*บทความวิจัย*

# การพัฒนาวิธีการคัดกรองและวิเคราะห์เอทธาโนลามีนเชิงสี โดยใช้อนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรเป็นตัวตรวจวัดเชิงสี

**อับดุลฮาดี ยะโก๊ะ และ วีณา เสียงเพราะ***

## บทคัดย่อ

เอทธาโนลามีน (2-อะมิโนเอทธานอล) เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตผงซักฟอกและยา แต่อย่างไรก็ตามเอทธาโนลามีนนั้นสามารถก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ดวงตา และปอดได้ อีกทั้งการได้รับสารในปริมาณมากอาจก่อให้เกิดภาวะระบบประสาทส่วนกลางถูกกดทับ (central nervous system depression) ซึ่งการตรวจวัดด้วยเครื่องมือที่ใช้โดยทั่วไปในห้องปฏิบัติการนั้นล้วนแล้วแต่ใช้เวลานาน มีราคาแพง และมีเครื่องมือที่ยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยจึงได้นำเสนอวิธีทางเลือกที่จะสามารถคัดกรองและตรวจวัดเอทธาโนลามีนได้อย่างง่ายและรวดเร็ว โดยในการตรวจวัดจะอาศัยหลักการในการออกซิเดชันอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรภายใต้สภาวะในการทดลอง ส่งผลให้อนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรมีขนาดเล็กลงและเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีม่วงเป็นสีส้ม แต่หากในสารละลายนั้นประกอบด้วยเอทธาโนลามีน เอทธาโนลามีนจะสามารถยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของอนุภาคเงินได้ทำให้สีของสารละลายไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่าค่าความเข้มสีนั้นแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับล็อกการิทึมของความเข้มข้นของเอทธาโนลามีนในช่วง 1 $\mu gL^{-1}$-100 $mgL^{-1}$ และมีขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.5 $\mu gL^{-1}$ นอกจากนี้วิธีการตรวจวัดเชิงสีนี้ยังแสดงความไวในการตรวจวิเคราะห์และความถูกต้องที่ดี ทำให้งานวิจัยที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการคัดกรองและวิเคราะห์เอทธาโนลามีนได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

**คำสำคัญ:** เอทธาโนลามีน อนุภาคเงินขนาดนาโน การคัดกรอง ตัวตรวจวัดเชิงสี

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: weenasi@hotmail.com

# Colorimetric Screening and Analysis of Ethanolamine using Silver Nanoparticles as Colorimetric Agent

**Abdulhadee Yakoh and Weena Siangproh***

## ABSTRACT

Ethanolamine (2-aminoethanol) are widely used in many industries such as the production of detergent and pharmaceuticals. Ethanolamine is irritating to the skin, eyes and lungs. Moreover, extensive using may cause central nervous system depression in exposed to animals. Unfortunately, several analytical methods used for the detection of ethanolamine require time-consuming operation, expensive and sophisticated instrument which limiting their applications. Here, we report an alternatively novel visual method for simple and rapid determination of the ethanolamine. In this work, the assay principle is based on the oxidation of silver nanoparticles (AgNPs), which induces the etching of AgNPs and the changing of color from violet to orange. However, the presence of ethanolamine can prevent the etching of the AgNPs. Under optimal conditions, the mean color intensity is related linearly to the logarithmic concentration of ethanolamine in the range of 1 $\mu gL^{-1}$-100 $mgL^{-1}$ with a detection limit of 0.5 $\mu gL^{-1}$. This colorimetric assay exhibits good sensitivity and accuracy, providing a simple and rapid method for the screening and analysis of ethanolamine.

**Keywords:** ethanolamine, silver nanoparticles (AgNPs), screening, colorimetric agent

Department of Chemistry, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Thailand

