

การวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนปริมาณต่ำที่รวดเร็วในตัวอย่าง ที่เป็นของเหลวโดยใช้สารเทียบสีที่มีความจำเพาะ

นุจรินทร์ วะสุกัน² รวิวรรณ มณีรัตนโชติ² มะยุไซะ ภูโน¹ และ สุจิตรา ศรีสังข์^{1*}

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคนิคการเทียบสี (colorimetric sensors) ที่มีความง่าย รวดเร็ว และมีความไวสูงเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางสำหรับการตรวจวิเคราะห์โลหะไอออนในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ อย่างไรก็ตามอนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs) มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นในผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค เนื่องจากผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ดังนั้นความเสี่ยงของการได้รับพิษของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่เกิดจากการปลดปล่อยลงสู่สภาวะแวดล้อมทางน้ำเป็นสิ่งกังวลที่สำคัญ ไดโทโซนลิแกนด์เป็นสารประกอบคีเลต (chelating reagents) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียร ดังนั้นในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ไดโทโซนเพื่อตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในสารละลายที่เป็นของเหลว รวมทั้งการศึกษาความจำเพาะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเปรียบเทียบกับโลหะไอออนอื่นๆ (Na^+ , K^+ , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Ag^+ , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} และ Pb^{2+}) ที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-5} โมลาร์ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อสารละลายไดโทโซนทำปฏิกิริยากับอนุภาคซิลเวอร์นาโนและโลหะไอออนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเขียวเป็นสีส้ม ในกรณีสารประกอบเชิงซ้อนอนุภาคซิลเวอร์นาโนกับไดโทโซนเท่านั้น โดยมีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 477 นาโนเมตร และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้เท่ากับ 0.071 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นวิธีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในตัวอย่างจริง

คำสำคัญ: อนุภาคซิลเวอร์นาโน ไดโทโซน สารประกอบเชิงซ้อน การเทียบสี ตัวอย่างที่เป็นของเหลว

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

²ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

*ผู้พิมพ์ประสานงาน, e-mail: sujittas@g.swu.ac.th

Rapid, low level determination of silver nanoparticles in liquid media using sensitive colorimetric reagents

Nootcharin Wasukan², Rawiwan Maniratanachote²,
Mayuso Kuno¹ and Sujittra Srisung^{1*}

ABSTRACT

Recently, a simplicity, rapidity, high sensitivity, and selectivity colorimetric sensors are widely investigating for heavy metal ions on the aquatic environment. However, silver nanoparticles (AgNPs) are increasing utilization in consumer products due to its antibacterial effect. Therefore, the potential risk related to their short- and long-term toxicity, that the release of AgNPs in the aquatic environment is of major concern. Dithizone is one of the most considered effective chelating reagents for metal ions with the stable complexes. In this study, the selective colorimetric sensor of dithizone was selected for AgNPs detection in aqueous media. The selectivity towards AgNPs compared with the other metal ions (Na⁺, K⁺, Cu²⁺, Mg²⁺, Ba²⁺, Mn²⁺, Fe³⁺, Co²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Ag⁺, Zn²⁺, Cd²⁺, Hg²⁺ and Pb²⁺) were investigated with the concentration of 1.0 x 10⁻⁵ M metal ions. The results showed that a distinct color change from green to orange was noticed only in the case of AgNPs-dithizone complexes formation, with a maximum wavelength of 477 nm. The detection limit of the present method for AgNPs is 0.071 mg/L. Therefore, a remarkable feature of this method can be applied to the determination of AgNPs in the real samples.

Keywords: Silver nanoparticles (AgNPs), Dithizone, Complex, Colorimetric sensors, Aqueous media

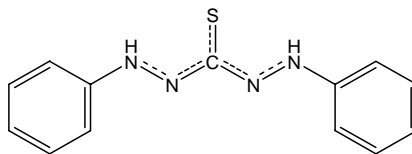
¹Department of Chemistry, Faculty of Science, Srinakharinwirot University

²Natinal Nanotechnology Center, National Science and Technology Development Agency

*Corresponding author, e-mail: sujittras@g.swu.ac.th

บทนำ

ปัจจุบันอนุภาคซิลเวอร์นาโน (Silver nanoparticles) ถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ทั่วโลก อาทิเช่น เครื่องสำอาง สิ่งทอ ผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามจากความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว อนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถปลดปล่อยจากผลิตภัณฑ์ทำให้มนุษย์มีโอกาสได้รับสัมผัสกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน รวมทั้งปลดปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมได้ [1-3] ดังนั้นจึงมีการตระหนักถึงผลกระทบและให้ความสำคัญกับการตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในสิ่งแวดล้อม สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน อาทิเช่น อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) และ อินดักทีฟลี คัพเปิลพลาสมา แมสสเปกโทรเมทรี (ICP-MS) อย่างไรก็ตามเครื่องมือดังกล่าวมีความซับซ้อน ใช้เวลานาน มีค่าใช้จ่ายสูง และต้องใช้ความชำนาญในการตรวจวิเคราะห์ รวมทั้งไม่สามารถพกพาได้ ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้ในการตรวจวิเคราะห์เป็นประจำ ดังนั้นผู้วิจัยสนใจที่จะพัฒนาเครื่องมือที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว เหมาะสมสำหรับการใช้งาน และมีความจำเพาะกับอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยใช้เทคนิค colorimetric sensors เป็นพื้นฐานของสัญญาณการมองเห็นสีที่ตอบสนองอย่างง่าย รวดเร็ว มีความไวสูงต่อการมองเห็นด้วยตาเปล่า รวมทั้งเป็นเทคนิคที่มีความสะดวกในการตรวจวิเคราะห์ และสามารถพกพาได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิค colorimetric sensors มาตรวจวิเคราะห์โลหะหลายชนิดในแหล่งน้ำ เช่น โปรท โครเมียม และนิกเกิล เป็นต้น โดยการสังเคราะห์ที่มีความจำเพาะของลิแกนด์กับโลหะได้ด้วยตาเปล่า [4-6] สำหรับไดไทโซน (dithizone) เป็นสารประเภทคีเลต (chelate) ซึ่งมีความจำเพาะและสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะหนักเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียรภาพ โครงสร้างของไดไทโซน แสดงดังรูปที่ 1 งานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าไดไทโซนถูกนำมาใช้ในการสกัดและแยกโลหะไอออนเป็นจำนวนมาก [7-8] นอกจากนี้ไดไทโซนยังมีความจำเพาะกับโลหะหลายชนิดเช่น ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และ โปรท เป็นต้น [9-11] เนื่องจากไดไทโซนมีหมู่ไทออล (thiol) ที่มีคุณสมบัติเป็นซอฟต์เบส (soft base) และจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างไดไทโซนกับโลหะไอออนเกิดเป็นสารประกอบที่ให้สีอย่างจำเพาะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ [12-13] และยังมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้นำไดไทโซนมาตรวจวิเคราะห์ไซยาไนด์ (CN⁻) ผ่านการใช้ cationic chemosensor ซึ่งวิธีนี้สามารถวิเคราะห์โคบอลต์ (Co²⁺) ในตัวอย่างน้ำในสิ่งแวดล้อมได้ [14] รวมทั้งมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาและพัฒนาลิแกนด์เพื่อนำมาตรวจวิเคราะห์ซิลเวอร์ไอออน (Ag⁺) ในตัวอย่างน้ำโดยใช้การสังเคราะห์ด้วยตาเปล่า [15] อย่างไรก็ตามยังไม่พบข้อมูลการนำไดไทโซนเพื่อเป็นสารเทียบสีในการตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำไดไทโซนมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในตัวอย่างที่เป็นของเหลว



