

เคมีโคมิเตอร์ชนิดใหม่สำหรับการตรวจวัดไซยาไนด์ไอออน

Novel Chemodosimeter for the Detection of Cyanide Ion

มนูญ พิชิ¹, สรายุทธ เวชสิทธิ์², ธวัชชัย ต้นทุลานี² และ จอมใจ สุกใส^{1*}

Manoon Phichi¹, Sarayut Watchasit², Thawatchai Tuntulani² and Chomchai Suksai^{1*}

¹ ภาควิชาเคมี และศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

² ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ได้ศึกษาการนำแอนเซนเบิลที่เตรียมได้จากสารประกอบโคออร์ดิเนชันชนิดไดนิวเคลียร์ของคอปเปอร์ (II) กับลิแกนด์ที่เป็นอนุพันธ์ของแอนทราซีน (Cu_2L) และอินดิเคเตอร์ไพโรแกลลอล เรด (PGR) มาใช้เป็นตัวตรวจวัดไซยาไนด์ไอออนและใช้สารละลายบัฟเฟอร์ 80/20 (%v/v) CH_3CN/H_2O ใน 10 mM HEPES ที่ pH 7.4 เป็นตัวทำละลาย จากการศึกษาค้นพบว่าแอนเซนเบิลดังกล่าวมีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัด CN^- ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีเพียง CN^- เท่านั้นที่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาการเติมด้วยนิวคลีโอไฟล์กับ PGR ในโครงสร้างของแอนเซนเบิลได้ โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของสารละลายสีน้ำเงินของแอนเซนเบิลไปเป็นไม่มีสี

คำสำคัญ : เคมีโคมิเตอร์ / ไซยาไนด์ / ไพโรแกลลอล เรด / คอปเปอร์ (II) ไอออน

Abstract

Formation of the ensemble between the anthracene base dinuclear Cu (II) complexes (Cu_2L) with pyrogallol red (PGR) were studied, with the aim to exploit the determination of cyanide (CN^-). The experiments were carried out in an aqueous solution of 80/20 (%v/v) CH_3CN/H_2O in the presence of 10 mM HEPES buffer pH 7.4. It was found this ensemble could sense CN^- selectively by changing the blue color of ensemble to colorless. The sensing process is based on the nucleophilic addition of CN^- to bounded PGR in the ensemble structure.

Keywords : Chemodosimeter, Cyanide, Pyrogallol Red, Copper(II) ion

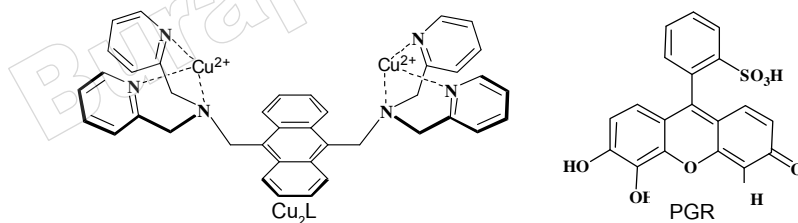
*Corresponding author. E-mail: jomjai@buu.ac.th

1. บทนำ

ไซยาไนด์ไอออน (CN⁻) จัดเป็นไอออนชนิดหนึ่งที่มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ต่างๆ ในร่างกาย ทำให้ระบบการหายใจระดับเซลล์ล้มเหลวและถึงแก่ความตายได้ ไซยาไนด์สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางการหายใจ ทางการกิน และซึมผ่านผิวหนัง (นพ.ธีระศิษฏ์ เฉินบำรุง, 2012) ในปัจจุบันไซยาไนด์ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมพลาสติก ยาง การฟอกหนัง โลหะ การถ่ายภาพ การสกัดทองคำและเงิน และใช้ในสารกำจัดวัชพืชและศัตรูพืช เป็นต้น (Bhattacharya, R., and Flora, S.J.S., 2009) นอกจากนี้ยังอาจพบไซยาไนด์ได้ในธรรมชาติ ในพืช แบบที่เรียกราก และสาหร่ายบางชนิด ที่พบบ่อยคือในหัวและใบของมันสำปะหลัง (cassava) (นพ.ธีระศิษฏ์ เฉินบำรุง, 2012) โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) ได้กำหนดความเข้มข้นไซยาไนด์ที่พบได้ในน้ำดื่มต้องมีค่าไม่เกิน 1.9 µM (Guidelines for Drinking-Water Quality, 1996) และปริมาณไซยาไนด์ในระบบน้ำสาธารณะต้องมีค่าไม่เกิน 0.2 mg/L (Toxicological profile for cyanide, 2006)

