกระดาษได้ ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้านี้⁶ Rho_B 2 มีความจำเพาะกับ Al³⁺ ทำให้ผู้ทำการวิจัยสนใจที่จะนำสารประกอบเชิงซ้อนของ Rho_B 2 และ Al³⁺ ที่มีสีชมพูลดลงบนกระดาษแบบที่ 1 ปรากฏว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษ ทำให้ผู้วิจัยคาดว่าสารประกอบเชิงซ้อน Rho_B 2 และ Al³⁺ ที่ Rho_B 2 เปิดวง spirolactam จะปิดวงทำให้สีชมพูเปลี่ยนเป็นไม่มีสีบนกระดาษ ดังแสดงในรูปที่ 4.1.5 จึงสามารถสรุปได้ว่า Rho_B 2 ไม่สามารถนำมาตรวจวัดโลหะ ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงสีบนอุปกรณ์กระดาษได้

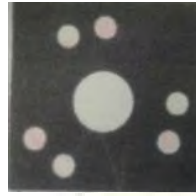


รูปที่ 4.1.5 แสดงการปิดวง spirolactam ของสารเชิงซ้อนบนอุปกรณ์กระดาษแบบที่ 1

จากการทดลองหาสารสี้อมที่เหมาะสมในการเลือกจับไอออนโลหะชนิดต่างๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจน พบว่า EBT ที่ pH 12 DMG และ Rho_B 1 ที่ความเข้มข้น 0.1 mg/mL สามารถเลือกจำเพาะเจาะจงกับโลหะเพียงชนิดเดียว จึงสนใจที่จะนำมาทดลองกับอุปกรณ์กระดาษแบบที่ 2 โดยมีวัตถุประสงค์ในการตรวจวัดสารละลายผสมของไอออนโลหะ Ni²⁺ Cu²⁺ และ Mn²⁺

4.2 การทดลองกับอุปกรณ์แบบที่ 2

4.2.1 ผลการทดลองของ DMG กับ Ni^{2+}

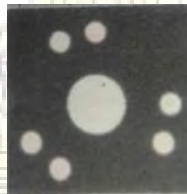


รูปที่ 4.2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเมื่อใส่ Ni^{2+}

จากรูปจะเห็นได้ว่า Ni^{2+} สามารถเปลี่ยนแปลงสีของ DMG เป็นสีชมพู ในกระดาษแบบที่ 2 ที่เป็นกระดาษแบบหลายชั้นได้ โดยอาศัย การแพร่ของสารละลาย แรงโน้มถ่วงโลก และ แรงแคปิลลารี ในการไหลของสารละลาย

4.2.2. ผลการทดลองของ Rho_B 1 กับ Cu^{2+} , Co^{2+} และ Ni^{2+}

4.2.2.1 ที่ ความเข้มข้นของ Rho_B 1 เท่ากับ 0.1 mM ใช้ปริมาณ 2 μ L พบว่ามีเพียง Cu^{2+} เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากกระดาษสีขาวเป็นสีชมพู ดังรูป 4.2.2.4.1



รูปที่ 4.2.2.4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเมื่อใส่ Cu^{2+}

ซึ่งสีที่ปรากฏมีความเข้มต่ำมากทำให้ต้องเพิ่มความเข้มข้นของสารสีย้อมขึ้น

4.2.2.2 ที่ความเข้มข้น Rho_B 1 1.0 mM 2 μ L พบว่า Cu^{2+} Co^{2+} และ Ni^{2+} ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากกระดาษสีขาวเป็นสีชมพู ดังตารางที่ 4.2.2.2

ตารางที่ 4.2.2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษเมื่อใส่ Co^{2+} Cu^{2+} และ Ni^{2+}

Co^{2+}	Cu^{2+}	Ni^{2+}

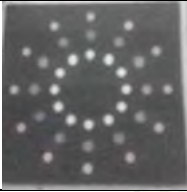

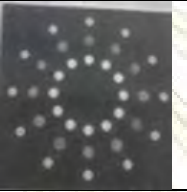
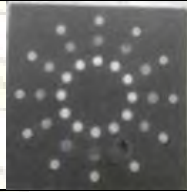
โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Rho_B 1 เป็น 1 mg/mL จะทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของ Rho_B 1 บนกระดาษสำหรับ Cu^{2+} Co^{2+} และ Ni^{2+} ทำให้ไม่สามารถใช้กระดาษแบบที่สองในการวิเคราะห์

สารละลายของไอออนโลหะรวมได้ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงสนใจที่จะทำกระดาษแบบที่ 3 โดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีที่แตกต่างจากสีย้อม EBT ที่ $\text{pH} = 7.4$ และ CA ที่ทำให้ไอออนของโลหะเปลี่ยนสีได้แตกต่างกันมากที่สุด

4.3 การทดลองกับอุปกรณ์กระดาษแบบที่ 3

4.3.1 การทดลองหาปริมาณของโลหะที่จะใช้ในกระดาษแบบที่ 3

ตารางที่ 4.3.1.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของไอออนโลหะชนิดต่างๆ โดยใช้ปริมาณแตกต่างกัน