รูปที่ 1 โครงสร้างของไดไทโซน

อุปกรณ์และวิธีทดลอง

1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์

1.1 ความสามารถในการละลายของไดโทโซน

นำไดโทโซน 50 มิลลิกรัม มาละลายด้วยตัวทำละลายต่างๆ ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร ดังนี้ เอทานอล (ethanol) เมทานอล (methanol) คลอโรฟอร์ม (chloroform) ไดคลอโรมีเทน (dichloromethane) เฮกเซน (hexane) อะซิโตน (acetone) อะซิโตนไนไตรด์ (acetonitrile) และไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide) จากนั้นนำสารละลายไดโทโซนมาตรวจวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี (UV-Vis spectrophotometry)

1.2 การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของไดโทโซน ซิลเวอร์ไอออน และอนุภาคซิลเวอร์นาโน

ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไดโทโซนที่มีความเข้มข้น 3.902×10^{-5} โมลาร์ ในสารละลาย ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ ซิลเวอร์ไอออนถูกเตรียมด้วยตัวทำละลายน้ำ DI มีความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ และอนุภาคซิลเวอร์นาโนถูกเตรียมด้วยตัวทำละลายน้ำ DI มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.855×10^{-4} โมลาร์ สารละลายถูกตรวจวัดด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี ที่ความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสงตั้งแต่ 250 - 800 นาโนเมตร แล้วบันทึกสเปกตรัมของสารตัวอย่าง

1.3 การศึกษาความจำเพาะของโลหะและอนุภาคซิลเวอร์นาโนกับไดโทโซน

การศึกษาความจำเพาะกับไดโทโซนโดยเปรียบเทียบกับโลหะไอออนต่างๆ ที่มีความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ ดังนี้ Na^+ , K^+ , Ba^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{2+} , Ag^+ , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} , Pb^{2+} และอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้น 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากเติมสารละลายไดโทโซนปริมาตร 2 มิลลิลิตรลงในสารละลายโลหะไอออนต่างๆ ที่มีปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า จากนั้นนำสารละลายมาตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี

1.4 การศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของไดโทโซน และอนุภาคซิลเวอร์นาโน

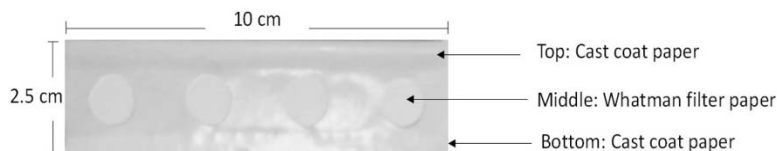
การศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสี โดยเตรียมสารละลายไดโทโซนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน การเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคซิลเวอร์นาโน กับไดโทโซน แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่าในสารละลายน้ำ

2. การประยุกต์

2.1 การประยุกต์ใช้บนตัวอย่างกระดาษ (paper based sample)

2.1.1 การออกแบบอุปกรณ์รูปแบบกระดาษสำหรับการวิเคราะห์

นำกระดาษเคลือบแก้ว (Cast coat paper) ขนาด (2.5 x 10 ตารางเซนติเมตร) มาตัดเป็นวงกลมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จากนั้นลอกด้านบนของกระดาษเคลือบออกแล้วนำกระดาษกรอง (Whatman) ใส่ไว้ตรงกลางและปิดทับด้วยกระดาษเคลือบด้านบนสุด ซึ่งกระดาษกรอง Whatman ถูกสร้างขึ้นเป็นรูปแบบอุปกรณ์ที่มีช่องวงกลมที่ง่ายและสะดวกสำหรับวิเคราะห์ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงรูปแบบกระดาษสำหรับการวิเคราะห์

2.1.2 การเทียบสี

สำหรับวิธีการเทียบสีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและง่ายในการตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในสารละลายน้ำ ในขณะที่เดียวกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคซิลเวอร์นาโนกับไดไทโชนจะได้รับการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่าบนกระดาษ และมีการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระดาษที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ห้วงถึงผลของความเข้มข้น ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา และขีดจำกัดการตรวจสอบของไดไทโชน และอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนกระดาษ

2.1.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของไดไทโชนบนกระดาษสำหรับการวิเคราะห์

นำสารละลายไดไทโชนมาเจือจางให้มีความเข้มข้นที่ต่างกันดังนี้ 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปิเปตสารละลายไดไทโชนที่มีความเข้มข้นต่างๆ ลงในกระดาษที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นปิเปตสารละลาย ซิลเวอร์ไอออนที่มีความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ และอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาตร 5 ไมโครลิตรลงในกระดาษ สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

2.1.4 การศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของซิลเวอร์ไอออน และอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนกระดาษ

การศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีบนกระดาษ โดยเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไอออนที่มีความเข้มข้น 1, 10, 100 และ 200 ไมโครโมลาร์ และอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้น 0.4, 0.6, 0.8, 1.25, 2.5, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อปิเปตสารละลายไดไทโชนที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 ไมโครลิตรลงในกระดาษ หลังจากนั้นปิเปตสารละลายซิลเวอร์ไอออน และอนุภาคซิลเวอร์นาโน ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษ จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นได้ด้วยตาเปล่า

2.1.5 กราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

สารละลายมาตรฐานของอนุภาคซิลเวอร์นาโนถูกเตรียมโดยทราบความเข้มข้นที่แน่นอน สารละลายไดโพรโซนใช้ในการตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในสารละลาย และกราฟมาตรฐานถูกนำมาพลอตระหว่างอัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนต่อลิแกนด์ ($A_{477 \text{ nm}} / A_{604 \text{ nm}}$) เทียบกับความเข้มข้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

2.2 การประยุกต์ใช้ในตัวอย่างครีมเบส (cream based sample)

2.2.1 การวิเคราะห์สารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนในตัวอย่างครีมเบส

นำครีมเบสผสมในสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันได้แก่ 0.4, 0.6, 0.8, 1.25, 2.5, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำครีมเบสผสมในสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน เพิ่มหลังจากการเติมสารละลายไดโพรโซน แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีโดยการมองเห็นด้วยตาเปล่า และตรวจสอบความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้

2.2.2 การวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในตัวอย่างครีม

นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ครีมที่มีจำหน่ายตามห้างสรรพสินค้าที่มีการระบุว่ามีส่วนประกอบซิลเวอร์นาโนข้างผลิตภัณฑ์ แต่ไม่ได้รับปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโน สำหรับการตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยนำสารละลายไดโพรโซนหยดลงไปในตัวอย่างครีมแล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

2.3 การประยุกต์ใช้ในตัวอย่างสารละลายที่เป็นของเหลว (Aqueous samples)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในตัวอย่างสารละลายที่เป็นของเหลว

2.3.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างในผลิตภัณฑ์

2.3.1.1 การวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในตัวอย่งน้ำ

นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่มีจำหน่ายตามห้างสรรพสินค้าซึ่งระบุว่ามีส่วนประกอบซิลเวอร์นาโน แต่ไม่ได้รับปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์กรองผ่านกระดาษกรอง whatman ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์หาปริมาณด้วยเทคนิคยูวีวิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี

2.3.1.2 การวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในตัวอย่งที่เป็นของเหลว (Aqueous samples) บนกระดาษ

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่นำมาวิเคราะห์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายตามห้างสรรพสินค้า และข้างผลิตภัณฑ์ มีการระบุว่ามีส่วนประกอบซิลเวอร์นาโนข้างขวด แต่ไม่ได้รับปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์ ก่อนการวิเคราะห์ตัวอย่างถูกเตรียมโดยนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman จากนั้นบีบอัดสารละลายผลิตภัณฑ์ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษและทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วบีบอัดสารละลายไดโพรโซนแล้วสังเกตเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

ผลการทดลอง

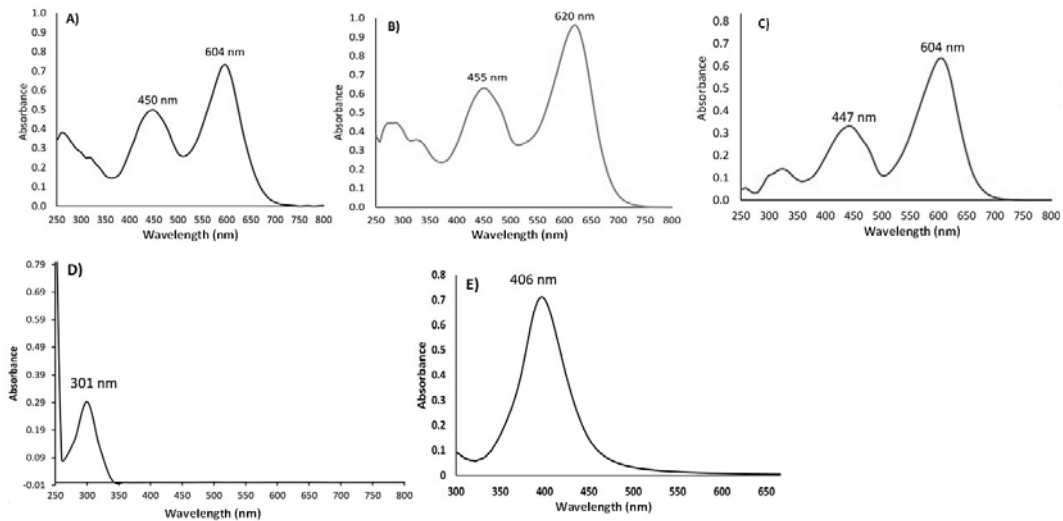
1. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ดังนี้

1.1 ผลการศึกษาความสามารถในการละลายของไดโทโซนต่ออนุภาคซิลเวอร์นาโน

สารละลายไดโทโซนถูกเตรียมโดยการละลายด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ดังนี้ เอทานอล เมทานอล เฮกเซน คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน อะซิโตน อะซิโตนไตรล์ และไดเมทิลซัลฟอกไซด์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไดโทโซนสามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ทั้งหมด จากนั้นนำสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้น 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2 มิลลิลิตร เติมลงในสารละลายไดโทโซน พบว่าสารละลายเกิดการแยกชั้นในกรณีของไดโทโซนที่ละลายด้วยคลอโรฟอร์ม เฮกเซนและไดคลอโรมีเทน เนื่องจากความมีขั้วที่แตกต่างกันของตัวทำละลาย อย่างไรก็ตามไดโทโซนที่ละลายในเมทานอล เอทานอล อะซิโตน อะซิโตนไตรล์และไดเมทิลซัลฟอกไซด์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสีหลังจากการเติมสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโน จากผลการทดลองพบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 450 และ 600 นาโนเมตร ดังนั้นตัวทำละลายเอทานอล อะซิโตนไตรล์ และไดเมทิลซัลฟอกไซด์ จึงถูกเลือกนำมาวิเคราะห์สำหรับการทดลองขั้นต่อไป อย่างไรก็ตามไดโทโซนที่ละลายในตัวทำละลายอะซิโตนไตรล์ มีความเสถียรมากกว่าในตัวทำละลายเอทานอลและไดเมทิลซัลฟอกไซด์

1.2 ผลการศึกษาสมบัติค่าความยาวคลื่นของไดโทโซน ซิลเวอร์ไอออน และอนุภาคซิลเวอร์นาโน

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไดโทโซน (3.902×10^{-5} โมลาร์) ในตัวทำละลายเอทานอลมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ค่าความยาวคลื่น 450 และ 604 นาโนเมตร ในขณะที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไดโทโซนในตัวทำละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์มีค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ 455 และ 620 nm และในตัวทำละลายอะซิโตนไตรล์ พบว่ามีค่าความยาวคลื่นที่ประมาณ 447 nm และ 604 nm ตามลำดับ นอกจากนี้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของซิลเวอร์ไอออนที่มีความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ มีความยาวคลื่น 301 นาโนเมตร ในขณะที่สารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้น 1.855×10^{-4} โมลาร์ พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีค่าความยาวคลื่น 406 นาโนเมตร แสดงดัง รูปที่ 3