*Corresponding author, E-mail: weenasi@hotmail.com

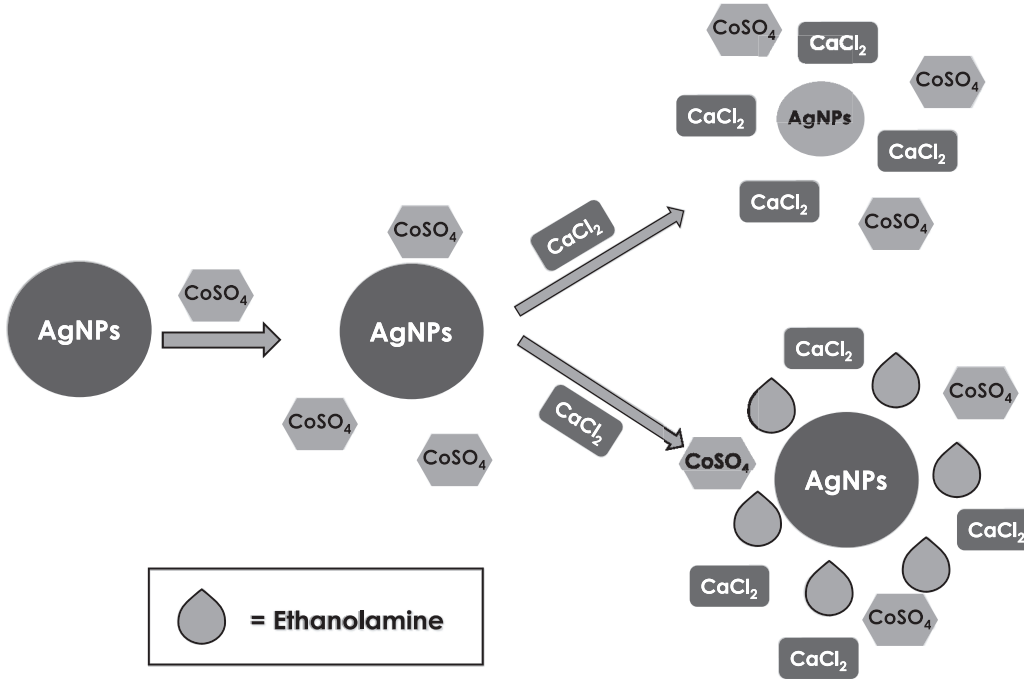
## บทนำ

เอทธาโนลามีน (Ethanolamine) หรือ 2-อะมิโนเอทธานอล (2-aminoethanol) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นทั้งแอลกอฮอลล์ปฐมภูมิ (primary alcohol) และเอมีนปฐมภูมิ (primary amine) จัดเป็นสารที่มีฤทธิ์เป็นเบสอ่อน (weak base) โดยเอทธาโนลามีนเป็นสารที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การใช้เป็นสารเคมีในการ scrubbing ของ acidic gases [1], การใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น ผงซักฟอก เป็นต้น นอกจากนี้เอทธาโนลามีนยังถูกนำมาใช้เป็นสารที่ช่วยเพิ่มความเสถียร (stabilizer) หรือสารที่ใช้ในการควบคุมพีเอช (pH) ของปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมการผลิตยา [2] โดยจากข้อมูลทางพิษวิทยาพบว่า การได้รับสารเอทธาโนลามีนในปริมาณมากอาจก่อให้เกิดภาวะระบบประสาทส่วนกลางถูกกดทับ (central nervous system depression) อีกทั้ง Modica-Napolitano, J.S. และคณะ [3] ยังได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากสารชนิดนี้ และพบว่าการได้รับสารเอทธาโนลามีนนั้นสามารถยับยั้งการทำงานของกระบวนการหายใจใน mitochondria ของสิ่งมีชีวิต (Mitochondria respiratory activity) ซึ่งก่อให้เกิดภาวะความผิดปกติทางอารมณ์ (the pathophysiology of affective illnesses) เช่น ภาวะซึมเศร้า (depression) และ โรคอารมณ์สองขั้ว (Bipolar disorder) โดยระดับของสารเอทธาโนลามีนที่สามารถยอมให้มีได้ (threshold limit value, TLV) คือ 3 $mgL^{-1}$ [2] จะเห็นว่าการตรวจวิเคราะห์เอทธาโนลามีนนั้นมีความสำคัญอย่างมากต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิต ดังนั้นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์เอทธาโนลามีนจึงจำเป็นต้องมีความถูกต้อง แม่นยำ และน่าเชื่อถือ แต่เนื่องจากคุณสมบัติของเอทธาโนลามีน เช่น มวลโมเลกุลน้อย, ความมีขั้วมาก, การระเหยต่ำ, ถูกไอออไนซ์ได้ง่ายในสารละลายน้ำ (aqueous solution) และไม่มีหมู่โครโมฟอร์ (chromophore) ในการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิล (UV-Vis) ทำให้การตรวจวิเคราะห์นั้นทำได้ยาก ทำให้พบรายงานการวิจัยที่น้อยมากๆ แต่อย่างไรก็ตามจากการทบทวนวรรณกรรมทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง พบเทคนิคทางวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณเอทธาโนลามีน เช่น เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography (GC)) [4], ของเหลวสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatography (HPLC)) [5] หรือไอออนโครมาโทกราฟี (Ion chromatography) [6] ซึ่งล้วนแล้วแต่ใช้เครื่องมือที่ราคาแพง ต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในเครื่องมือนั้นๆ ใช้เวลาในการตรวจวิเคราะห์นาน และมีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งอาจไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการตรวจวิเคราะห์ในงานที่ต้องการทราบผลทันที (real time analysis) จึงเกิดข้อจำกัดในการใช้งานขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยจึงมีเป้าหมายที่จะพัฒนาวิธีการคัดกรองและตรวจวิเคราะห์เอทธาโนลามีนให้มีความง่าย รวดเร็ว มีราคาถูก และให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำเชื่อถือได้