ปริมาณ 2 μL	ปริมาณ 3 μL	ปริมาณ 5 μL	ปริมาณ 10 μL
			

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อใส่ไอออนของโลหะในช่องชั้นในสุดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของ EBT ที่ช่องว่างชั้นกลางชัดเจนมากขึ้น แต่จะเห็นได้ว่าในส่วนของ CA ในช่องชั้นนอกสุด นั้นสีจางหายไป ผู้ทดลองจึงสลับตำแหน่งของ CA กับ EBT เพื่อดูว่าน้ำสามารถไหลไปถึงตำแหน่งของ CA ได้หรือไม่

4.3.2 การทดลองสลับตำแหน่งของสารสีย้อมของ EBT และ CA



รูปที่ 4.3.2 แสดงผลการทดลองจากการสลับตำแหน่งของ EBT กับ CA

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อสลับตำแหน่งของ CA และ EBT จะพบว่าเมื่อใส่ไอออนของโลหะหนักลงไป ทำให้ EBT ยังคงเห็นการเปลี่ยนแปลงสีได้ชัดเจนในช่องชั้นนอกสุด และสีของ CA ยังคงจางหายไปเหมือนเดิม ทำให้ผู้วิจัยสันนิษฐานว่า CA ละลายน้ำแล้วไหลลงจากชั้นตรงจวดไปยังชั้น transfer ผู้วิจัยจึงนำกระดาษแบบที่ 1 มาทดลองซ้ำเพื่อพิสูจน์สมมุติฐานนี้

4.3.3 ผลการทดลองการไหลระหว่างชั้นของสารสีย้อม CA และ EBT

จากกระดาษรูปแบบที่ 3 สีของ CA ในทุกๆ ช่องหายไป ทำให้ผู้ทำการทดลองสนใจที่จะทดลองกับกระดาษแบบที่ 1 และเพิ่มชั้น Transfer เข้ามาเพื่อทดสอบว่าสารสีย้อมละลายไหลลงไปยังชั้น Transfer หรือไม่



รูปที่ 4.3.3.1 แสดงผลการทดลองการไหลย้อมกับระหว่างชั้นของสารสีย้อมในชั้นต่างๆ

จากรูปทางด้านซ้ายเป็นส่วนที่ใส่ CA และทางด้านขวาเป็นส่วนที่ใส่ EBT ส่วนช่องตรงกลาง 2 ส่วน เป็นส่วนที่ใส่ไอออนของ Al^{3+} ลงไปจะเห็นได้ว่าเมื่อแกะกระดาษออกมาดู พบว่ามีสีชมพูของ CA ละลายลงมาเป็นส่วนมาก และ ส่วนของ EBT มีการละลายลงมาบางส่วน ทำให้ผู้ทำการทดลองต้องออกแบบกระดาษใหม่เป็นกระดาษแบบที่ 4 เพื่อป้องกันการไหลกลับของสารสีย้อม

4.4 การทดลองกับอุปกรณ์กระดาษแบบที่ 4

4.4.1 ผลการทดลองของกระดาษแบบที่ 4

ตารางที่ 4.4.1 แสดงผลการทดลองของกระดาษแบบที่ 4 กับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ กับ CA และ EBT

Mili Q	Ni^{2+}	Al^{3+}	Mn^{2+}
Co^{2+}	Cd^{2+}	Ag^+	Zn^{2+}
Pb^{2+}	Cu^{2+}	Fe^{3+}	Cr^{3+}

จากการทดลองจะสังเกตได้ว่า CA (ช่องซ้ายมือ) มีการเปลี่ยนแปลงสีกับ Al^{3+} เพียงชนิดเดียวโดยการเปลี่ยนแปลงกระดาษจากสีเทาเป็นสีชมพู ในส่วน EBT (ช่องขวามือ) จะให้การเปลี่ยนแปลงสีกับ Al^{3+} Zn^{2+} Ni^{2+} Fe^{3+} และ Mn^{2+} โดยจะเปลี่ยนสีของกระดาษจากน้ำเงิน เป็นสีม่วง ม่วงเข้ม ม่วง น้ำตาล และ เทียว ตามลำดับ

