

เซ็นเซอร์โม่เลกุลชนิดใหม่ที่ประกอบด้วยกรดโบโรนิก/ฟลูออเรสซิน สำหรับตรวจจับคอปเปอร์และไซยาไนด์ไอออน

NEW BORONIC ACID/FLUORESCEIN SENSORS FOR DETECTION OF COPPER AND CYANIDE IONS

ศรินันท์ กุลชาติ, บุษยรัตน์ ธรรมพัฒน์
Sirinan Kulchat, Boosayarat Tomapatanaget.

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์เซ็นเซอร์ตัวใหม่ที่มีอนุพันธ์ของฟลูออเรสซินและกรดโบโรนิก **F-mBOH** เพื่อใช้ตรวจวัดคอปเปอร์และไซยาไนด์ไอออน จากนั้นได้นำเซ็นเซอร์ **F-mBOH** มาศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแคตไอออนชนิดต่างๆ ซึ่งใช้อะซิโตนไนไตร์เป็นตัวทำละลาย โดยใช้เทคนิคยูวี-วิซิเบิลและการสังเกตด้วยตาเปล่า พบว่าแคตไอออนที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเซ็นเซอร์ได้ดีที่สุดคือ คอปเปอร์ไอออน ทั้งนี้ได้ศึกษาความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเซ็นเซอร์ **F-mBOH** กับคอปเปอร์ไอออน โดยใช้เทคนิคยูวี-วิซิเบิลไทเทรชัน ได้ค่าคงที่การจับ ($\log \beta$) เท่ากับ 7.36 นอกจากนี้เซ็นเซอร์ **F-mBOH** ยังสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีได้ด้วยตาเปล่าเมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับคอปเปอร์ไอออนภายในเวลา 10 นาที โดยเปลี่ยนจากสารละลายไม่มีสีเป็นสีเหลือง และมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสารละลายไม่มีสีเมื่อเติมไซยาไนด์ไอออน ดังนั้นสามารถใช้เซ็นเซอร์ **F-mBOH** ในการตรวจจับคอปเปอร์และไซยาไนด์ไอออนได้ทั้งเทคนิคยูวี-วิซิเบิลและการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

คำสำคัญ: ฟลูออเรสซิน, กรดโบโรนิก, คอปเปอร์, ไซยาไนด์, เซ็นเซอร์

Abstract

A major target of this research is to synthesize and characterize a new sensor containing fluorescein and boronic acid moieties **F-mBOH** for detection of copper and cyanide ions. Complexation studies in acetonitrile of sensor with various cations were evaluated by UV-Vis spectrophotometry and naked-eye detection found that **F-mBOH** was highly selective toward copper ion. The complexation ability with copper ion of **F-mBOH** determined by UV-visible titration exhibited the $\log \beta$ values of 7.36. Interestingly, in the presence of copper ions, the colorless solution of **F-mBOH** changed to strong yellow color within 10 min. Upon the addition of cyanide anions, the strong yellow color faded to colorless immediately. Consequently, **F-mBOH** could be served as excellently naked-eye sensors for detection of copper and cyanide ion.

Keywords: Fluorescein, Boronic acid, Copper, Cyanide, Sensor

บทนำ

ในปัจจุบันนักวิจัยพยายามออกแบบโมเลกุลเซ็นเซอร์และศึกษาถึงความสามารถในการตรวจจับแคตไอออนและแอนไอออนเพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ตรวจจับแคตไอออนหรือแอนไอออนในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้ ซึ่งคอปเปอร์ไอออนเป็นไอออนที่นักวิจัยให้ความสำคัญในการศึกษามาก เนื่องจากคอปเปอร์เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์บางชนิดในร่างกายมนุษย์ และยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยให้เอนไซม์ทำงานได้ดียิ่งขึ้น ในทางตรงข้ามถ้าร่างกายได้รับปริมาณของคอปเปอร์มากเกินไป จะทำให้เกิดโรคทางระบบประสาทได้ เช่น โรคอัลไซเมอร์ โรคพาร์กินสัน เป็นต้น [1] นอกจากนี้แอนไอออนที่มีความสำคัญในระบบ

