



การสังเคราะห์ลิแกนด์รีดิวซ์ชิฟเบสสำหรับการตรวจหาปริมาณเหล็กในสารตัวอย่างโดยใช้
สมาร์ทโฟน

SYNTHESIS OF REDUCED SCHIFF BASE LIGAND FOR IRON DETERMINATION IN
SAMPLES BY SMARTPHONE

SUNTI DOUNGCHANDENG

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การสังเคราะห์ลิแกนด์รีดิวซ์ฟิโอสสำหรับการตรวจหาปริมาณเหล็กในสารตัวอย่างโดยใช้
สมาร์ทโฟน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
การศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2567
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

SYNTHESIS OF REDUCED SCHIFF BASE LIGAND FOR IRON DETERMINATION IN
SAMPLES BY SMARTPHONE



SUNTI DOUNGCHANDENG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF EDUCATION
(Chemistry)

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2024

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การสังเคราะห์หลักฐานเชิงประจักษ์เพื่อใช้ในการตรวจหาปริมาณเหล็กในสารตัวอย่างโดยใช้สมาร์ตโฟน

ของ

SUNTI DOUNGCHANDENG

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.แพน ทองเรือง)

..... ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล อภิรติกุล)

..... ประธาน

(อาจารย์ ดร.นุจินทร์ วัชรกุล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อิทธิพล สังเวียนวงศ์)

ชื่อเรื่อง	การสังเคราะห์ลิแกนด์ Schiff base สำหรับการตรวจหาปริมาณเหล็กในสารตัวอย่างโดยใช้สมาร์ตโฟน
ผู้วิจัย	SUNTI DOUNGCHANDENG
ปริญญา	การศึกษามหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2567
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. แพน ทองเรือง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล อภิรติกุล

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีตรวจวัดปริมาณ Fe^{3+} ในสารตัวอย่างด้วย reduced Schiff base ligand ที่สังเคราะห์ง่ายและได้ % yield สูง โดยใช้สมาร์ตโฟน เมื่อศึกษาการจับจำเพาะเจาะจงกับไอออนบวกชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Na^+ K^+ Ag^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+} พบว่า reduced Schiff base ligand มีความจำเพาะเจาะจงกับ Fe^{3+} มากกว่าไอออนบวกชนิดอื่น ๆ โดยเกิดพีคใหม่ที่มีความยาวคลื่น 350-420 nm เป็นผลจาก ligand to metal charge transfer (LMCT) ค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 380 nm มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Fe^{3+} และมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) เท่ากับ 0.9994 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand ในช่วง $1.0 \times 10^{-4} - 1.0 \times 10^{-2}$ M ในการศึกษาการจับ Fe^{3+} พบว่าความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand ที่ 5.0×10^{-3} M มีการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีแดง สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนในการหาปริมาณ Fe^{3+} ได้ ความเข้มสี RGB แปรตามปริมาณ Fe^{3+} โดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นของ Fe^{3+} เท่ากับ $2.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-3}$ M โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) เท่ากับ 0.9980 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 1.3×10^{-5} M และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ (LOQ) เท่ากับ 4.3×10^{-5} M วิธีที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้เป็นตัวตรวจวัดในการหาปริมาณ Fe^{3+} ในสารตัวอย่างได้

คำสำคัญ : Reduced Schiff base ligand, ตัวตรวจวัด, สารตัวอย่าง, สมาร์ตโฟน, Fe^{3+}

Title	SYNTHESIS OF REDUCED SCHIFF BASE LIGAND FOR IRON DETERMINATION IN SAMPLES BY SMARTPHONE
Author	SUNTI DOUNGCHANDENG
Degree	MASTER OF EDUCATION
Academic Year	2024
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Pan Tongraung
Co Advisor	Assistant Professor Dr. Nuttapon Apiratikul

In this study, a simple and high-yield synthesis of a reduced Schiff base ligand was developed for the quantitative detection of Fe^{3+} in samples using a smartphone-based technique. The quantification of Fe^{3+} was analyzed using UV-Visible spectrophotometry. The selective binding of ligand with various cations (Na^+ , K^+ , Ag^+ , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Hg^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} , Fe^{3+}) was investigated. The results revealed that the reduced Schiff base ligand specifically formed a complex with Fe^{3+} , indicated by a new absorption peak in the 350-420 nm range due to ligand-to-metal charge transfer (LMCT). Quantitative studies of Fe^{3+} showed that the absorbance at 380 nm increased linearly with Fe^{3+} concentration, with a correlation coefficient (R^2) of 0.9994. As the concentration of the reduced Schiff base ligand increased within the range of 1.0×10^{-4} - 1.0×10^{-2} M, a distinct color change from yellow to red was observed at 5.0×10^{-3} M upon Fe^{3+} binding. This detection method allowed smartphone-based quantification through RGB color intensity analysis, which exhibited a linear correlation with Fe^{3+} concentration over the range of 2.0×10^{-5} to 1.0×10^{-3} M with a correlation coefficient (R^2) of 0.9980. The limit of detection (LOD) and limit of quantification (LOQ) were determined to be 1.3×10^{-5} M and 4.3×10^{-5} M. The developed method was successfully applied for Fe^{3+} quantification in real samples

Keyword : Reduced Schiff base ligand, Sensors, Samples, Smartphone, Fe^{3+}

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร. แพน ทอง เรือง อาจารย์ที่ปรึกษาหลักและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล อภิรติกุล อาจารย์ ที่ปรึกษาร่วม ที่ ท่านทั้งสองเมตตาคอยให้คำแนะนำชี้แนะต่าง ๆ ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดการวิจัยจนผ่านพ้นไปด้วยดี ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒและเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำปริญญานิพนธ์และช่วยเหลืออำนวยความสะดวกด้านธุรกรรมต่าง ๆ ตลอดการวิจัย ขอขอบคุณกรมการร่วมมือระหว่างประเทศ Thailand International Cooperation Agency (TICA) ที่เปิดโอกาสที่ดีและให้ทุนการศึกษาในครั้งนี้ นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่เป็นกำลังใจคอยช่วยเหลือในยามลำบากเสมอมา

กราบขอบพระคุณ ดร. นุจรินทร์ วะสุกัน ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธานกรรมการในการ สอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์และอ.ดร. อธิพล สังเวียนวงศ์ เป็นกรรมการควบคุมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ซึ่งได้กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัวและผู้มีพระคุณทุกท่านที่สนับสนุนเปิดโอกาส ให้ได้รับการศึกษาและเป็นกำลังใจในการศึกษาในครั้งนี้ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอน้อมบูชาพระคุณบิดา มารดาและบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ เมตตาแก่ผู้วิจัย ตลอดมาและเป็นกำลังใจที่สำคัญที่ทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

SUNTI DOUNGCHANDENG

สารบัญ

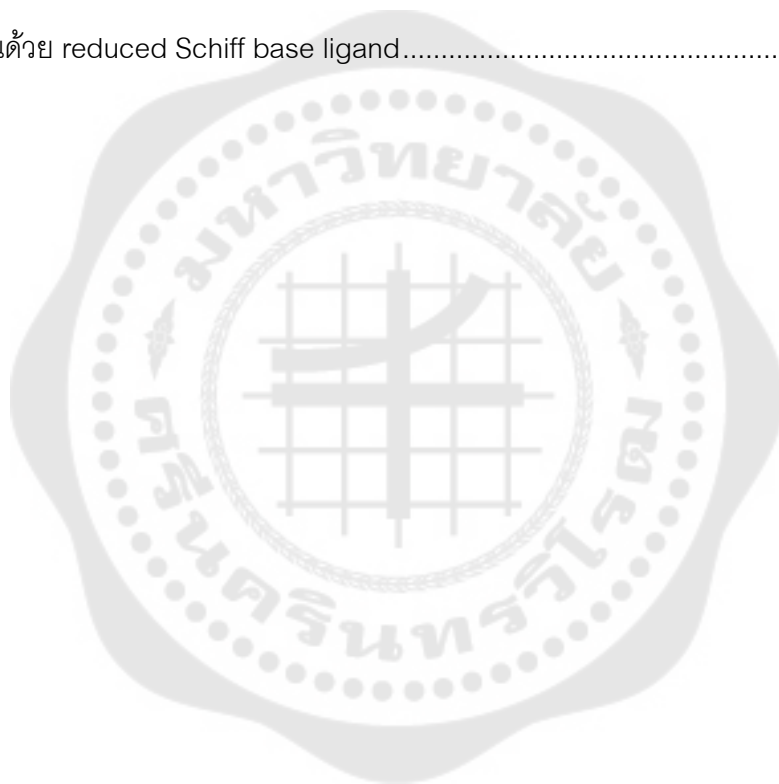
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย	4
ความสำคัญของงานวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย	5
นิยามคำศัพท์เฉพาะ	6
บทที่ 2 เอกสาร และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
ความสำคัญของ reduced Schiff base ligand	7
การสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand	8
ความสำคัญของเหล็ก	9
หลักการทำงานของ PhotoMetrix	10
การตรวจหาปริมาณ Fe^{3+} ด้วยเทคนิคต่างๆ	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	24
เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	25

วิธีดำเนินการ.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	32
การสังเคราะห์และพิสูจน์โครงสร้างของ reduced Schiff base ligand	32
ศึกษาการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ โดยใช้ UV-visible spectrophotometry	35
ศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการตรวจจับ Fe^{3+} โดยใช้ UV-visible Spectrophotometry	37
ศึกษาความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand ที่เหมาะสมในการตรวจวัด Fe^{3+} ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนโดยใช้สมาร์ทโฟนและศึกษาการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ โดยใช้การสังเกตด้วยตาเปล่า.....	38
ศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์โดยใช้สมาร์ทโฟน	41
ศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการตรวจจับ Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ทโฟน	42
ศึกษาผลการรบกวนการวิเคราะห์ของไอออนบวกที่เจือปนในสารตัวอย่าง ที่อาจส่งผลต่อการวิเคราะห์ Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ทโฟน.....	43
พัฒนาประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นในการหาปริมาณ Fe^{3+} ในสารตัวอย่าง	46
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	47
บรรณานุกรม	50
ประวัติผู้เขียน.....	58

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แสดงปริมาณสารอาหารที่แนะนำ (มิลลิกรัม/วัน) สำหรับการดูดกลืนธาตุเหล็กในอาหาร สำหรับผู้ใหญ่และเด็ก.....	9
ตาราง 2 การตรวจหาปริมาณ Fe^{3+} ด้านเทคนิคต่างๆ	11
ตาราง 3 ความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในตัวอย่างน้ำประปา น้ำคลองและน้ำดื่ม เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีที่ พัฒนาขึ้นด้วย reduced Schiff base ligand.....	46



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 การสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand.....	4
ภาพประกอบ 2 การสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand	8
ภาพประกอบ 3 อินเทอร์เฟซกราฟิกหลักของแอปพลิเคชัน PhotoMetrix พร้อมด้วยตัวเลือกการวิเคราะห์ (B) อินเทอร์เฟซการกำหนดค่า.....	11
ภาพประกอบ 4 แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์ Schiff base naphthalene-2-ol.....	13
ภาพประกอบ 5 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย H ₃ L ที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (0.2 mM) เมื่อเติมสารต่าง ๆ ไอออนของโลหะ (10.0 mM) ในตัวทำละลาย DMF/H ₂ O (v/v=1/1)	13
ภาพประกอบ 6 แสดงการสังเคราะห์ SBL.....	14
ภาพประกอบ 7 แสดงสเปกตรัมของ SBL (1x10 ⁻⁵ M) เมื่อเติมไอออนบวก Al ³⁺ Cd ²⁺ Ca ²⁺ Co ²⁺ Cu ²⁺ Fe ³⁺ Fe ²⁺ Hg ²⁺ Pb ²⁺ Ni ²⁺ Mg ²⁺ Na ⁺ K ⁺ และ Mn ²⁺ ในตัวทำละลายเอทานอล (1 x 10 ⁻⁴ M) ...	14
ภาพประกอบ 8 แสดงการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของ chemo sensor HBBA เมื่อเติม Fe ³⁺ และเติม Ethylenediaminetetraacetic acid: (EDTA)	15
ภาพประกอบ 9 กลไกการจับที่เป็นไปได้ของ CE-PEI-SA กับไอออน Fe ³⁺	16
ภาพประกอบ 10 สเปกตรัมการดูดกลืนของ (A) L1 และ (B) L2 เมื่อมีไอออนโลหะต่างกัน THF:H ₂ O ที่มีส่วนผสมของ 10:90% (L1) และ 40:60% (L2)	16
ภาพประกอบ 11 แสดง UV spectra และภาพถ่ายการเปลี่ยนแปลงสีของ PTC เมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่างๆ	17
ภาพประกอบ 12 แสดงแอปพลิเคชัน Color Assist App.....	18
ภาพประกอบ 13 แผนภาพระบบวิเคราะห์ที่ประกอบขึ้นเพื่อให้ได้มาซึ่งภาพดิจิทัลในการวิเคราะห์หา Fe ³⁺ ในเชื้อเพลิงไบโอเอทานอล.....	19
ภาพประกอบ 14 (a) สเปกตรัมการดูดกลืนของ L (30 μM) เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมไอออนโลหะต่างๆ 1 equiv (b) แสดงการไทเทรต L ด้วย Cu ²⁺ 0-0.6 equiv ใน tris HCl buffer 10 μM pH = 7.2..	19

ภาพประกอบ 15 แสดงการใช้สมาร์ตโฟนสำหรับการตรวจจับ Cr^{3+}	20
ภาพประกอบ 16 โครงสร้างของระบบสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบพกพาสำหรับสมาร์ตโฟน	21
ภาพประกอบ 17 การเตรียม VPA-AuNPs และกลไกการตรวจจับ UO_2^{2+}	21
ภาพประกอบ 18 การเปลี่ยนสีของสารละลาย rhodamine-based fluorometric and colorimetric เมื่อจับกับ Fe^{3+}	22
ภาพประกอบ 19 แสดงการใช้แอปพลิเคชัน PhotoMetrix ในการหาปริมาณ Mn^{2+}	23
ภาพประกอบ 20 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของ reduced Schiff base ligand ในตัวทำละลาย DMSO- d_6	33
ภาพประกอบ 21 สเปกตรัม $^{13}\text{C-NMR}$ ของ reduced Schiff base ligand ในตัวทำละลาย DMSO- d_6	34
ภาพประกอบ 22 สเปกตรัมอินฟราเรดของ reduced Schiff base ligand	34
ภาพประกอบ 23 สเปกตรัมมวล (Mass Spectrum, MS) ของ reduced Schiff base ligand ...	35
ภาพประกอบ 24 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ reduced Schiff base ligand ในตัวทำละลาย DMSO ความเข้มข้น 1.0×10^{-5} M เมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ (Na^+ K^+ Ag^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+}) ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M.....	36
ภาพประกอบ 25 กราฟแท่งแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย reduced Schiff base ligand (1.0×10^{-5} M) กับไอออนบวกชนิดต่าง ๆ (3.0×10^{-4} M) ก่อนเติม(สีน้ำเงิน) และหลังเติม Fe^{3+} ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M (สีส้ม) ที่ความยาวคลื่น 380 nm	36
ภาพประกอบ 26 สเปกตรัมของ reduced Schiff base ligand เมื่อเติมสารละลาย Fe^{3+} ความเข้มข้น 1.0×10^{-3} M ปริมาตร 0-800 μL	37
ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 380 nm กับความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในช่วง 2.0×10^{-6} - 1.0×10^{-3} M	38
ภาพประกอบ 28 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของ reduced Schiff base ligand ในแต่ละความเข้มข้นเมื่อจับกับ Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น 2.0×10^{-5} - 1.0×10^{-3} M	39

- ภาพประกอบ 29 แสดงการเปรียบเทียบกราฟมาตรฐานที่ให้ความเป็นเส้นตรงของ reduced Schiff base ligand ที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-4} 5.0×10^{-3} และ 1.0×10^{-2} M เมื่อจับกับ Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น 2.0×10^{-5} - 1.0×10^{-3} M 40
- ภาพประกอบ 30 แสดงการเปลี่ยนสีของสารละลาย reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 5×10^{-3} M (บน) และ 1×10^{-2} M (ล่าง) เมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Na^+ K^+ Ag^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+} ที่ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M..... 41
- ภาพประกอบ 31 แสดงการเปรียบเทียบความเข้มสีของสารละลาย reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ก่อนเติม Fe^{3+} และหลังเติม Fe^{3+} ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M ที่ pH ต่าง ๆ 42
- ภาพประกอบ 32 กราฟมาตรฐานแสดงสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีของ reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M เมื่อเติม Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น 2.0×10^{-5} - 1.0×10^{-3} M.. 43
- ภาพประกอบ 33 กราฟแท่งแสดงการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงของ reduced Schiff base ligand กับ Fe^{3+} ทั้งก่อนและหลังการเติม Fe^{3+} ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M ลงในไอออนบวกชนิดต่าง ๆ ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M 44
- ภาพประกอบ 34 กราฟแท่งแสดงผลการรบกวนการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe^{3+} (3.0×10^{-4} M) เมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ จำนวน 1 เท่า (3.0×10^{-4} M)..... 45
- ภาพประกอบ 35 กราฟแท่งแสดงผลการรบกวนการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe^{3+} (3.0×10^{-4} M) เมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ จำนวน 5 เท่า (1.5×10^{-3} M)..... 45

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ธาตุเหล็ก (Fe) คือ โลหะทรานซิชันชนิดหนึ่งที่เป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างมากต่อร่างกายมนุษย์ โดยมีความสำคัญในกระบวนการเผาผลาญและมีบทบาทต่อการทำงานทางสรีรวิทยา สรีรวิทยา (Domaille et al., 2008; Zhang et al., 2016) โดยทำหน้าที่ในกระบวนการทางเคมีและชีวภาพหลายอย่าง เช่น กระบวนการเมตาบอลิซึม การขนส่งออกซิเจนและการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Brugnara, 2003; Qin et al., 2008; Zhang et al., 2007) การได้รับธาตุเหล็กในปริมาณที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อสุขภาพอย่างมาก ถ้าได้รับมากเกินไปจะเกิดการสะสมในร่างกาย ส่งผลร้ายแรงทำให้เกิดความเสียหายต่อไตและตับ ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ฮีโมโครมาโตซิส และตับอักเสบ (Desai et al., 2014; Galaris et al., 2008; Qin et al., 2008; Yuan et al., 2004) การขาดธาตุเหล็กมีผลทำให้การสังเคราะห์เฮโมโกลบินและโปรตีนบางส่วนไม่เพียงพอและส่งผลต่อการขนส่งออกซิเจน ทำให้เกิดโรคต่างๆ รวมถึงกระบวนการเผาผลาญของเซลล์ โรคโลหิตจาง (Goswami et al., 2013; Prajapati et al., 2014; Sahoo et al., 2012; Wang et al., 2014) ปริมาณธาตุเหล็กโดยเฉลี่ยที่เหมาะสมในร่างกายมนุษย์ควรมีประมาณ 3.8 กรัม สำหรับผู้ชาย 2.3 กรัมและสำหรับผู้หญิง (Massironi et al., 2020; Mei et al., 2003) ปัญหาการขาดธาตุเหล็กในปัจจุบันมักพบในผู้หญิงตั้งครรภ์และเด็ก ร้อยละ 80 ก่อให้เกิดภาวะโรคโลหิตจาง เพื่อหลีกเลี่ยงการขาดธาตุเหล็กจึงจำเป็นต้องรับประทานอาหารที่มีธาตุเหล็กอย่างเพียงพอ เช่น เนื้อสัตว์ ตับ ปลา กุ้ง หอย ไข่แดงและผักที่มีธาตุเหล็ก เช่น ผักใบเขียว มะเขือพวง ผลไม้ที่มีวิตามินซี และรับประทานอาหารเสริมที่มีธาตุเหล็ก เช่น วิตามินรวม (AlJawaldeh et al., 2021; Weyrauch et al., 2024) ธาตุเหล็กที่มีอยู่ในสารตัวอย่างต่าง ๆ จะมีรูปแบบแตกต่างกันตามแต่ละชนิดของตัวอย่าง เช่น น้ำ ธาตุอยู่ในรูปแบบ สารประกอบ เฟอริกคลอไรด์ เฟอรัสซัลเฟต เฟอริกซัลเฟต เฟอริกคลอไรด์ เฟอริกไฮดรอกไซด์ ในอาหารธาตุเหล็กอยู่รูปแบบ ฮีโมโกลบิน ไมโอโกลบิน เฟอริกซีเตรต และรูปแบบของธาตุเหล็กที่มีในวิตามิน เฟอรัสกลูโคเนตและเฟอรัสฟูมาเรต (Appelo & Postma, 2004; Hurrell & Egli, 2010)

จากความสำคัญของธาตุเหล็กที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การวิเคราะห์หา Fe^{3+} ในตัวอย่างต่าง ๆ เช่น อาหาร วิตามินรวมและตัวอย่างน้ำจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ เช่น Capillary electrophoresis atomic absorption spectroscopy (Bag et al., 2000; Van Loon, 2012) Inductively coupled plasma mass spectrometry (Arnold et al.,