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีได้เข้ามามีส่วนช่วยในการทำให้การตรวจวิเคราะห์ต่างๆ นั้นง่ายขึ้น เช่น การนำอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตร (AgNPs) และ อนุภาคทองขนาดนาโนเมตร (AuNPs) มาใช้เป็นตัวตรวจวัดเชิงสีของสารหลายประเภท เช่น สารชีวภาพ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ต่างๆ โดยจากคุณสมบัติที่โดดเด่นของอนุภาคขนาดนาโนเมตรไม่ว่าจะเป็น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูง ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ความเสถียร และราคาที่ถูก ทำให้อนุภาคขนาดนาโนเมตรได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้อนุภาคเงินขนาดนาโนเมตร (AgNPs) ซึ่งมีการรายงานไว้ว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงกว่าอนุภาคทองขนาดนาโนเมตร (AuNPs) ถึง 100 เท่า ที่ขนาดอนุภาคเดียวกัน อีกทั้งยังมีราคาที่ถูกกว่ามาใช้เป็นตัวตรวจวัดเชิงสี โดยในการคัดกรองและตรวจวิเคราะห์หา

เอทธาโนลามีนนั้นจะอาศัยหลักการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตร โดยในสภาวะที่ไม่มีเอทธาโนลามีนอยู่นั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีสารละลายของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรจากสีม่วงเป็นสีส้มเพราะอนุภาคเงินจะมีขนาดเล็กลง แต่ในกรณีที่มีเอทธาโนลามีนอยู่ในสารละลาย อนุภาคเงินจะยังคงมีขนาดเท่าเดิมหรือใกล้เคียงของเดิมมากที่สุด ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรจากสีม่วงเป็นสีส้มนั้นจะเกิดได้ยากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำให้การคัดกรองและการตรวจวัดปริมาณเอทธาโนลามีนสามารถทำได้โดยการติดตามการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นนั้นได้ด้วยตาเปล่าโดยไม่ต้องอาศัยเครื่องมืออื่นๆ ที่ยุ่งยากซับซ้อน

จากข้อดีของวิธีที่พัฒนาขึ้นไม่ว่าจะเป็นความรวดเร็ว ง่าย และราคาที่ถูก ทำให้สามารถนำวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ไปประยุกต์ใช้ในการคัดกรองและวิเคราะห์เอทธาโนลามีนในตัวอย่างจริงต่อไปได้




**รูปที่ 1** แสดงหลักการตรวจวัดเอทธาโนลามีนโดยใช้อนุภาคเงินขนาดนาโนเป็นตัวตรวจวัดเชิงสี

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### สารเคมี

เอทธาโนลามีน 97% (Ethanolamine 97%), โคบอลต์ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (Cobalt sulfate heptahydrate), คอปเปอร์ไนเตรต (Copper nitrate), คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper Sulfate), นิกเกิลซัลเฟต (Nickel sulfate), แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) จากบริษัทซิกมา-แอลดิช อนุภาคเงินขนาดนาโนเมตร (Silver nanoparticles) โดยมีแป้ง (starch) เป็นตัวเพิ่มเสถียรภาพ จากหน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคเงินขนาดนาโนสีม่วง (45 นาโนเมตร), เหลือง (10 นาโนเมตร) และน้ำเงิน (50 นาโนเมตร), น้ำดีไอออไนซ์ (Deionized water)

**อุปกรณ์และเครื่องมือ**

ไมโครปิเปตขนาด 100 และ 1000 ไมโครลิตร (Micropipette, 100-1000 μL) จากบริษัท Eppendorf, เครื่องยูวี-วิสซิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ (UV-Vis spectrometer) จากบริษัทชิมาสสึ และ กล้องดิจิตัล (Digital camera) รุ่น Cyber-shot DSC-TX1 จากบริษัทโซนี่

## วิธีการดำเนินการวิจัย

**1. การคัดกรองและตรวจวัดเอทธาโนลามีนเชิงสีด้วยอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตร**

เตรียมสารละลายแบลงค์ โดยการหยดสารละลายของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรสีม่วงเข้มข้น 50 $mgL^{-1}$ ปริมาตร 200 μL ลงในถาดหลุมใสหลุมที่ 1 ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์และอบให้แห้งแล้ว จากนั้นทำการหยดสารละลายโคบอลต์ซัลเฟตเข้มข้น 1000 $mgL^{-1}$ ปริมาตร 200 μL และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 100 $mgL^{-1}$ ปริมาตร 200 μL ลงในถาดหลุมก่อนหน้าที่มีการหยดอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตร สารละลายจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคเงินขนาดนาโนจากสีม่วงเป็นสีส้ม ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าภายในเวลา 3 นาที ทำการบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้น