ชีวภาพคือ ไฮยาไนด์ไอออน เพราะไฮยาไนด์ไอออนถ้าอยู่ในสิ่งมีชีวิตจะส่งผลให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ แต่ในทางอุตสาหกรรมได้นำไฮยาไนด์ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ เช่น ใช้ในการสังเคราะห์โพลีเมอร์สังเคราะห์ไฟเบอร์และเรซิน เป็นต้น [2]

ในหลายงานวิจัยได้ศึกษาเซ็นเซอร์ที่สามารถตรวจวัดคอปเปอร์ โดยใช้การเปลี่ยนแปลงสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ สัญญาณยูวี-วิชิเบิล และสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าได้ เนื่องจากวิธีการที่กล่าวมาเป็นวิธีที่ประหยัดต้นทุนในการสร้างเซ็นเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจวัดไอออนได้ [3-4] สารประกอบที่สามารถให้สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์และยูวีได้ดีคือ ฟลูออเรสซินหรือโรดามีน ถ้าฟลูออเรส

ซินหรือโรดามีนอยู่ในรูปปิดวง (Spirolactam หรือ Closed Form) จะไม่สามารถให้สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์หรือยูวี แต่ถ้าอยู่ในรูปที่เปิดวง (Opened Form) จะสามารถให้สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์และยูวี-วิชิเบิล และทำให้ค่าการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสีได้ด้วยตาเปล่า [5-6] ในปัจจุบันนี้มีผู้ให้ความสนใจศึกษาเซ็นเซอร์ที่มีโรดามีนเป็นส่วนประกอบที่สามารถเปิด-ปิดวงได้ โดยแคตไอออน เช่น Hg^{2+} [7], Cu^{2+} [8], Fe^{3+} [9] แต่สำหรับเซ็นเซอร์ที่มีฟลูออเรสซินเป็นส่วนประกอบยังมีผู้สนใจศึกษาน้อยมาก

กรดโบโรนิกเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเซ็นเซอร์หลายชนิด เพราะกรดโบโรนิกสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารที่มีไดออลเป็นส่วนประกอบ สามารถนำไปใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับน้ำตาลและคาร์โบไฮเดรตได้ [10] นอกจากนี้กรดโบโรนิกยังมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับไซยาไนด์ไอออน [11] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาเซ็นเซอร์ที่มีฟลูออเรสซินเป็นส่วนประกอบที่สามารถเปิด-ปิดวงได้โดยคอปเปอร์ไอออน และได้นำหมู่โบโรนิกมาเชื่อมต่อกับวงฟลูออเรสซินเพื่อใช้เป็นส่วนที่สามารถตรวจจับกับไซยาไนด์ไอออนได้ (**F-mBOH**)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของเซ็นเซอร์ที่มีอนุพันธ์ของ 4 ฟลูออเรสซิน และกรดโบโรนิกเพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดคอปเปอร์และไซยาไนด์ไอออน

2. เพื่อศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเซ็นเซอร์กับคอปเปอร์และไซยาไนด์ไอออน

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

1. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสาร **F-mBOH**

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค ^1H-NMR , $^{13}C-NMR$ และ ESI-High Resolution Mass Spectroscopy ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสาร **F-mBOH** และได้ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ดังนี้

^1H-NMR (400 MHz, DMSO- d_6): δ (in ppm)=9.925 (s, -ArOH, 2H), 8.784 (s, -N=CH, 1H), 8.129 (s, -BOH, 2H), 7.918 ($J=7.2$ Hz, d, -ArH, 1H), 7.757 ($J=7.2$ Hz, d, -ArH, 2H), 7.600 (m, -ArH, 2H), 7.474 ($J=8.4$ Hz, d, -ArH, 1H), 7.317 ($J=7.2$ Hz, t, -ArH, 1H), 7.101 ($J=7.6$ Hz, d, -ArH, 1H), 6.666 ($J=1.6$ Hz, d, -ArH, 2H), 6.516 (m, -ArH, 2H), 6.461 (m, -ArH, 2H). **$^{13}C-NMR$ (100 MHz, DMSO- d_6):** δ (in ppm)= 163.349, 158.192, 151.597, 150.475, 148.373, 135.726, 133.617, 133.298, 132.947, 128.648, 128.081, 127.509, 126.966, 123.249, 122.816, 111.991, 109.549, 102.163, 64.623. **ESI-HRMS:** m/z Calcd for $[M+CH_3OH+H_3O]^+ = 529.1777$, found 529.1552.

2. การศึกษาสมบัติการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเซ็นเซอร์ **F-mBOH** กับแคตไอออนโดยเทคนิคยูวี-วิชิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี แบบปริมาณแคตไอออนมากเกินไป

นำเซ็นเซอร์ **F-mBOH** มาศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแคตไอออนของ Cu^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Ag^+ , Mg^{2+} ในตัวทำละลายอะซีโตนไนไตรท์ (CH_3CN) ซึ่งมี tetra *n*-butyl ammonium hexafluoro phosphate (Bu_4PF_6) เป็น supporting electrolyte ความเข้มข้น 0.01 M โดยเตรียม stock solution ของ **F-mBOH** ความเข้มข้น 0.001 M และเตรียม stock solution ของแคตไอออนความเข้มข้น 0.01 M ซึ่งในการทดลองจะเตรียมสารละลายใส่ในคิวเวตต์ขนาดเซลล์เท่ากับ 1 cm ความเข้มข้นสุดท้ายของ **F-mBOH** 3×10^{-5} M ปริมาตรรวม 2 mL แล้วเติมแคตไอออนลงไปเป็นจำนวน 70 เท่าของ **F-mBOH**

3. การศึกษาสมบัติการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเซ็นเซอร์ **F-mBOH** กับคอปเปอร์ไอออนโดยเทคนิคยูวี-วิชิเบิล โทเทรชัน และหาค่าคงที่การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเซ็นเซอร์กับคอปเปอร์ไอออน

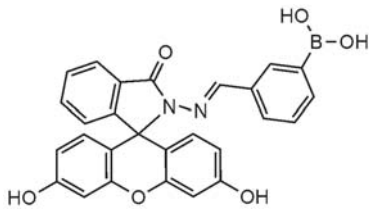
ในการศึกษาจะเตรียม stock solution ของสาร **F-mBOH** เท่ากับ 0.001 M ในขวดวัดปริมาตร 10 mL ในตัวทำละลายอะซีโตนไนไตรท์ โดยใช้ supporting electrolyte เหมือนกับการทดลองในหัวข้อ 2 จากนั้นจะเจือจางสารละลายนี้ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 2.5×10^{-5} M ในการไทเทรต ซึ่งได้เตรียมความเข้มข้นของ

คอปเปอร์ไอออน เท่ากับ 0.005 M ในตัวทำละลายอะซีโตนไนไตรท์ โดยใช้ Supporting electrolyte เหมือนกับการทดลองในหัวข้อ 2 ในการบันทึกกราฟของยูวี-วิชิเบิล จะบันทึกความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 nm ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะใช้สารละลายของคอปเปอร์เติมลงไปสารละลายเซ็นเซอร์ ที่ความเข้มข้น 2.5×10^{-5} M โดยใช้คิวเวตต์ขนาดเซลล์เท่ากับ 1 cm จากนั้นจะเริ่มบันทึกกราฟของยูวี-วิชิเบิลหลังจากเติมคอปเปอร์ไอออนลงไป 2 นาที ในการหาค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ($\log \beta$) ได้ใช้โปรแกรม Spectfit 32

ผลการวิจัย

1. การออกแบบเซ็นเซอร์ **F-mBOH**

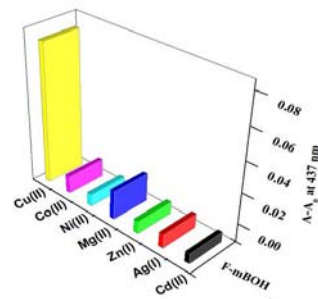
ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโมเลกุล **F-mBOH** เพื่อนำมาใช้เป็นเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดคอปเปอร์และไซยาไนด์ไอออน โดยขั้นตอนการสังเคราะห์สามารถสังเคราะห์ได้จากการนำฟลูออเรสซินไฮดราไซด์ มาทำปฏิกิริยากับไฮดราซีน [12] จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก [13] โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ได้สารผลิตภัณฑ์ **F-mBOH** เป็นของแข็งสีเหลืองอ่อน ซึ่ง ^{13}C -NMR Spectroscopy ของ **F-mBOH** ปรากฏสัญญาณที่ตำแหน่ง 64.623 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงคาร์บอนของวงสปิโรแลคแทม (spirrolactam) ของ **F-mBOH**