วิธีการที่นิยมนำมาใช้ในการตรวจวัดไซยาไนด์ไอออนนั้นได้แก่เทคนิค flow-injection (Ipatov, A., Ivanov, M., Makarychev-Mikhailov, S., Kolodnikov, V., Legin, A., and Vlasov, Y., 2002; Sulistyarti, H., Cardwell, T.J., and Kolev, S.D., 1997) แก๊สโครมาโทกราฟี (Liu, G. et al., 2009; Logue, B.A., Kirschten, N.P., Petrikovics, I., Moser, M.A., Rockwood, G.A., and Baskin, S.I., 2005) และเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (Fuente, J.M.G.L. et al., 2000) ซึ่งเทคนิคเหล่านี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่ยุ่งยากและมีราคาแพง ดังนั้นการตรวจวัดไซยาไนด์โดยใช้เทคนิคเซลล์อิเล็กโทรเคมีเช่นเซนเซอร์จึงเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถติดตามผลได้ด้วยตาเปล่า รวมทั้งเทคนิคการวิเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยาก นอกจากนี้แล้วจากการที่ไซยาไนด์มีสมบัติเป็นนิวคลีโอไฟล์ที่ดีจึงได้มีการพัฒนาเซนเซอร์ทางเคมีสำหรับใช้ในการตรวจวัดไซยาไนด์ไอออน โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาการเติมนิวคลีโอไฟล์ (nucleophilic addition) ของไซยาไนด์กับโมเลกุลของเซนเซอร์และทำให้สมบัติเชิงแสงของเซนเซอร์เปลี่ยนแปลงไป (Abalos, T. et al., 2009; Kaur, P., Sareen, D., Kaur, S., and Singh, K., 2009; Lee, H., and Kim, H.J., 2012; Yang, Y., and Tae, J., 2006; Zhou, X., Lv, X., Hao, J., Liu, D., and Guo, W., 2012) ซึ่งการตรวจวัดด้วยวิธีดังกล่าวนี้มีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดไซยาไนด์เป็นอย่างดี เนื่องจากแอนไอออนชนิดอื่นๆ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการเติมนิวคลีโอไฟล์กับโมเลกุลของเซนเซอร์ได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเสนอวิธีการตรวจวัดไซยาไนด์ โดยใช้เอนไซม์เบิลที่เตรียมได้จากสารประกอบโคออร์ดิเนชันชนิดไดนิวเคลียร์ของคอปเปอร์ (II) กับลิแกนด์ที่เป็นอนุพันธ์ของแอนทราซีน (Cu₂L) เป็นโมเลกุลรีเซปเตอร์และใช้อินดิเคเตอร์ไพโรกาลลอล เรด (pyrogallol red หรือ PGR) เป็นหน่วยให้สัญญาณในการตรวจวัดมาตรฐาน โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาการเติมนิวคลีโอไฟล์ของไซยาไนด์กับอินดิเคเตอร์ PGR ในโครงสร้างของเอนไซม์เบิลโดยมีสารประกอบ Cu₂L เป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดกลไกดังกล่าว โครงสร้างของสารประกอบ Cu₂L และอินดิเคเตอร์ PGR แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของสารประกอบ Cu₂L และ อินดิเคเตอร์ PGR