จากนั้นทำการตรวจวัดเอทธาโนลามีนโดยการหยดสารละลายของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรสีม่วงเข้มข้น 50 $mgL^{-1}$ ปริมาตร 200 μL ลงในถาดหลุมใสหลุมที่ 2 ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์และอบให้แห้งแล้ว จากนั้นทำการหยดสารละลายโคบอลต์ซัลเฟตเข้มข้น 1000 $mgL^{-1}$ ปริมาตร 200 μL ตามด้วยสารละลายเอทธาโนลามีนที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 200 μL และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 100 $mgL^{-1}$ ปริมาตร 200 μL ลงในถาดหลุมที่มีการหยดอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรไว้แล้ว โดยสารละลายจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคเงินขนาดนาโนเพียงเล็กน้อยจนแทบจะไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า เนื่องจากการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสีของเอทธาโนลามีน ทำการบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นของสารละลายทั้งสองหลุมด้วยกล้องดิจิตัล แล้วนำไปวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยซอฟท์แวร์ Adobe Photoshop เพื่อหาค่าความเข้มสีของสารละลาย โดยค่าความเข้มสีที่อ่านค่าได้จะถูกนำมาพลอตเป็นคาลิเบรชั่นเคิร์ฟเทียบกับความเข้มข้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณเอทธาโนลามีนในตัวอย่างต่อไป

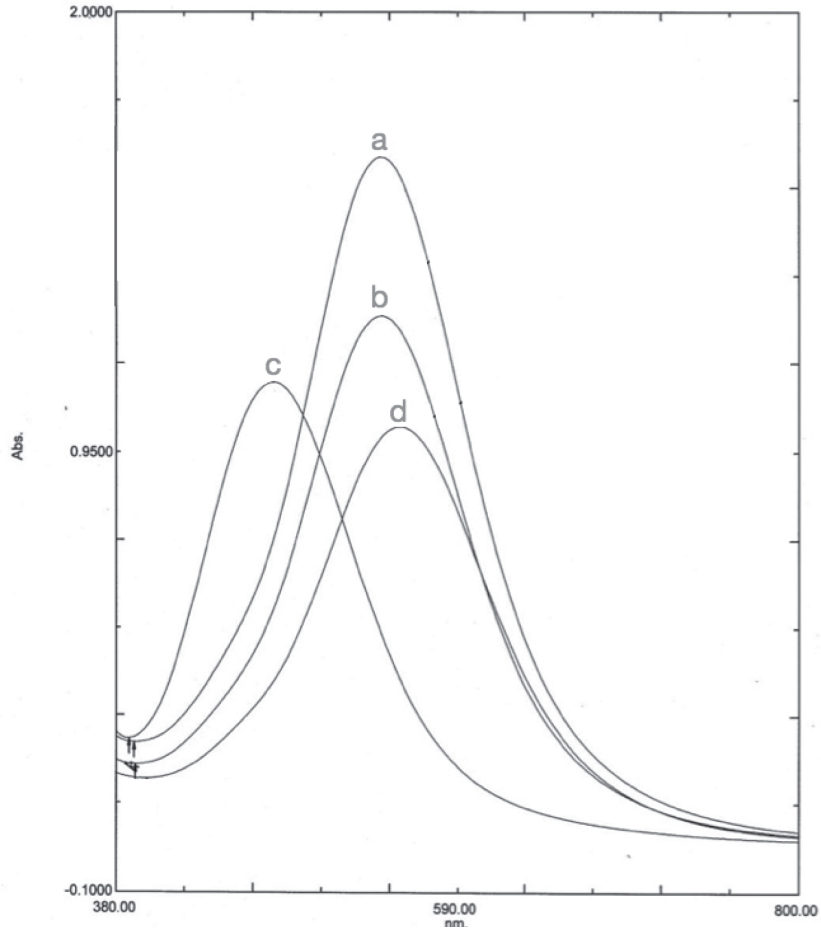
**2. ศึกษาการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรด้วยเครื่องยูวี-วิสซิเบิลสเปกโตรมิเตอร์**

เพื่อศึกษาถึงแนวโน้มของขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรซึ่งมีความสัมพันธ์กับสีของสารละลาย จึงนำสารละลายที่ต้องการศึกษามาทำการตรวจวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสซิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 390-800 นาโนเมตร (nm) โดยใช้คิวเวตมาตรฐานความกว้าง 1 เซนติเมตร

