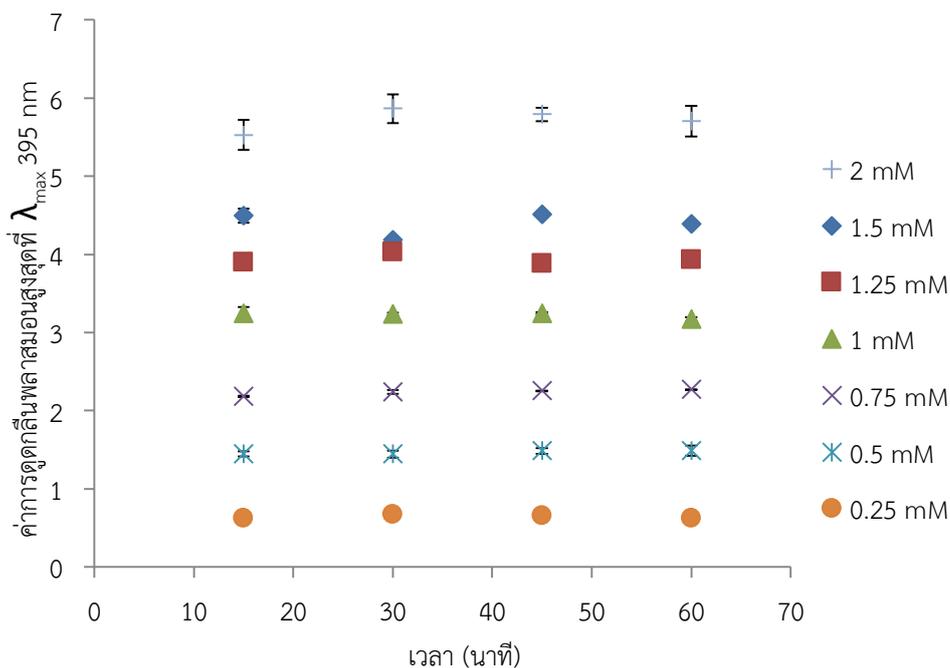


บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1. การตรวจวัดทางสีของปรอท (II) ไอออนแบบง่ายและรวดเร็วโดยอาศัยการติดตามการลดลงของอนุภาคเงินนาโน (AgNPs) ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy)

4.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์การสังเคราะห์ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิว

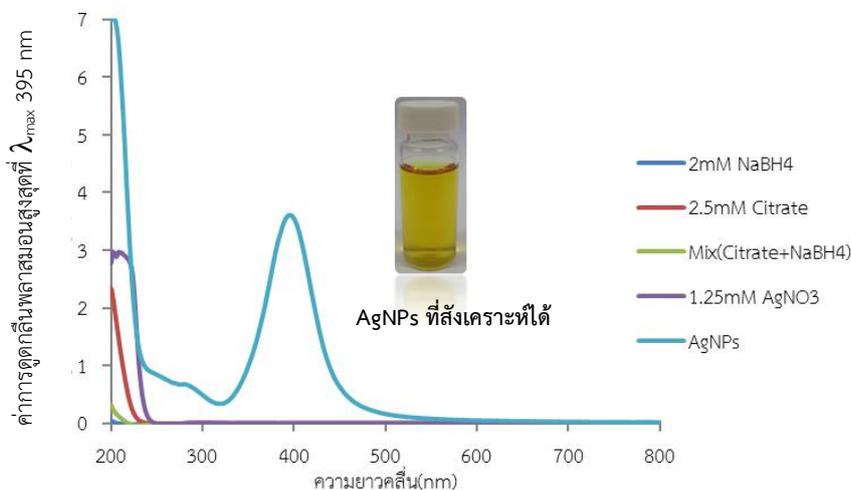
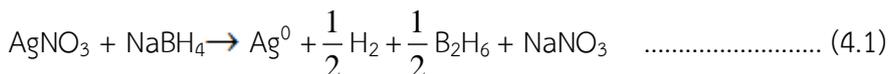
จากการสังเคราะห์สารละลาย AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวตามวิธีการทดลองที่ 3.3.2 ในการศึกษาความเข้มข้นของ AgNO_3 (สารตั้งต้น) ที่เหมาะสมและเวลาในการสังเคราะห์ AgNPs ที่เหมาะสม ทำการศึกษาโดยใช้หลักเกณฑ์ในการศึกษาดังนี้ คือได้ค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่สอดคล้องตามกฎของเบียร์ ($\text{Abs} \leq 1$) และใช้เวลาน้อยในการสังเคราะห์ AgNPs ที่เกิดปฏิกิริยาเป็น AgNPs ได้สมบูรณ์ (ค่าดูดกลืนพลาสมอนคงที่) เพราะ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้จะมาประยุกต์ใช้ตรวจวัดทางสีของปรอท (II) ไอออนในแหล่งน้ำ โดยในการศึกษาจะใช้ควบคุมสารละลายผสมระหว่าง NaBH_4 ความเข้มข้น 2 mM ปริมาตร 15 mL และ 2.5 mM tri-sodium citrate ปริมาตร 2 mL ให้คงที่และศึกษาความเข้มข้นของสารละลาย AgNO_3 ที่ความเข้มข้น 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 2, 3, 4, 4.5, 5, 5.5 และ 6 mM ตามลำดับที่มีปริมาตรสุดท้ายเป็น 5 mL และใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่ 15, 30, 45 และ 60 นาทีตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ $\lambda_{\text{max}} 395 \text{ nm}$ และเวลาในการสังเคราะห์ (นาที) ที่ความเข้มข้นของ AgNO_3 เป็น 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5 และ 2 mM ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.1 ค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ถูกบันทึกได้ในช่วง λ_{max} 395 nm พบว่าที่ความเข้มข้น 1.25 mM AgNO₃ ให้ค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดโดยสอดคล้องตามกฎของเบียร์ (Abs ≤ 1) เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่สังเคราะห์ได้มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดทางสีของปรอท (II) (เมื่ออยู่ในปริมาตรรวม 5 ml ซึ่งจะถูกเจือจางประมาณ 3 เท่า โดยจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 4.1.4) ที่ความเข้มข้นสูงกว่า 1.25 mM พบว่าค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดไม่สอดคล้องตามกฎของเบียร์ และมีเสถียรภาพที่ไม่ดี โดยการสังเคราะห์ AgNPs ตั้งแต่เวลาที่ 30 นาทีเป็นต้นไปค่าการดูดกลืนพลาสมอนเริ่มคงที่ ซึ่งบ่งบอกได้ว่า AgNPs เกิดได้สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของคุณ Solomon D.S. และคณะ [44] โดยจะต้องมีอัตราส่วนของตัวรีดิวซ์ (reducing agent) ในงานวิจัยนี้ใช้เป็น NaBH₄ ต่อสารตั้งต้น (AgNO₃) ประมาณ 6 ต่อ 1 เพื่อเสถียรภาพที่ดีของ AgNPs ที่สังเคราะห์ได้

จากการศึกษาความเข้มข้นของ AgNO₃ (สารตั้งต้น) และเวลาในการสังเคราะห์ AgNPs ที่เหมาะสม พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.25 mM และ 30 นาทีตามลำดับ โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้องในการสังเคราะห์พบว่าจะได้สารละลายสีเหลืองใสของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวดังรูปที่ 4.2 จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) โดยมีความยาวคลื่นของการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของโลหะนาโนในช่วงที่ตามองเห็นที่ λ_{max} ประมาณ 395 nm เนื่องจากเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิว [53] โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นสามารถแสดงดังสมการที่ (4.1)