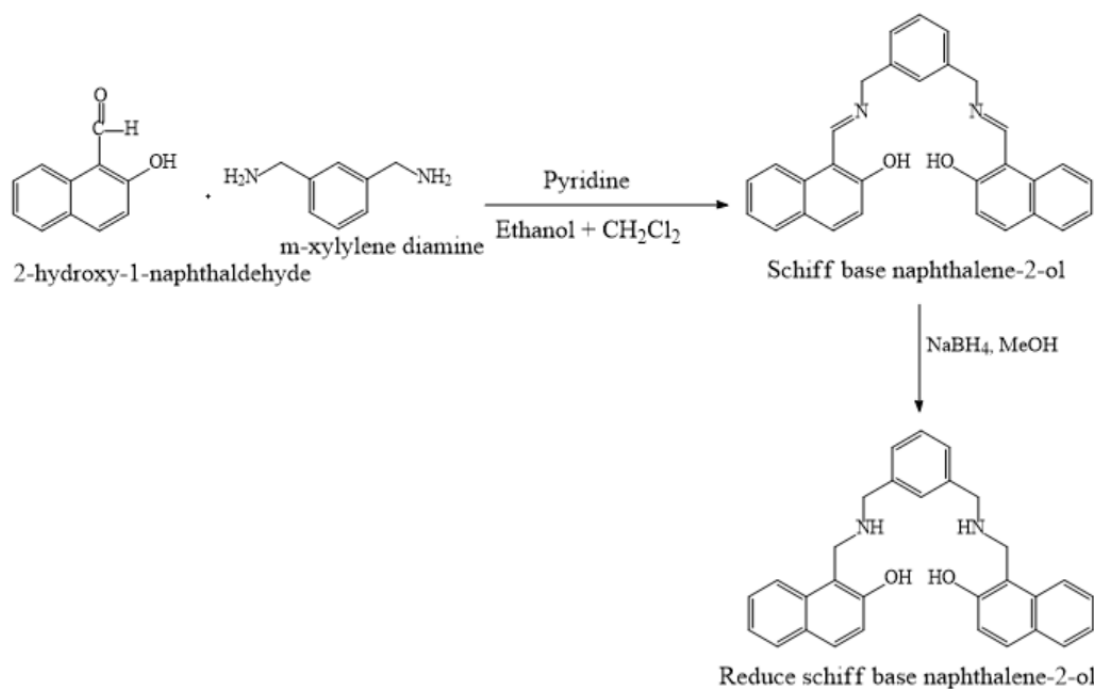
2004; Beauchemin, 2008; del Castillo Busto et al., 2009) fluorescence spectrophotometry (Mao et al., 2010; So & Dong, 2001) electrochemistry (Sobkowiak et al., 2014) and mass spectrometry (Domon & Aebbersold, 2006; Mohamed & Gledhill, 2015) ถึงแม้ว่าเทคนิคดังกล่าวนี้เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ มีความไวสูง มีความเที่ยงตรงและความแม่นยำที่ดี อย่างไรก็ตามเทคนิคเหล่านี้เป็นเครื่องมือขนาดใหญ่ มีความซับซ้อนและมีราคาสูง จึงต้องอาศัยผู้ทำการวิเคราะห์ที่มีประสบการณ์และมีความชำนาญในการใช้เครื่องมือ อีกทั้งบางเทคนิคจำเป็นต้องมีการเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ที่ยุ่งยาก ด้วยเหตุที่กล่าวมาข้างต้น นักวิจัยจึงให้ความสนใจออกแบบและสังเคราะห์โมเลกุลที่เป็น fluorescence sensor สำหรับการตรวจวัดไอออนของโลหะหนักในตัวอย่าง รวมถึงไอออนของเหล็ก โดยเฉพาะ fluorescence sensor ประเภท Schiff base เพราะมีข้อดีด้วยกัน 3 ข้อ คือ (1) เป็นได้ทั้งตัวจับและตัวส่งสัญญาณ (receptor/chemo sensor) (2) หาสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ง่ายและหลากหลาย (3) ปฏิกิริยาการสังเคราะห์เกิดง่าย ทำให้บริสุทธิ์ง่าย ได้ผลผลิตที่สูงและที่สำคัญสังเคราะห์ได้ง่ายเพียงขั้นตอนเดียวและต้นทุนต่ำได้รับความสนใจมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากใช้ต้นทุนในการตรวจวัดต่ำ (Fang et al., 2019; Sun et al., 2016) ช่วงการตรวจวัดที่กว้างขึ้น (Mironenko et al., 2017) และประสิทธิภาพการตรวจวัดที่ (Li et al., 2019) ทำให้ลดต้นทุนได้ ถึงแม้ว่า fluorescent sensor จะมีข้อดีดังที่กล่าวมาแล้ว แต่ก็ยังไม่เลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนเพียงชนิดเดียวแต่เลือกจับกับไอออนบวกมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปและมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ fluorescent sensor ที่ไม่สามารถติดตามได้ด้วยตาเปล่า เช่น งานวิจัยของ Lingyan Wang และคณะ (Wang et al., 2014) ได้รายงาน Schiff base probe ที่ได้จากการสังเคราะห์ของ di-ketopyrrolopyrrole และ p-methoxy aniline ที่ตรวจวัด Fe^{3+} และ Al^{3+} ให้สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ที่ลดลงเมื่อจับกับ Fe^{3+} และเพิ่มขึ้นเมื่อจับกับ Al^{3+} หรืองานวิจัยของ Min Zhang และคณะ (Zhang et al., 2019) รายงาน Schiff base probe จากการสังเคราะห์จาก 2-hydroxy-1-naphthaldehyde และ 5-amino salicylic acid ที่สามารถตรวจวัดได้ทั้ง Al^{3+} Cr^{3+} Fe^{3+} และ Cu^{2+} โดยมีทั้งการเปลี่ยนแปลงสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ เมื่อจับกับ Al^{3+} Fe^{3+} โดยมีสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อจับกับ Al^{3+} และมีสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ที่ลดลงเมื่อจับกับ Fe^{3+} ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายที่แตกต่างกันเมื่อจับกับ Cr^{3+} และ Cu^{2+} ไม่สามารถตรวจจับได้อย่างจำเพาะเจาะจง งานวิจัยของ Aussawaponpaisan และคณะ ที่ได้สังเคราะห์ Schiff base - naphthalene-2-ol ซึ่งมีทั้ง Schiff base และหมู่ไฮดรอกซิลเป็นตัวจับไอออนโลหะ และ 6-nitronaphthalene เป็นตัวส่งสัญญาณ สามารถตรวจจับได้อย่างจำเพาะเจาะจงกับ Cu^{2+} ถึงแม้ว่างานวิจัยนี้จะจับอย่าง

จำเพาะเจาะจงกับไอออนเพียงชนิดเดียวแต่การสังเคราะห์ค่อนข้างยุ่งยากและไม่สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่า (Aussawaponpaisan et al., 2017)

ปัจจุบันมีการรายงานงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้กับสมาร์ทโฟนในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นไอออนบวกของโลหะหนักกันอย่างแพร่หลาย โดยสังเกตการเปลี่ยนสีแปรตามปริมาณสารตัวอย่าง เช่น ในปี ค.ศ. 2018 Upadhyay และคณะ ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยใช้วิตามินบี 6 เป็นตัวดัดแปลงพื้นผิว สามารถเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับ Cr^{3+} สารละลายเปลี่ยนสีจากสีแดงไวน์เป็นสีน้ำเงินม่วง สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับสมาร์ทโฟนที่เป็นระบบ iOS ผ่านแอปพลิเคชัน Color Assist ตั้งแต่วรุ่น iPhone 6 plus (Upadhyay et al., 2018) หรืองานวิจัย Selva Kumar และคณะได้สังเคราะห์ new Schiff base จากปฏิกิริยา 1,10-phenanthroline-2,9-dicarbohydrazide กับ 2-Hydroxynaphthaldehyde สามารถตรวจ จับ Th^{4+} ทำให้สารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล และเมื่อจับ Al^{3+} ทำให้สารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลือง สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับสมาร์ทโฟนที่เป็นระบบ iOS ผ่านแอปพลิเคชัน (color picker) (Kumar et al., 2018) และในปี ค.ศ 2021 Sangsin และคณะ (Sangsin et al., 2021) มีการใช้สมาร์ทโฟนหาปริมาณ Cr^{3+} ในอาหารเสริมที่ง่าย ไม่ยุ่งยาก โดยใช้อนุภาคนาโนเงินที่ถูกดัดแปลงพื้นผิวด้วยอีทีเอและกรดแทนนิกในการจับกับ Cr^{3+} แล้วเกิดการรวมตัวเห็นการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองเป็นสีแดง สามารถประยุกต์ใช้กับสมาร์ทโฟนผ่านแอปพลิเคชัน “PhotoMetrix” ถ่ายภาพจะได้ค่า RGB (สีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) โดยความเข้มของสีแดงแปรตามปริมาณของ Cr^{3+} ทำให้สามารถหาปริมาณ Cr^{3+} ในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมได้ หรือในปี ค.ศ 2023 Sungwienwong และคณะ (Sungwienwong et al., 2023) ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินที่ถูกดัดแปลงพื้นผิวด้วยซิเตรท เมลามีนและอีทีเอ เมื่อจับกับ Mn^{2+} ที่ pH 10 จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลอมแดงสามารถหาปริมาณ Mn^{2+} ในตัวอย่างน้ำโดยใช้สมาร์ทโฟนผ่านแอปพลิเคชัน “PhotoMetrix” เช่นกัน

จาก fluorescence sensor ต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โมเลกุลเหล่านั้นไม่เลือกจับจำเพาะเจาะจงกับโลหะไอออนใด ๆ เลยและไม่สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีได้ด้วยตาเปล่า งานวิจัยนี้ค้นพบ reduced Schiff base ligand ที่เลือกจับจำเพาะเจาะจงกับ Fe^{3+} ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand โดยสังเคราะห์จากปฏิกิริยา coupling ระหว่าง 2-hydroxy-1-naphthaldehyde กับ m-xylylenediamine เกิดเป็น Schiff base-naphthalene-2-ol จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชันพันธะคู่ด้วย NaBH_4 ได้ reduced Schiff base ligand-naphthalene-2-ol ที่สังเคราะห์ได้ง่ายเพียง 2 ขั้นตอนและได้ % yield ที่สูง สามารถใช้

เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัด Fe^{3+} ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า โดยเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีแดงในตัวทำละลาย DMSO สามารถประยุกต์ใช้กับสมาร์ทโฟนผ่านแอปพลิเคชัน “PhotoMetrix” ได้ ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาเซ็นเซอร์ชนิดใหม่ที่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงสีได้ด้วยตาเปล่าที่มีประสิทธิภาพ มีความน่าเชื่อถือและมีต้นทุนต่ำ



ภาพประกอบ 1 การสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand ที่มีคุณสมบัติเชิงแสงและเป็น chromogenic sensor สำหรับการตรวจวัด Fe^{3+}
2. เพื่อตรวจหาปริมาณ Fe^{3+} ในสารตัวอย่างโดยใช้สมาร์ทโฟนที่ให้ผลการตรวจวัดที่แม่นยำและมีความไวสูง

ความสำคัญของงานวิจัย

1. การสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand สามารถสังเคราะห์ได้ง่ายเพียง 2 ขั้นตอนและได้ร้อยละผลได้ (% yield) สูง โดยพิสูจน์โครงสร้างด้วยเทคนิค Infrared Spectroscopy (IR), $^1\text{H-NMR}$, $^{13}\text{C-NMR}$ และ Mass spectrometry โดย reduced Schiff base ligand ที่สังเคราะห์ขึ้นมีความเสถียร และมีคุณสมบัติเชิงแสงที่เปลี่ยนไปเมื่อจับกับ Fe^{3+} สารละลายจะ

เปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีแดง โดยความเข้มสีที่เปลี่ยนไปแปรตามปริมาณของ Fe^{3+} สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

2. การหาปริมาณ Fe^{3+} ในสารตัวอย่างด้วย reduced Schiff base ligand ร่วมกับสมาร์ทโฟนผ่านแอปพลิเคชัน PhotoMetrix สามารถทำได้ง่าย ให้ผลการตรวจวัดที่เที่ยงตรงแม่นยำและมีค่าใช้จ่ายต่ำ ใช้งานภาคสนามได้

ขอบเขตของการวิจัย

1. สังเคราะห์ reduced Schiff base ligand จากปฏิกิริยา coupling ระหว่าง 2-hydroxy-1-naphthaldehyde กับ *m*-xylylene diamine เกิดเป็น Schiff base-naphthalene-2-ol จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชันด้วย NaBH_4 ได้ผลิตภัณฑ์ reduced Schiff base ligand

2. พิสูจน์โครงสร้างของ reduced Schiff base ligand ด้วยเทคนิค NMR Spectroscopy, IR Spectroscopy และ Mass Spectrometry

3. ศึกษาการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ เช่น Na^+ K^+ Ag^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+} โดยใช้เทคนิค UV-visible spectrophotometry

4. ศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการตรวจจับ Fe^{3+} ในสารละลาย เช่น ความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (LOD) ความเข้มข้นต่ำสุดที่หาปริมาณได้ (LOQ) ความแม่นยำและความเที่ยงโดยใช้ UV-visible Spectrophotometry

5. ศึกษาความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand ที่เหมาะสมในการตรวจวัด Fe^{3+} ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนและ pH ที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์โดยใช้สมาร์ทโฟน

6. ศึกษา reduced Schiff base ligand ที่ความเข้มข้นที่มองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนในการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ โดยการสังเกตด้วยตาเปล่า

7. ศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการตรวจจับ Fe^{3+} ในสารละลาย เช่น ความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (LOD) ความเข้มข้นต่ำสุดที่หาปริมาณได้ (LOQ) ความแม่นยำและความเที่ยงโดยใช้สมาร์ทโฟน

8. ศึกษาผลการรบกวนการวิเคราะห์ของไอออนบวกที่เจือปนในสารตัวอย่าง ที่อาจส่งผลต่อการวิเคราะห์ Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ทโฟน

9. พัฒนาประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นในการหาปริมาณ Fe^{3+} ในสารตัวอย่าง

นิยามคำศัพท์เฉพาะ

Reduced Schiff base ligand หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา coupling ระหว่าง 2-hydroxy- 1-naphthadehyde กับ *m*-xylylenediamine เกิดเป็น Schiff base–naphthalene-2-ol จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชันด้วย NaBH_4 ได้ผลิตภัณฑ์ reduced Schiff base ligand (1,1'(((1,3phenylenebis(methylene)))bis(azanediyl))bis(methylene))bis(naphthalen-2-ol))

Fe^{3+} หมายถึงไอออนของเหล็ก (III) ในสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์

สารตัวอย่าง หมายถึง น้ำประปา น้ำคลอง น้ำดื่ม

Chromogenic หมายถึงวิธีการที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย reduced Schiff base ligand ที่เปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีแดงเมื่อเติม Fe^{3+}

สมาร์ตโฟน หมายถึงโทรศัพท์มือถือที่ประยุกต์ใช้กับกล้องดิจิทัลควบคู่กับแอปพลิเคชัน PhotoMetrix ถ่ายภาพสารละลาย reduced Schiff base ligand ที่เปลี่ยนสีเมื่อเติม Fe^{3+} แล้วนำข้อมูลของภาพถ่ายไปหาค่าความเข้มสี RGB หรือสีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) เพื่อคำนวณหาปริมาณของ Fe^{3+}

บทที่ 2

เอกสาร และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะนำเสนอตามหัวข้อ
ดังนี้

1. ความสำคัญของ reduced Schiff base ligand
2. การสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand
3. ความสำคัญของเหล็ก
4. หลักการทำงานของ PhotoMetrix
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความสำคัญของ reduced Schiff base ligand

Schiff base คือหมู่ฟังก์ชันที่มีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน-ไนโตรเจน ($-C=N-$) ซึ่งเกิดจากการควบแน่นของเอมีนด้วยอัลดีไฮด์หรือคีโตน reduced Schiff base ligand หมายถึง Schiff base ที่ผ่านปฏิกิริยารีดักชันที่ทำให้พันธะคู่ของ ($-CH=N-$) ถูกเปลี่ยนเป็นด้วยพันธะเดี่ยว ($-CH_2-NH-$) ซึ่งเรียกว่า reduced Schiff base ligand การ reduced Schiff base ligand สามารถทำได้ด้วยวิธีการต่างๆ รวมถึงการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน การรีดิวซ์โดยใช้ $NaBH_4$ และการรีดิวซ์ด้วย Raney Nickel ปฏิกิริยานี้มีประโยชน์ในการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดอะมิโนแอลกอฮอล์และไซคลิกเอมีนของ Schiff base ที่ถูกรีดิวซ์ มีการประยุกต์ใช้หลายอย่างในเคมีอินทรีย์ เช่น ในการพัฒนานาฬิกาชีวภาพสำหรับการเร่งปฏิกิริยาแบบอสมมาตร และเป็นตัวกลางในการสังเคราะห์ยา reduced Schiff base ligand เป็นสารที่สามารถใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ และมีประโยชน์มากมาย ดังนี้ (Oboova et al., 2023)

1. สร้างสารประกอบอะโรมาติก reduced Schiff base ligand สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารประกอบอะโรมาติก และใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องสำอาง น้ำหอม และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้ ที่มีกลิ่นเหมือนสารประกอบจากธรรมชาติ เช่น วานิลลาสกัดและกลิ่นหอมของผลไม้ต่างๆ (Boulechfar et al., 2023)

2. ใช้เป็นสารประกอบสำหรับสี reduced Schiff base ligand ใช้เป็นสารประกอบสำหรับสีในการผลิตหลายประเภท เช่น สีเยียวเข้มและสีน้ำเงิน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ปลอดภัยต่อมนุษย์และสัตว์ (Jos & Suja, 2023)

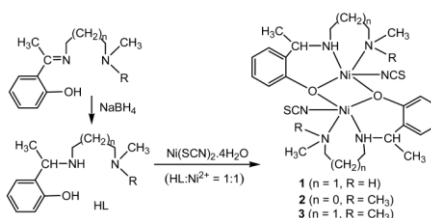
3. ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี reduced Schiff base ligand สามารถใช้เป็นสารประกอบสำหรับการผลิตยาและสารประกอบในอุตสาหกรรมเคมีอื่น ๆ เช่น สารป้องกันสนิม สารป้องกันความเสียหายของโลหะ (Jafari et al., 2022)

4. งานวิจัยทางการแพทย์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันและเป็นตัวยับยั้งไม่ให้เซลล์มะเร็งเกิดการขยายตัว เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ ป้องกันตาเหลืองและโรคมะเร็ง เป็นต้น (Sreenivasulu, 2009)

5. Reduced Schiff base ligand เป็นสารคีเลตที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับโลหะได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุเหล็ก (Fe) และธาตุนิกเกิล (Ni) ซึ่งทำให้ reduced Schiff base ligand มีประโยชน์สำหรับการวัดหาปริมาณโลหะในตัวอย่างทางชีวภาพ เช่น การวิเคราะห์ธาตุเหล็กในเลือดและการหาปริมาณธาตุเหล็กสะสมในเนื้อเยื่อต่างๆ ของสัตว์และพืช (Singh et al., 2009)

การสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand

การสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand สามารถทำได้โดยวิธีการต่างๆ วิธีการทั่วไปวิธีหนึ่งคือปฏิกิริยาของสารประกอบอะมิโนหรือกรดอะมิโนกับอัลดีไฮด์หรือคีโตนทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์ เช่น NaBH_4 หรือ LiAlH_4 ตัวรีดิวซ์ช่วยรีดิวซ์พันธะคู่ imine เพื่อสร้างเอมีนทุติยภูมิ (Biswas et al., 2010) อีกวิธีหนึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของสารประกอบอะมิโนกับอัลดีไฮด์หรือคีโตนทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทรานซิชัน เช่น Pd Ni หรือ Cu ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะส่งเสริมการรีดิวซ์ของพันธะคู่ imine ซึ่งนำไปสู่การสร้าง reduced Schiff base ligand นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารรีดิวซ์จากธรรมชาติ เช่น สารสกัดจากพืช โพลีฟีนอลหรือแสงแดดเพื่อ reduced Schiff base ligand การสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand สามารถทำได้โดยใช้วิธีการที่หลากหลายและขึ้นอยู่กับการใช้งานเฉพาะและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการดังแสดงในภาพประกอบที่ 2 (Sreenivasulu et al., 2005)



ภาพประกอบ 2 การสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand

ที่มา: Sreenivasulu, B. (2012).