## ผลการวิจัย

### 1. สเปกตรัมการดูดกลืนแสงยูวี-วิสซิเบิล

เพื่อศึกษาถึงแนวโน้มของขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรซึ่งมีความสัมพันธ์กับสีของสารละลาย จึงนำสารละลายที่ต้องการศึกษามาทำการตรวจวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสซิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 390-800 nm โดยจากกยูวี-วิสซิเบิลสเปกตรัม (รูปที่ 2) แสดงให้เห็นถึงความยาวคลื่นของค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ซึ่งจะพบว่าที่สภาวะปกติอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรสามารถดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่น 542 nm (a) และการเติมโคบอลต์ซัลเฟตไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนตำแหน่งของความยาวคลื่น (b) แต่หากทำการเติมแคลเซียมคลอไรด์ลงไป จะพบว่าจากสเปกตรัมจะเกิดการเลื่อนตำแหน่งของความยาวคลื่นไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง (Blue shift) จาก 542 nm มายัง 477 nm (c) ซึ่งมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคเงินขนาดนาโนที่เกิดขึ้น โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีม่วงเป็นสีส้ม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคเงินขนาดนาโนที่มีขนาดเล็กลง ทั้งนี้ทางผู้วิจัยเชื่อว่าการเลื่อนตำแหน่งของความยาวคลื่นและการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นเกิดเนื่องจากในสภาวะที่มีแคลเซียมคลอไรด์อยู่ด้วยนั้น ออกซิเจนจะสามารถออกซิไดส์ (Oxidize) อนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรได้ทำให้อนุภาคเงินขนาดนาโนมีขนาดเล็กลงไปอีก ในขณะเดียวกัน หากในสารละลายมีเอทธาโนลามีนอยู่จากสเปกตรัมจะพบว่า ไม่เกิดการเลื่อนตำแหน่งของความยาวคลื่น (d) และสีของอนุภาคเงินขนาดนาโนยังคงมีสีม่วง ไม่เปลี่ยนแปลงเป็นสีส้ม ซึ่งจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ทางผู้วิจัยเชื่อว่าเอทธาโนลามีนนั้นสามารถยับยั้งการออกซิไดส์อนุภาคเงินขนาดนาโนจากออกซิเจนในสภาวะที่มีโคบอลต์และแคลเซียมคลอไรด์ได้ โดยความสามารถในการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสีนั้นมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเอทธาโนลามีน แต่สำหรับกลไกการยับยั้งการออกซิไดซ์อนุภาคเงินขนาดนาโนจากออกซิเจนในสภาวะที่มีโคบอลต์และแคลเซียมคลอไรด์ด้วยเอทธาโนลามีนนั้นยังอยู่ในขั้นตอนการศึกษาที่ละเอียดลงไป




**รูปที่ 2** แสดงยูวี-วิสซิเบิลสเปกตรัมของ (a) อนุภาคเงินขนาดนาโน 100 $mgL^{-1}$ (b) อนุภาคเงินขนาดนาโน 100 $mgL^{-1}$ และโคบอลต์ซัลเฟต 1000 $mgL^{-1}$ (c) อนุภาคเงินขนาดนาโน 100 $mgL^{-1}$, โคบอลต์ซัลเฟต 1000 $mgL^{-1}$ และ แคลเซียมคลอไรด์ 100 $mgL^{-1}$ และ (d) อนุภาคเงินขนาดนาโน 100 $mgL^{-1}$, โคบอลต์ซัลเฟต 1000 $mgL^{-1}$, เอทธาโนลามีน 100 $mgL^{-1}$ และแคลเซียมคลอไรด์ 100 $mgL^{-1}$

**2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการคัดกรองและตรวจวิเคราะห์เอทธาโนลามีน**

สภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองไม่ว่าจะเป็น ชนิดของอนุภาคเงินขนาดนาโน ผลของโคบอลต์ซัลเฟต และผลของความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ ล้วนแล้วแต่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการตรวจวิเคราะห์ทั้งสิ้น ดังนั้นในการทดลองจึงจะต้องมีการเลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการทดลอง

**2.1 ผลการศึกษาการเลือกชนิดของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรที่เหมาะสม**

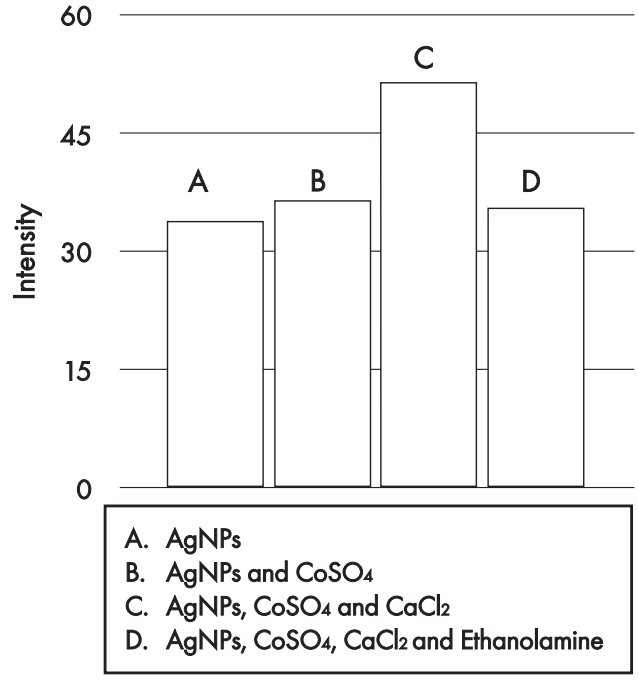
ปัจจัยแรกที่ส่งผลต่อการทดลองคือชนิดของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตร โดยในการทดลองอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรสีต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสีม่วง (ขนาดอนุภาค 45 nm) น้ำเงิน (ขนาดอนุภาค 50 nm) และ สีเหลือง (ขนาดอนุภาค 10 nm) ได้ถูกนำมาทดสอบ โดยพบว่าในสภาวะที่ไม่มีเอทธาโนลามีนอยู่นั้น (control) อนุภาคเงินขนาดนาโนสีม่วงสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีม่วงเป็นสีส้มซึ่งให้ค่าผลต่างของความเข้มสีที่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคเงินขนาดนาโนสีอื่นๆ ดังนั้นเมื่อมีเอทธาโนลามีน 100 $mgL^{-1}$ อยู่ การเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นจะถูกยับยั้ง ทำให้สารละลายยังคงมีสีม่วง และเมื่อทำการเปรียบเทียบความเข้มสีกับ control ซึ่งมีสีส้ม พบว่าจะให้ผลต่างความเข้มสีที่ชัดเจนที่สุดเมื่อเทียบกับอนุภาคเงินขนาดนาโนสีอื่นๆ ทางผู้วิจัยเชื่อว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากขนาดของอนุภาคเงินขนาดนาโน โดยอนุภาคเงินขนาดนาโนสีน้ำเงิน (ขนาด 50 nm) อาจมีขนาดที่ใหญ่เกินไป ทำให้เมื่อเกิดการออกซิไดส์ขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีแดงซึ่งให้ค่าผลต่างความเข้มสีที่น้อยกว่า ในขณะเดียวกันอนุภาคเงินขนาดนาโนสีเหลือง (ขนาด 10 nm) อาจมีขนาดที่เล็กเกินไป ทำให้การออกซิไดส์ เกิดขึ้นได้ยาก จึงมีการเปลี่ยนแปลงสีเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยและให้ผลต่างความเข้มสีสีน้อยเช่นเดียวกัน ดังนั้นอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรสีม่วงจึงได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

**2.2 ผลของการเติมโคบอลต์ซัลเฟต**

โคบลอต์ซัลเฟตจัดเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญต่อสภาวะการทดลอง ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีเอทธาโนลามีน 100 $mgL^{-1}$ โดยมีโคบอลต์ซัลเฟต 1000 $mgL^{-1}$ และปราศจากโคบอลต์ซัลเฟต พบว่าการมีอยู่ของโคบอลต์ซัลเฟตทำให้สารละลายยังคงมีสีม่วง หรือสามารถยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคเงินขนาดนาโนได้ โดยกลไกการยับยั้งการออกซิไดซ์อนุภาคเงินขนาดนาโนจากออกซิเจนในสภาวะที่มีโคบอลต์และแคลเซียมคลอไรด์ด้วยเอทธาโนลามีนที่แน่นอนนั้นยังคงอยู่ในขั้นตอนการศึกษาที่ละเอียดลงไป แต่ทางผู้วิจัยเชื่อว่า โคบอลต์สามารถประพฤติตัวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ในปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โคบอลต์ซัลเฟต 1000 $mgL^{-1}$ เป็นสารที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสีของเอทธาโนลามีน

### 2.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของแคลเซียมคลอไรด์

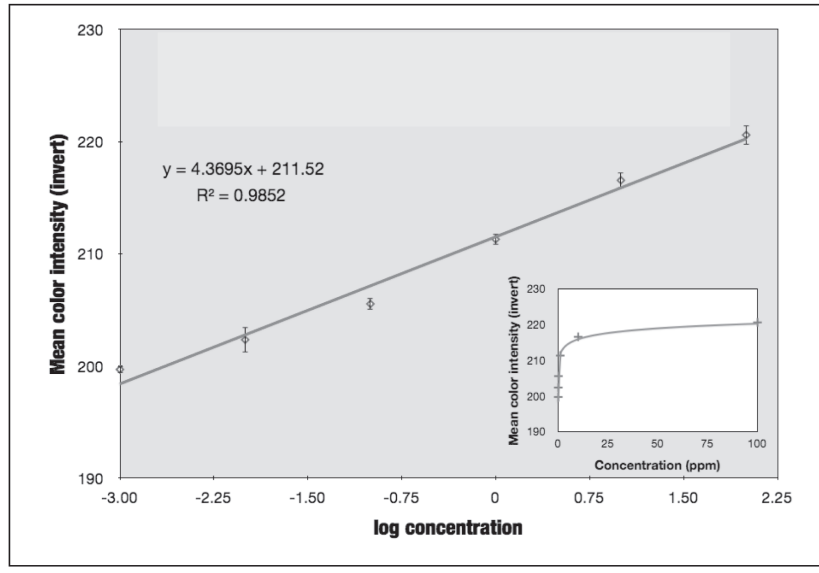
นอกจากนี้ ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ก็ส่งผลสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคเงินขนาดนาโน ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดสอบผลของการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคเงินขนาดนาโน โดยมีความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์เป็น 100 $mgL^{-1}$ และ 1000 $mgL^{-1}$ พบว่าการใช้แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1000 $mgL^{-1}$ ส่งผลทำให้การสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีนั้นทำได้ยาก เนื่องจากจะสังเกตการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเอทธาโนลามีนได้ลดลง ดังนั้นจึงเลือกใช้แคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 100 $mgL^{-1}$ รูปที่ 3 แสดงผลการคัดกรองและวิเคราะห์เอทธาโนลามีนในสภาวะที่เหมาะสม คือ ใช้สารละลายเงินขนาดนาโนเมตรสีม่วง โคบอลต์ซัลเฟต 1000 $mgL^{-1}$ และแคลเซียมคลอไรด์ 100 $mgL^{-1}$




**รูปที่ 3** แสดงการเปลี่ยนสีของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรในสภาวะที่มีเอทธาโนลามีน 100 $mgL^{-1}$ ด้วยอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรสีม่วงขนาดอนุภาค 35 nm เทียบกับ control (control คือ สารละลายผสมของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตร, โคบอลต์ซัลเฟต และ แคลเซียมคลอไรด์) ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสม

### 3. การทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์

ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่าการคัดกรองและตรวจวิเคราะห์เอทธาโนลามีนโดยวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นนั้น แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าความเข้มสีเฉลี่ย (Mean intensity) และล็อกการิทึมของความเข้มข้นของเอทธาโนลามีน (logarithmic concentration of ethanolamine) เป็นแบบเส้นตรง โดยช่วงความเป็นเส้นตรงนั้นอยู่ในช่วง 1 $\mu gL^{-1}$ ถึง 100 $mgL^{-1}$ โดยมีสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรง ($r^2$) เท่ากับ 0.9852 ดังแสดงในรูปที่ 4 และมีขีดจำกัดตรวจวัดและหาปริมาณเท่ากับ 0.5 $\mu gL^{-1}$ และ 1 $\mu gL^{-1}$ ตามลำดับ




**รูปที่ 4** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีเฉลี่ย (Mean intensity) และล็อกการิทึมของความเข้มข้นของเอทธาโนลามีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

ผลของการศึกษาความจำเพาะของวิธีวิเคราะห์ ทำการคัดกรองและวิเคราะห์เอทธาโนลามีนที่ความเข้มข้นเท่ากับ 100 $mgL^{-1}$ เมื่อมีการเติมสารรบกวน (Interference) อื่นๆ ที่อาจพบได้ในตัวอย่างน้ำทิ้ง เพื่อตรวจสอบดูว่าสารรบกวนเหล่านั้นมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนสีของสารละลายหรือไม่ โดยใช้หลักการว่าการรบกวนที่ยอมรับได้จะให้ช่วงค่าเบี่ยงเบนของความเข้มสีเฉลี่ยได้เท่ากับ ± 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความเข้มข้นของสารรบกวนที่มีผลต่อการตรวจวัดเอทธาโนลามีน แสดงในตารางที่ 1 จากผลการศึกษาพบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นมานี้มีความจำเพาะเจาะจงดีต่อการคัดกรองและวิเคราะห์เอทธาโนลามีน

**ตารางที่ 1** แสดงผลของสารรบกวนที่เติมลงไปที่ความเข้มข้นสูงมากจึงจะมีผลรบกวนต่อการวิเคราะห์

| สารรบกวน | อัตราส่วนความเข้มข้นของสารรบกวน (ความเข้มข้นของเอทาโนลามีนต่อความเข้มข้นของสารรบกวน) |
|---|---|
| $Zn^{2+}$, $Mn^{2+}$, $Mg^{2+}$, $Ni^{2+}$, $Cr^{6+}$<br>$Al^{3+}$, $Fe^{2+}$, $NO_3^-$, $NO_2^-$<br>$SO_4^{2-}$, $CN^-$, $CH_3COO^-$ | มากกว่า 1000 |