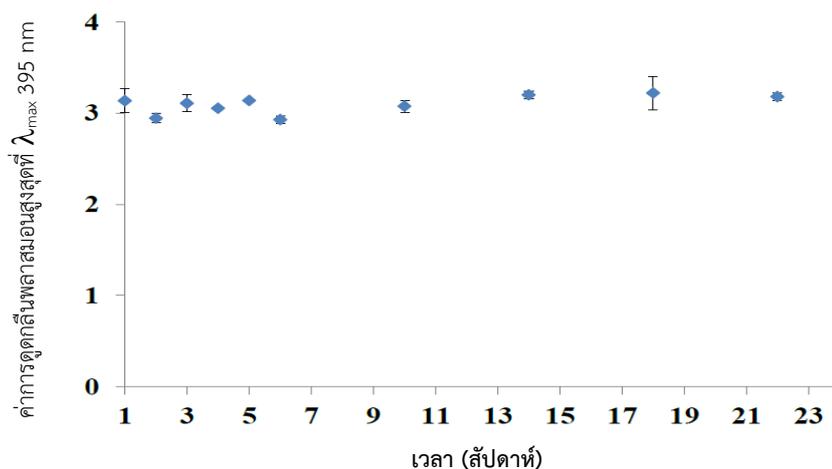
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิว

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้ตัวรีดิวซ์ (reducing agent) และตัวเพิ่มความเสถียร (stabilizing agent) เป็น NaBH₄ และ tri-sodium citrate ตามลำดับ จากสมการที่ (1.1) เลขออกซิเดชันของ Ag จะเปลี่ยนจาก +1 ไปเป็น 0 ซึ่งบ่งบอกถึงความเป็นอนุภาคนาโนของ Ag นอกจากนี้ความยาวคลื่นของการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของโลหะนาโนยังสามารถบอกแนวโน้มของขนาดได้โดยการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของโลหะนาโน

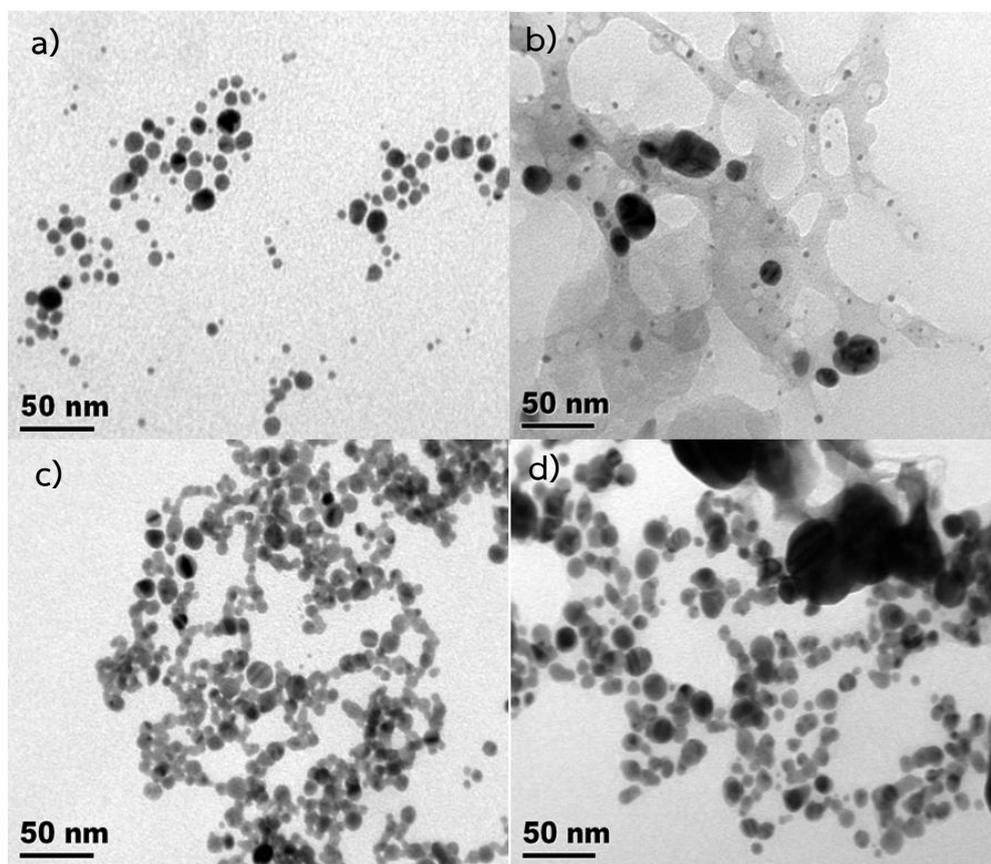
เลื่อนไปทาง red shift (ความยาวคลื่นมากขึ้น) ขนาดอนุภาคนาโนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ในทางกลับกันถ้าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของโลหะนาโนเลื่อนไปทาง blue shift (ความยาวคลื่นน้อยลง) ขนาดของอนุภาคนาโนจะมีขนาดเล็กลง จากการพัฒนาการสังเคราะห์ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวในงานวิจัยนี้พบว่าไม่มีความซับซ้อนในขั้นตอนและมีความรวดเร็วในการสังเคราะห์เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ได้รายงานก่อนหน้านี้ [32-34] นอกจากนี้ยังพบว่าการสังเคราะห์ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถสังเคราะห์ซ้ำได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และยังให้เสถียรภาพที่ดีในสภาวะอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลาหลายเดือน ดังผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3 จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ใช้สภาวะตามตารางที่ 4.2 พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ AgNPs ที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 8.3 ± 1.4 nm (นับจำนวนเท่ากับ 95) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 a) จากรูปพบว่า AgNPs กระจายตัวได้ดีในสารละลายโดยมีความเข้มข้นโดยมวล (mass concentration) เท่ากับ 0.674 mg/mL และมีจำนวนอนุภาคนาโนต่อปริมาตร (number concentration) เท่ากับ 0.135×10^{13} nanoparticles/mL ตามลำดับโดยใช้วิธีการคำนวณอ้างอิงจากงานวิจัยของ Solomon D.S. และคณะ [52]

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดที่บันทึกได้ในช่วง λ_{\max} 395 nm ของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่สังเคราะห์ขึ้นเองในแต่ละครั้ง

ครั้งที่	λ_{\max} (nm)	ค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิว
1	395	2.974
2	395	3.050
3	395	2.942
4	394	2.901
5	394	2.788
6	395	2.870
7	395	2.966
8	395	2.954



รูปที่ 4.3 แสดงความคงตัวของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิว ที่สังเคราะห์ขึ้นเองที่อุณหภูมิห้อง โดยทำ 3 ซ้ำจากการสังเคราะห์ 3 ชุด (n เท่ากับ 3)



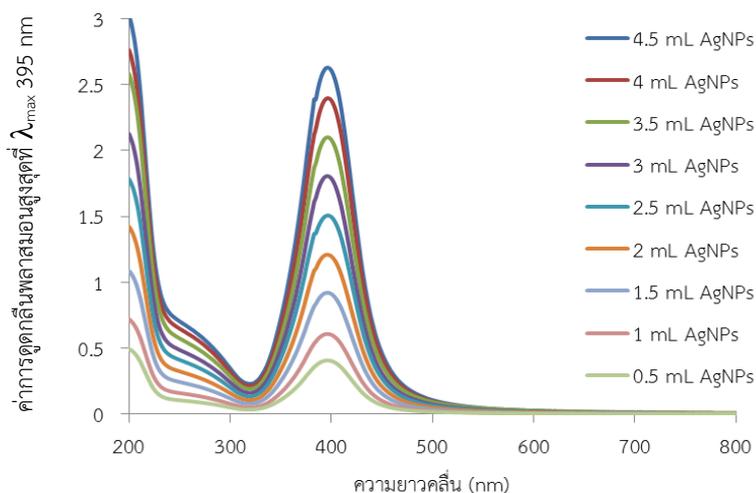
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) แสดงการกระจายตัวของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวในสถานะ (a) ปกติ (b) เมื่อทำปฏิกิริยากับโปรท (II) ที่ความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 5 ppm (c) ทำปฏิกิริยากับ Cu(II) และ (d) เติมโปรท (II) จนมีความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 5 ppm ในสถานะที่มี Cu(II) ร่วมด้วย

ตารางที่ 4.2 แสดงสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เครื่อง TEM

TEM operating conditions	
Beam current (μA)	56
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	25
Humidity (%)	25
Acceleration voltage (kV)	80