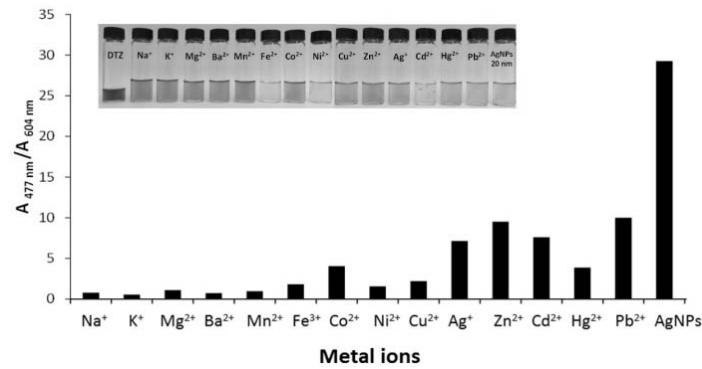


รูปที่ 3 ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไดไทโชนในตัวทำละลาย A) เอทานอล B) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ C) อะซีโตนไทรล์ D) ซิลเวอร์ไอออน และ E) อนุภาคซิลเวอร์นาโน

1.3 ผลการศึกษาความจำเพาะของโลหะและอนุภาคซิลเวอร์นาโนกับไดไทโชน

1.3.1 ไดไทโชนในตัวทำละลายเอทานอล

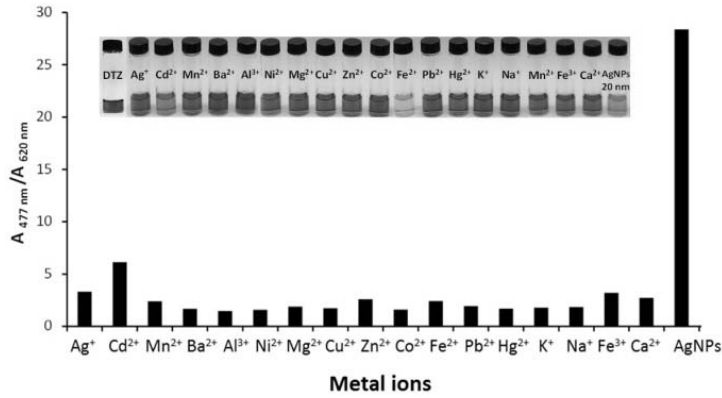
การศึกษาความจำเพาะของไดไทโชนในตัวทำละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร กับสารละลายโลหะไอออนต่างๆ ดังนี้ Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ag^+ , Cd^{2+} , Hg^{2+} , Pb^{2+} และอนุภาคซิลเวอร์นาโน ในขั้นตอนการเลือกใช้ไดไทโชนในการตรวจจับโลหะไอออนถูกทดสอบโดยการเติมสารละลายไดไทโชนลงในสารละลายโลหะไอออนที่มีปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองพบว่าสารละลายซิลเวอร์ไอออน อนุภาคซิลเวอร์นาโนมีสีที่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะไอออนอื่นๆ ขณะที่สารละลายซิลเวอร์ไอออนและอนุภาคซิลเวอร์นาโนเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีชมพูและสีเหลืองส้ม ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4 นอกจากนี้ยังมีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสเปกตรัมของไดไทโชนมีความยาวคลื่นที่ 450 และ 604 นาโนเมตร และพบว่าเมื่อเติมสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโน โดยอิเล็กตรอนของโลหะและลิแกนด์มีแรงผลักดันทำให้ d-ออร์บิทัลของโลหะมีการแยกชั้นระดับพลังงาน ทำให้สเปกตรัมเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นความจำเพาะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนกับไดไทโชนแสดงโดยการพลอตกราฟระหว่างอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงเปรียบเทียบกับชนิดของโลหะไอออนอื่นๆ ดังแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย และกราฟแสดงความจำเพาะของสารละลายไดไทโชนในตัวทำละลายเอทานอลต่ออนุภาคซิลเวอร์นาโน

1.3.2 ไดไทโชนในตัวทำละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์

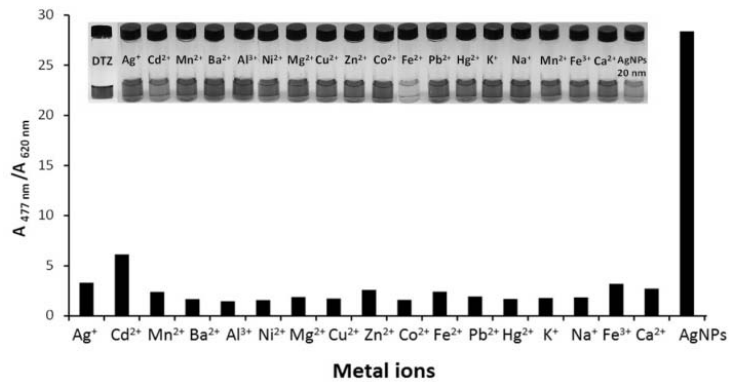
การศึกษาความจำเพาะของไดไทโชนในตัวทำละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กับสารละลายโลหะไอออนต่างๆ ดังนี้ Na⁺, K⁺, Cu²⁺, Mg²⁺, Ba²⁺, Mn²⁺, Fe³⁺, Co²⁺, Ni²⁺, Ag⁺, Zn²⁺, Cd²⁺, Hg²⁺, Pb²⁺ และอนุภาคซิลเวอร์นาโน ผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมสารละลายไดไทโชนซึ่งมีสารละลายสีเขียวลงไปในสารละลายซิลเวอร์ไอออน อนุภาคซิลเวอร์นาโนพบว่าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูและสีส้ม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าสารละลายมีสีที่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะไอออนอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 5 นอกจากนี้ยังมีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสเปกตรัมของไดไทโชนมีความยาวคลื่นที่ 455 และ 620 นาโนเมตร และเมื่อเติมสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดสเปกตรัมใหม่ที่มีความยาวคลื่น 477 นาโนเมตร ดังนั้นความจำเพาะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนกับไดไทโชนแสดงโดยการพลอตกราฟระหว่างอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง ($A_{477 \text{ nm}} / A_{620 \text{ nm}}$) เปรียบเทียบกับชนิดของโลหะไอออนอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าไม่มีผลต่อโลหะไอออนอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญดังแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย ความจำเพาะของสารละลายไดไทโชนในตัวทำละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ต่ออนุภาคซิลเวอร์นาโน

1.3.3 ไดไทโชนในตัวทำละลายอะซีโตนไตรล

การศึกษาความจำเพาะของไดไทโชนในตัวทำละลายอะซีโตนไตรลมีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร กับสารละลายโลหะไอออนต่างๆ ดังนี้ Na^+ , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Ag^+ , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} , Pb^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Cr^{2+} และอนุภาคซิลเวอร์นาโน ผลการทดลองพบว่าสารละลายซิลเวอร์ไอออน อนุภาคซิลเวอร์นาโนเปลี่ยนเป็นสีชมพูและสีส้ม ตามลำดับ หลังจากเติมสารละลายไดไทโชน เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะไอออนอื่นๆ มีสีที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 6 นอกจากนี้ยังมีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย ผลการทดลองพบว่าสเปกตรัมของไดไทโชนกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีความยาวคลื่น 477 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าไม่มีผลต่อโลหะไอออนอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญดังแสดงดังรูปที่ 6

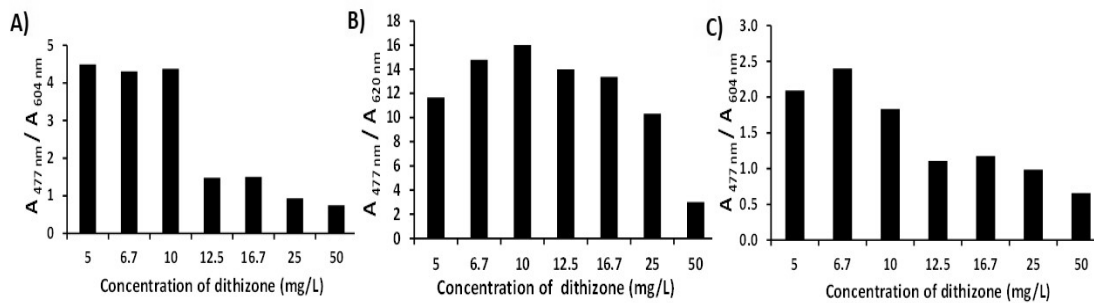


รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย และกราฟแสดงความจำเพาะของสารละลายไดไทโชนในตัวทำละลายอะซีโตนไตรลต่ออนุภาคซิลเวอร์นาโน

ผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าสารละลายไดไทโชนในตัวทำละลายเอทานอล ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ และอะซีโตไนไตรล์ หลังจากเติมสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโน พบว่าสีของสารละลายเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีส้ม ซึ่งแสดงให้เห็นความจำเพาะของไดไทโชนต่ออนุภาคซิลเวอร์นาโน ขณะที่สารละลายซิลเวอร์ไอออนเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีชมพู หลังจากเติมสารละลายไดไทโชน ซึ่งมีสีที่ต่างกันแสดงให้เห็นถึงความจำเพาะของอนุภาคซิลเวอร์นาโน และซิลเวอร์ไอออน เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะไอออนอื่นๆ

1.4 ผลการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของไดไทโชน

เตรียมสารละลายไดไทโชนในตัวทำละลายเอทานอล ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ และอะซีโตไนไตรล์ ให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 5 - 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นเติมสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนปริมาตร 2 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้น 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีส้ม จากนั้นนำสารละลายไปวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและพลอตกราฟระหว่างอัตราส่วนการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายไดไทโชน พบว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของไดไทโชนในตัวทำละลายเอทานอลและไดเมทิลซัลฟอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของไดไทโชนในตัวทำละลายอะซีโตไนไตรล์ที่ความเข้มข้น 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 7

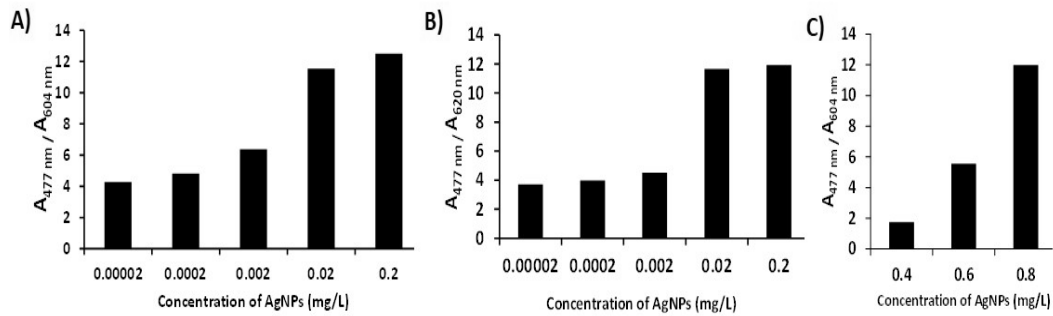


รูปที่ 7 กราฟแสดงความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของไดไทโชนในตัวทำละลาย A) เอทานอล B) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ และ C) อะซีโตไนไตรล์

1.5 ผลการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

เตรียมสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง 0.00002 - 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นเติมสารละลายไดไทโชนปริมาตร 2 มิลลิลิตร ที่เตรียมในตัวทำละลายเอทานอลมีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสารละลายเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีส้ม เมื่อนำสารละลายไปวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและพลอตกราฟระหว่างอัตราส่วนการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโน พบว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของไดไทโชนในตัวทำละลายเอทานอลมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 8A ขณะที่สารละลายไดไทโชนที่เตรียมในตัวทำละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์และอะซีโตไนไตรล์พบว่ามีค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ที่ความเข้มข้น 10 และ 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นนำมาเติมลงในสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.00002 - 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับไดไทโชนที่เตรียมในตัวทำละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ ส่วนสารละลายไดไทโชนที่เตรียมในตัวทำละลายอะซีโตไนไตรล์จะถูกเติมลงในสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.4 - 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการวิเคราะห์พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเช่นเดียวกันกับไดไทโชนที่เตรียมในตัวทำละลายเอทานอล ขณะที่มีความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ความเข้มข้น

0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตรในสารละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์และอะซีโตนไตรรต์ แสดงดังรูป 8B และ 8C ตามลำดับ



รูปที่ 8 กราฟแสดงความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคซิลเวอร์นาโนกับไดโทโซนในตัวทำละลาย A) เอทานอล B) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ และ C) อะซีโตนไตรรต์

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่าไดโทโซนในตัวทำละลายอะซีโตนไตรรต์ ถูกนำมาใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไปเนื่องจากมีความเสถียรมากกว่าไดโทโซนในเอทานอลและไดเมทิลซัลฟอกไซด์ ซึ่งสีของสารละลายไม่สลายตัวเมื่อโดนแสง รวมทั้งยังสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน ที่อุณหภูมิห้อง

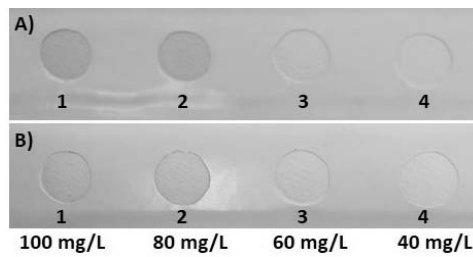
2. การประยุกต์

ในการวิเคราะห์การใช้งานโดยนำไดโทโซนในตัวทำละลายอะซีโตนไตรรต์มาใช้ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป ดังนี้

2.1 การประยุกต์ใช้บนตัวอย่างกระดาษ (paper based sample)