**4. ผลของการวัดปริมาณเอทธาโนลามีนในตัวอย่างน้ำทิ้ง**

ตัวอย่างที่เลือกทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ น้ำทิ้ง ทดสอบโดยการเติมสารมาตรฐานเอทธาโนลามีนลงไปในตัวอย่างที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน และนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ทำการศึกษาความเที่ยงและความแม่นของวิธี จากการตรวจวัดปริมาณเอทธาโนลามีนในตัวอย่างจริง พบว่าเมื่อทำการคำนวณหาค่าร้อยละการกลับคืน (%Recovery) มีค่าอยู่ในช่วง 98.70-116.32% และค่าความเที่ยง (%RSD) อยู่ในช่วง 5.58-7.36% จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้เป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นวิธีที่พัฒนาขึ้นจึงสามารถตรวจวัดปริมาณเอทธาโนลามีนในตัวอย่างจริงได้

## สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาวิธีที่ใช้ในการตรวจวัดเอทธาโนลามีนโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคเงินขนาดนาโน โดยวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นวิธีที่มีราคาถูก สะดวก รวดเร็ว และมีความไวในการตรวจวิเคราะห์ที่ดี จึงลดขีดจำกัดในการใช้งานจากเครื่องมืออื่นๆ ที่มีราคาแพงได้ อีกทั้งยังสามารถนำไปต่อยอดเพื่อพัฒนาเป็นอุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดเอทธาโลมีนแบบรู้ผลทันทีได้ในชีวิตประจำวัน โดยภายใต้สภาวะที่เหมาะสม วิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นพบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 1 $\mu gL^{-1}$ ถึง 100 $mgL^{-1}$ และมีขีดจำกัดตรวจวัดและหาปริมาณเท่ากับ 0.5 $\mu gL^{-1}$ และ 1 $\mu gL^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ครอบคลุมระดับของสารเอทธาโนลามีนที่สามารถยอมให้มีได้ (threshold limit value, TLV) คือ 3 $mgL^{-1}$ อีกทั้งยังสามารถติดตามผลได้จากการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดได้อย่างง่ายและรวดเร็ว โดยหากสารละลายนั้นมีเอทธาโนลามีนอยู่ เอทธาโนลามีนจะสามารถยับยั้งการเปลี่ยนแปลงจากสีของอนุภาคเงินขนาดนาโนเมตรจากสีม่วงเป็นสีส้มได้ ซึ่งสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ด้วยตาเปล่าโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือใดๆ จึงเป็นการประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายจากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือที่มีราคาแพงและใช้เวลานาน และสามารถพัฒนาต่อไปเป็นชุดตรวจวัดสารเอทธาโนลามีนสืบต่อไปในอนาคตได้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัย ประจำปี 2558 (รหัสโครงการ 189/2558) ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และหน่วยปฏิบัติการเชิงไฟฟ้าเคมีและแสง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์เพิ่มเติมสำหรับการศึกษาและการพัฒนาวิธีวิเคราะห์เอทธาโนลามีน

## เอกสารอ้างอิง

1. D., A.; Sengupta, A.; Kumar, S. D.; Kumbhar, A. G.; Venkateswaran, G. 2011. Derivatization Ion Chromatography for the Determination of Monoethanolamine in Presence of Hydrazine in PHWR Steam-Water Circuits. *International Journal of Analytical Chemistry,* 2011, 1-5.
2. Prasanna, S.J.; Kumar, K.S.R.P.; Mukkanti, K.; Kumar, V.J.; Sharma, H.K. 2010. A Simple and Sensitive Ion Chromatography Method for the Determination of Ethanolamine in Parmaceutical Drug Substances. *Der Pharma Chemica,* 2(4), 409-416.
3. Modica-Napolitano, J. S.; Renshaw, P. F. 2004. Ethanolamine and Phosphoethanolamine Inhibit Mitochondrial Function in vitro: Implications for Mitochondrial Dysfunction Hypothesis in Depression and Bipolar Disorder. *Biological Psychiatry,* 55 (3), 273-277.
4. Piekos, R.; Kobylczyk, K.; Grzybowski, J. 1975. Quantitative Gas Chromatographic Determination of Ethanolamines as Trimethylsilyl Derivatives. *Analytical Chemistry,* 47 (7), 1157-1159.
5. McMaster, C.; Choy, P. 1992. The Determination of Tissue Ethanolamine Levels by Reverse-Phase High-Performance Liquid Chromatography. *Lipids,* 27 (7), 560-563.
6. Mrklas, O.; Chu, A.; Lunn, S. 2003. Determination of Ethanolamine, Ethylene Glycol and Triethylene Glycol by Ion Chromatography for Laboratory and Field Biodegradation Studies. *Journal of Environmental Monitoring,* 5 (2), 336-340.

*ได้รับบทความวันที่ 18 กันยายน 2558*
*ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 4 พฤศจิกายน 2558*