ความสำคัญของเหล็ก

Iron (Fe) จัดอยู่ในธาตุกลุ่ม d เลขอะตอมเท่ากับ 26 มีความหนาแน่นสูง สีเงินเทา Fe มีเลขออกซิเดชันหลายค่า ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติและการนำไปใช้งานของ Fe (Iannotti et al., 2006; Schumann et al., 2007) Fe มีความสำคัญในอุตสาหกรรม เช่น การผลิตเหล็กและการผลิตสารเคมีต่างๆ เช่น สี ยารักษาโรค และอื่นๆ ได้มีการนำ Fe มาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น การผลิตอะไหล่คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ไอทีอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีความสำคัญในสิ่งมีชีวิตและมนุษย์ โดยมีบทบาทสำคัญในการสร้างเซลล์เม็ดเลือดแดงและฟอสฟอรัสในร่างกาย มีความสำคัญในกระบวนการเผาผลาญและการทำงานทางสรีรวิทยา โดยทำหน้าที่ในกระบวนการทางเคมีและชีวภาพหลายอย่าง เช่น กระบวนการเมแทบอลิซึม การขนส่งออกซิเจนและการถ่ายโอนอิเล็กตรอน การได้รับไอออนของเหล็กในปริมาณที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อสุขภาพอย่างมาก ถ้าได้รับมากเกินไปจะเกิดการสะสมในร่างกาย ส่งผลร้ายแรงทำให้เกิดความเสียหายต่อไตและตับ ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ฮีโมโครมาโตซิสและตับอักเสบ การขาดธาตุเหล็กมีผลทำให้การสังเคราะห์เฮโมโกลบินและโปรตีนบางส่วนไม่เพียงพอและส่งผลต่อการขนส่งออกซิเจน ทำให้เกิดโรคต่างๆ มากมายรวมถึงกระบวนการเผาผลาญของเซลล์ โรคโลหิตจาง

ปริมาณธาตุเหล็กที่ร่างกายต้องการต่อวันต่างกันไปขึ้นอยู่กับเพศและอายุของบุคคล ดังตารางที่ 1 (Organization, 2004) เพื่อหลีกเลี่ยงการขาดธาตุเหล็กจึงจำเป็นต้องรับประทานอาหารที่มีธาตุเหล็กอย่างเพียงพอ เช่น เนื้อสัตว์ ตับ ปลา กุ้ง หอย ไข่แดงและผักที่มีธาตุเหล็ก เช่น ผักใบเขียว มะเขือพวง ผลไม้ที่มีวิตามินซีและรับประทานอาหารเสริมที่มีธาตุเหล็ก เช่น วิตามินรวม (Ahlberg, 2021; Zakrzewski, 2024)

ตาราง 1 แสดงปริมาณสารอาหารที่แนะนำ (มิลลิกรัม/วัน) สำหรับการดูดกลืนธาตุเหล็กในอาหารสำหรับผู้ใหญ่และเด็ก

Group	Age (Years)	Mean body weight (kg)	Recommended nutrient intake(mg/day) for a dietary iron bioavailability			
			15%	12%	10%	5%
Infants and children	0-1	9	6.2	7.7	9.3	18.6
	1-3	13	3.9	4.8	5.8	11.6
	4-6	19	4.2	5.3	6.3	12.6

ตาราง 1 (ต่อ)

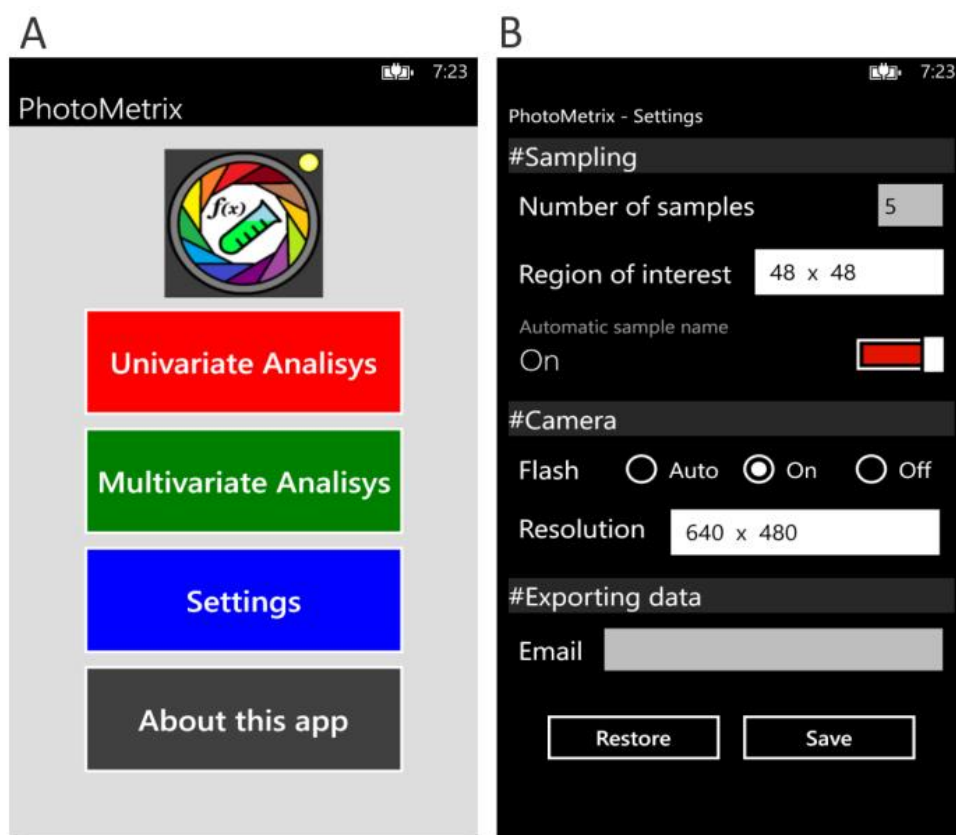
Group	Age (Years)	Mean body weight (kg)	Recommended nutrient intake(mg/ day) for a dietary iron bioavailability			
			15%	12%	10%	5%
Infants and children	7-10	28	5.9	7.4	8.9	17.8
Males	11-14	45	9.7	12.2	14.6	29.2
	15-17	64	12.5	15.4	18.8	37.6
	18 ⁺	75	9.1	11.7	13.7	27.4
Females	11-14	46	9.3	27.7	32.7	65.4
	15-17	46	21.8	25.8	31.0	62.0
	18 ⁺	6.2	19.6	24.5	29.4	58.8
Postmenopausal		62	7.5	9.4	11.3	22.6
Lactating		62	10.0	12.5	15.0	30.0

ที่มา: (Organization, 2004)

หลักการทำงานของ PhotoMetrix

แอปพลิเคชัน PhotoMetrix ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ 2015 ใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ทางเคมีของการถ่ายภาพดิจิทัลที่ได้ใช้กล้องสมาร์ทโฟนและประมวลผลภายในอุปกรณ์เดียวกัน ซึ่งเหมาะสมในงานที่ต้องการวิเคราะห์ในภาคสนามหรือในสถานที่จริง ภาพถ่ายแต่ละเวอร์ชันของแอปพลิเคชันถูกแยกออกเป็นสีหลัก 3 สี คือ สีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) สามารถจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบโมเดลเพิ่มสี่พื้นฐาน นอกนั้นแอปพลิเคชันจะวิเคราะห์ภาพด้วยการแยกช่องสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB) ซึ่งใช้ฮิสโตแกรม (histogram) ตามโมเดล RGB อีกทางหนึ่งคือจากแยกอิสระของชาแนล RGB และโมเดลสีที่ได้มาจาก RGB เช่น เชนเดสี (H) ความอิ่มตัว (S) ความสว่าง (L) ซึ่งกำหนดสีตามที่มีความยาวคลื่น เช่น ความแตกต่างระหว่างสีแดงและสีเหลือง

และความเข้มตัวคือปริมาณของสีที่มีอยู่ เช่น ความแตกต่างระหว่างสีแดงและสีชมพู ส่วนความสว่าง ความเข้ม ความแตกต่างระหว่างสีแดงเข้มและสีแดงอ่อน หรือระหว่างสีเทาเข้มและสีเทาอ่อน (Bock et al., 2020)



ภาพประกอบ 3 อินเทอร์เฟซกราฟิกหลักของแอปพลิเคชัน PhotoMetrix พร้อมด้วยตัวเลือกการวิเคราะห์ (B) อินเทอร์เฟซการกำหนดค่า

ที่มา: (Bock et al., 2020)

การตรวจหาปริมาณ Fe^{3+} ด้วยเทคนิคต่างๆ

ตาราง 2 การตรวจหาปริมาณ Fe^{3+} ด้านเทคนิคต่างๆ

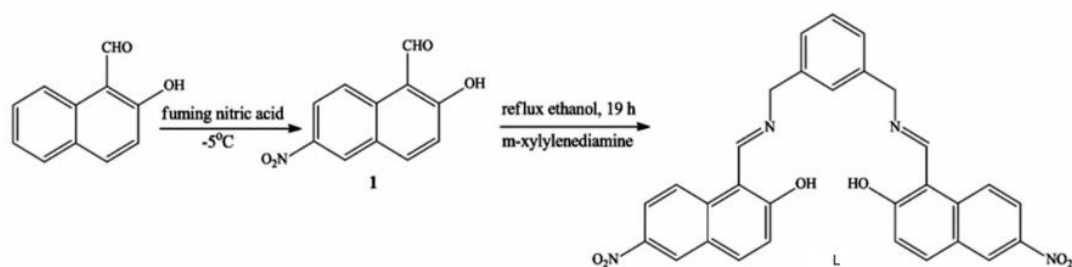
เทคนิค	เครื่องมือ/เทคนิค	LOD	%RSD	ตัวอย่าง	อ้างอิง
Capillary zone electrophoresis	capillary electrophoresis	0.06 ppm	-	น้ำใต้ดิน	(Pozdniakova et al., 1997)

ตาราง 2 (ต่อ)

เทคนิค	เครื่องมือ/เทคนิค	LOD	%RSD	ตัวอย่าง	อ้างอิง
Spectrometry	FAAS	0-15 ppm	2	น้ำมันหล่อ ลื่นใน รถยนต์	(Reis et al., 2004)
Spectroscopy	UV-Visible	0.458 μM	-	-	(Karami et al., 2016)
Spectrometry	UV-Vis (Model 2401PC)	0.65 μM	-	-	(Aussawapon paisan et al., 2017)
application's images of the sensor	สมาร์ทโฟน	~ 15 $\mu\text{g/dL}$	-	-	(Serhan et al., 2020)
Spectrometry	สมาร์ทโฟน	0.479 ppm	-	น้ำ	(Silva et al., 2022)

**งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาปริมาณ Fe^{3+} และโลหะอื่นๆ โดยการสังเคราะห์
ลิแกนด์ Schiff base**

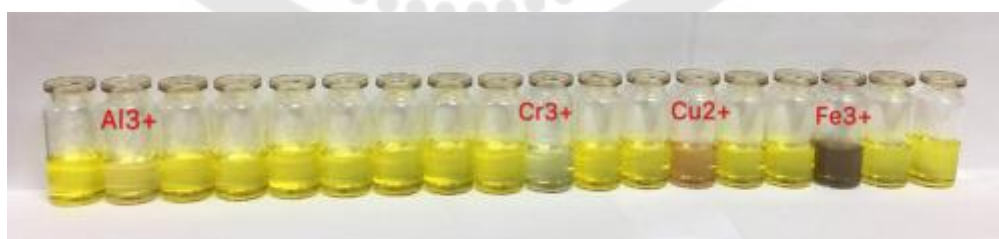
ในปี ค.ศ 2017 Aussawaponpaisan และคณะ (Aussawaponpaisan et al., 2017) ได้สังเคราะห์ Schiff base-naphthalene-2-ol (L) ดังแสดงในภาพประกอบ 4 ใช้สำหรับตรวจวัด Cu^{2+} เมื่อเติม Cu^{2+} จะแสดงการจับสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ในตัวทำละลาย DMSO ความเข้มของฟลูออเรสเซนซ์ที่ถูกระงับมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นของ Cu^{2+} ในช่วง 0.64-8.57 μM โดยมี R^2 เท่า 0.9941 มีค่า LOD เท่ากับ 0.65 μM ซึ่งเป็นอีกวิธีการที่มีความแม่นยำสูงและเชื่อถือได้สำหรับการตรวจวัด Cu^{2+}



ภาพประกอบ 4 แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์ Schiff base naphthalene-2-ol

ที่มา: (Aussawaponpaisan et al., 2017)

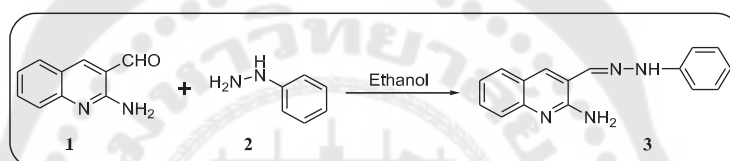
ในปี ค.ศ 2019 Zhang และคณะ (Zhang et al., 2019) ได้สังเคราะห์ Schiff base จากปฏิกิริยา 2-hydroxy-5-[(2-hydroxy-1-naphthyl)methylidene amino] benzoic acid (H_3L) ทำหน้าที่เป็น chemosensor อเนกประสงค์ที่สามารถตรวจจับ Cr^{3+} Cu^{2+} Fe^{3+} และ ไอออน Al^{3+} ในตัวทำละลาย DMF/ H_2O (v/v=1/1) เมื่อเติมไอออน Cr^{3+} Cu^{2+} Fe^{3+} หรือ Al^{3+} เกิดการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนของ H_3L หรือมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ที่เพิ่มขึ้นและลดลงที่หลากหลาย โดยมีสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อจับกับ Al^{3+} และมีสัญญาณ ฟลูออเรสเซนซ์ที่ลดลงเมื่อจับกับ Fe^{3+} ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายที่แตกต่างกันเมื่อจับกับ Cr^{3+} และ Cu^{2+} สามารถตรวจวิเคราะห์ Cr^{3+} Cu^{2+} Fe^{3+} และ Al^{3+} ได้ทั้ง 4 ชนิด โดยมีค่า LOD เท่ากับ 3.37×10^{-7} M 4.65×10^{-7} M 3.58×10^{-7} M และ 4.89×10^{-7} M ตามลำดับ



ภาพประกอบ 5 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย H_3L ที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (0.2 mM) เมื่อเติมสารต่าง ๆ ไอออนของโลหะ (10.0 mM) ในตัวทำละลาย DMF/ H_2O (v/v=1/1)

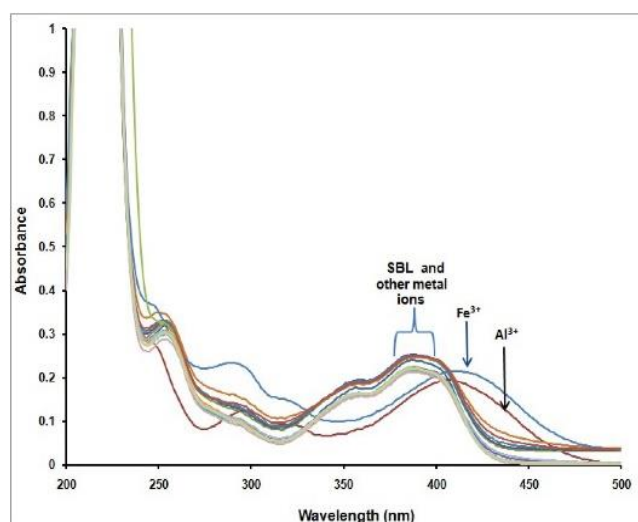
ที่มา: (Zhang et al., 2019)

ในปี ค.ศ 2019 Patil และคณะ (Patil et al., 2019) ได้สังเคราะห์สาร Schiff base ligand (SBL) ดังแสดงในภาพประกอบ 6 ซึ่งทำหน้าที่เป็นโพรบ (Probe) วัดสีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจวัด Al^{3+} และ Fe^{3+} ในตัวทำละลายเอทานอล เมื่อ SBL จับกับ Al^{3+} และ Fe^{3+} SBL จะเกิดการเปลี่ยนสีและเกิดพีคใหม่ที่ 427 nm โดยเกิด red shift 34 nm ดังแสดงในภาพประกอบ 7 และเมื่อวิเคราะห์ด้วย Fluorescence spectrophotometry พบว่า SBL จับกับ Al^{3+} จะเกิดการรบกวนแสงเพิ่มขึ้นโดยความเข้มข้นของฟลูออเรสเซนต์ที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นของ Al^{3+} $3.81 \times 10^{-5} - 8.15 \times 10^{-5}$ M โดยมี R^2 เท่ากับ 0.986 มีค่า LOD เท่ากับ 8.22×10^{-6} M และค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นเมื่อจับกับ Fe^{3+} มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน โดยมี R^2 เท่ากับ 0.978 และมีค่า LOD เท่ากับ 2.74×10^{-5} M



ภาพประกอบ 6 แสดงการสังเคราะห์ SBL

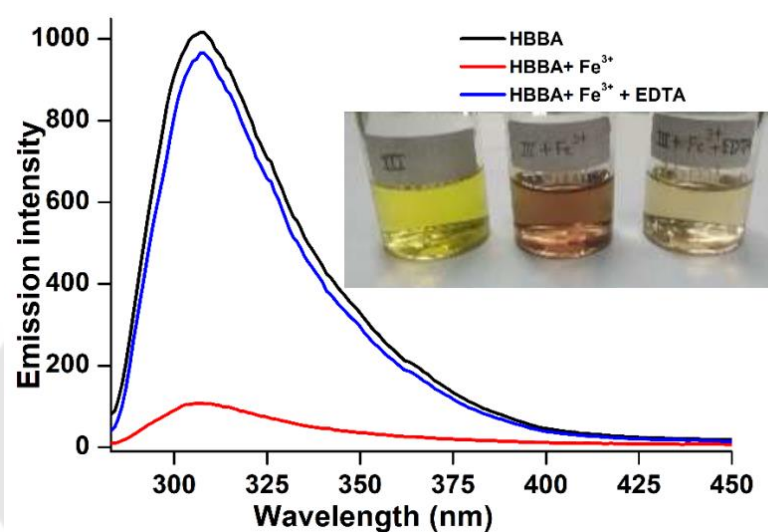
ที่มา: (Patil et al., 2019)



ภาพประกอบ 7 แสดงสเปกตรัมของ SBL (1×10^{-5} M) เมื่อเติมไอออนบวก Al^{3+} Cd^{2+} Ca^{2+} Co^{2+} Cu^{2+} Fe^{3+} Fe^{2+} Hg^{2+} Pb^{2+} Ni^{2+} Mg^{2+} Na^{+} K^{+} และ Mn^{2+} ในตัวทำละลายเอทานอล (1×10^{-4} M)

ที่มา: (Patil et al., 2019)

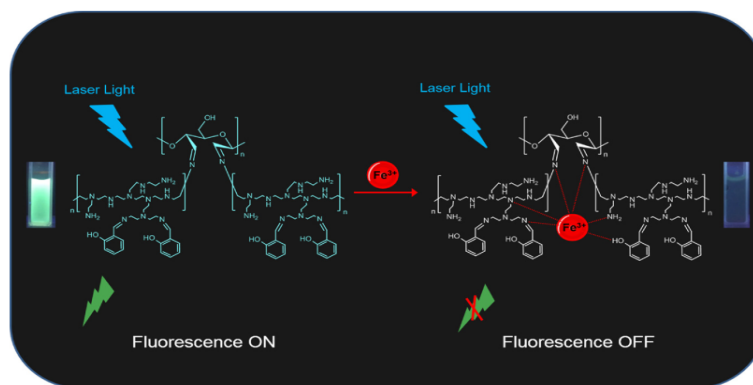
ในปี ค.ศ. 2019 Singh และคณะ (Singh et al., 2019) ได้พัฒนาเซ็นเซอร์เรืองแสงตัวใหม่คือ 4-(2-hydroxybenzylideneamino) benzoic acid (HBBA) ใช้สำหรับการตรวจจับไอออน Fe^{3+} เมื่อเติม Fe^{3+} จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของสารละลายจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาล และเมื่อติดตามปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค fluorescent spectrophotometry พบว่าสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ ที่ลดลงมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในช่วง $0.27 \times 10^{-5} - 1.2 \times 10^{-5}$ M มีค่า R^2 เท่ากับ 0.98211 และค่า LOD เท่ากับ 0.77 μM



ภาพประกอบ 8 แสดงการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของ chemo sensor HBBA เมื่อเติม Fe^{3+} และเติม Ethylenediaminetetraacetic acid: (EDTA)

ที่มา: (Singh et al., 2019)

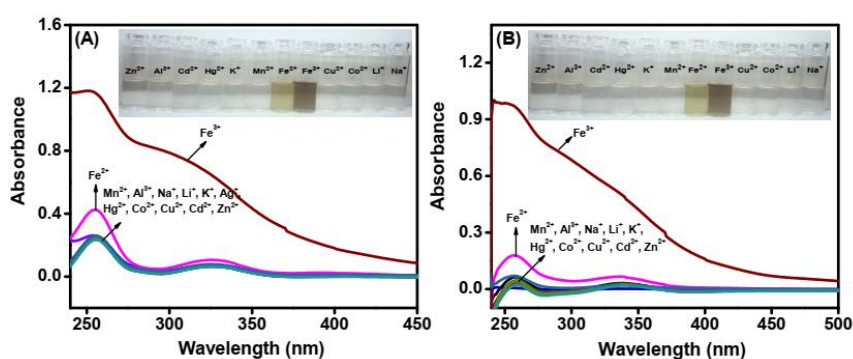
ในปี ค.ศ. 2020 Fan และคณะ (Fan et al., 2020) ได้ออกแบบเซ็นเซอร์ตัวใหม่ที่สังเคราะห์จากไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส (MCC) โพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) และซาลิซิลาลดีไฮด์ (SA) โดยเซ็นเซอร์ตัวใหม่นี้เลือกจับจำเพาะเจาะจงกับ Fe^{3+} เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และเกิดการระงับสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ โดยการระงับการวาวแสงมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในช่วง 4-20 ppm โดยมีค่า LOD เท่ากับ 0.01 ppm ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำที่มีความไวสูงและความน่าเชื่อถือในการตรวจจับ Fe^{3+}



ภาพประกอบ 9 กลไกการจับที่เป็นไปได้ของ CE-PEI-SA กับไอออน Fe^{3+}

ที่มา: (Fan et al., 2020)

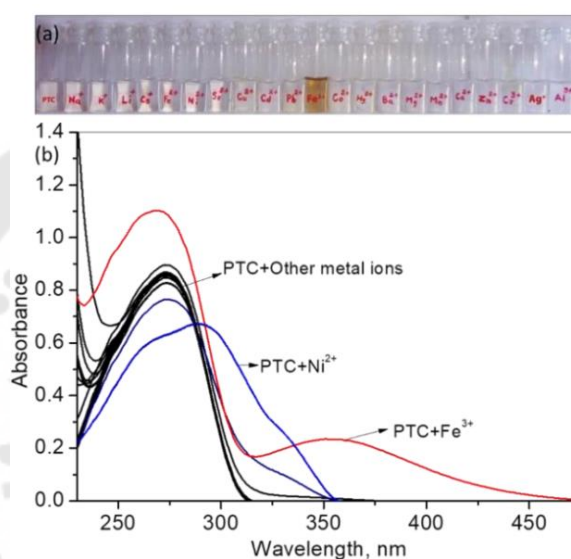
ในปี ค.ศ 2020 Harathi และ Thenmozhi (Harathi & Thenmozhi, 2020) ได้สังเคราะห์อนุพันธ์ของซาลิซิลาลดีไฮด์เรืองแสงสองตัวคือ L1 และ L2 ผ่านปฏิกิริยาของ Schiff base ที่เกิดการรวมตัว สามารถตรวจสอบคุณสมบัติทางแสงของ L1 และ L2 โดยใช้การวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการการวาวแสงฟลูออเรสเซนซ์ ลิแกนด์ทั้งสองได้แสดงการเลือกจับจำเพาะเจาะจงกับ Fe^{3+} ดังภาพประกอบ 10 ซึ่งเกิดจากการถ่ายโอนประจุจากลิแกนด์ไปยังโลหะ (LMCT) ลิแกนด์ทั้งสองสามารถตรวจจับ Fe^{3+} ได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่า LOD เท่ากับ 0.163 μM และ 3.99 μM ตามลำดับ



ภาพประกอบ 10 สเปกตรัมการดูดกลืนของ (A) L1 และ (B) L2 เมื่อมีไอออนโลหะต่างกัน
THF:H₂O ที่มีส่วนผสมของ 10:90% (L1) และ 40:60% (L2)

ที่มา: (Harathi & Thenmozhi, 2020)