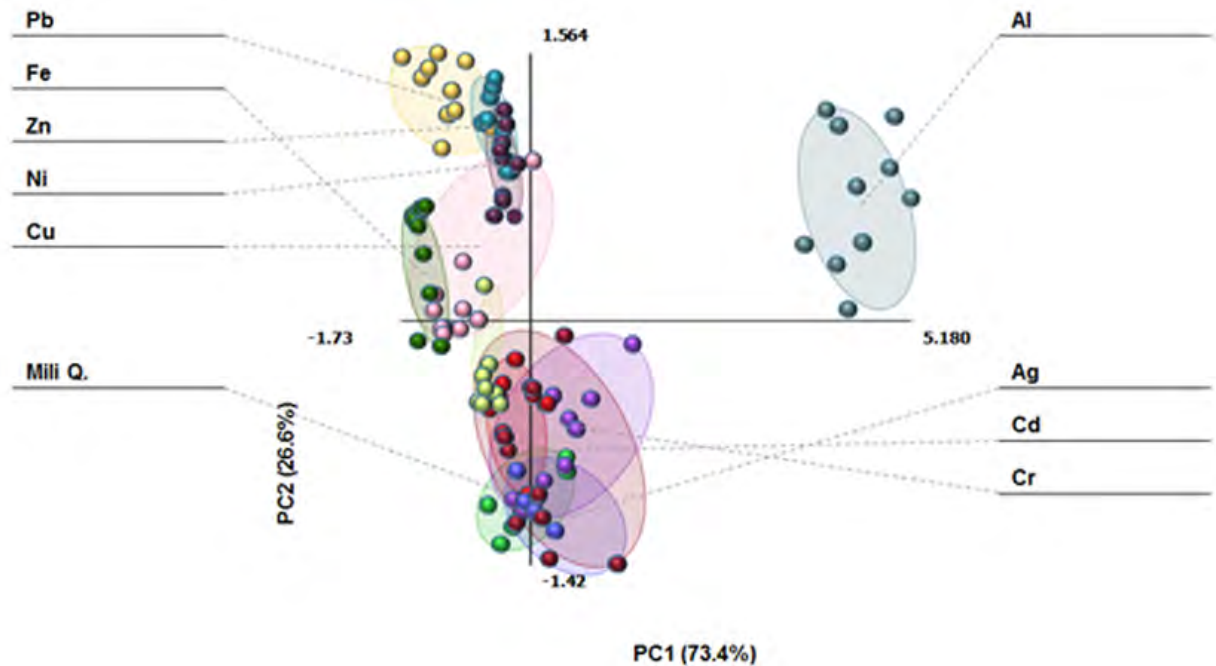
4.4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า R G B ด้วย โปรแกรม image J

ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างแต่ละชนิด จะทำการทดลอง 10 ครั้งซ้ำ เพื่อให้ได้ค่า R G B ของแต่ละสารตัวอย่าง 10 ค่า ดังแสดงในตารางที่ ก-1

4.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยหลักการวิเคราะห์ส่วนสำคัญ PCA

เนื่องจากการสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าของสารสีเดียวกับสารตัวอย่างมีจำนวนมาก และเห็นความแตกต่างไม่ชัดเจน จึงเป็นการยากที่จะแยกการตรวจวัดโลหะไอออนแต่ละชนิดออกจากกันด้วยตาเปล่าอย่างเดียว จึงได้มีการนำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยหลักการวิเคราะห์ส่วนสำคัญ PCA มาเป็นเครื่องมือในการแยกตรวจวัดโลหะไอออนแต่ละชนิด แล้วนำข้อมูลซึ่งเป็นตัวเลข R G B มาทำการวิเคราะห์เชิงสถิติแบบ PCA โดยแบ่งเป็นการวิเคราะห์จากข้อมูลของ CA อย่างเดียว และ EBT อย่างเดียว กับ สารตัวอย่าง และท้ายสุดได้ทำการวิเคราะห์จากข้อมูลของ CA และ EBT กับสารตัวอย่าง