ภาพที่ 1 โมเลกุล **F-mBOH**

2. การศึกษาสมบัติการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเซ็นเซอร์ **F-mBOH** กับแคตไอออนโดยเทคนิคยูวี-วิชิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี

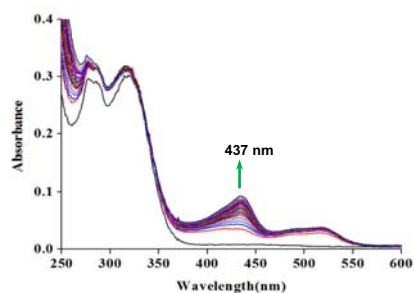
ในขั้นตอนแรกได้นำโมเลกุล **F-mBOH** ไปศึกษาความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแคตไอออนชนิดต่างๆ คือ Cu^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Ag^+ , Mg^{2+} โดยใช้เทคนิคยูวี-วิชิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 2 พบว่า กราฟมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเติมคอปเปอร์ลงไปเซ็นเซอร์ **F-mBOH** โดยกราฟของยูวี-วิชิเบิลที่ตำแหน่งการดูดกลืนแสงความยาวคลื่นที่ 437 nm จะมีการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น แสดงว่าคอปเปอร์ไอออนช่วยเหนี่ยวนำให้เซ็นเซอร์เปลี่ยนจากรูปปิดวงเป็นเปิดวง ซึ่งเป็นการยืนยันอย่างชัดเจนว่าเซ็นเซอร์ **F-mBOH** มีความจำเพาะเจาะจงกับคอปเปอร์เท่านั้น และได้มีการศึกษาหาค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง **F-mBOH** กับคอปเปอร์โดยใช้เทคนิคยูวี-วิชิเบิลไทเทรชัน



ภาพที่ 2 การดูดกลืนแสงของ **F-mBOH** ($3 \times 10^{-5} \text{M}$) กับแคตไอออนชนิดต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 437 nm ในอะซีโตไนไตร์

3. การศึกษาสมบัติการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเซ็นเซอร์ **F-mBOH** กับคอปเปอร์ไอออนโดยเทคนิคยูวี-วิชิเบิลไทเทรชันและหาค่าคงที่การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเซ็นเซอร์กับคอปเปอร์ไอออน

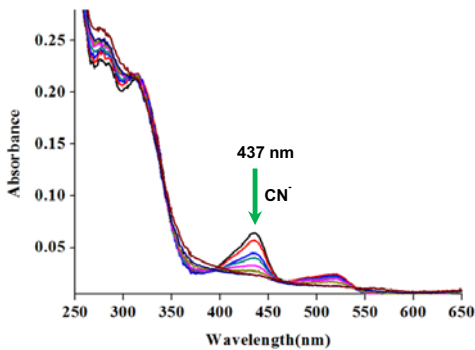
ในการไทเทรตระหว่าง **F-mBOH** กับคอปเปอร์ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่าสเปกตรัมที่ตำแหน่ง 437 nm มีการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นแสดงว่า **F-mBOH** อยู่ในรูปเปิดวง



ภาพที่ 3 การไทเทรตระหว่าง **F-mBOH** กับคอปเปอร์ ในอะซีโตไนไตร์

จากข้อมูลที่บันทึกได้จากกราฟ ภาพที่ 3 สามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้โดยใช้โปรแกรม Spectfit 32 ซึ่งค่าคงที่ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ($\log \beta$) ระหว่าง **F-mBOH** และ คอปเปอร์เท่ากับ 7.36 และคำนวณหาอัตราส่วนในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง **F-mBOH** และคอปเปอร์ได้เท่ากับ 2 ต่อ 1