4.1.2 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่มีผลต่อการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs เพื่อการตรวจวัดทางสีของปรอท (II)

จากสภาวะที่เหมาะสมของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวจาก 4.1.1 ต้องทำการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่มีผลต่อการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs เพื่อการตรวจวัดทางสีของปรอท (II) ศึกษาโดยใช้ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่ปริมาตร 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 และ 4.5 mL ตามลำดับโดยปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 5 mL ด้วยน้ำ DI ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5

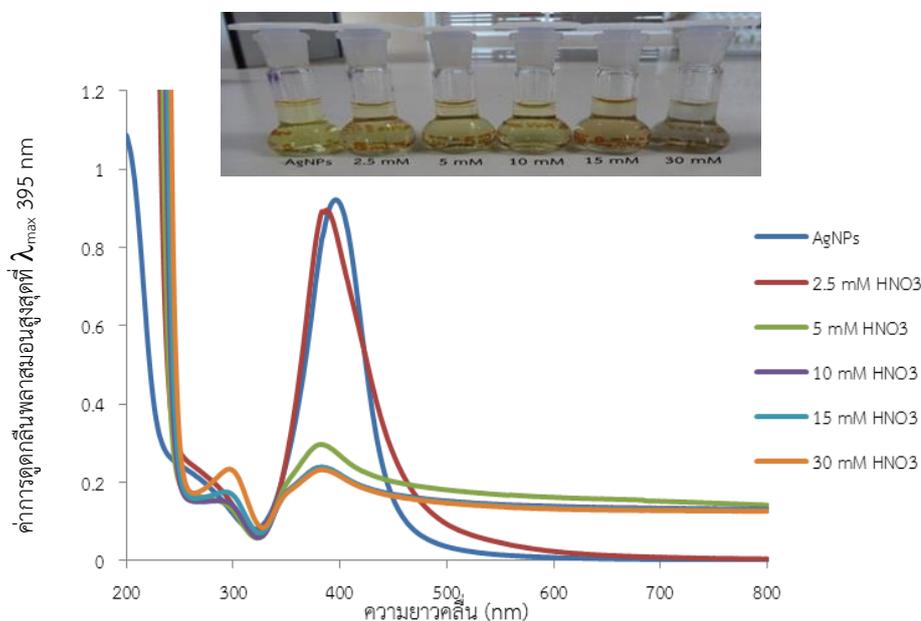


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ปริมาตรต่างๆ ที่ λ_{max} ประมาณ 395 nm

จากรูปที่ 4.5 พบว่าปริมาตรที่ 1.5 mL ของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวให้ค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดที่ λ_{max} ประมาณ 395 nm สอดคล้องตามกฎของเบียร์ ($\text{Abs} \leq 1$) บ่งบอกว่าปริมาตรที่ 1.5 mL ของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวนั้นเป็นปริมาตรที่เหมาะสมที่จะใช้ในการตรวจวัดปรอท (II) เนื่องจาก AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับการตรวจวัดทางสีของปรอท (II) ดังนั้น ปริมาตรที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวคือ 1.5 mL ซึ่งจะเป็นปริมาตรที่ใช้ในการทดลองต่อไป

4.1.3 การศึกษาผลของ pH ที่มีผลต่อการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวเพื่อการตรวจวัดทางสีของปรอท (II)

เนื่องจากการวิจัยในส่วนนี้มีกรดไนตริก (HNO_3) เป็นองค์ประกอบในตัวละลายปรอท (II) ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาผลของ pH ของสารละลายต่อการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวเพื่อการตรวจวัดทางสีของปรอท (II) โดย ปิเปตสารละลาย AgNPs ปริมาตร 1.5 mL ลงใน ขวดวัดปริมาตรขนาด 5 mL จากนั้นปรับปริมาตรด้วยสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ที่ความเข้มข้น 2.5, 5, 10, 15 และ 30 mM ตามลำดับ เขย่าให้เข้ากัน โดยมีความเข้มข้นสุดท้ายในปริมาตร 5 mL ดังนี้ 1.75, 3.5, 7, 10.5 และ 21 mM ตามลำดับและมี pH เท่ากับ 4.0, 3.0, 2.5, 2.0 และ 1.5 ตามลำดับ โดยศึกษาค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงของสภาวะต่างๆ โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลต วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) และบันทึกค่า pH โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิว ที่ λ_{\max} ประมาณ 395 nm เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก (HNO_3) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 เมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกเพิ่มมากขึ้นการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวจะเริ่มลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่ 3.5 mM HNO_3 ซึ่งมีค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 3.0 เนื่องจากสารละลายมาตรฐานปรอท (II) ที่เตรียมมีความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 50 mL (จะมีความเข้มข้นสุดท้ายของกรดไนตริกเท่ากับ 4.67 mM) อีกทั้งในการทดลองนี้สนใจความเข้มข้นปรอทในช่วง 0.05-15 ppm เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3

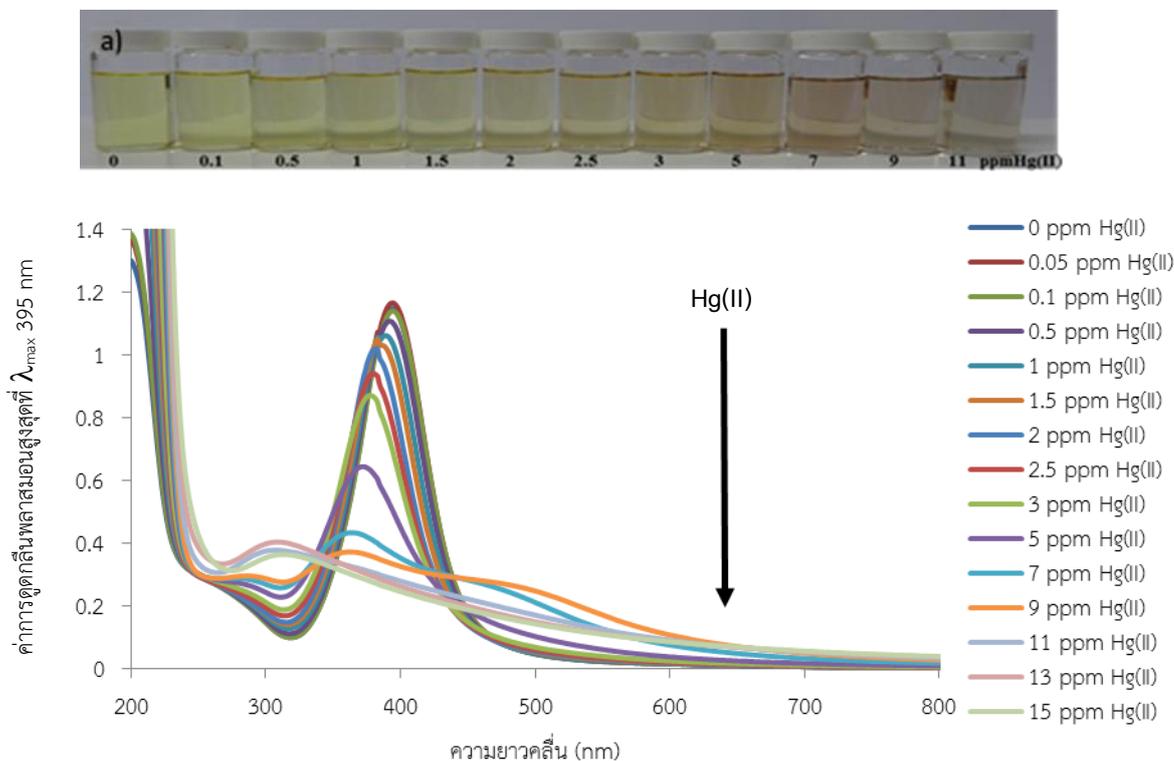
ตารางที่ 4.3 แสดงความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่างๆของปรอท (II) และค่า pH ของระบบที่เกิดขึ้น (ปิเปตสารละลาย AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวปริมาตร 1.5 mL ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 5 mL จากนั้นปรับปริมาตรด้วยสารละลายปรอท (II) ความเข้มข้น 0.1-11 ppm (ในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ DI))