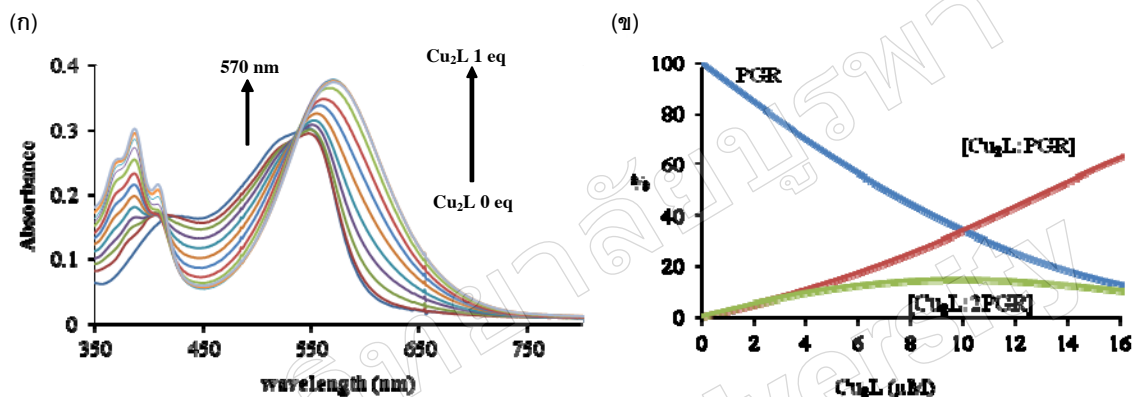
2. วิธีการทดลอง

การทำยวี่-วิธีเบิลไทเทรชันทำในสารละลาย 80/20 (%v/v) CH₃CN/H₂O ใน 10 mM HEPES บัฟเฟอร์ ที่ pH 7.4 การหาค่าคงที่ความเสถียร (log β) ของการเกิดเอนไซม์เบิล [Cu₂L+PGR] และค่าคงที่ความเสถียรของสารประกอบเอนไซม์เบิล [Cu₂L+PGR] กับ CN⁻ คำนวณโดยใช้โปรแกรม SPECFIT (Spectrum Software Associates., 2004)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

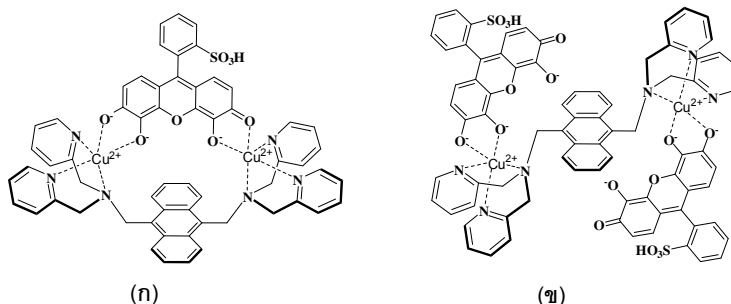
3.1 การหาค่าคงที่ความเสถียรของการเกิดเอนไซม์ระหว่าง Cu_2L กับ PGR ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลไทเทรชัน

ทำได้โดยการไทเทรตสารละลาย PGR ความเข้มข้น 20 μM ด้วยสารละลายของสารประกอบ Cu_2L ความเข้มข้น 400 μM หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทำไทเทรชันไปคำนวณหาค่าคงที่ความเสถียรของการเกิดเอนไซม์ ($\log \beta$) จากการทดลองพบว่าสารละลายของอินดิเคเตอร์ PGR มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 547 nm เมื่อค่อยๆ ทำการไทเทรตสารละลาย Cu_2L ลงไปยังสารละลายดังกล่าว พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายผสมดังกล่าวจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มากขึ้น (bathochromic shift) และเมื่อทำการไทเทรตต่อไปจนถึง 1 equivalent ค่าการดูดกลืนแสงจะคงที่ โดยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 570 nm ดังแสดงในภาพที่ 2(ก) นอกจากนี้ยังพบว่าสีของสารละลาย PGR จะค่อยๆ เปลี่ยนจากสีแดงของอินดิเคเตอร์ PGR ในรูปอิสระไปเป็นสีน้ำเงินของสารละลายเอนไซม์ จึงเป็นการยืนยันได้ว่า PGR สามารถเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์กับอะตอมของคอปเปอร์ (II) ทั้งสองอะตอมในสารประกอบ Cu_2L