2.1.1 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายไดโทโซนบนกระดาษ

สารละลายไดโทโซนถูกเจือจางให้มีความเข้มข้น 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นปิเปตสารละลาย 5 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษสำหรับวิเคราะห์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสีของกระดาษเปลี่ยนจากไม่มีสีไปเป็นสีเขียวของสารละลายไดโทโซน ดังแสดงในรูปที่ 9 หลังจากนั้นปิเปตน้ำ DI (deionized water) ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ตามลงไปบนกระดาษ ซึ่งมีการดูดซึมสารละลายอย่างรวดเร็ว พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงสีอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ความชัดเจนของสีขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายไดโทโซนดังนั้นจึงเลือกนำสารละลายไดโทโซนที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตรมาทดสอบในขั้นตอนต่อไป

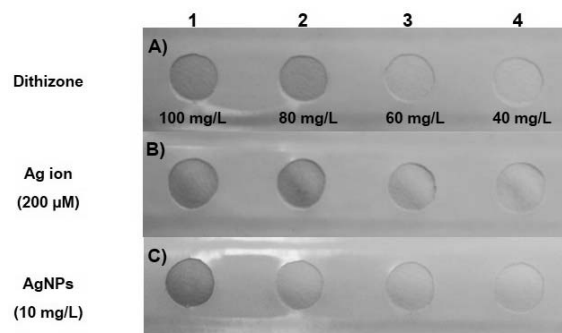


รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีบนกระดาษ A) สารละลายไดโทโซนที่มีความเข้มข้น 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร B) หลังจากเติมน้ำ DI ลงบนกระดาษ

2.1.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของไดโทโซน ซิลเวอร์ไอออน และอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนกระดาษ

2.1.2.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของไดโทโซนบนกระดาษ

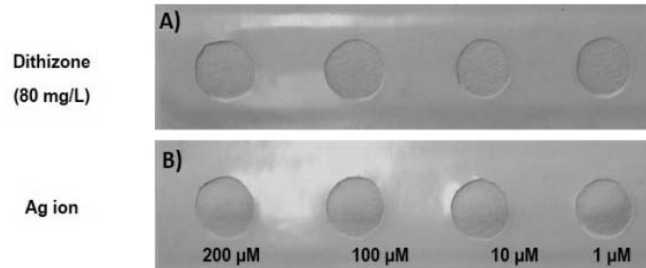
สารละลายไดโทโซนถูกเตรียมให้มีความเข้มข้น 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และเปิด 5 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษสำหรับการวิเคราะห์ที่เตรียมไว้ จากนั้นเติมสารละลายซิลเวอร์ไอออนความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 5 ไมโครลิตร และอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ลงไปบนกระดาษ ผลการทดลองพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเขียวเป็นสีชมพูและเหลืองส้มตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของสารละลายไดโทโซนที่ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร มองเห็นสีที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่าได้ชัดเจน เมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่ 40 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูป 10 ดังนั้นความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของไดโทโซนบนกระดาษเท่ากับ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 10 แสดงผลการเปลี่ยนสีบนกระดาษ A) สารละลายไดโทโซนที่มีความเข้มข้น 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร B) หลังจากเติมสารละลายซิลเวอร์ไอออน และ C) สารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโน

2.1.2.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของซิลเวอร์ไอออนบนกระดาษ

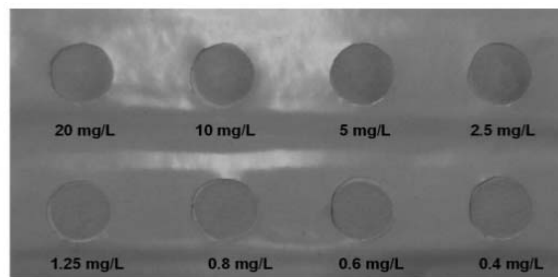
นำสารละลายไดไทโซนที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปเปิดลงบนกระดาษที่เตรียมไว้สำหรับการวิเคราะห์ หลังจากนั้นเปิดสารละลายซิลเวอร์ไอออนที่มีความเข้มข้น 1, 10, 100 และ 200 ไมโครโมลาร์ ลงไปบนกระดาษ เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเขียวเป็นสีชมพูดังรูปที่ 11 และความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของซิลเวอร์ไอออนบนกระดาษเท่ากับ 100 ไมโครโมลาร์



รูปที่ 11 แสดงผลการเปลี่ยนสีบนกระดาษ A) สารละลายไดไทโซนที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร B) หลังจากเติมสารละลายซิลเวอร์ไอออนที่มีความเข้มข้น 1, 10, 100 และ 200 ไมโครโมลาร์

2.1.2.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนกระดาษ

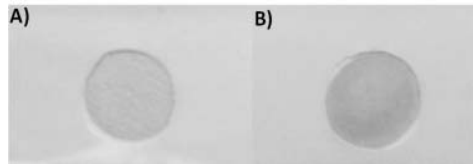
เมื่อเปิดสารละลายไดไทโซนที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงบนกระดาษที่เตรียมไว้ หลังจากนั้น เปิดสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้น 0.4, 0.6, 0.8, 1.25, 2.5, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงบนกระดาษปริมาตร 5 ไมโครลิตร ผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเขียวเป็นสีเหลืองส้ม แสดงดังรูปที่ 12 และความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคซิลเวอร์นาโนบนกระดาษเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 12 แสดงผลการเปลี่ยนสีบนกระดาษหลังจากเติมสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้น 0.4, 0.6, 0.8, 1.25, 2.5, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

2.1.3 การวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวบนกระดาษ

เตรียมสารละลายไดโทโซนที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงบนกระดาษสำหรับวิเคราะห์ จากนั้นเปิดตัวอย่างผลิตภัณฑ์ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ซึ่งผ่านการกรองและพบว่าเป็นสารละลายไม่มีสี ลงบนกระดาษสำหรับวิเคราะห์นั้น สังเกตสีด้วยตาเปล่าพบว่าการเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีส้ม แสดงดังรูปที่ 13 ดังนั้นผลิตภัณฑ์ซึ่งระบุว่ามียอนุภาคซิลเวอร์นาโน แต่ไม่ได้ระบุปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์นั้น สามารถเบื้องต้นได้ว่ามียอนุภาคซิลเวอร์นาโนอยู่ในผลิตภัณฑ์จริง

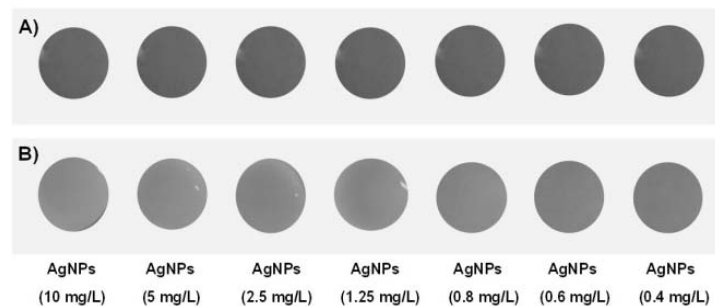


รูปที่ 13 แสดงผลการเปลี่ยนสีบนกระดาษ A) สารละลายไดโทโซนที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร B) หลังจากเติมสารละลายตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