ในปี ค.ศ Patil และคณะ (Patil et al., 2022) ได้สังเคราะห์ chemo sensor ชนิดใหม่จากปฏิกิริยาของ *N*-(pyrimidin-2-y)thiophene-2-carboxamide (PTC) สำหรับการตรวจจับกับ Fe^{3+} ที่มีความไวสูง สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีได้ด้วยตาเปล่า ติดตามการเกิดปฏิกิริยาด้วยเทคนิค UV-visible spectrophotometry พบว่ามีค่า LOD เท่ากับ $2.03 \mu\text{M}$ และเมื่อติดตามปฏิกิริยาด้วยเทคนิค fluorescence spectrophotometry พบว่ามีค่า LOD เท่ากับ $1.24 \mu\text{M}$



ภาพประกอบ 11 แสดง UV spectra และภาพถ่ายการเปลี่ยนแปลงสีของ PTC เมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่างๆ

ที่มา: (Patil et al., 2022)

ในปี ค.ศ 2020 Jittangprasert และคณะ (Jittangprasert et al., 2020) ได้พัฒนาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินที่มีพื้นผิวดัดแปลงโดยใช้สารเพิ่มความคงตัวร่วมกัน (4-ATP-CT-EDTA-L-TA-AgNPs) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ Fe^{3+} โดยมีความจำเพาะต่อ Fe^{3+} มากกว่าไอออนชนิดอื่นๆ และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์กับตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้พบว่าตรวจวัด Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น $3.0\text{--}100.0 \text{ mg/L}$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9997 และมีค่า LOD เท่ากับ (3SD) ที่ 0.13 mg/L และ LOQ เท่ากับ (10SD) ที่ 3.04 mg/L วิธีการวิเคราะห์นี้มีความเที่ยงตรงสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีค่าความเที่ยงตรงของผลการวิเคราะห์แบบภายในวันเดียวกันและแบบระหว่างวันสูง (%RSD < 2.0 ; n=3)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สมาร์ทโฟนตรวจหาไอออนของโลหะ

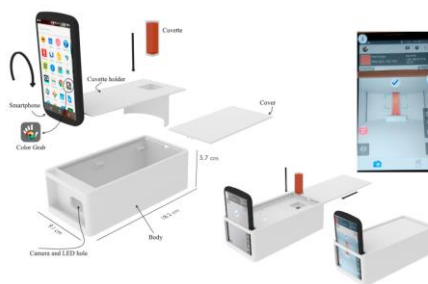
ในปี ค.ศ. 2018 Upadhyay และคณะ (Upadhyay et al., 2018) ได้สังเคราะห์ chemo sensor ชนิดใหม่ (L) จากปฏิกิริยาของ 1-aminopyrine กับ pyridoxal ที่เป็น cofactor ของวิตามิน B₆ เพื่อการตรวจจับ Fe³⁺ พบว่าสารละลายมีการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองไปเป็นไม่มีสี สามารถประยุกต์ใช้กับสมาร์ทโฟนผ่านแอปพลิเคชัน Color Assist App ดังภาพประกอบที่ 12 พบว่าความเข้มสีที่ลดลงมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นของ Fe³⁺ ในช่วง 5-34 µM โดยมี R² เท่ากับ 0.9921



ภาพประกอบ 12 แสดงแอปพลิเคชัน Color Assist App

ที่มา: (Upadhyay et al., 2018)

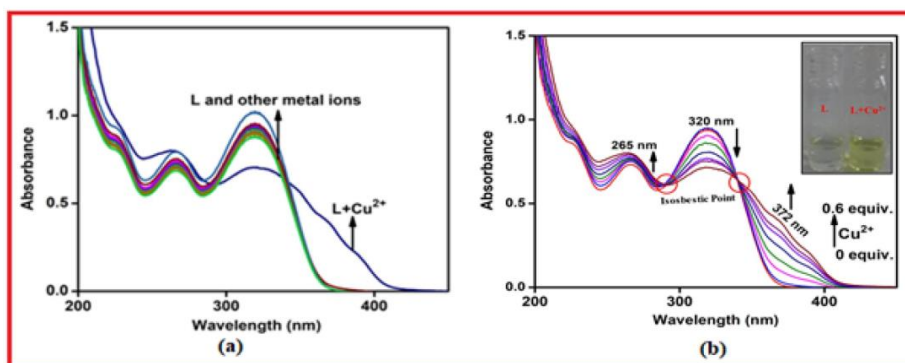
ในปี ค.ศ 2019 Joao และคณะ (Joao et al., 2019) ได้พัฒนาวิธีการตรวจวัดความเข้มข้น Fe³⁺ ในเชื้อเพลิงไบโอเอทานอลโดยการถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน ซึ่งเป็นเทคนิควิเคราะห์ที่ง่ายและรวดเร็ว ผ่านแอปพลิเคชัน “Color Grab” ในการวัดค่า RGB (สีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) การตรวจวัดปริมาณ Fe³⁺ ขึ้นอยู่กับความสามารถในเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนกับไทโอไซยาเนต ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีแดงของ Fe(SCN)²⁺ โดยความเข้มสีแดงแปรตามปริมาณ Fe³⁺ โดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นของ Fe³⁺ 0.5-10.0 mg/L มีค่า R² เท่ากับ 0.9980 และมีค่า LOD เท่ากับ 0.1 mg/L ซึ่งสามารถตรวจวัด Fe³⁺ ในเชื้อเพลิงไบโอเอทานอลได้



ภาพประกอบ 13 แผนภาพระบบวิเคราะห์ที่ประกอบขึ้นเพื่อให้ได้มาซึ่งภาพดิจิทัลในการวิเคราะห์หา Fe^{3+} ในเชื้อเพลิงไบโอเอทานอล

ที่มา: (Joao et al., 2019)

ในปี ค.ศ 2020 Manna และคณะ (Manna et al., 2020) ได้ออกแบบเคมีเซ็นเซอร์ชนิดใหม่ (L) เพื่อตรวจจับ Cu^{2+} ที่มีความเพาะเจาะจงในตัวทำละลาย $\text{CH}_3\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ (1:1 v/v, tris HCl buffer 10 μM , pH = 7.2) ซึ่งสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่าโดยเปลี่ยนจากสารละลายไม่มีสีเป็นสีเหลืองสามารถประยุกต์ใช้กับสมาร์ทโฟน พบว่ามีค่าคงที่ (K) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเท่ากับ $1.3 \times 10^{-2} \text{ M}^{-1/2}$ และมีค่า LOD เท่ากับ 1.8 μM

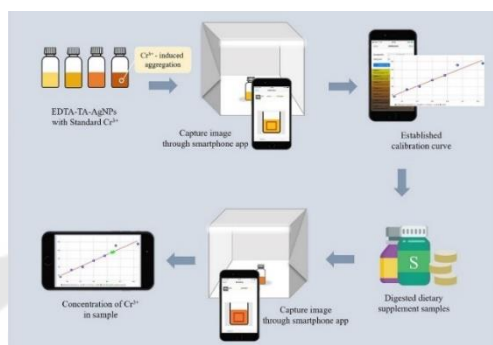


ภาพประกอบ 14 (a) สเปกตรัมการดูดกลืนของ L (30 μM) เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมไอออนโลหะต่างๆ 1 equiv (b) แสดงการไทเทรต L ด้วย Cu^{2+} 0-0.6 equiv ใน tris HCl buffer 10 μM pH = 7.2

ที่มา: (Manna et al., 2020)

ในปี ค.ศ 2021 Sangsin และคณะ (Sangsin et al., 2021) มีการใช้สมาร์ทโฟนหาปริมาณ Cr^{3+} ในอาหารเสริมที่ง่าย ไม่ยุ่งยาก โดยใช้นาโนเซ็นเซอร์ที่ถูกดัดแปลงพื้นผิวด้วยอิมิ

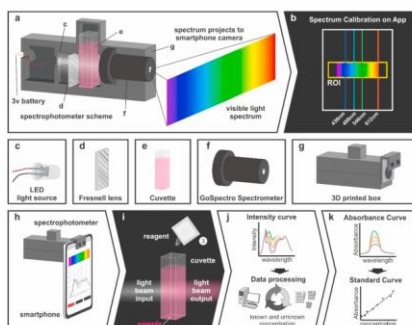
เอและกรดแทนนิกในการจับกับ Cr^{3+} แล้วเกิดการรวมตัวเห็นการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองเป็นสีแดง สามารถประยุกต์ใช้กับสมาร์ทโฟนผ่านแอปพลิเคชัน“PhotoMetrix” ถ่ายภาพจะได้ค่า RGB (สีแดง (R), สีเขียว (G)และสีน้ำเงิน (B)) โดยความเข้มของสีแดงแปรตามปริมาณ Cr^{3+} ทำให้สามารถหาปริมาณ Cr^{3+} ในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมได้



ภาพประกอบ 15 แสดงการใช้สมาร์ทโฟนสำหรับการตรวจจับ Cr^{3+}

ที่มา: (Sangsin et al., 2021)

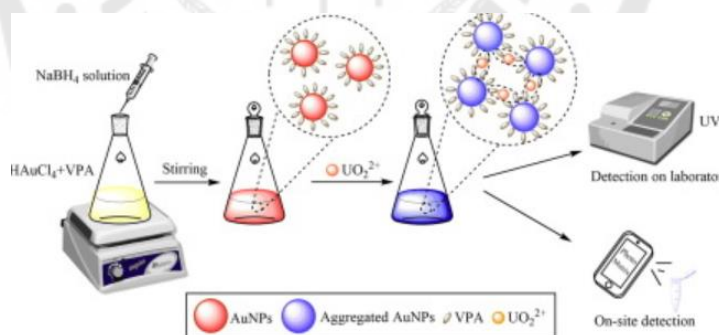
ในปี ค.ศ 2022 Silva และคณะ (Silva et al., 2022) ได้พัฒนาระบบวัดค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในตัวอย่างน้ำ ใช้สมาร์ทโฟนเป็นเครื่องมือวัด โดยใช้ระบบสเปกโตรมิเตอร์พกพา (Handheld Smartphone Spectrophotometry System : HSSS) ซึ่งประกอบด้วย สเปกโตรมิเตอร์พกพา Go Spectro ที่สามารถวัดสเปกตรัมของแสงในส่วนที่มองเห็นได้ และมีความไวในการวัดมากพอที่จะใช้งานในสถานที่ต่าง ๆ ได้โดยผลการทดสอบแสดงว่าระบบนี้สามารถวัดค่าความเข้มข้นของโลหะทั้งสองชนิดได้อย่างแม่นยำและสามารถวัดสเปกตรัมของแสงในบริเวณที่มองเห็นได้ HSSS สำหรับตรวจ Cu^{2+} ได้ค่า LOD และ LOQ เท่ากับ 0.589 และ 1.784 mg/L สำหรับตรวจ Fe^{3+} ได้ค่า LOD และ LOQ เท่ากับ 0.479 และ 1.450 mg/L ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสีเขียวที่สามารถใช้งานได้ง่ายและราคาไม่แพง สามารถนำมาใช้สำหรับการตรวจวัดคุณภาพน้ำในสถานที่ต่าง ๆ ได้



ภาพประกอบ 16 โครงสร้างของระบบสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบพกพาสำหรับสมาร์ทโฟน

ที่มา: (Silva et al., 2022)

ในปี ค.ศ 2022 Zhang และคณะ (Zhang et al., 2022) ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ ที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยกรดไวนิลฟอสโฟนิก (VPA-AuNPs) ใช้เซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัด UO_2^{2+} ในน้ำ โดยที่ UO_2^{2+} จะรวมกับ VPA-AuNP ส่งผลให้เปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับสมาร์ทโฟนผ่านแอปพลิเคชันได้ “PhotoMetrix” ได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 18 ตามความเข้มของสีที่แตกต่างกันแปรตามปริมาณของ UO_2^{2+} ในช่วงความเข้มข้น 4.0-20.0 μM โดยมีค่า LOD 5.13 μM

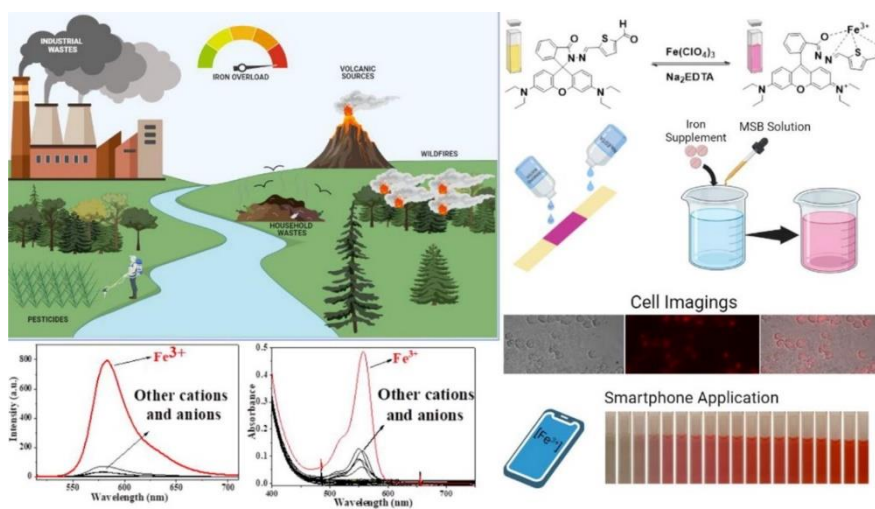


ภาพประกอบ 17 การเตรียม VPA-AuNPs และกลไกการตรวจวัด UO_2^{2+}

ที่มา: (Zhang et al., 2022)

ในปี ค.ศ 2023 Aribuga และคณะ (Aribuga et al., 2023) ได้พัฒนาโพรบชนิดใหม่ rhodamine-based fluorometric and colorimetric ที่ ถูก สังเคราะห์ จากปฏิกิริยาของ Rhodamine B hydrazine hydrate solution (80 %) กับ 2,5-thiophenedicarboxaldehyde และ

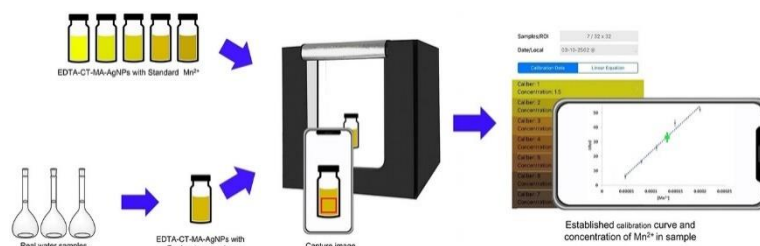
Na₂EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid disodium salt) ได้สารละลายสีเหลืองสามารถตรวจวัด Fe³⁺ ได้อย่างแม่นยำมีความเชื่อถือสูง มองเห็นการเปลี่ยนแปลงด้วยตาเปล่า เมื่อเติม Fe³⁺ สารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีชมพู จึงประยุกต์ใช้งานร่วมกับสมาร์ทโฟนได้ พบว่ามีค่า LOD เท่ากับ 4.8×10^{-9} M สามารถหาปริมาณ Fe³⁺ ในตัวอย่างน้ำได้



ภาพประกอบ 18 การเปลี่ยนสีของสารละลาย rhodamine-based fluorometric and colorimetric เมื่อจับกับ Fe³⁺

ที่มา: (Aribuga et al., 2023)

ในปี ค.ศ 2023 Sungwienwong และคณะ (Sungwienwong et al., 2023) ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินดัดแปลงพื้นผิวร่วมกับ Ethylenediaminetetraacetic acid : (EDTA) ซิเตรตและเมลามีนเพื่อตรวจจับกับ Mn²⁺ เมื่ออนุภาคนาโนเงินจับกับ Mn²⁺ ที่ pH 10 ทำให้เกิดการเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับสมาร์ทโฟนผ่านแอปพลิเคชัน “PhotoMetrix” ดังแสดงในภาพประกอบ 19 โดยความเข้มสีแดงเข้มขึ้นตามปริมาณ Mn²⁺ ให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นของ Mn²⁺ เท่ากับ 4.0×10^{-5} - 2.0×10^{-4} M ค่า LOD เท่ากับ 2.7×10^{-5} M และวิธีนี้สามารถตรวจหาปริมาณ Mn²⁺ ในตัวอย่างน้ำได้



ภาพประกอบ 19 แสดงการใช้แอปพลิเคชัน PhotoMetrix ในการหาปริมาณ Mn^{2+}

ที่มา: (Sungwienwong et al., 2023)



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. สังเคราะห์ reduced Schiff base ligand
2. พิสูจน์โครงสร้างของ reduced Schiff base ligand ด้วยเทคนิค Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR) Infrared Spectroscopy (IR) Mass Spectrometry
3. ศึกษาการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Na^+ K^+ Ag^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+} โดยใช้ UV-visible spectrophotometry
4. ศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการตรวจจับ Fe^{3+} โดยใช้ UV-visible Spectrophotometry
5. ศึกษาความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand ที่เหมาะสมในการตรวจวัด Fe^{3+} ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนและ pH ที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์โดยใช้สมาร์ทโฟน
6. ศึกษา reduced Schiff base ligand ที่ความเข้มข้นที่มองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนในการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ โดยการสังเกตด้วยตาเปล่า
7. ศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการตรวจจับ Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ทโฟน
8. ศึกษาผลการรบกวนการวิเคราะห์ของไอออนบวกที่เจือปนในสารตัวอย่าง ที่อาจส่งผลต่อการวิเคราะห์ Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ทโฟน
9. พัฒนาประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นในการหาปริมาณ Fe^{3+} ในสารตัวอย่าง

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectrometers) รุ่น Bruker Ascend 500 จากบริษัท Bruker โดยใช้ความถี่ 500 MHz สำหรับ ^1H -NMR และ ที่ 125 MHz สำหรับ ^{13}C -NMR
2. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (infrared spectrophotometer) รุ่น AAnalyst 300 ยี่ห้อ Perkin Elmer

3. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible Spectrophotometer) รุ่น UV-2401PC จากบริษัท Shimadzu
4. เครื่องชั่งอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance 4 Digits) รุ่น New Classic MF จากบริษัท METTLER TOLEDO
5. เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary Evaporator) Buchi 23022A120 Rotavapor R-210 Professional Rotary Evaporator, P+G Diagonal; 115V
6. เครื่องกวนสาร (Hotplate Stirrer)
7. ชุดเครื่องกรอง Büchner funnel
8. กล้องดิจิทัลจากสมาร์ทโฟนระบบ android รุ่น OPPO A53 โดยใช้ภาพถ่ายแต่ละภาพจะถูกจับด้วย ROI 32 x 32 (Dortez et al., 2023) pixel ในมุมด้านข้างโดยมีความยาวโฟกัส 6 cm ในกล่องสตูดิโอพื้นหลังสีขาว ขนาด 22.6 x 23 x 40 cm ใช้หลอดไฟ LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงซึ่งอยู่ห่างจากตำแหน่งตัวอย่าง 20 cm

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ ($(\text{CH}_3)_2\text{SO}$ - d_6 Andover. MA01810 USA
2. ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ ($(\text{CH}_3)_2\text{SO}$ จากบริษัท Fisher
3. เมทานอล (CH_3OH) จากบริษัท Acros Organics
4. ไคลอโรโรมีเทน (CH_2Cl_2) จากบริษัท Acros Organics
5. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) จากบริษัท Acros Organics
6. 2-ไฮดรอกซี-1-แนพทาลดีไฮด์ ($\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_2$) จากบริษัท Acros Organics
7. เมตาไซลีนไดเอมีน ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$) จากบริษัท Acros Organics
8. ไพรีดีน ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$) จากบริษัท Acros Organics
9. ไอร์รอน (II) เปอร์คลอเรต ($\text{Fe}(\text{ClO}_4)_2$) จากบริษัท Sigma Aldrich
10. ไอร์รอน (III) เปอร์คลอเรต ($\text{Fe}(\text{ClO}_4)_3$) จากบริษัท Sigma Aldrich
11. คอปเปอร์ (II) เปอร์คลอเรต ($\text{Cu}(\text{ClO}_4)_2$) จากบริษัท Sigma Aldrich
12. แคดเมียม (II) เปอร์คลอเรต ($\text{Cd}(\text{ClO}_4)_2$) จากบริษัท Sigma Aldrich
13. โคบอลต์ (II) เปอร์คลอเรต ($\text{Co}(\text{ClO}_4)_2$) จากบริษัท Sigma Aldrich
14. โครเมียม (III) เปอร์คลอเรต ($\text{Cr}(\text{ClO}_4)_3$) จากบริษัท Unilab
15. ซิงค์ (II) เปอร์คลอเรต ($\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2$) จากบริษัท Sigma Aldrich
16. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จากบริษัท Acros Organics

17. โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) จากบริษัท Acros Organics
18. แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) จากบริษัท Acros Organics
19. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) จากบริษัท Acros Organics
20. เลด (II) ไนเตรต $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ จากบริษัท Acros Organics
- 21.ปรอท (II) คลอไรด์ (HgCl_2) จากบริษัท Acros Organics
22. โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) จากบริษัท Sigma Aldrich
23. นิกเกิล (II) เปอร์คลอเรต ($\text{Ni}(\text{ClO}_4)_2$) จากบริษัท Sigma Aldrich
24. แมงกานีส (II) เปอร์คลอเรต ($\text{Mn}(\text{ClO}_4)_2$) จากบริษัท Sigma Aldrich