ภาพที่ 2 (ก) ยูวี-วิสิเบิลไทเทรชันของการไทเทรตสารละลายของ PGR (20 μM) ด้วยสารประกอบ Cu_2L (400 μM) ในสารละลายบัฟเฟอร์ 80/20 (%v/v) CH_3CN/H_2O ใน 10 mM HEPES ที่ pH 7.4 (ข) กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ของสารประกอบ Cu_2L และอินดิเคเตอร์ PGR

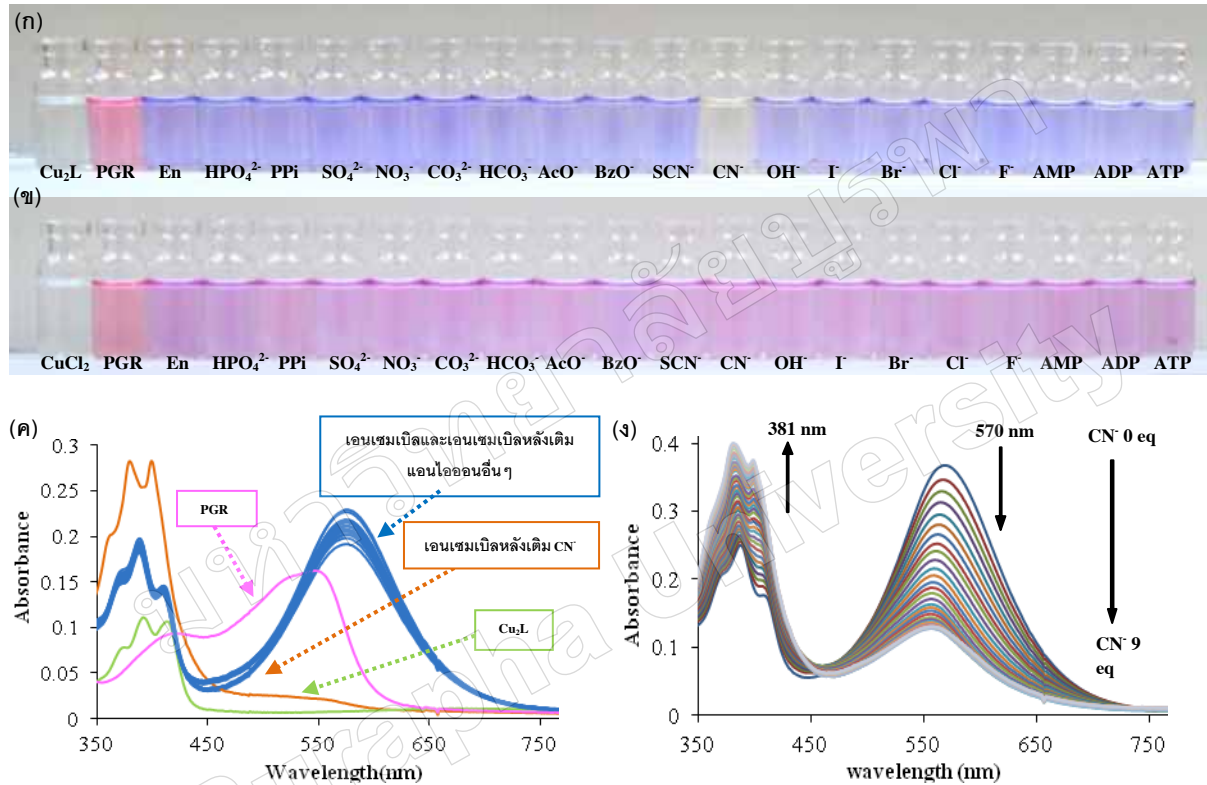
จากการคำนวณค่า $\log \beta$ ของการเกิดเอนไซม์พบว่ามีค่า $\log \beta_1 = 6.55 \pm 0.20$ และ $\log \beta_2 = 11.36 \pm 0.50$ ซึ่งตรงกับสปีชีส์ของเอนไซม์ $[Cu_2L \cdot PGR]$ และ $[Cu_2L \cdot 2PGR]$ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกของการไทเทรตนั้นจะเกิดเอนไซม์ที่มีอัตราส่วนของ $Cu_2L:PGR$ คือ 1:2 เพราะเมื่อเริ่มต้นการไทเทรตนั้นความเข้มข้นของ PGR มีมากเกินไปและเมื่อทำการไทเทรตเพิ่มความเข้มข้นของ Cu_2L ให้มากขึ้นจะพบว่าความเข้มข้นของเอนไซม์ $[Cu_2L \cdot 2PGR]$ มีค่าน้อยลงโดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะเห็นได้ว่ามีสปีชีส์ที่มีอัตราส่วนของ $Cu_2L:PGR$ คือ 1:1 $[Cu_2L \cdot PGR]$ อยู่ประมาณ 70% ดังแสดงในภาพที่ 2 (ข) โครงสร้างที่เป็นไปได้ของเอนไซม์ $[Cu_2L \cdot PGR]$ และ $[Cu_2L \cdot 2PGR]$ แสดงได้ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างที่เป็นไปได้ของเอนไซม์ (ก) $[Cu_2L \cdot PGR]$ และ (ข) $[Cu_2L \cdot 2PGR]$