ความเข้มข้นปรอท (II) (ppm)	ความเข้มข้นกรดไนตริกในปริมาตรรวม 5 mL (mM)/(pH)	pH ของระบบที่มี ปรอท (II)
0.0	0.000/(6.0)	5.0
0.1	0.009/(6.0)	5.0
0.5	0.048/(6.0)	5.0
1.0	0.093/(6.0)	5.0
1.5	0.140/(6.0)	4.5
2.0	0.187/(6.0)	4.5
2.5	0.234/(6.0)	4.5
3.0	0.280/(5.5)	4.0
5.0	0.467/(5.5)	4.0
7.0	0.654/(5.5)	3.5
9.0	0.841/(5.5)	3.5
11.0	1.028/(5.0)	3.5

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นปรอทในช่วง 0.1-11 ppm ซึ่งมีความเข้มข้นของกรดไนตริกประมาณ 1 mM และมีค่า pH ของระบบที่มีปรอทเท่ากับ 3.5 ดังนั้นกรดไนตริกที่ใช้ในการละลายปรอท (II) จะไม่มีผลรบกวนการวิเคราะห์

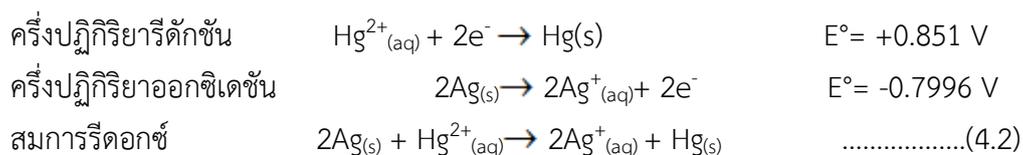
4.1.4 การศึกษาช่วงการตอบสนองแบบเป็นเส้นตรง (linear range) ในการตรวจวัดทางสีของปรอท (II) และความเที่ยง (precision)

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่างๆ ดังแสดง 4.1.1-4.1.3 จะใช้สภาวะที่เหมาะสมศึกษาช่วงการตอบสนองแบบเป็นเส้นตรง (linear range) ในการตรวจวัดทางสีของปรอท (II) และความเที่ยง (precision) ดังแสดงใน 3.3.3



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ λ_{\max} ประมาณ 395 nm เมื่อทำปฏิกิริยากับปรอท (II) ที่ความเข้มข้น

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเติมปรอท (II) ลงใน AgNPs จะทำสีเหลืองเข้มเริ่มต้นจางลงเรื่อยๆ ภายใน 30 วินาที ตามความเข้มข้นของปรอทเพิ่มขึ้น อีกทั้งค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs มีค่าลดลง และมีแนวโน้มเลื่อนมาทางความยาวคลื่นน้อยลง (blue shift) โดยสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้รายงานมาแล้ว [54-56] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารละลายมีความเป็น AgNPs ลดลงหรือ AgNPs มีขนาดเล็กลง โดยที่สามารถอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (reduction potential) ของ Ag^+/Ag มีค่าเท่ากับ 0.7996 V ซึ่งน้อยกว่าของ Hg^{2+}/Hg ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.851 V [57] ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า AgNPs สามารถรีดิวซ์ปรอท (II) ให้เป็นปรอท (0) ได้หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า ปรอท (II) สามารถออกซิไดซ์ AgNPs จึงทำให้เลขออกซิเดชันของ Ag เปลี่ยนจาก 0 เป็น +1 ดังแสดงในสมการที่ (4.2)

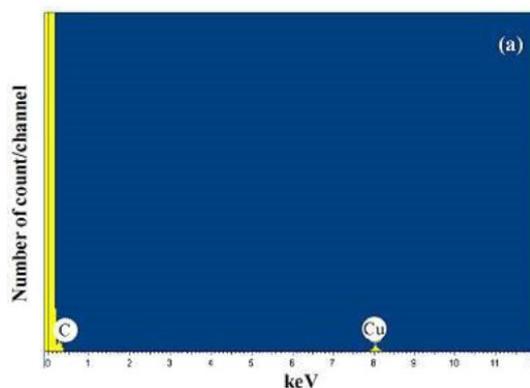


นอกจากนี้ยังคาดว่าโลหะปรอท ($\text{Hg}(s)$) ที่เกิดขึ้นในสารละลายดังสมการที่ (4.2) จะยึดเกาะบนพื้นผิวของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่เหลือในระบบทำให้ได้เป็นสารประกอบเมอร์คิวรีอะมัลกัม (amalgam particles of mercury, (Hg-Ag)) โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ [57] โดยสามารถยืนยันผลได้ด้วยเทคนิควิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDs) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ที่รายงานว่ามีธาตุเงิน และปรอท เหลืออยู่บนคอปเปอร์กริดที่เคลือบด้วยคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 b) เนื่องจากการเกิด (amalgam particles of mercury, (Hg-Ag)) จะยึดจับกันอย่างแข็งแรง [55-56] และเกิดขึ้นได้โดยง่าย ส่งผลให้ลดความหนาแน่นของโมเลกุลของซีเตรตที่เป็นประจุลบทำหน้าที่คงตัวของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวไว้ทำให้ขนาดของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยากับปรอท (II) ที่ความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 5 ppm ดังแสดงใน รูปที่ 4.4 b) และตารางที่ 4.4 จากรูปที่ 4.4 b) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าขนาดของ AgNPs ที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวจะมีทั้งขนาดเล็ก และใหญ่ขึ้นพร้อมกันเมื่อมีการเติมสารละลายปรอท (II) ลงในระบบเมื่อสามารถเปรียบเทียบกับขนาดของ AgNPs ที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 a)

เทคนิคการวัดขนาดอนุภาคแบบไฮโดรไดนามิก และศักย์ซีต้า (The hydrodynamic size and zeta potential) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจในการยืนยันว่าการเติมปรอทลงใน AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวทำให้ความเสถียรของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวลดลง โดยพิจารณาจากค่าศักย์ซีต้า หากค่าศักย์ซีต้ามีค่ามากกว่า -30 mV หรือ มากกว่า +30 mV จะมีความเสถียรสูง [58] โดยในงานวิจัยนี้ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวจะมีค่าศักย์ซีต้าที่ประมาณ -35 mV เมื่อเติมปรอทลงไปที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ซีต้าจะมีค่ามากกว่า -30mV ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปรอทจะทำให้เสถียรภาพของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งสอดคล้องกับการอธิบายผลข้างต้น

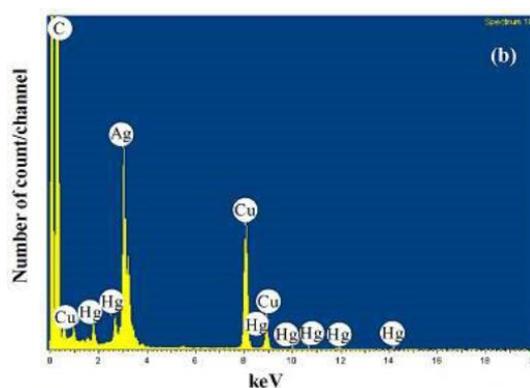
a)

Element	Peak Area	Area Sigma	k factor	Abs Corr.	Weight%
C K	5423	44	0.737	1	94.89
Cu K	472	36	0.456	1	5.11
Totals					100



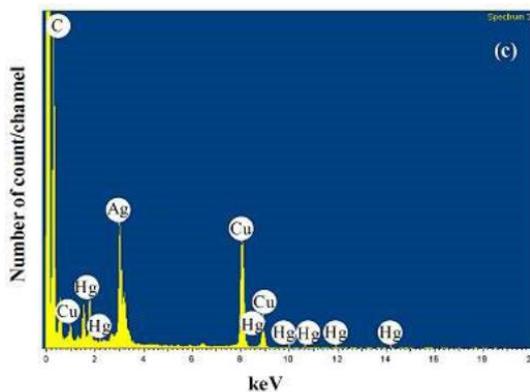
b)