วิธีดำเนินการ

1. การสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand

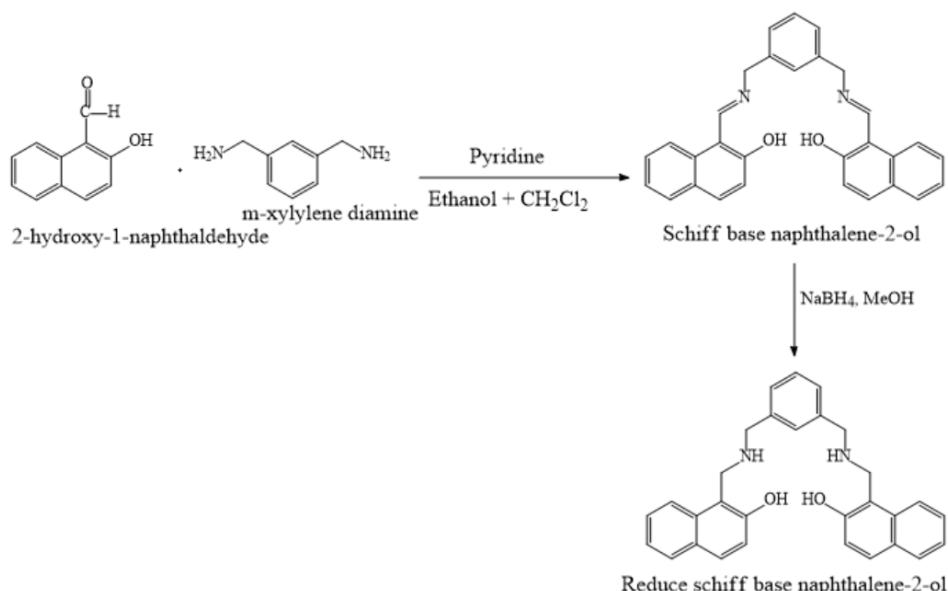
1.1 การสังเคราะห์ Schiff base ligand

ชั่งสาร 2-Hydroxy-1-naphthaldehyde จำนวน 1.264 กรัม แล้วละลายในเอทานอล 10 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้ไป stirrer ด้วยเครื่อง กวนสาร ทำที่อุณหภูมิ 0-5 องศาเซลเซียสละลายสาร m-xylylene diamine จำนวน 0.5 กรัม หรือ 0.484 มิลลิลิตร ละลายในเอทานอลเล็กน้อย นำสารละลายที่ได้ไปหยดลงในสารละลายใน 2-Hydroxy-1-naphthaldehyde อย่างช้าๆ ใส่สาร Pyridine จำนวน 2 มิลลิลิตรลงในปฏิกิริยาข้างต้นทำการคนสารละลายผสมที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาทีทำการคนสารละลายผสมที่ได้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจสอบปฏิกิริยาด้วย Thin-layer chromatography (TLC) เมื่อเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ นำสารละลายที่ได้ไปทำให้ระเหยด้วย เครื่องระเหย แบบหมุนเหวี่ยงกรองผลึกที่ได้และล้างผลึก (Vacuum Freeze Dryer) ด้วยน้ำเย็น 10 มิลลิลิตร จำนวน 5 ครั้ง นำเอาผลึกที่ได้ไปทำให้แห้งด้วยเครื่องตรายสุญญากาศนำผลึกสีเหลืองที่สังเคราะห์ได้ไปพิสูจน์โครงสร้างด้วยเครื่องแมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ แมสสเปกโทรเมตรี และ อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

1.2 การสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand

Schiff base-naphthalene-2-ol จำนวน 500 มิลลิกรัม ละลายด้วยเมทานอล 5 มิลลิลิตร เติม glacial acetic acid จำนวน 0.5 มิลลิลิตร ตามด้วย sodium borohydride 80 มิลลิกรัมลงในสารละลาย Schiff base-naphthalene-2-ol นำไป stirrer เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยตรวจสอบปฏิกิริยาด้วย TLC หลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาทำการระเหยตัวทำละลาย กรองตะกอน และล้างด้วยน้ำเย็นปริมาตร 10 มิลลิลิตร จำนวน 5 ครั้ง นำตะกอนที่ได้ไประเหยแห้งด้วยเครื่องตราย

สัญญาณและพิสูจน์โครงสร้างด้วย NMR spectroscopy, IR spectroscopy และ mass spectrometry



2. พิสูจน์โครงสร้างของ reduced Schiff base ligand ด้วยเทคนิค NMR Spectroscopy, IR Spectroscopy และ Mass Spectrometry

2.1 ละลายสาร reduced Schiff base ligand จำนวน 10 mg ในสารละลาย DMSO-d₆ ในปริมาตร 0.6 mL นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วย NMR spectroscopy

2.2 เตรียม reduced Schiff base ligand ที่เป็นผงละเอียดในปริมาณที่เพียงพอต่อการวัดไม่น้อยกว่า 0.5 g แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IR spectroscopy

2.4 เตรียม reduced Schiff base ligand ที่เพียงพอแล้วนำไปวิเคราะห์ Mass Spectrometry

3. ศึกษาการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Na⁺ K⁺ Ag⁺ Mg²⁺ Mn²⁺ Fe²⁺ Co²⁺ Ni²⁺ Cu²⁺ Zn²⁺ Hg²⁺ Cd²⁺ Pb²⁺ Cr³⁺ Fe³⁺ โดยใช้ UV-visible spectrophotometry

3.1 เตรียมสารละลายไอออนบวกของโลหะแต่ละชนิด ได้แก่ Na⁺ K⁺ Ag⁺ Mg²⁺ Mn²⁺ Fe²⁺ Co²⁺ Ni²⁺ Cu²⁺ Zn²⁺ Hg²⁺ Cd²⁺ Pb²⁺ Cr³⁺ Fe³⁺ ความเข้มข้น 3.0 x 10⁻⁴ M และเตรียมสารละลาย reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 1.0 x 10⁻⁵ M

3.2 ผสมสารละลายไอออนบวกแต่ละชนิดปริมาตร 1.50 mL กับสารละลาย reduced Schiff base ligand 1.50 mL

3.3 เขย่าให้เข้ากันแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-700 nm

3.4 เปรียบเทียบสเปกตรัมและสีของสารละลาย reduced Schiff base ligand เมื่อเติมไอออนชนิดต่าง ๆ

4. ศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการตรวจวัด Fe^{3+} โดยใช้ UV-visible Spectrophotometry

4.1 เตรียมสารละลาย reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 1.0×10^{-5} M

4.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานของ Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น 2.0×10^{-6} - 1.0×10^{-3} M

4.3 เติมสารละลายมาตรฐาน Fe^{3+} ในข้อ 4.2 ลงในสารละลาย reduced Schiff base ligand

4.4 นำสารละลายที่ได้ในข้อ 4.3 วัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-700 nm

4.5 นำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 380 nm มาสร้างกราฟเทียบกับความเข้มข้นของ Fe^{3+} เพื่อหาสมการเส้นตรง

4.6 คำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (LOD) และปริมาณต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (LOQ) โดยใช้ข้อมูลจากกราฟมาตรฐาน คำนวณได้จากสูตร

$$\text{LOD} = \frac{3\text{SD}}{\text{slope}}$$

$$\text{LOQ} = \frac{10\text{SD}}{\text{slope}}$$

5. ศึกษาความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand ที่เหมาะสมในการตรวจวัด Fe^{3+} ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนและ pH ที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์โดยใช้สมาร์ตโฟน

5.1 ศึกษาความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนในการตรวจวัด Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ตโฟน

5.1.1 เตรียมสารละลาย reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 1.0×10^{-4} 1.0×10^{-3} 5.0×10^{-3} และ 1.0×10^{-2} M

5.1.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานของ Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น 2.0×10^{-5} - 1.0×10^{-3} M

5.1.3 ผสมสารละลาย Fe^{3+} ในข้อ 5.1.2 ลงในสารละลาย reduced Schiff base ligand ทั้ง 4 ความเข้มข้น

5.1.4 เขย่าให้เข้ากันแล้วนำไปถ่ายภาพด้วยแอปพลิเคชัน PhotoMetric

5.1.5 นำความเข้มสี RGB ไปสร้างกราฟเทียบกับความเข้มข้นของ Fe^{3+} เพื่อเปรียบเทียบ R^2 ของแต่ละความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand

5.2 ศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์ Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ทโฟน

5.2.1 เตรียมสารละลาย reduced Schiff base ligand ความเข้มข้นที่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่ pH 3, 5, 9 และ 12 ตามลำดับ นำไปถ่ายภาพผ่านแอปพลิเคชัน PhotoMetric

5.2.2 เตรียมสารละลาย Fe^{3+} ความเข้มข้น 3×10^{-4} M ที่ pH 3, 5, 9 และ 12

5.2.3 ผสมสารละลาย Fe^{3+} ที่ได้ในข้อ 5.2.2 ปริมาตร 1.50 mL กับสารละลาย reduced Schiff base ligand ปริมาตร 1.50 mL ของแต่ละ pH

5.2.4 เขย่าให้เข้ากันแล้วนำไปถ่ายภาพด้วยแอปพลิเคชัน PhotoMetric

5.2.5 นำความเข้มสี RGB ในข้อ 5.2.1 กับข้อ 5.2.4 มาสร้างกราฟเทียบกับ pH เพื่อหา pH ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ Fe^{3+}

6. ศึกษา reduced Schiff base ligand ความเข้มข้นที่มองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนในการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ โดยการสังเกตด้วยตาเปล่า

6.1 เตรียมสารละลายไอออนบวกของโลหะชนิดต่าง ๆ ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M และเตรียมสารละลาย reduced Schiff base ligand ความเข้มข้นที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีชัดเจน

6.2 ผสมสารละลายไอออนบวกแต่ละชนิดปริมาตร 1.50 mL กับสารละลาย reduced Schiff base ligand 1.50 mL

6.3 สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงสีของ reduced Schiff base ligand เมื่อเติมไอออนโลหะชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับเมื่อเติม Fe^{3+}

7. ศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการตรวจจับ Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ทโฟน

7.1. เตรียมสารละลาย reduced Schiff base ligand ความเข้มข้นที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีชัดเจนที่ pH ที่เหมาะสม

7.2 เตรียมสารละลายมาตรฐาน Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น $2.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ ที่ pH ที่เหมาะสม

7.3 เตรียมสารละลายมาตรฐาน Fe^{3+} ในข้อ 7.2 ลงในสารละลาย reduced Schiff base ligand

7.4 เขย่าสารละลายในข้อ 7.3 ให้เข้ากันแล้วนำไปถ่ายภาพด้วยแอปพลิเคชัน PhotoMetrix

7.5 นำความเข้มสี RGB มาสร้างกราฟมาตรฐานเทียบกับความเข้มข้นของ Fe^{3+} เพื่อหาสมการเส้นตรงและ R^2

7.6 คำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (LOD) และปริมาณต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (LOQ) โดยใช้ข้อมูลจากสมการเส้นตรงที่ได้ คำนวณได้จากสูตร

$$\text{LOD} = \frac{3\text{SD}}{\text{slope}} \quad \text{LOQ} = \frac{10\text{SD}}{\text{slope}}$$

8. ศึกษาผลการรบกวนการวิเคราะห์ของไอออนบวกที่เจือปนในสารตัวอย่าง ที่อาจส่งผลต่อการวิเคราะห์ Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ตโฟน

8.1 เตรียมสารละลาย reduced Schiff base ligand ความเข้มข้นที่เห็นการเปลี่ยนสีที่ชัดเจน

8.2 เตรียมสารละลายไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Na^+ K^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+} ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} และ $1.5 \times 10^{-3} \text{ M}$

8.3 ปิเปตสารละลาย reduced Schiff base ligand ปริมาตร 2.0 mL ลงใน vial 15 ขวด จากนั้นขวดที่ 1 เติม DMSO ปริมาตร 1.00 mL ขวดที่เหลือเติม Fe^{3+} ความเข้มข้น $3.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ ปริมาตร 1.00 mL แล้วนำไปวัดความเข้มสี RGB ด้วยแอปพลิเคชัน PhotoMetrix

8.4 จากนั้นขวดที่ 1 เติม DMSO อีก 1.00 mL ขวดที่เหลือเติมไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ ความเข้มข้น $3.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ หรือ $1.5 \times 10^{-3} \text{ M}$ ปริมาตร 1.00 mL ลงไปในแต่ละขวด แล้วนำไปวัดความเข้มสี RGB ด้วยแอปพลิเคชัน PhotoMetrix

8.5 เปรียบเทียบความเข้มสี RGB เพื่อวิเคราะห์หาไอออนบวกที่รบกวนการวิเคราะห์ Fe^{3+}

9. พัฒนาประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นในการหาปริมาณ Fe^{3+} ในสารตัวอย่าง

9.1 เตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลาย Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น 2.0×10^{-5} - 1.0×10^{-3} M ที่เป็นเส้นตรงด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น

9.2 การเตรียมตัวอย่างโดยใช้วิธีการ spiked sample

9.2.1 นำเอาน้ำดื่ม น้ำคลอง น้ำประปา มากรอง แล้วนำเอาน้ำตัวอย่างทั้ง 3 มาเติม Fe^{3+} ตัวอย่างละ 3 ความเข้มข้น เช่น 0.5×10^{-5} และ 3×10^{-4} M

9.2.2 นำเอาตัวอย่างที่เตรียมเสร็จมาต้มให้แห้งแล้วปรับปริมาตรด้วย DMSO ให้ได้ปริมาตรเท่าเดิม

9.3 นำเอาสารตัวอย่างมาผสมกับ reduced Schiff base ligand อย่างละ 2 มิลลิลิตรแล้วนำไปถ่ายภาพผ่านแอปพลิเคชัน PhotoMetrix

9.4 นำค่าความเข้มสี RGB ของสารตัวอย่างไปหาปริมาณ Fe^{3+} โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานจากวิธีที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การวิจัยในครั้งนี้ ได้สังเคราะห์ reduced Schiff base ligand ด้วยการใช้อนุพันธ์ coupling ระหว่าง 2-hydroxy- 1-naphthaldehyde กับ *m*-xylylene diamine ที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็น

Schiff base ligand จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยารีดักชันด้วย NaBH_4 เป็น reduced Schiff base ligand ที่มีคุณสมบัติเชิงแสงและเป็น chromogenic sensor สำหรับการตรวจวัด Fe^{3+} ได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย โดยผู้วิจัยได้นำการวิจัยตามขั้นตอนและกระบวนการต่าง ๆ ที่ได้กำหนดดังนี้

1. สังเคราะห์ reduced Schiff base ligand และพิสูจน์โครงสร้างของ reduced Schiff base ligand ด้วยเทคนิค NMR spectroscopy IR spectroscopy และ Mass Spectrometry

2. ศึกษาการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Na^+ K^+ Ag^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+} โดยใช้ UV-visible spectrophotometry

3. ศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการตรวจวัด Fe^{3+} โดยใช้ UV-visible Spectrophotometry

4. ศึกษาความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand ที่เหมาะสมในการตรวจวัด Fe^{3+} ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนโดยใช้สมาร์ทโฟนและศึกษาการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Na^+ K^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+} โดยใช้การสังเกตด้วยตาเปล่า

5. ศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัดวิเคราะห์โดยใช้สมาร์ทโฟน

6. ศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการตรวจวัด Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ทโฟน

7. ศึกษาผลการรบกวนการวิเคราะห์ของไอออนบวกที่เจือปนในสารตัวอย่าง ที่อาจส่งผลต่อการวิเคราะห์ Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ทโฟน

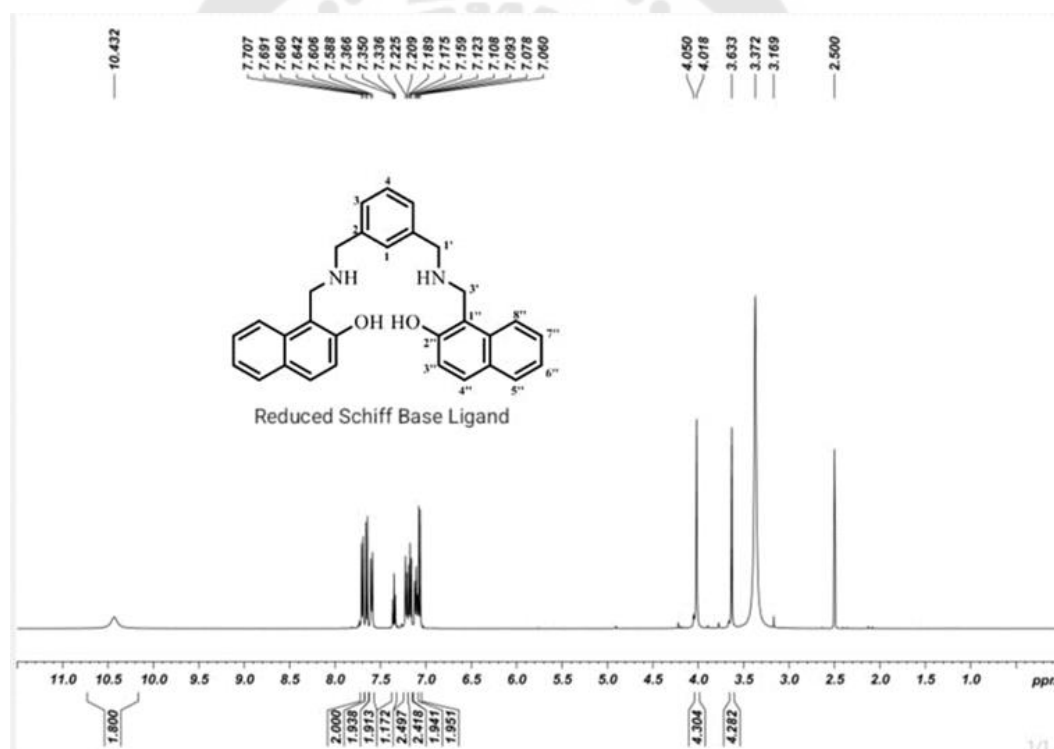
8. พัฒนาประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นในการหาปริมาณ Fe^{3+} ในสารตัวอย่าง

การสังเคราะห์และพิสูจน์โครงสร้างของ reduced Schiff base ligand

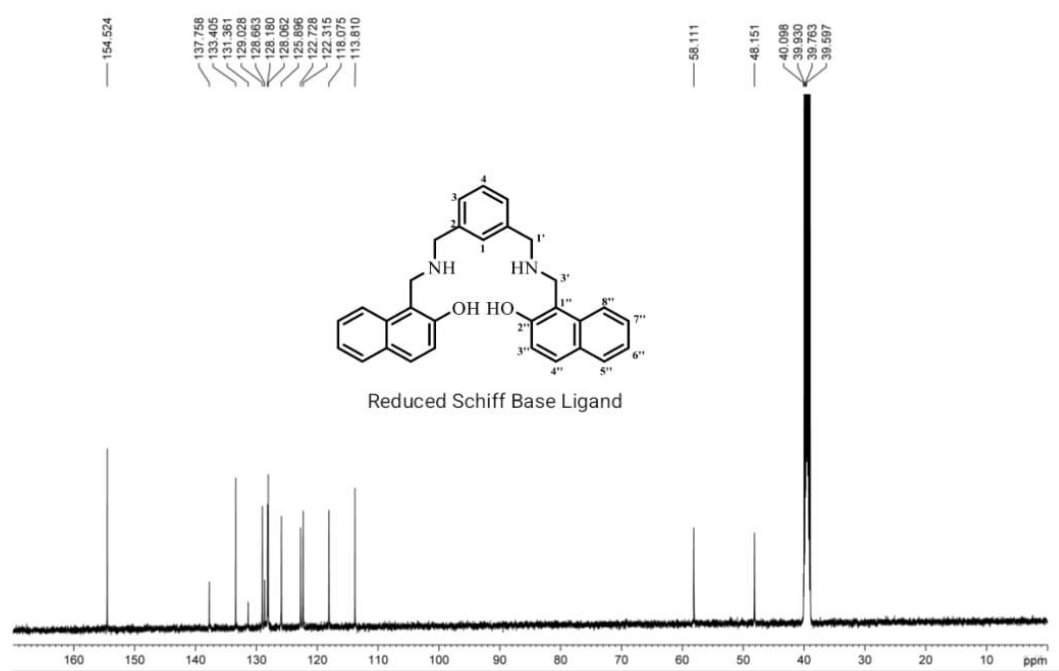
สังเคราะห์ reduced Schiff base ligand ด้วยการใช้อนุพันธ์ coupling ระหว่าง 2-hydroxy-1-naphthaldehyde กับ *m*-xylylene diamine ที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Schiff base ligand

จากนั้นนำไปรีดิวซ์ด้วย NaBH_4 ได้ตะกอนสีเหลืองของ reduced Schiff base ligand ที่มีร้อยละผลได้สูง เมื่อนำมาพิสูจน์โครงสร้างด้วยเทคนิค NMR, IR และ Mass Spectrometry ได้ผลดังนี้

^1H MNR ($\text{DMSO}-d_6$, 500MHz): δ : 3.633 (4H, s, H-3), 4.018 (4H,s,H-1"), 7.078 (2H, d, $j=8.8$ Hz, H-3"), 7.108 (2H, t, $j=7.6$ Hz, H-7"), 7.174-7.209 (5H, m, H-1, H-3, H-6"), 7.350 (1H, t, $j=7.4$ Hz, H-4), 7.588 (2H,d, $j= 8.5$ Hz, H-8"), 7.642 (2H, d, $j= 8.8$ Hz, H-4"), 7.691 (2H, d, $j=8.0$ Hz, H-5"), ดังภาพประกอบ 20 ^{13}C NMR (125MHz, $\text{DMSO}-d_6$): δ 48.1(C-1'), 58.1(C-3'), 113.8 (C-9'),118.0(C-3'), 122,3(C-6'), 122.7 (C-8'), 125.8 (C-7'), 128.0 (C-10'), 128.1(C-5') 128.6 (C-3), 129.0 (C-4'), 131.3 (C-1), 133.4 (C-1'), 137.7 (C-2), 154.5 (C-2'), ดังภาพประกอบ 21

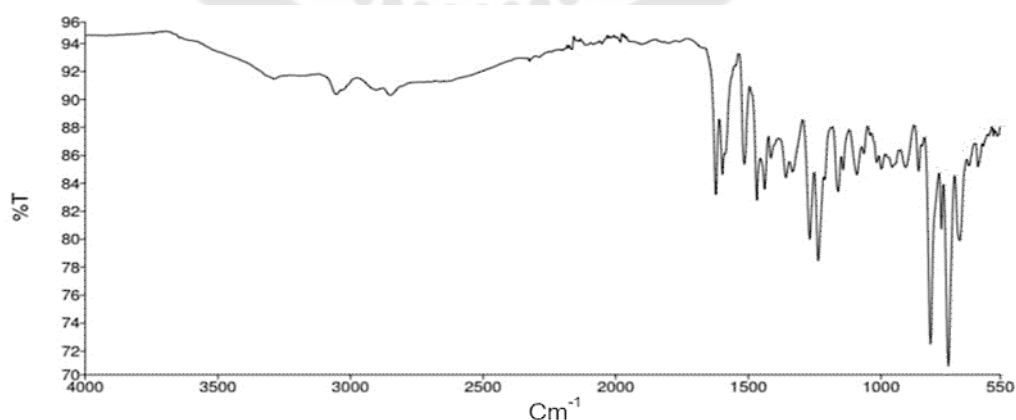


ภาพประกอบ 20 สเปกตรัม ^1H -NMR ของ reduced Schiff base ligand ในตัวทำละลาย $\text{DMSO}-d_6$

