



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตอบสนองต่อแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนที่ฝังบนอนุภาคทองในระดับนาโน
สำหรับตรวจวัดปรอท

Optical response of silver nanoparticles embedded on gold nanoparticles
for measuring of mercuric (II)

นายเอกรัฐ เดชศรี

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก เงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2561
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตอบสนองต่อแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนที่ฝังบนอนุภาคทองในระดับนาโน
สำหรับตรวจวัดปรอท

Optical response of silver nanoparticles embedded on gold nanoparticles
for measuring of mercuric (II)

นายเอกรัฐ เดชศรี

600265580

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก เงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2561
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การตอบสนองต่อแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนที่ฝังบนอนุภาคทองในระดับนาโนสำหรับตรวจวัดปรอท

แหล่งเงิน ทุนอุดหนุนทั่วไป/เงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ 2561 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 250,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2560 ถึง 30 กันยายน 2561

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ

หัวหน้าโครงการ นายเอกรัฐ เศษศรี สังกัดภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ตัวรับรู้เชิงสีชนิดใหม่ของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินได้ถูกนำเสนอสำหรับการวิเคราะห์ที่ว่องไวและจำเพาะต่อปรอทไอออน โดยกลไกการตรวจวัดสามารถตรวจสอบด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เครื่องวัดศักย์ซีต้า เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ โดยอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินสามารถตรวจวัดปรอทไอออนในสารละลายน้ำได้อย่างชัดเจนจะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอมส้มเป็นสีม่วง ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่มีประสิทธิภาพของไอออนโลหะหนัก 10 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม แบริียม แคลเซียม แคลเซียม ทองแดง เพอร์ส ตะกั่ว แมกนีเซียม นิกเกิล และ สังกะสี ซึ่งไม่รบกวนในการวิเคราะห์ปรอทไอออน บ่งชี้ถึงความจำเพาะของตัวรับรู้เชิงสีของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน ซึ่งความสัมพันธ์เชิงเส้นของยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรเมทรี แสดงให้เห็นว่าตัวรับรู้เชิงสีของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน สามารถใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของปรอทไอออนในช่วง 0.5-80 ppm และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9818 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดปรอทไอออนมีค่าเท่ากับ 0.526 ± 0.001 ppm อนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินได้รับการยืนยันว่าสามารถใช้งานได้ดีในการวิเคราะห์ปรอทไอออนในตัวอย่างจริง ทำให้เป็นวัสดุที่มีแนวโน้มสำหรับการใช้งานของตัวรับรู้เชิงสี

คำสำคัญ : ตัวรับรู้เชิงสี ปรอทไอออน เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น อนุภาคนาโนโลหะผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Optical response of silver nanoparticles embedded on gold nanoparticles for measuring of mercuric (II)

Researcher: Dr. Ekarat Detsri

Faculty: Science **Department:** Chemistry

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

A new colorimetric sensor based on Au-Ag bimetallic nanoparticles (Au-Ag BNPs) was proposed for the sensitive and selective detection of mercury (II). The detection mechanisms have been verified via UV-vis spectra, Zeta Potential, FT-IR, TEM, XRD and EDX. The resulting Au-Ag BNPs sensor was able to detect mercury (II) in aqueous solution, visibly changing from brownish-orange to purple. Under the optimized experimental conditions, 10 kinds of potential heavy metals such as aluminium (II), barium (II), cadmium (II), calcium (II), copper (II), ferrous (II), lead (II), magnesium (II), nickel (II) and zinc (II) have no interference on the mercury (II) detection indicating the high selectivities of our Au-Ag BNPs based colorimetric sensor. The linear relationships of the UV-vis spectrometry demonstrate that Au-Ag BNPs based colorimetric sensor can be used for the quantitative analysis of mercury (II) in the range of 0.5-80 ppm, with the correlation coefficient (R^2) of 0.9818. The limit of detection (LOD) of mercury (II) was found to be 0.526 ± 0.001 ppm. Au-Ag BNPs is also verified to have a good practical applicability for mercury (II) detection in the real samples, making it a promising material for use in colorimetric sensors.

Keywords : Colorimetric sensor, Mercury (II), Layer-by-Layer deposition technique, Bimetallic nanoparticles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยตามโครงการการตอบสนองต่อแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนที่ฝังบนอนุภาคทองใน
ระดับนาโนสำหรับตรวจวัดปรอทนี้ สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์เป็นอย่างดีเนื่องจากได้รับทุนสนับสนุน
การวิจัย จากทุนวิจัยประเภทส่งเสริมนักวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้



เอกรัฐ เศษศรี

หัวหน้าโครงการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อและสัญลักษณ์.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พรอท.....	3
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของพรอท.....	4
2.1.2 พืชของพรอท.....	4
2.1.3 ค่ามาตรฐานความปลอดภัยของพรอท.....	4
2.1.4 วิธีการวิเคราะห์พรอท.....	4
2.2 เซนเซอร์ทางแสง (Optical sensor).....	7
2.3 การสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโน.....	8
2.3.1 วิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction).....	8
2.3.2 วิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical method).....	8
2.3.3 วิธีการปลูกเมล็ด (Seed-mediated growth method).....	10
2.3.4 วิธีการรีดักชันโดยใช้แสง (Photochemical reduction method).....	11
2.3.5 วิธีการสังเคราะห์แบบมีแกนกลางและเปลือกหุ้ม (Core-shell nanoparticle).....	11
2.4 การสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโน.....	13
2.4.1. วิธีทางกายภาพ (Physical method).....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2. วิธีทางเคมี (Chemical method)	13
2.4.3. วิธีทางชีวภาพ (Biological approach)	14
2.5 เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวอนุภาค (Layer-by-Layer technique)	14
2.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ (Characterization)	15
2.6.1 ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-vis Spectrophotometry)	15
2.6.2 ศักย์ซีต้า (Zeta potential)	16
2.6.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	17
2.6.4 พูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR)	17
2.6.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	24
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	25
3.3 สารเคมี	25
3.4 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน (Au-Ag BNPs)	26
3.4.1 การสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโน (AuNPs) โดยวิธีเทอร์เควิช	26
3.4.1.1 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรท	26
3.4.1.2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีไดแอลลิลดีเมทิลอแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC)	27
3.4.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs).....	28
3.4.3 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิด (COPSS)	30
3.5 การศึกษาการรับรู้ของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินในการวิเคราะห์ปรอท.....	31
3.5.1 การศึกษาความเป็นเส้นตรง.....	31
3.5.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอทไอออน.....	31
3.5.3 การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอทไอออน.....	32
3.5.4 การศึกษาผลของเกลือที่ส่งผลต่ออนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน	33
3.5.5 การศึกษาผลของตัวรบกวนที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ปรอทไอออน	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.6 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)	34
3.5.7 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)	34
3.5.8 การศึกษาค่าร้อยละการคืนกลับและค่าความเที่ยง.....	35
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	36
4.1 ผลการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน.....	36
4.1.1 ผลการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโน โดยวิธีเทอร์ควิช	36
4.1.1.1 ผลการศึกษาการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ สารละลายไตรโซเดียมซิเตรทสำหรับการสังเคราะห์ อนุภาคทองระดับนาโน.....	36
4.1.1.2 ผลของการศึกษาการหาความเข้มข้น ที่เหมาะสมของสารละลายโพลีไคเดแอลลิล โดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC)	42
4.1.2 ผลการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs)	46
4.1.3 ผลการศึกษาการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย COPSS	52
4.2 ผลการศึกษาการรับรู้ของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน ในการวิเคราะห์ปรอท.....	59
4.2.1 ผลการศึกษาความเป็นเส้นตรง	59
4.2.2 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอท	63
4.2.3 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอท	64
4.2.4 ผลการศึกษาผลของเกลือที่ส่งผลต่อ อนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน.....	65
4.2.5 การศึกษาผลของตัวรบกวนที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ปรอท	66
4.2.6 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD).....	67
4.2.7 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)	67
4.2.8 การศึกษาค่าร้อยละการคืนกลับและค่าความแม่นยำ.....	68
4.2.9 การทดสอบความถูกต้องของวิธี.....	69
4.2.10 เปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์กับวิธีอื่นๆ	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	71
5.1 สรุปผลการวิจัย	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารอ้างอิง	73
ภาคผนวก ก	81
ภาคผนวก ข	89
ภาคผนวก ค	94



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดี-ข้อเสีย ของวิธีมาตรฐาน	6
3.1 อัตราส่วนความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรท : โพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเล็กแอซิด : โซเดียมโบโรไฮไดรด์	29
4.1 แสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของอนุภาคทองระดับนาโน	38
4.2 แสดงหมู่ฟังก์ชันของ Trisodium citrate และหมู่ฟังก์ชันของ AuNPs	40
4.3 แสดงหมู่ฟังก์ชันของ PDADMAC และหมู่ฟังก์ชันของ AuNPs-PDADMAC	45
4.4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ของอนุภาคเงินระดับนาโน	48
4.5 แสดงค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินระดับนาโน	48
4.6 แสดงหมู่ฟังก์ชันของ COPSS และหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs	50
4.7 แสดงหมู่ฟังก์ชันของ AuNPs-PDADMAC, AgNPs และหมู่ฟังก์ชันของ Au-Ag bimetallic nanoparticles	56
4.8 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินเป็นตัวรับรู้เชิงสีในการวิเคราะห์ปรอท	60
4.9 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน	67
4.10 ตารางแสดงค่า LOD และ LOQ	67
4.11 ตารางแสดงค่าร้อยละของการคืนกลับของสารละลายมาตรฐานปรอทและค่าความแม่นยำ	68
4.12 ตารางแสดงค่าร้อยละของการคืนกลับและค่าความแม่นยำของตัวอย่างน้ำ	68
4.13 แสดงผลการเปรียบเทียบวิธีที่พัฒนาขึ้นมาเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ปรอท	69
4.14 การเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ต่างๆ	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างเซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย	8
2.2 แสดงการสังเคราะห์อนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) บนแผ่นฟิล์มของ polypyrrole ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	9
2.3 แสดงอันตรกิริยาระหว่าง C ₁₆ TAB กับโครงสร้างระดับนาโนแบบแท่ง	10
2.4 แสดงการสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยวิธีปลูกเมล็ด	11
2.5 แสดงวิธีการสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโนแบบเปลือก	12
2.6 แผนผังขั้นตอนการขึ้นรูปแบบขั้นต่อขั้น	15
2.7 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis Spectrophotometry	16
2.8 ส่วนประกอบของเครื่อง Transmission electron microscopy (TEM)	17
2.9 ลักษณะการสั่นในโมเลกุลของสาร	18
2.10 แสดงหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	18
3.1 แผนผังวิธีการสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโนด้วยสารละลายไตรโซเดียมไซเตรท ความเข้มข้น 10 15 และ 20 mM	26
3.2 แผนผังวิธีการการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคทองระดับนาโนด้วย โพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC)	27
3.3 แผนผังวิธีการการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนโดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชัน	28
3.4 แผนผังวิธีการการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย COPSS ที่ใช้ในการสังเคราะห์ อนุภาคระดับนาโนสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบขั้นต่อขั้น (Layer-by-Layer) บนพื้นผิวอนุภาค	30
3.5 แผนผังวิธีการศึกษาความเป็นเส้นตรงของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณปรอท ด้วยอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน	31
3.6 แผนผังวิธีการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอทไอออน	32
3.7 แผนผังวิธีการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอทไอออน	32
3.8 แผนผังวิธีการศึกษาผลของเกลือที่ส่งผลต่ออนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน	33
3.9 แผนผังวิธีการศึกษาผลของตัวรบกวนที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ปรอทไอออน	34
4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ AuNPs	36
4.2 กลไกการรักษาเสถียรภาพของไตรโซเดียมไซเตรท	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคทองระดับนาโนที่สังเคราะห์ด้วย สารละลายไตรโซเดียมซิเตรทความเข้มข้น 10 15 และ 20 mM	38
4.4 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของ (a),(b) AuNPs (c) กราฟแสดงขนาดเฉลี่ย ของอนุภาคทองระดับนาโน	39
4.5 สเปกตรัม FTIR ของ (a) Trisodium citrate (b) AuNPs.....	40
4.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคทองระดับนาโนด้วยเครื่อง XRD	41
4.7 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDX	41
4.8 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 533 nm ของสารละลาย AuNPs-PDADMAC ความเข้มข้นต่างๆ.....	42
4.9 แสดงค่าศักย์ซีต้าของสารละลายอนุภาคทองระดับนาโนที่ปรับปรุงพื้นผิว ด้วยสารละลาย PDADMAC	43
4.10 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของอนุภาคทองระดับนาโนที่ปรับปรุงสภาพพื้นผิว ด้วยสารละลาย PDADMAC	44
4.11 สเปกตรัม FTIR ของ (a) PDADMAC (b) AuNPs-PDADMAC	44
4.12 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคทองระดับนาโน ที่ปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยเครื่อง XRD	45
4.13 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDX	46
4.14 กลไกการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน	46
4.15 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ด้วยสารละลาย โพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเล็กแอซิดความเข้มข้น 0.1 1.0 2.5 5.0 และ 7.5 mM	47
4.16 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของ (a),(b),(c) AgNPs (d) กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของ AgNPs	49
4.17 สเปกตรัม FTIR ของ (a) COPSS (b) AgNPs.....	50
4.18 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคเงินระดับนาโนด้วยเครื่อง XRD	51
4.19 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDX	52
4.20 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 531 nm ของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน	53
4.21 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าของสารละลาย Au-Ag bimetallic nanoparticles.....	54
4.22 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน	55
4.23 สเปกตรัม FTIR ของ (a) AuNPs-PDADMAC (b) AgNPs (c) Au-Ag bimetallic	56
4.24 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินด้วยเครื่อง XRD	58
4.25 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDX	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.26 ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินที่ใช้เป็นตัวรับรู้เชิงสี ในการวิเคราะห์ปรอทความเข้มข้น 0.5-80 ppm.....	59
4.27 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 404 nm และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอท.....	60
4.28 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินในการวิเคราะห์ปรอท	61
4.29 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDX	62
4.30 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของ อะมัลกัม (Ag_2Hg_3)	62
4.31 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย EDX	63
4.32 ค่าการดูดกลืนแสงของการวิเคราะห์ปรอทที่เวลาต่าง ๆ กัน	63
4.33 ค่าการดูดกลืนแสง ของการวิเคราะห์ปรอทที่ pH ต่าง ๆ กัน	64
4.34 ค่าการดูดกลืนแสงผลของเกลือที่ส่งผลต่ออนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน	65
4.35 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของตัวรับกวนต่างๆที่เติมลงไปนในสารละลายอนุภาคนาโน โลหะผสมทองและเงิน	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
AuNPs	Gold nanoparticles
AgNPs	Silver nanoparticles
Au-Ag BNPs	Gold-Silver bimetallic nanoparticles
LBL	Layer-by-Layer
Hg ²⁺	Mercury (II)
NaCl	Sodium chloride
Na ₂ SO ₄	Sodium sulfate
Na ₃ PO ₄	Sodium phosphate
UV-vis spectrophotometry	Ultraviolet-visible spectrophotometry
FT-IR	Fourier transform infrared spectrophotometer
TEM	Transmission electron microscopy
XRD	X-ray diffractometer
mL	Milliliter (มิลลิลิตร)
M	Molar (โมลาร์)
mM	Millimolar (มิลลิโมลาร์)
mV	Millivolt (มิลลิโวลต์)
ppm	Milligram per liter (มิลลิกรัมต่อลิตร)
nm	Nanometer (นาโนเมตร)
pH	p function of Hydrogen ion
R ²	Relative coefficient (ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ)
LOD	Limit of detection (ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด)
LOQ	Limit of quantitative (ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์)
S.D.	Standard deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปรอทถูกนำมาใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ซึ่งอุตสาหกรรมที่มีการใช้ปรอทเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตมีอยู่มากมายหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรมการผลิตสี และ อุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ยเคมี เป็นต้น โดยโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้มักจะปล่อยสารปรอทออกมากับน้ำทิ้ง จากกฎหมายสิ่งแวดล้อมไทยได้มีการกำหนดไว้ว่า ปริมาณปรอทในน้ำทิ้งต้องไม่เกิน 0.05 mg/cm^3 เนื่องจากสารปรอทเป็นโลหะหนักที่มีพิษร้ายแรง ทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งปรอทสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทางระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร ผิวหนัง กระแสเลือด จากนั้นปรอทจะกระจายไปยังเซลล์สมองได้อย่างรวดเร็ว ทำให้มีอาการแขนขา มือ เท้า ริมฝีปากชา ช่วยเหลือตัวเองไม่ได้จนเป็นอัมพาต [1]

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทโดยทั่วไปจะใช้เทคนิค เช่น Cold vapor atomic absorption spectrometry [2], Inductive coupled plasma mass spectrometry [3], Electrochemical spectroscopy [4] และ Fluorescence spectroscopy [5] เป็นต้น ซึ่งเทคนิคเหล่านี้เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ มีความไว และมีความจำเพาะเจาะจงสูง แต่เทคนิคเหล่านี้มีต้นทุนในการวิเคราะห์สูงเครื่องมือที่ใช้มีราคาแพง ต้องใช้เวลาในการเตรียมตัวอย่าง ใช้ปริมาณตัวอย่างมาก และใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน จากข้อเสียที่กล่าวมา ทำให้นักวิทยาศาสตร์ได้คิดค้น และ พัฒนาริธีวิเคราะห์ในการหาปริมาณปรอทที่ใช้ต้นทุนในการวิเคราะห์ต่ำ ไม่ต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่ราคาแพง ไม่ต้องเตรียมตัวอย่างให้ยุ่งยาก ใช้ปริมาณสารตัวอย่างน้อย และ ใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่นาน ซึ่งในปัจจุบันวิธีวิเคราะห์หาปริมาณสารต่างๆ รวมถึงปรอท นิยมใช้เทคนิคเซนเซอร์ทางแสง (Optical sensor) ในการวิเคราะห์ เนื่องจากเป็นวิธีที่วิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสารได้ด้วยตาเปล่า เป็นการวิเคราะห์เบื้องต้นว่าในตัวอย่างมีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือไม่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ในสถานที่จริงได้โดยไม่ต้องเก็บตัวอย่างเข้ามาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเทคนิคเซนเซอร์ทางแสงมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอทโดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโน [6] และใช้อนุภาคทองระดับนาโน [7]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาวิธีวิเคราะห์ที่ให้จำเพาะและมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดปรอทโดยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมของทองและเงิน โดยอาศัยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวอนุภาค (Layer-by-Layer technique) เพื่อเป็นตัวรับรู้เชิงสี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโน การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของอนุภาคทองระดับนาโน การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน และ การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมของทองและเงิน
- 2) เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการวิเคราะห์ปรอทด้วยอนุภาคนาโนโลหะผสมของทองและเงิน
- 3) เพื่อศึกษาตัวแปรทางเคมีวิเคราะห์ในการวิเคราะห์ปรอทด้วยอนุภาคนาโนโลหะผสมของทองและเงิน
- 4) เพื่อศึกษาความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ปริมาณปรอทจากวิธีที่พัฒนาขึ้นเทียบกับวิธีมาตรฐาน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโน การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของอนุภาคทองระดับนาโน การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน และ การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมของทองและเงิน
- 2) ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการวิเคราะห์ปรอทด้วยอนุภาคนาโนโลหะผสมของทองและเงิน
- 3) ศึกษาตัวแปรทางเคมีวิเคราะห์ในการวิเคราะห์ปรอทด้วยอนุภาคนาโนโลหะผสมของทองและเงิน
- 4) ศึกษาความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ปริมาณปรอทจากวิธีที่พัฒนาขึ้นเทียบกับวิธีมาตรฐาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโน การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของอนุภาคทองระดับนาโนการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน และ การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมของทองและเงิน
- 2) ทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการวิเคราะห์ปรอทด้วยอนุภาคนาโนโลหะผสมของทองและเงิน
- 3) ทำให้ทราบถึงผลทางเคมีวิเคราะห์ในการวิเคราะห์ปรอทด้วยอนุภาคนาโนโลหะผสมของทองและเงิน
- 4) ทำให้ทราบถึงความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ปริมาณปรอทจากวิธีที่พัฒนาขึ้นเทียบกับวิธีมาตรฐาน

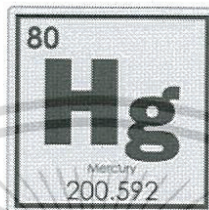
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พรอท

2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของปรอท



ชื่อ พรอท (Mercury)	สัญลักษณ์ของธาตุคือ Hg
มวลอะตอม 200.59 กรัมต่อโมล	จุดหลอมเหลว -38.83°C
จุดเดือด 356.73°C	ความหนาแน่น 13.53 g/cm^3

ปรอท (Mercury) เป็นโลหะหนักที่มีลักษณะเป็นของเหลวสีเงิน สามารถระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิปกติได้ ซึ่งในปัจจุบันปรอทถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายถึงแม้ว่าปรอทจะมีพิษร้ายแรงก็ตาม โดยปรอทจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศหรือปนเปื้อนมากับน้ำเสียที่ปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานสารเคมี ผลิตเยื่อกระดาษ พลาสติก เครื่องมือวิทยาศาสตร์ อุปกรณ์ไฟฟ้า และแบตเตอรี่ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมอีกด้วย [8]

2.1.2 ความเป็นพิษของปรอท

ปรอทเป็นโลหะที่มีพิษร้ายแรง เมื่อปรอทเกิดการระเหยกลายเป็นไอแล้วเข้าสู่ร่างกายจะก่อให้เกิดอาการ เช่น ใจสั่น นอนไม่หลับ ปวดศีรษะ สายตาพร่ามัว เดินเซ พูดไม่ชัด อ่อนเพลีย และอาจไปทำลายระบบประสาท ซึ่งสามารถส่งผลต่อการเรียนรู้ กระบวนการคิด ความจำ และการสื่อสาร ถ้าร่างกายสะสมไอปรอทในปริมาณที่สูง จะส่งผลกระทบต่อระบบต่างๆ เช่น ไต ระบบการหายใจและอาจถึงขั้นเสียชีวิตได้ [9]

2.1.3 ค่ามาตรฐานความปลอดภัยของปรอท

ตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ. 2560 กำหนดให้ค่ามาตรฐานความปลอดภัยของปรอท (Hg) มีค่าไม่เกิน 0.005 mg/cm^3 [10]

2.1.4 วิธีการวิเคราะห์ปรอท

วิธีการวิเคราะห์ปรอทที่เป็นวิธีมาตรฐานมีหลายวิธี เช่น Cold vapor atomic absorption spectrometry, Inductive coupled plasma mass spectrometry และ Electrochemical spectroscopy เป็นต้น โดยแต่ละการวิเคราะห์มีข้อดี ข้อเสียที่แตกต่างกันไป

2.1.4.1 เทคนิคโคลด์เวปเปอร์อะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมทรี (Cold vapor atomic absorption spectrometry; CV-AAS)

เทคนิคโคลด์เวปเปอร์อะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมทรี เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทที่น้อยมากๆ ซึ่งเทคนิคนี้ใช้สารละลายสแตนนัส (II) คลอไรด์ (SnCl_2) เป็นตัวรีดิวซ์ปรอทที่อยู่ในรูป Hg^{2+} เกิดการระเหยกลายเป็นปรอท (Hg^0) แล้วทำการวัดค่าดูดกลืนแสง ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผันตรงกับค่าความเข้มข้นของปรอท [11] นอกจากนี้เทคนิค CV-AAS สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับเทคนิคต่างๆได้ ยกตัวอย่าง เช่น

จิงเหว่ย ซู [12] ได้ทำการศึกษาการตรวจวัดปรอท (Hg^{2+}) ในน้ำ โดยอาศัยระบบการไหล (Flow injection) เข้ามาช่วยในการเก็บตัวอย่างน้ำที่เป็นแบบ On-line ซึ่งจะทำให้การ Load ปรอทเข้าสู่คอลัมน์ (Column) แล้วทำการดูดซับละลาย $10\% \text{ HNO}_3$ ที่เป็นตัวพาปรอทเข้าสู่ระบบ จากนั้นทำการฟลักซ์ของ NaBH_4 ด้วยอัตราการไหล เท่ากับ 3.7 mL/min แล้วทำการสกัดแบบ Solid phase extraction (SPE) ที่ใช้ Cyanex 923 เป็นตัวดูดซับ (Sorbent) จากนั้นปรอทจะเข้าสู่ Gas-liquid separator เพื่อทำการแยก แล้วเข้าสู่ Quartz cell เพื่อทำการวิเคราะห์ปรอทต่อไป

ร็อบสัน [13] ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ปรอทในปุ๋ยฟอสเฟต โดยอาศัยแลนทานัมคลอไรด์ (Lanthanum chloride) เป็นตัวช่วยเพิ่มปริมาณสารปรอทที่สกัดจากตัวอย่างที่เป็นของแข็งไปเป็นสารละลาย ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถสร้างขึ้น โดยนำสารละลายที่มีส่วนผสมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ กรดไฮโดรคลอริก และไทโอยูเรีย (Thiourea) ไป Sonicate เป็นเวลา 20 นาที แล้วเติมโซเดียมเตตระไฮโดรโบเรตที่ป็นตัวรีดิวซ์ เพื่อให้ปรอทจะกลายเป็นไอและทำการตรวจวัดปรอท

2.1.4.2 เทคนิคอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปกโตรเมทรี (Inductive coupled plasma mass spectrometry; ICP-MS)

เทคนิคอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปกโตรเมทรี เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์ธาตุได้หลายธาตุในเวลาเดียวกันที่มีระดับความเข้มข้นต่ำๆ ได้ โดยอาศัยกระบวนการคายพลังงานของอะตอม (Atomic emission) ซึ่งทำการฉีดสารตัวอย่างเป็นละอองฝอยเข้าไปที่เปลวอาร์กอนพลาสมา เพื่อให้แตกตัวเป็นไอออน จากนั้นส่งไปทำการแยกและตรวจวัดมวลสารตามค่ามวลต่อประจุ (Mass-to-charge ratio; m/z) ด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ [14] และเทคนิคนี้สามารถนำไปใช้งานควบคู่กับเทคนิคอื่นๆได้อีก เช่น ในงานวิจัยของ เชื้อหยีไท [15] ได้ศึกษาระบบการไหลของสาร (Flow injection chemical vapor generation inductively coupled plasma mass spectrometry; FI-VG-ICP-MS) เพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ปรอทในสมุนไพรมะนาว โดยการนำผงสมุนไพรมะนาว เติมกรดไฮโดรคลอริก 0.2 ml และ น้ำ 1.5 ml แล้วนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 10 นาที แล้วทิ้งให้เย็น ต่อมาทำการเติมกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 10% m/v ปริมาตร 0.1 ml จากนั้นทำการฉีด (Inject) ผงสมุนไพรมะนาว ความเข้มข้น 0.5% m/v ปริมาตร 100 μl กรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.1% m/v และกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2% v/v เข้าสู่ระบบ FI-VG เพื่อให้ปรอทจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอ แล้วทำการตรวจวัดปรอทไอออนด้วยเครื่อง ICP-MS

2.1.4.3 เทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical spectroscopy)

เทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้ามีหลายเทคนิค เช่น ไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry) เป็นเทคนิคที่ศึกษาค่าความต่างศักย์ของการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox potential) ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง โดยวัสดุที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทำงานจะต้องมีความเสถียรสูง เช่น แพลตินัม (Platinum; Pt) หรือคาร์บอนอสัณฐาน ส่วนขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) เป็นขั้วไฟฟ้ามาตรฐานที่มีความต่างศักย์คงที่ ซึ่งใช้เป็นค่าเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าทำงาน และขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) ที่ทำมาจากลวดแพลตินัม โดยทำการจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ขั้วในสารตัวอย่าง [16] ซึ่งเทคนิคนี้สามารถปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทำงานด้วยวัสดุต่างๆ เพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้ เช่น ในงานวิจัยของ โมฮัมหมัด โกเบนนิบ [17] ได้ทำการศึกษาแท่งทองคำนาโนแบบ 3 มิติ (GNT) เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าในการตรวจวิเคราะห์ปรอทในน้ำดื่ม ซึ่งทำการเตรียมแท่งทองคำนาโนแบบ 3 มิติ โดยนำทองไปปรับปรุงรูพรุน ด้วยวิธีการ Sputter บนโพลีคาร์บอนเนตเทมเพลต (PC template) จากนั้นนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 20 นาที และทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำโพลีคาร์บอนเนตเทมเพลตไปยึดติดบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนอสัณฐาน (Glassy carbon electrode; GCE) แล้วนำไปเติมสารละลายผสมของไดคลอโรโรมีเทนกับเอทานอลที่มีอัตราส่วนเป็น 1:1 v/v ซึ่งการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียม 3D GNT/GCE เป็นประยุกต์ใช้งานของตัวรับรู้ในขั้วทำงาน (working electrode) ที่นำไปทำการตรวจวัดปรอทในน้ำดื่ม ส่วนหยวนเหลียว [18] ได้ทำการพัฒนาเซ็นเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า โดยใช้ บิสอินโดลมีเทน/เส้นใยคาร์บอนนาโนที่มีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2-5 nm/แนฟฟิออน/ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนอสัณฐาน (Bis (indolyl) methane/Mesoporous carbonnanofiber/Nafion/glassy carbon electrode; BIM/MCNF/Nafion/GCE) เป็นเซ็นเซอร์ในการตรวจวิเคราะห์ปรอท ซึ่งการสังเคราะห์ BIM จะทำการเติมเมทิลอินโดล (3-methylindole) 1.22 g และเติมสารละลาย 99% เบนซาลดีไฮด์ ลงไป 0.2 g แล้วนำมาละลายในเอทานอล 50 ml และหยดกรดซัลฟิวริก 0.5 ml จากนั้นทำการปั่นกวนข้ามคืน ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิห้องและนำมาล้างด้วยเอทานอล ต่อมาทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าด้วยการเติม 50% กรดไนตริก เอทานอล และน้ำ แล้วนำสารละลาย 5 %w/w แนฟฟิออน (Nafion) ที่เจือจางด้วยสารละลาย 0.5 %w/w ไดเมทิลฟอร์มามิด (N,N-dimethylformamide; DMF) จากนั้นเติม MCNF 1 mg และ Sonicate เป็นเวลา 20-30 นาที แล้วนำไปเคลือบบนขั้วไฟฟ้าคาร์บอนอสัณฐานเพื่อใช้ในการตรวจวัดปรอท ฮีลิ่งหัว [19] ได้ทำการพัฒนาวัสดุนาโนคอมโพสิตของซิงค์ฟอสเฟต $[Zn_3(PO_4)_2]$ ประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้ทางเคมีไฟฟ้าในการตรวจวัดปรอท โดยทำการเติมสารละลายซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) 1.33 ml จากนั้นเติมสารละลายบัฟเฟอร์ (Phosphate buffer solution; PBS) ที่มี pH เท่ากับ 7.4 ปริมาตร 200 ml แล้วเติมดีเอ็นเอ (DNA) 500 nM จากนั้นไปบ่มที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 3 วัน แล้วทำการกรองและอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำวัสดุนาโนคอมโพสิต $[Zn_3(PO_4)_2@MWCNTs-DNA]$ มาเคลือบขั้วไฟฟ้าแล้วนำไปทำการวิเคราะห์หาปรอทในน้ำ

ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อเสีย ของวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ปรอท

วิธีมาตรฐาน	ข้อดี	ข้อเสีย
CV-AAS	วิเคราะห์ปรอทในความเข้มข้นที่ต่ำถึงระดับ ppb	ราคาแพง และวิเคราะห์ตัวอย่างธาตุได้เพียงทีละธาตุ
ICP-MS	วิเคราะห์หาธาตุต่างๆที่ความเข้มข้นต่ำถึงระดับ ppb ได้หลายธาตุพร้อมกัน	ราคาแพง และใช้ปริมาณสารตัวอย่างมาก
Electrochemical	ใช้งานง่าย สะดวก และรวดเร็ว	ราคาแพง และต้องทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าให้ดี

จากตารางข้างต้นเป็นการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ปรอท จะพบว่าทั้ง 3 วิธี สามารถวิเคราะห์หาปรอทที่มีปริมาณน้อยๆได้ และให้ผลวิเคราะห์ที่ถูกต้องแม่นยำ แต่มีราคาที่ค่อนข้างแพง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ในการตรวจวัดปรอทขึ้นมา เพื่อลดต้นทุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน โดยนำระบบของเซนเซอร์ทางแสงที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเข้ามาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดอีกด้วย

2.2 เซนเซอร์ทางแสง (Optical sensor)

ในปัจจุบันเซนเซอร์ทางแสง เป็นที่นิยมในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการวิเคราะห์โดยอาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางแสงแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ เซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย (Colorimetric sensor) สามารถตรวจวัดด้วยตาเปล่าจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายได้โดยตรง ซึ่งแสดงผลออกมาในรูปแบบทางกายภาพ มี 2 ลักษณะ คือ Red shift เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น และ Blue shift เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นลดลง ส่วนเซนเซอร์ที่อาศัยการเรืองแสง (Fluorogenic sensor) จะมีสภาพไวที่สูงกว่าแต่มีข้อจำกัด คือ ต้องใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นวิธีที่ยุ่งยากกว่าเซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย ดังนั้นผู้ทดลองจึงได้ศึกษาเทคนิคนี้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในการตรวจวัดตัวอย่างเนื่องจากสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ยุ่งยากหรือซับซ้อนแต่อย่างใด ตรวจวัดได้ง่ายและสะดวก [20]

ซึ่งวัสดุที่สามารถทำเป็นเซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายได้นั้นมีหลายชนิด เช่น ในงานวิจัยของสรายุทธ เวชสิทธิ์ [21] ใช้ลิแกนด์ที่เป็นอนุพันธ์ของโรดามีน บี (Rhodamine B) ที่มีหมู่ไฮโอเซมิคาร์บาไซด์ (Thiosemicarbazide) และหมู่แนฟทิล (Naphthyl) มาเป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดไอออนคอปเปอร์ (II) ถัดมาในงานวิจัยของห่วยเถากง [22] ได้นำอนุพันธ์อะมิโดไพลิดินิมตัวใหม่ ที่มีหมู่แอนทราซีน (Anthracene) เป็นตัวให้สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ในการตรวจวัดฟอสเฟตไอออน (H_2PO_4^-) ซึ่งไอออนฟอสเฟตจะเข้าจับกับอนุพันธ์ไทโอยูเรียแล้วทำให้หมู่แอนทราซีน (Anthracene) เกิดการเคลื่อนเข้ามาใกล้กันมากขึ้นจนเกิดเป็นเอ็กซ์ไซเมอร์ (Excimer) จากนั้นมีการนำเส้นใยนาโนของแพลตินัม-แพลลิเดียมที่เคลือบบนแผ่นบางขนาดนาโนแกรฟีน (PtPdNDs/GNs catalyst) ซึ่งพัฒนาจากกลุ่มงานวิจัยของเซียวเหมย ฉิน [23] เพื่อใช้ในการตรวจวัดไอออนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ถัดมาในงานวิจัยของลิลิ [24] ได้ใช้สัญญาณของไอโอโดโรดเบนพื้นผิวของทองแดงและอนุภาคทองนาโน เมื่อนำไปตรวจวัดปรอท จะพบว่าสารละลายเกิดการเปลี่ยนสีจากสีชมพูเป็นสารละลายใสไม่มีสี และในงานวิจัยของคาลิล ฟาฮาดี [25] ได้ทำการศึกษาตัวรับรู้เชิงสีของโลหะผสมเงินและแพลลิเดียมอนุภาคระดับนาโนที่อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า เพื่อนำไปตรวจวัดซีสเตอีนจะทำให้สารละลายเปลี่ยนสีจากสีเหลืองน้ำตาลไปเป็นสีเขียว



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างเซนเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย

2.3 การสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโน

อนุภาคทองระดับนาโน คือ โลหะทอง (Gold metal) ที่มีขนาดนาโน มักเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาการรีดิวซ์อนุมูลทองให้กลายเป็นโลหะทอง ทำให้อนุภาคทองระดับนาโนมีคุณสมบัติเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขึ้นกว่าทองปกติที่เคลื่อนต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งการสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโนมีหลายวิธีดังนี้

2.3.1 วิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction)

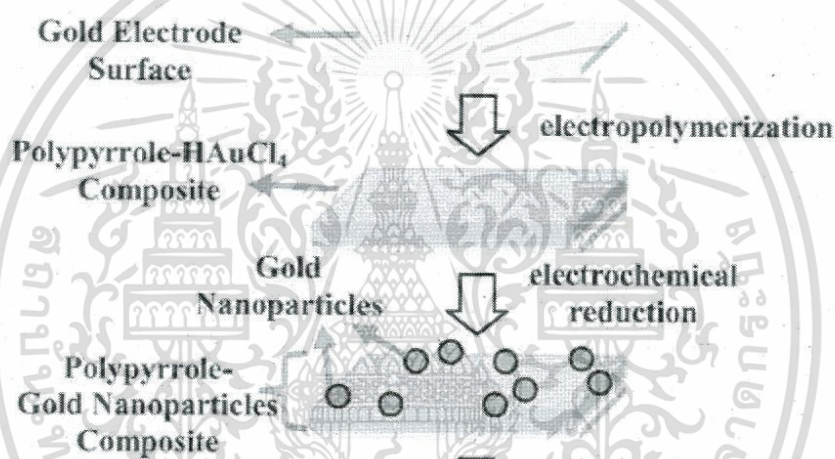
การสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโนด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี หรือวิธีของเทอร์เควิช [26] จะอาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ HAuCl_4 กับโซเดียมซิเตรท ซึ่งในวิธีการนี้โซเดียมซิเตรทจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และเป็นสารรักษาเสถียรภาพของทองไว้ และอนุภาคที่ได้จะมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งข้อจำกัดของวิธีการสังเคราะห์แบบเทอร์เควิช คือขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในช่วง 10-20 nm ถ้าต้องการให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจะต้องปรับสัดส่วนของปริมาณซิเตรท ซึ่งจะทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันและทำให้ได้อนุภาคที่มีรูปร่างเปลี่ยนไป