Element	Peak Area	Area Sigma	k factor	Abs Corr.	Weight%
C K	21628	323	0.737	1	55.52
Cu K	11754	187	0.456	1	18.66
Ag K	4903	168	1.499	1	25.59
Hg L	74	64	0.893	1	0.23
Totals					100



c)

Element	Peak Area	Area Sigma	k factor	Abs Corr.	Weight%
C K	11727	246	0.737	1	46.27
Cu K	11353	184	0.456	1	27.71
Ag K	3222	139	1.499	1	25.85
Hg L	38	59	0.893	1	0.18
Totals					100

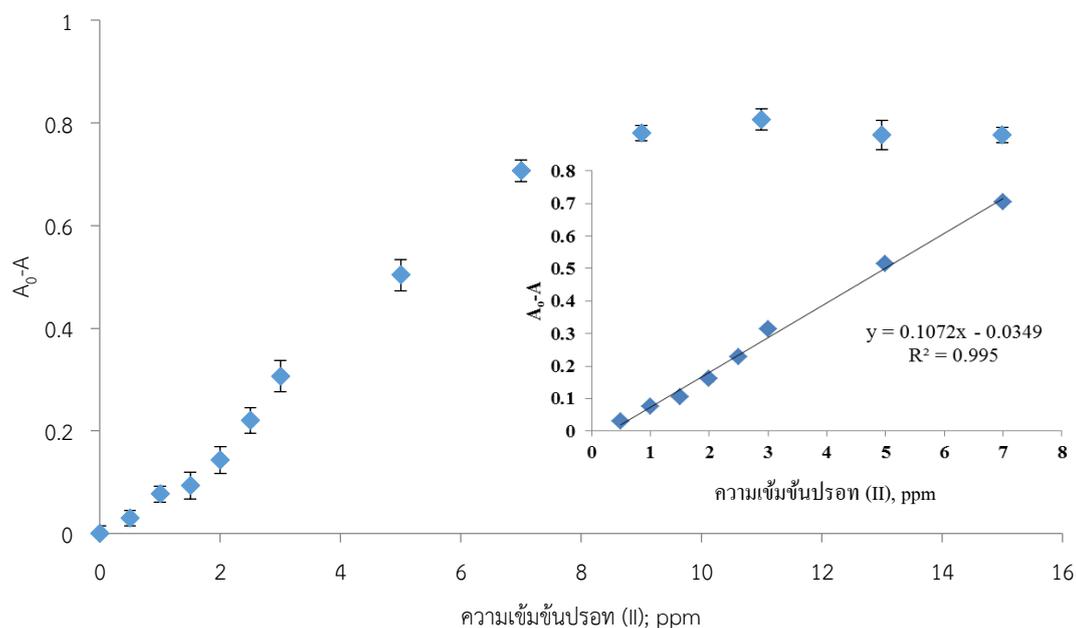


รูปที่ 4.8 แสดงข้อมูลที่ได้จากเทคนิค EDs และ EDs spectra ของ a) คอปเปอร์กิริตเคลือบด้วยคาร์บอน b) AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่ถูกเหนี่ยวนำโดยการเติม สารละลายปรอท (II) ไอออน ที่ความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 5 ppm c) AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่ถูกเหนี่ยวนำโดยการเติม สารละลายคอปเปอร์ (II) ไอออน และสารละลายปรอท (II) ไอออน ที่ความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 12.5 และ 5 ppm ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของสารละลายปรอท (II) ไอออน ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน กับขนาดอนุภาคแบบไฮโดรไดนามิกและค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินนาโน (AgNPs) ในกรณีที่ไม่มีและมีคอปเปอร์ (II) ไอออนเข้มข้น 12.5 ppm ที่ความเข้มข้นสุดท้าย ตามลำดับ จากการทำ 3 ซ้ำของการสังเคราะห์ AgNPs ครั้งเดียว (n เท่ากับ 3)

Hg (II) concentration (ppm)	The absence of Cu (II)		The presence of Cu(II) 12.5 ppm	
	Particle size (nm)	Zeta potential (mV)	Particle size (nm)	Zeta potential (mV)
0	24.5 ± 0.9	-35.1 ± 0.4	60.6 ± 2.0	-14.1 ± 0.2
1	39.7 ± 1.2	-18.8 ± 0.4	86.8 ± 0.8	-13.1 ± 1.6
5	56.4 ± 0.8	-11 ± 0.8	104.4 ± 0.6	-11.7 ± 0.9

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายปรอท (II) เพิ่มมากขึ้นการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่ λ_{max} ประมาณ 395 nm มีค่าลดลงตามความเข้มข้นของปรอท (II) ที่เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มเลื่อนมาทางความยาวคลื่นน้อยลง (blue shift) ตามการอภิปรายผลข้างต้น โดยมีช่วงความเป็นเส้นตรง (linear dynamic range) ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า A_0-A ของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่ λ_{max} ประมาณ 395 nm กับความเข้มข้นปรอท (II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ และช่วงความเป็นเส้นตรง (รูปเล็ก)

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง A₀-A (A₀ คือค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่ λ_{max} ประมาณ 395 nm กรณีที่ไม่มีสารละลายปรอท และ A คือค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่ λ_{max} ประมาณ 395 nm กรณีที่มีสารละลายปรอท (II) ที่ความเข้มข้น โดยมีช่วงความเป็นเส้นตรง (linear working range) ของปรอทตั้งแต่ 0.5-7 ppm โดยมีสมการเส้นตรงดังแสดง $y = 0.1072x - 0.0349$ และมีค่า $r^2=0.995$ โดยมีขีดจำกัดของการตรวจวัดต่ำสุด (limit of detection; LOD) เท่ากับ 0.06 ppm คำนวณจาก $3SD_{blank}/slope$ โดยที่ SD_{blank} คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสารละลาย blank จำนวน 10 ครั้ง และความไวในการวิเคราะห์เทคนิคที่พัฒนาขึ้นมาจากความชันของกราฟมาตรฐาน นอกจากนี้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นมีความเที่ยงตรงที่ดีจากทำซ้ำโดยมาจากการสังเคราะห์ AgNPs ที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิว 4 ชุดการทดลอง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5

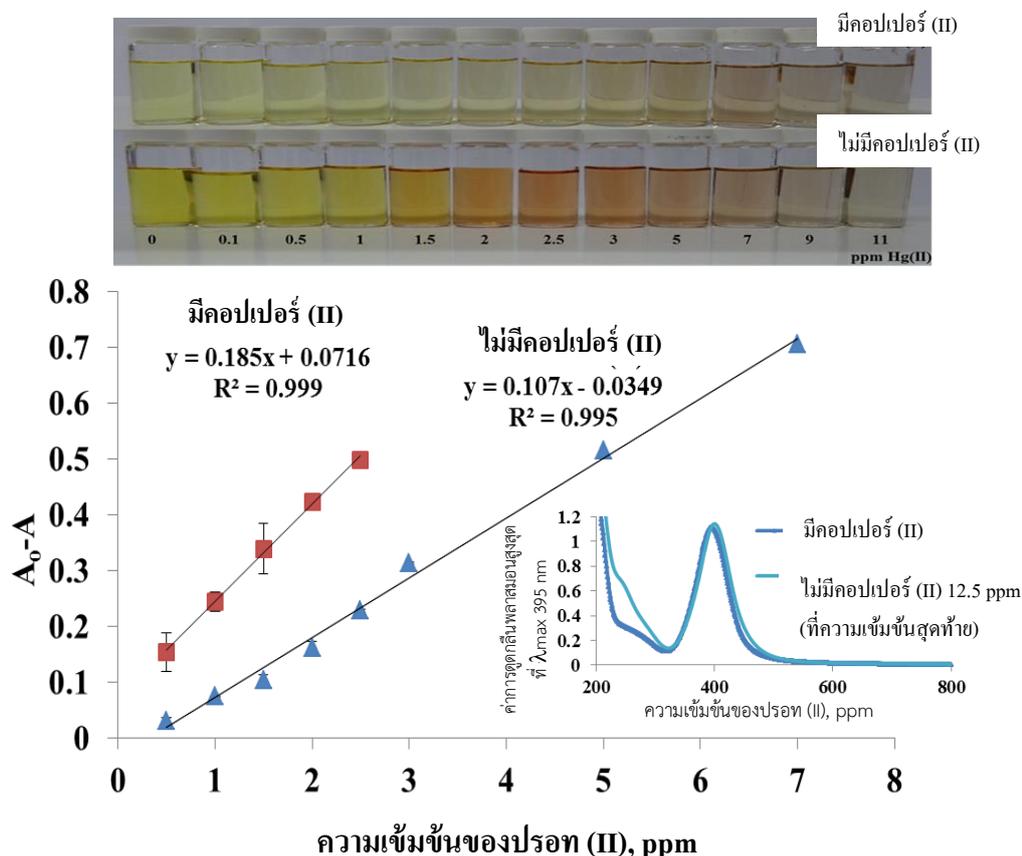
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ λ_{max} 390-400 nm ความเข้มข้นปรอท (II) 1, 3 และ 5 ppm (n=4) ที่มาจากการสังเคราะห์ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิว 4 ครั้ง