3.2 การศึกษาความจำเพาะเจาะจงในการเลือกจับกับแอนไอออนชนิดต่างๆ ของเอนไซม์เบิล

จากการศึกษาความจำเพาะเจาะจงในการเลือกจับกับแอนไอออนชนิดต่างๆ ของเอนไซม์เบิล $[Cu_2L \cdot PGR]$ ดังแสดงในภาพที่ 4(ก) พบว่ามีเพียง CN^- ไอออนเท่านั้นที่ทำให้สีน้ำเงินของสารละลายเอนไซม์เบิลเปลี่ยนเป็นสารละลายใสไม่มีสี ในขณะที่แอนไอออนชนิดอื่นๆ ไม่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายเอนไซม์เบิลระหว่างอินดิเคเตอร์ PGR และสารประกอบ Cu_2L ในขณะที่มีแอนไอออนชนิดต่างๆ อยู่ในระบบ จากภาพที่ 4(ค) จะเห็นได้ว่าเมื่อมี CN^- อยู่ในระบบ จะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 570 nm มีค่าลดลงในขณะที่แอนไอออนชนิดอื่นๆ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าระบบของเอนไซม์เบิลที่เตรียมขึ้นมานี้มีความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัด CN^- เป็นอย่างยิ่ง

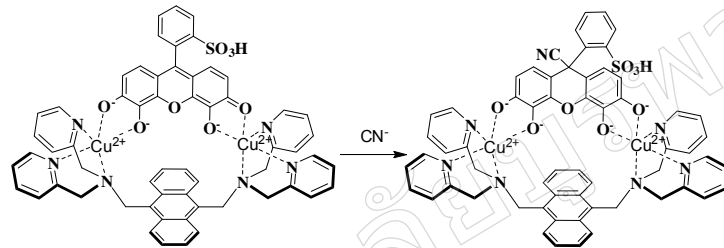


ภาพที่ 4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของ (ก) สารละลายเอนไซม์เบิล $[Cu_2L \cdot PGR]$ เมื่อมีแอนไอออนชนิดต่างๆ อยู่ในระบบ (ข) สารละลายผสมระหว่างอินดิเคเตอร์ PGR และ $CuCl_2$ เมื่อมีแอนไอออนชนิดต่างๆ อยู่ในระบบ (ค) ยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัมของสารละลายเอนไซม์เบิล $[Cu_2L \cdot PGR]$ (20 μM) ในสภาวะที่มีแอนไอออนชนิดต่างๆ 7.5 equivalent อยู่ในระบบ และ (ง) ยูวี-วิสิเบิลไทเทรชันของการไทเทรตสารละลายเอนไซม์เบิล $[Cu_2L \cdot PGR]$ (20 μM) ด้วย CN^- (1 mM)