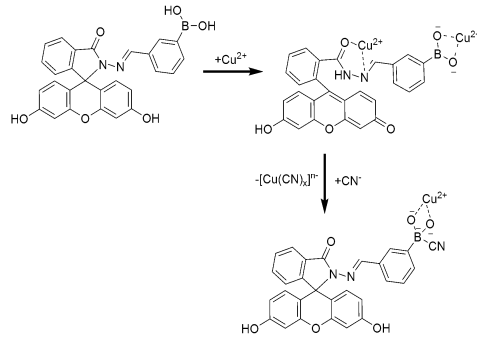
เนื่องจากมีหมู่โบโรนิก ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับไซยาไนด์ไอออนได้ จึงได้มีการทดลองเติมไซยาไนด์ไอออนลงในสารละลายพบว่า สเปกตรัมที่ตำแหน่ง 437 nm มีการดูดกลืนแสงค่อยๆ ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การเติมไซยาไนด์ไอออนเข้าไปในสารละลายที่มีคอปเปอร์อยู่ในสารละลายของ **F-mBOH** (2.5×10^{-5} M)

แสดงว่าไซยาไนด์ไอออนสามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับคอปเปอร์ไอออนและคาดว่าไซยาไนด์ไอออนสามารถเข้าไปอยู่ในตำแหน่ง

ที่ว่างของกรดโบโรนิกได้อีกด้วย ซึ่งได้แสดงกลไกในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง **F-mBOH** กับคอปเปอร์และไซยาไนด์ไอออนดังแสดงในภาพที่ 5

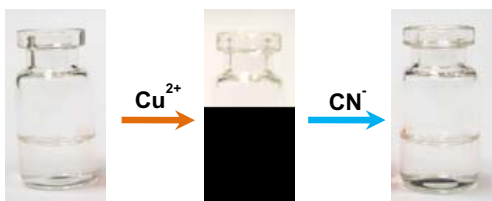


ภาพที่ 5 กลไกในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง **F-mBOH** เมื่อเติมคอปเปอร์และไซยาไนด์ไอออน

เริ่มต้นคอปเปอร์ไอออนสามารถจับกับ **F-mBOH** ได้สองตำแหน่งคือ คอปเปอร์สามารถช่วยเหนี่ยวนำให้วงสไปโรแลคแทม (spirolactam) ของ **F-mBOH** เปิดวงออกได้ ทำให้สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสีได้ โดยจะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีเหลือง และอีกตำแหน่งหนึ่ง คือ คอปเปอร์ไอออนสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ตำแหน่งกรดโบโรนิก และเมื่อเติมไซยาไนด์ไอออนเข้าไปในสารละลายไซยาไนด์จะดึงคอปเปอร์ไอออนออกมาแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของคอปเปอร์ไซยาไนด์

จากกลไกที่เกิดขึ้นคาดว่าไซยาไนด์ไอออนสามารถเกิดปฏิกิริยากับคอปเปอร์ไอออนได้ที่ตำแหน่งสไปโรแลคแทม และทำให้วงสไปโรแลคแทมของ **F-mBOH** เปลี่ยนจากเปิดวงกลับไปเป็นแบบปิดวง ทำให้สีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองกลายเป็นใสไม่มีสี และสาเหตุที่ไซยาไนด์ไม่ดึงคอปเปอร์ที่ตำแหน่งกรดโบโรนิกออกไปได้นั้น อาจจะเป็นเนื่องจากความแข็งแรงของพันธะที่ตำแหน่งนี้แข็งแรงกว่าบริเวณวงสไปโรแลคแทม ทั้งนี้กรดโบโรนิกยังมีที่ว่างอีกหนึ่งตำแหน่งที่ไซยาไนด์สามารถเข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 5

นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีได้ด้วยตาเปล่า เมื่อเติมคอปเปอร์ไอออนลงไป จะมีการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายจากไม่มีสีเป็นสีเหลือง และเมื่อเติมไซยาไนด์ลงไปจะทำให้สีของสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสีเหมือนเดิม ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงสีของ **F-mBOH** (2.5×10^{-5} M) เมื่อเติมคอปเปอร์และไซยาไนด์ไอออน