2.3.2 วิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical method)

การสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโนโดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า [27] จะมีขั้วอิเล็กโทรดสองขั้ว โดยขั้วแอโนดเป็นแผ่นทอง และขั้วแคโทดเป็นแผ่นแพลตตินัม ซึ่งขั้วทั้งสองจะจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น เฮกซะเดซิลไตร-เมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C_{16}TAB) และ เตตระโต-เดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (TC_{12}AB) โดย C_{16}TAB จะทำหน้าที่เป็นตัวเคลือบทอง เพื่อป้องกันไม่ให้ทองขยายออกด้านข้าง ในขณะที่ TC_{12}AB ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดโครงสร้างแบบแท่ง จากนั้นทำการเติมอะซิโตนและเฮกเซนลงไปเล็กน้อย เพื่อไม่ให้เกิดโครงร่างไมเซลล์ที่แข็งแรง [28] ซึ่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะพบว่าทองที่ขั้วแอโนดจะเปลี่ยนไปเป็น AuBr_4^- และสารประกอบของทองที่เกิดขึ้นจะถูกกระแสไฟฟ้าผลักดันให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ซึ่งเป็นจุดที่จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน จากนั้น Au^0 จะเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยของหลานซู [29] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) บนแผ่นฟิล์มของ polypyrrole โดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า ขั้นตอนแรกจะทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์คือ Polypyrrole ด้วยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าลงบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานคือขั้วทองจะจุ่มอยู่ในสารละลายผสมระหว่าง HAuCl_4 , Pyrrole และ Na_2SO_4 เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ Pyrrole มีการสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดเป็นไดเมอร์ ไตรเมอร์ และพอลิเมอร์ตามลำดับ เมื่อได้ Polypyrrole เคลือบอยู่บนพื้นผิวอิเล็กโทรดแล้วจะทำการสังเคราะห์อนุภาคทองคำนาโนด้วยการใช้วิธีดักจับทางเคมีไฟฟ้าในการทำปฏิกิริยาจะให้ศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้า 0-0.8 V ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทองจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันจะได้ Au^0 ซึ่งจะรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคอยู่บนบนแผ่นฟิล์มของ Polypyrrole



รูปที่ 2.2 แสดงการสังเคราะห์อนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) บนแผ่นฟิล์มของ Polypyrrole ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

เช่นเดียวกับงานวิจัยของเฉินจงหวง [30] ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคทองคำนาโนคิ้วยด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธีนี้จะใช้ขั้วอิเล็กโทรดสองขั้ว โดยขั้วแอโนดคือทอง และขั้วแคโทดคือแพลตตินัม ขั้วทั้งสองจะจุ่มอยู่ในสารละลาย CTAB ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ทองที่ขั้วแอโนดเมื่อให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปทองจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดซึ่งจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดย CTAB จะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และสารรักษาเสถียรภาพจะได้ Au^0 หรือ Au atom และในการงานวิจัยนี้ได้เติม Acetone ลงไปในสารละลาย CTAB จะทำให้เกิด Micelle Template ไปเคลือบอนุภาคทองคำนาโน ยังมีปริมาณของอะซิโตนมากอนุภาคทองคำนาโนจะเปลี่ยนรูปร่างจากทรงกลมเป็นลูกบาศก์มากขึ้น

2.3.3 วิธีการปลูกเมล็ด (Seed-mediated growth method)

วิธีการปลูกเมล็ด เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยในขั้นแรกจะเตรียมเมล็ดทองขึ้นมา ก่อนด้วยการนำ HAuCl_4 ทำปฏิกิริยากับ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เป็นตัวรีดิวซ์และใช้โซเดียมซิเตรทเป็นสารรักษาเสถียรภาพ จากนั้นเติมสารละลายผสมของ HAuCl_4 กับ C_{16}TAB และกรดแอสคอร์บิก ลงในเมล็ดทองที่เตรียมไว้ในขั้นแรก โดยกรดแอสคอร์บิกจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์อ่อน ๆ ส่วน C_{16}TAB จะใช้หมู่ไตรเมทิลแอมโมเนียมที่เป็นส่วนหัวจับกับเกล็ดของเมล็ดทอง ส่วนด้านไฮโดรคาร์บอนจะเกิดชั้นสองชั้นโดยยึดกันไว้ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ แล้วเกิดโครงสร้างแบบแท่งขึ้น ซึ่งความยาวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนก็มีผลต่อความยาวของแท่งนาโนเช่นเดียวกัน โดยพบว่าถ้าสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวขึ้นจะทำให้ได้แท่งนาโนที่ยาวกว่าสายไฮโดรคาร์บอนที่สั้นกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [31]

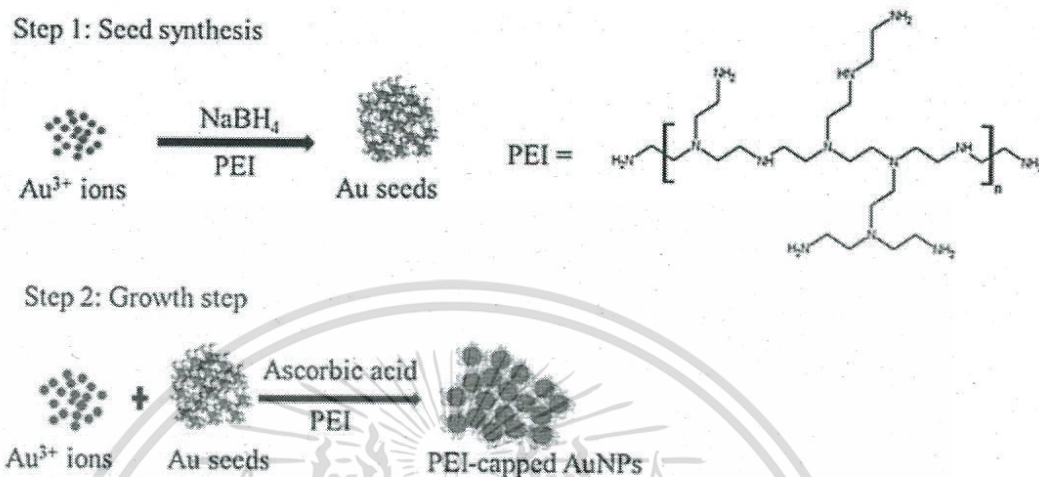


รูปที่ 2.3 แสดงอันตรกิริยาระหว่าง C_{16}TAB กับโครงสร้างระดับนาโนแบบแท่ง [31]

เช่นเดียวกับเอลเซย์เยท [32] และลีโจวอี้ [33] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคด้วยวิธีการปลูกเมล็ดโดยจะเตรียมเมล็ดทองด้วยวิธีรีดักชันทางเคมีเตรียมได้จากนำ HAuCl_4 ทำปฏิกิริยากับ NaBH_4 ที่เป็นตัวรีดิวซ์และ CTAB เป็นสารรักษาเสถียรภาพจากนั้นนำเมล็ดทองที่ได้ทำการผสมกับสารละลาย Au^+ (เตรียมจาก AuCl_4 ทำปฏิกิริยากับ CTAB, CTAB และกรดแอสคอร์บิกจะได้อนุภาคทองนาโนรูปร่าง 8 เหลี่ยม ส่วนกลุ่มวิจัยของจูลีเย เจนคิน [34] ได้ทำการทดลองโดยเตรียมอนุภาคทองนาโนโดยใช้สารละลาย Gold (III) chloride trihydrate (HAuCl_4) ทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิเตรทซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และเป็นสารรักษาเสถียรภาพจะได้สารละลายสีม่วงแดงแล้วนำไปให้ความร้อนและปั่นกววนอีก 20 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องสารละลายนี้จะถูกนำมาใช้ในการเตรียมด้วยวิธีปลูกเมล็ดโดยจะเติมสารละลาย Hydroxylamine hydrochloride ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) ในการเตรียมทองด้วยวิธีนี้อาจจะได้อนุภาคแบบทรงกลม และเอนิช ฟิลลิป [35] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคทองนาโนด้วยวิธีการปลูกเมล็ดโดยจะเตรียมเมล็ดทองเป็นขั้นตอนแรกด้วยการนำ HAuCl_4 ทำปฏิกิริยากับ NaBH_4 ที่เป็นตัวรีดิวซ์และรักษาเสถียรภาพด้วย Polyethyleneimine (PEI) เมื่อได้เมล็ดทองแล้วจะนำไปผสมกับสารละลาย HAuCl_4 , PEI และกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอสคอร์บิกจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์อ่อนๆ ส่วน PEI จะช่วยในการควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนให้มีลักษณะที่กลมอย่างสม่ำเสมอ โดยการล้อมรอบอนุภาคไว้ ดังรูป



รูปที่ 2.4 แสดงการสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยวิธีปลูกเมล็ด [35]

2.3.4 วิธีการรีดักชันโดยใช้แสง (Photochemical reduction method)

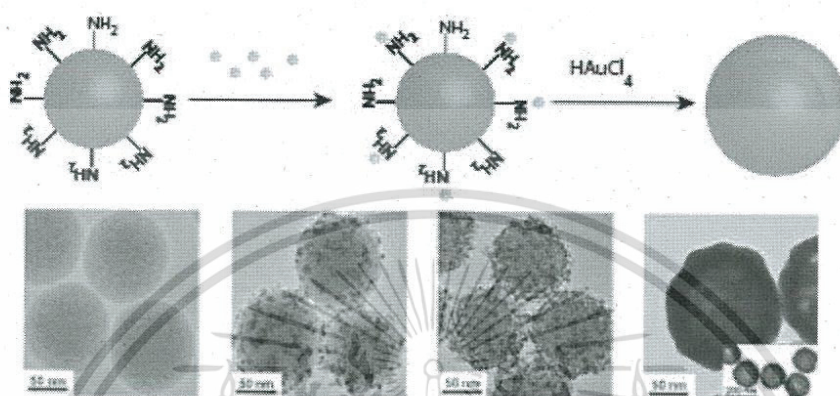
โซฮันตง [36] และคิม [37] ได้ศึกษาวิธีโดยการฉายแสงที่มีความยาวคลื่น 250-400 nm ไปยังสารละลาย HAuCl_4 ในเอทิลีนไกลคอลและพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่เป็นตัวเคลือบซึ่งกลไกการเกิดอนุภาคนาโนจะใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นให้ Au^{3+} ไปสู่สภาวะกระตุ้น หลังจากนั้นเอทิลีนไกลคอลจะรีดิวซ์ Au^{3+} ไปเป็น Au^{2+} ซึ่ง Au^{2+} จะเกิดการสลายตัวไปเป็น Au^{3+} และ Au^+ หลังจากนั้นอาจจะเกิดปฏิกิริยาได้สองแบบคือ ปฏิกิริยารีดักชันด้วยเอทิลีนไกลคอลและเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวไปเป็น Au^0 ซึ่งก็จะเกิดการนิวคลีโอซันต่อไป ส่วนห่วย เฉินหวง [38] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคทองนาโนด้วยวิธีรีดักชันโดยยิงแสง NIR จาก เลเซอร์ไดโอด ความยาวคลื่น 808 nm ไปยังสารละลาย HAuCl_4 ในโซเดียมออกซาลेटที่เป็นตัวรีดิวซ์ลักษณะของอนุภาคนาโนจะมีรูปร่างสามเหลี่ยมหรือหกเหลี่ยม ซึ่งขนาดของอนุภาคขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโซเดียมออกซาลेट

2.3.5 วิธีการสังเคราะห์แบบมีแกนกลางและเปลือกหุ้ม (Core-shell nanoparticle)

การสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโนแบบมีแกนและเปลือกหุ้ม เป็นวิธีที่ได้รับการพัฒนาจากกลุ่มวิจัยของฮาลัส [39] และลีเสี่ยวซิน [40] โดยจะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน โดยขั้นแรกเป็นการสังเคราะห์แกนกลาง (Core) ขึ้นมาก่อนจากนั้นนำอนุภาคนาโนของซิลิกาที่เตรียมได้จากวิธีการของสโตเบอร์ ซึ่งพื้นผิวของซิลิกาจะถูกปรับให้เป็นหมู่เอมีโน เพื่อเพิ่มความสามารถในการจับกับไอออนของทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ 3-amino propyltriethoxysilane และขั้นตอนที่สอง เป็นการเคลือบอนุภาคของลงบนแกนกลางที่หมู่อะมิโน (Shell) แต่วิธีการสังเคราะห์นี้มีข้อจำกัด คือ ควบคุมความหนาและความสม่ำเสมอในการเคลือบได้ยาก ซึ่งการสังเคราะห์โครงสร้างแบบนี้จะให้อนุภาคที่มีเกรนใหญ่และพื้นผิวขรุขระ หรืออาจจะได้อนุภาคที่เคลือบด้วยทองแค่บางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.5 แสดงวิธีการสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโนแบบมีแกนกลางและเปลือกหุ้มและภาพ TEM ของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ [39]

นอกจากนี้หยางลีหมิน [41] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแบบมีแกนกลางและเปลือกหุ้มโดยจะสังเคราะห์อนุภาคทองนาโนเป็นแกนกลางซึ่งจะใช้วิธีตกชั้นทางเคมีด้วยการนำ HAuCl₄ ทำปฏิกิริยากับ Sodium citrate ที่เป็นตัวรีดิวซ์และสารรักษาเสถียรภาพ จากนั้นจะทำการเคลือบด้วย Polyaniline ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันบนพื้นผิวของอนุภาคทองนาโนจะเกิด Interaction ระหว่าง หมู่ NH₂ ของ aniline และ AuNPs และในงานวิจัยของเมทเรท ฮี [42] ได้ทำการสังเคราะห์ Gold-silver nanoparticles Core-shell ด้วยการใช่วิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดยจะทำการสังเคราะห์แกนกลางคืออนุภาคทองนาโนซึ่งจะใช้สารจากธรรมชาติคือ Curdlan เป็นตัวรีดิวซ์และสารรักษาเสถียรภาพซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของ Curdlan จะมีหมู่ไฮดรอกซิลจะสามารถเกิดพันธะกับ Au ได้ จากนั้นจะทำการเติมสารละลาย AgNO₃ ซึ่งจะถูกรีดิวซ์ด้วย Curdlan ภายใต้อุณหภูมิและความดันเพื่อเคลือบลงบนพื้นผิวของอนุภาคทองนาโน

2.4 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน

อนุภาคเงินระดับนาโน คือ เทคโนโลยีการสังเคราะห์เงินหรือซิลเวอร์ (Silver) ให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร คือ มีขนาดไม่เกิน 100 nm ซึ่งอนุภาคเงินระดับนาโนมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคหรือแบคทีเรียอีกด้วย โดยวิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนมี 3 วิธีได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ ซึ่งแต่ละวิธีจะให้ขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป

2.4.1. วิธีทางกายภาพ (Physical approach)

วิธีสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีทางกายภาพ เป็นวิธีที่ไม่ใช่การทำปฏิกิริยาระหว่างสารเคมี เช่น เทคนิคการระเหยสาร (Evaporation) เทคนิคการยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) [43] เทคนิคการใช้ไมโครเวฟ (Microwave) [44] และเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical process) เป็นต้น วิธีการนี้เป็นวิธีการที่สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคได้อย่างแน่นอน แต่อนุภาคส่วนใหญ่ที่ได้จะไม่ค่อยเสถียร

2.4.2. วิธีทางเคมี (Chemical approach)

2.4.2.1 วิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method)

วิธีรีดักชันทางเคมีเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้กันเป็นจำนวนมาก เป็นวิธีที่อาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดักชันระหว่างสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต กับตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และสารรักษาเสถียรภาพ (Stabilizing agent) เพื่อให้ Ag^+ กลายเป็น Ag^0 ซึ่งอนุภาคที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเล็กและมีจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของปริม [45] ได้ทำการเติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในสารละลายผสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เป็นตัวรีดิวซ์ และโซเดียมซิเตรตที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพ แล้วทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที สารละลายจากใสไม่มีสีกลายเป็นสีเหลือง ซึ่งอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็ก 8.3 nm และสามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 395 nm ส่วนงานวิจัยของซาเลสกา [46] ได้ทำการผสมซิลเวอร์ไนเตรต กับ โพลีไวนิลไพโรลิโดน จากนั้นค่อยๆ หยดโซเดียมซิเตรตลงไปพร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว แสดงว่าซิลเวอร์ไอออนถูกเปลี่ยนเป็นอนุภาคเงินนาโนแล้ว จากนั้นนำไปทำการตกตะกอนเพื่อแยกเอาอนุภาคเงินนาโนก่อนไปทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ นอกจากนี้ในงานวิจัยของราเจศกมา [47] ได้พัฒนาระบบส่งยา โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโนด้วยวิธีรีดักชันทางเคมีที่ใช้ตัวรีดิวซ์และสารรักษาเสถียรภาพที่แตกต่างกัน เช่น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ไตรโซเดียมซิเตรต และโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เพื่อหาตัวรีดิวซ์และสารรักษาเสถียรภาพที่เหมาะสมในการใส่ตัวยาแวนโคมัยซิน (Vancomycin) ที่เป็นยาปฏิชีวนะที่มีโครงสร้างทางเคมีแบบไกลโคเปปไทด์ ซึ่งงานวิจัยนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของยาและสามารถส่งยาไปยังเป้าหมายได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 วิธีรักษาเสถียรภาพด้วยความเกะกะ (Steric stabilization)

เป็นวิธีที่ใช้พอลิเมอร์หรือสารอินทรีย์ที่มีสายโซ่ยาวหรือมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความเกะกะสูงในการยึดที่ผิวของอนุภาคด้วยแรงผลักด้านทางไฟฟ้า โดยจะใช้ตัวกลางที่มีประจุอิสระกระจายตัวอยู่ แต่วิธีนี้จะใช้ตัวกลางที่เป็นพอลิเมอร์หรือสารที่มีขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่แทน ไว้ ยกตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของเทอเรนนี่วา [48] ได้ใช้สาร Polyhexamethylene guanidine hydrochloride มาเป็นตัวที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคเงินนาโน และในงานวิจัยของเอมมา [49] ได้นำเคซีนไมเซลล์ (Casein micellar) ที่เป็นโปรตีนชนิดหนึ่งมาทำการยึดเกาะผิวอนุภาคเงินนาโนแทนการใช้ซีเตรท ซึ่งโมเลกุลของเคซีนจะถูกอนุภาคเงินนาโนดึงดูดและยึดติดที่ผิวทำให้เกิดชั้นของโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ล้อมรอบอนุภาค ส่งผลให้อนุภาคมีความเสถียรและอนุภาคไม่สามารถรวมตัวกันได้

2.4.3. วิธีทางชีวภาพ (Biological approach)

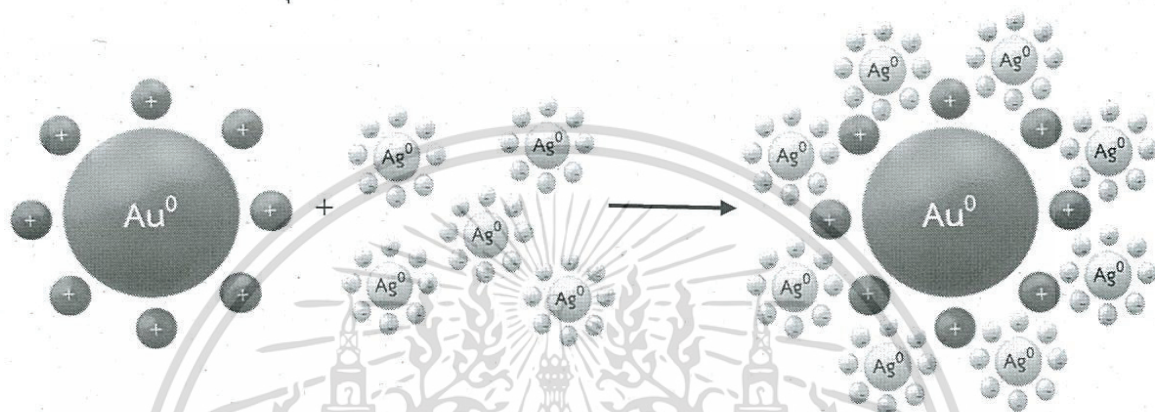
วิธีทางชีวภาพเป็นวิธีที่ใช้สารในการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Green method) หรือมีความเป็นพิษน้อย เช่น ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายหรือตัวรีดิวซ์ และใช้สารที่ไม่เป็นพิษมาเป็นสารรักษาเสถียรภาพ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของรินา [50] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน โดยใช้สารสกัดจากพืชแทนการใช้สารเคมีเพื่อประยุกต์ใช้ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ โดยเติมซิลเวอร์ไนเตรตลงในสารสกัดจากพืช จากนั้นสารละลายเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีเขียวน้ำตาล นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของเรตตี [51] ที่ได้นำใบกะเพรามาเป็นตัวรีดิวซ์และเป็นสารรักษาเสถียรภาพ จากนั้นนำไปอบและบดเป็นผง แล้วนำไปต้มพร้อมทั้งกรอง จากนั้นเติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 5 มิลลิกรัม ลงในสารสกัดจากใบกะเพรา 1 มิลลิกรัม แล้วทำการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งลักษณะของอนุภาคเงินนาโนที่ได้จะมีลักษณะเป็นผลึกรูปสามเหลี่ยม มีขนาดเฉลี่ย 42 นาโนเมตร และในงานวิจัยของปิงเย้า [52] ได้ทำการเติมสาร Proanthocyanidins ที่สกัดได้จากเมล็ดองุ่น ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และเป็นสารรักษาเสถียรภาพ โดยจะทำการเติมสารสกัดเมล็ดองุ่นลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต โดยสารละลายจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีม่วงแดงไปเป็นสีน้ำตาล ซึ่งวิธีการสังเคราะห์นี้เป็นวิธีการที่สามารถวิเคราะห์ได้ประสิทธิภาพสูงเหมือนกับวิธีอื่นๆ สังเคราะห์ได้ง่าย ปลอดภัยต่อผู้ทำการวิจัยและสิ่งแวดล้อมแถมยังมีต้นทุนต่ำกว่าอีกด้วย แต่ควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคได้ยาก

2.5 เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) บนพื้นผิวอนุภาค

เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวอนุภาคเป็นเทคนิคที่ทำให้อนุภาคที่แตกต่างกันสามารถมาคอมโพสิตกันได้ โดยใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวกลาง ซึ่งจะอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตระหว่างประจุที่แตกต่างกันของโพลีอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งโพลีอิเล็กโทรไลต์ คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดประจุได้แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ โพลีแอนไอออน (Polyanion) ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุลบ และโพลีแคทไอออน (Polycation) ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุบวก เช่น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโนแล้วปรับปรุงสภาพพื้นผิวทองระดับนาโนด้วย PDADMAC ที่เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวก และทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนที่มีพื้นผิวเป็นประจุลบของ COPSS จากนั้นทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสม โดยนำอนุภาคทองและเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้มาคอมโพสิตกัน ซึ่งอนุภาคทั้งสองจะยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตระหว่างประจุที่แตกต่างกันของพอลิอิเล็กโทรไลต์บนพื้นผิวอนุภาค



รูปที่ 2.6 เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นบนอนุภาค

2.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ (Characterlization)

2.6.1 ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-vis Spectrophotometry)

เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้ม (Intensity) ของสารตัวอย่างที่มีหมู่โครโมฟอร์ (Chromophores) หมู่ออกโซโครม (Auxochrome) และ Lone pair electron เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า แล้วทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ “Beer-Lambert” ซึ่งค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังสมการที่ 2.1 ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณ และเป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวที่ดี ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า “Spectrum” [53]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

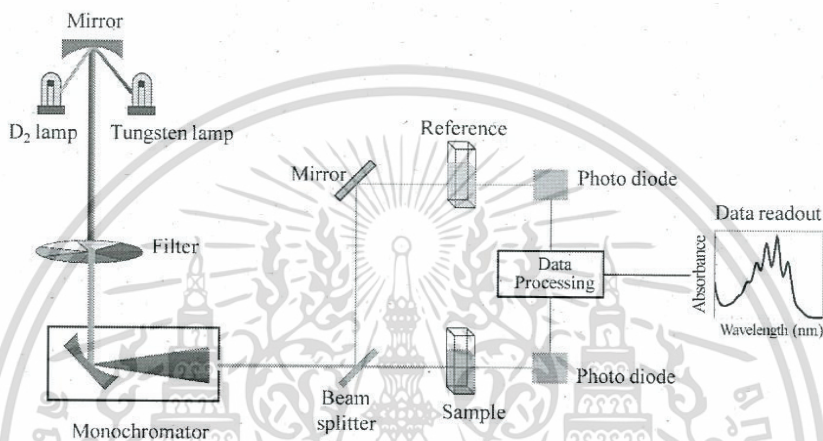
$$A = \epsilon bc \quad (2.1)$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

ϵ คือ ค่าโมลาร์แอบซอร์ปทิวิตี (molar absorptivity) ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

b คือ ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง หรือ ความกว้างของเซลล์ (cm)

c คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (mol L^{-1})



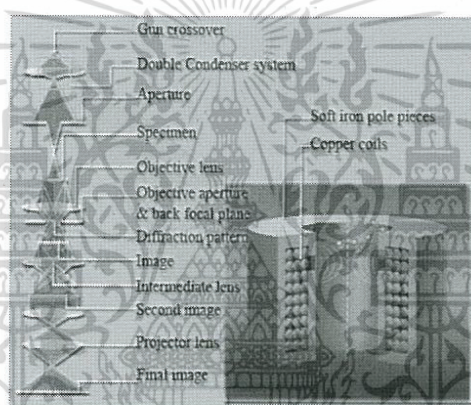
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-vis spectrophotometer [54]

2.6.2 ศักย์ซีต้า (Zeta potential)

ศักย์ซีต้า (Zeta potential) เป็นเทคนิคที่อาศัยความแตกต่างของประจุไฟฟ้าระหว่างชั้นความหนาแน่นของไอออนที่อยู่รอบๆอนุภาคและประจุในของเหลวที่อยู่ล้อมรอบเมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในเซลล์ อนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วตรงข้ามกับชนิดของประจุโดยความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า สำหรับค่าศักย์ซีต้าจะสัมพันธ์กับประจุบนผิวของอนุภาคซึ่งมีผลต่อการตกตะกอน และการเกาะตัวกัน ถ้าอนุภาคมีค่าศักย์ซีต้ามากกว่า +30 mV หรือมีค่าน้อยกว่า -30 mV แสดงว่าอนุภาคที่ได้จะไม่เสถียรและเกิดการกระจายตัว แต่ถ้ามีค่าศักย์ซีต้าอยู่ในช่วงระหว่าง -30 ถึง +30 mV อนุภาคที่ได้จะไม่เสถียรแล้วเกิดการรวมตัวกันและตกตะกอน โดยเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ขนาดอนุภาคในช่วง 0.3-5,000 nm และอนุภาคควรอยู่ในตัวกลางที่สามารถนำไฟฟ้าได้ หรือ มีค่าไดอิเล็กทริกค่อนข้างสูง เช่น น้ำ เป็นต้น [55]

2.6.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เป็นเทคนิคที่ใช้ในการสร้างภาพของสารตัวอย่างขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนจะถูกแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) บีบให้เป็นลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง (Specimen) ที่บางมากๆ แล้ววิ่งไปยังเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งทำหน้าที่ปรับโฟกัสและสร้างภาพที่ intermediate image ขึ้น และขยายสัญญาณภาพด้วย Projector Lens ลงบนฉากเรืองแสง (Fluorescence Screen) เกิดเป็นภาพ 2 มิติขึ้น โดยที่วัตถุที่มีค่าเลขอะตอม (Atomic Number) มากภาพที่ได้จะมีสีดำส่วนวัตถุที่มีเลขอะตอมน้อยภาพที่เห็นจะเป็นสีขาว ภาพที่ได้จะถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD (Charge Coupled Device) และสามารถวิเคราะห์หาธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) ได้ [56]

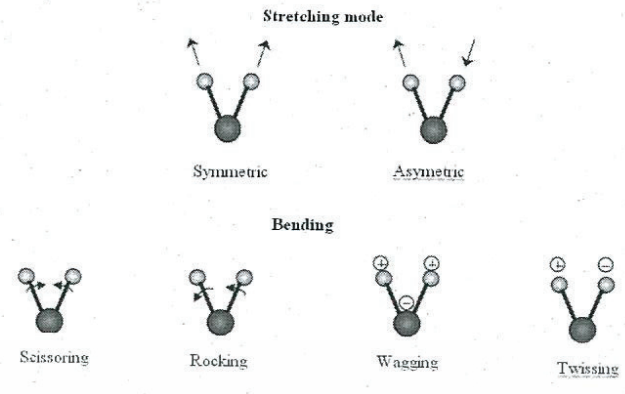


รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่อง TEM [56]

2.6.4 พูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)

ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชนิดของสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ของเหลว ก๊าซได้ ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยและไม่สิ้นเปลืองสารเคมี แต่มีข้อจำกัดคือสารตัวอย่างต้องไม่มีน้ำปนอยู่ ซึ่งเทคนิคนี้อาศัยการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างในย่านความถี่ของแสงช่วงอินฟราเรด (Infrared light) ที่อยู่ในช่วง Middle Infrared ($4000-200\text{ cm}^{-1}$) แล้วเกิดการสั่น (Vibration) ของพันธะภายในโมเลกุลจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) โดยลักษณะการสั่นในโมเลกุลของสารมีสองแบบคือ การสั่นแบบยืด (Stretching) และการสั่นแบบงอ (Bending) ดังรูปที่ 2.7 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า “Infrared spectrum” [57]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



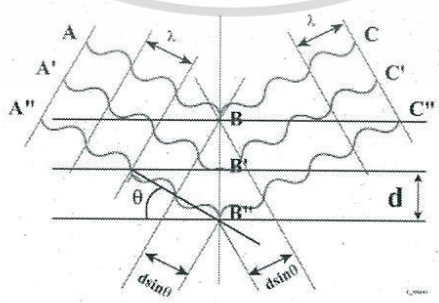
รูปที่ 2.9 ลักษณะการสั่นในโมเลกุลของสาร [57]

2.6.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์มาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะอาศัยหลักการของ 'Bragg's law' ดังสมการที่ 2.2 ในการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดสัญญาณเป็นตัวรับข้อมูล

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{2.2}$$

- เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
- d คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
- θ คือ มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งเท่ากับมุมตกกระทบ
- n คือ ลำดับการเลี้ยวเบน มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มคือ 1,2,3...n



รูปที่ 2.10 แสดงหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [58]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งโครงสร้างของสารจะมีองค์ประกอบในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไปจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ รูปร่าง ขนาด และ ลักษณะของผลึก จึงสามารถบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ [58]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 ระบบตัวรับรู้เชิงสีปรอทที่เรียบง่ายและจำเพาะโดยใช้ไคโตซานรักษาเสถียรภาพอนุภาคทองระดับนาโน และ 2,6-pyridinedicarboxylic acid (A simple and selective colorimetric mercury (II) sensing system based on chitosan stabilized gold nanoparticles and 2,6-pyridinedicarboxylic acid)

งานวิจัยนี้พัฒนาโดยกลุ่มวิจัยของคุณ เทียน [59] โดยใช้ไคโตซานที่มีคุณสมบัติเป็นตัวรักษาเสถียรภาพในการสังเคราะห์อนุภาคทองนาโนเพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้เชิงสีในการตรวจวัดปรอทในตัวอย่างน้ำในแม่น้ำ ซึ่งทำการเตรียมอนุภาคทองนาโนโดยนำสารละลายไคโตซาน ที่ความเข้มข้น 1%w/v ปริมาตร 2 ml แล้วนำไปให้ความร้อนจนเดือดพร้อมปั่นกวนตลอดเวลาจากนั้นเติมสารละลายเตตระคลอโรอโรเท ความเข้มข้น 10 mM ปริมาตร 1 ml ลงไป สารละลายจะค่อยๆเปลี่ยนสีเป็นสีแดง จากนั้นปั่นกวนสารละลายอีกเป็นเวลา 10 นาที แล้วปล่อยให้เย็น และนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยแรงเหวี่ยงที่ 13,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ต่อมานำอนุภาคทองนาโนที่ได้ไปเก็บที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนใช้งานและเพื่อให้จำเพาะต่อการตรวจวัดปรอทจะนำ 2,6-pyridinedicarboxylic acid (PDA) ความเข้มข้น 10 mM ปริมาตร 1 ml ผสมกับอนุภาคทองระดับนาโนปริมาตร 0.4 ml และน้ำ ปริมาตร 2 ml จากนั้นนำไปให้ความร้อน อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปตรวจวัดปรอทสารละลายอนุภาคทองระดับนาโนจะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีฟ้าเนื่องจากปรอทเกิดปฏิกิริยากับอะตอมไนโตรเจนของไพรีดีน และสามารถตรวจวัดได้ในช่วงความเข้มข้น 300 nM - 5 μM ซึ่งเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นวิธีการที่ง่าย สามารถตรวจสอบปรอทโดยใช้ตาเปล่าได้ ช่วยลดราคาในการใช้เครื่องมือที่ซับซ้อนและการเตรียมตัวอย่างยาก

2.7.2 การตรวจวัดเชิงสีของปรอท (II) ในน้ำด้วยการสกัดอนุภาคทองในระดับนาโนแบบหยด (Single-drop gold nanoparticles for headspace microextraction and colorimetric assay of mercury (II) in environmental waters)

เทสเพย์ โทเลสซ่า และคณะ [60] ได้เห็นความสำคัญในการลดปริมาณการใช้ออนุภาคทองนาโนที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย จึงนำเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายหยดเดียว (SDME) เข้ามาช่วยในการตรวจวัดปรอทในน้ำ โดยทำการหยดอนุภาคทองนาโนที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดไธโอไกลโคลิค (TGA - AuNPs) ลงในสารตัวอย่างพร้อมทำการปั่นกวนตลอดเวลา จากนั้นฉีดสแตนนัส (II) คลอไรด์ (SnCl₂) ลงไป 1 ซีซี เพื่อให้ปรอทเกิดการระเหยจากปรอท (Hg²⁺) ไปเป็น ปรอท (Hg⁰) สารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีจากสีแดงเป็นสีฟ้า ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเทคนิคที่ง่าย ราคาไม่แพง ไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ยุ่ยยาก ซับซ้อนและสามารถตรวจวัดปรอทในน้ำที่ความเข้มข้นต่ำๆได้

2.7.3 ตัวรับรู้เชิงสีสำหรับการตรวจวัดปรอทโดยการสังเคราะห์สีเขียวและอนุภาคเงินระดับนาโน (Highly selective Hg^{2+} colorimetric sensor using green synthesized and unmodified silver nanoparticles)

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโนด้วยวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้เชิงสีในการตรวจวัดปรอท ซึ่งคาลิส ฟาฮาดี [6] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน โดยนำรากพืช hedysarum ปริมาตร 15 ml ภายใต้อุณหภูมิ $86^{\circ}C$ มาทำการสกัดเพื่อเป็นสารรักษาเสถียรภาพ และในงานวิจัยนี้สามารถตรวจวัดได้ในช่วงความเข้มข้น $10 - 100 \mu M$ มีค่าต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) คือ $2.2 \mu M$ นอกจากนี้ยังมีความไวและความจำเพาะในการตรวจวัดไอออนโลหะทรานซิชัน โลหะแอลคาไลน์ และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ โดยวิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก สามารถพกพาได้ และนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจหาปรอทในตัวอย่างน้ำได้อีกด้วย

2.7.4 การตรวจวัดเชิงสีโดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนสำหรับการตรวจวัดปรอทที่ง่าย และรวดเร็ว (Selective colorimetric sensors based on the monitoring of an unmodified silver nanoparticles reduction for a simple and rapid determination of mercury)

ปุมิ จารุจาร์ส [45] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาตัวรับรู้เชิงสีโดยใช้อนุภาคเงินนาโน (AgNPs) ที่เคลือบด้วยคอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) เพื่อเพิ่มความไวและจำเพาะต่อการตรวจวัดปรอทไอออนในตัวอย่างน้ำ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโน โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดักชันทางเคมีของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เป็นตัวรีดิวซ์ และไตรโซเดียมซิเตรตที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพ หลังจากนั้นเติมสารละลายคอปเปอร์ (Cu^{2+}) ที่ความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 1.25 ml แล้วทำการปรับปริมาตรเป็น 5 ml จะได้ขนาดของอนุภาคเงินนาโนเท่ากับ 8.3 ± 1.4 nm แล้วนำไปตรวจวัดปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆจะพบว่าสารละลายจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองเข้มไปเป็นสีเหลืองอ่อน ภายในเวลา 30 วินาที เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของปรอท (Hg^{2+}) ขึ้นจะส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินนาโนลดลงอย่างต่อเนื่องและเกิดการ Shift ไปทาง Blue shift ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปรอท (Hg^{2+}) ทำให้อนุภาคเงินนาโน (Ag^0) เกิดการออกซิเดชัน กลายเป็น Ag^+ และส่งผลให้อนุภาคเงินนาโน เกิดการสลายตัวเป็นอนุภาคที่เล็กลงจากนั้นปรอท (Hg^{2+}) จะเกิดการรีดักชันไปเป็น Hg^0 แล้วไปดูดซับบนพื้นผิวอนุภาคเงินนาโน ซึ่งในการทดลองจะได้กราฟมาตรฐานช่วง 0.5-7 ppm ($R^2 = 0.995$) ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดปรอท (LOD) = 0.06 ppm โดยงานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ที่ง่าย สะดวก ราคาไม่แพง และให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.5 ตัวรับรู้เชิงสีสำหรับการตรวจวัดปรอทด้วยปรอท-อนุภาคเงินนาโนรูปสามเหลี่ยมกับโครงสร้างคล้ายอะมัลกัม (A facile label-free colorimetric sensor for Hg^{2+} based on Hg-triangular silver nanoplates with amalgam-like structure)