3.3 การหาค่าคงที่ความเสถียรระหว่างเอนไซม์เบิล $[Cu_2L \cdot PGR]$ และ CN^- ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลไทเทรชัน

เมื่อทำการไทเทรตสารละลาย CN^- ความเข้มข้น 1 mM ลงในสารละลายเอนไซม์เบิล $[Cu_2L \cdot PGR]$ ความเข้มข้น 20 μM พบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 570 nm ของสารละลายเอนไซม์เบิลมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 381 nm จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4(ง) และสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินของเอนไซม์เบิลไปเป็นไม่มีสี แสดงให้เห็นว่า CN^- ไม่ได้เข้าไปเกิดปฏิกิริยาการแทนที่กับอินดิเคเตอร์ PGR ที่อยู่ในโครงสร้างของเอนไซม์เบิลแต่อย่างใด และยังพบว่าเมื่อเติม CN^- ลงในสารละลายอินดิเคเตอร์ PGR ในรูปอิสระ นั้นไม่ทำให้สีของสารละลายจางหายไป แสดงว่าการเปลี่ยนสีของสารละลายนั้นเกิดจากการที่ CN^- เข้าไปทำปฏิกิริยาโดยตรงกับอินดิเคเตอร์ PGR ที่เกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์กับอะตอมของคอปเปอร์ (II) ในสารประกอบ Cu_2L

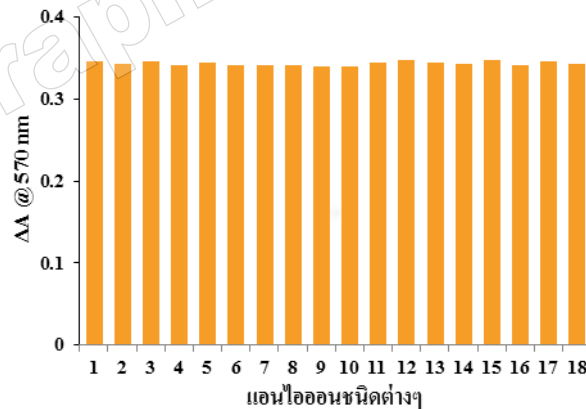
จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วจึงคาดว่า การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเอนไซม์เกิดจากการที่ CN^- เข้าไปทำปฏิกิริยาการเติมด้วยนิวคลีโอไฟล์กับอินดิเคเตอร์ PGR ในโครงสร้างของเอนไซม์ ส่งผลให้โครงสร้างของอินดิเคเตอร์ PGR สูญเสียระบบคอนจูเกตทำให้สีของเอนไซม์ซีดจางลง ดังแสดงในภาพที่ 5 เมื่อนำผลการทดลองที่ได้จากการทำยูวี-วิสิเบิลไทเทรชันไปคำนวณหาค่า $\log \beta$ ของการเกิดปฏิกิริยาการเติมด้วยนิวคลีโอไฟล์ของ CN^- กับเอนไซม์ $[\text{Cu}_2\text{L}\cdot\text{PGR}]$ พบว่ามีค่าเท่ากับ 6.27 ± 0.12 ซึ่งตรงกับสปีซีของเอนไซม์-เอนไซม์ $[\text{Cu}_2\text{L}\cdot\text{PGR}\cdot\text{CN}]$ การที่ CN^- สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยา nucleophilic addition กับอินดิเคเตอร์ PGR ได้นั้นเนื่องจากเมื่อ PGR เกิดพันธะโคออร์ดิเนตโควาเลนต์กับสารประกอบ Cu_2L แล้วจะส่งผลให้โมเลกุลของ PGR มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยลงหรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีสมบัติของความเป็นอิเล็กโตรไฟล์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น CN^- ซึ่งเป็นนิวคลีโอไฟล์ที่ดีจึงสามารถเข้าไปเกิดปฏิกิริยาการเติมได้ จากการศึกษเพิ่มเติมพบว่าเมื่อเติม CN^- ลงไปยังสารละลายผสมระหว่าง CuCl_2 กับอินดิเคเตอร์ PGR พบว่า CN^- ไอออนที่เติมลงไปไม่ได้ทำให้สีของสารละลายจางลงดังแสดงในภาพที่ 4(ข) แสดงว่าโครงสร้างของลิแกนด์ในสารประกอบ Cu_2L มีผลต่อความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดไซยาไนด์ไอออน