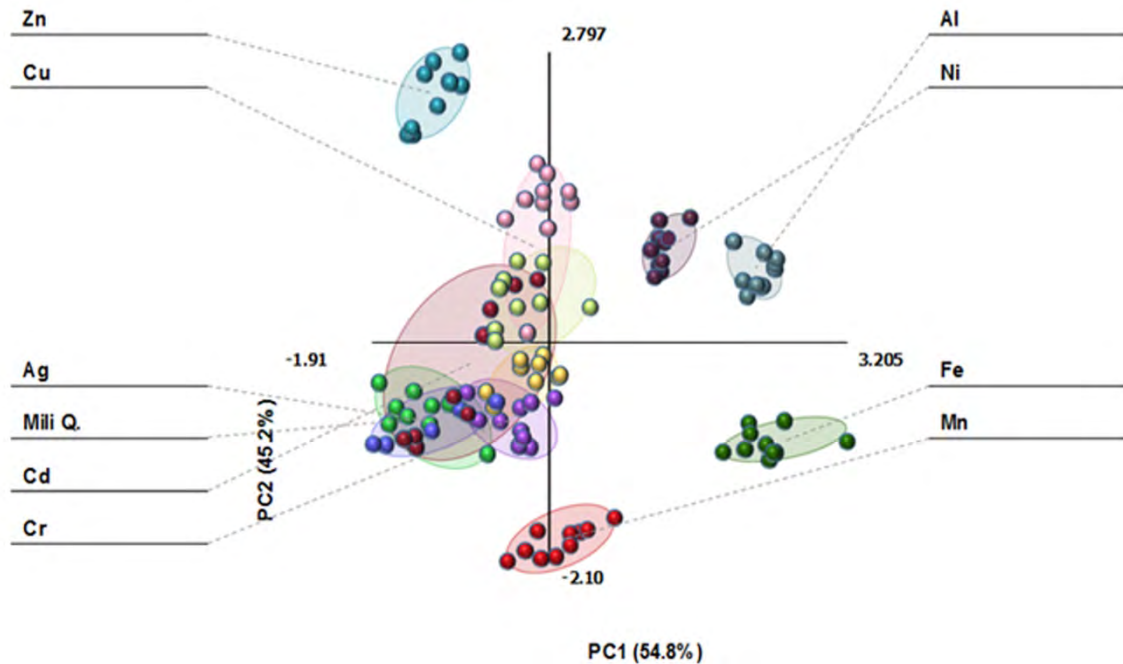
4.4.2.1 PCA ของ CA กับสารตัวอย่าง



รูปที่ 4.4.2.1 แสดงผลจากการวิเคราะห์ PCA ของสารสีเดียวกับ CA

จากการทำ PCA ของ R G B ในการเปลี่ยนแปลงสีของ CA จากไอออนของโลหะชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่า CA สามารถแยกโลหะชนิดต่างๆ ได้หลากหลายกลุ่ม โดยมี Al^{3+} ที่สามารถแยกกลุ่มออกมาจากไอออนของโลหะชนิดอื่นๆ ได้อย่างชัดเจนด้วยเปอร์เซ็นต์ความแน่นอนประมาณ 100

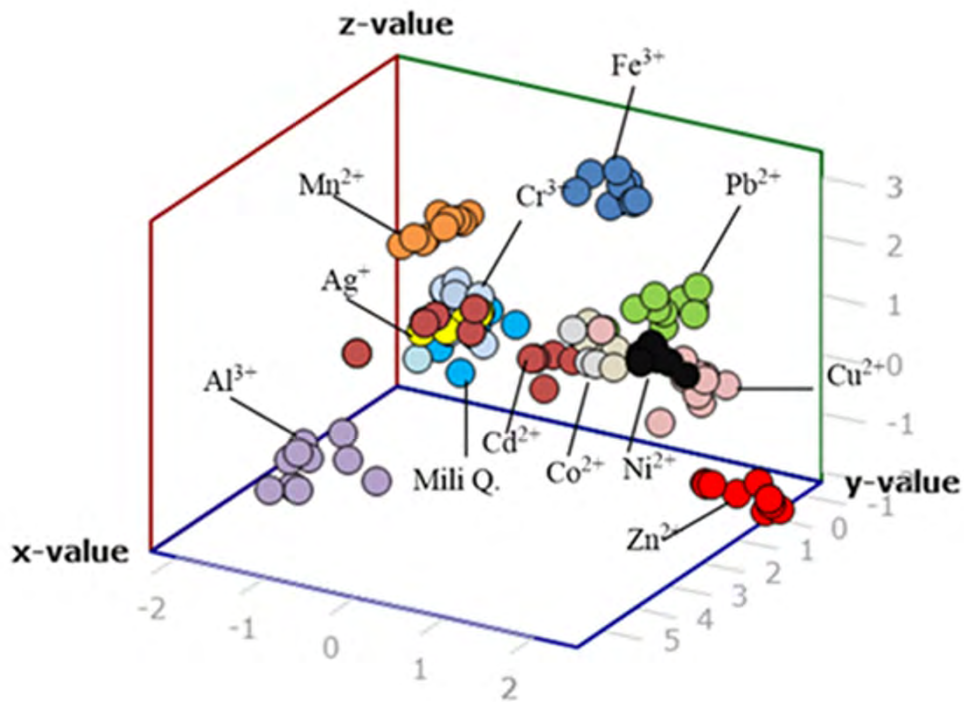
4.4.2.2 PCA ของ EBT กับสารตัวอย่าง



รูปที่ 4.4.2.2 แสดงผลจากการวิเคราะห์ PCA ของสารสี้อม EBT

จากการทำ PCA ของค่า R G B ในการเปลี่ยนแปลงสีของ EBT จะเห็นได้ว่า EBT สามารถแยกความแตกต่างในการตรวจวัดโลหะชนิดต่างๆ ได้อย่างชัดเจน โดยสามารถแยก Al^{3+} Zn^{2+} Ni^{2+} Fe^{3+} และ Mn^{2+} ออกจากกันได้ ส่วนไอออนโลหะตัวอื่นจะเกาะกลุ่มอยู่ใกล้กันกับน้ำ Mili Q

4.4.2.3 PCA ของ CA และ EBT รวมกัน



รูปที่ 4.4.2.3 แสดงผลจากการวิเคราะห์ PCA ของสารสีย้อม CA และ EBT

เมื่อนำค่า R G B ของ CA และ EBT มารวมกัน จากรูปจะเห็นได้ว่าการนำข้อมูลมารวมกันจะสามารถแยกความแตกต่างของโลหะชนิดต่างๆ ได้ออกเป็นหลากหลายกลุ่ม แต่จะมีเพียง Al³⁺ Zn²⁺ Pb²⁺ Mn²⁺ และ Fe³⁺ ที่แยกกลุ่มออกมาจากโลหะชนิดอื่นๆ อย่างชัดเจนทำให้สามารถใช้การเปลี่ยนแปลงสีในการวิเคราะห์โลหะดังกล่าวได้

การใช้ CA และ EBT สามารถแยกชนิดไอออนของโลหะ Al³⁺ Zn²⁺ Ni²⁺ Fe³⁺ Mn²⁺ และ Pb²⁺ ได้โดยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงสี และการวิเคราะห์ข้อมูลทาง PCA