ครั้งที่ ปรอท(II),ppm	ค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่ λ_{max} 390-400 nm		
	1	3	5
1	1.06	0.82	0.63
2	1.12	0.87	0.66
3	1.04	0.80	0.60
4	1.07	0.86	0.66
\bar{X}	1.07	0.84	0.64
S.D.	0.035	0.033	0.029
RSD	3.24	3.99	4.53

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่า RSD หรือค่าความเที่ยงในการตรวจวัดที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 ppm มีค่าไม่เกิน 5% ซึ่งยอมรับได้ จากผลการทดลองสามารถบอกได้ว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมีความเที่ยงสูง นอกจากนี้ระบบการตรวจวัดปรอท (II) บนสารละลายที่พัฒนาขึ้นนี้พบว่ามีความการวิเคราะห์ได้แก่ ช่วงการตอบสนองแบบเป็นเส้นตรงและ ขีดจำกัดการตรวจวัดต่ำสุดที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ได้รายงานไว้ [32,34]

4.1.5 การศึกษาผลของคอปเปอร์ (Cu (II)) ต่อการเพิ่มความไวของการวิเคราะห์

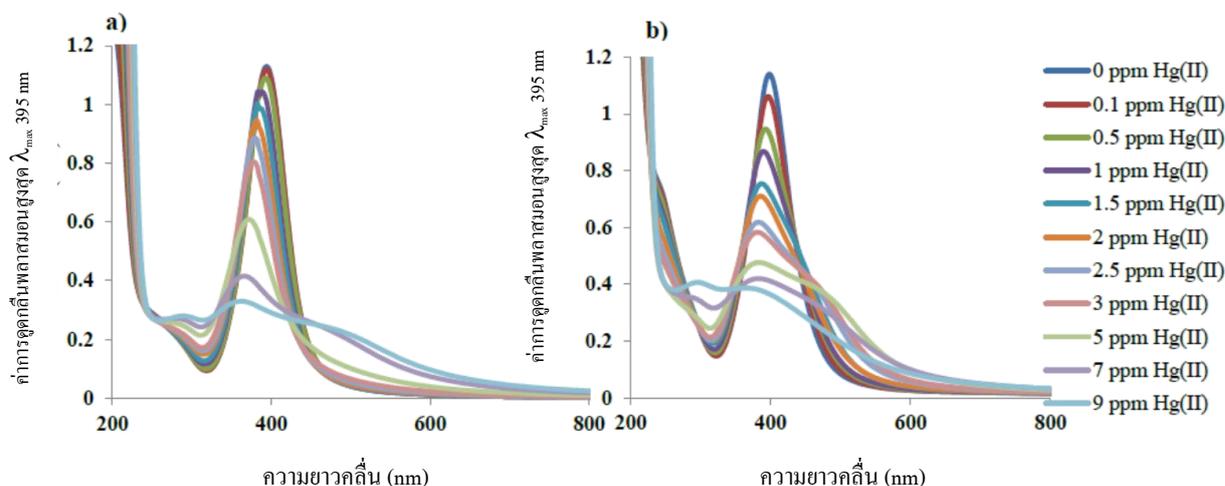
จากการศึกษาช่วงการตอบสนองแบบเป็นเส้นตรง (linear range) ในการตรวจวัดทางสีของปรอท (II) และความเที่ยง (precision) ใน 4.1.4 โดยการใช้สารละลายคอปเปอร์ 50 ppm ปริมาตร 1.25 mL จะได้ความเข้มข้นสุดท้ายของคอปเปอร์ (II) ไอออนเป็น 12.5 ppm ตามการทดลองที่อธิบายใน 3.3.3 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของสีของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวเมื่อมีปรอทที่มีความเข้มข้นต่างๆ (ด้านบน) กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $A_0 - A$ และความเข้มข้นของปรอท (II) ก่อน และหลังเติม 12.5 ppm ของคอปเปอร์ (II) (n เท่ากับ 3). (รูปเล็ก) ค่าการดูดกลืนสูงสุดของ AgNPs ก่อนและหลังเติม 12.5 ppm ของคอปเปอร์ (II)

จากรูปที่ 4.10 พบว่า AgNPs ที่มี 12.5 ppm ของคอปเปอร์ (II) ที่ความเข้มข้นสุดท้ายสามารถเพิ่มความไวของการตรวจวัดได้จริง โดยมีสีของสารละลาย AgNPs ที่เข้มข้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีคอปเปอร์ (II) ที่ความเข้มข้นของปรอท (II) มากขึ้น โดยทำการทดลองเหมือน 4.1.4 เนื่องจากค่า $A_0 - A$ มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้กราฟมาตรฐานมีค่าความชันมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.6 ส่งผลให้ค่า LOD มีค่าลดลงเท่ากับ 0.008 ppm นอกจากนี้คอปเปอร์ (II) ที่ความเข้มข้น 12.5 ppm ไม่มีผลรบกวนต่อการตรวจวัดปรอท (II) ในการตรวจวัดด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (รูปเล็ก) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสีของสารละลาย AgNPs จะ

จางลงเมื่อความเข้มข้นของปรอทเพิ่มขึ้น อีกทั้งค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs มีค่าลดลงและมีแนวโน้มเลื่อนมาทางความยาวคลื่นน้อยลง (blue shift) ที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นผลมาจากคอปเปอร์ (II) แต่เป็นผลมาจากปรอท (II) อย่างเดียวตามการอธิบายผลการทดลองที่แสดงใน 4.1.4



รูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงไปทางความยาวคลื่นสั้น (Blue shift) ของอนุภาคเงินนาโน (AgNPs) ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวเมื่อความเข้มข้นของสารละลายปรอท (II) ไอออน เพิ่มขึ้นในกรณีที่ไม่มียอดปรอท (II) a) และมียอดปรอท (II) เข้มข้น 12.5 ppm ที่ความเข้มข้นสุดท้าย b)

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าการดูดกลืนแสง (A_0-A) ในกรณีที่ไม่มียอดและมียอดปรอท (II) ไอออนเข้มข้น 12.5 ppm ที่ความเข้มข้นสุดท้าย ตามลำดับ