ภาพที่ 5 การเกิดปฏิกิริยาการเติมด้วยนิวคลีโอไฟล์ของไซยาไนด์กับ PGR ในเอนไซม์

3.4 การศึกษาการรบกวนของแอนไอออนชนิดต่างๆ ต่อการตรวจวัดไซยาไนด์ไอออนด้วยเอนไซม์ $[\text{Cu}_2\text{L}\cdot\text{PGR}]$

จากการศึกษาผลของแอนไอออนชนิดอื่นๆ ที่มีผลต่อการตรวจวัดไซยาไนด์ไอออนโดยใช้เอนไซม์ $[\text{Cu}_2\text{L}\cdot\text{PGR}]$ ดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่าไม่มีแอนไอออนชนิดใดที่ส่งผลรบกวนต่อการตรวจวัดไซยาไนด์ไอออนเนื่องจากไม่ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของเอนไซม์ที่ความยาวคลื่น 570 nm ลดลงแต่อย่างใดแสดงว่าระบบของเอนไซม์ $[\text{Cu}_2\text{L}\cdot\text{PGR}]$ มีความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัดไซยาไนด์ไอออนได้เป็นอย่างดี และยังสามารถนำเอนไซม์ดังกล่าวไปใช้ในการตรวจวัดไซยาไนด์ไอออนที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0 – 65 μM ได้โดยมีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 1.07 μM ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่องค์การอนามัยโลกกำหนด



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของ $[\text{Cu}_2\text{L}\cdot\text{PGR}] + \text{CN}^-$ (2.5 eq.) หลังเติมแอนไอออนชนิดอื่นๆ ได้แก่ (1) buffer; (2) HPO_4^{2-} ; (3) PPI; (4) SO_4^{2-} ; (5) NO_3^- ; (6) CO_3^{2-} ; (7) HCO_3^- ; (8) AcO^- ; (9) BzO^- ; (10) SCN^- ; (11) OH^- ; (12) I^- ; (13) Br^- ; (14) Cl^- ; (15) F^- ; (16) AMP; (17) ADP; (18) ATP จำนวน 2.5 eq.

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาความเป็นไปได้ของการตรวจวัดไซยาไนด์ไอออนโดยเอนไซม์ที่เกิดจากสารประกอบโคออร์ดิเนชันชนิดไดนิวเคลียร์ของคอปเปอร์ (II) Cu_2L กับอินดิเคเตอร์ PGR นั้นพบว่าเอนไซม์ดังกล่าวสามารถตรวจวัด CN^- ได้อย่างจำเพาะเจาะจง