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การทดลองจากกระดาษในรูปแบบต่างๆ

กระดาษแบบที่ 1 หาความจำเพาะของสารสี้อมกับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ

EBT มีความเลือกจำเพาะที่แตกต่างกันที่ pH ต่างๆ โดย

ที่ pH=3 สามารถใช้ในการวิเคราะห์โลหะ Ni^{2+} Cu^{2+} Mn^{2+} Cd^{2+} Ag^+ Pb^{2+} Fe^{3+} และ Cr^{3+}

ที่ pH=7.4 สามารถใช้ในการวิเคราะห์โลหะ Ni^{2+} Al^{3+} Zn^{2+} Cu^{2+} และ Mn^{2+}

ที่ pH=10 สามารถใช้ในการวิเคราะห์โลหะ Mn^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} และ Mn^{2+}

ที่ pH=11 สามารถใช้ในการวิเคราะห์โลหะ Mn^{2+} และ Cu^{2+}

ที่ pH=12 สามารถใช้ในการวิเคราะห์โลหะ Mn^{2+}

CA มีความเลือกจำเพาะต่อไอออนของ Al^{3+} Mn^{2+} Co^{2+} Cd^{2+} Ag^+ Zn^{2+} Pb^{2+} Cu^{2+} Fe^{3+} และ Cr^{3+}

DMG มีความเลือกจำเพาะต่อไอออนของ Ni^{2+} เพียงชนิดเดียว

Rho_B 1 ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันสามารถเลือกจำเพาะการตรวจวัดไอออนโลหะได้แตกต่างกัน โดย

ที่ความเข้มข้น 1 mg/mL มีความเลือกจำเพาะต่อ Co^{2+} Ni^{2+} และ Cu^{2+}

ที่ความเข้มข้น 0.1 mg/mL มีความเลือกจำเพาะต่อ Cu^{2+} เพียงชนิดเดียว

Rho_B 2 เป็นสารสี้อมที่ไม่สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดไอออนของโลหะบนกระดาษได้

กระดาษแบบที่ 2 เมื่อใช้สารสี้อม Rho_B 1 และ DMG

ไม่สามารถวิเคราะห์โลหะหนักผสมระหว่าง Ni^{2+} และ Cu^{2+} ได้เพราะ Rho_B 1 ต้องใช้ความเข้มข้นสูงในการเปลี่ยนแปลงสีบนกระดาษ กับโลหะ Cu^{2+} ทำให้ Rho_B 1 จะเปลี่ยนแปลงสีได้กับโลหะ Ni^{2+} Co^{2+} และ Cu^{2+} ด้วยเช่นกัน

กระดาษแบบที่ 3 เมื่อใช้สารสี้อม EBT และ CA

จากผลการทดลองกระดาษแบบที่ 3 พบว่าสารสี้อมเกิดการไหลลงมาในระหว่างขั้นทำให้ไม่สามารถใช้ในการวิเคราะห์โลหะได้

กระดาษแบบที่ 4 เมื่อใช้สารสี้อม EBT และ CA

สามารถใช้ในการวิเคราะห์ไอออนของโลหะ Al^{3+} Zn^{2+} Ni^{2+} Fe^{3+} Mn^{2+} และ Pb^{2+} ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล R G B ด้วยโปรแกรม image J และ หลักการ PCA ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงสีได้ และไม่มีการไหลย้อนกลับของสารสี้อม

เอกสารอ้างอิง

1. http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html (accessed Apr. 11, 2016)
2. Mahmoud, M. E., Silica gel-immobilized Eriochrome black-T as a potential solid phase extractor for zinc (II) and magnesium (II) from calcium (II). *Talanta* **1997**, *45* (2), 309-315.
3. Gazda, D. B.; Fritz, J. S.; Porter, M. D., Determination of nickel(II) as the nickel dimethylglyoxime complex using colorimetric solid phase extraction. *Analytica Chimica Acta* **2004**, *508* (1), 53-59.
4. Zhao, Y.; Zhang, X.-B.; Han, Z.-X.; Qiao, L.; Li, C.-Y.; Jian, L.-X.; Shen, G.-L.; Yu, R.-Q., Highly Sensitive and Selective Colorimetric and Off-On Fluorescent Chemosensor for Cu²⁺ in Aqueous Solution and Living Cells. *Analytical Chemistry* **2009**, *81* (16), 7022-7030.
5. Wang, F.; Huang, W.; Li, K.; Li, A.; Gao, W.; Tang, B., Study on the fluorescence enhancement in Lanthanum(III)-carminic acid-cetyltrimethylammonium bromide system and its analytical application. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* **2011**, *79* (5), 1946-1951.
6. Mahammad, A.; Mistri, T.; Alam, R.; Bhowmick, R.; Mandal, S. K.; Dolai, M.; Khuda-Bukhsh, A. R., A simple rhodamine-based dual signalling reversible molecular switch for recognition of Al(III) with Promising applications for advanced logic operations - 'OR', 'Keypad Lock' & 'INHIBIT' logic function and cell-imaging studies[dagger]. *Analyst* **2014**.
7. Rattanarat, P.; Dungchai, W.; Cate, D.; Volckens, J.; Chailapakul, O.; Henry, C. S., Multilayer Paper-Based Device for Colorimetric and Electrochemical Quantification of Metals. *Analytical Chemistry* **2014**, *86* (7), 3555-3562.
8. Zhang, Y.; Zuo, P.; Ye, B.-C., A low-cost and simple paper-based microfluidic device for simultaneous multiplex determination of different types of chemical contaminants in food. *Biosensors and Bioelectronics* **2015**, *68*, 14-19.
9. Lehn, J. M. Organic Chemistry: Its Language and Its State of the Art. In Kisakurek, M. V. (Ed), Proceeding of the Centenary of the Geneva Conference, pp 72-75. Weinheim: VCH, 1993.