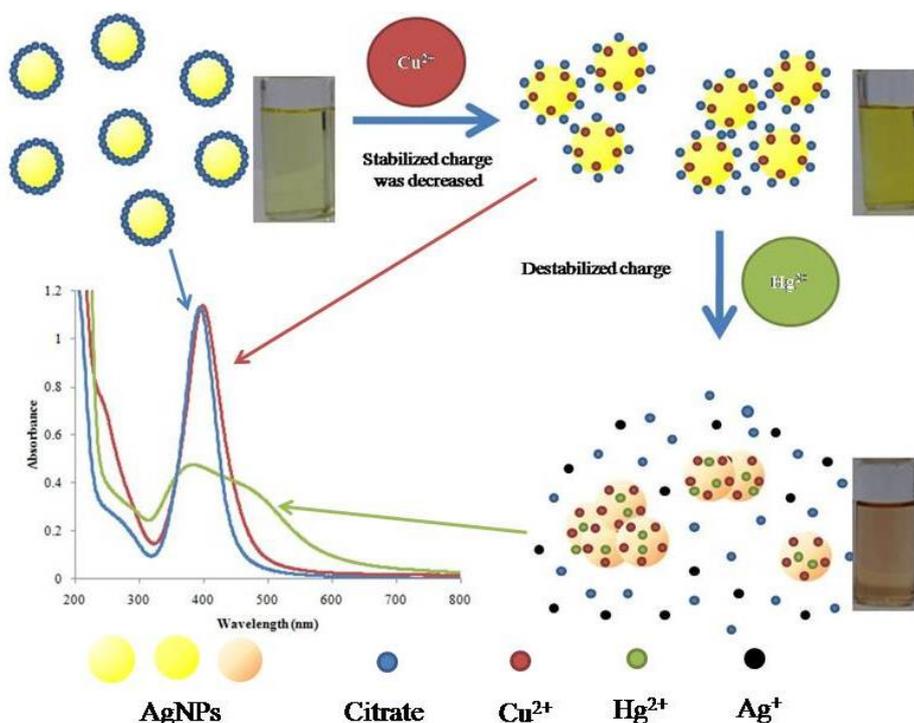
Concentration of Hg (II) (ppm)	The absorption (A_0-A) value					
	The absence of Cu (II)			The presence of Cu (II) 12.5 ppm		
	A_0	A	A_0-A	A_0	A	A_0-A
0.5	1.117	1.086	0.031	1.125	0.971	0.154
1	1.117	1.043	0.074	1.125	0.88	0.245
1.5	1.117	1.013	0.104	1.125	0.786	0.339
2	1.117	0.955	0.162	1.125	0.702	0.423
2.5	1.117	0.888	0.229	1.125	0.626	0.499
3	1.117	0.803	0.314	1.125	0.585	0.540
5	1.117	0.603	0.514	1.125	0.47	0.655
7	1.117	0.412	0.705	1.125	0.421	0.704
9	1.117	0.339	0.778	1.125	0.387	0.738

A_0 = ค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ไม่มีการเติมปรอท (II) ที่ความยาวคลื่น 395 nm

A = ค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs เมื่อเติมปรอท (II) ที่ความยาวคลื่น 395 nm

การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ระบบของไหลจุลภาค
สำหรับการตรวจวัดสารปรอทที่อยู่ในแหล่งน้ำ

ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ในรูปที่ 4.4 c) แสดงให้เห็นว่า AgNPs ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวอยู่ใกล้กันมากขึ้นเมื่อมีการเติมคอปเปอร์ (II) ที่ความเข้มข้นสุดท้าย 12.5 ppm เมื่อเปรียบเทียบกับ AgNPs ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวที่ไม่มีคอปเปอร์ (II) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 a) คาดได้ว่าคอปเปอร์ (II) จะยึดเกาะบนพื้นผิวของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิว ส่งผลให้ลดความหนาแน่นของโมเลกุลของซิเตรตที่เป็นประจุลบที่ทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพของ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวไว้ โดยยืนยันผลด้วยเทคนิค zeta potential ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่ามีแนวโน้มว่าขนาดของ AgNPs จะใหญ่ขึ้นทำให้ค่า A_0 สูงขึ้นสีของสารละลายเข้มข้น จากนั้นเมื่อมีการเติมสารละลายปรอท (II) ลงไปในระบบที่มี AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่มีคอปเปอร์ (II) ความเข้มข้น 12.5 ppm ในปริมาตรสุดท้าย 5 mL อยู่ พบว่า AgNPs มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 d) โดยที่ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเกิดขึ้นสอดคล้องกับการอธิบายผลในหัวข้อ 4.1.4 และสอดคล้องกับผลการทดลองที่อธิบายด้านบน โดยคาดว่ากลไกที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.12 โดยคอปเปอร์ (II) ที่เติมลงไปอาจเกิดเป็นโลหะอะมัลกัมกับปรอท (Hg-Cu) ซึ่งไปช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Ag^0/Ag^+ ได้ดีขึ้น [18]

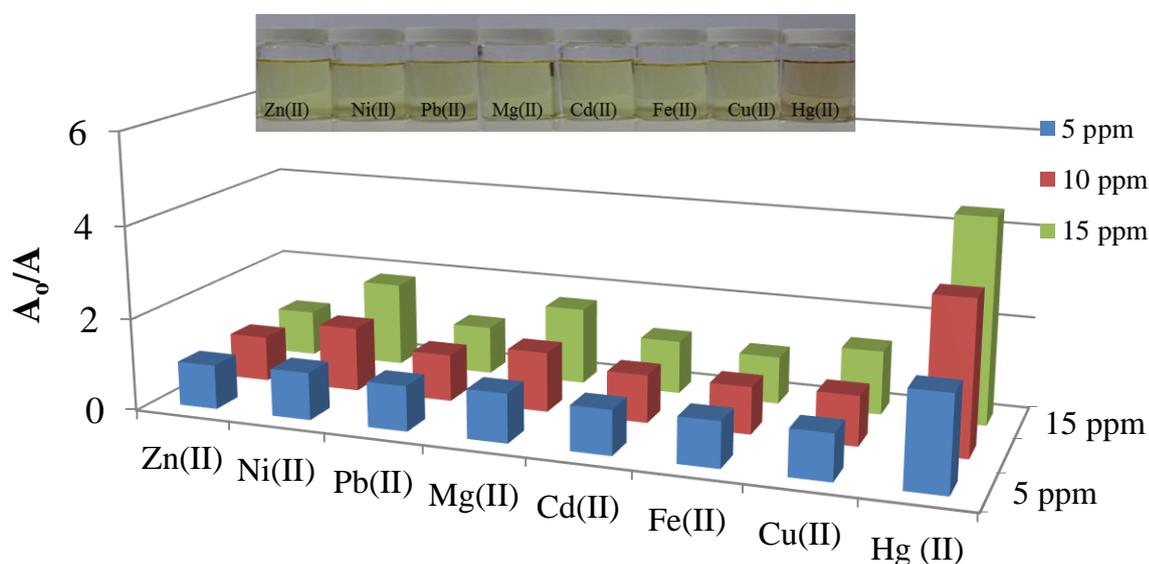


รูปที่ 4.12 แสดงแผนภาพกลไกการทำปฏิกิริยาของปรอท (II) ไอออน กับ AgNPs เมื่อมีคอปเปอร์ (II) ไอออนเป็นตัวช่วยเพิ่มความไวในการตรวจวัดทางสี

4.1.6 การศึกษาผลของตัวรบกวน (interferences)

ทำการทดลองดังนี้ ปิเปตตสารละลาย AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวปริมาตร 1.5 mL ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 5 mL จากนั้นปรับปริมาตรด้วยสารละลายมาตรฐาน Zn(II), Pb(II), Cd(II), Cu(II), Mg(II), Fe(II) และ Ni(II) ที่ความเข้มข้น 0.5 5 และ 15 ppm ตามลำดับ (ในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ DI) เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นศึกษาค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet and Visible Spectroscopy) โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13

ตัวรบกวนที่คาดว่าจะมีผลต่อระบบการตรวจวัดทางสีของปรอท โดยใช้สารละลายมาตรฐานของโลหะ (II) ที่พบในน้ำ ได้แก่ Zn(II), Pb(II), Cd(II), Cu(II), Mg(II) Fe(II) และ Ni(II) โดยเตรียมที่ความเข้มข้น 0.5 5 และ 15 ppm ตามลำดับ เนื่องจากส่วนใหญ่แล้วโลหะหนักเหล่านี้ถูกควบคุมให้มีค่าไม่เกิน 1 ppm ในแหล่งน้ำต่างๆ [12] ดังนั้นจึงเลือกช่วงความเข้มข้นที่จะศึกษาดังกล่าว



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า A_0/A และโลหะ (II) ชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้น 0.5 5 และ 15 ppm (A_0/A = ค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ประมาณ λ_{max} 395 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่ประมาณ λ_{max} 395 nm ที่ทำปฏิกิริยากับโลหะ (II) ชนิดต่างๆ)