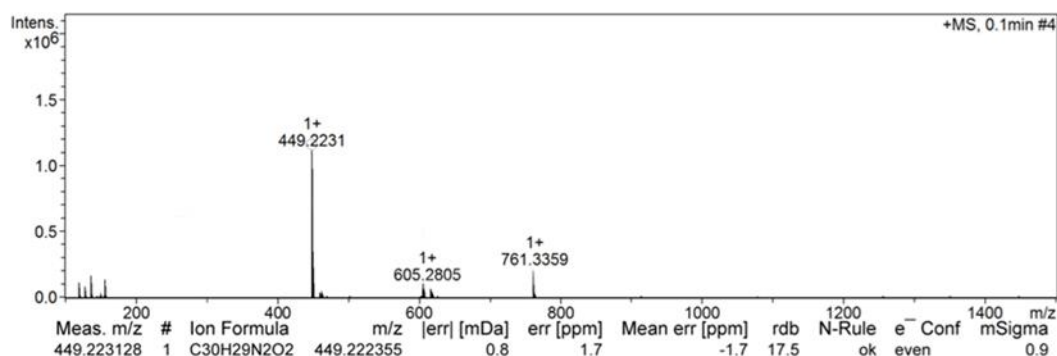


ภาพประกอบ 21 สเปกตรัม ^{13}C -NMR ของ reduced Schiff base ligand ในตัวทำละลาย $\text{DMSO}-d_6$

IR(ATR) ν_{max} 3293, 3055, 2851, 1621, 1597, 1514, 1467, 1437, 1357, 1327, 1267, 1235, 1130, 1089, 955, 904, 857, 812 cm^{-1} , ดังภาพประกอบ 22 HR-ESI-MS m/z 449.2231 $[\text{M} + \text{H}]^+$ (calcd for $\text{C}_{30}\text{H}_{29}\text{N}_2\text{O}_2$ 449.2223) ดังภาพประกอบ 23



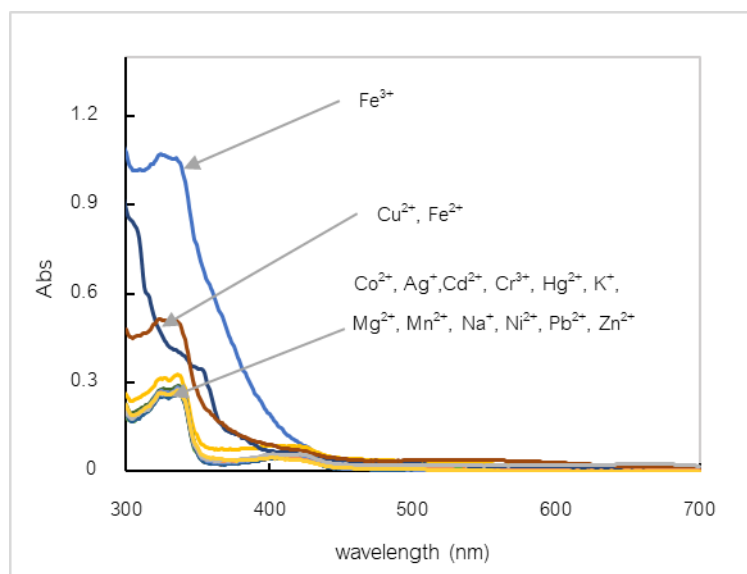
ภาพประกอบ 22 สเปกตรัมอินฟราเรดของ reduced Schiff base ligand



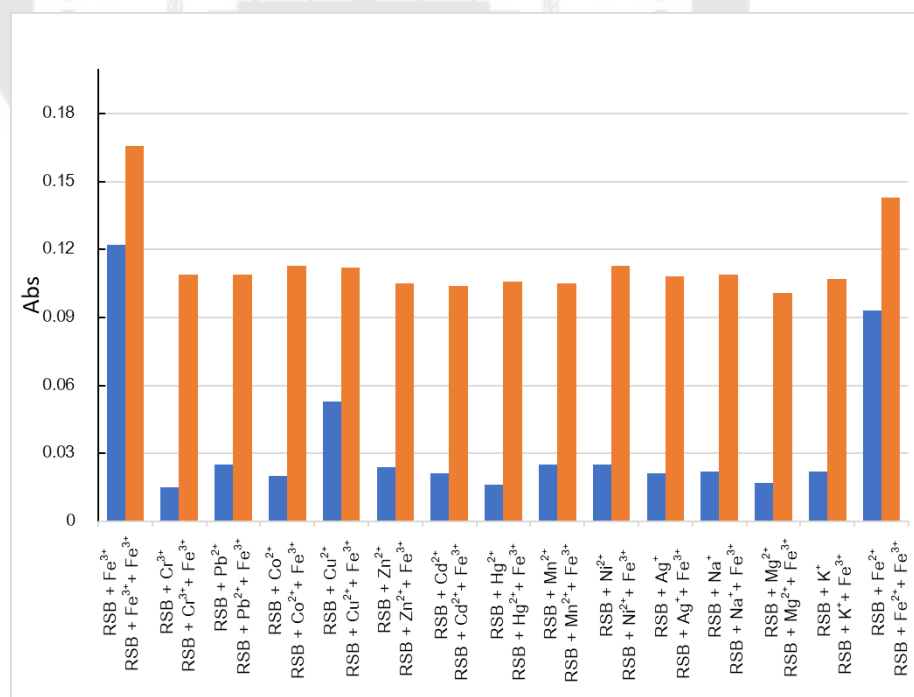
ภาพประกอบ 23 สเปกตรัมมวล (Mass Spectrum, MS) ของ reduced Schiff base ligand

ศึกษาการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ โดยใช้ UV-visible spectrophotometry

เมื่อนำ reduced Schiff base ligand มาศึกษาการจับกับไอออนบวกชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Na^+ K^+ Ag^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+} เมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-700 nm พบว่าสเปกตรัมของ reduced Schiff base ligand มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติม Fe^{3+} โดยเกิดพีคใหม่ที่ ความยาวคลื่น 350-420 nm อันเนื่องมาจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากลิแกนด์ไปยังไอออนของโลหะ (LMCT) ในขณะที่ไอออนบวกชนิดอื่น ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมมีเพียง Fe^{2+} และ Cu^{2+} ที่สเปกตรามีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในภาพประกอบ 24 แต่เมื่อศึกษาความจำเพาะจงโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย reduced Schiff base ligand ที่เติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ ก่อนเติมและหลังเติม Fe^{3+} ที่ความยาวคลื่น 380 nm พบว่า reduced Schiff base ligand เลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับ Fe^{3+} เพราะค่าการดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้นหลังเติม Fe^{3+} มีเพียง Fe^{2+} ที่เป็นไอออนบวกชนิดดังแสดงในภาพประกอบ 25



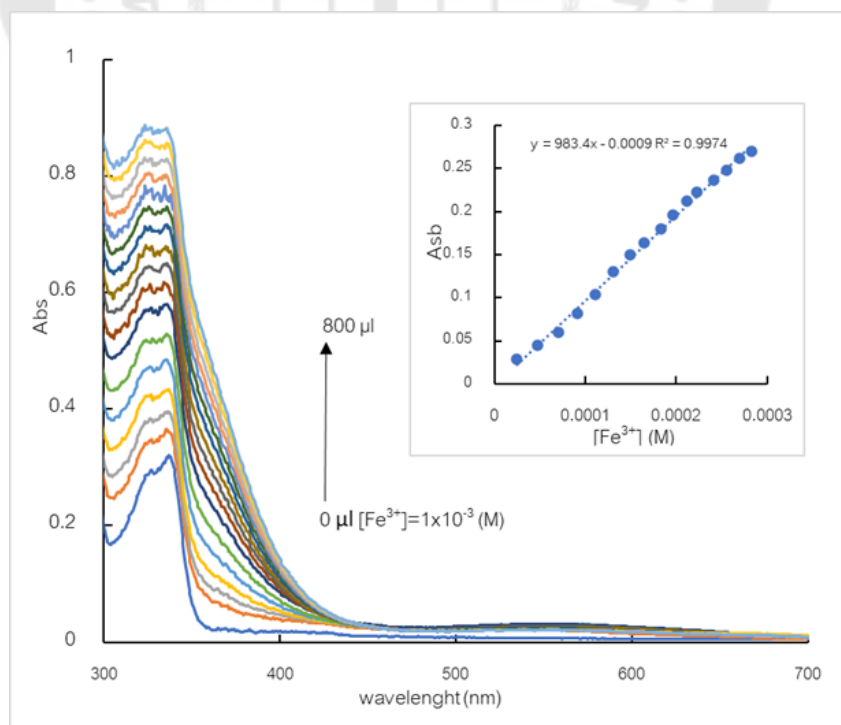
ภาพประกอบ 24 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ reduced Schiff base ligand ในตัวทำละลาย DMSO ความเข้มข้น 1.0×10^{-5} M เมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ (Na^+ K^+ Ag^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+}) ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M



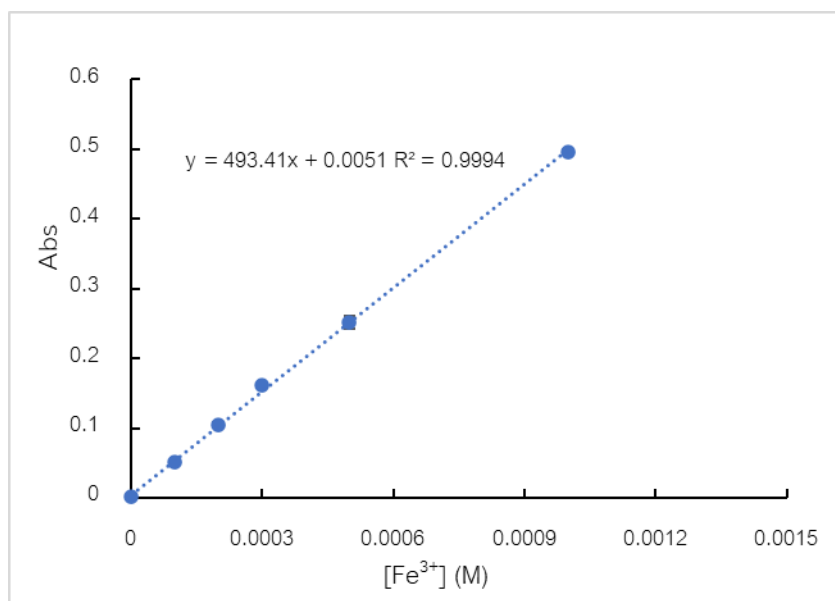
ภาพประกอบ 25 กราฟแท่งแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย reduced Schiff base ligand (1.0×10^{-5} M) กับไอออนบวกชนิดต่าง ๆ (3.0×10^{-4} M) ก่อนเติม (สีน้ำเงิน) และหลังเติม Fe^{3+} ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M (สีส้ม) ที่ความยาวคลื่น 380 nm

ศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการตรวจจับ Fe^{3+} โดยใช้ UV-visible Spectrophotometry

การศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการจับกับ Fe^{3+} โดยเติมสารละลาย Fe^{3+} ลงในสารละลาย reduced Schiff base ligand พบว่าค่าการดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 350-420 nm มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Fe^{3+} ที่เติมลงไป ดังแสดงในภาพประกอบ 26 เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 380 nm มาสร้างกราฟเทียบกับความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่เติมลงไป จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) เท่ากับ 0.9974 ดังแสดงในภาพประกอบ 26 ยืนยันความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 380 nm กับความเข้มข้นของ Fe^{3+} โดยการสร้างกราฟมาตรฐาน พบว่าช่วงความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 2.0×10^{-6} - 1.0×10^{-3} M โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9994 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ (LOQ) คำนวณได้จากสมการ $3\text{SD}/\text{slope}$ และ $10\text{SD}/\text{slope}$ โดย SD มาจากการวัดสัญญาณสารละลายแบบลงค์จำนวน 10 ซ้ำ พบว่า LOD มีค่าเท่ากับ 1.2×10^{-6} M และ LOQ มีค่าเท่ากับ 2.0×10^{-6} M ดังแสดงในภาพประกอบ 27



ภาพประกอบ 26 สเปกตรัมของ reduced Schiff base ligand เมื่อเติมสารละลาย Fe^{3+} ความเข้มข้น 1.0×10^{-3} M ปริมาตร 0-800 μL

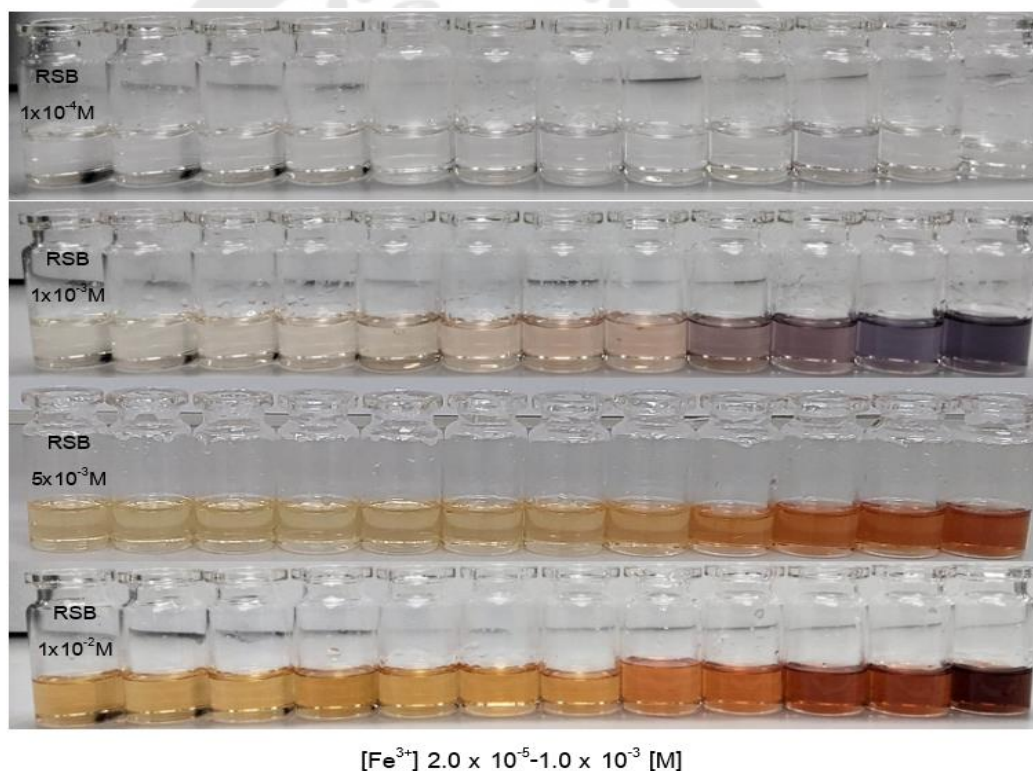


ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 380 nm กับความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในช่วง $2.0 \times 10^{-6} - 1.0 \times 10^{-3} \text{ M}$

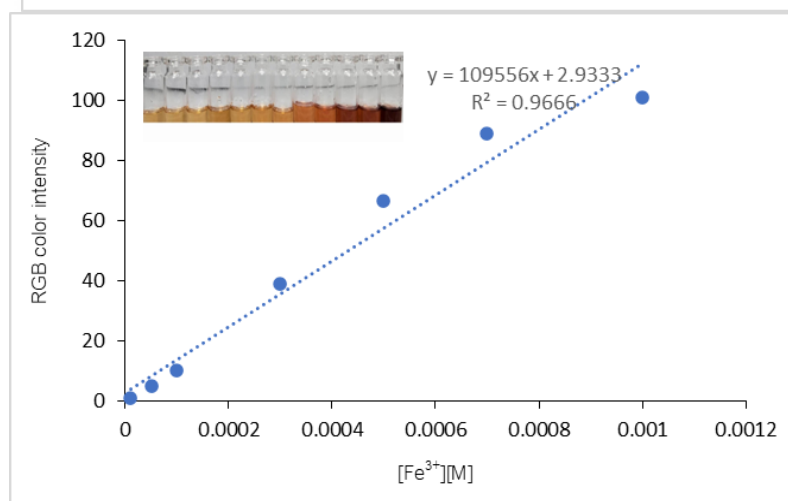
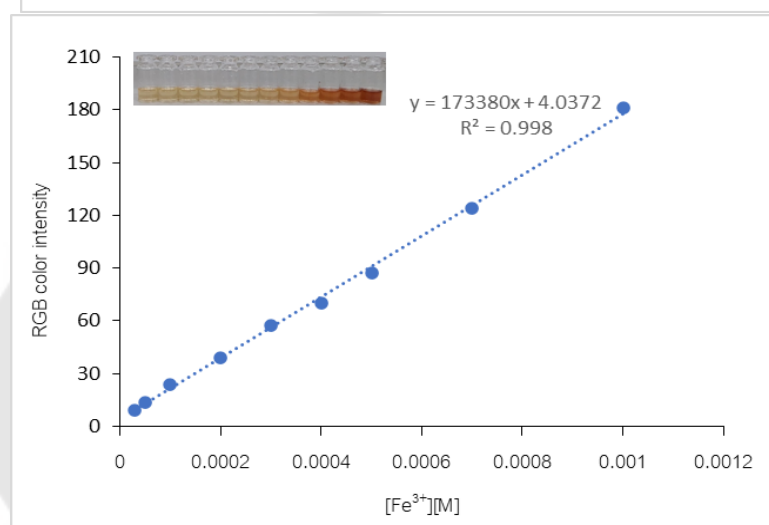
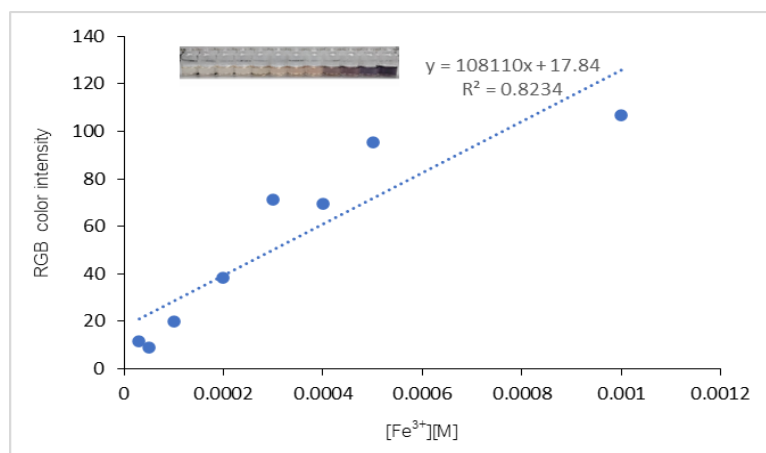
ศึกษาความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand ที่เหมาะสมในการตรวจวัด Fe^{3+} ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนโดยใช้สมาร์ตโฟนและศึกษาการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ โดยใช้การสังเกตด้วยตาเปล่า

เมื่อนำ reduced Schiff base ligand มาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการจับ Fe^{3+} ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน โดยนำ reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 1.0×10^{-4} 1.0×10^{-3} 5.0×10^{-3} และ $1.0 \times 10^{-2} \text{ M}$ มาเติม Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น $2.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ พบว่า reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย ในขณะที่ reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 1.0×10^{-3} 5.0×10^{-3} และ $1.0 \times 10^{-2} \text{ M}$ สารละลายเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีม่วงและสีแดง ดังแสดงในภาพประกอบ 28 เมื่อประยุกต์ใช้กับสมาร์ตโฟนผ่านแอปพลิเคชัน PhotoMetrix พบว่า reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ ที่สารละลายเปลี่ยนสีเป็นสีม่วง ความเข้มสีแปรตามปริมาณ Fe^{3+} ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) เพียง 0.8234 ในขณะที่ reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น $5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ และ $1.0 \times 10^{-2} \text{ M}$ ที่สารละลายเปลี่ยนเป็นสีแดง ความเข้มสีแปรตามปริมาณ Fe^{3+} ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) สูงถึง 0.9980 และ 0.9666 ตามลำดับดังภาพประกอบ 29 ถึงแม้ค่า (R^2) ของ reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-2} \text{ M}$ จะมีค่าต่ำกว่าแต่ก็เป็นที่ยอมรับในการหาปริมาณ Fe^{3+} ได้ จึงได้นำ reduced Schiff base ligand ที่

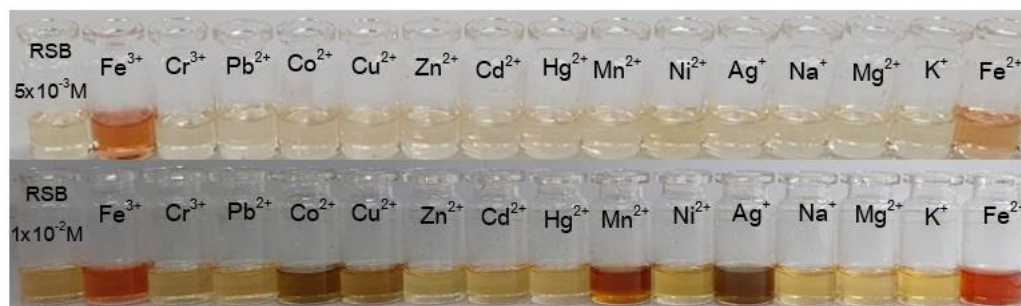
มีความเข้มข้น 1.0×10^{-2} และ 5.0×10^{-3} M มาศึกษาการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับไอออนบวกชนิดต่าง ๆ พบว่า reduced Schiff base ligand ที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-2} M มีค่าสูงเกินไปสามารถจับได้ Co^{2+} Cu^{2+} Mn^{2+} และ Ag^{2+} ทำให้เกิดการรบกวนในการตรวจหาปริมาณ Fe^{3+} ในสารตัวอย่าง ในขณะที่ reduced Schiff base ligand ที่ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M เลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับ Fe^{3+} มีเพียง Fe^{2+} เป็นตัวรบกวนแต่ไม่ส่งผลต่อการหาปริมาณเหล็กในสารตัวอย่างเพราะเป็นการหาเหล็กรวมทั้ง Fe^{3+} และ Fe^{2+} ดังแสดงในภาพประกอบ 30 งานวิจัยนี้จึงเลือกความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand ที่ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ที่ให้ค่า R^2 ที่สูงสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า เลือกจับกับ Fe^{3+} อย่างจำเพาะเจาะจงและไม่มี การรบกวนจากไอออนบวกชนิดอื่นในการตรวจหาปริมาณ Fe^{3+} ในสารตัวอย่าง