การพัฒนาวิธีการตรวจวัดปรอท (Hg^{2+}) โดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนรูปสามเหลี่ยมมาเป็นตัวรับรู้เชิงสี ซึ่งเจียงโบ เฉิน และคณะ [61] ได้ทำการเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนโดยผสมสารละลายไตรโซเดียมไซเตรต ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพ ความเข้มข้น 30 mM ปริมาตร 300 μ l และสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 50 ml แล้วนำไปปั่นกวนจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 300 μ l ลงไปปั่นกวน 30 นาที แล้วทำการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C จากนั้นปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยการเติมไลซีน (Lysine) เพื่อให้อนุภาคเงินนาโนรูปสามเหลี่ยมเชื่อมระหว่างอัลลอยด์ของปรอทได้และจะทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจวัดปรอทสูงขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถตรวจวัดปรอทได้ในช่วงความเข้มข้น 30 nM - 50 μ M และตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการโดยการวิเคราะห์ปรอท (Hg^{2+}) ในน้ำประปา มีค่าร้อยละการคืนกลับ เท่ากับ 91.35 - 106%

2.7.6 การตรวจวัดเชิงสีสำหรับการตรวจวัดปรอทไอออนด้วยแกรไฟต์คาร์บอนไนไตรด์ที่ยึดเกาะกับแพลทินัมนาโนคอมโพสิต (Graphitic carbon nitride supported platinum nanocomposites for rapid and sensitive colorimetric detection of mercury ions)

หวังหยี่เหว่ย [62] ได้ทำการนำวัสดุนาโนคอมโพสิตของแกรไฟต์คาร์บอนไนไตรด์มายึดเกาะกับแพลทินัม ($g-C_3N_4/PtNPs$) เป็นตัวรับรู้ในการตรวจวัดปรอทไอออน ซึ่งใช้แกรไฟต์คาร์บอนไนไตรด์ ($g-C_3N_4$) เป็นสารรักษาเสถียรภาพ และโซเดียมโบโรไฮไดรด์จะเป็นตัวรีดิวซ์ แพลทินัมไอออน (Pt) ให้กลายเป็น แพลทินัมนาโน (PtNPs) แล้วไปเกาะบนพื้นผิวแกรไฟต์คาร์บอนไนไตรด์ จากนั้นเติมสารละลายเตตระเมทิลเบนซิดีน (TMB) ความเข้มข้น 1.2 mM ปริมาตร 200 μ l เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของ $g-C_3N_4/PtNPs$ เมื่อทำปฏิกิริยากับปรอท (Hg^{2+}) จะทำให้กลายเป็นอะมัลกัมของปรอทแพลทินัม (HgPt) ซึ่งเทคนิคที่ศึกษานี้มีความรวดเร็ว ง่าย ราคาไม่แพง สามารถสังเกตด้วยตาเปล่าได้ และมีขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดปรอท (LOD) เท่ากับ 1.23 nM

2.7.7 การตรวจวัดเชิงสีและเรืองแสงทางเคมีสำหรับการตรวจวัดปรอท โดยใช้การแลกเปลี่ยนไอออนของพอลิไดอะเซทิลีนแคทไอออน (A colorimetric and fluorescent chemosensor for detection of Hg^{2+} using counterion exchange of cationic polydiacetylene)

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาการตรวจวัดเชิงสีและเรืองแสงทางเคมีสำหรับการตรวจวัดปรอท (Hg^{2+}) โดยใช้การแลกเปลี่ยนไอออนของพอลิไดอะเซทิลีน (PDA) ที่มีหมู่ Quaternary ammonium เป็นแคทไอออน และ ไอโอดีนเป็นแอนไอออน ซึ่งคณะวิจัยของลีโชกยู [63] ได้ทำการเตรียม Diacetylene ที่มีส่วนผสมระหว่าง PCDA-EDA และ PCDA-TMEDA เป็นอัตราส่วน 7:1 แล้วนำไป Sonicate ที่ $80^{\circ}C$ เป็นเวลา 70 นาที จากนั้นกรองเพื่อกำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไปและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ $4^{\circ}C$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วฉายรังสี UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm เป็นเวลา 5 นาที เมื่อนำสารละลายพอลิไดอะเซทิลีน (PDA) ไปตรวจวัดปรอท (Hg^{2+}) สารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีฟ้าเป็นสีแดง ซึ่งเทคนิคที่ศึกษานี้มีความจำเพาะต่อการตรวจวัดปรอท (Hg^{2+}) ด้วยตาเปล่า ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดปรอท (LOD) เท่ากับ $8.3 \mu M$ และสามารถหาความเข้มข้นของปรอท (Hg^{2+}) ในตัวอย่างน้ำประปา

2.7.8 การตรวจวัดเชิงสีที่จำเพาะต่อปรอทไอออน โดยใช้การเรืองแสงของคูมาริน (Selective chromogenic and fluorogenic signalling of Hg^{2+} ions using a fluorescein-coumarin conjugate)

คิมฮีจุง [64] ได้ทำการศึกษาวิธีสังเคราะห์ไดคลอโรฟลูออเรสซิน คูมาริน (DCF-coumarin) โดยใช้ปฏิกิริยาของแมนนิช (Mannich) ในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารไดคลอโรฟลูออเรสซิน (DCF) กับพิดเพอราซีนคูมาริน (Piperazinyl-coumarin) เพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้ในการตรวจวัดเชิงสีของปรอทไอออน (Hg^{2+}) และในงานวิจัยพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของไดคลอโรฟลูออเรสซิน คูมาริน (DCF-coumarin) มีลักษณะเป็นพีค Broad และเกิดการ Shift ไปทาง Red-shift จากความยาวคลื่น 505 nm เป็น 515 nm ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถตรวจวัดปรอทด้วยตาเปล่าได้ และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของไดคลอโรฟลูออเรสซิน-คูมารินในการตรวจวัดปรอทไอออน (Hg^{2+}) ในน้ำ (LOD) เท่ากับ $4.3 \mu M$

2.7.9 การตรวจวัดเชิงสีของปรอทโดยการกัดและการรวมตัวกันของอนุภาคนาโนทองและเงินแบบแท่งที่มีการปรับปรุงด้วยซีสเทอีน (Colorimetric determination of Hg (II) by combining the etching and aggregation effect of cysteine-modified Au-Ag core-shell nanorods)

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองและเงินแบบแท่งเพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดเชิงสี โดยเจียน จู และคณะ [65] ได้เตรียมอนุภาคนาโนแบบแท่งด้วยการผสมสารละลาย CTAB ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 5 ml กับ สารละลายเตตระคลอโรเอทไทรไฮเดรต ความเข้มข้น 0.01 M ปริมาตร 250 μl พร้อมปั่นกววน จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.01 M ปริมาตร 250 μl จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้สารละลายสีน้ำตาลอ่อน และการเตรียมอนุภาคนาโนทองและเงินแบบแท่ง (Au-Ag core-shell nanorods) จะเตรียมโดยการนำอนุภาคทองนาโนแบบแท่งที่เตรียมก่อนหน้าไปปั่นเหวี่ยง 8000 รอบ/นาที่ 15 นาที จากนั้นเติมสารละลาย CTAB ความเข้มข้น 0.08 M สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.01 M สารละลายแอสคอร์บิกเอซิดความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 0.4 ml และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 1ml ในอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิ 65°C จากนั้นนำมาปรับปรุงพื้นผิวโดยการเติมสารละลาย แอล-ซิสเทอีน (L-Cysteine) ความเข้มข้น 2×10^{-4} M ปริมาตร 100 μ l แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 6000 รอบ/นาที่ 15 นาที ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถทำการตรวจวัดปรอทได้ในช่วงความเข้มข้นคือ 1 - 60 μ M และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดคือ 0.273 μ M

2.7.10 การตรวจวัดเชิงสีของปรอทด้วยการใช้สัญญาณของไอโอดไรด์บนพื้นผิวของทองแดงและทองอนุภาคนาโน (Iodide-responsive Cu @ Au nanoparticle-based colorimetric assay for sensitive mercury (II) detection)

ลิลิ [66] ได้ศึกษาการตรวจวัดเชิงสีของปรอทด้วยการใช้สัญญาณของไอโอดไรด์บนพื้นผิวอนุภาคนาโนของทองแดงและทอง โดยการเตรียมอนุภาคนาโนของทองแดงและทอง ด้วยการผสมน้ำ 20 ml ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 75 μ l และสารละลายโซเดียมซิติเรต ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 50 μ l ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ปริมาตร 1 ml พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที แล้วทำการเติมสารละลายคลอโรอูเรท ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 50 μ l ปั่นกวนอีก 20 นาที เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 14°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปตรวจวัดกับปรอท ต้องเติมสารละลายปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงในสารละลายทองแดงและทองอนุภาคนาโนทิ้งไว้ 21 นาที แล้วเติมสารละลายไอโอดไรด์ความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 20 μ l ตั้งทิ้งไว้ 25 นาที สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสารละลายใสไม่มีสี ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถตรวจวัดปรอทได้ในช่วงความเข้มข้น 0.1-70 nM และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ 0.037 nM

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้ ขั้นตอนที่ 1 คือ การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน ได้แก่ การสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction) การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนโดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชันของโซเดียมโบโรไฮไดรด์และใช้โพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิดเป็นสารรักษาเสถียรภาพ การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวอนุภาค

ขั้นตอนที่ 2 คือ การศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการรับรู้ของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินในการวิเคราะห์ปรอทไอออน ได้แก่ การศึกษาความเป็นเส้นตรง การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอทไอออน การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอทไอออน การศึกษาผลของเกลือที่ส่งผลต่ออนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน การศึกษาผลของตัวรบกวนที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ปรอทไอออน การศึกษาการวิเคราะห์ปรอทในตัวอย่างจริง

ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาตัวแปรทางเคมีวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ ค่าร้อยละการคืนกลับ ค่าความแม่นยำ และขั้นตอนที่ 4 เป็นการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีโดยเทียบกับวิธีมาตรฐานคือ Cold vapor atomic absorption spectrometry

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
2. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
3. ปีกเกอร์ (Beaker)
4. กระจกตวง (Cylinder)
5. ปิเปต (Pipette)
6. เทอร์มิเตอร์ (Thermometer)
7. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Stirrer)
8. เตาให้ความร้อน (Hot plate)
9. อ่างน้ำ (Water bath)
10. ช้อนตักสาร (Spatula)
11. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical balance)
12. ไมโครปิเปตขนาด 1000 μL รุ่น SL-1000XLS ผลิตโดยบริษัท Rainin, USA (Micropipette)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ	ประเภทรุ่นของเครื่องมือ	บริษัทที่ผลิต	ประเทศที่ผลิต
เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-vis spectrophotometer)	UV-1800	Shimadzu	ญี่ปุ่น
เครื่องวัดศักย์ซีต้า (Zeta potential analysis)	Zetasizer NanoZS	Malvern	อังกฤษ
เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)	Spectrum GX	Perkin Elmer	สหรัฐอเมริกา
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	TECNAI G2 20	FEI	สหรัฐอเมริกา
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD)	XRD-6100	Shimadzu	ญี่ปุ่น

3.3 สารเคมี

สารเคมี	สูตรโครงสร้าง	บริษัทที่ผลิต
เตตระคลอโรอโรเอทไตรไฮเดรต, Gold (III) chloride trihydrate	$\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Sigma-Aldrich
โซเดียมซิเตรทไตรเบสิกไดไฮเดรต, Sodium citrate tribasic dihydrate	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Sigma-Aldrich
โพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์, Poly(diallyldimethylammoniumchloride)	$(\text{C}_8\text{H}_{16}\text{ClN})_n$	Sigma-Aldrich
ซิลเวอร์ไนเตรต, Silver nitrate	AgNO_3	CARLO ERBA reagent
โซเดียมโบโรไฮไดรด์, Sodium borohydride	NaBH_4	Sigma-Aldrich
โพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิด, Poly(4-Styrenesulfonic acid-co-maleic acid)	$[\text{C}_2\text{H}_2(\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3)]_x[\text{CH}(\text{CO}_2\text{R})\text{CH}(\text{CO}_2\text{R})]_y$	Sigma-Aldrich

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

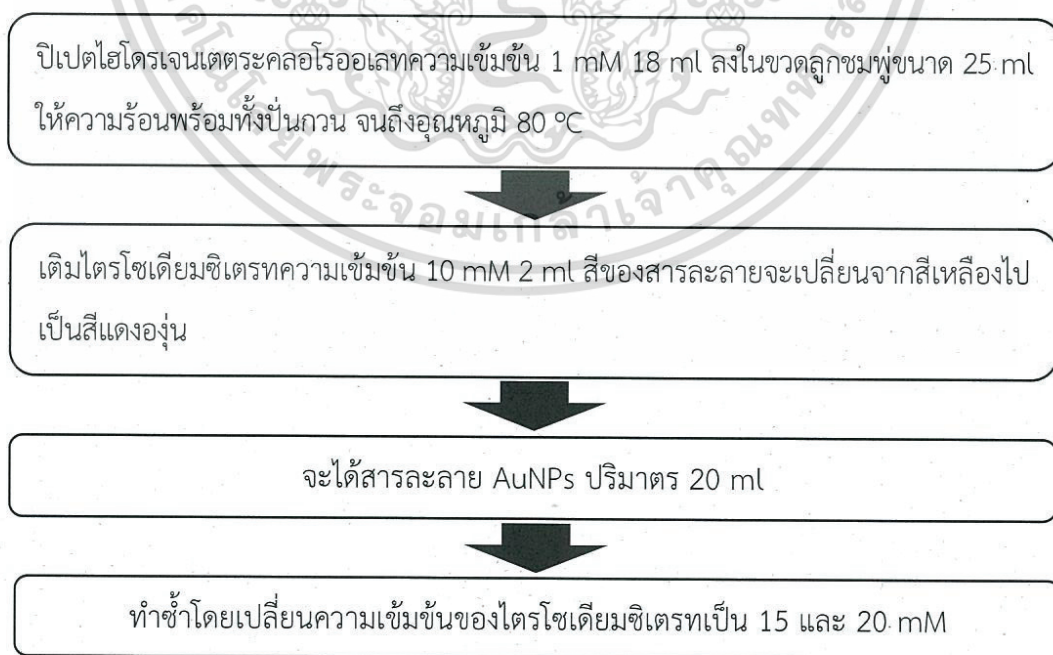
สารเคมี	สูตรโครงสร้าง	บริษัทที่ผลิต
กรดไนตริก, Nitric acid	HNO_3	CARLO ERBA reagent
โซเดียมไฮดรอกไซด์, Sodium hydroxide	NaOH	CARLO ERBA reagent
โซเดียมคลอไรด์, Sodium chloride	NaCl	CARLO ERBA reagent
โซเดียมซัลเฟต, Sodium sulfate	Na_2SO_4	CARLO ERBA reagent
โซเดียมฟอสเฟต, Sodium phosphate	Na_3PO_4	CARLO ERBA reagent

3.4 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน

3.4.1 การสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโนโดยวิธีของเทอร์เควิช

3.4.1.1 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรทสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโน

เปิดสารละลายไฮโดรเจนเตตระคลอโรออลาทความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 18 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดลูกอมพู่ขนาด 25 ml แล้วนำไปให้ความร้อนพร้อมทั้งปั่นกวนตลอดเวลาจนถึงอุณหภูมิ 80°C จากนั้นเติมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรทความเข้มข้น 10 15 และ 20 mM ปริมาตร 2 mL ลงไปที่ละความเข้มข้นตามลำดับ สังเกตสีของสารละลาย โดยสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นสีแดงอ่อน ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีการสังเคราะห์ AuNPs ด้วยไตรโซเดียมซิเตรทความเข้มข้น 10 15 และ 20 mM

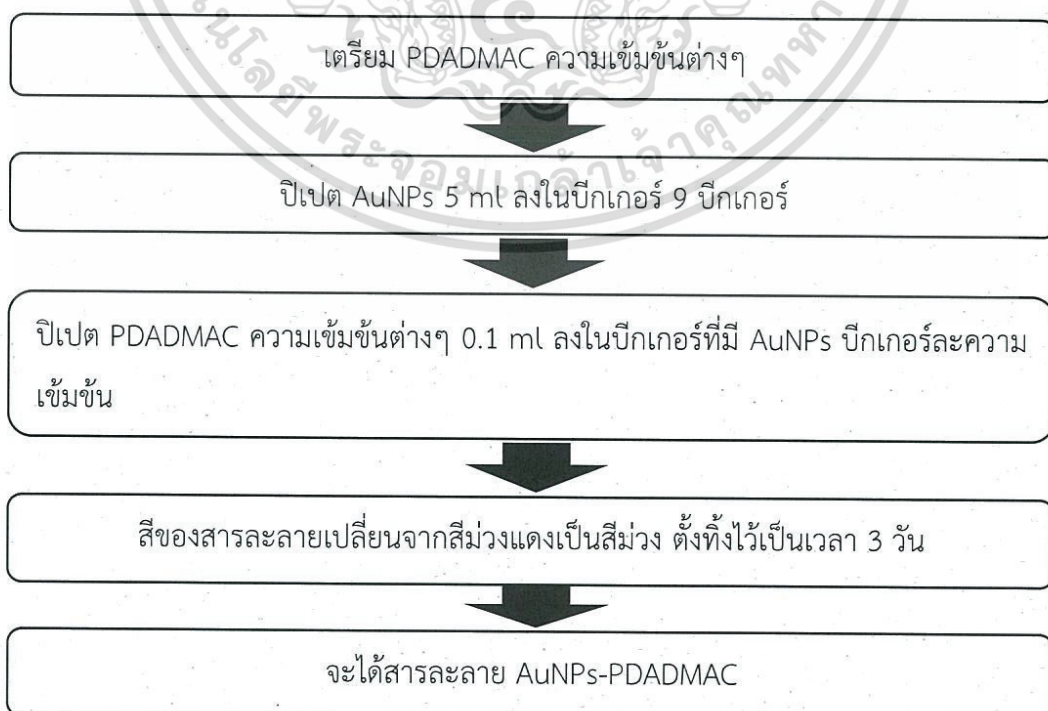
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะทำการศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้

ลำดับ	ตัวแปร	การวิเคราะห์
1	ศึกษาผลของการดูดกลืนแสงของ AuNPs	UV-vis spectrophotometry
2	ศึกษาสภาพความเป็นประจุของ AuNPs	Zeta potential
3	ศึกษารูปร่างและขนาดของ AuNPs	TEM
4	ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ AuNPs	FT-IR
5	ศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกของ AuNPs	XRD
6	ศึกษาธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ AuNPs	EDX

3.1.4.2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคทองระดับนาโน

เตรียมสารละลาย PDADMAC ความเข้มข้น 0.00001 0.0001 0.001 0.005 0.01 0.02 0.1 0.2 และ 0.3 M แล้วปิเปตสารละลาย AuNPs ที่สังเคราะห์ได้ปริมาตร 5 mL ลงในบีกเกอร์จำนวน 9 บีกเกอร์ จากนั้น ปิเปตสารละลาย PDADMAC ความเข้มข้นต่างๆที่เตรียมไว้ปริมาตร 0.1 mL ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลาย AuNPs อยู่ บีกเกอร์ละความเข้มข้น สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีม่วงแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 3.2



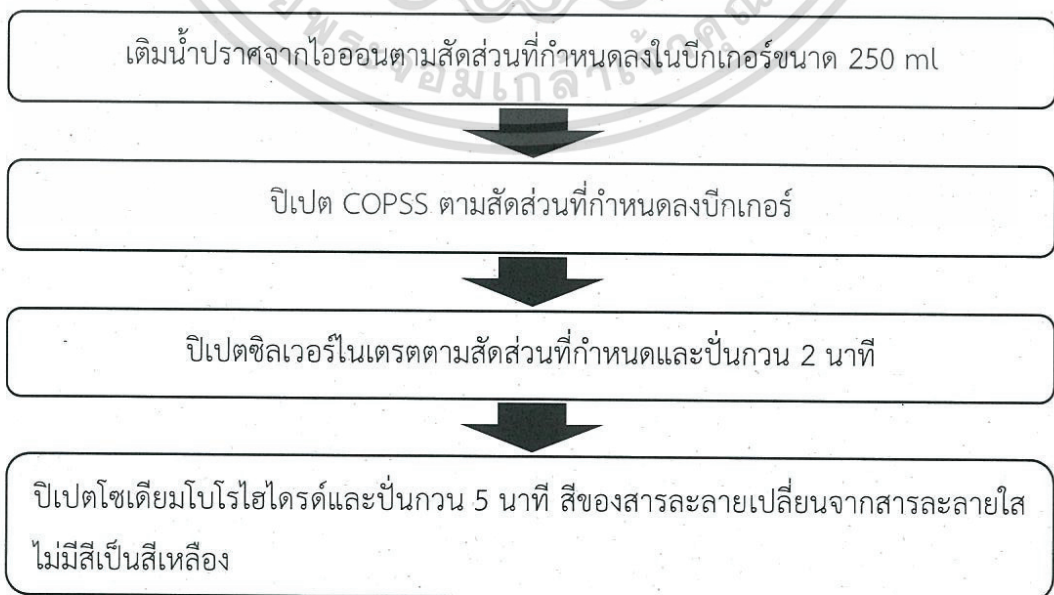
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก รูปที่ 3.2 แผนผังวิธีการการปรับปรุงพื้นผิว AuNPs ด้วย PDADMAC มีการนำไปใช้

โดยจะทำการศึกษาดังต่อไปนี้

ลำดับ	ตัวแปร	การวิเคราะห์
1	ศึกษาผลของการดูดกลืนแสงของ AuNPs-PDADMAC	UV-vis spectrophotometry
2	ศึกษาสภาพความเป็นประจุของ AuNPs-PDADMAC	Zeta potential
3	ศึกษารูปร่างและขนาดของ AuNPs-PDADMAC	TEM
4	ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ AuNPs-PDADMAC	FT-IR
5	ศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกของ AuNPs-PDADMAC	XRD
6	ศึกษาธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ AuNPs-PDADMAC	EDX

3.4.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนโดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชัน

เตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 100 mL เตรียมสารละลาย COPSS ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 100 mL และเตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 50 mM ปริมาตร 250 mL จากนั้นใส่น้ำปราศจากไอออนตามสัดส่วนที่กำหนดดังตารางที่ 3.1 ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 mL ปิเปตสารละลาย COPSS ตามสัดส่วนที่กำหนดดังตารางที่ 3.1 และเริ่มทำการปั่นกวน แล้วปิเปตสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตตามสัดส่วนที่กำหนดดังตารางที่ 3.1 และปั่นกวนเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นปิเปตสารละลาย โซเดียมโบโรไฮไดรด์และทำการปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสารละลายใสไม่มีสีเป็นสีเหลือง ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 3.3



เอกสารนี้เป็นเอกสาร **รูปที่ 3.3** แผนผังวิธีการการสังเคราะห์ AgNPs โดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชัน โยชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรท : โพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิด : โซเดียมโบโรไฮไดรด์

อัตราส่วน สารเคมี	อัตราส่วนความเข้มข้นของ AgNO_3 : COPSS : NaBH_4 (mM)				
	1:0.1:10	1:1:10	1:2.5:10	1:5:10	1:7.5:10
AgNO_3 100 mM	1 ml	1 ml	1 ml	1 ml	1 ml
COPSS 100 mM	0.1 ml	1 ml	2.5 ml	5 ml	7.5 ml
NaBH_4 50mM	20 ml	20 ml	20 ml	20 ml	20 ml
น้ำกลั่น	78.9 ml	78 ml	76.5 ml	74 ml	71.5 ml
รวม	100 ml	100 ml	100 ml	100 ml	100 ml

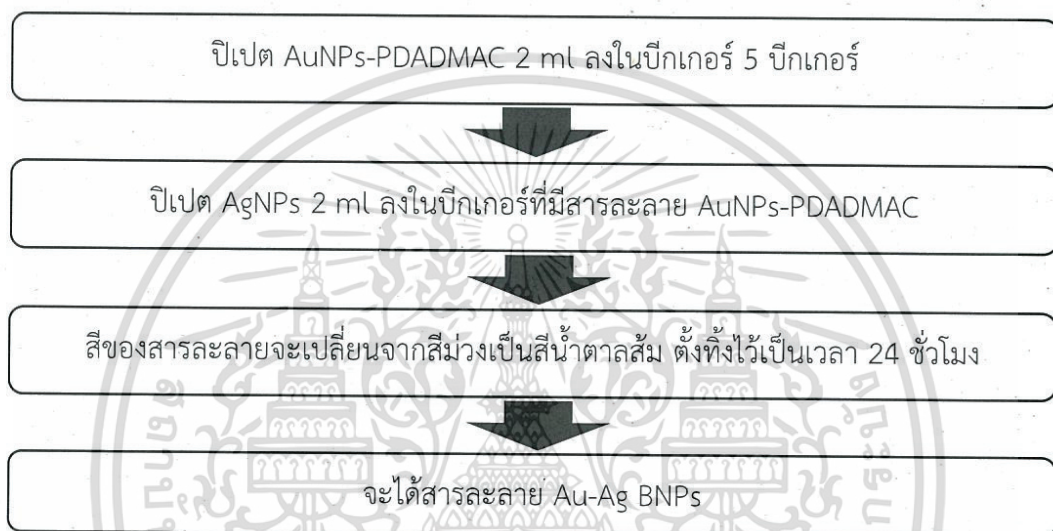
โดยจะทำการศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้

ลำดับ	ตัวแปร	การวิเคราะห์
1	ศึกษาผลของการดูดกลืนแสงของ AgNPs	UV-vis spectrophotometry
2	ศึกษาสภาพความเป็นประจุของ AgNPs	Zeta potential
3	ศึกษาลักษณะและการกระจายตัวของ AgNPs	TEM
4	ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs	FT-IR
5	ศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกของ AgNPs	XRD
6	ศึกษาธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ AgNPs	EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิดที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวอนุภาค

ปีเปตสารละลาย AuNPs-PDADMAC ปริมาตร 2 mL ลงในบีกเกอร์ จำนวน 5 บีกเกอร์ จากนั้นปีเปตสารละลาย AgNPs ที่เตรียมได้จากตอน 3.4.2 ปริมาตร 2 mL ลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลาย AuNPs-PDADMAC สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีน้ำตาลส้ม และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังวิธีการการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย COPSS ที่ใช้ในการสังเคราะห์ Au-Ag BNPs ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวอนุภาค

โดยจะทำการศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้

ลำดับ	ตัวแปร	การวิเคราะห์
1	ศึกษาผลของการดูดกลืนแสงของ Au-Ag BNPs	UV-vis spectrophotometry
2	ศึกษาสภาพความเป็นประจุของ Au-Ag BNPs	Zeta potential
3	ศึกษารูปร่างและขนาดของ Au-Ag BNPs	TEM
4	ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ Au-Ag BNPs	FT-IR
5	ศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกของ Au-Ag BNPs	XRD
6	ศึกษาธาตุที่เป็นองค์ประกอบของ Au-Ag BNPs	EDX

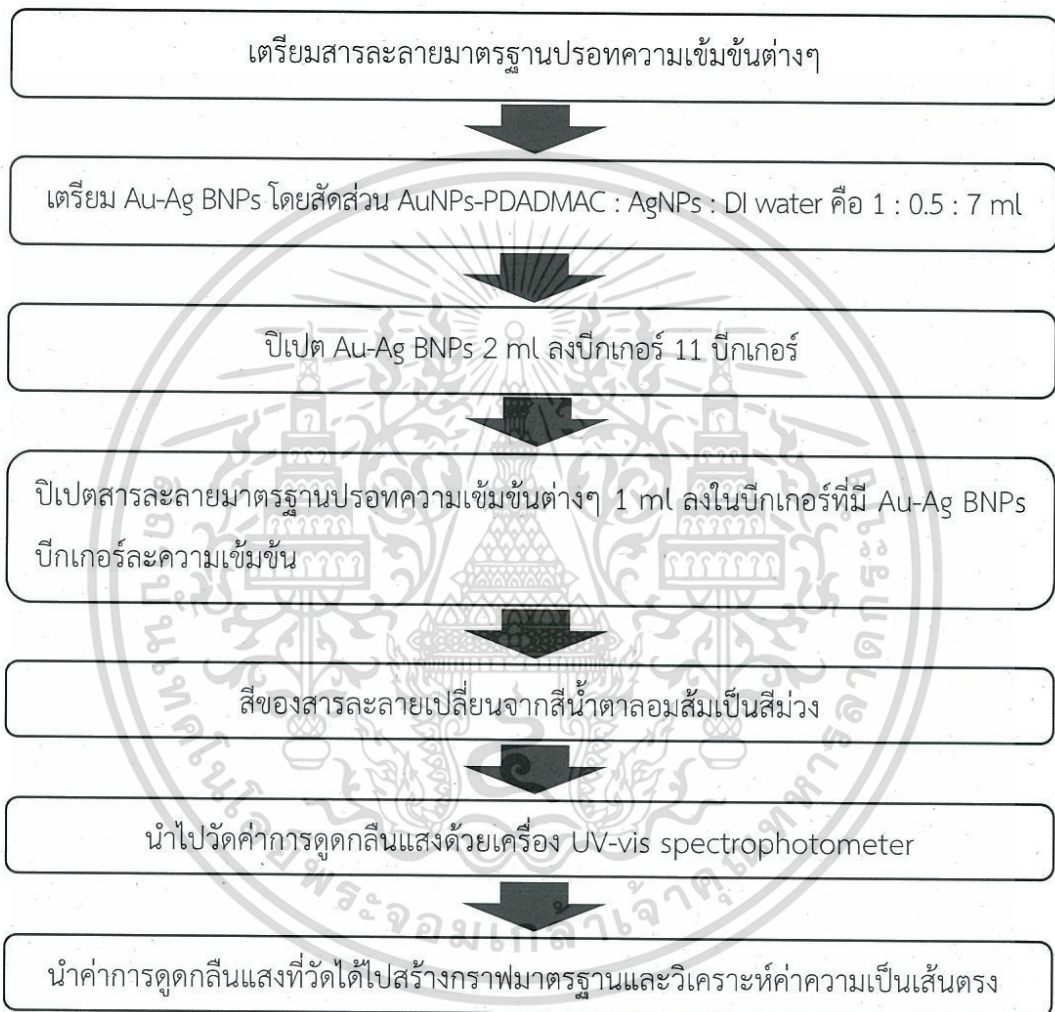
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การศึกษาการรับรู้ของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินในการวิเคราะห์ปรอท

3.5.1 การศึกษาความเป็นเส้นตรง

การศึกษาความเป็นเส้นตรงศึกษาได้จากการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.5 1 5 10 20 30 40 50 60 70 และ 80 ppm จากนั้นวิเคราะห์ค่าความเป็นเส้นตรง (R^2) ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.5

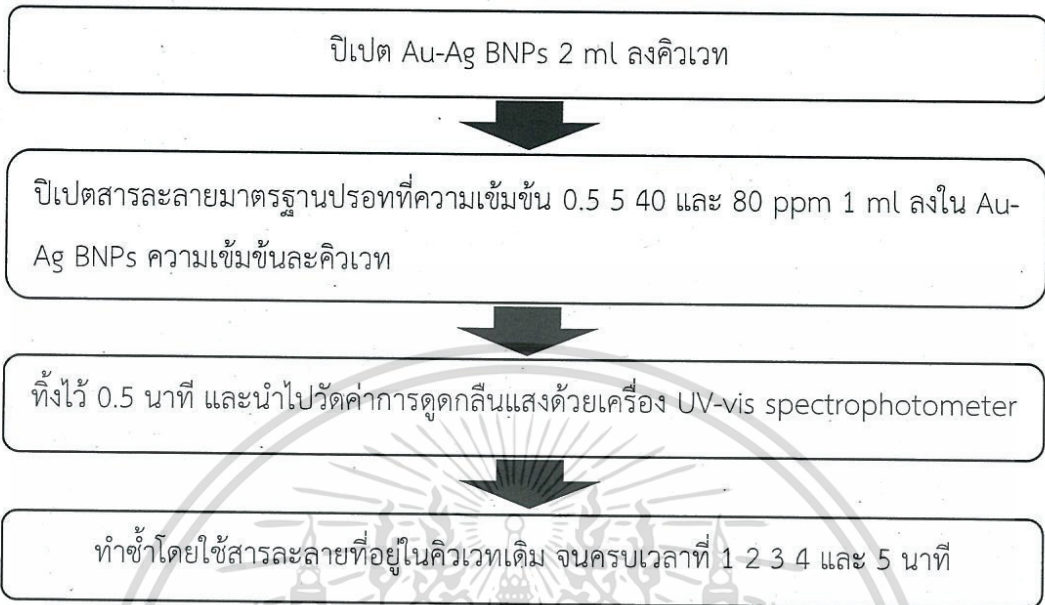


รูปที่ 3.5 แผนผังวิธีการศึกษาความเป็นเส้นตรงของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณปรอทด้วย Au-Ag BNPs

3.5.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอทไอออน

นำสารละลาย Au-Ag BNPs ที่เตรียมได้จากตอน 3.5.1 ปริมาตร 8 mL แล้วปิเปตมา ปริมาตร 2 mL ลงในคิวเวท จากนั้นปิเปตสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.5 5 40 และ 80 ppm ที่เตรียมได้จากตอน 3.5.1 ปริมาตร 1 mL ใส่ลงในคิวเวทที่มีสารละลาย Au-Ag BNPs อยู่ในคิวเวทละความเข้มข้น ทิ้งไว้เป็นเวลา 0.5 นาที และนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องเอกซเรย์เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

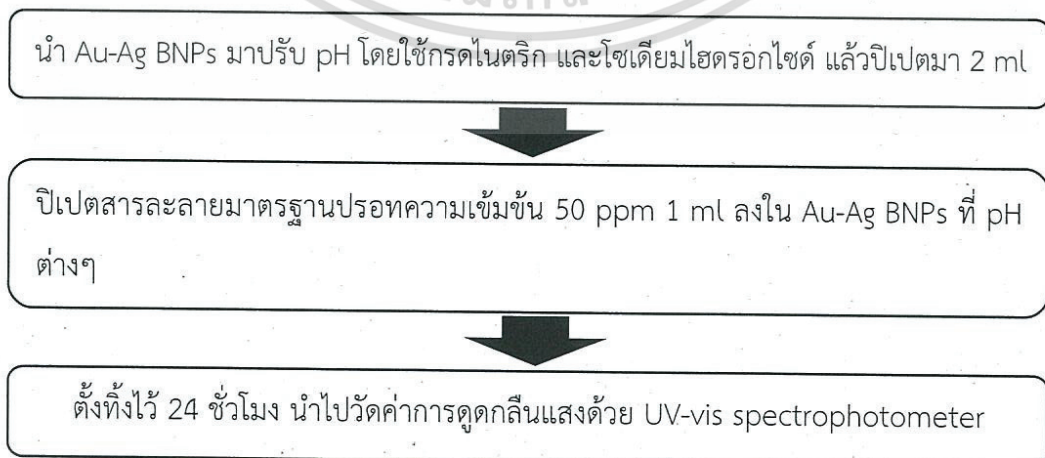
UV-vis spectrophotometer ทำซ้ำโดยใช้สารละลายที่อยู่ในควิเวทเดิมจนครบเวลาที่ 1 2 3 4 และ 5 นาที ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนผังวิธีการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอทไอออน

3.5.3 การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอทไอออน

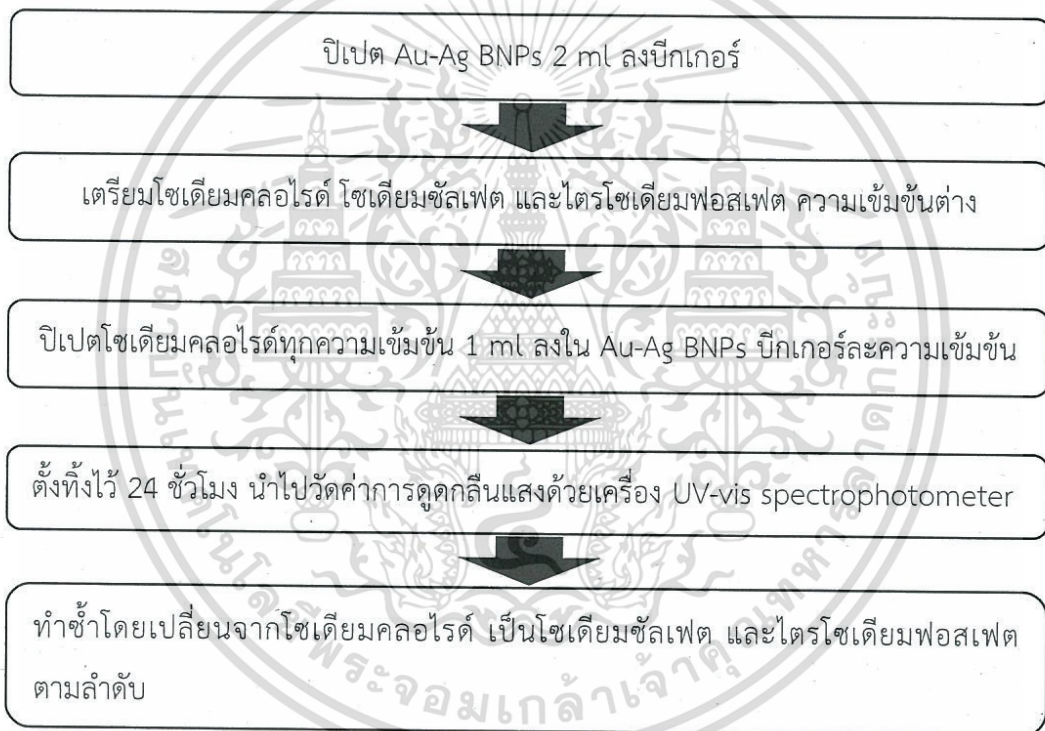
นำสารละลาย Au-Ag BNPs ที่เตรียมได้จากตอน 3.5.1 ปริมาตร 20 mL มาปรับ pH โดยใช้กรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้ pH 2 3 4 5 6 7 8 9 และ 10 แล้วปิเปตมาปริมาตร 2 mL ของแต่ละ pH จากนั้นปิเปตสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 1 mL ใส่ลงในสารละลาย Au-Ag BNPs ที่ pH ต่างๆ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง และนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนผังวิธีการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอทไอออน

3.5.4 การศึกษาผลของเกลือที่ส่งผลต่ออนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน

นำสารละลาย Au-Ag BNPs ที่เตรียมได้จากตอน 3.5.1 ปริมาตร 60 mL แล้วปิเปิดมา ปริมาตร 2 mL ลงในบีกเกอร์จำนวน 30 บีกเกอร์ เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และไตรโซเดียมฟอสเฟต ที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 และ 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 25 mL ปิเปิดสารละลายโซเดียมคลอไรด์ทุกความเข้มข้นปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลาย Au-Ag BNPs บีกเกอร์ละความเข้มข้น ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปตรวจวัด ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ทำซ้ำโดยเปลี่ยนจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตตามลำดับ ซึ่งสามารถ แสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 3.8

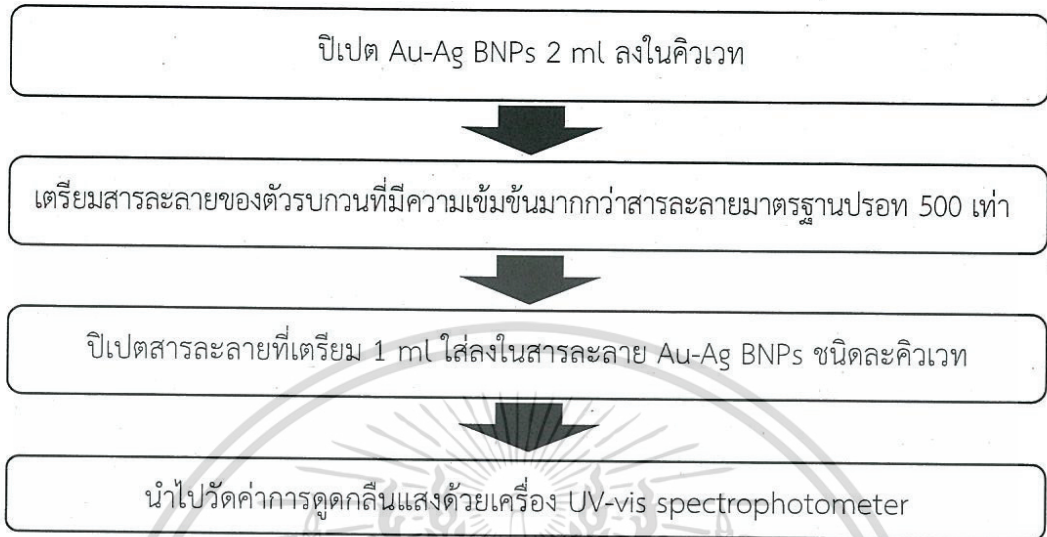


รูปที่ 3.8 แผนผังวิธีการศึกษาผลของเกลือที่ส่งผลต่อ Au-Ag BNPs

3.5.5 การศึกษาผลของตัวรบกวนที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ปรอทไอออน

นำสารละลาย Au-Ag BNPs ที่เตรียมได้จากตอน 3.5.1 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วปิเปิดมา ปริมาตร 2 mL ลงในคิวเวท เตรียมสารละลาย Aluminium sulfate, Barium sulfate, Cadmium sulfate, Calcium nitrate, Copper nitrate, Ferrous sulfate, Lead nitrate, Magnesium nitrate, Nickel nitrate และ Zinc sulfate ที่ความเข้มข้นมากกว่าสารละลายมาตรฐานปรอท 500 เท่า ปริมาตร 25 mL ปิเปิดสารละลายที่เตรียมได้ทั้ง 10 ชนิด ปริมาตร 1 mL ใส่ลงในคิวเวทที่มี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาติเห็นาเบเซบระเษชนดานการค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย Au-Ag BNP อยู่ ชนิดละคิวเวท จากนั้นนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนผังวิธีการศึกษาผลของตัวรบกวนที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ปรอทไอออน

3.5.6 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดเป็นการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของปรอทที่ตรวจวัดได้โดยใช้กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทและค่าการดูดกลืนแสง ทำได้โดยการวัด Blank จำนวน 10 ครั้ง แล้วนำมาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD) ของ Blank จากนั้นทำการคำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{LOD} = \frac{3 \text{ S.D. of Blank}}{\text{Slope of calibration curve}}$$

3.5.7 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เป็นการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของปรอทที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทและค่าการดูดกลืนแสง ทำได้โดยการวัด Blank จำนวน 10 ครั้ง แล้วนำมาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD) ของ Blank จากนั้นทำการคำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{LOQ} = \frac{10 \text{ S.D. of Blank}}{\text{Slope of calibration curve}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.8 การศึกษาค่าร้อยละการคืนกลับและค่าความเที่ยง

การศึกษาค่าร้อยละการคืนกลับของสารละลายมาตรฐานปรอททำโดยเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 5 25 50 และ 75 ppm แล้วปิเปตสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆปริมาตร 1 mL ใส่ลงในสารละลาย Au-Ag BNPs 2 mL แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer

การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของปรอทในตัวอย่างน้ำ 1 และตัวอย่างน้ำ 2 ทำได้โดยเริ่มจากการนำตัวอย่างน้ำ 1 และตัวอย่างน้ำ 2 มาเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 30 และ 60 ppm ตามลำดับ แล้วปิเปตมา 1 mL ใส่ลงในสารละลาย Au-Ag BNPs 2 mL จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer แล้วทำการเติมสารละลายปรอทความเข้มข้น 5 และ 15 ppm ลงไป ในแต่ละตัวอย่างน้ำ ปิเปตมา 1 mL ใส่ลงในสารละลาย Au-Ag BNPs 2 mL แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer

การศึกษาค่าความเที่ยงพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation; RSD) ซึ่งสามารถทำได้โดยการตรวจวัดซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$\%RSD = \frac{S.D.}{\bar{x}} \times 100$$

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

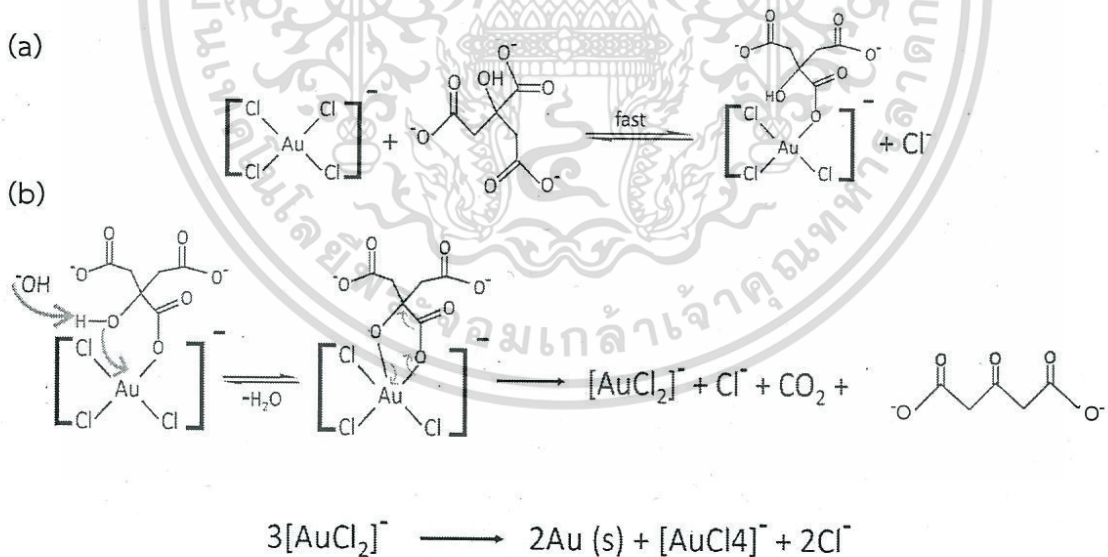
จากผลการศึกษสามารถอภิปรายผลการทดลองการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้เชิงสีในการวิเคราะห์ปรอท ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน

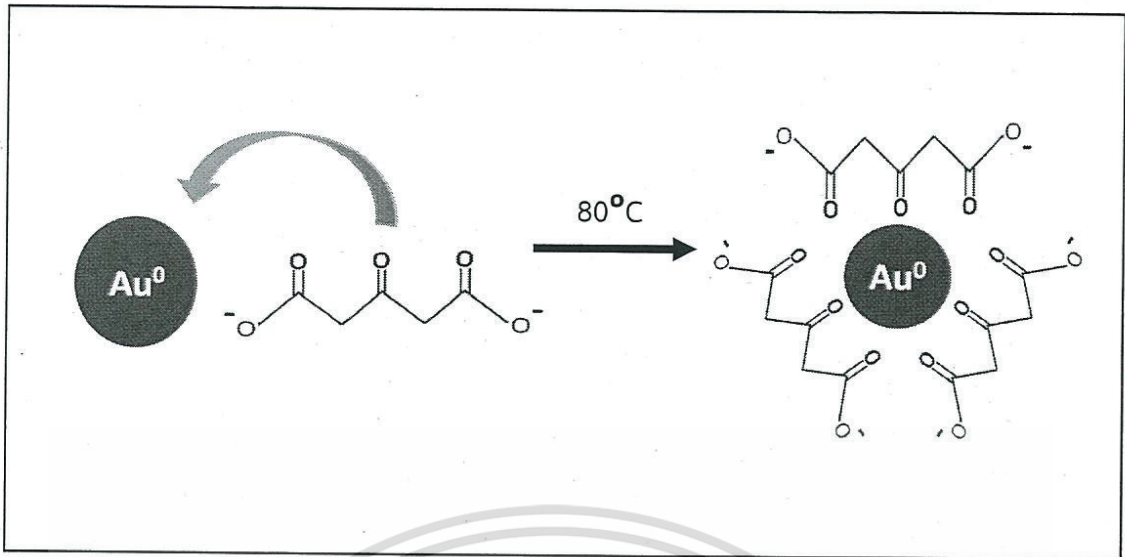
4.1.1 ผลการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโนโดยวิธีของเทอร์เควิช

4.1.1.1 ผลการศึกษาการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรทสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคทองระดับนาโน

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกการสังเคราะห์ AuNPs ด้วยวิธีเทอร์เควิช ซึ่งวิธีนี้จะอาศัยปฏิกิริยารีดักชันของไตรโซเดียมซิเตรท โดยซิเตรทจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และเป็นสารรักษาเสถียรภาพภายใต้อุณหภูมิ 80°C สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีแดงอมน้ำ จากนั้นจะได้สารละลาย AuNPs และนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วย PDADMAC เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ Au-Ag BNPs โดยกลไกการสังเคราะห์ AuNPs แสดงดังรูปที่ 4.1



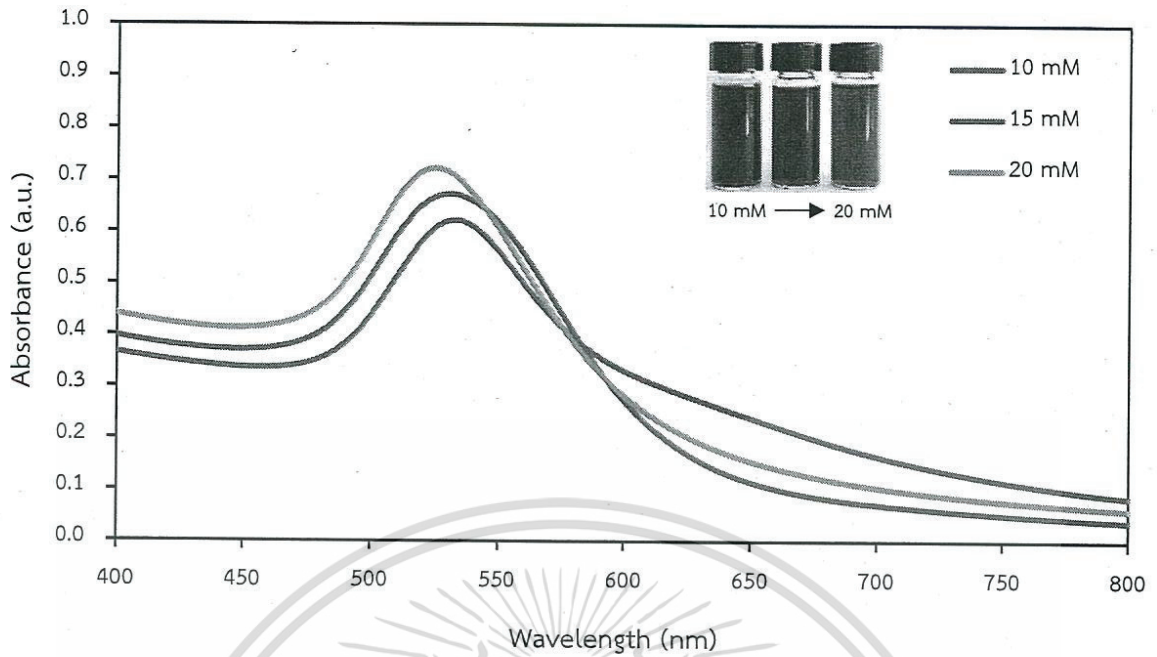
รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ AuNPs (a) Ligand Exchange Reaction (b) Decarboxylation and Reduction of Au (III) [66]



รูปที่ 4.2 การรักษาเสถียรภาพของไตรโซเดียมซิเตรท

จากรูปที่ 4.1 ปฏิบัติการสังเคราะห์ AuNPs ประกอบด้วย 2 ปฏิบัติการ โดยปฏิบัติการแรก (a) ซิเตรทไอออนเข้าไปทำปฏิกิริยากับเตตระคลอโรอเลทไตรไฮเดรต เกิดการแลกเปลี่ยนลิแกนด์อย่างรวดเร็ว โดยซิเตรทไอออนจะเข้าไปแทนที่คลอไรด์ (Cl^-) ของเตตระคลอโรอเลทไตรไฮเดรต และปฏิบัติการที่ 2 (b) หมู่ Hydroxyl ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำจะไปดึงไฮโดรเจนจากหมู่ Hydroxyl ของซิเตรทไอออน ทำให้ออกซิเจนไปสร้างพันธะกับทองได้เป็นวงไซคลิก จากนั้นเกิดปฏิกิริยา Decarboxylation ในวงไซคลิกทำให้คาร์บอนไดออกไซด์หลุดออก ต่อมาเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนทำให้พันธะระหว่างออกซิเจนกับทองแตกออกได้เป็น 1,3-dicarboxylate และเกิดปฏิกิริยา Reduction ทำให้ Au^{3+} ถูกรีดิวซ์เป็น Au^0 ซึ่ง Au^0 จะไปรับอิเล็กตรอนจาก 1,3-dicarboxylate ได้เป็น Au^0 และจะถูกรักษาเสถียรภาพ [67] ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรทมีผลต่อขนาดของอนุภาค ถ้าความเข้มข้นของซิเตรทสูง จะมีประจุลบของหมู่ Carboxylate มาก ประจุลบแต่ละตัวจะผลักกันด้วยแรงทางไฟฟ้า ทำให้อนุภาคกระจายตัวออกจากกันได้มาก ส่งผลให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็ก และถ้าความเข้มข้นของซิเตรทต่ำ ประจุลบของหมู่ Carboxylate มีน้อย แรงผลักก็จะน้อย ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่มาใกล้กันได้มาก ส่งผลให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคยังส่งผลต่อลักษณะการเกิดสเปกตรัม ถ้าขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็ก สเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นสั้นลง และถ้าอนุภาคขนาดใหญ่ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นสูงขึ้น [68] การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรทสำหรับการสังเคราะห์ AuNPs สามารถวิเคราะห์ได้โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer โดยความเข้มข้นของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรทที่ทำการศึกษาคือ 10 15 และ 20 mM ซึ่งผลการศึกษาดังรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



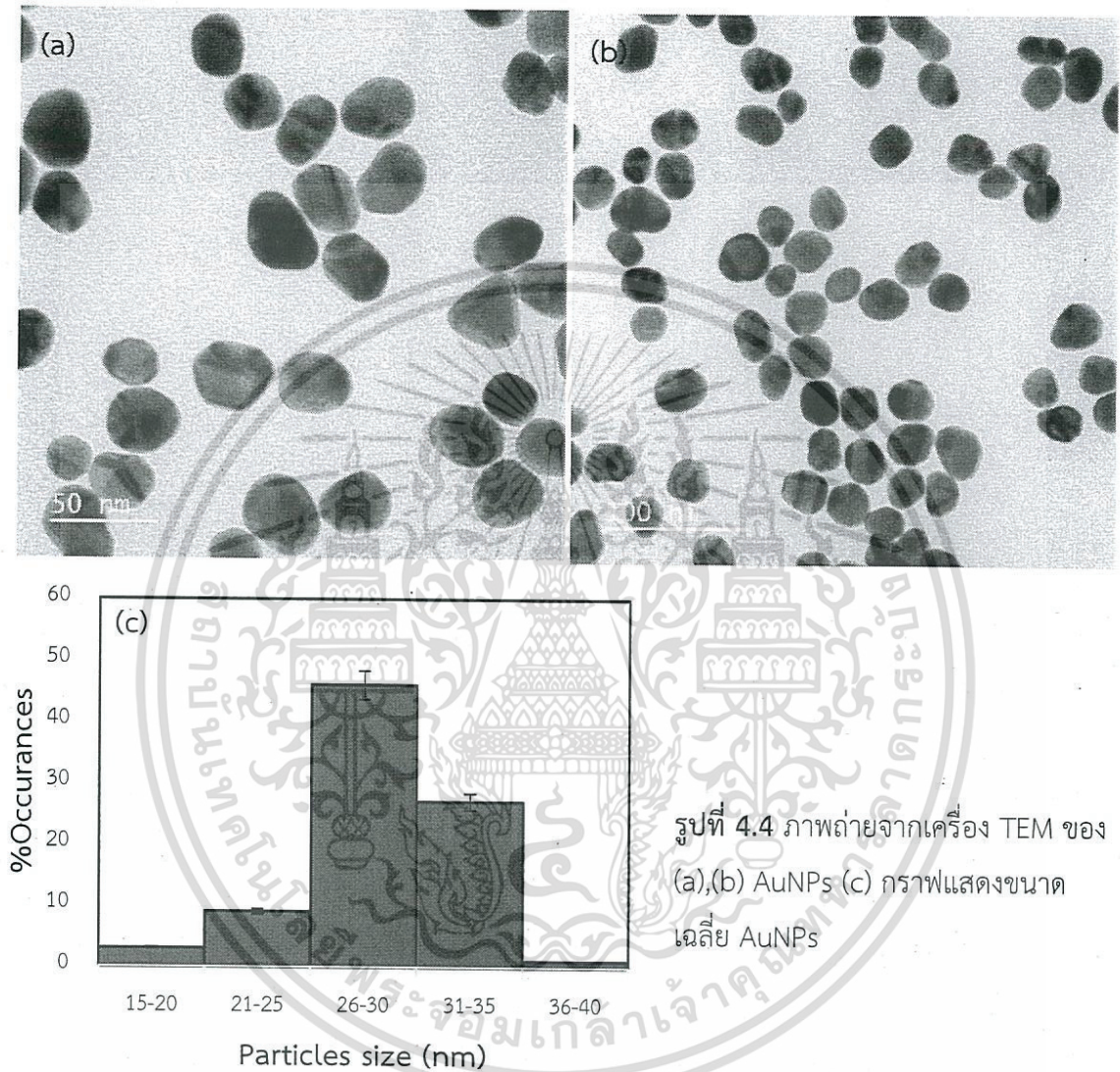
รูปที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AuNPs ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายไตรโซเดียมซิเตรท ความเข้มข้น 10 15 และ 20 mM

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{\max}) ของ AuNPs

ความเข้มข้นไตรโซเดียมซิเตรท (mM)	ความยาวคลื่นสูงสุด (nm)
10	535
15	531
20	525

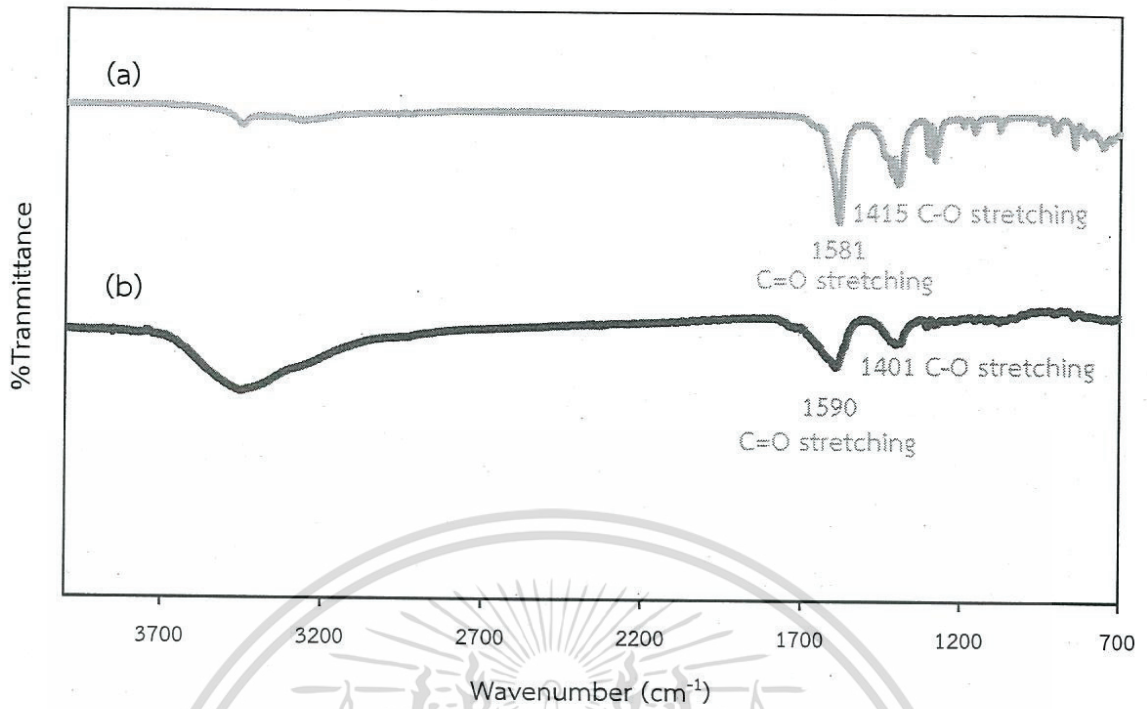
จากรูปที่ 4.3 เห็นได้ว่าลักษณะของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลงเมื่อความเข้มข้นของซิเตรทเพิ่มขึ้น โดยที่ซิเตรทความเข้มข้นต่ำ คือ 10 mM ขนาดของอนุภาคจะใหญ่ ให้ค่าความยาวคลื่นสูงสุดมากที่สุด คือ 535 nm และที่ซิเตรทความเข้มข้นสูง คือ 20 mM ขนาดของอนุภาคจะเล็ก ให้ค่าความยาวคลื่นสูงสุดน้อยที่สุด คือ 525 nm [67] โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรทสำหรับการสังเคราะห์ AuNPs ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ 15 mM เนื่องจากถ้าเลือกใช้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรทความเข้มข้นต่ำ อนุภาคจะมีขนาดใหญ่ ทำให้อนุภาคแต่ละอนุภาคสามารถรวมตัวกันได้ง่าย [69] และถ้าเลือกใช้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรทความเข้มข้นสูง จะทำให้มีซิเตรทมากเกินไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรทความเข้มข้น 15 mM ในการสังเคราะห์ AuNPs และนำไปวัดศักย์ซีต้า โดยค่าศักย์ซีต้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ -39.00 mV เนื่องจาก AuNPs ถูกรักษาเสถียรภาพด้วย 1,3-dicarboxyacetone ซึ่งไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1,3-dicarboxyacetone มีประจุเป็นลบของหมู่ Carboxylate ดังนั้นค่าศักย์ซีต้าที่วัดได้จึงมีค่าเป็นลบ [69] จากนั้นเป็นการดูขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคทองระดับนาโนโดยนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของ (a),(b) AuNPs (c) กราฟแสดงขนาดเฉลี่ย AuNPs

จากรูปที่ 4.4 (a) และ (b) ลักษณะของ AuNPs ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะคล้ายทรงกลม มีการกระจายตัวของอนุภาคดี ไม่เกาะกลุ่มกัน และเมื่อนำมาหาขนาดอนุภาคเฉลี่ย อนุภาคมีขนาดอยู่ในช่วง 26-30 nm ดังรูปที่ 4.4 (c) หลังจากนั้นนำ AuNPs ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR เพื่อดูหมู่ฟังก์ชันของสาร ได้ผลดังรูปที่ 4.5



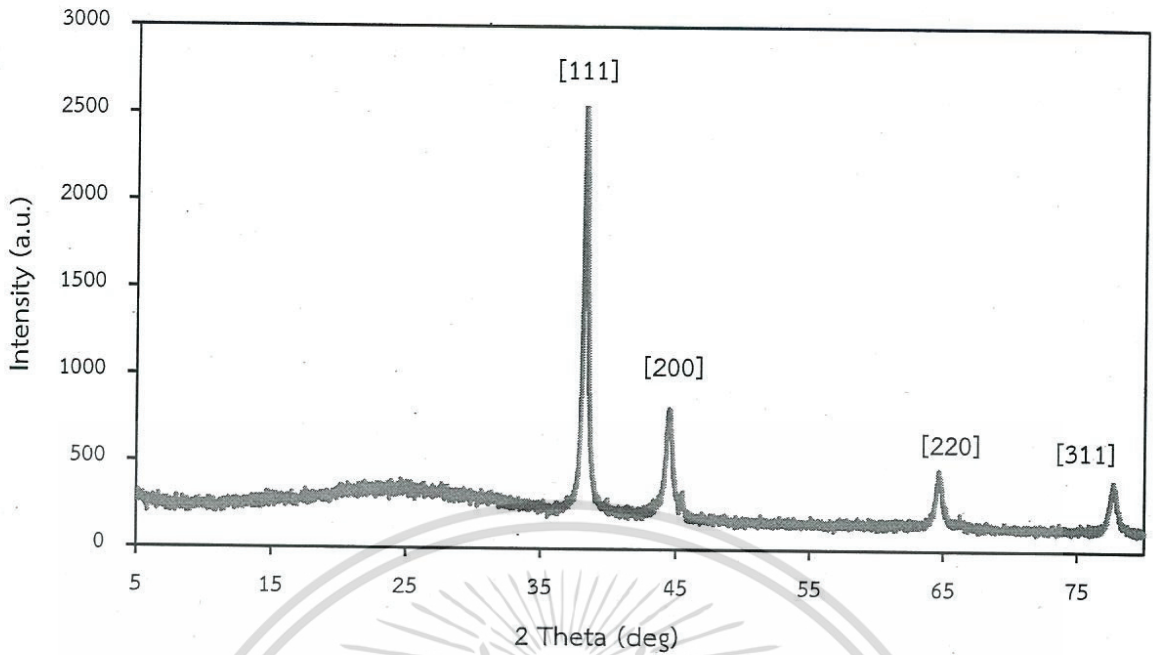
รูปที่ 4.5 สเปกตรัม FTIR ของ (a) ไตรโซเดียมซิเตรท (b) AuNPs

ตารางที่ 4.2 แสดงหมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิเตรท และหมู่ฟังก์ชันของ AuNPs

ไตรโซเดียมซิเตรท		AuNPs	
Wavenumber (cm ⁻¹)	Bond	Wavenumber (cm ⁻¹)	Bond
1581	C=O stretching	1590	C=O stretching
1415	C-O stretching	1401	C-O stretching

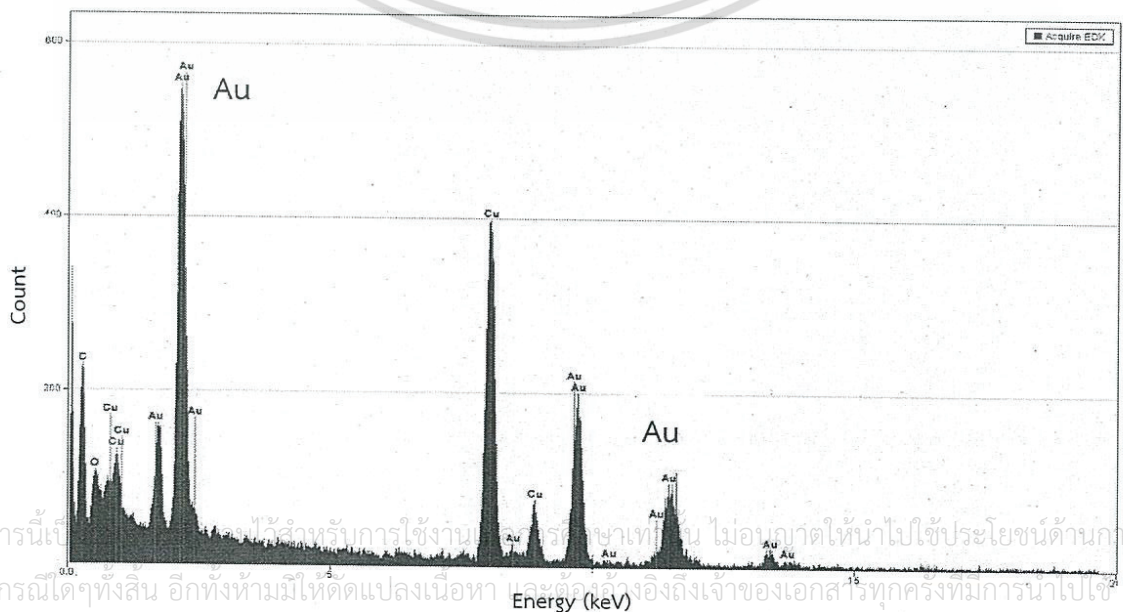
จากรูปที่ 4.5 (a) ไตรโซเดียมซิเตรทปรากฏสเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1581 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C=O สเปกตรัมที่ปรากฏในช่วงเลขคลื่น 1415 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-O และ (b) AuNPs ที่สังเคราะห์ที่ได้มีสเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1590 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C=O และสเปกตรัมที่ปรากฏในช่วงเลขคลื่น 1401 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-O เมื่อนำสเปกตรัมของ AuNPs มาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของไตรโซเดียมซิเตรท เห็นได้ว่าสเปกตรัมทั้งสองตรงกัน จึงสามารถยืนยันได้ว่า AuNPs ที่สังเคราะห์ที่ได้มีไตรโซเดียมซิเตรทรักษาเสถียรภาพจริง จากนั้นทำการศึกษากการจัดเรียงตัวของ AuNPs ด้วยเครื่อง XRD ได้ผลดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ AuNPs ด้วยเครื่อง XRD

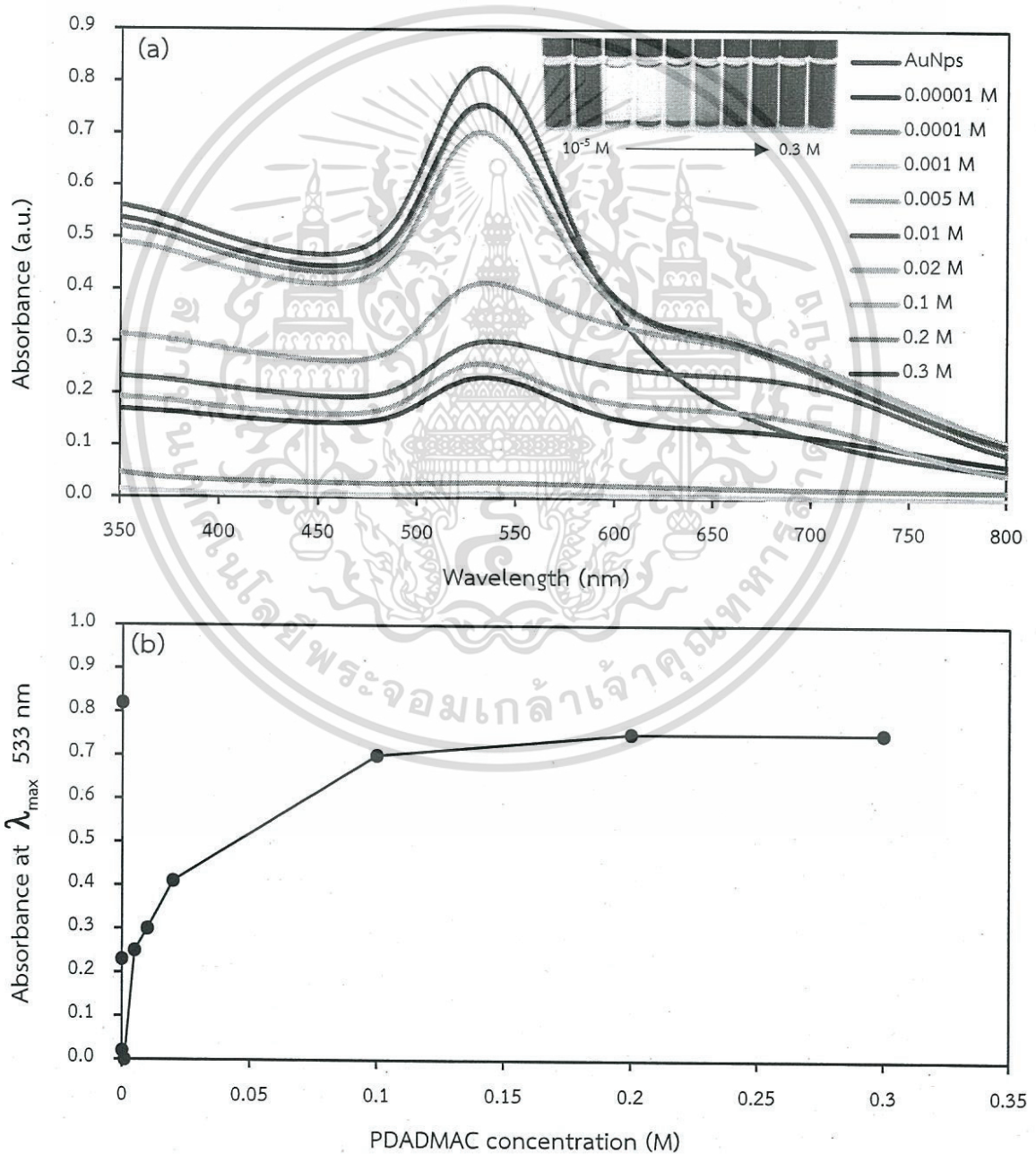
จากรูปที่ 4.6 AuNPs ที่สังเคราะห์ได้แสดงสเปกตรัมที่มีค่า 2θ ประมาณ 38.87° 44.47° 64.67° และ 77.65° ตามลำดับ โดยระนาบที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ คือ [111] [200] [220] และ [311] ตามลำดับ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอนุภาคทองระดับนาโนมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC สอดคล้องกับ XRD pattern ของ Au ในฐานข้อมูล JCPDS File number 04-0783 ที่มีค่า 2θ เท่ากับ 38.10° 44.30° 64.50° และ 77.50° เห็นได้ว่า AuNPs ที่สังเคราะห์ขึ้น มีค่า 2θ ตรงกับ XRD pattern ของ Au ในฐานข้อมูล JCPDS File number 04-0783 จึงยืนยันได้ว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ขึ้นมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC ของทอง และสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ใน AuNPs โดยการนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX พบว่ามีฟีดของทองเกิดขึ้น แสดงว่า AuNPs ที่สังเคราะห์ได้มี Au เป็นองค์ประกอบ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX

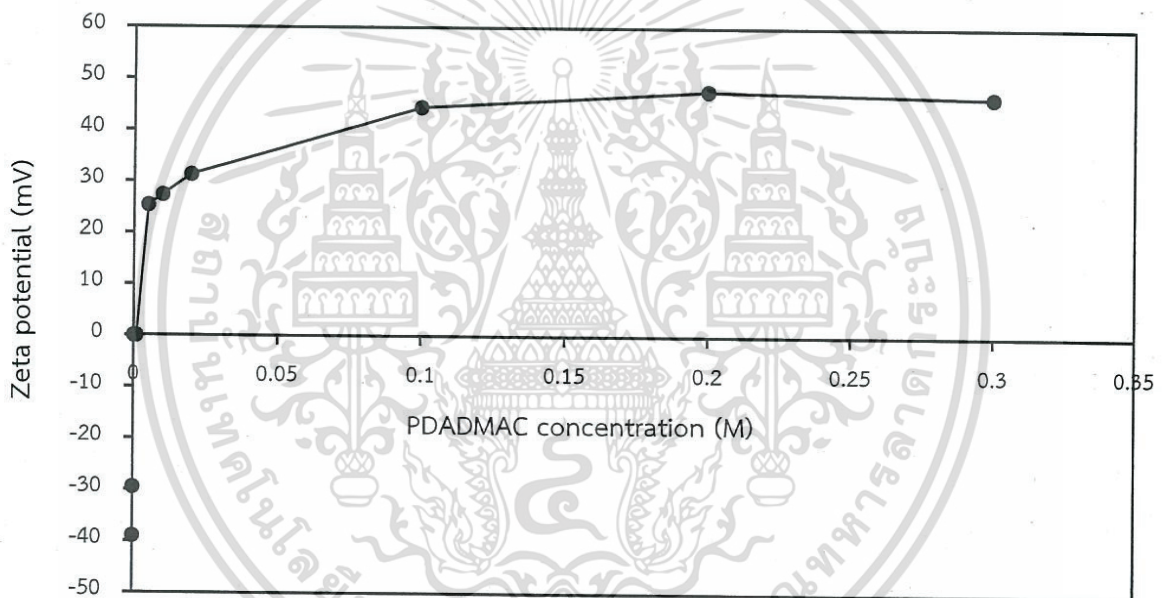
4.1.1.2 ผลของการศึกษาการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีไดแอลลิไลดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคทองระดับนาโน

ในการสังเคราะห์ Au-Ag BNPs อาศัยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวอนุภาคด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าระหว่างประจุบวกและประจุลบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงสภาพพื้นผิว AuNPs ให้มีพื้นผิวเป็นประจุบวกเพื่อไปยึดเหนี่ยวกับประจุลบของ AgNPs โดยใช้สารละลาย PDADMAC เป็นตัวปรับปรุงสภาพพื้นผิว ซึ่งความเข้มข้นของสารละลาย PDADMAC มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคทองระดับนาโน จึงต้องทำการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย PDADMAC ได้ผลดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 (a) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ AuNPs-PDADMAC (b) ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 533 nm ของ AuNPs-PDADMAC

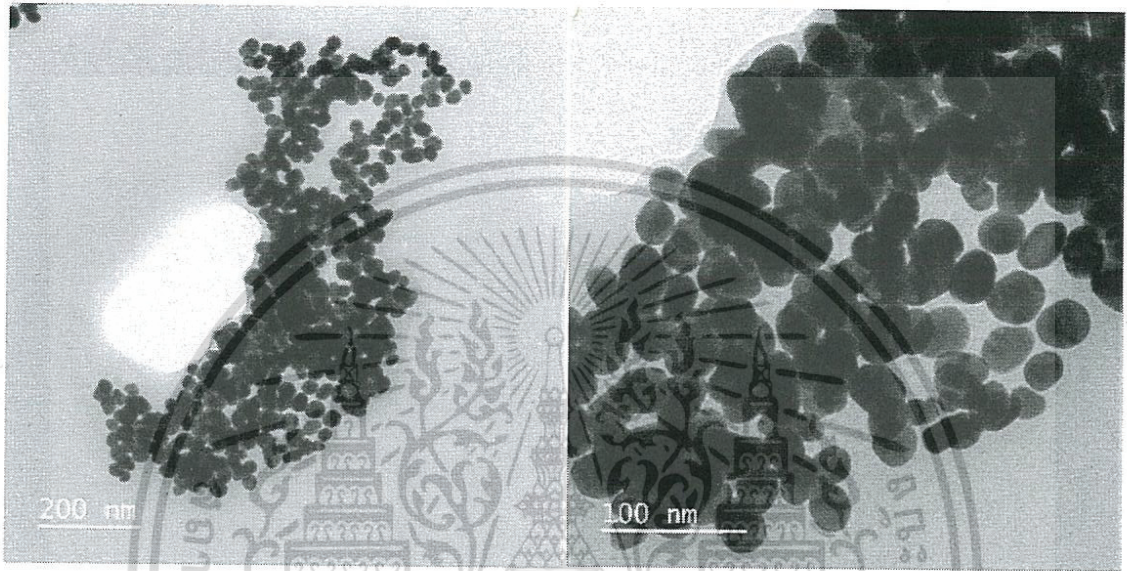
จากรูปที่ 4.8 สารละลาย AuNPS มีสีม่วงแดง โดยมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด 533 nm เมื่อเติม PDADMAC ลงไปทำให้สีของสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีม่วง และมีสเปกตรัมใหม่เกิดขึ้นในช่วง 700 nm โดยความเข้มข้นของ PDADMAC ที่ 0.00001-0.001 M ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลงจนเท่ากับ 0 เนื่องจากเกิดการสมดุประจุของหมู่ Quaternary ammonium จาก PDADMAC กับหมู่ Carboxylate บนพื้นผิว AuNPs ทำให้อนุภาคตกตะกอน เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย PDADMAC เพิ่มขึ้น ทำให้ AuNPs กระจายตัวกลับขึ้นมา สังเกตได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากหมู่ Quaternary ammonium ที่มีมากขึ้นทำให้อนุภาคที่ตกตะกอนไปแล้วสามารถกระจายตัวกลับขึ้นมาได้ [71] จากนั้นเพื่อยืนยันว่า AuNPs ได้ถูกสารละลาย PDADMAC ล้อมรอบเพื่อปรับปรุงพื้นผิวแล้ว โดยการนำไปวัดศักย์ซีต้าเพื่อดูประจุบนพื้นผิวอนุภาค ได้ผลดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงค่าศักย์ซีต้าของ AuNPs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC

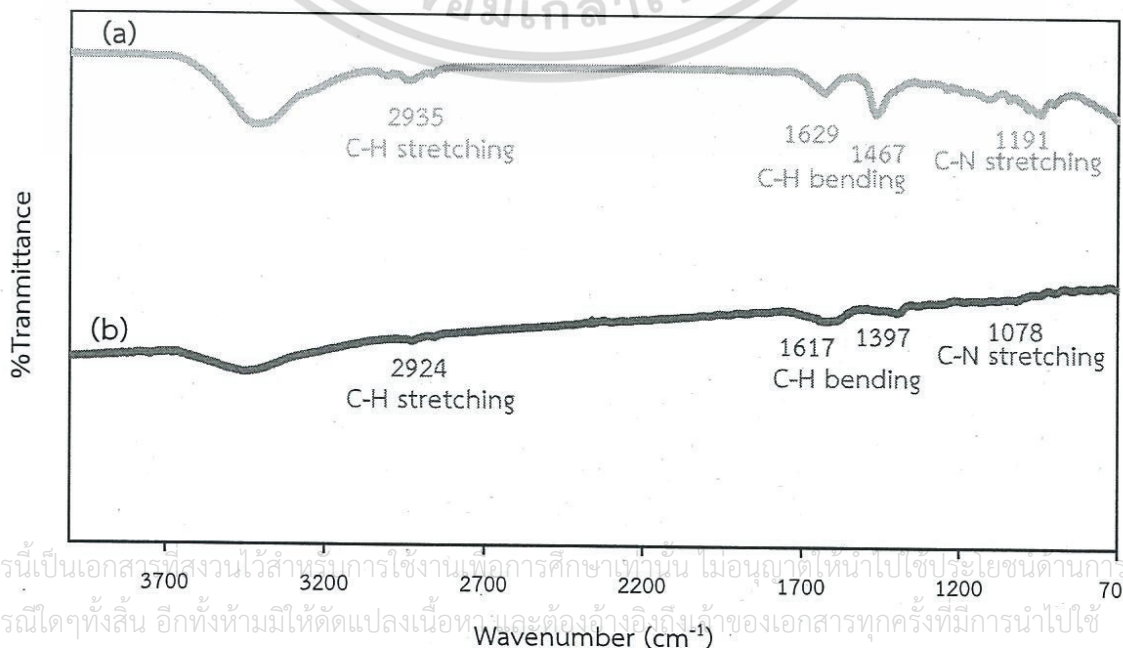
จากรูปที่ 4.9 AuNPs ก่อนปรับปรุงสภาพพื้นผิวมีค่าศักย์ซีต้าเท่ากับ -39.00 mV เมื่อเติม PDADMAC ความเข้มข้นต่างๆลงไป ค่าศักย์ซีต้าเปลี่ยนแปลงจากค่าลบไปเป็นค่าบวกตามความเข้มข้นของ PDADMAC ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ PDADMAC ความเข้มข้นต่ำ แสดงค่าศักย์ซีต้าเป็นประจุลบ คือ -29.48 mV เนื่องจากความเข้มข้นของ PDADMAC มีความเข้มข้นไม่เพียงพอต่อการปรับสภาพพื้นผิวอนุภาคทองระดับนาโนให้มีสภาพพื้นผิวเป็นประจุบวก ค่าศักย์ซีต้าที่ได้จึงเป็นค่าลบ ที่ความเข้มข้นของ PDADMAC 0.0001-0.001 M AuNPs เกิดการตกตะกอน ค่าศักย์ซีต้าที่วัดได้จึงเท่ากับ 0 mV และเมื่อความเข้มข้นของ PDADMAC สูงขึ้นแสดงค่าศักย์ซีต้าเป็นประจุบวก คือ +25.32, +27.33, +31.34, +44.47, +47.76 และ +46.53 mV ตามลำดับ เนื่องจากสารละลาย PDADMAC ได้ไปล้อมรอบ AuNPs เพื่อปรับปรุงสภาพพื้นผิวแล้ว ค่าศักย์ซีต้าที่วัดได้จึงแสดงค่าเป็นบวก ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของหมู่ Quaternary ammonium โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมของ PDADMAC ที่เลือกใช้สำหรับการปรับปรุงพื้นผิว AuNPs คือ 0.1 M เนื่องจากถ้าใช้ความเข้มข้นต่ำ AuNPs เกิดการตกตะกอนไม่สามารถใช้ในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวได้ และถ้าใช้ความเข้มข้นสูง จะมีปริมาณ PDADMAC มากไปส่งผลให้เกิดปัญหาในขั้นตอนการสังเคราะห์ Au-Ag BNPs จากนั้นเป็นการดูลักษณะของ PDADMAC ที่เข้าไปปรับปรุงสภาพพื้นผิวของ AuNPs โดยนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ได้ผลดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของ AuNPs-PDADMAC

เมื่อเติม PDADMAC ลงไปใน AuNPs สารละลาย PDADMAC จะเข้าไปล้อมรอบ AuNPs โดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิตระหว่างหมู่ Quaternary ammonium กับหมู่ Carboxylate ซึ่งลักษณะการล้อมรอบของ PDADMAC มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4.10 หลังจากนั้นนำ AuNPs-PDADMAC ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR เพื่อดูหมู่ฟังก์ชันของสาร ได้ผลดังรูปที่ 4.11

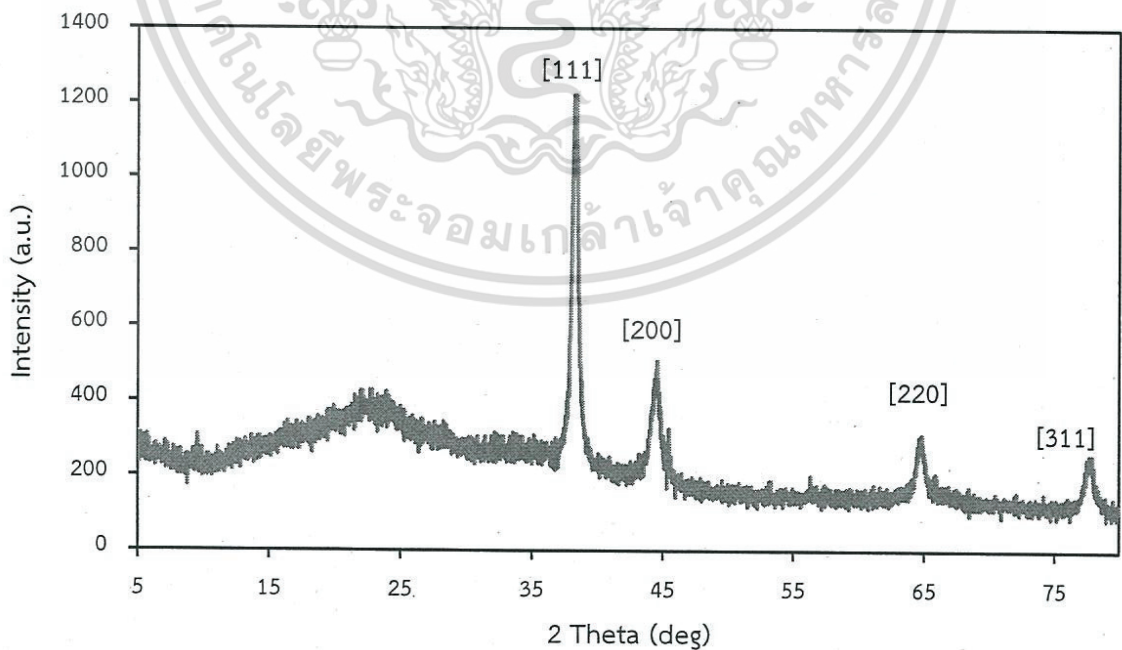


รูปที่ 4.11 สเปกตรัม FT-IR ของ (a) PDADMAC (b) AuNPs-PDADMAC

ตารางที่ 4.3 แสดงหมู่ฟังก์ชันของ PDADMAC และหมู่ฟังก์ชันของ AuNPs-PDADMAC

PDADMAC		AuNPs-PDADMAC	
Wavenumber (cm ⁻¹)	Bond	Wavenumber (cm ⁻¹)	Bond
2935	C-H stretching	2924	C-H stretching
1629, 1467	C-H bending	1617, 1397	C-H bending
1191	C-N stretching	1078	C-N stretching

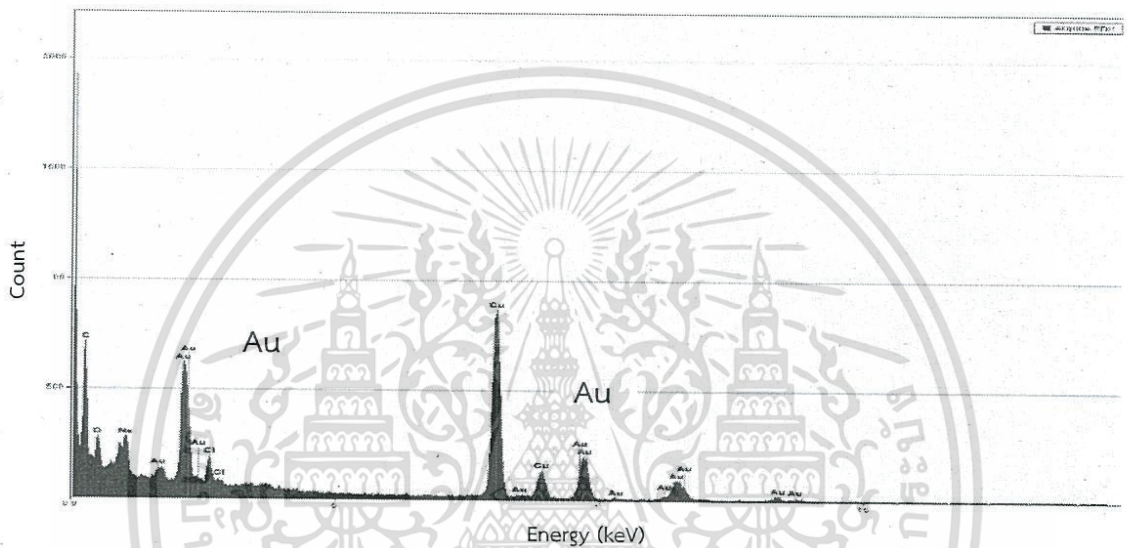
จากรูปที่ 4.11 (a) PDADMAC ปรากฏสเปกตรัมที่ในช่วงเลขคลื่น 2935 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-H สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1629 ,1467 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบงอ (Bending) ของพันธะ C-H และสเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1191 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-N (b) AuNPs-PDADMAC ปรากฏสเปกตรัมที่ในช่วงเลขคลื่น 2924 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-H สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1617,1397 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบงอ (Bending) ของพันธะ C-H สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1078 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-N เมื่อนำสเปกตรัมของ AuNPs-PDADMAC มาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของ PDADMAC จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมทั้งสองตรงกัน แสดงว่า PDADMAC ถูกใช้ในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของ AuNPs จริง หลังจากนั้นทำการศึกษาการจัดเรียงตัวของ AuNPs-PDADMAC ด้วยเครื่อง XRD ได้ผลดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ AuNPs-PDADMAC ด้วยเครื่อง XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

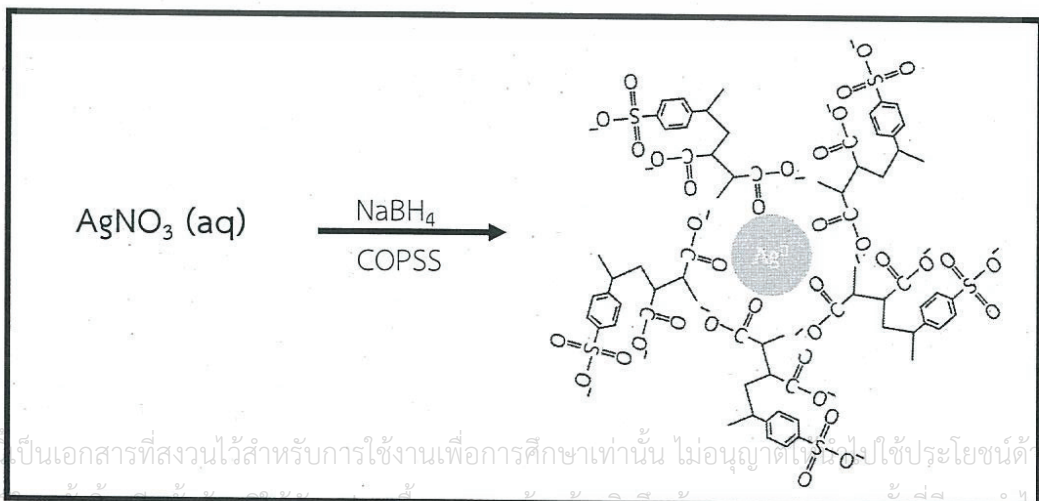
จากรูปที่ 4.12 AuNPs ที่สังเคราะห์ได้แสดงสเปกตรัมที่มีค่า 2θ ประมาณ 38.27° 44.49° 64.62° และ 77.56° ตามลำดับ โดยระนาบที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ คือ [111] [200] [220] และ [311] ตามลำดับ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอนุภาคทองระดับนาโนที่ปรับปรุงสภาพพื้นผิวแล้วมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC สอดคล้องกับ XRD pattern ของ AuNPs ที่สังเคราะห์ได้ แสดงว่าอนุภาคที่ถูกปรับปรุงสภาพพื้นผิวคือ AuNPs สุดท้ายเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ใน AuNPs-PDADMAC โดยการนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ได้ผลดังรูปที่ 4.13 จากรูปพบว่าไม่มีฟีดของทองปรากฏขึ้น แสดงว่าอนุภาคที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวคือ AuNPs



รูปที่ 4.13 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX

4.1.2 ผลการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) โดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชัน

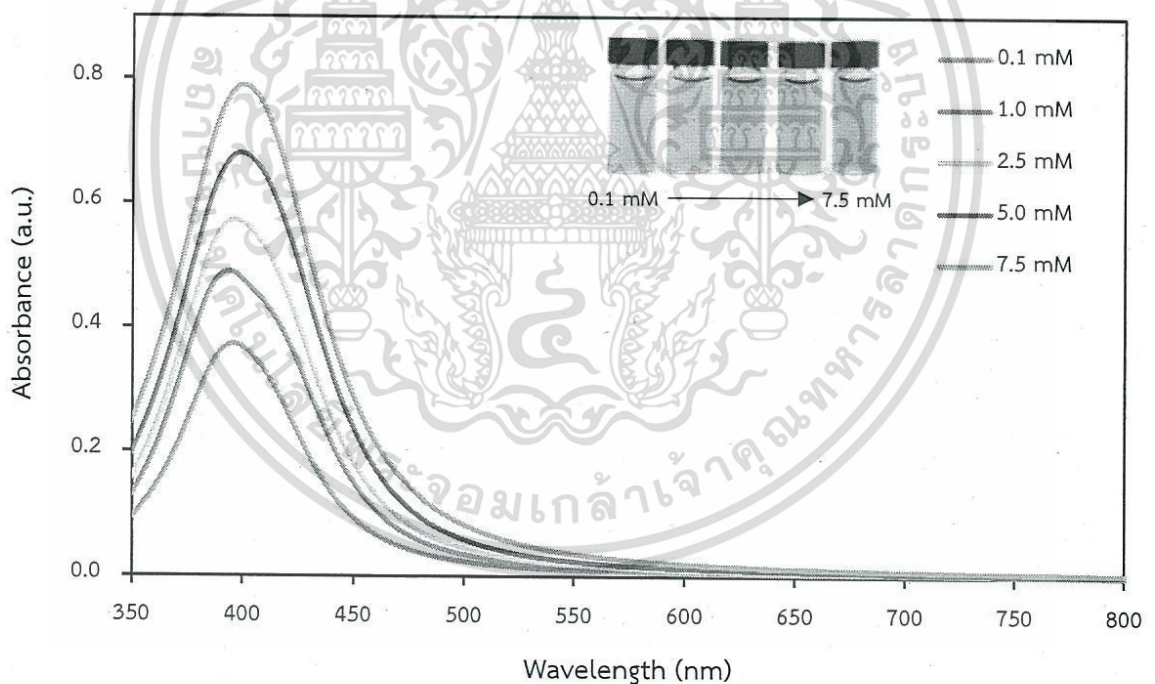
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการสังเคราะห์ AgNPs โดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชันของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ และ ใช้สารละลาย COPSS เป็นสารรักษาเสถียรภาพ สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสารละลายใสไม่มีสีเป็นสีเหลือง ซึ่งสามารถแสดงกลไกการสังเคราะห์ AgNPs ดังรูปที่ 4.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปะลงเนื้อหา และที่ยังยั้งอิงเสียงของเอกสารทุกครั้งที่สืบค้นไปใช้

รูปที่ 4.14 กลไกการสังเคราะห์ AgNPs

จากรูป 4.14 เป็นกลไกการสังเคราะห์ AgNPs เริ่มจากโซเดียมโบโรไฮไดรด์ จะปรีดิทซ์ Ag^+ ให้กลายเป็น Ag^0 และใช้ COPSS เป็นสารรักษาเสถียรภาพ Ag^0 ซึ่งขนาดของ AgNPs ขึ้นกับความเข้มข้นของ COPSS เนื่องจาก COPSS ที่ใช้เป็นสารรักษาเสถียรภาพมีประจุลบของหมู่ Carboxylate และหมู่ Sulfonic ในโครงสร้าง ซึ่งจะผลักกันด้วยแรงทางไฟฟ้า ถ้าความเข้มข้นของ COPSS สูง จะมีตัวรักษาเสถียรภาพมาก ประจุลบมาก แรงผลักทางไฟฟ้าก็จะมาก ส่งผลให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็ก และถ้าความเข้มข้นของ COPSS ต่ำ จะมีสารรักษาเสถียรภาพน้อย แรงผลักทางไฟฟ้าน้อย ทำให้อนุภาคแต่ละอนุภาคเข้าใกล้กันได้มาก ส่งผลให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่ [72] ซึ่งขนาดของอนุภาคส่งผลต่อค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสเปกตรัมเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ โดยขนาดของอนุภาคจะแปรผันตามค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสเปกตรัมเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ คือ ถ้าขนาดอนุภาคเล็ก ค่าความยาวคลื่นสูงสุดก็จะน้อย แต่ถ้าขนาดใหญ่ ค่าความยาวคลื่นสูงสุดก็จะมาก [68] ดังนั้นจึงต้องหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ COPSS ที่จะนำมาใช้ในการสังเคราะห์ AgNPs โดยความเข้มข้นของ COPSS ที่ทำการศึกษา คือ 0.1 1.0 2.5 5.0 และ 7.5 mM ซึ่งผลการศึกษาดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ค่าการดูดกลืนแสงของ AgNPs ที่สังเคราะห์ด้วย COPSS ความเข้มข้น 0.1 1.0 2.5 5.0 และ 7.5 mM

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ของ AgNPs

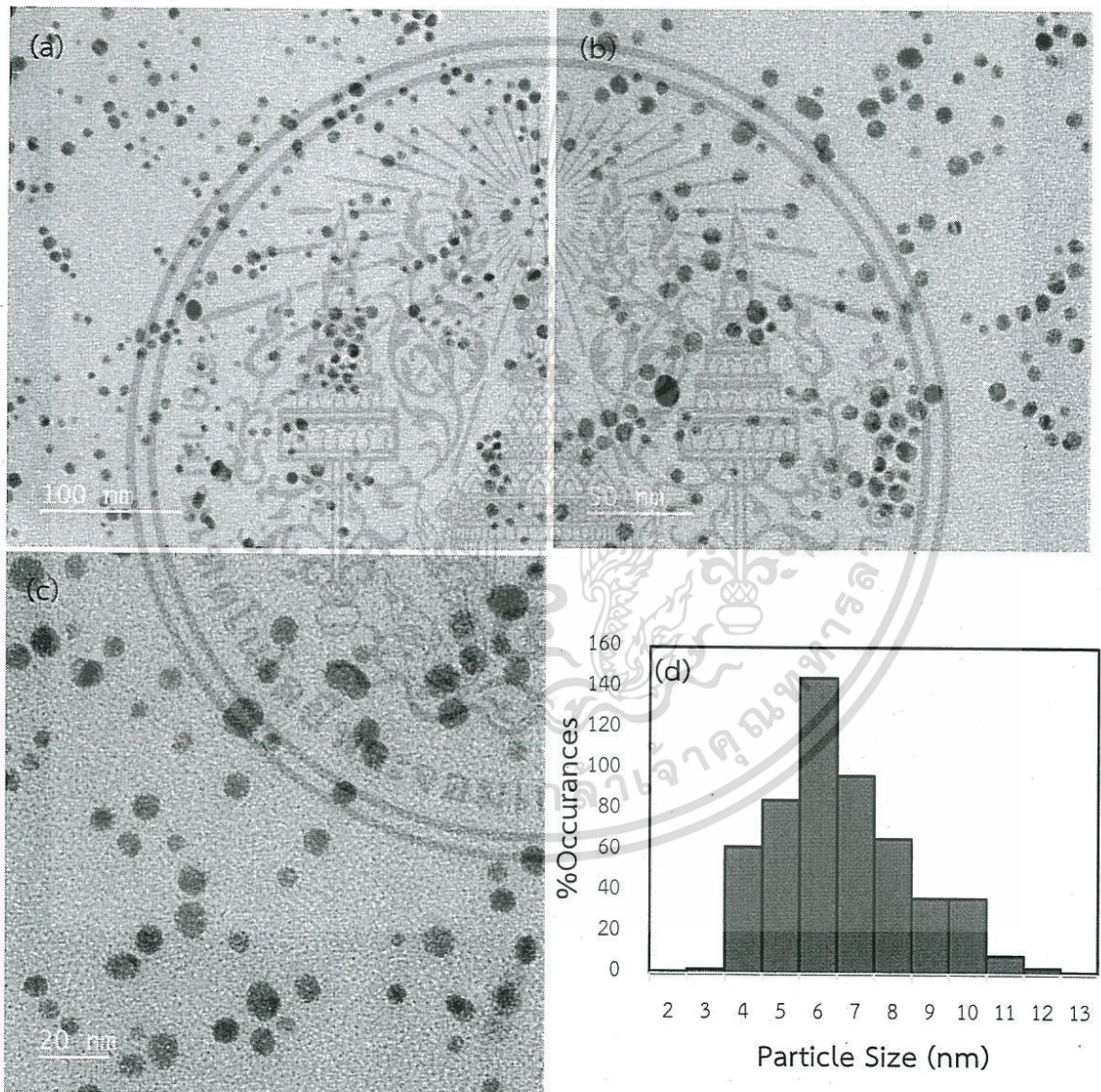
ความเข้มข้น COPSS (mM)	ความยาวคลื่นสูงสุด (nm)
0.5	396
1.0	394
2.5	396
5.0	399
7.5	400

จากรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.4 ลักษณะของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีทั้งแบบดูดกลืนแสงไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง และดูดกลืนแสงไปทางความยาวคลื่นที่สูงขึ้น ที่สารละลาย COPSS ความเข้มข้น 0.1-1 mM สเปกตรัมมีการดูดกลืนแสงไปทางความยาวคลื่นสั้นลง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการข้างต้น คือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย COPSS เพิ่มขึ้น อนุภาคจะมีขนาดเล็กลง ค่าความยาวคลื่นสูงสุดก็ลดลง แต่ที่สารละลาย COPSS ความเข้มข้น 2.5-7.5 mM สเปกตรัมมีการดูดกลืนแสงไปทางความยาวคลื่นที่สูงขึ้น เป็นผลมาจากหมู่ Carboxylate และหมู่ Sulfonic ที่มีมากขึ้น โดยหมู่ Carboxylate และหมู่ Sulfonic เป็นหมู่ที่สามารถดูดกลืนแสงได้ จึงส่งผลต่อลักษณะของสเปกตรัม แต่ขนาดของอนุภาคยังคงเล็กลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นไม่เกี่ยวข้องกับลักษณะของสเปกตรัมที่เกิดขึ้น จากนั้นทำการวัดประจุบนพื้นผิวของ AgNPs ด้วยเครื่องวัดศักย์ซีต้า เพื่อเป็นการดูว่า COPSS ได้รักษาเสถียรภาพ AgNPs แล้ว โดยดูจากค่าศักย์ซีต้าที่วัดได้ ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าศักย์ซีต้าของ AgNPs

ความเข้มข้น COPSS (mM)	Zeta potential (mV)
0.1	-36.9
1.0	-42.0
2.5	-47.0
5.0	-68.5
7.5	-72.0

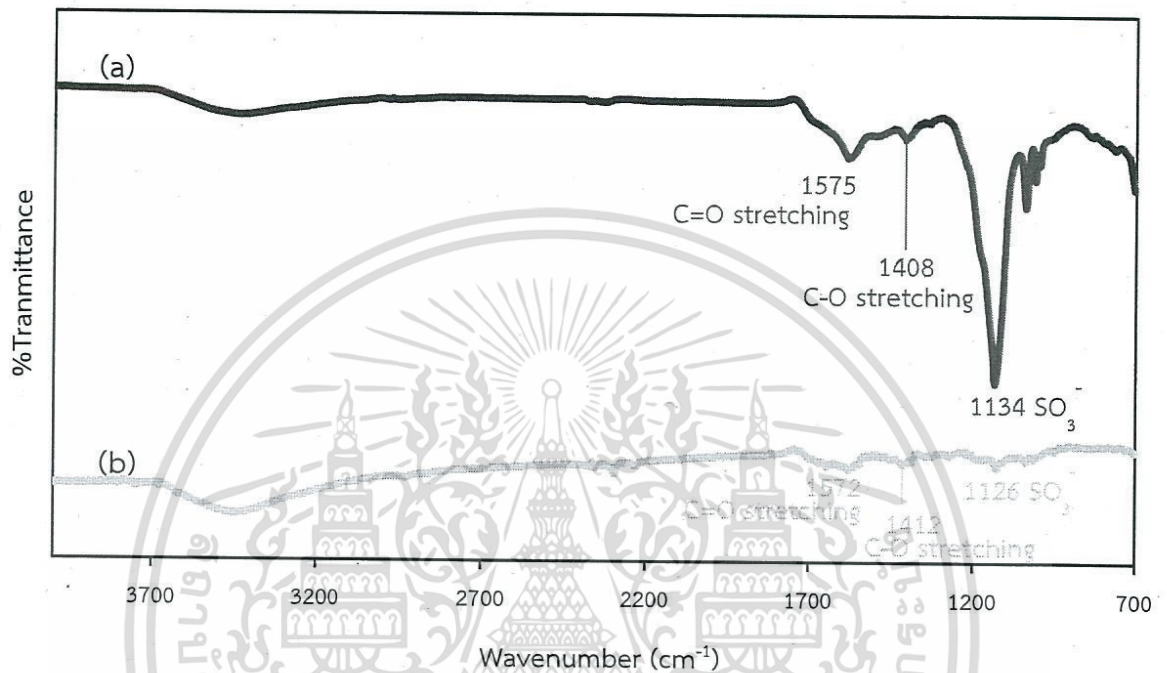
จากตารางที่ 4.5 ค่าศักย์ซีต้าแสดงค่าเป็นประจุลบ เป็นผลมาจากหมู่ Carboxylate และหมู่ Sulfonic ที่มีประจุลบอยู่ในโครงสร้างของ COPSS ที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพ AgNPs ยิ่งความเข้มข้นของ COPSS สูงขึ้น หมู่ Carboxylate และหมู่ Sulfonic ก็มีมากขึ้น ทำให้ค่าศักย์ซีต้าที่วัดได้ ตีลบมากขึ้น [73] โดยความเข้มข้นของ COPSS ที่ใช้ในการสังเคราะห์ AgNPs ในงานวิจัยนี้ คือ 5 mM เนื่องจากถ้าใช้ความเข้มข้นของ COPSS ต่ำหรือสูงกว่า 5 mM จะส่งผลต่อการสังเคราะห์ Au-Ag BNPs ดูได้จากหัวข้อที่ 4.1.3 จากนั้นทำการศึกษาขนาดและการกระจายตัวของ AgNPs ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง TEM ผลดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของ (a) (b) (c) AgNPs (d) กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของ AgNPs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 (a) (b) และ (c) ลักษณะของ AgNPs ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคเล็ก ลักษณะคล้ายทรงกลม มีการกระจายตัวของอนุภาคดี ไม่เกาะกลุ่มกัน และเมื่อนำมาหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยสามารถ AgNPs ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 6 nm แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.16 (d) หลังจากนั้นนำ AgNPs ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR เพื่อดูหมู่ฟังก์ชันของสาร ได้ผลดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 สเปกตรัม FT-IR ของ (a) COPSS (b) AgNPs

ตารางที่ 4.6 แสดงหมู่ฟังก์ชันของ COPSS และหมู่ฟังก์ชันของ AgNPs

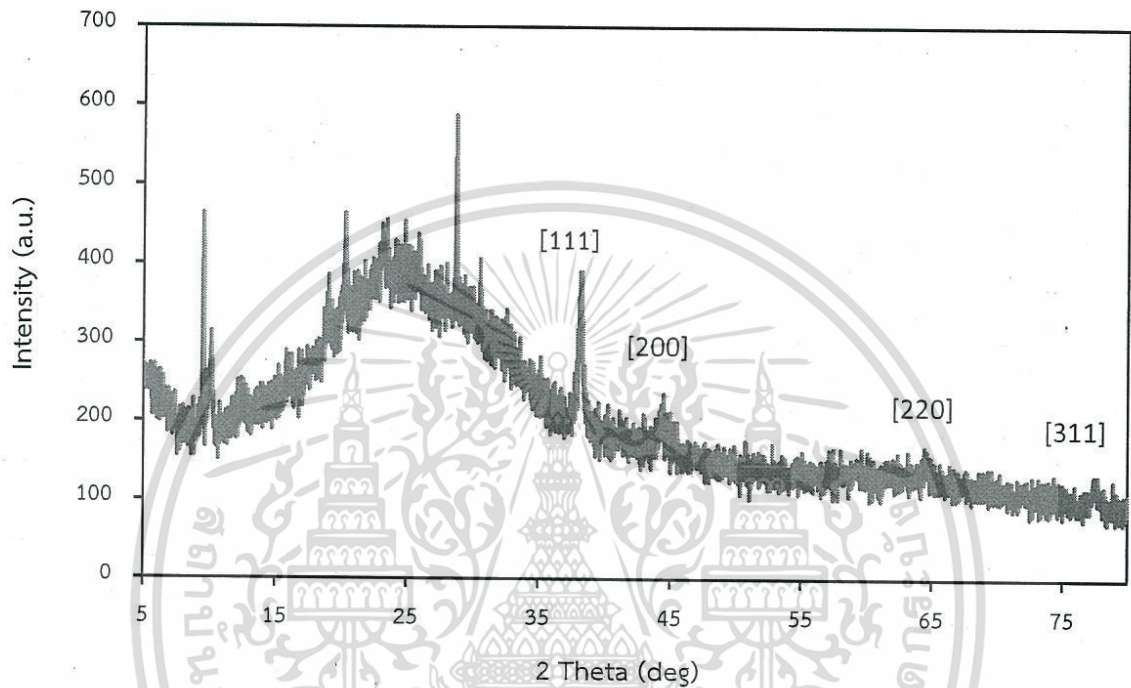
COPSS		AgNPs	
Wavenumber (cm ⁻¹)	Bond	Wavenumber (cm ⁻¹)	Bond
1575	C=O stretching	1572	C=O stretching
1408	C-O stretching	1412	C-O stretching
1134	SO ₃ ⁻	1126	SO ₃ ⁻

จากรูปที่ 4.17 (a) COPSS ปรากฏสเปกตรัมที่ในช่วงเลขคลื่น 1575 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C=O สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1408 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-O สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1134 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ SO₃⁻ (b) AgNPs ปรากฏสเปกตรัมที่ในช่วงเลขคลื่น 1572 cm⁻¹ เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C=O สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1412

เอกส รีนเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย

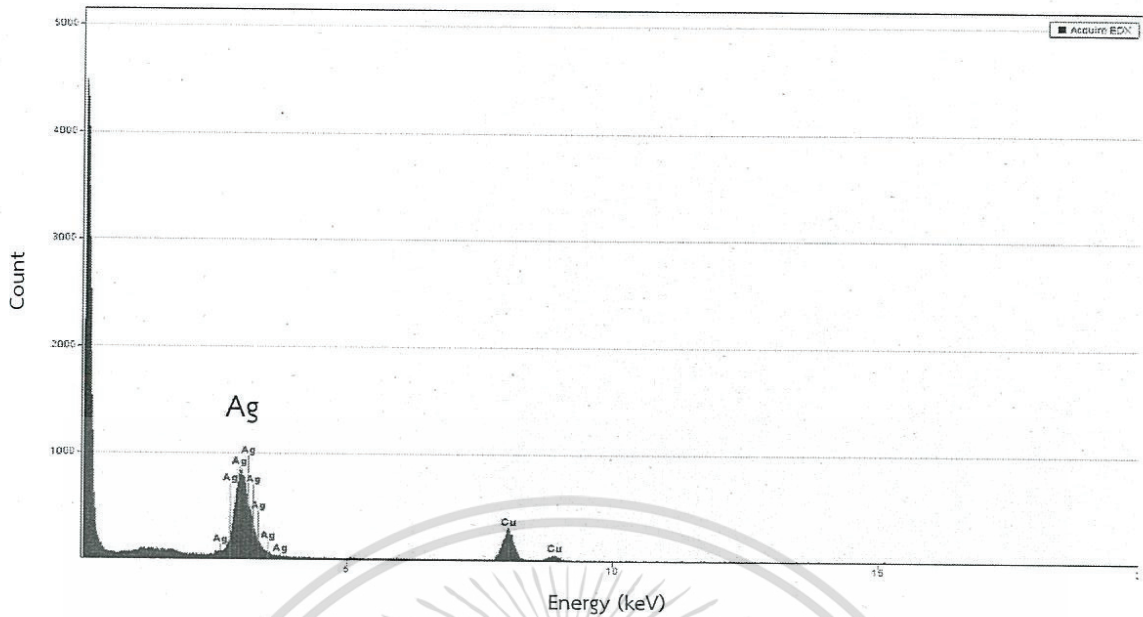
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-O สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1126 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ SO_3^- เมื่อนำสเปกตรัมของ AgNPs มาเปรียบเทียบกับสเปกตรัม COPSS เห็นได้ว่าสเปกตรัมทั้งสองตรงกัน แสดงว่า COPSS ถูกใช้ในการรักษาเสถียรภาพ AgNPs จริง จากนั้นได้ทำการศึกษาการจัดเรียงตัวของ AgNPs ด้วยเครื่อง XRD ได้ผลดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ AgNPs ด้วยเครื่อง XRD