จากรูปที่ 4.13 พบว่าโดยมีเพียงปรอท (II) เพียงชนิดเดียวที่มีค่า A_0/A สูงกว่าโลหะตัวอื่นๆและมี tolerance ratio (ความเข้มข้นของโลหะรบกวนต่อความเข้มข้นของปรอท (II) ที่ 5 ppm) ของ Zn(II), Pb(II), Cd(II), Fe(II), Cu(II) มีค่าเท่ากับ 2 โดยที่ Ni(II) และ Mg(II) มีค่าเท่ากับ 1 ตามลำดับ ดังนั้นจึงบอกได้ว่า AgNPs ที่ใช้เป็นตัวตรวจวัดทางสีมีความจำเพาะต่อปรอท (II) ถ้าพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (reduction potential) ของโลหะต่างๆ มีค่าดังนี้ Zn(II) มีค่าเท่ากับ -0.76 V Pb(II) มีค่าเท่ากับ -0.13 V Cd(II) มีค่าเท่ากับ -0.40 V Cu(II) มีค่าเท่ากับ +0.34 V Fe(II) มีค่าเท่ากับ -0.44 V Mg(II) มีค่าเท่ากับ -2.37 V และ Ni(II) มีค่าเท่ากับ -0.28 V [51] โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานต่ำกว่า Ag^+/Ag (0.799V) ซึ่งมีค่าเท่ากับ +0.7991V [57] ซึ่งกล่าวได้ว่าโลหะเหล่านี้ไม่มีผลต่อการตรวจวัดปรอทในตามเหตุผลที่อธิบายในหัวข้อ 4.1.4

4.1.7 การศึกษาร้อยละของการได้กลับคืนมา (recovery) และสอบเทียบ (Method validation) กับเทคนิคมาตรฐาน (Standard method)

ศึกษาน้ำตัวอย่าง 2 ชนิด คือน้ำดื่ม น้ำประปา และ Standard reference material 1641d, mercury in water with certified value of mercury $1.557 \text{ mg/kg} \pm 0.020 \text{ mg/kg}$ จาก National institute of standards ซึ่งตัวอย่างจากน้ำประปาจะถูกกำจัดคลอรีนโดยตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นนำไปให้ความร้อนจนเดือดเป็นเวลา 15 นาทีและทำการทดลองดังนี้ ปิเปตสารละลาย AgNPs ปริมาตร 1.5 mL ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 5 mL ปรับปริมาตรด้วยสารละลายปรอท (II) ที่ความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 3 และ 5 ppm (ในตัวทำละลายที่เป็นน้ำตัวอย่างชนิดต่างๆ) จากนั้นศึกษาค่าการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs ที่เปลี่ยนแปลงไปโดยเทียบกราฟมาตรฐาน (standard addition) โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet and Visible Spectroscopy)

และทำการสอบเทียบ (Method validation) กับเทคนิคมาตรฐาน (Standard method) เทคนิคแกรไฟต์เฟอเรนเนสอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมทรี (Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry) ซึ่งเทคนิคนี้ใช้วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารเพื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องกับเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนี้ โดยให้สารตัวอย่างสลายตัวเป็นอะตอมได้ด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้าบนเตาเผาที่ทำมาจากแกรไฟต์ โดยใช้โปรแกรมการให้อุณหภูมิของการเผาและใช้เวลาแต่ละขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 4.7 โดยใช้ค่าความยาวคลื่น 253.65 nm และใช้ modifiers เป็นสารผสมของ $5.0 \text{ } \mu\text{g Pd(NO}_3)_2$ และ $3.0 \text{ } \mu\text{g Mg(NO}_3)_2$ โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 แสดงการตั้งค่าโปรแกรมการให้อุณหภูมิของการเผา และเวลาต่างๆ ในการวิเคราะห์ด้วย GFAAS

The Optimized Pyrolysis and Atomization Temperatures Program					
step	Temperature (°C)	Ramp Time	Hold Time	Internal Flow	Gas Type
1	110	1	30	250	Normal
2	130	15	30	250	Normal
3	250	10	20	250	Normal
4	1300	0	5	0	Normal
5	2450	1	3	250	Normal

ตารางที่ 4.8 แสดงการหาปริมาณปรอท (II) ในตัวอย่างน้ำในตัวอย่างน้ำต่างๆและstandard reference material (SRM) 1641d โดยใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นและเทคนิค GFAAS (n เท่ากับ 3)

น้ำตัวอย่าง	เทคนิคที่พัฒนาขึ้น				เทคนิค GFAAS			
	Hg(II); ppm		%Recovery	RSD	Hg(II); ppm		%Recovery	RSD
	เต็ม	พบ			เต็ม	พบ		
Drinking water	0	ND.	-	-	0	ND.	ND.	-
	0.5	0.46 ± 0.003	93.0	0.7	0.5	0.52 ± 0.030	104.5	5.8
	1	0.96 ± 0.005	96.6	0.5	1	1.00 ± 0.050	100	5.0
	3	3.10 ± 0.039	104.0	1.3	3	3.53 ± 0.042	117.6	1.2
	5	5.39 ± 0.112	107.8	2.1	5	5.15 ± 0.052	103.2	1.0
Tap water	0	ND.	-	-	0	ND.	ND.	-
	0.5	0.54 ± 0.004	109.0	0.7	0.5	0.52 ± 0.032	104	6.2
	1	0.96 ± 0.011	105.8	1.1	1	0.86 ± 0.045	91.4	5.2
	3	3.23 ± 0.043	107.8	1.3	3	3.35 ± 0.034	105.9	1.0
	5	5.38 ± 0.062	107.6	1.2	5	5.39 ± 0.102	107.8	1.9
SRM (1.557 ± 0.020) mg/kg	0	1.48 ± 0.032	96.0	2.16	-	-	-	-

ND. หมายถึง “ไม่สามารถตรวจพบ”

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.7 พบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นได้ร้อยละการได้กลับคืนมา (%recovery) อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คือ 93.0-107.8% 105.8-109.0% และ 96.0% ของตัวอย่างน้ำดื่ม น้ำประปา และ SRM ตามลำดับ และให้ค่าความเที่ยงอยู่ในช่วง 0.65-2.1, 0.74-1.15 และ 2.16 ตามลำดับ แสดงว่าในน้ำตัวอย่างที่มีองค์ประกอบแตกต่างกันจะไม่มีผลรบกวนระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นอีกทั้งยังผลการทดลองสอดคล้องกับเทคนิค GFAAS ซึ่งถูกใช้เป็นเทคนิคมาตรฐานดังนั้นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมีความน่าเชื่อถืออีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้ในตัวอย่างน้ำต่างๆ ได้

จากผลการทดลองในส่วนของการตรวจวัดทางสีของปรอท (II) ไอออนแบบง่ายและรวดเร็วโดยอาศัยการติดตามการลดลงของอนุภาคเงินนาโน (AgNPs) ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลต วิสเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่ใช้มีความจำเพาะกับปรอท (II) ดี แต่ยังคงต้องใช้สารเคมีและสารตัวอย่างในปริมาณมาก (mL) ซึ่งทำให้มีของเสียที่เกิดจากการตรวจวัดทำให้ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และยังคงต้องมีเครื่องมือที่ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยในส่วนที่สอง การสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดทางสีของปรอท (II) ที่ใช้ระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษแบบสองชั้น (double layer microfluidic paper-based analytical device, double layer μ PAD) โดยใช้เทคนิคการพิมพ์ (printing) ทำให้ใช้ปริมาณสารเคมีและตัวอย่างที่ลดลง (μ L) ง่าย สะดวก รวดเร็ว โดยใช้กลไกของปฏิกิริยาเติมในระบบสารละลาย และพัฒนาเทคนิคในการอ่านผลข้อมูลเชิงปริมาณบน double layer μ PAD ด้วยโปรแกรม ImageJ เพื่อการทำเชิงปริมาณวิเคราะห์