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้นำเซ็นเซอร์ **F-mBOH** ที่สังเคราะห์ได้ มาศึกษาความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแคตไอออนชนิดต่างๆ คือ Cu^{2+} Cd^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Zn^{2+} Ag^+ และ Mg^{2+} โดยได้ศึกษาในแบบแคตไอออนปริมาณมากเกินพอ ในอะซิโตนไนไตร (CH₃CN) โดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมตรี พบว่าเซ็นเซอร์มีความจำเพาะเจาะจงกับคอปเปอร์ไอออนมากที่สุด และจากเทคนิคยูวี-วิสิเบิล ไทเทรชัน จึงสามารถหาความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเซ็นเซอร์ **F-mBOH** กับคอปเปอร์ไอออนได้ค่าคงที่ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ($\log \beta$) เท่ากับ 7.36 นอกจากนี้เซ็นเซอร์ **F-mBOH** ยังสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีได้ด้วยตาเปล่าเมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับคอปเปอร์ไอออนภายในเวลา 10 นาที โดยเปลี่ยนจากสารละลายใสไม่มีสีเป็นสีเหลือง และมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสารละลายไม่มีสีเมื่อเติมไซยาไนด์ไอออน ดังนั้นสามารถใช้เซ็นเซอร์ **F-mBOH** เป็นตัวตรวจจับคอปเปอร์และไซยาไนด์ไอออนได้ทั้งเทคนิคยูวี-วิสิเบิลและการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการโครงการพัฒนา
อัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
สำหรับเด็กและเยาวชน (JSTP) ที่ให้ทุน
สนับสนุนในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเคมีซูพรา
(Supramolecular Chemistry Research Unit)
ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้
เอื้อเฟื้อเครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่จำเป็น
ต่างๆที่ทำให้การวิจัยสำเร็จและเป็นไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] K.M. Swamy; et al. (2008). Boronic Acid-Linked Fluorescent and Colorimetric Probes for Copper Ions. *Chemical Communication*. 5915-5917.
- [2] X. Lou; et al. (2009). A New Rhodamine-Based Colorimetric Cyanide Chemosensor: Convenient Detecting Procedure and High Sensitivity and Selectivity. *ACS Applied Material & Interfaces*. 1: 2529-2535.
- [3] T. Gunnlaugsson; J.P. Leonard; & N.S. Murray. (2004). Highly Selective Colorimetric Naked-Eye Cu(II) Detection Using an Azobenzene Chemosensor. *Organic Letter*. 6: 1557-1560.
- [4] R. Sheng; et al. (2008). A New Colorimetric Chemosensor for Hg²⁺ Based on Coumarinazine Derivative. *Sensor and Actuator B*. 128: 507-511.
- [5] J.Y. Kwon; et al. (2005). A Highly Selective Fluorescent Chemosensor for Pb²⁺. *Journal of American Chemical Society*. 127: 10107-10111.
- [6] J.S. Wu; et al. (2007). Rhodamine-Based Hg²⁺-Selective Chemodosimeter in Aqueous Solution: Fluorescent Off-On. *Organic Letter*. 9: 907-910.
- [7] Y.K. Yang; K.J. Yook; & J. Tae. (2005). A Rhodamine-Based Fluorescent and Colorimetric Chemodosimeter for the Rapid Detection of Hg²⁺ Ions In Aqueous Media. *Journal of American Chemical Society*. 127: 16760-16761.
- [8] Y. Xiang; et al. (2006). New Fluorescent Rhodamine Hydrazone Chemosensor for Cu(II) With High Selectivity and Sensitivity. *Organic Letter*. 8: 2863-2866.
- [9] M. Zhang; et al. (2007). A Selective Turn-On Fluorescent Sensor for Fe(III) and Application to Bioimaging. *Tetrahedron Letter*. 48: 3709-3712.

- [10] J. Zhao; et al. (2004). An Enantioselective Fluorescent Sensor for Sugar Acids. *Journal of American Chemical Society*. 126: 16179–16186.
- [11] M. Jamkratoke; et al. (2009). A-D-A Sensors Based on Naphthoimidazoledione and Boronic Acid as Turn-On Cyanide Probes in Water. *Journal of Organic Chemistry*. 74: 3919–3922.
- [12] X. Chen; & H. Ma. (2006). A Selective Fluorescence-on reaction of spiro form fluorescein hydrazide with Cu(II). *Analytica Chimica Acta*. 575: 217–222.
- [13] L.M. Hyman; et al. (2010). Toward the Development of Prochelators As Fluorescent Probes of Copper-Mediated Oxidative Stress. *Dalton Transaction*. 39: 568–576.