- 10 Graf, E.; Kintzinger, J. P.; Lehn, J. M.; LeMoigne, J., Molecular recognition. Selective ammonium cryptates of synthetic receptor molecules possessing a tetrahedral recognition site. *Journal of the American Chemical Society* **1982**, *104* (6), 1672-1678.
- 11 <http://www.rmutphysics.com/charud/naturemystery/colour/colour1.htm> (accessed Apr. 15, 2016)
- 12 Sharma, A.; Artiss, J. D.; Zak, B., A method for the sequential colorimetric determination of serum triglycerides and cholesterol. *Clinical Biochemistry* **1987**, *20* (3), 167-172.
13. Petrucci, R. H. General Chemistry: Principles and Modern Applications, 5th ed. New York: Macmillan Publishing, 1989.
- 14 Masoud, M. S.; Hammud, H. H.; Beidas, H., Dissociation constants of eriochrome black T and eriochrome blue black RC indicators and the formation constants of their complexes with Fe(III), Co(II), Ni(II), Cu(II), Zn(II), Cd(II), Hg(II), and Pb(II), under different temperatures and in presence of different solvents. *Thermochimica Acta* **2002**, *381* (2), 119-131.
- 15 Kirby, J., Spring, M., Higgitt, C. The Technology of Red Lake Pigment Manufacture: Study of the Dyestuff Substrate. National Gallery Technical Bulletin **2005**, *26*, 71-87.
- 16 Kirby, J., Spring, M., Higgitt, C. The Technology of Eighteenth- and Nineteenth-Century Red Lake Pigments. National Gallery Technical Bulletin **2007**, *28*, 69-87.
- 17 3M Innovative Properties Company, Method and Device for Indicating Moisture Based on Bis (Glyoxime) Transition Metal Complexes

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก-1 แสดงผลการวิเคราะห์ค่า R G B ด้วยโปรแกรม image J

ลำดับ	สาร ตัวอย่าง	Eriochrome black T (EBT)			Carminic acid (CA)		
		Red	Green	Blue	Red	Green	Blue
1	Mili Q.	0.315627	0.310773	0.3736	0.336785	0.327729	0.335487
2	Mili Q.	0.315905	0.315782	0.368313	0.346481	0.32237	0.331149
3	Mili Q.	0.310693	0.309612	0.379695	0.352753	0.317181	0.330066
4	Mili Q.	0.310966	0.314411	0.374623	0.341803	0.326604	0.331592
5	Mili Q.	0.311378	0.31335	0.375272	0.343875	0.324454	0.331672
6	Mili Q.	0.317829	0.312965	0.369206	0.344993	0.324029	0.330978
7	Mili Q.	0.312718	0.314744	0.372539	0.352907	0.317969	0.329124
8	Mili Q.	0.320743	0.312622	0.366635	0.339353	0.328826	0.331821
9	Mili Q.	0.309113	0.315973	0.374914	0.342762	0.325792	0.331446
10	Mili Q.	0.323914	0.320188	0.355898	0.345855	0.323284	0.330861
11	Al ³⁺	0.382629	0.293254	0.324117	0.401949	0.280712	0.317339
12	Al ³⁺	0.386538	0.290409	0.323053	0.408955	0.270206	0.320839
13	Al ³⁺	0.379602	0.294723	0.325675	0.408665	0.278664	0.312671
14	Al ³⁺	0.380034	0.292479	0.327487	0.420429	0.264115	0.315455
15	Al ³⁺	0.383059	0.293117	0.323824	0.412609	0.272083	0.315308
16	Al ³⁺	0.382194	0.292992	0.324814	0.413998	0.274823	0.311178
17	Al ³⁺	0.386766	0.289809	0.323425	0.411058	0.280252	0.308689
18	Al ³⁺	0.387499	0.288902	0.323598	0.423967	0.267353	0.308679
19	Al ³⁺	0.381702	0.28632	0.331978	0.406354	0.270511	0.323135
20	Al ³⁺	0.385739	0.287979	0.326282	0.419547	0.267687	0.312765
21	Cr ³⁺	0.324529	0.310797	0.364674	0.349935	0.314824	0.335242
22	Cr ³⁺	0.332919	0.31295	0.354131	0.352435	0.317815	0.329749
23	Cr ³⁺	0.331438	0.318971	0.349592	0.348232	0.320761	0.331007
24	Cr ³⁺	0.329465	0.318823	0.351713	0.343883	0.32464	0.331478
25	Cr ³⁺	0.324534	0.315034	0.360432	0.353172	0.314645	0.332183
26	Cr ³⁺	0.339542	0.311208	0.349249	0.354775	0.314519	0.330705
27	Cr ³⁺	0.331092	0.316534	0.352374	0.346327	0.322885	0.330788