ภาพประกอบ 28 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของ reduced Schiff base ligand ในแต่ละความเข้มข้นเมื่อจับกับ Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น 2.0×10^{-5} - 1.0×10^{-3} M



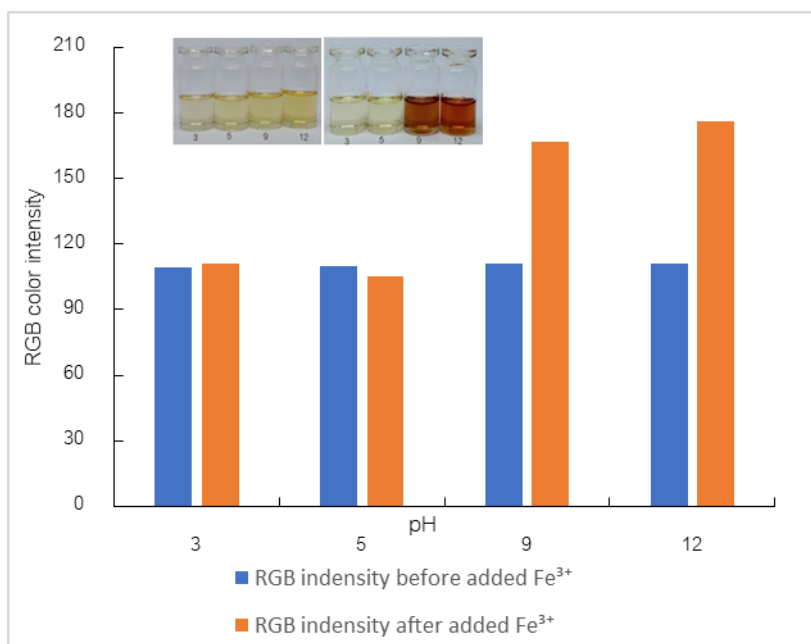
ภาพประกอบ 29 แสดงการเปรียบเทียบกราฟมาตรฐานที่ให้ความเป็นเส้นตรงของ reduced Schiff base ligand ที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-4} 5.0×10^{-3} และ $1.0 \times 10^{-2} M$ เมื่อจับกับ Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น 2.0×10^{-5} - $1.0 \times 10^{-3} M$



ภาพประกอบ 30 แสดงการเปลี่ยนสีของสารละลาย reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 5×10^{-3} M (บน) และ 1×10^{-2} M (ล่าง) เมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Na^+ K^+ Ag^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+} ที่ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M

ศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์โดยใช้สมาร์ตโฟน

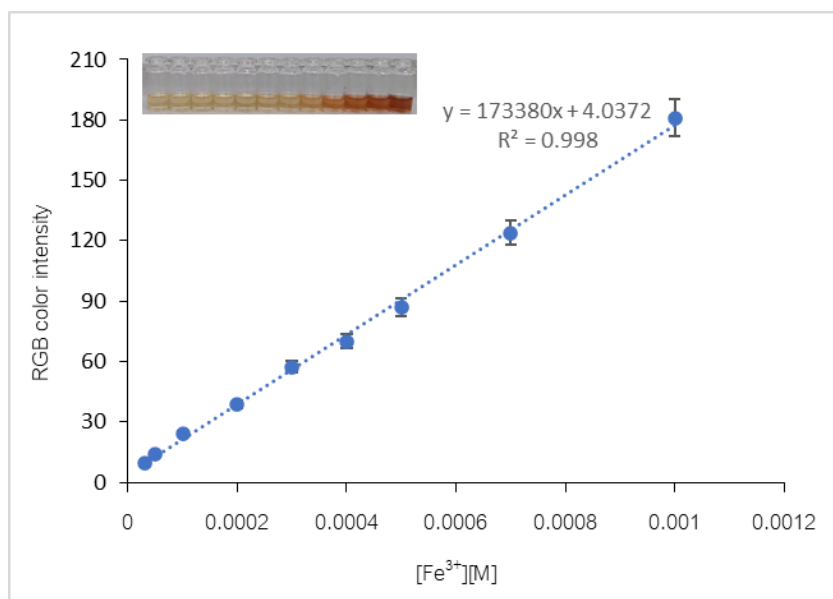
เมื่อนำ reduced Schiff base ligand มาศึกษา pH ที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัด Fe^{3+} โดยนำสารละลาย reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 5×10^{-3} M ที่ pH 3 5 9 และ 12 มาถ่ายภาพผ่านแอปพลิเคชัน PhotoMetrix พบว่าที่ pH 3 5 9 และ 12 สารละลาย reduced Schiff base ligand มีสีเหลืองจางและความเข้มสีที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน บ่งชี้ถึงความเสถียรของ reduced Schiff base ligand ที่ pH ต่าง ๆ แต่เมื่อเติมสารละลาย Fe^{3+} ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M พบว่าที่ pH 3 และ 5 สีของสารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างไม่มีนัยสำคัญ บ่งชี้ว่าที่ pH 3 และ 5 อยู่ในสภาวะกรด reduced Schiff base ligand มีการเติมโปรตอนในตำแหน่ง N-donor และ O-donor ทำให้ไม่สามารถจับ Fe^{3+} ได้ สีของสารละลายจึงไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ pH 9 และ 12 อยู่ในสภาวะเบส N-donor และ O-donor ของ reduced Schiff base ligand จับกับ Fe^{3+} ได้ดีจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายอย่างชัดเจนจากสีเหลืองเป็นสีแดง ความเข้มสีที่ได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 31 แสดงว่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัด Fe^{3+} คือ สภาวะที่เป็นเบส



ภาพประกอบ 31 แสดงการเปรียบเทียบความเข้มสีของสารละลาย reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ก่อนเติม Fe^{3+} และหลังเติม Fe^{3+} ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M ที่ pH ต่าง ๆ

ศึกษาประสิทธิภาพของ reduced Schiff base ligand ในการตรวจจับ Fe^{3+} โดยใช้สเปกโตรโฟม

เมื่อนำ reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M มาเติม Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น 2.0×10^{-5} - 10×10^{-3} M พบว่าสารละลายของ reduced Schiff base ligand เปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีแดง นำไปถ่ายภาพผ่านแอปพลิเคชัน PhotoMetrix แล้วนำความเข้มสีมาสร้างกราฟเทียบกับความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่เติมลงไป พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับ Fe^{3+} ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9980 ดังแสดงในภาพประกอบ 32



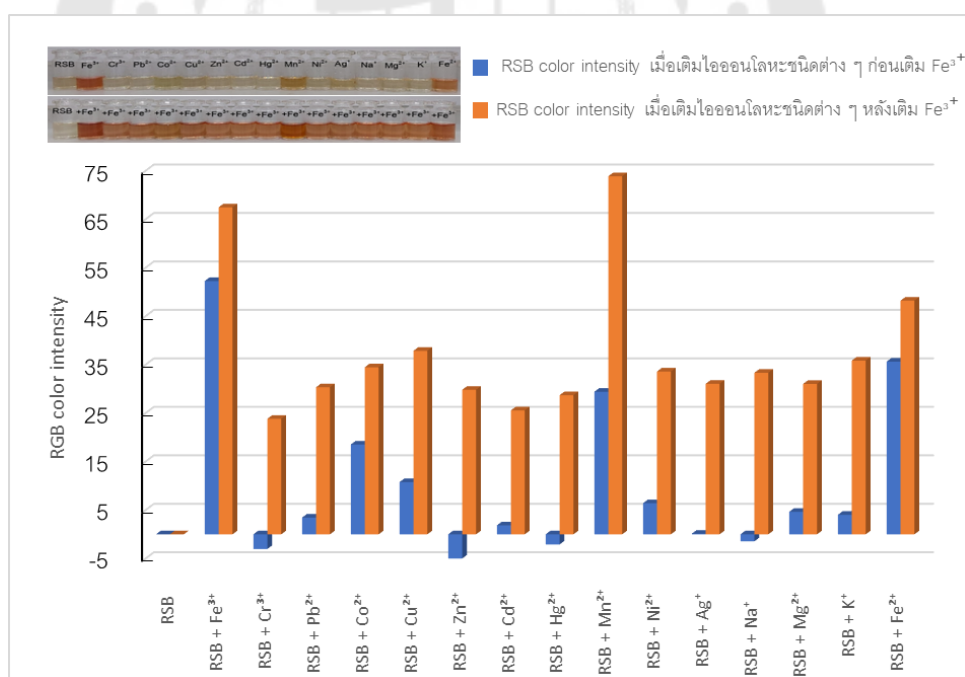
ภาพประกอบ 32 กราฟมาตรฐานแสดงสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีของ reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M เมื่อเติม Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น 2.0×10^{-5} - 1.0×10^{-3} M

ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ (LOQ) คำนวณได้จาก $3\text{SD}/\text{slope}$ และ $10\text{SD}/\text{slope}$ โดย SD มาจากการวัดความเข้มสีของสารละลายแบบสุ่มจำนวน 10 ซ้ำ พบว่า LOD มีค่าเท่ากับ 1.3×10^{-5} M และ LOQ เท่ากับ 4.3×10^{-5} M

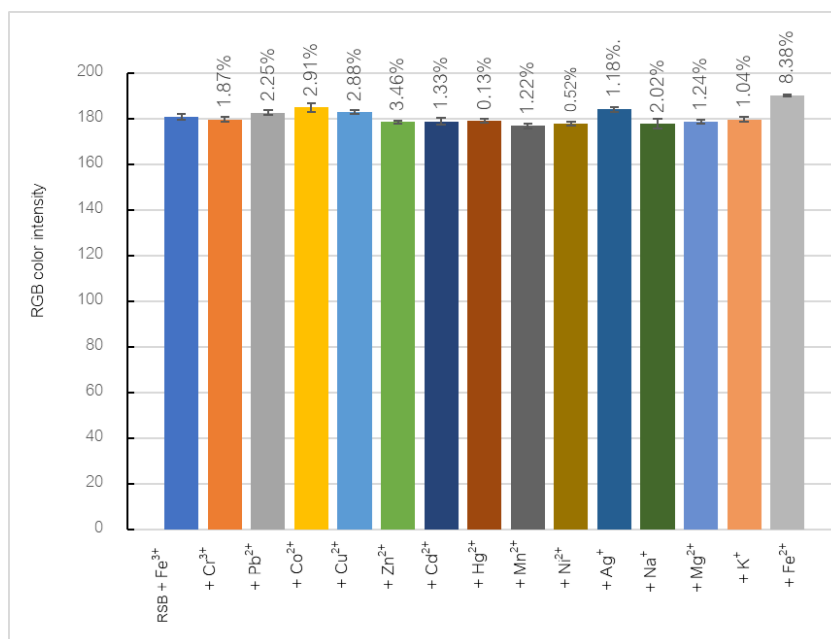
ศึกษาผลการรบกวนการวิเคราะห์ของไอออนบวกที่เจือปนในสารตัวอย่าง ที่อาจส่งผลต่อการวิเคราะห์ Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ทโฟน

ศึกษาการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงและผลการรบกวนการตรวจวัด Fe^{3+} จากไอออนบวกชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Na^+ K^+ Ag^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ทโฟน โดยนำ reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M มาเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว ความเข้มข้น 3.0×10^{-4} M แล้วนำไปถ่ายภาพผ่านแอปพลิเคชัน PhotoMetrix นำผลต่างความเข้มสีของ reduced Schiff base ligand กับความเข้มสีเมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ มาสร้างกราฟ จะได้กราฟแท่งสีน้ำเงิน ดังแสดงในภาพประกอบ 33 ความเข้มสีที่เพิ่มขึ้นมีเพียงเมื่อเติม Fe^{3+} และ Fe^{2+} ที่เห็นผลชัดเจน แต่เมื่อเติม Fe^{3+} ลงในทุกขวดที่มีไอออนบวกชนิดต่าง ๆ อีกครั้งเพื่อหาความเข้มสีที่เพิ่มขึ้น พบว่าทุกขวดมีความเข้มสีเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติม Fe^{3+} ดังแสดงในภาพประกอบ 33 กราฟแท่งสีส้ม บ่งชี้ถึงการเลือกจับอย่าง

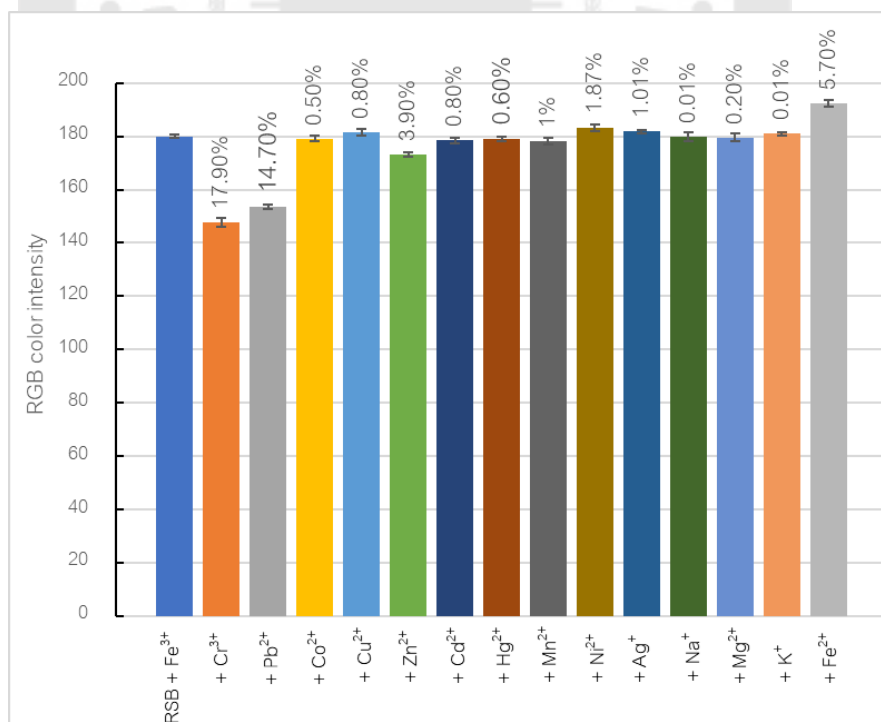
จำเพาะเจาะจงของ reduced Schiff base ligand กับ Fe^{3+} เมื่อศึกษาผลการรบกวนการตรวจวัด Fe^{3+} ความเข้มข้น $3.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ ในขณะที่ไอออนบวกชนิดต่าง ๆ รบกวนได้แก่ Na^+ K^+ Ag^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} ที่จำนวน 1 เท่า ($3.0 \times 10^{-4} \text{ M}$) และจำนวน 5 เท่า ($1.5 \times 10^{-3} \text{ M}$) แล้วนำความเข้มสีที่ได้มาสร้างกราฟแท่งดังแสดงในภาพประกอบ 34 และ 35 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ ที่จำนวน 1 เท่า ความเข้มสีที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับความเข้มสีของ reduced Schiff base ligand กับ Fe^{3+} อยู่ระหว่าง 0.95-8.30 % โดยไอออนบวกที่รบกวนให้การเปลี่ยนแปลงความเข้มสีที่ได้เกิน 5.0 % มีเพียง Fe^{2+} คือเท่ากับ 8.60% ในขณะที่เมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ ที่จำนวน 5 เท่า ความเข้มสีที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0.01-17.90 % โดยมีตัวรบกวนที่ความเข้มสีเปลี่ยนแปลงเกิน 5% คือ Fe^{2+} Pb^{2+} และ Cr^{3+} โดยมีค่าเท่ากับ 5.70% 14.70 % และ 17.90 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การรบกวนของ Fe^{2+} ไม่ส่งผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีเหล็ก เพราะงานวิจัยนี้หาเป็นปริมาณเหล็ก รวมทั้ง Fe^{3+} และ Fe^{2+} และสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์มีปริมาณ Pb^{2+} และ Cr^{3+} น้อย ไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe^{3+}



ภาพประกอบ 33 กราฟแท่งแสดงการเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงของ reduced Schiff base ligand กับ Fe^{3+} ทั้งก่อนและหลังการเติม Fe^{3+} ความเข้มข้น $3.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ ลงในไอออนบวกชนิดต่าง ๆ ความเข้มข้น $3.0 \times 10^{-4} \text{ M}$



ภาพประกอบ 34 กราฟแท่งแสดงผลการรบกวนการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe³⁺ (3.0×10^{-4} M) เมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ จำนวน 1 เท่า (3.0×10^{-4} M)



ภาพประกอบ 35 กราฟแท่งแสดงผลการรบกวนการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe³⁺ (3.0×10^{-4} M) เมื่อเติมไอออนบวกชนิดต่าง ๆ จำนวน 5 เท่า (1.5×10^{-3} M)

พัฒนาประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นในการหาปริมาณ Fe^{3+} ในสารตัวอย่าง

นำ reduced Schiff base ligand ที่สังเคราะห์มาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัดปริมาณ Fe^{3+} โดยนำ reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น $5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ มาเติม Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น $2.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ แล้วถ่ายภาพผ่านแอปพลิเคชัน PhotoMetrix เพื่อนำความเข้มสีที่เพิ่มขึ้นมาสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นเตรียมตัวอย่างน้ำ 3 ชนิด คือ น้ำประปา น้ำคลองและน้ำดื่ม โดยการเติมสารละลายมาตรฐาน Fe^{3+} ลงในตัวอย่างน้ำแต่ละชนิด แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำแต่ละชนิด ให้ได้ความเข้มข้น Fe^{3+} เท่ากับ 5.0×10^{-5} และ $3.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ ในแต่ละชนิดของตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างน้ำแต่ละความเข้มข้นไปหาปริมาณ Fe^{3+} ด้วยการเติม reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น $5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร แล้วทำการถ่ายภาพผ่านแอปพลิเคชัน PhotoMetrix นำความเข้มสีที่ได้ไปหาปริมาณ Fe^{3+} โดยการเทียบกับกราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้น ผลการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe^{3+} ในตัวอย่างน้ำแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถหาปริมาณของ Fe^{3+} ที่เติมลงไปได้อย่างแม่นยำ (% recovery) มีค่าอยู่ระหว่าง 95.0-104.0% เป็นค่าที่ยอมรับได้ในระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงให้เห็นว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการใช้เป็นเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดปริมาณ Fe^{3+} ในตัวอย่างน้ำได้

ตาราง 3 ความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในตัวอย่างน้ำประปา น้ำคลองและน้ำดื่ม เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นด้วย reduced Schiff base ligand

สารตัวอย่าง	Spiked [M]	วิธีที่พัฒนาขึ้น [M]	%Recovery
		(%RSD, n=3)	
น้ำประปา	0.00	-	-
	5.00×10^{-5}	$4.95 \pm 0.08 \times 10^{-5}$ (1.62)	99.00 ± 1.60
	3.00×10^{-4}	$3.12 \pm 0.06 \times 10^{-4}$ (1.60)	104.00 ± 1.67
น้ำคลอง	0.00	8.20×10^{-6}	-
	5.00×10^{-5}	$5.57 \pm 0.12 \times 10^{-5}$ (2.15)	95.00 ± 2.14
	3.00×10^{-4}	$2.98 \pm 0.07 \times 10^{-4}$ (2.16)	96.67 ± 2.33
น้ำดื่ม	0.00	-	-
	5.00×10^{-5}	$5.01 \pm 0.18 \times 10^{-5}$ (3.59)	100.20 ± 3.60
	3.00×10^{-4}	$2.96 \pm 0.13 \times 10^{-4}$ (4.42)	98.67 ± 4.33

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ reduced Schiff base ligand (1,1'-(((1,3-phenylenebis(methylene))bis(azanediyl))bis(methylene))bis(naphthalene-2-ol)) (RSB) โดยใช้ปฏิกิริยา coupling ระหว่าง 2-hydroxy-1-naphthaldehyde กับ *m*-xylylene diamine เกิดเป็น Schiff base ligand จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชันด้วย NaBH_4 ได้ผลิตภัณฑ์ reduced Schiff base ligand ซึ่งสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ง่ายเพียง 2 ขั้นตอนและมี %yield สูง โดย reduced Schiff base ligand ที่สังเคราะห์ขึ้นมานั้นมีหมู่ของ secondary amine (-NH-) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่สามารถเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับ Fe^{3+} ได้ เมื่อความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand เหมาะสมจะเห็นการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อจับ Fe^{3+} ได้ด้วยตาเปล่า สามารถนำ reduced Schiff base ligand ที่สังเคราะห์ได้มาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์สำหรับการวิเคราะห์ Fe^{3+} ในสารตัวอย่างโดยใช้สมาร์ตโฟนโดยสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

การศึกษาการจับกับไอออนบวกชนิดต่าง ๆ (Na^+ K^+ Ag^+ Mg^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Cr^{3+} Fe^{3+}) ด้วยการใช้อยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมทรี พบว่า reduced Schiff base ligand สามารถเลือกจับอย่างจำเพาะเจาะจงกับ Fe^{3+} เกิดพีคใหม่ในช่วงความยาวคลื่น 350-420 nm เนื่องมาจากปรากฏการณ์ ligand to metal charge transfer (LMCT) ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 380 nm มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น 2.0×10^{-6} - 1.0×10^{-3} M มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) เท่ากับ 0.9994 โดย ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 1.2×10^{-6} M และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณ (LOQ) เท่ากับ 2.0×10^{-6} M

การศึกษาความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand ที่เหมาะสมในการจับกับ Fe^{3+} ที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนโดยใช้สมาร์ตโฟน เมื่อใช้ความเข้มข้นของ reduced Schiff base ligand เท่ากับ 1.0×10^{-4} , 1.0×10^{-3} , 5.0×10^{-3} และ 1.0×10^{-2} M พบว่าความเข้มข้นที่ 1.0×10^{-4} M สารละลายของ reduced Schiff base ligand ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี ความเข้มข้น 1×10^{-3} M เปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นม่วง ให้ค่า R^2 ที่ต่ำ ไม่เหมาะในการตรวจวัดปริมาณ Fe^{3+} และความเข้มข้น 5.0×10^{-3} และ 1.0×10^{-2} M เปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีแดงเหมือนกัน และให้ค่า R^2 ที่สูงเท่ากับ 0.9980 และ 0.9666 ตามลำดับ แต่ความเข้มข้น 1.0×10^{-2} M มีความเข้มข้นสูงเกินไป ทำให้เกิดการรบกวนจากไอออนบวกชนิดอื่นในการตรวจวัด Fe^{3+} ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M จึงเหมาะสมในการใช้ตรวจวัดและยังคงมีความจำเพาะเจาะจงกับ Fe^{3+} เพียงชนิดเดียว

นอกจากนี้ยังศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์ Fe^{3+} โดยใช้สมาร์ตโฟน ที่ pH 3 5 9 และ 12 ที่สภาวะกรด pH 3 และ 5 N-donor และ O-donor เกิดการเติมโปรตอนทำให้ไม่สามารถจับ Fe^{3+} ได้ สารละลายของ reduced Schiff base ligand จึงไม่เกิดการเปลี่ยนสี เพราะไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อน ที่สภาวะเบส pH 9 และ 12 N-donor และ O-donor จะจับกับ Fe^{3+} ได้ดี ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน สารละลายของ reduced Schiff base ligand จึงเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีแดงความเข้มข้นมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เหมาะสมในการตรวจวัด Fe^{3+} ในสภาวะที่เป็นเบส

ในการศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัด Fe^{3+} เมื่อนำ reduced Schiff base ligand ความเข้มข้น $5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ ไปศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัด Fe^{3+} พบว่าความเข้มข้นของสารละลาย reduced Schiff base ligand มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับ Fe^{3+} ในช่วงความเข้มข้น $2.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) เท่ากับ 0.9980 มีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดเท่ากับ $1.3 \times 10^{-5} \text{ M}$ และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปริมาณเท่ากับ $4.3 \times 10^{-5} \text{ M}$ เมื่อศึกษาการรบกวนจากไอออนบวกชนิดอื่น ๆ ($\text{Na}^+ \text{K}^+ \text{Ag}^+ \text{Mg}^{2+} \text{Mn}^{2+} \text{Fe}^{2+} \text{Co}^{2+} \text{Ni}^{2+} \text{Cu}^{2+} \text{Zn}^{2+} \text{Hg}^{2+} \text{Cd}^{2+} \text{Pb}^{2+} \text{Cr}^{3+} \text{Fe}^{3+}$) ที่จำนวน 1 เท่า และ 5 เท่า ของความเข้มข้น Fe^{3+} พบว่ามีเพียง Fe^{2+} รบกวนการตรวจวัด Fe^{3+} ที่จำนวน 1 เท่า แต่เมื่อใช้ไอออนบวกชนิดอื่น ๆ จำนวน 5 เท่า พบว่ามีทั้ง $\text{Fe}^{2+} \text{Pb}^{2+}$ และ Cr^{3+} ที่ความเข้มข้นมีการเปลี่ยนแปลงเกิน 5 % โดยมีค่าเท่ากับ 5.70 %, 14.70 % และ 17.90 % ตามลำดับ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้หาเป็นปริมาณเฉลี่ยรวมทั้ง Fe^{3+} และ Fe^{2+} และสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์มีปริมาณ Pb^{2+} และ Cr^{3+} ต่ำไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe^{3+} เมื่อนำ reduced Schiff base ligand มาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจหาปริมาณ Fe^{3+} ในตัวอย่างน้ำทั้ง 3 ชนิดคือ น้ำประปา น้ำคลอง และน้ำดื่มโดยการเติม Fe^{3+} ลงไปในตัวอย่างน้ำทั้ง 3 ชนิด และใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นคือใช้ reduced Schiff base ligand หาปริมาณของ Fe^{3+} พบว่าสามารถหาปริมาณ Fe^{3+} ในน้ำคลองได้เท่ากับ $8.20 \times 10^{-6} \text{ M}$ แต่ไม่พบในน้ำประปาและน้ำดื่ม แต่สามารถหาปริมาณ Fe^{3+} ที่เติมลงไป ได้ %recovery ในช่วง 95.00-104.00 % ซึ่งมีความสอดคล้องกับความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่เติมลงไป ผิดพลาดไม่เกิน 5 % เป็นที่ยอมรับในระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงให้เห็นว่า reduced Schiff base ligand ที่สังเคราะห์ขึ้นมานั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe^{3+} ได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงนับได้ว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการวิเคราะห์ Fe^{3+} อย่างง่าย ไม่ยุ่งยากและใช้ต้นทุนต่ำ

ข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้ ในอนาคตสามารถนำวิธีที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณเหล็กในอาหารเสริมหรือวิตามินรวมได้ เพราะปริมาณเหล็กในตัวอย่างเหล่านี้มีปริมาณเพียงพอ สามารถตรวจวัดได้



บรรณานุกรม

- Ahlberg, M. K. (2021). A profound explanation of why eating green (wild) edible plants promote health and longevity. *Food frontiers*, 2(3), 240-267.
- AlJawaldeh, A., Taktouk, M., Doggui, R., Abdollahi, Z., Achakzai, B., Aguenou, H., AlHalaika, M., Almamary, S., Barham, R., & Coulibaly Zerbo, F. (2021). Are countries of the eastern mediterranean region on track towards meeting the world health assembly target for anemia? A review of evidence. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2449.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2004). *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC press.
- Aribuga, H., Ertugral, U., Alcay, Y., Yavuz, O., Yildirim, M. S., Ozdemir, E., Kaya, K., Sert, A. B. O., Kok, F. N., & Tuzun, N. s. (2023). A new Fe³⁺-selective, sensitive, and dual-channel turn-on probe based on rhodamine carrying thiophenecarboxaldehyde: Smartphone application and imaging in living cells. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 287, 122060.
- Arnold, G., Weyer, S., & Anbar, A. (2004). Fe isotope variations in natural materials measured using high mass resolution multiple collector ICPMS. *Analytical chemistry*, 76(2), 322-327.
- Aussawaponpaisan, P., Nusuwan, P., Tongraung, P., Jittangprasert, P., Pumsa-ard, K., & Kuno, M. (2017). Fluorescent Chemosensor for Cu²⁺ based on Schiff base-naphthalene-2-ol. *Materials Today: Proceedings*, 4(5), 6022-6030.
- Bag, H., Turker, A. R., & Lale, M. (2000). Determination of Cu, Zn, Fe, Ni and Cd by flame atomic absorption spectrophotometry after preconcentration by Escherichia coli immobilized on sepiolite. *Talanta*, 51(5), 1035-1043.
- Beauchemin, D. (2008). Inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytical chemistry*, 80(12), 4455-4486.
- Biswas, A., Drew, M. G., Gomez Garcia, C. J., & Ghosh, A. (2010). Use of a reduced

- schiff-Base ligand to prepare novel chloro-bridged chains of rare Cu (II) trinuclear complexes with mixed azido/oxo and chloro/oxo bridges. *Inorganic chemistry*, 49(17), 8155-8163.
- Bock, F. C., Helfer, G. A., da Costa, A. B., Dessuy, M. B., & Ferrao, M. F. (2020). PhotoMetrix and colorimetric image analysis using smartphones. *Journal of Chemometrics*, 34(12), e3251.
- Boulechfar, C., Ferkous, H., Delimi, A., Djedouani, A., Kahlouche, A., Boublia, A., Darwish, A. S., Lemaoui, T., Verma, R., & Benguerba, Y. (2023). Schiff bases and their metal complexes: a review on the history, synthesis, and applications. *Inorganic Chemistry Communications*, 110451.
- Brugnara, C. (2003). Iron deficiency and erythropoiesis: new diagnostic approaches. *Clinical chemistry*, 49(10), 1573-1578.
- del Castillo Busto, M. E., Montes-Bayón, M., & Sanz-Medel, A. (2009). The potential of mass spectrometry to study iron-containing proteins used in clinical diagnosis. *Analytica chimica acta*, 634(1), 1-14.
- Desai, N. K., Kolekar, G. B., & Patil, S. R. (2014). Off-on fluorescent polyanthracene for recognition of ferric and fluoride ions in aqueous acidic media: application in pharmaceutical and environmental analysis. *New Journal of Chemistry*, 38(9), 4394-4403.
- Domaille, D. W., Que, E. L., & Chang, C. J. (2008). Synthetic fluorescent sensors for studying the cell biology of metals. *Nature chemical biology*, 4(3), 168-175.
- Domon, B., & Aebersold, R. (2006). Mass spectrometry and protein analysis. *science*, 312(5771), 212-217.
- Dortez, S., Crevillen, A. G., & Escarpa, A. (2023). Integrated calibration and serum iron in situ analysis into an array microfluidic paper-based analytical device with smartphone readout. *Talanta*, 253, 123914.
- Fan, J., Zhang, S., Xu, Y., Wei, N., Wan, B., Qian, L., & Liu, Y. (2020). A polyethylenimine/salicylaldehyde modified cellulose Schiff base for selective and sensitive Fe³⁺ detection. *Carbohydrate polymers*, 228, 115379.

- Fang, H., Huang, P., & Wu, F. (2019). A highly sensitive fluorescent probe with different responses to Cu^{2+} and Zn^{2+} . *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 214, 233-238.
- Galaris, D., Skiada, V., & Barbouti, A. (2008). Redox signaling and cancer: the role of "labile" iron. *Cancer letters*, 266(1), 21-29.
- Goswami, S., Aich, K., Das, S., Das, A. K., Sarkar, D., Panja, S., Mondal, T. K., & Mukhopadhyay, S. (2013). A red fluorescence 'off-on' molecular switch for selective detection of Al^{3+} , Fe^{3+} and Cr^{3+} : experimental and theoretical studies along with living cell imaging. *Chemical Communications*, 49(91), 10739-10741.
- Harathi, J., & Thenmozhi, K. (2020). AIE-active Schiff base compounds as fluorescent probes for the highly sensitive and selective detection of Fe^{3+} ions. *Materials Chemistry Frontiers*, 4(5), 1471-1482.
- Hurrell, R., & Egli, I. (2010). Iron bioavailability and dietary reference values. *The American journal of clinical nutrition*, 91(5), 1461S-1467S.
- Iannotti, L. L., Tielsch, J. M., Black, M. M., & Black, R. E. (2006). Iron supplementation in early childhood: health benefits and risks. *The American journal of clinical nutrition*, 84(6), 1261-1276.
- Jafari, H., Rezaeivala, M., Mokhtarian, N., Berisha, A., & Ameri, E. (2022). Corrosion inhibition of carbon steel in 0.5 M H_2SO_4 by new reduced Schiff base ligand. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 8(3), 81.
- Jittangprasert, P., Kerdkok, D., & Tongraung, P. (2020). Synthesis and Application of Novel Modified Silver Nanoparticles for Determination of Iron (III) in Wastewater. *J. Res. Unit Sci. Technol. Environ. Learning*, 11(2).
- Joao, A. F., Squissato, A. L., Fernandes, G. M., Cardoso, R. M., Batista, A. D., & Munoz, R. A. (2019). Iron (III) determination in bioethanol fuel using a smartphone-based device. *Microchemical Journal*, 146, 1134-1139.
- Jos, S., & Suja, N. (2023). Chiral Schiff base ligands of salicylaldehyde: A versatile tool for medical applications and organic synthesis-A review. *Inorganica Chimica Acta*, 547, 121323.

- Karami, C., Alizadeh, A., Taher, M., Hamidi, Z., & Bahrami, B. (2016). UV-visible spectroscopy detection of iron (III) ion on modified gold nanoparticles with a hydroxamic acid. *Journal of Applied Spectroscopy*, 83, 687-693.
- Kumar, A., Vijayakrishna, K., Sivaramakrishna, A., CVS, B. R., Sivaraman, N., & Sahoo, S. K. (2018). Development of the Smartphone-Assisted Colorimetric Detection of Thorium by Using New Schiff's Base and Its Applications to Real Time Samples. *Inorganic chemistry*, 57(24), 15270-15279.
- Li, Y., Niu, Q., Wei, T., & Li, T. (2019). Novel thiophene-based colorimetric and fluorescent turn-on sensor for highly sensitive and selective simultaneous detection of Al^{3+} and Zn^{2+} in water and food samples and its application in bioimaging. *Analytica Chimica Acta*, 1049, 196-212.
- Manna, A. K., Sahu, M., Rout, K., Das, U. K., & Patra, G. K. (2020). A highly selective novel multiple amide based Schiff base optical chemosensor for rapid detection of Cu^{2+} and its applications in real sample analysis, molecular logic gate and smart phone. *Microchemical Journal*, 157, 104860.
- Mao, J., He, Q., & Liu, W. (2010). An rhodamine-based fluorescence probe for iron (III) ion determination in aqueous solution. *Talanta*, 80(5), 2093-2098.
- Massironi, S., Cavalcoli, F., Rausa, E., Invernizzi, P., Braga, M., & Vecchi, M. (2020). Understanding short bowel syndrome: Current status and future perspectives. *Digestive and Liver Disease*, 52(3), 253-261.
- Mei, Z., Parvanta, I., Cogswell, M. E., Gunter, E. W., & Grummer-Strawn, L. M. (2003). Erythrocyte protoporphyrin or hemoglobin: which is a better screening test for iron deficiency in children and women? *The American journal of clinical nutrition*, 77(5), 1229-1233.
- Mironenko, A. Y., Tutov, M., Sergeev, A., & Bratskaya, S. Y. (2017). On/off rhodamine based fluorescent probe for detection of Au and Pd in aqueous solutions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 246, 389-394.
- Mohamed, K. N., & Gledhill, M. (2015). Determination of specific iron chelator by using LC-ICP-MS and LC-ESI-MS. *Procedia Environmental Sciences*, 30, 256-261.

- Oboova, B., Habala, L., Litecka, M., Herich, P., Bilkova, A., Bilka, F., & Horvath, B. (2023). Antimicrobially active Zn (II) complexes of reduced Schiff bases derived from cyclohexane-1, 2-diamine and fluorinated benzaldehydes-Synthesis, crystal structure and bioactivity. *Life*, 13(7), 1516.
- Organization, W. H. (2004). *Vitamin and mineral requirements in human nutrition*. World Health Organization.
- Patil, D., Patil, A., Khadke, N., & Borhade, A. (2019). Highly selective and sensitive colorimetric probe for Al^{3+} and Fe^{3+} metal ions based on 2-aminoquinolin-3-yl phenyl hydrazone Schiff base. *Inorganica Chimica Acta*, 492, 167-176.
- Patil, P., Shinde, S., & Sahoo, S. (2022). Fe^{3+} Selective Pyrimidine Based Chromogenic and Fluorogenic Chemosensor. *Trends in Sciences*, 19(23), 4487-4487.
- Pozdniakova, S., Padarauskas, A., & Schwedt, G. (1997). Simultaneous determination of iron (II) and iron (III) in water by capillary electrophoresis. *Analytica Chimica Acta*, 351(1-3), 41-48.
- Prajapati, S. M., Patel, K. D., Vekariya, R. H., Panchal, S. N., & Patel, H. D. (2014). Recent advances in the synthesis of quinolines: a review. *RSC Advances*, 4(47), 24463-24476.
- Qin, C., Cheng, Y., Wang, L., Jing, X., & Wang, F. (2008). Phosphonate-functionalized polyfluorene as a highly water-soluble iron (III) chemosensor. *Macromolecules*, 41(21), 7798-7804.
- Reis, B. F. d., Knochen, M., Pignalosa, G., Cabrera, N., & Giglio, J. (2004). A multicommutated flow system for the determination of copper, chromium, iron and lead in lubricating oils with detection by flame AAS. *Talanta*, 64(5), 1220-1225.
- Sahoo, S. K., Sharma, D., Bera, R. K., Crisponi, G., & Callan, J. F. (2012). Iron (III) selective molecular and supramolecular fluorescent probes. *Chemical Society Reviews*, 41(21), 7195-7227.
- Sangsin, S., Srivilai, P., & Tongraung, P. (2021). Colorimetric detection of Cr^{3+} in dietary supplements using a smartphone based on EDTA and tannic acid-modified silver nanoparticles. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular*

Spectroscopy, 246, 119050.

- Schumann, K., Ettle, T., Szegner, B., Elsenhans, B., & Solomons, N. W. (2007). On risks and benefits of iron supplementation recommendations for iron intake revisited. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 21(3), 147-168.
- Serhan, M., Jackemeyer, D., Long, M., Sprowls, M., Perez, I. D., Maret, W., Chen, F., Tao, N., & Forzani, E. (2020). Total iron measurement in human serum with a novel smartphone-based assay. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, 8, 1-9.
- Silva, G. M., Garcia, J. A., de Alencar Garitta, J., Cunha, D. G. F., Finkler, N. R., Mendiando, E. M., & Ghiglieno, F. (2022). Smartphone-based spectrometry system as a prescreening assessment of copper and iron for real time control of water pollution. *Journal of Environmental Management*, 323, 116214.
- Singh, G., Sindhu, J., Kumar, V., Sharma, V., Sharma, S. K., Mehta, S. K., Mahnashi, M. H., Umar, A., & Kataria, R. (2019). Development of an off-on selective fluorescent sensor for the detection of Fe^{3+} ions based on Schiff base and its Hirshfeld surface and DFT studies. *Journal of Molecular Liquids*, 296, 111814.
- Singh, R., Banerjee, A., Colacio, E., & Rajak, K. K. (2009). Enantiopure tetranuclear iron (III) complexes using chiral reduced Schiff base ligands: Synthesis, structure, spectroscopy, magnetic properties, and DFT studies. *Inorganic chemistry*, 48(11), 4753-4762.
- So, P. T., & Dong, C. Y. (2001). Fluorescence spectrophotometry. e LS.
- Sobkowiak, M., Gabrielsson, R., Inganäs, O., & Milczarek, G. (2014). Amperometric detection of iron (III) on electroconductive hydrogel based on polypyrrole and alkoxy-sulfonated poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)(PEDOT-S). *Synthetic Metals*, 194, 170-175.
- Sreenivasulu, B. (2009). Diphenoxo-bridged copper (II) complexes of reduced schiff base ligands as functional models for catechol oxidase. *Australian journal of chemistry*, 62(9), 968-979.
- Sreenivasulu, B., Vetrichelvan, M., Zhao, F., Gao, S., & Vittal, J. J. (2005). Copper (II)

- complexes of Schiff-base and reduced Schiff-base ligands: Influence of weakly coordinating sulfonate groups on the structure and oxidation of 3, 5-DTBC. In (pp. 1434-1948): Wiley Online Library.
- Sun, Z., Li, Z., Yuan, D., Gao, J., Lin, L., Lin, J., Zhu, M., Makawana, J. A., Qian, Y., & Zhu, H. (2016). A quinoline-based ratiometric and reversible fluorescent probe for cadmium imaging in living cells. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 64(1), 27-33.
- Sungwienwong, I., Dankhanob, L., Kerdkok, D., Tongraung, P., & Apiratikul, N. (2023). Functionalized Silver Nanoparticles for Rapid Detection of Mn^{2+} Employing a Smartphone Platform. *ChemistrySelect*, 8(6), e202204514.
- Upadhyay, Y., Bothra, S., Kumar, R., & Sahoo, S. K. (2018). Smartphone-assisted colorimetric detection of Cr^{3+} using vitamin B₆ cofactor functionalized gold nanoparticles and its applications in real sample analyses. *ChemistrySelect*, 3(24), 6892-6896.
- Van Loon, A. T. (2012). *Analytical atomic absorption spectroscopy: selected methods*. Elsevier.
- Wang, L., Yang, L., & Cao, D. (2014). A visual and fluorometric probe for Al (III) and Fe (III) using diketopyrrolopyrrole-based Schiff base. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 202, 949-958.
- Weyrauch, K., Duverna, R., Sisco, P. N., Domesle, A., & Bilanovic, I. (2024). A Survey of the Levels of Selected Metals in US Meat, Poultry, and Siluriformes Fish Samples Taken at Slaughter and Retail, 2017–2022. *Journal of Food Protection*, 87(4), 100243.
- Yuan, X., Li, W., Baird, S. K., Carlsson, M., & Melefors, O. (2004). Secretion of ferritin by iron-laden macrophages and influence of lipoproteins. *Free radical research*, 38(10), 1133-1142.
- Zakrzewski, J. (2024). Foods Good for Mental Health and Blood Sugar Choosing foods that provide consistent nourishment has a positive impact on your mood and energy levels, setting the stage for successful blood sugar management. *Blood*.

- Zhang, F., Gao, Q., Zhao, J., Ge, M., & Bai, Y. (2016). Design and synthesis of a novel rhodamine-based chemosensor and recognition study to Fe^{3+} . *Heterocyclic Communications*, 22(1), 37-42.
- Zhang, L., Huang, D., Zhao, P., Yue, G., Yang, L., & Dan, W. (2022). Colorimetric detection for uranyl ions in water using vinylphosphonic acid functionalized gold nanoparticles based on smartphone. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 269, 120748.
- Zhang, M., Gong, L., Sun, C., Li, W., Chang, Z., & Qi, D. (2019). A new fluorescent-colorimetric chemosensor based on a Schiff base for detecting Cr^{3+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} and Al^{3+} ions. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 214, 7-13.
- Zhang, X., Bing, Cheng, G., Zhang, W., Jun, Shen, G., Li, & Yu, R., Qin. (2007). A fluorescent chemical sensor for Fe^{3+} based on blocking of intramolecular proton transfer of a quinazolinone derivative. *Talanta*, 71(1), 171-177.

ประวัติผู้เขียน