เนื่องจากสารประกอบ Cu_2L จะเหนี่ยวนำให้อินดิเคเตอร์ PGR มีความเป็นอิเล็กโทรไฟล์มากขึ้น ส่งผลให้ CN^- สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาการเติมด้วยนิวคลีโอไฟล์กับ PGR ในโครงสร้างของเอมเซมเบิล ได้ส่งผลให้ระบบคอนจูเกตภายในโครงสร้างของอินดิเคเตอร์ PGR ถูกทำลาย เป็นสาเหตุให้สีสารละลายจางลง และยังพบว่าแอนไอออนอื่นๆ ไม่ส่งผลรบกวนต่อการตรวจวัด CN^- ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเอมเซมเบิลที่เกิดจากสารประกอบโคออร์ดิเนชันชนิดไดนิวเคลียร์ของคอปเปอร์ (II) Cu_2L กับอินดิเคเตอร์ PGR สามารถใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัด CN^- ได้ดี โดยให้ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดมีค่าเท่ากับ $1.07 \mu\text{M}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลก (WHO) กำหนดให้พบได้ในน้ำดื่ม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ทุนเมธีวิจัย สกว (RSA5580031) และทุนเมธีวิจัยอาวุโส สกว (RTA5380003) ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- นพ.ธีระศิษฐ์ เชนบำรุง, Cyanide. (2012) เข้าถึงวันที่ 26 ธันวาคม 2556, จาก http://www.summacheeva.org/index_thaitox_cyanide.htm
- Abalos, T., Royo, S., Martinez-Manez, R., Sancenon, F., Soto, J., Costero, A.M., et al. (2009). Surfactant-assisted chromogenic sensing of cyanide in water. *New Journal of Chemistry*, 33, 1641-1645.
- Bhattacharya, R., and Flora, S.J.S. (2009). Cyanide toxicity and its treatment. *Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents*, 2009, 255-270.
- Fuente, J.M.G.L., Martinez, E.F., Pérez, J.A.V., Fernández, S.F., Ordieres, A.J.M., Uria, J.E.S., et al. (2000). Differential-pulse voltammetric determination of low mg l^{-1} cyanide levels using EDTA, Cu(II) and a hanging mercury drop electrode. *Analytica Chimica Acta*, 410, 135-142.
- Guidelines for Drinking-Water Quality (1996). World Health Organization: Geneva.
- Ipatov, A., Ivanov, M., Makarychev-Mikhailov, S., Kolodnikov, V., Legin, A., and Vlasov, Y. (2002). Determination of cyanide using flow-injection multisensory system, *Talanta*, 58, 1071-1076.
- Kaur, P., Sareen, D., Kaur, S., and Singh, K. (2009). An efficacious "naked-eye" selective sensing of cyanide from aqueous solutions using a triarylmethane leuconitrile. *Inorganic Chemistry Communications*, 12, 272-275.
- Lee, H., and Kim, H.J. (2012). Highly selective sensing of cyanide by a benzochromene-based ratiometric fluorescence probe. *Tetrahedron Letters*, 53, 5455-5457.
- Liu, G., Liu, J., Hara, K., Wang, Y., Yu, Y., Gao, L., et al. (2009). Rapid determination of cyanide in human plasma and urine by gas chromatography-mass spectrometry with two-step derivatization. *Journal of Chromatography B*, 877, 3054-3058.
- Logue, B.A., Kirschten, N.P., Petrikovics, I., Moser, M.A., Rockwood, G.A., and Baskin, S.I. (2005). Determination of the cyanide metabolite 2-aminothiazoline-4-carboxylic acid in urine and plasma by gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography B*, 819, 237-244.
- SPECFIT/32, Spectrum Software Associates. (2004). 197 M Boston Post Road West, Marlborough, MA, 01752 USA.
- Sulistiyarti, H., Cardwell, T.J., and Kolev, S.D. (1997). Determination of cyanide as tetracyanonickelate(II) by flow injection and spectrophotometric detection. *Analytica Chimica Acta*, 357, 103-109.
- Toxicological profile for cyanide (2006): U.S. Department of Health and Human Services Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- Yang, Y., and Tae, J. (2006). Acridinium Salt Based Fluorescent and Colorimetric Chemosensor for the Detection of Cyanide in Water. *Organic Letters*, 8(25), 5721-5723.
- Zhou, X., Lv, X., Hao, J., Liu, D., and Guo, W. (2012). Coumarin-indanedione conjugate as a doubly activated Michael addition type probe for the colorimetric and ratiometric fluorescent detection of cyanide. *Dyes and Pigments*, 95, 168-173.