28	Cr ³⁺	0.334905	0.312037	0.353058	0.366462	0.303771	0.329767
29	Cr ³⁺	0.331084	0.317536	0.35138	0.357776	0.311242	0.330982
30	Cr ³⁺	0.328236	0.315035	0.356729	0.341917	0.324885	0.333198
31	Mn ²⁺	0.340686	0.32952	0.329794	0.348468	0.316051	0.33548
32	Mn ²⁺	0.333722	0.331837	0.334441	0.336904	0.321874	0.341222
33	Mn ²⁺	0.331768	0.33211	0.336122	0.338856	0.320204	0.34094
34	Mn ²⁺	0.319355	0.336633	0.344012	0.348861	0.315802	0.335337
35	Mn ²⁺	0.327653	0.335699	0.336648	0.339648	0.321996	0.338356
36	Mn ²⁺	0.330909	0.333941	0.335151	0.339636	0.319043	0.341321
37	Mn ²⁺	0.323126	0.334905	0.341968	0.345907	0.316718	0.337375
38	Mn ²⁺	0.335032	0.331438	0.33353	0.340047	0.322084	0.337869
39	Mn ²⁺	0.326757	0.331866	0.341377	0.344831	0.323187	0.331982
40	Mn ²⁺	0.325279	0.336065	0.338656	0.342167	0.316368	0.341465
41	Pb ²⁺	0.340639	0.30473	0.354631	0.331651	0.303477	0.364872
42	Pb ²⁺	0.335876	0.306616	0.357508	0.32268	0.30877	0.368549
43	Pb ²⁺	0.328275	0.310625	0.3611	0.337056	0.30487	0.358074
44	Pb ²⁺	0.341587	0.308051	0.350362	0.325883	0.305792	0.368326
45	Pb ²⁺	0.33941	0.306044	0.354546	0.328084	0.308393	0.363523
46	Pb ²⁺	0.337157	0.308784	0.354059	0.328866	0.306603	0.36453
47	Pb ²⁺	0.328557	0.312475	0.358968	0.329589	0.307447	0.362964
48	Pb ²⁺	0.32831	0.312902	0.358787	0.31852	0.309532	0.371948
49	Pb ²⁺	0.336471	0.305568	0.357961	0.32401	0.307573	0.368417
50	Pb ²⁺	0.342145	0.30766	0.350195	0.326792	0.311042	0.362166
51	Zn ²⁺	0.346444	0.263385	0.390171	0.340441	0.305296	0.354263
52	Zn ²⁺	0.341112	0.266593	0.392295	0.335089	0.305536	0.359375
53	Zn ²⁺	0.3488	0.258303	0.392897	0.339447	0.303925	0.356628
54	Zn ²⁺	0.343672	0.259879	0.396449	0.336748	0.303198	0.360055
55	Zn ²⁺	0.341044	0.261878	0.397078	0.336241	0.304789	0.35897
56	Zn ²⁺	0.33449	0.271168	0.394343	0.341037	0.305657	0.353306
57	Zn ²⁺	0.333679	0.271301	0.39502	0.34089	0.305551	0.353559
58	Zn ²⁺	0.334781	0.270258	0.394961	0.340332	0.305977	0.353691
59	Zn ²⁺	0.344642	0.262828	0.39253	0.3373	0.30236	0.360339
60	Zn ²⁺	0.3446	0.263051	0.392349	0.337749	0.301562	0.360689