2.2 การประยุกต์ใช้ในตัวอย่างครีมเบส (cream based sample)

2.2.1 ผลการวิเคราะห์สารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนในครีมเบส

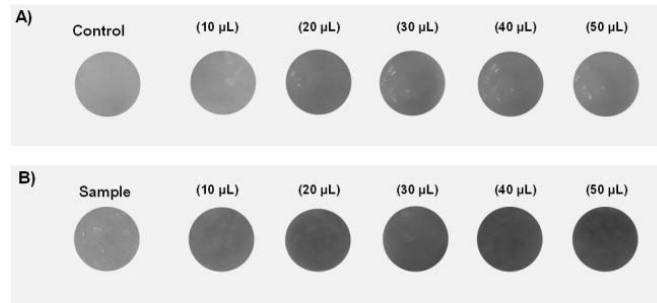
นำสารละลายไดโทโซนที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ผสมกับครีมเบส 0.4 กรัม ทำให้ครีมเบสเปลี่ยนสีจากสีขาวขุ่นเป็นสีเขียว หลังจากนั้นนำสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้น 0.4, 0.6, 0.8, 1.25, 2.5, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปทดสอบกับครีมเบส หลังจากสารละลายผสมกับครีมเบสเป็นระยะเวลา 10 นาที สีของตัวอย่างเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีส้มที่ความเข้มข้น 2.5, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดงผลการเปลี่ยนสีบนตัวอย่างครีมเบส A) ตัวอย่างครีมเบสผสมกับสารละลายไดโทโซนที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร B) หลังจากเติมสารละลายอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ความเข้มข้น 0.4, 0.6, 0.8, 1.25, 2.5, 5, และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

2.2.2 ผลการวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ครีม

นำผลิตภัณฑ์ครีมซึ่งระบุว่ามียูนาซิลเวอร์นาโน แต่ไม่ได้ระบุปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์มาทดสอบโดยเตรียมสารละลายไดโทโซนที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปิเปตลงบนตัวอย่างผลิตภัณฑ์ครีมในปริมาตรที่ต่างกัน โดยเปรียบเทียบกับครีมเบสที่ผสมกับสารละลายไดโทโซน ผลการทดลองพบว่ามีความโน้มการเปลี่ยนแปลงสีจากสีขาวขุ่นของผลิตภัณฑ์ครีมกลายเป็นสีส้ม แสดงดังรูปที่ 15 ดังนั้นสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่ามีอนุภาคซิลเวอร์นาโนอยู่ในผลิตภัณฑ์ครีมอยู่จริง

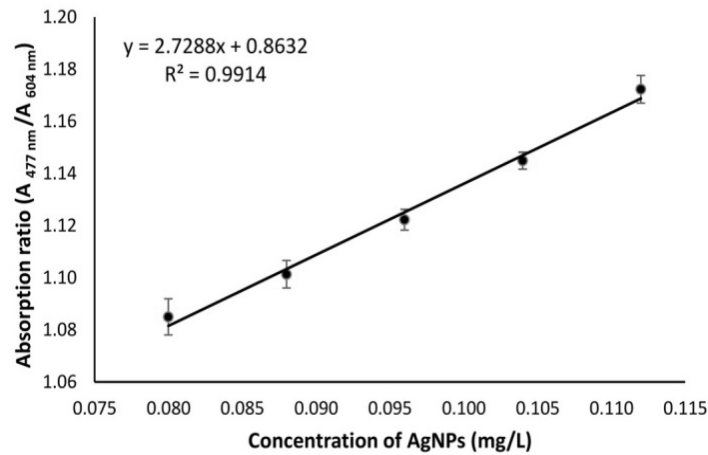


รูปที่ 15 แสดงผลการเปลี่ยนสีบนผลิตภัณฑ์ครีม A) ตัวอย่างครีมเบสผสมกับสารละลายไดโทโซนที่ปริมาตรแตกต่างกัน B) หลังจากเติมสารละลายไดโทโซนในผลิตภัณฑ์ครีม

2.3 การประยุกต์ใช้ในตัวอย่างสารละลายที่เป็นของเหลว (Aqueous samples)

2.3.1 ผลการวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในตัวอย่างที่เป็นของเหลว

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวถูก spiked ลงไปในสารละลายมาตรฐานของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.080-0.112 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าได้กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงคือ $y = 2.7288x + 0.8632$, $R^2 = 0.9914$ แสดงดังรูปที่ 16 และมีเปอร์เซ็นต์การคืนกลับ (% recovery) เท่ากับ 98 -101.59% สำหรับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (relative standard deviations ; RSD) มีค่าเท่ากับ 1.16 - 3.15% แสดงดังตารางที่ 1 ขณะที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้เท่ากับ 0.071 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่าระดับมาตรฐานที่สำคัญของซิลเวอร์ที่อนุญาตให้ใช้น้ำดื่ม [16] ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการนี้เพื่อตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนตัวอย่างจริง ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่ายและรวดเร็วในการวิเคราะห์ และสามารถพบข้อจำกัดความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้



รูปที่ 16 แสดงกราฟมาตรฐานที่พลอตระหว่างอัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสง ($A_{477 \text{ nm}} / A_{604 \text{ nm}}$) เทียบกับความเข้มข้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโนอยู่ในช่วง 0.080 - 0.112 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 1 แสดงผลความเข้มข้นของอนุภาคซิลเวอร์นาโน เปอร์เซ็นต์การคืนกลับ และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์

Sample	AgNPs added (mg/L)	Recovered (mg/L)	Recovery (%)	RSD (%)
Aqueous sample (Real sample)	0.080	0.081 ± 0.0026	101.59	3.15
	0.088	0.087 ± 0.0019	99.16	2.22
	0.096	0.095 ± 0.0015	98.89	1.53
	0.104	0.103 ± 0.0012	99.27	1.16
	0.112	0.113 ± 0.0019	101.15	1.71

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาความสามารถในการละลายของไดโทโซนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์พบว่า ตัวทำละลายเอทานอล อะซีโตไนไตรล์ และไดเมทิลซัลฟอกไซด์ สามารถละลายไดโทโซนได้ดีกว่าตัวทำละลายอื่นๆ เนื่องจากตัวทำละลายที่มีค่าที่ไดอิเล็กทริกและมีความเป็นขั้วสูง [17]

สำหรับผลการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของไดโทโซน ซิลเวอร์ไอออน และอนุภาคซิลเวอร์นาโนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและตัวทำละลายอินทรีย์รวมทั้งปฏิกิริยาของไดโทโซนกับซิลเวอร์ [18-19] จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่าไดโทโซนในตัวทำละลายอะซีโตไนไตรล์ ถูกนำมาใช้ในการทดลองขั้นตอนการประยุกต์ใช้ในตัวอย่างบนกระดาษ ตัวอย่างครีม และในตัวอย่างที่เป็นของเหลว เนื่องจากมีความเสถียรมากกว่าไดโทโซนในเอทานอลและไดเมทิลซัลฟอกไซด์ รวมทั้งยังสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานที่อุณหภูมิห้อง

การประเมินการตรวจจับอนุภาคซิลเวอร์นาโนในตัวอย่างจริง โดยการเลือกใช้ไดโทโซนในการตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโน พบว่าสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองส้ม ซึ่งไดโทโซนมีความจำเพาะกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะไอออนอื่นๆ สำหรับการประยุกต์ใช้อุปกรณ์รูปแบบกระดาษในการเทียบสี ทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ สะดวก รวดเร็ว ประหยัดเวลา และสามารถพกพาได้ รวมทั้งสามารถ

วิเคราะห์หรืออ่านผลการตรวจได้ด้วยตนเองโดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ของอนุภาคซิลเวอร์เท่ากับ 0.071 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี ดังนั้นในอนาคตวิธีการตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนทั้งหมดดังกล่าวจึงเป็นวิธีที่มีความสำคัญและมีประโยชน์สำหรับการตรวจวิเคราะห์ในตัวอย่างจริง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้สนับสนุนสถานที่และเครื่องมือในงานวิจัย ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

ขอขอบพระคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (Nanotec) สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA)

ขอขอบพระคุณโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย TGIST (Grant No. TG-55-17-55-055D) สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

เอกสารอ้างอิง

1. Benn, T.M., and Westerhoff, P. 2008. Nanoparticle Silver Released into Water From Commercially Available Sock Fabrics. *Environmental Science and Technology*. 42(11): 4133-4139.
2. Blaser, S.A., Scheringer, M., Macleod, M., and Hungerbühler, K. 2008. Estimation of Cumulative Aquatic Exposure and Risk due to Silver: Contribution of Nano-Functionalized Plastics and Textiles. *Science of the Total Environment*. 390(2-3): 396-409.
3. Lorenz, C., Windler, L., von Goetz, N., Lehmann, R. P., Schuppler, M., Hungerbuhler, K., Heuberger, M., and Nowack, B. 2012. Characterization of Silver Release from Commercially Available Functional (Nano) Textiles. *Chemosphere*. 89: 817-824.
4. Das, P., Ghosh, A., Bhatt, H., and Das, A. 2012. A Highly Selective and Dual Responsive Test Paper Sensor of Hg^{2+}/Cr^{3+} for Naked Eye Detection in Neutral Water. *RSC Advances*. 2: 3714-3721.
5. Jiang, J., Gou, C., Luo, J., Yi, C., and Liu, X. 2012. A Novel Highly Selective Colorimetric Sensor for Ni(II) Ion Using Coumarin Derivatives. *Inorganic Chemistry Communications*. 15: 12-15.
6. Mei, Q., Wang, L., Tian, B., Yan, F., Zhang, B., Huang, W., and Tong, B. 2012. A Highly Selective and Naked-Eye Sensor for Hg^{2+} based on Quinazoline-4(3H)-Thion. *New Journal of Chemistry*. 36(9): 1879-1883.

7. Safavi, A., and Bagheri, M. 2005. Design of a Copper (II) Optode Based on Immobilization of Dithizone on a Triacetylcellulose Membrane. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 107: 53-58.
8. Takahashi, Y., Danwittayakul, S., and Suzuki, T.M. 2009. Dithizone Nanofiber-Coated Membrane for Filtration-Enrichment and Colorimetric Detection of Trace Hg(II) Ion. *Analyst*. 134: 1380-1385.
9. Antônio, C., Lopes, L., Korn, A., and Portela, J.G. 2002. Separation and Pre-Concentration of Cadmium, Copper, Lead, Nickel and Zinc by Solid-Liquid Extraction of Their Cocrystallized Naphthalene Dithizone Chelate in Saline Matrices. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 13: 674-678.
10. Danwittayakul, S., Takahashi, Y., Suzuki, T., and Thanaboonsombut, A. 2008. Simple Detection of Mercury Ion Using Dithizone Nanoloaded Membrane. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*. 18: 37-40.
11. Yin, C., Iqbal, J., Hu, H., Liu, B., Zhang, L., Zhu, B., and Du, Y. 2012. Sensitive Determination of Trace Mercury by UV-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy after Complexation and Membrane Filtration-Enrichment. *Journal of Hazardous Materials*. 233-234: 207-212.
12. Kiwan, A.M. 1997. Use of Dichloromethane with Dithizone as an Alternative Solvent to Carbon Tetrachloride Restricted by Montreal Protocol. *Talanta*. 44: 947-950.
13. Salih, B., Denizli, A., Kavaklı, C., Say, R., and Piskin, E. 1998. Adsorption of Heavy Metal Ions onto Dithizone-Anchored poly (EGDMA-HEMA) Microbeads. *Talanta*. 46: 1205-1213.
14. Kadambi, A. V., and Gopal, B. 2011. Preparation of Cu₂O Nano-Colloid and Its Application as Selective Colorimetric Sensor for Ag⁺ Ion. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 155: 653-658.
15. Tavallali, H., Deilamy-Rad, G., Parhami, A., and Mousavi, S.Z. 2013. A Novel Development of Dithizone as a Dual-Analyte Colorimetric Chemosensor: Detection and Determination of Cyanide and Cobalt (II) Ions in Dimethyl Sulfoxide/Water Media with Biological applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 125: 121-130.
16. World Health Organization. 2008. Guidelines for Drinking-Water Quality. 3rd ed. Geneva: Switzerland.
17. Adam, A.M.A. 2016. Charge Transfer Complexation of the Anticholinergic Drugclidinium Bromide and Picric Acid in Different Polar Solvents: Solvent Effect on the Spectroscopic and Structural Morphology Properties of the Product. *Journal of Molecular Liquids*. 216: 192-208.

18. Gulam RM; Takahashi T, and Ohga Y. 2009. Dynamic Solvent Effects on the Thermalisomerization of Zinc Dithizonate. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 11: 5170-5174.
29. Zaporozhets, O., Petruniok, N., and Sukhan, V. 1999. Determination of Ag(I), Hg(II) and Pb(II) by using Silica Gel Loaded with Dithizone and Zinc Dithizonate. *Talanta*. 50: 865-873.

ได้รับบทความวันที่ 9 มกราคม 2561

ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 24 พฤษภาคม 2561