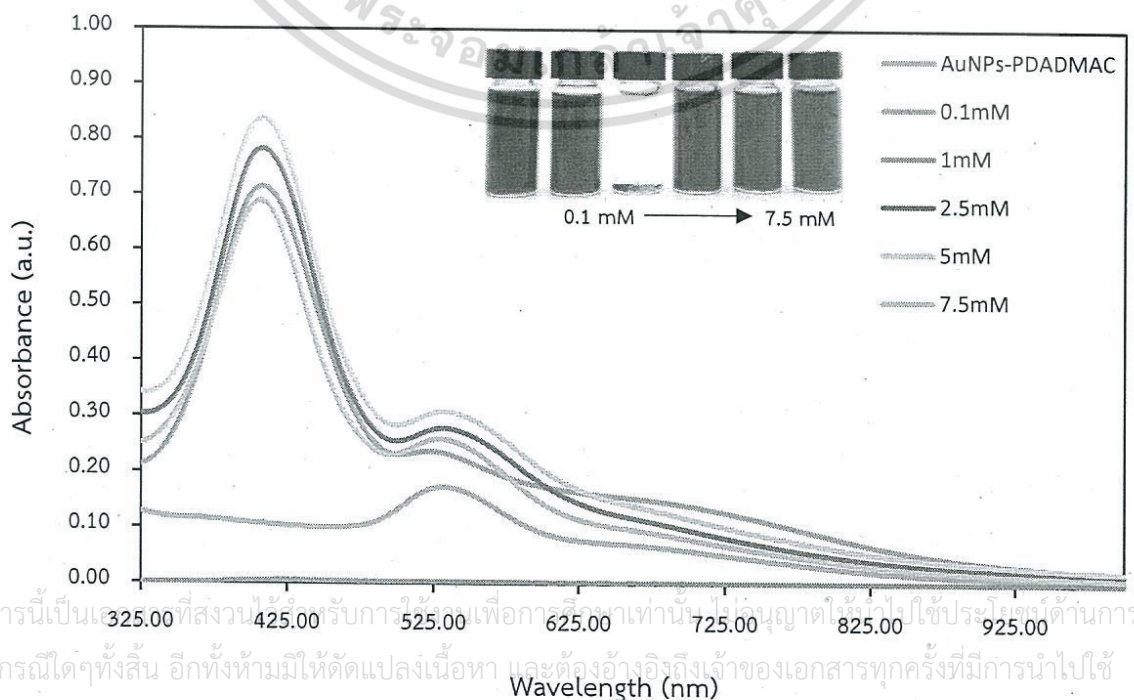
จากรูปที่ 4.18 (a) AgNPs ที่สังเคราะห์ได้ แสดงสเปกตรัมที่มีค่า 2θ ประมาณ 38.18° , 44.25° , 64.72° และ 77.40° ตามลำดับ โดยระนาบที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ คือ [111], [200], [220] และ [311] ตามลำดับ ซึ่งการจัดเรียงตัวของ AgNPs มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC สอดคล้องกับ XRD pattern ของ Ag ในฐานข้อมูล JCPDS File number 04-0784 ที่มีค่า 2θ เท่ากับ 38.10° , 44.30° , 64.50° และ 77.50° เห็นได้ว่า AgNPs ที่สังเคราะห์ขึ้น มีค่า 2θ ตรงกับ XRD pattern ของ Ag ในฐานข้อมูล JCPDS File number 04-0784 จึงสามารถยืนยันว่าอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC ของเงิน สุดท้ายเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ใน AgNPs ที่สังเคราะห์ได้ โดยการนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ได้ผลดังรูปที่ 4.19 จากรูปมีพีคของเงินเกิดขึ้น แสดงว่า AgNPs ที่สังเคราะห์ขึ้นมี Ag เป็นองค์ประกอบ



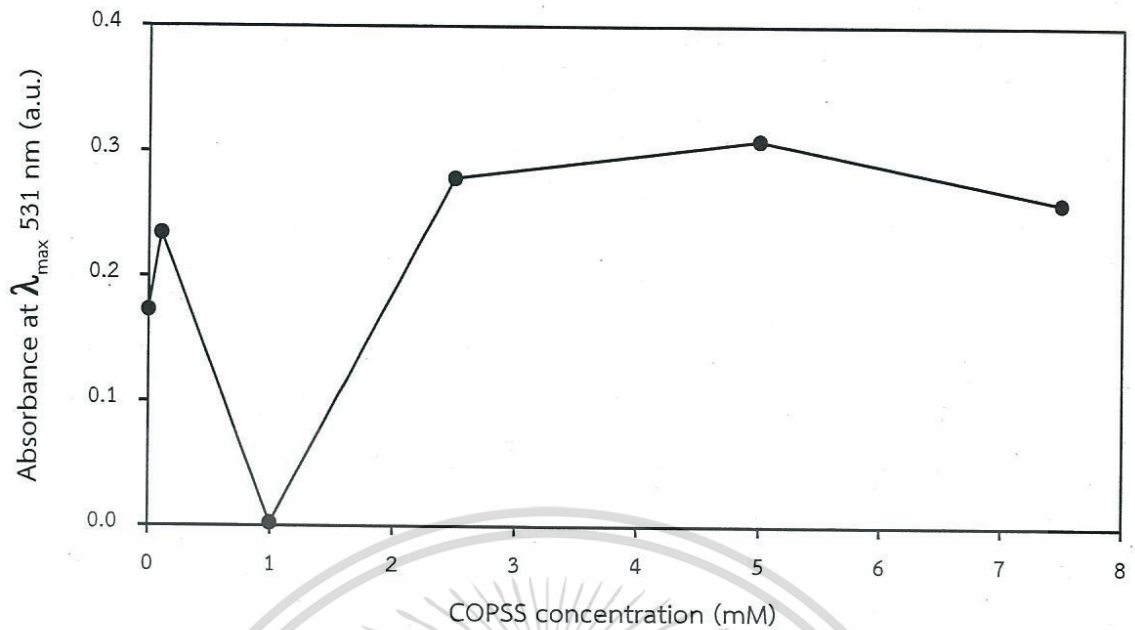
รูปที่ 4.19 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX

4.1.3 ผลการศึกษาการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย COPSS ที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวอนุภาค

งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ Au-Ag BNPs โดยอาศัยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวอนุภาค ซึ่งเทคนิคนี้จะอาศัยการยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงทางไฟฟ้าระหว่าง AuNPs ที่มีพื้นผิวเป็นประจุบวกของหมู่ Quaternary ammonium และ AgNPs ที่มีพื้นผิวเป็นประจุลบของหมู่ Carboxylate จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ได้ผลดังรูปที่ 4.20

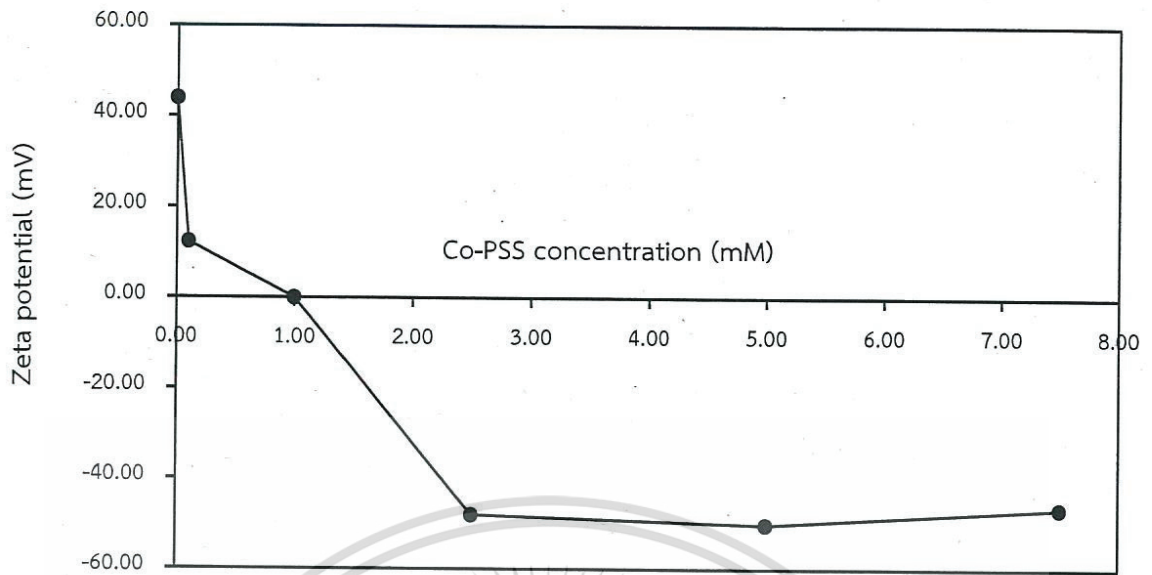


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



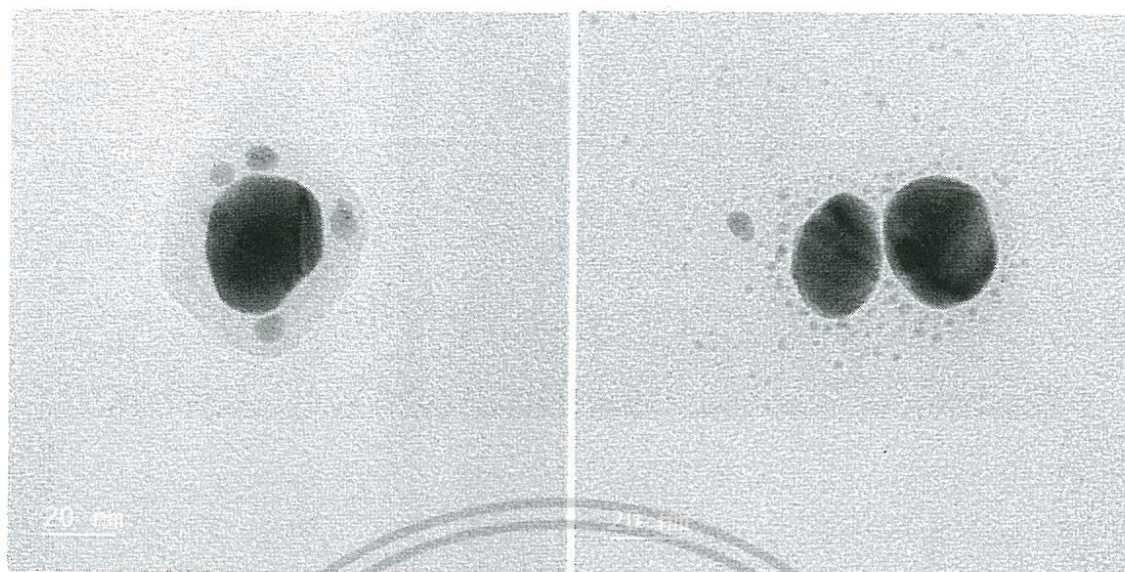
รูปที่ 4.20 (a) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Au-Ag BNPs (b) ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 531 nm ของสารละลาย Au-Ag BNPs

จากรูปที่ 4.20 สารละลาย AuNPs-PDADMAC มีสีม่วง โดยมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ 531 nm เมื่อเติม AgNPs ลงไปใน AuNPs-PDADMAC สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีน้ำตาลส้ม และมีสเปกตรัมใหม่เกิดขึ้นที่ 404 nm ซึ่งเป็นสเปกตรัมของ AgNPs ที่สารละลาย AgNPs ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลาย COPSS ความเข้มข้น 0.1 mM มีค่าการดูดกลืนแสงที่ 531 nm สูงขึ้น เนื่องจากเมื่อ AgNPs ไปล้อมรอบ AuNPs ทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้น ที่สารละลาย AgNPs ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลาย COPSS ความเข้มข้น 1 mM อนุภาคเกิดการตกตะกอน เนื่องจากเกิดการสมดุลประจุของหมู่ Carboxylate กับหมู่ Quaternary ammonium จึงทำให้อนุภาคตกตะกอน เมื่อความเข้มข้นของ COPSS ที่ใช้สังเคราะห์ AgNPs เพิ่มขึ้น หมู่ carboxylate และ หมู่ Sulfonic ของ COPSS จะทำให้อนุภาคกระจายตัว สังเกตได้จากสีของสารละลายจะกลับมาเป็นสีน้ำตาลส้มอีกครั้ง และค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้น จากนั้นนำ Au-Ag BNPs ไปวิเคราะห์ประจุบนพื้นผิวด้วยเครื่องวัดศักย์ซีต้า ได้ผลดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าของสารละลาย Au-Ag BNPs

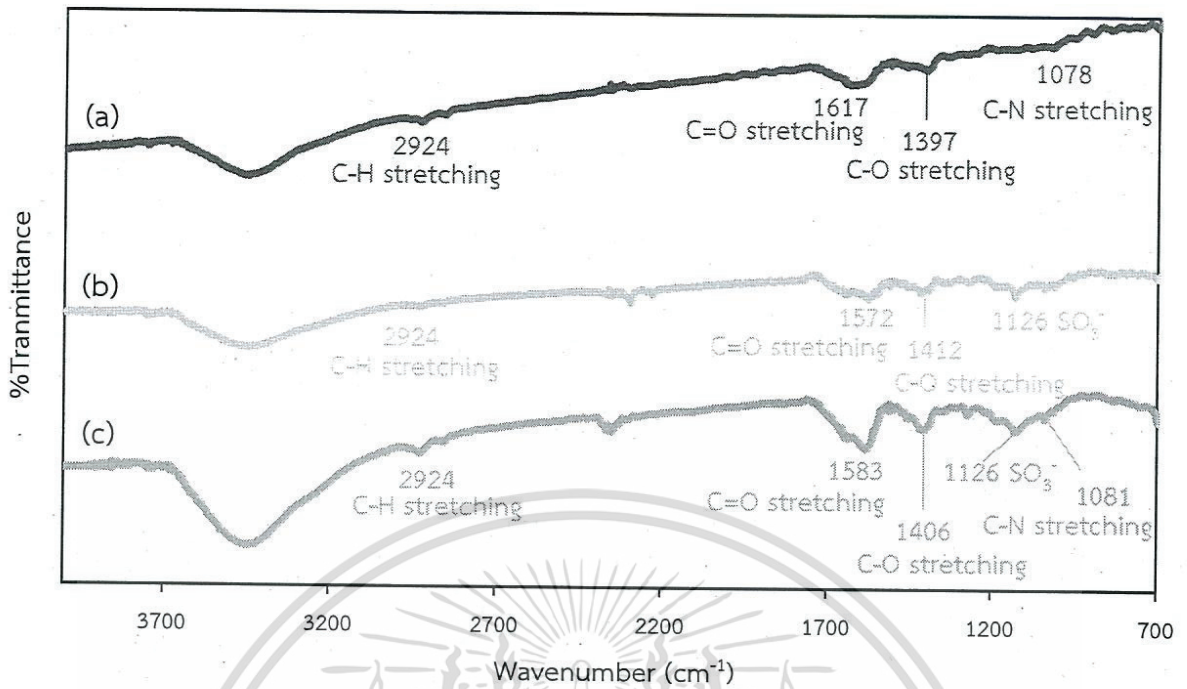
จากรูปที่ 4.21 AuNPs-PDADMAC มีค่าศักย์ซีต้า +44.47 เมื่อเติม AgNPs ลงไปทำให้ค่าศักย์ซีต้าที่เป็นบวกเปลี่ยนเป็นค่าลบ โดยที่ AgNPs ที่สังเคราะห์ด้วย COPSS ความเข้มข้น 0.1 mM ยังแสดงค่าศักย์ซีต้าเป็นประจุบวกอยู่ คือ +12.31 mV เนื่องจากความเข้มข้นของ COPSS ที่ใช้ในการสังเคราะห์ AgNPs มีความเข้มข้นไม่เพียงพอในการที่จะทำให้ AgNPs ไปยึดเหนี่ยว AuNPs-PDADMAC ด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตได้หมด จึงยังคงแสดงค่าศักย์ซีต้าเป็นประจุบวกของ AuNPs-PDADMAC ที่ความเข้มข้นของ COPSS ที่ใช้สังเคราะห์ AgNPs 1 mM อนุภาคตกตะกอนค่าศักย์ซีต้าที่วิเคราะห์ได้จึงเท่ากับ 0 mV เมื่อความเข้มข้นของ COPSS ที่ใช้ในการสังเคราะห์ AgNPs เพิ่มขึ้นแสดงค่าศักย์ซีต้าเป็นประจุลบ คือ -48.00, -50.14 และ -46.56 mV ตามลำดับ เนื่องจาก AgNPs ที่สังเคราะห์ด้วย COPSS ได้ไปล้อมรอบ AuNPs-PDADMAC ด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิตแล้ว จึงแสดงค่าเป็นลบของหมู่ Carboxylate และหมู่ Sulfonic ดังนั้นความเข้มข้นที่เหมาะสมของ COPSS ที่ใช้ในการสังเคราะห์ AgNPs สำหรับการสังเคราะห์ Au-Ag BNPs คือ 5 mM เนื่องจากถ้าใช้ความเข้มข้นของสารละลาย COPSS ต่ำ ทำให้มีความเข้มข้นไม่เพียงพอต่อการสังเคราะห์ Au-Ag BNPs และถ้าใช้ความเข้มข้นของสารละลาย COPSS สูงกว่า 5 mM จะมีปริมาณ COPSS มากเกินพอ หลังจากนั้นศึกษาลักษณะของ Au-Ag BNPs โดยนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ได้ผลดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของ Au-Ag BNPs

จากรูปที่ 4.22 เห็นได้ว่า AuNPs ถูกล้อมรอบด้วย AgNPs สรุปได้ว่าภายใต้กระบวนการ การขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวอนุภาค ของ AuNPs และ AgNPs สามารถสังเคราะห์ Au-Ag BNPs ได้ หลังจากนั้นนำ Au-Ag BNPs ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR เพื่อดูหมู่ฟังก์ชันของสาร ได้ผลดังรูปที่ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



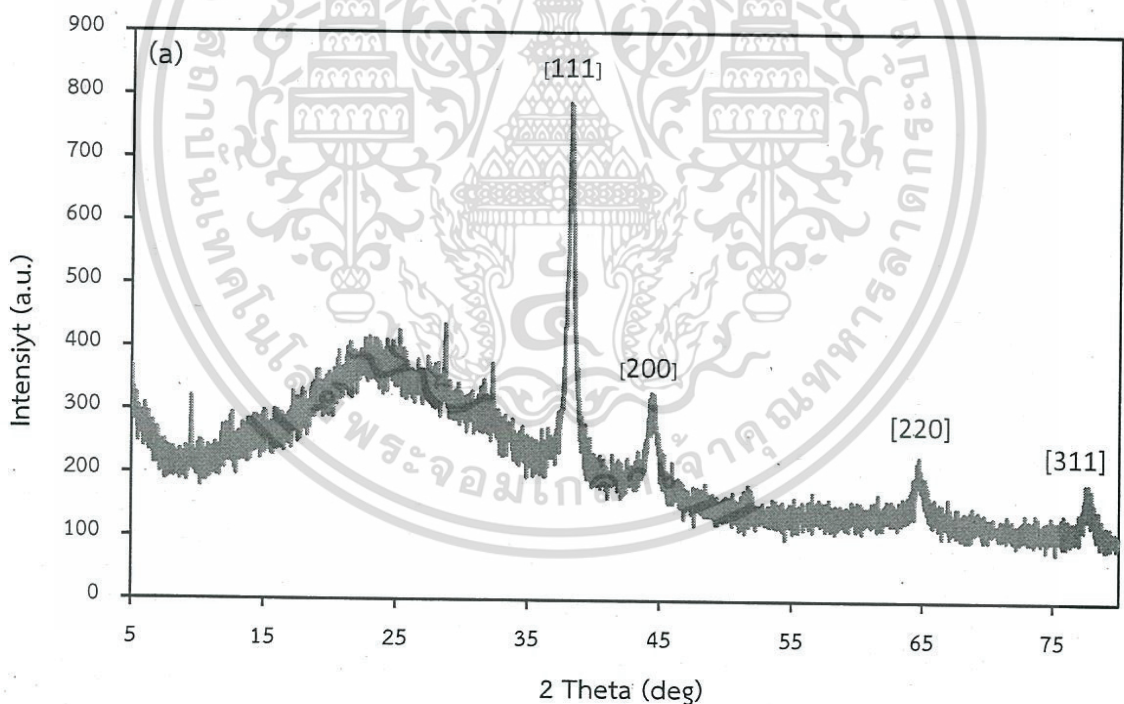
รูปที่ 4.23 สเปกตรัม FT-IR ของ (a) AuNPs-PDADMAC (b) AgNPs (c) Au-Ag BNPs

ตารางที่ 4.7 แสดงหมู่ฟังก์ชันของ AuNPs-PDADMAC, AgNPs และหมู่ฟังก์ชันของ Au-Ag BNPs

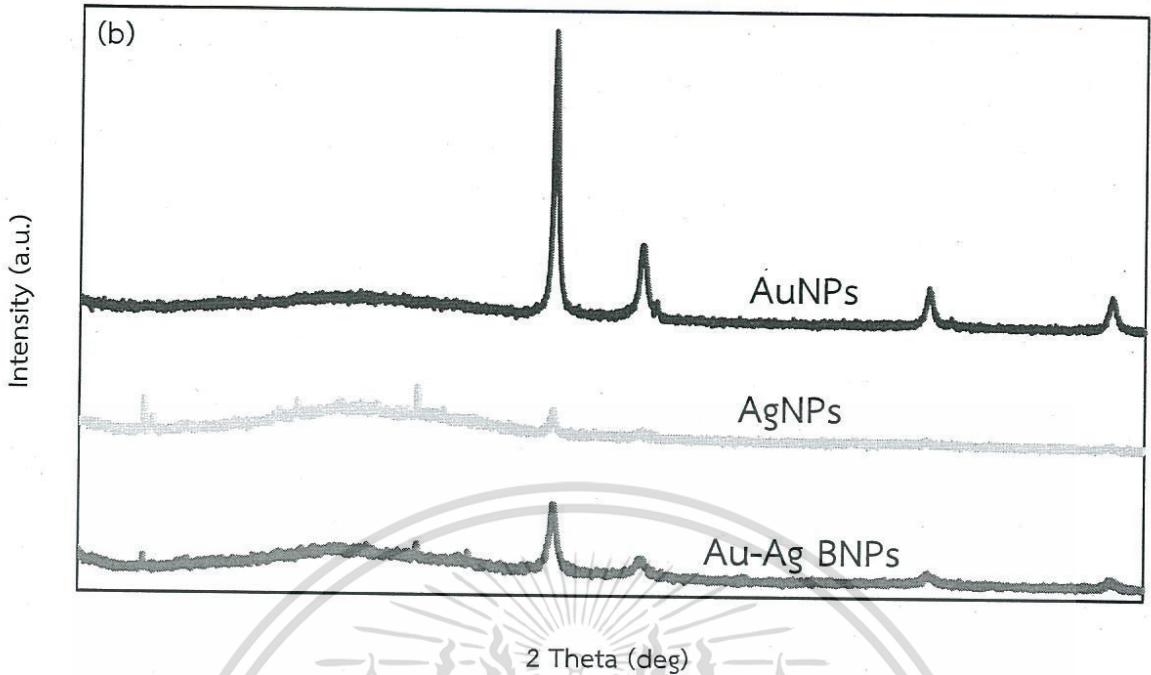
AuNPs-PDADMAC		AgNPs		Au-Ag BNPs	
Wavenumber (cm ⁻¹)	Bond	Wavenumber (cm ⁻¹)	Bond	Wavenumber (cm ⁻¹)	Bond
2924	C-H stretching	2924	C-H stretching	2924	C-H stretching
1617, 1397	C-H bending	1572	C=O stretching	1583	C=O stretching
-	-	1412	C-O stretching	1406	C-O stretching
-	-	1126	SO ₃ ⁻	1126	SO ₃ ⁻
1078	C-N stretching	-	-	1081	C-N stretching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.7 (a) เป็นสเปกตรัม FT-IR ของ AuNPs-PDADMAC โดยสเปกตรัมปรากฏในช่วงเลขคลื่น 1078 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-N สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1397 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-O สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1617 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C=O และสเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 2924 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-H (b) เป็นสเปกตรัม FT-IR ของ AgNPs โดยสเปกตรัมที่ปรากฏในช่วงเลขคลื่น 1126 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ SO_3^- สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1412 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-O สเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 1572 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C=O และสเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 2924 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบยืดหด (Stretching) ของพันธะ C-H เมื่อนำสเปกตรัมของ (c) Au-Ag BNPs มาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของ (a) AuNPs-PDADMAC และ (b) AgNPs จะเห็นได้ว่ามีสเปกตรัมที่ตรงกัน จึงสามารถยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้เป็น Au-Ag BNPs จากนั้นทำการศึกษากิจการจัดเรียงตัวของ Au-Ag BNPs ด้วยเครื่อง XRD ได้ผลดังรูปที่ 4.24

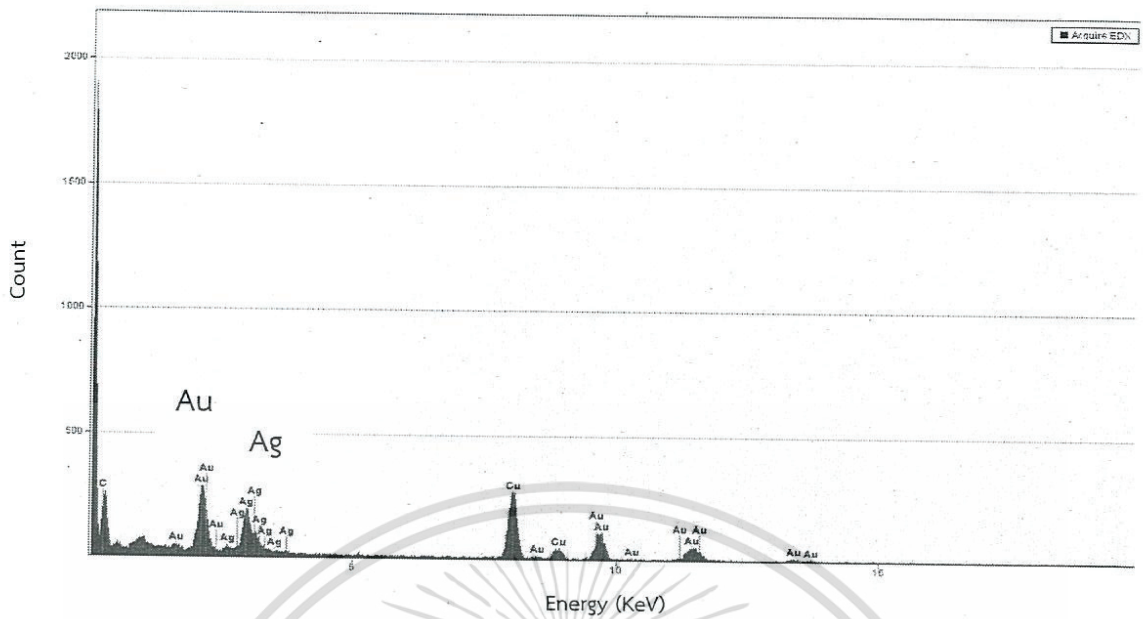


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 (a) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ Au-Ag BNPs ด้วย XRD (b) เปรียบเทียบ XRD ของ AuNPs-PDADMAC, AgNPs และ Au-Ag BNPs

จากรูปที่ 4.24 (a) Au-Ag BNPs แสดงสเปกตรัมที่มีค่า 2θ ประมาณ 38.25° 44.44° 64.72° และ 77.65° ตามลำดับ ระบุที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ คือ [111] [200] [220] และ [311] ตามลำดับ ซึ่งการจัดเรียงตัวของ Au-Ag BNPs มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC สอดคล้องกับ XRD pattern ของ AuNPs กับ AgNPs รูปที่ 4.24 (b) โดยพีคของ Au-Ag BNPs ตรงกับพีคของ AuNPs และ AgNPs จึงยืนยันได้ว่า Au-Ag BNPs มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC เช่นเดียวกับกับเงินและทอง สุดท้ายเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ใน Au-Ag BNPs โดยการนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ได้ผลดังรูปที่ 4.25 จากรูป พบว่ามีพีคของ Au และ Ag เกิดขึ้น จึงสามารถยืนยันได้ว่า Au-Ag BNPs มีธาตุ Au และ Ag เป็นองค์ประกอบ

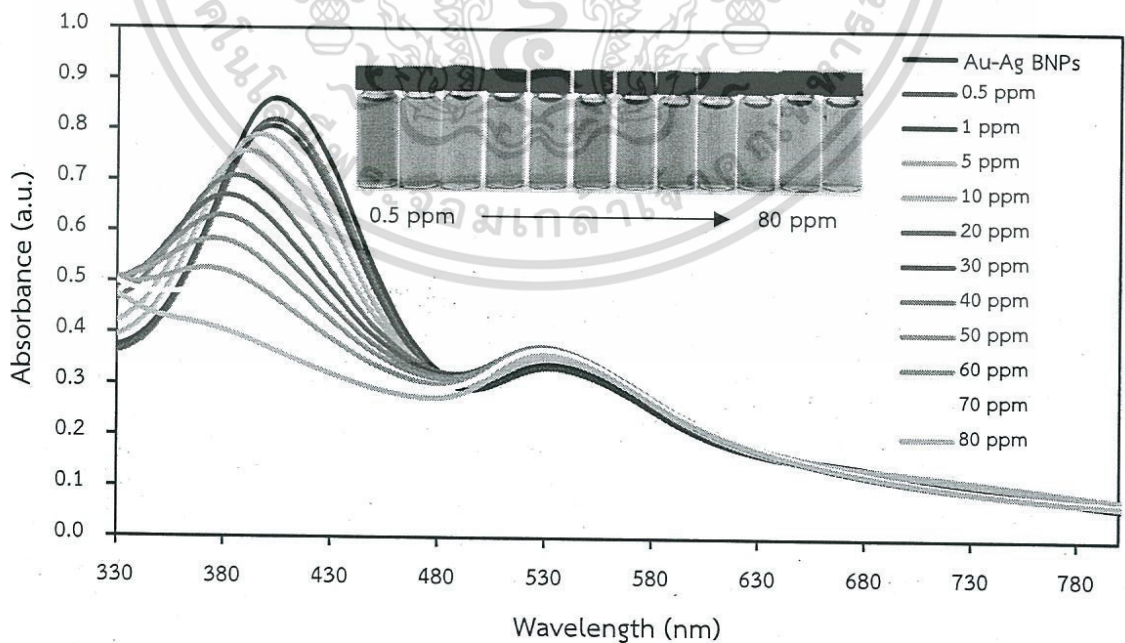


รูปที่ 4.25 ผลของการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX

4.2 ผลการศึกษาการรับรู้ของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินในการวิเคราะห์ปรอท

4.2.1 ผลการศึกษาความเป็นเส้นตรง

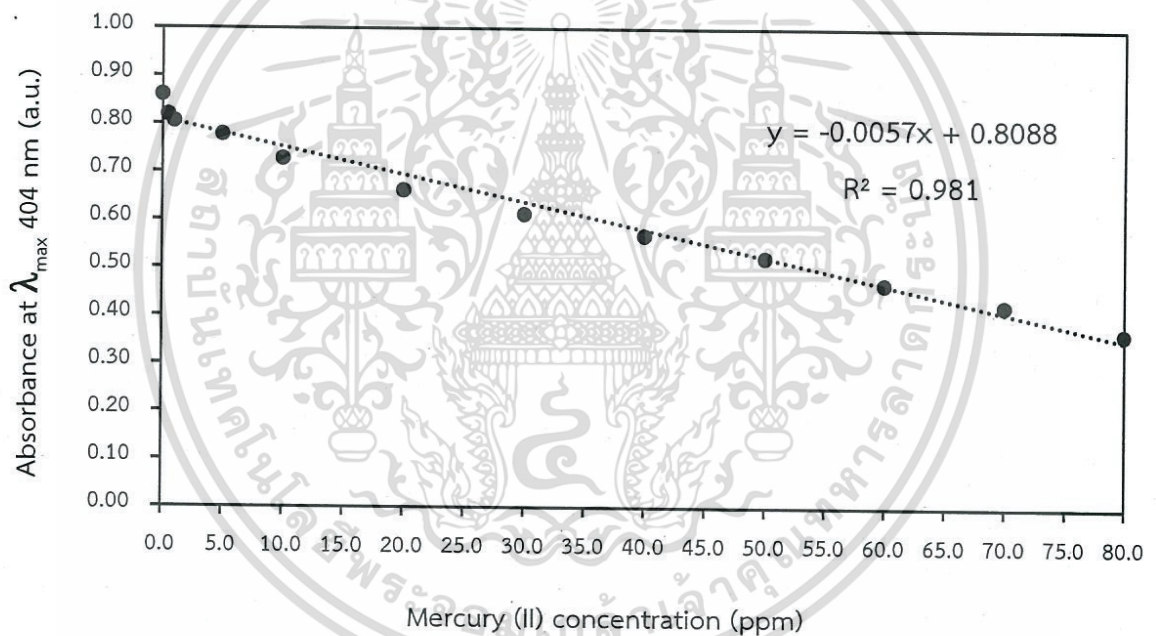
ทำได้โดยสังเคราะห์ Au-Ag BNPs และนำไปวิเคราะห์ปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆจากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ค่าการดูดกลืนแสงของ Au-Ag BNPs ที่ใช้เป็นตัวรับรู้เชิงสีในการวิเคราะห์ปรอทความเข้มข้น 0.5 ถึง 80 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.26 สารละลาย Au-Ag BNP มีสีน้ำตาลอมส้ม มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด 404 nm ซึ่งเป็นสเปกตรัมของ AgNPs และสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นสูงสุด 531 nm เป็นสเปกตรัมของ AuNPs เมื่อเติมสารละลายปรอทความเข้มข้นต่างๆลงไป Au-Ag BNP เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำตาลอมส้มไปเป็นสีม่วง โดยความยาวคลื่นสูงสุดที่ 404 nm มีค่าการดูดกลืนแสงลดลงเรื่อยๆ ตามความเข้มข้นปรอทที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปรอทเข้าไปทำปฏิกิริยากับ AgNPs ของ Au-Ag BNP โดยปรอทจะไปออกซิไดซ์ Ag^0 กลายเป็น Ag^+ โดยปรอทมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน +0.851 V จึงสามารถออกซิไดซ์เงินได้ [74] ซึ่งความเข้มข้นปรอทที่ 80 ppm ไม่ปรากฏสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 404 nm เนื่องจากปรอทมีความเข้มข้นสูงพอที่จะออกซิไดซ์ AgNPs จนสลายตัวหมดทำให้เหลือเพียง AuNPs-PDADMAC จึงมีแค่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด 531 nm จากนั้นนำผลค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 404 nm และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทมาสร้างกราฟมาตรฐาน เพื่อหาสมการเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 404 nm และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอท

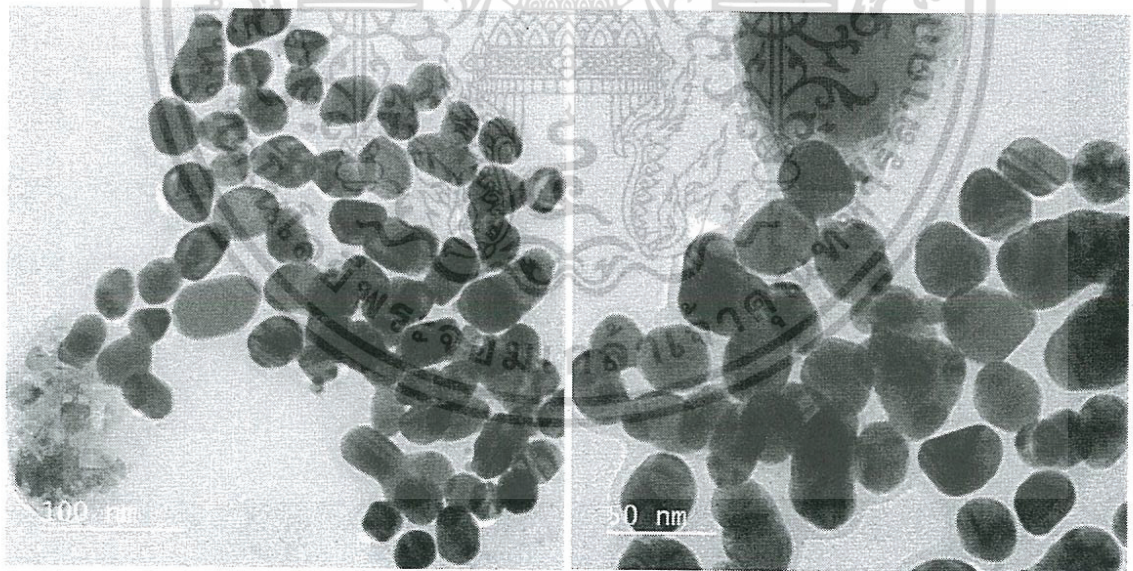
จากรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 404 nm และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทมาสร้างกราฟมาตรฐานจะได้สมการเส้นตรง คือ $y = -0.0057x + 0.8088$ และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.9818 จากนั้นนำ Au-Ag BNP ในการวิเคราะห์ปรอทความเข้มข้น 5 40 และ 80 ppm เป็นตัวแทนในการนำไปวัดศักย์ซีต้า ได้ผลดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าของ Au-Ag BNPs เป็นตัวรับรู้เชิงสีในการวิเคราะห์ปรอท

ความเข้มข้น Mercury (II) (ppm)	Zeta Potential (mV)
0	-50.1
5	-44.0
40	-33.3
80	+33.8

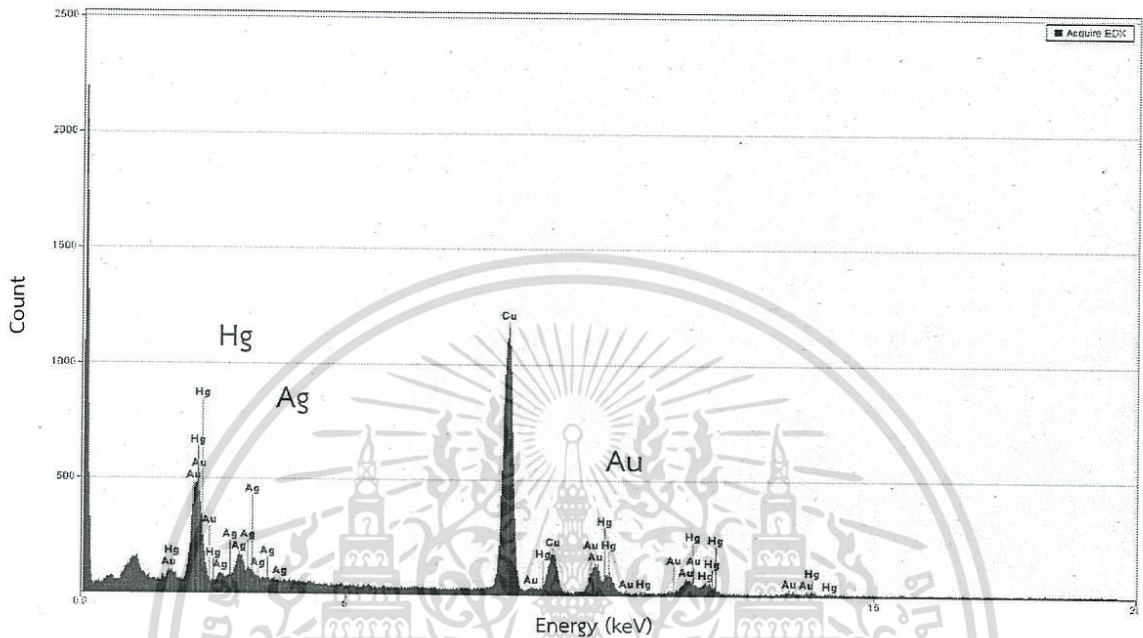
จากตารางที่ 4.8 ที่ปรอทความเข้มข้น 5 และ 40 ppm แสดงค่าศักย์ซีต้าเป็นประจุลบ คือ -44.07 และ -33.39 mV เนื่องจากปรอทได้ไปออกซิไดซ์ AgNPs แต่ปรอทมีความเข้มข้นไม่เพียงพอที่จะทำให้ AgNPs สลายตัวหมด ค่าศักย์ซีต้าจึงมีค่าเป็นลบ และที่ปรอทความเข้มข้น 80 ppm แสดงค่าศักย์ซีต้าเป็นประจวบคือ +33.80 mV เนื่องจากปรอทได้ไปออกซิไดซ์ AgNPs จนสลายตัวหมด ทำให้เหลือแต่ AuNPs-PDADMAC ค่าศักย์ซีต้าที่ได้จึงแสดงค่าเป็นประจวบ จากนั้นนำ Au-Ag BNPs ที่วิเคราะห์ปรอทความเข้มข้น 80 ppm ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM เพื่อดูว่าที่ปรอทความเข้มข้น 80 ppm สามารถทำให้อนุภาคเงินสลายตัวหมดจริง ได้ผลดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของ Au-Ag BNPs ในการวิเคราะห์ปรอท 80 ppm

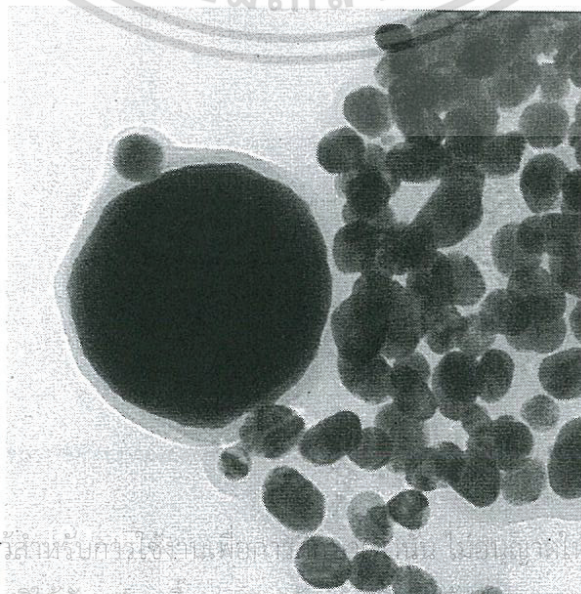
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าไม่มี AgNPs ล้อมรอบ AuNPs-PDADMAC แสดงว่าที่ปรอทความเข้มข้น 80 ppm สามารถออกซิไดซ์ AgNPs ให้สลายตัวหมดแล้ว สามารถยืนยันได้จากการนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ได้ผลดังรูปที่ 4.29 พบว่ามีพีคของทอง เงิน และปรอท ที่ยังพบพีคของเงินอยู่ เนื่องจากเงินที่ถูกออกซิไดซ์ก็ยังคงอยู่ในสารละลายอยู่ จึงพบพีคของเงิน

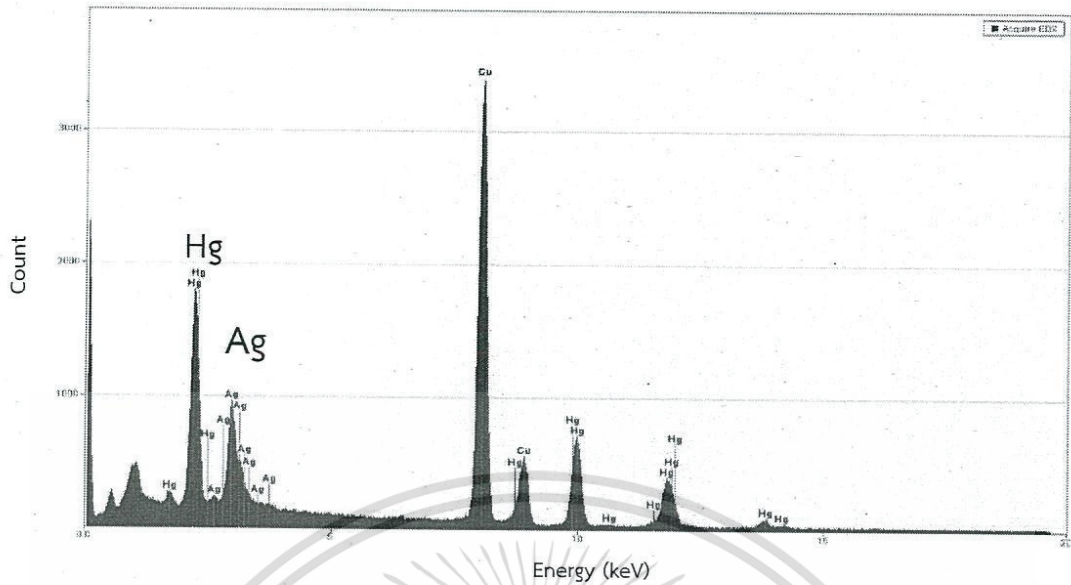


รูปที่ 4.29 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX

โดยเงินที่ถูกออกซิไดซ์แล้วยังอยู่ในสารละลายจะไปรวมตัวกับปรอทเกิดเป็นอะมัลกัม (Ag_2Hg_3) แสดงดังรูปที่ 4.30 สอดคล้องกับงานวิจัยของบุรีม [45] โดยอะมัลกัมที่เกิดขึ้นสามารถยืนยันได้จากเทคนิค EDX ว่ามีเพียงแคปรอทและเงินในอะมัลกัมเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 4.31 จากรูป มีพีคของเงินและปรอทเกิดขึ้น แสดงว่าอะมัลกัมมีธาตุเงินและปรอทเป็นองค์ประกอบ



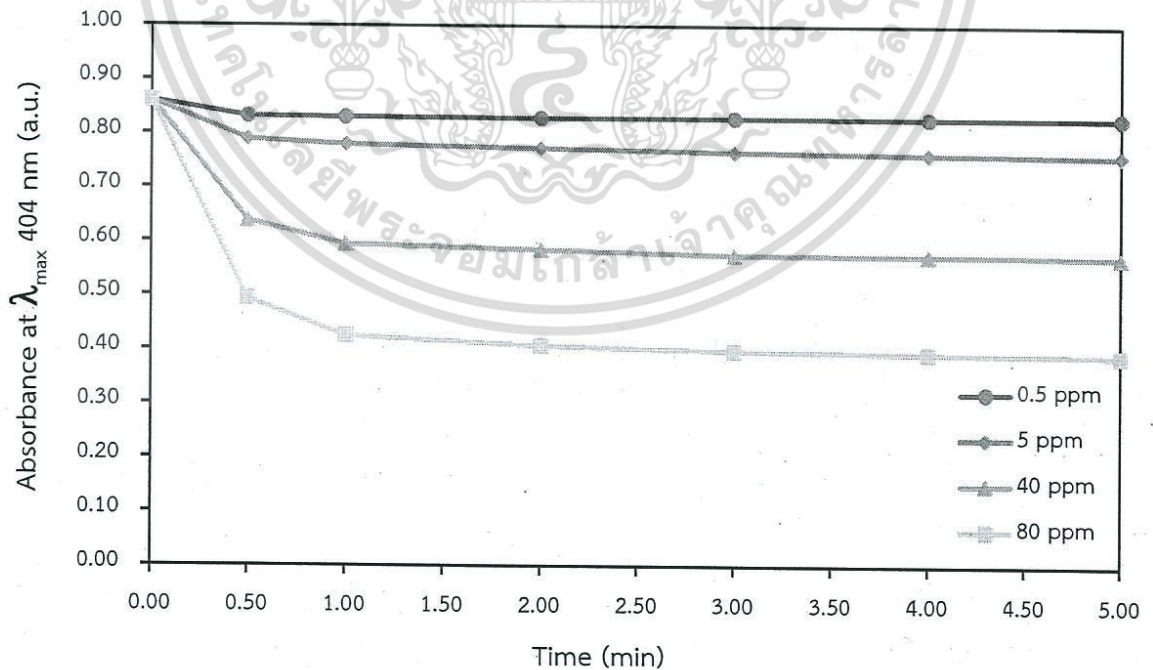
รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายจากเครื่อง TEM ของ อะมัลกัม



รูปที่ 4.31 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDX

4.2.2 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอท

การทดลองทำโดยนำสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้น 0.5 5 40 และ 80 ppm ใส่ลงใน Au-Ag BNPs จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ที่เวลา 0.5 1 2 3 4 และ 5 นาที ได้ผลดังรูปที่ 4.32



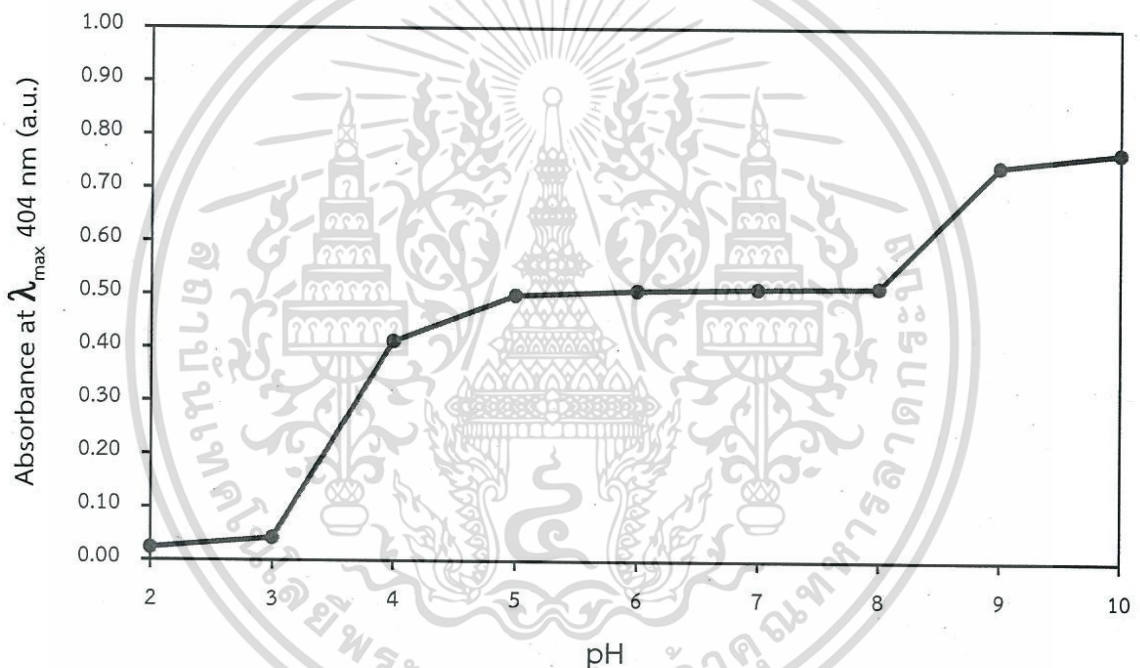
รูปที่ 4.32 ค่าการดูดกลืนแสงของการวิเคราะห์ปรอทที่เวลาต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.32 เป็นการศึกษาผลของเวลาในการตรวจวัดปรอท พบว่าที่ปรอทความเข้มข้นต่ำ เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเสร็จสิ้นที่ช่วงเวลา 3 นาที สังเกตได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่เริ่มคงที่ และที่ปรอทความเข้มข้นสูงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเสร็จสิ้นที่ช่วงเวลา 1 นาที ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอท คือ 3 นาที

4.2.3 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอท

การทดลองทำโดยนำ Au-Ag BNP's มาปรับ pH โดยใช้กรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ได้ pH 2 3 4 5 6 7 8 9 และ 10 แล้วนำไปวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 50 ppm จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ได้ผลดังรูปที่ 4.33



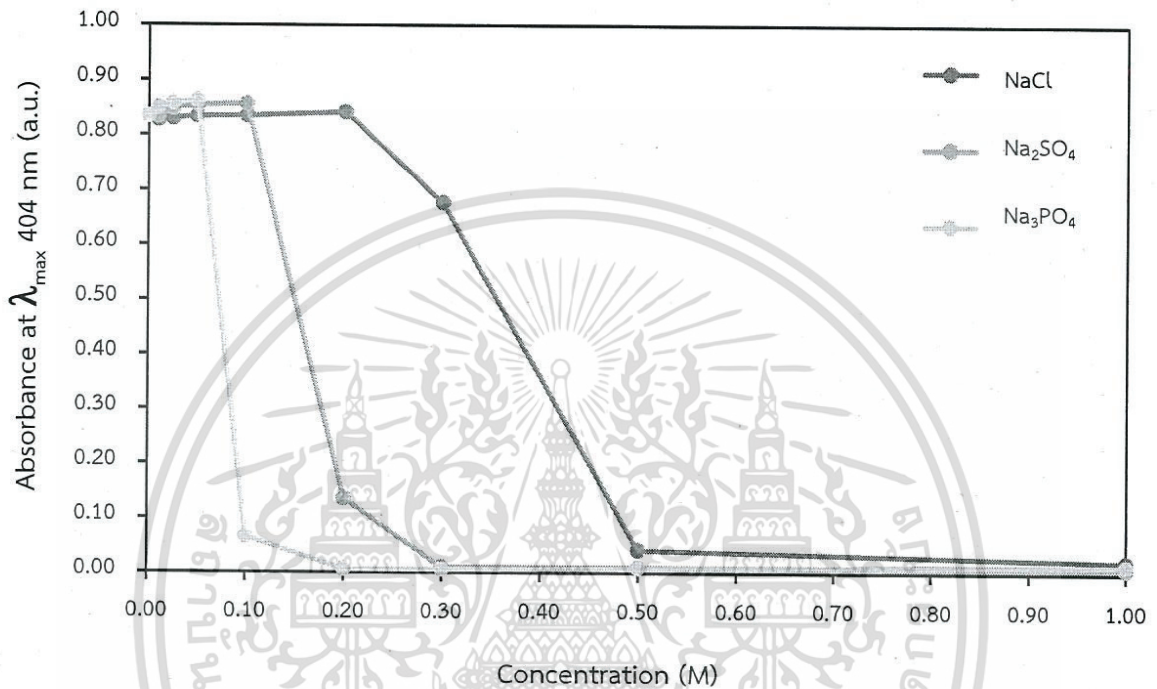
รูปที่ 4.33 ค่าการดูดกลืนแสงของการวิเคราะห์ปรอทที่ pH ต่างๆกัน

จากรูปที่ 4.33 เป็นการศึกษาผลของ pH ที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ปรอท พบว่าในช่วง pH 2-3 เป็นสภาวะกรดมี Proton (H^+) มาก ซึ่ง H^+ จะเกิดการ Deprotonate กับหมู่ Carboxylate (COO^-) กลายเป็น Carboxylic ($COOH$) ทำให้อนุภาคตกตะกอน จึงไม่สามารถวิเคราะห์ปรอทได้ [75] ช่วง pH 4-8 เป็นช่วง pH ที่ทำให้อนุภาคเริ่มกระจายตัวกลับขึ้นมาและกระจายตัวได้ดี เมื่อวิเคราะห์ปรอท จึงให้ค่าการดูดกลืนแสงที่คงที่ [76] และในช่วง pH 9-10 เป็นสภาวะเบส มี Hydroxide (OH^-) มาก ซึ่ง OH^- จะไปทำลายแรงผลึกของอนุภาคแต่ละอนุภาค [77] อนุภาคจึงเข้ามาใกล้กัน ขนาดจึงใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น ดังนั้นช่วง pH ที่สามารถวิเคราะห์ปรอทได้คือ pH 5-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการศึกษาผลของเกลือที่ส่งผลต่ออนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน

ในตัวอย่างนำที่นำมาวิเคราะห์ปรอทอาจมีไอออนของเกลืออยู่ ซึ่งเกลือเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่ออนุภาคนาโน ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษามลของเกลือ โดยใช้เกลือ 3 ชนิดในการศึกษา ได้ผลดังรูปที่ 4.34



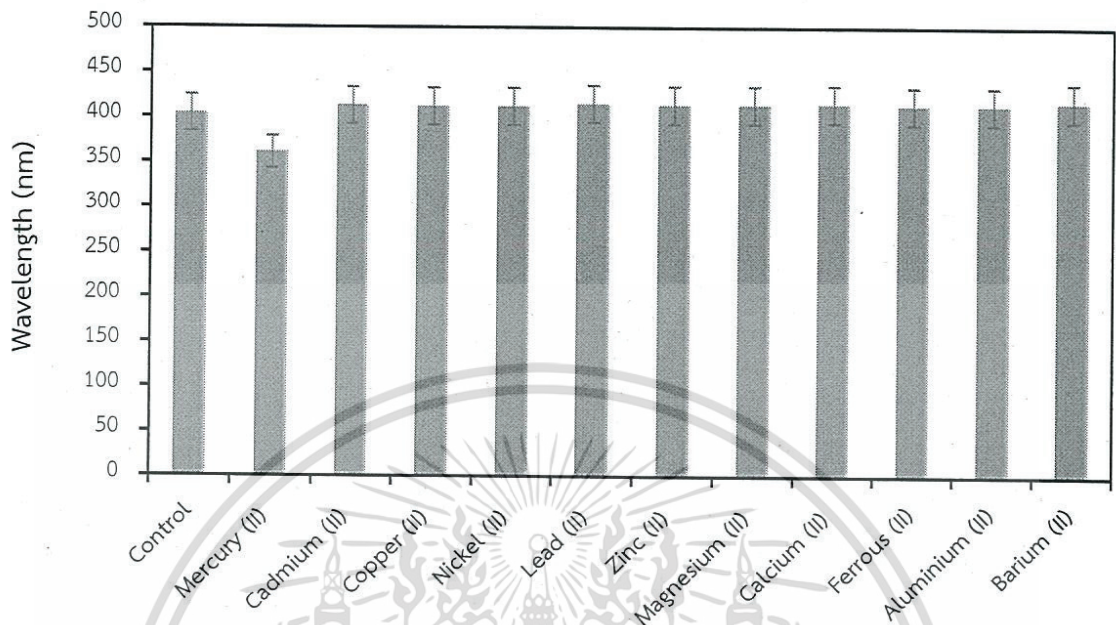
รูปที่ 4.34 ค่าการดูดกลืนแสงผลของเกลือที่ส่งผลต่อ Au-Ag BNPs

จากรูปที่ 4.34 เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และไตรโซเดียมฟอสเฟต ที่ความเข้มข้น 0.1-1.0 โมลาร์ ลงใน Au-Ag BNPs โดยโซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และไตรโซเดียมฟอสเฟต ทำให้ Au-Ag BNPs ตกตะกอนที่ความเข้มข้น 0.5 0.3 และ 0.2 M ตามลำดับ เนื่องจากเกลือที่เป็นไตรวาเลนซ์ (Na_3PO_4) สามารถทำลายแรงผลึก (Repulsive force) ระหว่างอนุภาค Au-Ag BNPs ได้ดี จึงทำให้อนุภาคเข้ามาใกล้กันและตกตะกอน ส่วนเกลือที่เป็นโมโนวาเลนซ์ (NaCl) ทำลายแรงผลึกน้อย จึงทำให้อนุภาค Au-Ag BNPs ตกตะกอนได้ช้า [77] ดังนั้นช่วงความเข้มข้นของเกลือที่ไม่ส่งผลต่อ Au-Ag BNPs คือ 0.05 M

4.2.5 การศึกษาผลของตัวรบกวนที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ปรอท

การทดลองทำโดยการเติมสารต่างๆดังนี้ Aluminium sulfate, Barium sulfate, Cadmium sulfate, Calcium nitrate, Copper nitrate, Ferrous sulfate, Lead nitrate, Magnesium nitrate, Nickel nitrate และ Zinc sulfate ที่มีความเข้มข้นมากกว่าสารละลายมาตรฐานปรอท 500 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางวิชาการ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใน Au-Ag BNPs จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ได้ผล ดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของตัวรบกวนต่างๆ ที่เติมลงไปนสารละลาย Au-Ag BNPs

จากรูปที่ 4.35 เป็นผลของการศึกษาผลของตัวรบกวนโดยการเติมสารต่างๆ จำนวน 10 ชนิดที่มีความเข้มข้นมากกว่าปรอท 500 เท่าลงใน Au-Ag BNPs พบว่าสารทั้ง 10 ชนิดที่เติมลงไปไม่ส่งผลต่อการตรวจวิเคราะห์ สังเกตได้จากค่าความยาวคลื่นสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกับค่าความยาวคลื่นสูงสุดของ Au-Ag BNPs ยกเว้นปรอทที่มีค่าความยาวคลื่นสูงสุดเปลี่ยนไปจาก Au-Ag BNPs เนื่องจากปรอทมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมากกว่าเงิน จึงสามารถออกซิไดซ์เงินได้ แต่ตัวรบกวนที่เติมลงไปทั้ง 10 ชนิด มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานต่ำกว่าเงิน จึงไม่สามารถออกซิไดซ์เงินได้ ทำให้ค่าความยาวคลื่นสูงสุดไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงจากค่าความยาวคลื่นสูงสุด Au-Ag BNPs จึงสรุปได้ว่า Au-Ag BNPs ที่สังเคราะห์ขึ้น เป็นวิธีที่จำเพาะต่อการวิเคราะห์ปรอท

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน

Interference	Standard potential; E0 (V)
Aluminium (II)	-1.66
Barium (II)	-2.92
Cadmium (II)	-0.40
Calcium (II)	-2.84
Copper (II)	+0.34
Ferrous (II)	+0.77
Lead (II)	-0.13
Magnesium (II)	-2.37
Nikel (II)	-0.26
Zinc (II)	-0.76

4.2.6 ผลการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)

ทำได้โดยใช้กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทและค่าการดูดกลืนแสง ทำได้โดยวัด Blank จำนวน 10 ครั้ง นำมาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Blank ได้ค่าเท่ากับ 0.001 โดยมีค่าความชันของสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน คือ 0.0057 แล้วนำมาคำนวณหาค่า LOD โดยได้ผลดังตารางที่ 4.10

4.2.7 ผลการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)

ได้โดยใช้กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทและค่าการดูดกลืนแสง ทำได้โดยวัด Blank จำนวน 10 ครั้ง นำมาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Blank ได้ค่าเท่ากับ 0.001 โดยมีค่าความชันของสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน คือ 0.0057 แล้วนำมาคำนวณหาค่า LOQ โดยได้ผลดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่า LOD และ LOQ

ตัวแปร	ค่าที่คำนวณได้ (ppm)
ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)	0.526 ± 0.001
ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)	1.754 ± 0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 ผลการศึกษาค่าร้อยละการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความเที่ยง (Precision)

การทดลองทำได้โดยนำสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 5 25 50 และ 75 ppm ใส่ลงใน Au-Ag BNPs แล้วนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ได้ผลดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงค่าร้อยละของการคืนกลับของสารละลายมาตรฐานปรอทและค่าความเที่ยง

Standard (ppm)	Found value (ppm)	Accuracy (%Recovery)	Precision (%RSD)
5	4.97 ± 0.08	99.35	1.59
25	25.02 ± 0.10	100.06	0.39
50	49.58 ± 0.71	99.17	1.43
75	75.03 ± 0.07	100.04	0.09

ตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าสารละลายมาตรฐานปรอทสามารถหาค่าร้อยละของการคืนกลับได้เท่ากับ 99.17 ถึง 100.06% และมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 0.09 ถึง 1.59 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

ผลการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของปรอทในตัวอย่างน้ำ 1 และตัวอย่างน้ำ 2 ทำได้โดยการนำตัวอย่างน้ำ 1 และตัวอย่างน้ำ 2 มาเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 30 และ 60 ppm ตามลำดับ แล้ว ใส่ลงใน Au-Ag BNPs จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer แล้วทำการ Spike ปรอท ความเข้มข้น 5 และ 15 ppm ลงไป ในแต่ละตัวอย่างน้ำ แล้วนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ได้ผลดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงค่าร้อยละของการคืนกลับและค่าความแม่นยำของตัวอย่างน้ำ

	Concentration of mercury (II) (ppm)			%Recovery	%RSD
	Detected	Added	Found		
Sample1	29.3	5	34.16 ± 0.78	98.01	2.29
		15	44.18 ± 0.70	99.45	1.58
Sample2	58.2	5	63.32 ± 1.29	101.72	2.04
		15	73.13 ± 0.80	99.32	1.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างน้ำ 1 และตัวอย่างน้ำ 2 สามารถหาค่าร้อยละของการคืนกลับได้เท่ากับ 98.01 ถึง 99.45% และ 99.32 ถึง 101.72% ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จากการตรวจวัดน้ำตัวอย่างทั้งสองมีค่าใกล้เคียง 100% แสดงให้เห็นว่าตัวรบกวนไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ นอกจากนี้จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าความแม่นยำของทั้ง 2 ตัวอย่างอยู่ในช่วง 1.10 ถึง 2.29 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

4.2.9 การตรวจสอบความถูกต้องของวิธี

การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีในการวิเคราะห์ตัวอย่างจริงของปรอทในน้ำ ทำได้โดยเทียบผลวิเคราะห์ของวิธีที่พัฒนาขึ้น (Au-Ag BNPs) กับวิธีมาตรฐาน (Cold vapor atomic fluorescence spectrometry) โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการเปรียบเทียบวิธีที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ปรอท

Method	Concentration of mercury (II) (ppm)			%Recovery	%RSD
	Deteced	Add	Found		
Au-Ag bimetallic nanoparticle colorimetric sensor	29.30	15	44.18 ± 0.70	99.45	1.58
Cold vapor atomic fluorescence spectrometry	29.99	15	45.00 ± 0.03	100.04	0.06

จากตารางที่ 4.13 วิธีมาตรฐานตรวจพบปรอทความเข้มข้น 45.00 ± 0.03 ppm ในขณะที่วิธีที่พัฒนาขึ้นตรวจพบปรอทความเข้มข้น 44.18 ± 0.70 ppm ซึ่งค่าที่ตรวจพบปรอทของทั้ง 2 วิธี มีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบผลระหว่าง 2 วิธี ด้วยการใช้การคำนวณตามหลักการทางสถิติแบบ Paired t-test พบว่าผลวิเคราะห์ของวิธีที่พัฒนาขึ้นมีผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับวิธีมาตรฐาน ($t_{\text{calculated}}=2.08$, $t_{\text{critical}}=2.92$) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นวิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้วิเคราะห์ปรอทได้อย่างน่าเชื่อถือ

4.2.10 เปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์กับวิธีอื่นๆ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ปริมาณปรอทกับวิธีอื่นๆ ซึ่งสามารถแสดงผลดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ต่างๆ

Colorimetric probe	LOD (μM)	Linear range (μM)	Ref.
Ultrasmall Ce^{3+} and Tb^{3+} doped SrF_2 nanocrystals capped with glutathione	20.00	1 - 10	[78]
Counterion exchange of cationic polydiacetylene	8.30	0 - 65	[63]
Dichlorofluorescein – coumarin conjugate	4.30	0 - 100	[64]
Rhodamine derivative functionalized chitosan	3.42	0 - 6	[79]
Green synthesized silver nanoparticles	2.20	0 - 100	[6]
Au-Ag Bimetallic nanoparticle	1.94	0 - 295	This work

จากการเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์กับวิธีอื่น พบว่าการวิเคราะห์ปรอทด้วย Au-Ag BNPs มีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดเท่ากับ $1.94 \mu\text{M}$ และมีช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง $0-295 \mu\text{M}$ เมื่อเปรียบเทียบค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดและช่วงความเป็นเส้นตรงกับวิธีอื่นๆ วิธีที่ใช้ตัวรับรู้เชิงสีโดยใช้ Au-Ag BNPs ให้ผลวิเคราะห์ที่ดีกว่า คือ สามารถวิเคราะห์ปรอทที่มีความเข้มข้นต่ำได้ และสามารถวิเคราะห์ปรอทได้ในช่วงกว้าง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน ดังต่อไปนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือ การศึกษาการสังเคราะห์ Au-Ag BNPs ได้แก่ การสังเคราะห์ AuNPs ด้วยวิธีของเทอร์เควิช ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรทที่ใช้ในการสังเคราะห์ AuNPs เท่ากับ 15 mM การปรับปรุงสภาพพื้นผิว AuNPs ด้วย PDADMAC เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ Au-Ag BNPs โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมของ PDADMAC ที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพพื้นผิว คือ 0.1 M การสังเคราะห์ AgNPs โดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชันของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ และใช้ COPSS เป็นสารรักษาเสถียรภาพ ซึ่งความเข้มข้นที่เหมาะสม COPSS ที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพ คือ 5 mM และการสังเคราะห์ Au-Ag BNPs ใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นผิวอนุภาคโดยอาศัยการยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงทางไฟฟ้าระหว่าง AuNPs-PDADMAC ที่มีพื้นผิวเป็นประจุบวก และ AgNPs ที่มีพื้นผิวเป็นประจุลบ ซึ่งสารทั้งหมดที่สังเคราะห์ได้พิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้ UV-vis spectrophotometer ในการศึกษาค่าการดูดกลืนแสง เครื่องวัดศักย์ซีต้าใช้ในการศึกษาประจุบนพื้นผิวของอนุภาค TEM ศึกษาลักษณะและการกระจายตัวของอนุภาค FTIR ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสาร XRD ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และ EDX ในการดองค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในสารที่สังเคราะห์ขึ้น ส่วนที่สอง คือ การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ปรอท ได้แก่ ผลของเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ปรอท ซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปรอท คือ 3 นาที ผลของ pH โดยช่วง pH ที่สามารถทำการวิเคราะห์ปรอทได้ คือช่วง pH 5-8 ผลของเกลือซึ่งเกลือควรมีความเข้มข้นไม่เกิน 0.05 M จึงจะไม่ส่งผลต่อ Au-Ag BNPs และผลของตัวรบกวน จากผลการทดลองตัวรบกวนไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ แสดงว่า Au-Ag BNPs เป็นวิธีที่จำเพาะต่อการวิเคราะห์ปรอท ส่วนที่สาม คือ การศึกษาตัวแปรทางเคมีวิเคราะห์ โดยนำ Au-Ag BNPs ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้เชิงสีในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอท แล้วศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงจากกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด 404 nm กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทในช่วงความเข้มข้น 0.5-80 ppm มีสมการเส้นตรง คือ $y = -0.0057x + 0.8088$ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9818 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดปรอทมีค่าเท่ากับ 0.526 ± 0.001 ppm และส่วนที่สี่ เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของวิธี โดยนำ Au-Ag BNPs มาวิเคราะห์ปรอทในตัวอย่างน้ำ และเทียบผลวิเคราะห์กับวิธี CV-AFS ที่เป็นวิธีมาตรฐาน ซึ่งผลวิเคราะห์ของทั้ง 2 วิธี

ให้ผลไม่แตกต่างกัน ดังนั้นตัวรับรู้เชิงแสงของ Au-Ag BNPs สามารถใช้ในการวิเคราะห์ปรอทได้จริง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการสังเคราะห์อนุภาคของระดับนาโนต้องควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ในช่วง 80 องศาเซลเซียส และไม่ควรเกิน 100 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการตกตะกอนของอนุภาคของระดับนาโนขณะทำการสังเคราะห์
- 2) ในขั้นตอนการปรับปรุงสภาพพื้นผิวอนุภาคของระดับนาโนควรทำการ Sonicate เพื่อให้อนุภาคกระจายตัวออกจากกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันอาหาร กระทรวงอุตสาหกรรม. ปรอท(Mercury). สืบค้นเมื่อวันที่ 22 เมษายน 2561 www.nfi.or.th/food-safety/upload/damage/pdf/mercury2.pdf
- [2] Robson M.de Jesus, Laiana O.B.Silva, Jacira T.Castro, Andre D.de Azevedo Neto,Raildo M. de Jesus, Sergio L. C. Ferreira, **Determination of mercury in phosphate fertilizers by cold vapor atomic absorption spectrometry**, Talanta 106 (2013) 293-297.
- [3] D.Karunasagar, J.Arunachalam, S.Gangadharan, **Development of a 'collect and punch cold vapour inductive coupled plasma mass spectrometric method for the direct determination of mercury at nanograms per liter levels**, J. Anal. Atom. Spectrom. 13 (1998) 679-682.
- [4] A.Moutcin, A. Chtaini, **Electrochemical determination of trace mercury in water sample using EDTA-CPE modified electrode**, Sensing and Bio-Sensing Research 17 (2018) 30-35.
- [5] Pandeewar Makam, Rohilla Shilpa, Ahmad Esmailzadeh Kandjani, Selvakannan R.Periasamy, Ylias Sabri Chilakapati Madhu, Suresh Kumar Bhargava, Thimmaiah **SERS and fluorescence-based ultrasensitive detection of mercury in water**, Biosensors and Bioelectronics 100 (2018) 556-564.
- [6] Khalil Farhadia, Mehrdad Forougha, Rahim Molaeia, Salahaddin Hajizadeha, Aysan Rafipour, **Highly selective Hg²⁺ colorimetric sensor using green synthesized and unmodified silver nanoparticles**, Sensors and Actuators B 161 (2012) 880- 885.
- [7] Shijiang He, Di Li, Changfeng Zhu, Shiping Song, Lihua Wang, Yitao Longb, Chunhai Fan, **Design of a gold nanoprobe for rapid and portable mercury detection with the naked eye**.
- [8] ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ. **อันตรายจากสารปรอทที่ควรทราบ**. สืบค้นเมื่อวันที่ 23 เมษายน 2561 จากเว็บไซต์ <http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/video/itemlist/tag/ปรอท>
- [9] **ปรอท (Mercury:Hg) ประโยชน์ และพิษปรอท**. สืบค้นเมื่อวันที่ 23 เมษายน 2561 จากเว็บไซต์ <http://www.siamchemi.com/ปรอท>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] นพ.วิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์. *Mercury*. สืบค้นเมื่อวันที่ 23 เมษายน 2561 จากเว็บไซต์ http://www.summacheeva.org/index_thaitox_mercury.htm.
- [11] เทคนิคโคลด์เวเพอร์อะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมทรี. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม 2561 จากเว็บไซต์ <http://www.thaiscience.info/Journals/Article/JSMU/10888206.pdf>.
- [12] Taicheng Duan, Xuejie Song, Jingwei Xu, Pengran Guo, Hangting Chen, Hongfei Li, Determination of Hg(II) in waters by on-line preconcentration using Cyanex 923 as a sorbent Cold vapor atomic absorption spectrometry, *Spectrochimica Acta* 61 (2006) 1069–1073.
- [13] Robson M.deJesus, Laiana O.B.Silva, Jacira T.Castro, Andre D.de Azevedo Neto, Raildo M.deJesus, Sergio L. C.Ferreira, Determination of mercury in phosphate fertilizers by cold vapor atomic absorption spectrometry, *Talanta* 106 (2013) 293–297.
- [14] เทคนิคอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปกโตรเมทรี. สืบค้น วันที่ 20 พฤษภาคม 2561 จากเว็บไซต์ <https://www.zeninnovation.co.th/service/analytical-laboratory/chemical-analysis>
- [15] Chia-Yi Tai, Shih-Jen Jiang, A.C. Sahayam, Determination of As, Hg and Pb in herbs using slurry sampling flow injection chemical vapor generation inductively coupled plasma mass spectrometry, *Food Chemistry* 192 (2016) 274–279.
- [16] เทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม 2561 จากเว็บไซต์ https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/218_76-79.pdf.
- [17] Yaser Bahari Mollamahale, Mohammad Ghorbanib, Abolghasem Dolatib, Masoumeh Ghalkhanic, Application of 3D gold nanotube ensembles in electrochemical sensing of ultra-trace Hg (II) in drinkable water, *Surfaces and Interfaces* 10 (2018) 27–31.
- [18] Yuan Liao, Qian Li, Na Wang, Shijun Shao, Development of a new electrochemical sensor for determination of Hg (II) based on Bis (indolyl) methane/Mesoporous carbonnanofiber/ Nafion/ glassy carbon electrode, *Sensors and Actuators B* 215 (2015)592–597.
- [19] Linghao He, Shuai Zhang, Minghua Wang, Donglai Peng, Fufeng Yan, Zhihong Zhang, Liming Zhou, Facile fabrication of zinc phosphate-based nanocomposites for high-performance electrochemical sensing of Hg(II), *Sensors and Actuators B* 228 (2016) 500–508.

- [20] วรวิทย์ จันทรสวรรณ. The Design of Chemosensors for Naked-Eye Detection of Mercury (II) Ion. *KKU Sci. J.* 42(4) 748-760 (2014).
- [21] Sarayut Watchasit, Chomchai Suksai, Rhodamine B-Naphthylthiosemicarbazide Derivative Based Optical Chemosensor for Copper(II) ion. สืบค้นเมื่อวันที่ 23 เมษายน 2561 จาก <http://science.buu.ac.th/ojs246/index.php/sci/article/view/1691/1586>.
- [22] Weitao Gong, Kazuhisa Hiratani, A novel amide pyridinium-based tripodal fluorescent chemosensor for phosphate ion via binding-induced excimer formation, *Tetrahedron Letters* 49 (2008) 5655-5657.
- [23] Xiaomei Chen, Bingyuan Su, Zhixiong Cai, Xi Chen, Munetaka Oyama, PtPd nanodendrites Supported on graphene nanosheets: A peroxidase-like catalyst for colorimetric detection of H₂O₂, *Sensors and Actuators B:Chemical* 201 (2014) 286-292.
- [24] Li Lia, Laiping Zhanga, Tianhong Loub, Zhengbo Chenb, Iodide-responsive Cu@Au nanoparticle-based colorimetric assay for sensitive mercury (II) detection, *Sensors and Actuators B* 252 (2017) 663-670.
- [25] Khalil Farhadi, Highly sensitive and selective colorimetric probe for determination of l-cysteine in aqueous media based on Ag/Pd bimetallic nanoparticles.
- [26] Turkevich, J., Stevenson, P. C. and Hillier, J. (1951). A study of the nucleation and growth processes in the synthesis of colloidal gold. *Discuss. Faraday.* 11: 55-75
- [27] Chang, S. S., Shih, C. W., Chen, C. D., Lai, W. C. And Wang, C. R. C.. The shape transition of gold nanorods, *Langmuir* 15: 701-709.
- [28] Toernblom, M. and Henriksson, U. (1997). Effect of solubilization of aliphatic hydrocarbons on size and shape of rodlike C16TABr micelles studied by 2H-NMR relaxation *J. Phys Chem. B.* 101:60 28-6035.
- [29] Lan QU, Chao Biant, Jizhou Sun, Zhenxing Ren, Jinghong Han, Shanhong Xia, Electrochemical Synthesis of Gold Nanoparticles in Polypyrrole for Antibody Immobilization
- [30] Chien-Jung Huang, Pin-Hsiang Chiu, Yeong-Her Wang, Wen Ray Chen, Teen Hang Mee, The Electrochemical Society Synthesis of the Gold Nanocubes by Electrochemical Technique, *Journal of The Electrochemical Society*, 153 (2006) 129-133.

- [31] Chang, S. S., Shih, C. W., Chen, C. D., Lai, W. C. And Wang, C. R. C. The shape transition of gold nanorods Langmuir 15: 701-709.
- [32] El-Sayed, Preparation and Growth Mechanism of Gold Nanorods (NRs) Using Seed-Mediated Growth Method, Chem. Mater. 15 (2003) 1957-1962.
- [33] Chaoyu Li, Fengru Fan, Bingsheng Yin, Liang Chen, Tapan Ganguly, Zhongqun Tian, A novel precursor for seed-mediated growth of gold nanoparticles in aqueous solution, Nano Research 6 (2013) 29-37.
- [34] Julie A. Jenkins, Terianna J. Wax, Jing Zhao, Seed-Mediated Synthesis of Gold Nanoparticles of Controlled Sizes to Demonstrate the Impact of Size on Optical Properties, Chem. Educ. 94 (2017) 1090-1093.
- [35] Anish Philip, Bright Ankudze, Tuula T. Pakkanen, Polyethylenimine-assisted seed-mediated synthesis of gold nanoparticles for surface-enhanced Raman scattering studies, Applied Surface Science 444 (2018) 243-252.
- [36] Hou- An Dong, Shi- Ping Zhou, Photochemical synthesis of colloidal gold nanoparticles, Materials Science and Engineering B 140 (2007) 153-159.
- [37] Kim, F., Song, J. H. and Yang, P. D. (2002). Photochemical synthesis of gold nanorods. J. Am. Chem. Soc. 124: 14316-14367.
- [38] Wei-Chieh Huang, Yu-Chie Chen, Photochemical synthesis of polygonal gold nanoparticles, J Nanopart Res (2008) 10:697-702.
- [39] Averitt, R. D., Westcott, S. L. and Halas, N. J. (1999). The linear optical properties of gold nanoshells. J. Opt. Soc. Am. B. 16: 1824-1832.
- [40] Xiaoqin Li, Jinru Li, Long Jiang, A silica-gold core-shell structure to mimic the large size of gold particles for promoting cell growth: A comparative study of the silica core size and the nanogold amount in the shell, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 459 (2014) 211-216.
- [41] Limin Yang, Shufeng Liu, Qixiu Zhang, Feng Li, Simultaneous electrochemical determination of dopamine and ascorbic acid using AuNPs@polyaniline core-shell nanocomposites modified electrode, Talanta 89 (2012) 136- 141.

- [42] Mehrez E. El-Naggara, Tharwat I. Shaheena, Moustafa M.G. Foudaa,b, Ali A. Hebeishaa, Eco-friendly microwave-assisted green and rapid synthesis of well-stabilized gold and core-shell silver-gold nanoparticles, *Carbohydrate Polymers* 136 (2016) 1128–1136.
- [43] M.A. Valverde-Alva, T. García-Fernández, M. Villagrán-Muniz, C. Sánchez-Aké, R. Castaneda-Guzmán, Esparza-Alegria, C.F. Sánchez-Valdés, J.L. Sánchez Llamazares, C.E. Márquez Herrera, Synthesis of silver nanoparticles by laser ablation in ethanol: A pulsed photoacoustic study. *Applied Surface Science* 355 (2015) 341–349.
- [44] Xihui Zhao, Yanzhi Xia, Qun Li, Xiaomei Ma, Fengyu Quan, Cunzhen Geng, Zhenyu Hana, Microwave assisted synthesis of silver nanoparticles using sodium alginate and their antibacterial activity. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 444 (2014) 180–188.
- [45] Purim Jarujamrus, Maliwan Amatatongchai, Araya Thima, Thatsanee Khongrangdee, Chakrit Mongkontong, Select colorimetric sensors based on the monitoring of an unmodified silver nanoparticles (AgNPs) reduction for a simple and rapid determination of mercury, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 142 (2015) 86–93.
- [46] Zielinska, A., Skwarek, E., Zaleska, A., Gazda, M., and Hupka, J., Preparation of silver nanoparticles with controlled particle size. *Procedia Chemistry* 1 (2009) 1560-1566.
- [47] Amritpal Kaur, Divya Goyal, Rajesh Kumar, Surfactant mediated interaction of vancomycin with silver nanoparticles. *Applied Surface Science* 449 (2018) 23–30.
- [48] E.A. Terenteva, V.V. Apyari, S.G. Dmitrienko, A.V. Garshev, P.A. Volkov, Yu.A. Zolotov, Determination of pyrophosphate and sulfate using polyhexamethylene guanidine hydrochloride-stabilized silver nanoparticles. *Talanta* 180 (2018) 346–351.
- [49] Emma K. Fauss, Robert I. MacCusprie, Vinka Oyanedel-Craver, James A. Smith, Nathan S. Swami, Disinfection action of electrostatic versus steric stabilized silver nanoparticles on *E. coli* under different water chemistries. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 113 (2014) 77– 84.
- [50] วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 เมษายน 2561 จากชื่อเว็บไซต์ file:///C:/Users/Pcomputer/Downloads/Fulltext%239_281560.pdf.

- [51] Subba Rao, Y., Kotakadi, V. S., Prasad, T. N. V. K. V., Reddy, A. V., and Sai Gopal, D. V. R., Green synthesis and spectral Characterization of silver nanoparticles from Lakshmi tulasi (*Ocimum sanctum*) leaf extract. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 103 (2013) 156-159.
- [52] Ping Yao, Jun Zhang, Tieling Xing, Guoqiang Chen, Ran Tao, Kwang-Ho Choo, Green synthesis of silver nanoparticles using grape seed extract and their application for reductive catalysis of Direct Orange 26. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 58 (2018) 74–79.
- [53] Nano Tec. UV/VIS Spectroscopy. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 เมษายน 2561 จากชื่อเว็บไซต์ https://www2.nanotec.or.th/th/?page_id=575.
- [54] ส่วนประกอบของเครื่อง UV-vis spectrophotometer. สืบค้นเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม 2561 เว็บไซต์ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_of_UV_visible_spectrophotometer.png.
- [55] หัสวิภา หมายมั่น. Zetasizer Nano ZS90. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 เมษายน 2561 จากชื่อเว็บไซต์ <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/78-zetasizer-nano-zs90.html>.
- [56] มหาวิทยาลัยขอนแก่น. แนะนำกล้องจุลทรรศน์. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 เมษายน 2561 จากเว็บไซต์ http://mdresearch.kku.ac.th/files/news/filesnews/RIC_SEP_2014.pdf.
- [57] ดารณี ปัดดา. FTIR-Raman Spectrometer. สืบค้นเมื่อวันที่ 11 เมษายน 2561 จากเว็บไซต์ <http://web2mfu.ac.th/center/stic/spectroscopy-chem-analysis-instrument/item/139-ftir-raman-spectrometer.html>.
- [58] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. X-Ray Diffractometer. https://www.slri.or.th/bdd/th/?option=com_content&view=article&id=71:x-ray-diffractometer-xrd&catid=22
- [59] Kun Tian, Gene Siegel, Ashutosh Tiwari, A simple and selective colorimetric mercury (II) sensing system based on chitosan stabilized gold nanoparticles and 2,6-pyridinedicarboxylic acid, *Materials Science and Engineering C* 71 (2017) 195–199.
- [60] Tesfaye Tolessaa,b, Zhi-Qiang Tana, Yong-Guang Yina, Jing-Fu Liua,b, Single-drop gold nanoparticles for Headspace microextraction and colorimetric assay of mercury (II) in environmental waters, *Talanta* 176 (2018) 77–84.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [61] Zhengbo Chen, Tianhong Lou, Qian Wu, Kai Li, Lulu Tan, Jingyan Sun, **A facile label-free colorimetric sensor for Hg²⁺ based on Hg-triangular silver nanoplates with amalgam-like structure**, *Sensors and Actuators B* 221 (2015) 365–369.
- [62] Yi-Wei Wang, Lixing Wang, Fengping An, Hui Xu, Zejin Yin, Shurong Tang, Huang-Hao Yang, Hongbo Song, **Graphitic carbon nitride supported platinum nanocomposites for rapid and sensitive colorimetric detection of mercury ions**, *Analytica Chimica Acta* 980 (2017) 72e78.
- [63] Cheol Gyu Lee, Seungyoon Kang, Jinyoung Oh, Min Sik Eom, Jusung Oh, Min-Gon Kim, Woon Seob Lee, Sukwon Hong, Min Su Han, **A colorimetric and fluorescent chemosensor for detection of Hg²⁺ using counterion exchange of cationic polydiacetylene**, *Tetrahedron Letters* 58 (2017) 4340–4343.
- [64] Hee Jung Kim, Ji Eun Park, Myung Gil Choi, Sangdoo Ahn, Suk-Kyu Chang, **Selective chromogenic and fluorigenic signalling of Hg²⁺ ions using a fluorescein-coumarin conjugate**, *Dyes and Pigments* 84 (2010) 54–58.
- [65] Jian Zhu, Bing-zheng Zhao, Ying Qi, Jian-Jun Li, Xin Li, Jun-Wu Zhao, **Colorimetric determination of Hg (II) by combining the etching and aggregation effect of cysteine-modified Au-Ag core-shell nanorod**, *Sensors and Actuators B* 255 (2018) 2927–2935.
- [66] Li Lia, Laiping Zhang, Tianhong Lou, Zhengbo Chen, **Iodide-responsive Cu@Au nanoparticle based colorimetric assay for sensitive mercury (II) detection**, *Sensors and Actuators B* 252 (2017) 663–670.
- [67] Isaac Ojea-Jiménez, Francisco M. Romero, Neus G. Bastús, Victor Puntes, **Supporting Information: Small gold nanoparticles synthesized with sodium citrate and heavy water: Insights into the reaction mechanism**
- [68] Stephan Link and Mostafa A. El-Sayed, **Size and Temperature Dependence of the Plasmon Absorption of Colloidal Gold Nanoparticles**, Atlanta, Georgia 30332-0400 *J. Phys. Chem. B* 1999, 103, 4212-4217.
- [69] Yu Pan, Sabine Neuss, Annika Leifert, Monika Fischler, Fei Wen, Ulrich Simon, Gnter Schmid, Wolfgang Brandau and Willi Jahnen-Dechent, **Size-Dependent Cytotoxicity of Gold Nanoparticles**, *Nanoparticle toxicity* DOI: 10.1002/sml.200700378

- [70] Vo Ke Thanh Ngo, Preparation of gold nanoparticles by microwave heating and application of spectroscopy to study conjugate of gold nanoparticles with antibody E. coli O157:H7, *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* 6 (2015) 035015 (6pp).
- [71] Natallia Shalkevich, Andrey Shalkevich, Lynda Si-Ahmedc, Thomas Bu, Reversible formation of gold Nanoparticle surfactant composite assemblies for the preparation of concentrated colloidal solutions, *Physical Chemistry Chemical Physics*.
- [72] Xiaolong Ding, Synthesis of polyhedral Ag nanostructures by a PVP-assisted hydrothermal, *J Nanopart Res* (2012) 14:1000 DOI 10.1007/s11051-012-1000-8.
- [73] Snigdhamayee Praharaj, Sudip Nath, Sudipa Panigrahi, Sujit Kumar Ghosh, Soumen Basu, Surojit Pande, Su bhra Jana, and Tarasankar Pal, Layer-by-Layer Deposition of Bimetallic Nanoshells on Functionalized Polystyrene Beads, *Inorg. Chem.* 2006,45, 1439–1441.
- [74] Yingju Fan, Zhen Liu, L. e. Wang, Jinhua Zhan, Synthesis of Starch-Stabilized Ag Nanoparticles and Hg²⁺ Recognition in Aqueous Media.
- [75] Andrew N. Shipway, Michal Lahav, Rachel Gabai, Itamar Willner, Investigations into the Electrostatically Induce Aggregation of Au Nanoparticles, *Langmuir* 16 (2000) 8789-8795.
- [76] K. Wagers, T.Chui, Effect of pH on the Stability of Gold Nanoparticles and Their Application for melamine Detection in Infant Formula, *IOSR Journal of Applied Chemistry* 7 (2014) 15-20.
- [77] Katalin Halasz, George Grozdits†, Levente Csóka, 10-Functional nanostructured coatings via layer-by-layer self-assembly, *Anti-Abrasive Nanocoatings* (2015) 249–281.
- [78] Manjunath Chatti, Shyam Sarkar, Venkataramanan Mahalingam, Glutathione modified ultrasmall Ce³⁺ and Tb nanocrystals for fluorescent determination of Hg(II) and Pb (II) ions, *Microchim Acta* (2016) 133–140.
- [79] Dechao Shi, Fanyong Yan, Meng Wang, Yu Zou, Tancheng Zheng, Xuguang Zhou, Li Chen, Rhodamine derivative functionalized chitosan as efficient sensor and Adsorbent for mercury(II) detection and removal, *Materials Research Bulletin* 70 (2015) 958–964.

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารละลาย

เตรียมสารละลายเตตระคลอโรออร์เทไทรไฮเดรต ($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 1.0 mM

$$\frac{g}{Mw} = \frac{CV}{1000}$$

$$\frac{g}{393.83 \text{ g/mol}} = \frac{(1 \times 10^{-3} \text{ M})(250 \text{ ml})}{1000}$$

$$g = 0.0985 \text{ g}$$

ดังนั้น ชั่งน้ำหนักของไฮโดรเจนเตตระคลอโรออร์เทไทรไฮเดรต 0.0985 กรัม ละลายและปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water) จะได้สารละลายไฮโดรเจนเตตระคลอโรออร์เทไทรไฮเดรตความเข้มข้น 1.0 mM ปริมาตร 250 mL

เตรียมสารละลายไตรโซเดียมซีเตรตความเข้มข้น 10 15 และ 20 mM

ที่ความเข้มข้น 10 mM

$$\frac{g}{Mw} = \frac{CV}{1000}$$

$$\frac{g}{294.10 \text{ g/mol}} = \frac{(10 \times 10^{-3} \text{ M})(100 \text{ ml})}{1000}$$

$$g = 0.2941 \text{ g}$$

ที่ความเข้มข้น 15 mM

$$\frac{g}{Mw} = \frac{CV}{1000}$$

$$\frac{g}{294.10 \text{ g/mol}} = \frac{(15 \times 10^{-3} \text{ M})(100 \text{ ml})}{1000}$$

$$g = 0.4412 \text{ g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความเข้มข้น 20 mM

$$\frac{g}{Mw} = \frac{CV}{1000}$$

$$\frac{g}{294.10 \text{ g/mol}} = \frac{(20 \times 10^{-3} \text{ M})(100 \text{ mL})}{1000}$$

$$g = 0.5882 \text{ g}$$

ดังนั้น ชั่งน้ำหนักของไตรโซเดียมซิติเตรท 0.2941 0.4412 และ 0.5882 g ตามลำดับ ละลาย และปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 100 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สายละลายโซเดียมซิติเตรทความเข้มข้น 10 15 และ 20 mM ปริมาตร 100 mL

เตรียมสารละลายโพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) ความเข้มข้น 1.0 M

ที่ความเข้มข้น 1.0 M

$$C = \frac{\%10d}{Mw}$$

$$C = \frac{(20)(10)(1.04)}{161.5}$$

$$C = 1.287 \text{ M}$$

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(1.287\text{M})(V_1) = (1\text{M})(25 \text{ mL})$$

$$V_1 = 19.43 \text{ mL}$$

ดังนั้น ปริมาณสารละลายโพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ปริมาตร 19.43 mL จากนั้น ละลายและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 100 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายความเข้มข้น 1.0 M ปริมาตร 100 mL

เตรียมสารละลายโพสไลต์แอลลิลไคเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) ความเข้มข้น 0.00001 0.0001 0.001 0.005 0.01 0.02 0.1 0.2 และ 0.3 M

$$\text{จากสูตร } C_1V_1 = C_2V_2$$

$$\text{ที่ความเข้มข้น 0.3 M} \quad (1.0\text{M})(V_1) = (0.3\text{M})(50\text{ml})$$

$$V_1 = 15 \text{ ml}$$

$$\text{ที่ความเข้มข้น 0.2 M} \quad (0.3\text{M})(V_1) = (0.2\text{M})(50\text{ml})$$

$$V_1 = 33.33 \text{ ml}$$

$$\text{ที่ความเข้มข้น 0.1 M} \quad (0.2\text{M})(V_1) = (0.1\text{M})(50\text{ml})$$

$$V_1 = 25 \text{ ml}$$

$$\text{ที่ความเข้มข้น 0.02 M} \quad (0.1\text{M})(V_1) = (0.02\text{M})(50\text{ml})$$

$$V_1 = 10 \text{ ml}$$

$$\text{ที่ความเข้มข้น 0.01 M} \quad (0.02\text{M})(V_1) = (0.01\text{M})(50\text{ml})$$

$$V_1 = 25 \text{ ml}$$

$$\text{ที่ความเข้มข้น 0.005 M} \quad (0.01\text{M})(V_1) = (0.005\text{M})(50\text{ml})$$

$$V_1 = 25 \text{ ml}$$

$$\text{ที่ความเข้มข้น 0.001 M} \quad (0.005\text{M})(V_1) = (0.001\text{M})(50\text{ml})$$

$$V_1 = 10 \text{ ml}$$

$$\text{ที่ความเข้มข้น 0.0001 M} \quad (0.001\text{M})(V_1) = (0.0001\text{M})(50\text{ml})$$

$$V_1 = 5 \text{ ml}$$

$$\text{ที่ความเข้มข้น 0.00001 M} \quad (0.0001\text{M})(V_1) = (0.00001\text{M})(50\text{ml})$$

$$V_1 = 5 \text{ ml}$$

ดังนั้น ปิเปตสารละลายโพสไลต์แอลลิลไคเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ปริมาตร 0.0005 0.005 0.05 0.25 0.5 1 5 10 และ 15 mL จากนั้นละลายและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 50 mL ด้วย น้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลาย PDADMAC ความเข้มข้น 0.00001 0.0001 0.001 0.005 0.01 0.02 0.1 0.2 และ 0.3 M ปริมาตร 50 mL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ความเข้มข้น 100 มิลลิโลาร์

$$\frac{g}{Mw} = \frac{CV}{1000}$$

$$\frac{g}{169.87 \text{ g/mol}} = \frac{(100 \times 10^{-3} \text{ M})(100 \text{ ml})}{1000}$$

$$g = 1.6987 \text{ g}$$

ดังนั้น ชั่งน้ำหนักของซิลเวอร์ไนเตรต 1.6987 g ละลายและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 100 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สายละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 100 mL

เตรียมสารละลายโพตัสไดโครเมตโพแทสเซียมไดออกไซด์โคบอลต์ไดออกไซด์ (COPSS) ความเข้มข้น 100 mM

$$\frac{g}{Mw} = \frac{CV}{1000}$$

$$\frac{g}{365.50 \text{ g/mol}} = \frac{(100 \times 10^{-3} \text{ M})(100 \text{ ml})}{1000}$$

$$g = 3.655 \text{ g}$$

ดังนั้น ชั่งน้ำหนักของ COPSS 3.655 g ละลายและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 100 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สายละลาย COPSS ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 100 mL

เตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) ความเข้มข้น 50 mM

$$\frac{g}{Mw} = \frac{CV}{1000}$$

$$\frac{g}{37.83 \text{ g/mol}} = \frac{(50 \times 10^{-3} \text{ M})(100 \text{ ml})}{1000}$$

$$g = 1.8915 \text{ g}$$

ดังนั้น ชั่งน้ำหนักของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 1.8915 กรัม ละลายและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 250 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สายละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 50 mM ปริมาตร 250 mL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 100 ppm

$$100 \text{ ppm} = 100 \text{ mg/L} = 0.1 \text{ g/L}$$

$$1000 \text{ mL} = 0.1 \text{ g}$$

$$100 \text{ mL} = 0.01 \text{ g}$$

ดังนั้น ชั่งน้ำหนักของเมอร์คิวรีคลอไรด์ 0.01 g จากนั้นละลายและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 100 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สายละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 100 mL

การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 0.5 1 5 10 20 30 40 50 60 70 และ 80 ppm

จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

ที่ความเข้มข้น 80 ppm $(100 \text{ ppm})(V_1) = (80 \text{ ppm})(50 \text{ mL})$

$$V_1 = 40 \text{ mL}$$

ที่ความเข้มข้น 70 ppm $(80 \text{ ppm})(V_1) = (70 \text{ ppm})(50 \text{ mL})$

$$V_1 = 43.75 \text{ mL}$$

ที่ความเข้มข้น 60 ppm $(70 \text{ ppm})(V_1) = (60 \text{ ppm})(50 \text{ mL})$

$$V_1 = 42.85 \text{ mL}$$

ที่ความเข้มข้น 50 ppm $(60 \text{ ppm})(V_1) = (50 \text{ ppm})(50 \text{ mL})$

$$V_1 = 41.67 \text{ mL}$$

ที่ความเข้มข้น 40 ppm $(50 \text{ ppm})(V_1) = (40 \text{ ppm})(50 \text{ mL})$

$$V_1 = 40 \text{ mL}$$

ที่ความเข้มข้น 30 ppm $(40 \text{ ppm})(V_1) = (30 \text{ ppm})(50 \text{ mL})$

$$V_1 = 37.5 \text{ mL}$$

ที่ความเข้มข้น 20 ppm $(30 \text{ mg/L})(V_1) = (20 \text{ mg/L})(50 \text{ mL})$

$$V_1 = 33.33 \text{ mL}$$

ที่ความเข้มข้น 10 ppm $(20 \text{ ppm})(V_1) = (10 \text{ ppm})(50 \text{ mL})$

$$V_1 = 25 \text{ mL}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ที่ความเข้มข้น 5 ppm} \quad (10 \text{ ppm})(V_1) = (5 \text{ ppm})(50 \text{ ml})$$

$$V_1 = 25 \text{ ml}$$

$$\text{ที่ความเข้มข้น 1 ppm} \quad (5 \text{ ppm})(V_1) = (1 \text{ ppm})(50 \text{ ml})$$

$$V_1 = 10 \text{ ml}$$

$$\text{ที่ความเข้มข้น 0.5 ppm} \quad (1 \text{ ppm})(V_1) = (0.5 \text{ ppm})(50 \text{ ml})$$

$$V_1 = 25 \text{ ml}$$

ดังนั้น ปิเปตสารละลายปริมาตร 0.25 0.5 2.5 5 10 15 20 25 30 35 และ 40 mL จากนั้นละลายและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 0.5 1 5 10 20 30 40 50 60 70 และ 80 ppm ปริมาตร 50 mL

การเตรียม Stock สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และ ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์

เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

$$\frac{\text{g}}{\text{Mw}} = \frac{\text{CV}}{1000}$$

$$\frac{\text{g}}{58.40 \text{ g/mol}} = \frac{(1 \text{ M})(25 \text{ mL})}{1000}$$

$$\text{g} = 1.4600 \text{ g}$$

เตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

$$\frac{\text{g}}{\text{Mw}} = \frac{\text{CV}}{1000}$$

$$\frac{\text{g}}{142.04 \text{ g/mol}} = \frac{(1 \text{ M})(25 \text{ mL})}{1000}$$

$$\text{g} = 3.5510 \text{ g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4)

$$\frac{g}{Mw} = \frac{CV}{1000}$$

$$\frac{g}{163.94 \text{ g/mol}} = \frac{(1 \text{ M})(25 \text{ mL})}{1000}$$

$$g = 4.0985 \text{ g}$$

การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และ ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 และ 0.9 M จาก Stock 1.0 M

จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

ที่ความเข้มข้น 0.9 M $(1.0\text{M})(V_1) = (0.9\text{M})(25\text{ml})$

$$V_1 = 22.50 \text{ ml}$$

ที่ความเข้มข้น 0.8 M $(0.9\text{M})(V_1) = (0.8\text{M})(25\text{ml})$

$$V_1 = 22.22 \text{ ml}$$

ที่ความเข้มข้น 0.7 M $(0.8\text{M})(V_1) = (0.7\text{M})(25\text{ml})$

$$V_1 = 21.87 \text{ ml}$$

ที่ความเข้มข้น 0.6 M $(0.7\text{M})(V_1) = (0.6\text{M})(25\text{ml})$

$$V_1 = 21.42 \text{ ml}$$

ที่ความเข้มข้น 0.5 M $(0.6\text{M})(V_1) = (0.5\text{M})(25\text{ml})$

$$V_1 = 20.83 \text{ ml}$$

ที่ความเข้มข้น 0.4 M $(0.5\text{M})(V_1) = (0.4\text{M})(25\text{ml})$

$$V_1 = 20.00 \text{ ml}$$

ที่ความเข้มข้น 0.3 M $(0.4\text{M})(V_1) = (0.3\text{M})(25\text{ml})$

$$V_1 = 18.75 \text{ ml}$$

ที่ความเข้มข้น 0.2 M $(0.3\text{M})(V_1) = (0.2\text{M})(25\text{ml})$

$$V_1 = 16.67 \text{ ml}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ที่ความเข้มข้น } 0.1 \text{ M} \quad (0.2\text{M})(V_1) = (0.1\text{M})(25\text{ml})$$

$$V_1 = 12.5 \text{ ml}$$

ดังนั้น ปิเปตสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) และ ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na₃PO₄) ปริมาตร 22.5 22.22 21.87 21.42 20.83 20.00 18.75 16.67 และ 12.5 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ในขวดปรับปริมาตร 25 จะได้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) และไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na₃PO₄) ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 และ 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 25 mL



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

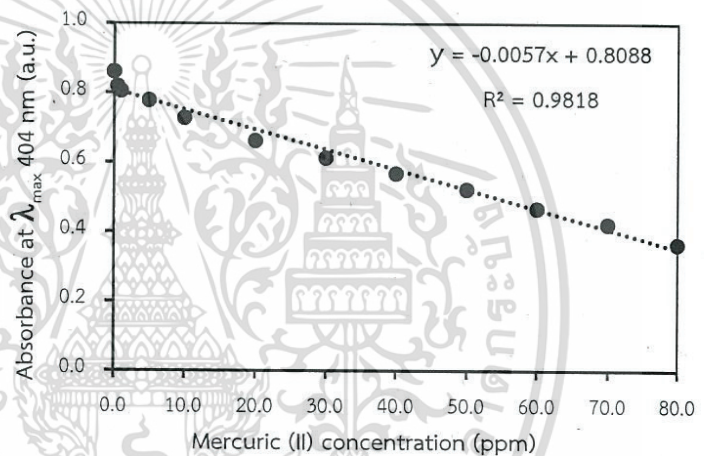
ภาคผนวก ข

การคำนวณหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดปรอท (LOD) และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ปรอท (LOQ)

ทำการศึกษาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดและขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินที่เป็นตัวรับรู้เชิงสีในการวิเคราะห์ปรอท ซึ่งมีสมการเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การตัดล้นใจเท่ากับ $y = -0.0057x + 0.8088$ $R^2=0.9818$

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงินที่ความยาวคลื่น 404 nm

No.	Absorbance at λ_{\max} 404 nm (a.u.)
1	0.8604
2	0.8617
3	0.8635
4	0.8623
5	0.8598
6	0.863
7	0.8616
8	0.8625
9	0.8619
10	0.8595
Average	0.8616
S.D.	0.001



$$\text{LOD} = \frac{3 \text{ S.D. of Blank}}{\text{Slope of calibration curve}}$$

$$= \frac{3 \times 0.001}{0.0057}$$

$$= 0.526 \text{ ppm}$$

$$\text{LOQ} = \frac{10 \text{ S.D. of Blank}}{\text{Slope of calibration curve}}$$

$$= \frac{10 \times 0.001}{0.0057}$$

$$= 1.754 \text{ ppm}$$

ดังนั้นขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดและขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ มีค่า = 0.526 และ 1.754 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าร้อยละการคืนกลับ (%Recovery) และความเที่ยง (%RSD)

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าการตรวจวัดปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆด้วยอนุภาคนาโนโลหะผสมทองและเงิน เพื่อนำมาคำนวณหาค่าร้อยละการคืนกลับและความเที่ยง

Standard (ppm)	Found value (ppm)	%Recovery	%RSD
5	4.97 ± 0.08	99.35	1.59
25	25.02 ± 0.10	100.06	0.39
50	49.58 ± 0.71	99.17	1.43
75	75.03 ± 0.07	100.04	0.09

ตัวอย่างการคำนวณ : สารละลายมาตรฐานของปรอทที่ความเข้มข้น 5 ppm

$$\begin{aligned} \% \text{Recovery} &= \frac{\text{Spiked sample} - \text{Sample}}{\text{Standard}} \times 100 \\ &= \frac{4.97 - 0}{5} \times 100 \\ &= 99.35 \% \\ \% \text{RSD} &= \frac{\text{S.D.}}{\bar{x}} \times 100 \\ &= \frac{0.08}{4.97} \times 100 \\ &= 1.59 \% \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าร้อยละการคืนกลับ (%Recovery) ของสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 5 25 50 และ 75 มีค่าเท่ากับ 99.35 100.06 99.17 และ 100.04 % ส่วนค่าความเที่ยง (%RSD) ของสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 5 25 50 และ 75 มีค่าเท่ากับ 1.59 0.39 1.43 และ 0.09 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าร้อยละการคืนกลับ และค่าความเที่ยงของการตรวจวัดปรอทในตัวอย่างน้ำ 1 และ 2 ตารางที่ ข.3 แสดงค่าการตรวจวัดปรอทในตัวอย่างน้ำ 1 และ 2 เพื่อคำนวณหาค่าร้อยละการคืนกลับ และค่าความแม่นยำ

	Concentration of mercury (II) (ppm)			%Recovery	%RSD
	Detected	Added	Found		
Sample1	29.3	5	34.16 ± 0.78	98.01	2.29
		15	44.18 ± 0.70	99.45	1.58
Sample2	58.2	5	63.32 ± 1.29	101.72	2.04
		15	73.13 ± 0.80	99.32	1.10

ตัวอย่างการคำนวณ : %Recovery และ %RSD ของปรอทในตัวอย่างน้ำ 1 ที่ทำการ Spike ปรอท ความเข้มข้น 5 ppm ลงไป

$$\begin{aligned}
 \% \text{Recovery} &= \frac{\text{Spiked sample} - \text{Sample}}{\text{Standard}} \times 100 \\
 &= \frac{34.16 - 29.3}{5} \times 100 \\
 &= 98.01 \% \\
 \% \text{RSD} &= \frac{\text{S.D.}}{\bar{x}} \times 100 \\
 &= \frac{0.78}{34.16} \times 100 \\
 &= 2.29 \%
 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าร้อยละการคืนกลับของสารตัวอย่าง 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 98.01 99.45 101.72 และ 99.32 ส่วนค่าความเที่ยงของสารตัวอย่าง 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 2.2 2.3 2.0 และ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าร้อยละการคืนกลับ และ ค่าความเที่ยงของวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ปรอท

ตารางที่ ข.4 แสดงค่าการเปรียบเทียบวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ปรอท

Method	Concentration of mercury (II) (ppm)			%Recovery	%RSD
	Deteced	Add	Found		
Au-Ag BNP's colorimetric sensor	29.30	15	44.18 ± 0.70	99.45	1.58
Cold vapor atomic fluorescence spectrometry	29.99	15	45.00 ± 0.03	100.04	0.06

ตัวอย่างการคำนวณ : %Recovery และ %RSD ของตัวอย่างที่1 ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น (Au-Ag BNP's colorimetric sensor)

$$\begin{aligned} \text{\%Recovery} &= \frac{\text{Spiked sample}-\text{Sample}}{\text{Standard}} \times 100 \\ &= \frac{44.18-29.3}{15} \times 100 \\ &= 99.45 \% \\ \text{\%RSD} &= \frac{\text{S.D.}}{\bar{x}} \times 100 \\ &= \frac{0.70}{44.18} \times 100 \\ &= 1.58 \% \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าร้อยละการคืนกลับของวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 99.45 และ 100.04 ส่วนค่าความเที่ยงของทั้ง 2 วิธี มีค่าเท่ากับ 1.58 และ 0.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาความต่างของวิธีที่พัฒนาขึ้นเทียบกับวิธีมาตรฐานโดยใช้ Paired t-Test

ตารางที่ ข.5 แสดงค่าการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน

Sample	Colorimetric sensor	CV-AFS	ค่าแตกต่าง (d)
1	43.86	44.97	1.11
2	44.98	45.02	0.04
3	43.07	45.00	1.30
Mean (\bar{d})			0.82
SD			0.68

ซึ่ง ค่า t_{cal} หาได้จากสมการ

$$t_{cal} = \frac{\bar{d}}{S.D. / \sqrt{n}}$$

$$t_{cal} = \frac{0.82}{0.63 / \sqrt{3}}$$

$$t_{cal} = 2.08$$

จากระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และที่ degree of freedom ($n-1$) = 2 จะได้ค่า $t_{critical} = 2.920$

จะเห็นว่า $t_{cal} < t_{critical}$ ดังนั้นผลวิเคราะห์ทั้งสองวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

สรุปการใช้จ่ายงบวิจัย

โครงการวิจัย เรื่องการตอบสนองต่อแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนที่ฝังบนอนุภาคทองในระดับนาโนสำหรับตรวจวัดปรอท

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย		รายการรับ ดอกเบี้ย รับ	รายการจ่าย			รวม รายการจ่าย
			รับ	จ่าย		คงเหลือ	งบบุคลากร	ค่าจ้าง ชั่วคราว	
	งบประมาณที่ได้รับการอนุมัติ (ตามแผน)		250000		0				
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 1 = 85%)		212500						
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 2 = 15%)		37500						
	หัก ค่าใช้จ่าย			250000			62400	40442	147158
	งบประมาณคงเหลือ				0				
	รายละเอียดค่าใช้จ่าย								
	ค่าจ้างชั่วคราว	ธ.ค.-60					15600		15600
	ค่าจ้างชั่วคราว	ม.ค.-61					15600		15600
	ค่าจ้างชั่วคราว	ก.พ.-61					15600		15600
	ค่าจ้างชั่วคราว	มี.ค.-61					15600		15600

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายการรับ ดอกเบี้ย รับ	รายการจ่าย			รวม รายการจ่าย	
			รับ	จ่าย	คงเหลือ		งบบุคลากร	ค่าจ้าง ชั่วคราว	ค่าใช้จ่าย สอย		ค่าวัสดุ
	ค่าจ้างวิเคราะห์	3753-47						10800		10800	
	ค่าจ้างวิเคราะห์	PPCSDWI-06- 203/001.5						7350		7350	
	ค่าจ้างวิเคราะห์	50414/61						7000		7000	
	ค่าจ้างวิเคราะห์	เล่มที่ 125 เลขที่ 32						9850		9850	
	ค่าวัสดุ	IV18-011234							78540	78540	
	ค่าวัสดุ	6101465							12171	12171	
	ค่าวัสดุ	IV18-011235							1245	1245	
	ค่าวัสดุ	027/01333							3890	3890	
	ค่าวัสดุ	003-558627							246	246	
	ค่าวัสดุ	MG180104790							1490	1490	
	ค่าวัสดุ	101-000357							280	280	
	ค่าวัสดุ	11046							283	283	
	ค่าวัสดุ	IV18-110440							513	513	
	ค่าวัสดุ	IV1802735							48500	48500	
	ค่าถ่ายเอกสาร	ไม่ระบุ						442		442	
	ค่าพิมพ์รายงานจัดทำรูปเล่ม	ไม่มี						5000		5000	
	รวม						62400	40442	147158	250000	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้