61	Ag ⁺	0.329113	0.312048	0.35884	0.344249	0.323949	0.331802
62	Ag ⁺	0.322303	0.313431	0.364267	0.346211	0.323539	0.33025
63	Ag ⁺	0.307079	0.319181	0.37374	0.350504	0.322692	0.326803
64	Ag ⁺	0.304834	0.319066	0.3761	0.346811	0.322429	0.33076
65	Ag ⁺	0.315638	0.316898	0.367464	0.342534	0.322907	0.334559
66	Ag ⁺	0.322202	0.311464	0.366334	0.347011	0.322119	0.33087
67	Ag ⁺	0.323083	0.314113	0.362803	0.342518	0.326051	0.331431
68	Ag ⁺	0.312159	0.319434	0.368407	0.347737	0.323206	0.329057
69	Ag ⁺	0.312568	0.317705	0.369727	0.349389	0.324901	0.32571
70	Ag ⁺	0.310622	0.318152	0.371226	0.363623	0.318368	0.31801
71	Cd ²⁺	0.345206	0.293031	0.361763	0.352233	0.310121	0.337646
72	Cd ²⁺	0.334993	0.297822	0.367186	0.340847	0.322503	0.336651
73	Cd ²⁺	0.340859	0.293924	0.365218	0.340019	0.322071	0.337909
74	Cd ²⁺	0.331694	0.301931	0.366375	0.345295	0.316556	0.338149
75	Cd ²⁺	0.331694	0.301931	0.366375	0.345813	0.316364	0.337823
76	Cd ²⁺	0.322202	0.311464	0.366334	0.347011	0.322119	0.33087
77	Cd ²⁺	0.323083	0.314113	0.362803	0.342518	0.326051	0.331431
78	Cd ²⁺	0.312159	0.319434	0.368407	0.347737	0.323206	0.329057
79	Cd ²⁺	0.312568	0.317705	0.369727	0.349389	0.324901	0.32571
80	Cd ²⁺	0.310622	0.318152	0.371226	0.363623	0.318368	0.31801
81	Co ²⁺	0.352137	0.297104	0.350759	0.33609	0.321789	0.342121
82	Co ²⁺	0.33911	0.293298	0.367591	0.334571	0.322608	0.342821
83	Co ²⁺	0.344038	0.296588	0.359374	0.336741	0.319312	0.343947
84	Co ²⁺	0.334243	0.300916	0.364841	0.335476	0.320572	0.343952
85	Co ²⁺	0.33792	0.294523	0.367556	0.338277	0.320306	0.341416
86	Co ²⁺	0.339534	0.297461	0.363005	0.335754	0.314998	0.349249
87	Co ²⁺	0.347543	0.29034	0.362117	0.339105	0.320521	0.340373
88	Co ²⁺	0.339547	0.301335	0.359119	0.334516	0.317639	0.347845
89	Co ²⁺	0.342991	0.290275	0.366733	0.336114	0.321006	0.34288
90	Co ²⁺	0.333421	0.302645	0.363933	0.335406	0.322343	0.342251
91	Cu ²⁺	0.353446	0.275203	0.371351	0.330736	0.320038	0.349226
92	Cu ²⁺	0.354693	0.276655	0.368652	0.325416	0.32146	0.353123
93	Cu ²⁺	0.356525	0.280881	0.362594	0.331356	0.318562	0.350081

94	Cu ²⁺	0.344287	0.283842	0.371871	0.325595	0.320418	0.353987
95	Cu ²⁺	0.349111	0.280707	0.370182	0.331371	0.315662	0.352967
96	Cu ²⁺	0.351929	0.281121	0.366951	0.327531	0.321525	0.350944
97	Cu ²⁺	0.35268	0.279397	0.367923	0.327093	0.321741	0.351166
98	Cu ²⁺	0.339547	0.301335	0.359119	0.334516	0.317639	0.347845
99	Cu ²⁺	0.350724	0.285115	0.364161	0.327269	0.322004	0.350728
100	Cu ²⁺	0.356845	0.279392	0.363763	0.345639	0.302736	0.351625
101	Fe ²⁺	0.371597	0.319858	0.308545	0.322227	0.324843	0.35293
102	Fe ²⁺	0.364048	0.318952	0.317	0.322397	0.31698	0.360623
103	Fe ²⁺	0.370753	0.314371	0.314876	0.324482	0.320886	0.354632
104	Fe ²⁺	0.372157	0.317611	0.310232	0.326909	0.322889	0.350202
105	Fe ²⁺	0.36795	0.318368	0.313683	0.321065	0.317834	0.3611
106	Fe ²⁺	0.373011	0.31876	0.308229	0.321176	0.318066	0.360758
107	Fe ²⁺	0.372641	0.318815	0.308544	0.322098	0.318008	0.359894
108	Fe ²⁺	0.370266	0.315873	0.313861	0.322681	0.316625	0.360694
109	Fe ²⁺	0.377047	0.313847	0.309106	0.323471	0.316126	0.360403
110	Fe ²⁺	0.386126	0.316744	0.29713	0.323233	0.319114	0.357653
111	Ni ²⁺	0.368797	0.28613	0.345074	0.339463	0.307824	0.352714
112	Ni ²⁺	0.369673	0.286709	0.343618	0.340053	0.303226	0.356721
113	Ni ²⁺	0.366598	0.291347	0.342054	0.339247	0.304726	0.356028
114	Ni ²⁺	0.370217	0.283375	0.346408	0.339643	0.302577	0.35778
115	Ni ²⁺	0.366772	0.290294	0.342934	0.339334	0.305623	0.355044
116	Ni ²⁺	0.367959	0.289673	0.342368	0.342435	0.304474	0.353091
117	Ni ²⁺	0.365235	0.292218	0.342547	0.338853	0.305369	0.355778
118	Ni ²⁺	0.375759	0.282829	0.341411	0.339465	0.308088	0.352447
119	Ni ²⁺	0.366785	0.287997	0.345218	0.337654	0.309856	0.35249
120	Ni ²⁺	0.370605	0.286152	0.343243	0.342251	0.307779	0.34997

คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้วิจัย

นาย อาทิตย์ แก้วอำไพ เกิดเมื่อวันที่ 17 กรกฎาคม 2537 ที่จังหวัด สุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย สายสามัญ แผนการเรียนวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียน สุราษฎร์พิทยา จังหวัด สุราษฎร์ธานี เมื่อปีการศึกษา 2554 และเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้หลังจบการศึกษาปริญญาตรี เลขที่ 277/44 ถนนธราธิบดี ตำบลท่าข้าม อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84130



ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย