



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและการ  
สร้างฟิล์มบาง นาโนโพลีอิเล็กโทรไลต์โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นเพื่อ  
เป็นตัวรับรู้สำหรับไอออนของปรอท

**SYNTHESIS OF SILVER TRIANGULAR NANOPRISM AND ITS  
LAYER-BY-LAYER ASSEMBLY INTO POLYELECTROLYTE NANO THIN  
FILM FOR MERCURIC IONS SENSOR**

นายเอกรัฐ เดชศรี

60024582

๒๖๖๖ ๒๖

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและการสร้างฟิล์มบาง นาโนโพลีเอทิลีนไตรโกล์โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นเพื่อเป็นตัวรับรู้อิออนของปรอท

แหล่งเงิน คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558 ถึง 30 กันยายน 2559

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ เดชศรี

ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) มาใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน โดยแผ่นฟิล์มบางหลายชั้นจะถูกสร้างขึ้นจากการทับถมสลับกันระหว่างประจุลบของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและประจุบวกของโพลีไธมอแลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ จากนั้นได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มบางหลายชั้นที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-visible spectrophotometry), เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD), การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope, FESEM) ต่อมาเมื่อแผ่นฟิล์มเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นตัวรับรู้อิออนสำหรับการตรวจวัดไอออนของปรอท การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแสงของแผ่นฟิล์มจะเกิดขึ้นต่างกันไปตามความเข้มข้นของไอออนของปรอทที่แตกต่างกัน โดยสามารถสังเกตได้จากสีของแผ่นฟิล์มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำเงินไปเป็นสีม่วงจนกระทั่งใสไม่มีสี ทั้งนี้พบว่าแผ่นฟิล์มบางหลายชั้นที่ถูกสร้างขึ้นนั้นสามารถให้การเปลี่ยนแปลงสีได้อย่างดีเยี่ยมเนื่องจากการตอบสนองอย่างรวดเร็วกับไอออนของปรอท มีช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้างระหว่าง 0.5 - 20 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งมีสมการถดถอย คือ  $y = -0.0132x + 0.2849$  และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.9963 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (3SD/slope) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (10SD/slope) มีค่าเท่ากับ  $0.45 \pm 0.002$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แลก็ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิลิตรต่อลิตร และ  $1.52 \pm 0.002$  มิลลิลิตรต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อนำแผ่นฟิล์มบางหลายชั้นของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์หาไอออนของปรอทในตัวอย่างน้ำ พบว่าค่าร้อยละของการคืนกลับอยู่ในช่วง 100.1 - 106.4

**คำสำคัญ :** เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น ปรอท ฟิล์มบางขนาดนาโน อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title:** A COLORIMETRIC APPROACH FOR MEASURING DOPAMINE WITH ULTRA HIGH SELECTIVITY USING LABEL-FREE GOLD NANOPARTICLES

**Researcher:** Ekarat Detsri

**Faculty:** Science    **Department:** Chemistry

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

In this work, the Layer-by-Layer deposition technique was used to prepare nano thin-films of silver triangular nanoprisms. The multilayers thin films were constructed by alternate deposition of anionic silver triangular nanoprisms and cationic poly(diallyldimethylammonium chloride), PDADMAC. The characteristics of the multilayers thin films were investigated using UV-visible spectroscopy, XRD, AFM and FESEM. As these films are to be used as sensor for the mercuric ions detection, the changes in optical properties of the films were evaluated for various mercuric ions concentration. A strong color shift from blue to violet and colorless was visible when exposed to mercuric ions concentration. The constructed multilayers thin films exhibited excellent color changes of mercuric ions with a quick response time, a wide linear range between 0.5 - 20 ppm with a regression equation of  $y = -0.0132x + 0.2849$  and a correlation coefficient ( $r^2$ ) of 0.9963. The LOD (3SD/slope) and LOQ (10SD/slope) were  $0.45 \pm 0.002$  ppm and  $1.52 \pm 0.002$  ppm, respectively. The silver triangular nanoprisms multilayers thin films was satisfactorily applied for determine of mercuric ions in wastewater samples to obtain the %recovery in the range of 100.1 - 106.4%.

**Keywords :** Layer-by-Layer technique, Mercuric, Nano-thin films, Silver triangular nanoprisms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน ทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภท เงินอุดหนุนทั่วไป/เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

นายเอกรัฐ เดชศรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แสง ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology).....	4
2.1.1 ประเภทของนาโนเทคโนโลยี.....	5
2.1.1.1 วัสดุนาโน (Nanomaterial).....	5
2.1.1.2 อุปกรณ์นาโน (Nanodevices).....	6
2.1.1.3 นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (Bionanotechnology).....	7
2.1.1.4 การแพทย์นาโน (Nanomedicine).....	8
2.2 อนุภาคเงินในระดับนาโน (Silver nanoparticle).....	9
2.2.1 คุณสมบัติของอนุภาคเงินในระดับนาโน.....	9
2.2.1.1 คุณสมบัติเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface plasmon Resonance).....	9
2.2.1.2 คุณสมบัติการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย.....	10
2.2.2 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโน.....	10
2.2.2.1 วิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction).....	10
2.2.2.2 วิธีเชิงแสงทางเคมี (Photochemical synthesis).....	11
2.2.2.3 วิธีการใช้ไมโครเวฟ (Microwave treatment).....	12
2.2.2.4 วิธีไมโครอิมัลชัน (Microemulsion).....	12
2.2.2.5 วิธีการยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation).....	13
2.2.3 อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (Silver triangular nanoprisms).....	14
2.2.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3.2 ตัวรับรู้การเปรียบเทียบสี (Colorimetric sensor) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน.....	15
2.3 เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance).....	16
2.4 ตัวรับรู้เชิงแสงของอนุภาคเงินในระดับนาโน (Nanoparticle as optical sensor) .....	17
2.5ปรอท (Hg ; Mercury).....	17
2.5.1 ข้อมูลทั่วไป.....	17
2.5.2 การปนเปื้อนของสารปรอท .....	18
2.5.3 พิษรูปแบบทางเคมีของปรอท.....	18
2.5.4 โรคมินามาตะ .....	18
2.5.5 ค่ามาตรฐานความปลอดภัย.....	18
2.6 เทคนิคการประกอบแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique).....	19
2.6.1 โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte).....	20
2.7 เทคนิคการประกอบแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique).....	21
2.7.1 จำนวนชั้น (Number of layer).....	21
2.7.2 เวลาในการจุ่ม (Dipping time).....	22
2.7.3 ค่าความแรงไอออน (Ionic strength).....	23
2.8 การพิสูจน์เอกลักษณ์ (Characterization).....	24
2.8.1 ยูวี - วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-visible spectrophotometry) .....	24
2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Transmission electron microscopy).....	25
2.8.3 ศักย์ซีต้า (Zeta potential) .....	26
2.8.4 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy).....	26
2.8.5 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy).....	27
2.8.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction).....	27
2.8.7 ทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle).....	29
2.8.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope) .....	29
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>37</b>
3.1 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNP) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) .....	37
3.1.1 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซัลไฟต์ .....	37
3.1.1.1 สารเคมี.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.1.2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย ไตรโซเดียมซิเตรต.....	37
3.1.2 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ .....	39
3.1.2.1 สารเคมี.....	39
3.1.2.2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์.....	39
3.1.3 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method).....	40
3.1.3.1 สารเคมี.....	40
3.1.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน .....	40
3.2 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิค การขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique).....	42
3.2.1 การเตรียมพื้นผิวแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Primer).....	42
3.2.1.1 สารเคมี.....	42
3.2.1.2 การเตรียมพื้นผิวแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Primer) โดยการใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) .....	42
3.2.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการ จุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน.....	43
3.2.2.1 สารเคมี.....	43
3.2.2.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่ม สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน .....	43
3.2.3 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน .....	44
3.2.3.1 สารเคมี .....	44
3.2.3.2 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs ร่วมกับสารละลาย PDADMAC .....	44
3.3 การนำค่าสภาวะต่างๆที่ได้จากการศึกษาข้างต้นมาใช้ในการสร้าง แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน.....	45
3.3.1 สารเคมี.....	45
3.3.2 การสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน .....	46
3.4 การนำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่าง สามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท.....	46
3.4.1 การตรวจวัดปรอทโดยการใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยม ปริซึมในระดับนาโน.....	46
3.4.1.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท (HgCl <sub>2</sub> ).....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD).....	47
3.4.1.3 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ).....	47
3.4.1.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy).....	48
3.4.1.5 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์.....	48
3.4.2 การตรวจวัดปรอทโดยการใช้แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน .....	48
3.4.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท ( $HgCl_2$ ).....	48
3.4.2.1.1 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาด นาโนที่ใช้ในการจุ่มสารละลายมาตรฐานปรอท.....	48
3.4.2.1.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท ( $HgCl_2$ ).....	49
3.4.2.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD).....	49
3.4.2.3 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ).....	50
3.4.2.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy).....	50
3.4.2.5 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์.....	51
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย.....</b>	<b>52</b>
4.1 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยม สามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน .....	52
4.1.1 ผลจากการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ ไตรโซเดียมไซเตรต.....	53
4.1.2 ผลจากการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ โซเดียมโบโรไฮไดรด์.....	55
4.1.3 ผลจากการศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินรูปร่าง สามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs) .....	56
4.1.3.1 ผลจากการศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาค เงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs) .....	56
4.1.3.2 ผลจากการศึกษาสภาพความเป็นประจุของอนุภาคเงิน รูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs).....	58
4.1.3.3 ผลจากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่าง สามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs) .....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิค การขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique).....	60
4.2.1 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่ม สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs) .....	61
4.2.2 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน .....	62
4.2.2.1 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน.....	62
4.2.2.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ.....	64
4.2.2.3 การศึกษามุมสัมผัสของของเหลวบนแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ.....	65
4.2.2.4 การศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน.....	66
4.3 การนำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่าง สามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท .....	67
4.3.1 การตรวจวัดปรอทโดยการใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่าง สามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs).....	67
4.3.1.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท (HgCl <sub>2</sub> ).....	67
4.3.1.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD).....	72
4.3.1.3 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ).....	72
4.3.1.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy).....	73
4.3.1.5 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์ .....	74
4.3.2 การตรวจวัดปรอทโดยการใช้แผ่นฟิล์มบางนาโน .....	74
4.3.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท.....	74
4.3.2.1.1 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาด นาโนที่ใช้ในการจุ่มสารละลายมาตรฐานปรอท.....	74
4.3.2.1.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท (HgCl <sub>2</sub> ).....	75
4.3.2.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD).....	80
4.3.2.3 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ).....	80
4.3.2.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy).....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2.5 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์.....	82
4.3.2.6 ศึกษาเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์นี้กับวิธีอื่นๆ.....	82
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>84</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>86</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>94</b>
ภาคผนวก ก.....	95
ภาคผนวก ข.....	99
ประวัติผู้วิจัย.....	107



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุบวก (Polycation).....	20
2.2 ตัวอย่างของโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุลบ (Polyanion).....	21
4.1 ตารางแสดงค่าศักย์ซีต้าของ AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน.....	58
4.2 ตารางแสดงหมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิติเรตและหมู่ฟังก์ชันของAgTNPs.....	60
4.3 ตารางแสดงลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ.....	65
4.4 ตารางแสดงค่าศักย์ซีต้าของสารละลาย AgTNPs ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้น 0.40, 10.00 และ 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	70
4.5 ตารางแสดงค่า LOD และ LOQ.....	72
4.6 ตารางแสดงค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy) ในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่ม.....	73
4.7 ตารางแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุด เมื่อเติมตัวรบกวนต่างๆลงไป.....	74
4.8 ตารางแสดงลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน.....	78
4.9 ตารางแสดงค่า LOD และ LOQ.....	81
4.10 ตารางแสดงค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy) ในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่ม.....	81
4.11 ตารางแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุด เมื่อเติมตัวรบกวนต่างๆลงไป.....	82
4.12 ตารางแสดงการเปรียบเทียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอท.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ขนาดของนาโนเทคโนโลยี.....	4
2.2 ท่อนาโนคาร์บอน.....	5
2.3 หุ่นยนต์นาโนสำหรับการซ่อมแซมเซลล์ (Cell repair nanorobots).....	8
2.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ของอนุภาคเงินระดับนาโนขนาดเฉลี่ย 12 นาโนเมตร ที่ใช้แบ่งเป็นตัวรีดิวซ์ด้วยวิธีการใช้รังสีไมโครเวฟ.....	12
2.5 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดย วิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี.....	14
2.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (TEM) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึม ในระดับนาโน โดยใช้วิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction) ทำการสังเคราะห์.....	15
2.7 กระบวนการสั่นของพลาสมอน (Plasmon oscillation) สำหรับอนุภาคทรงกลม.....	16
2.8 วิธีการสร้างฟิล์มบางโพลีเอเล็คโทรไลต์โดยการสลับประจุบวก และประจุลบ.....	19
2.9 การประกอบกันแบบชั้นต่อชั้นของอนุภาคนาโนโดยการเคลือบตามลำดับ.....	19
2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและจำนวนชั้นของ PSS/PDADMAC.....	22
2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาจุ่มของ PSS/PDADMAC.....	22
2.12 ยูวี-วิสิเบิลสเปกตรัม (UV-vis spectrum).....	24
2.13 ภาพถ่ายอนุภาคเงินในระดับนาโนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (TEM).....	25
2.14 เครื่อง Atomic force microscope.....	27
2.15 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก.....	28
3.1 แผนผังการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	38
3.2 แผนผังการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	40
3.3 แผนผังการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน โดยวิธีการเกิดปฏิกิริยารีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method).....	41
3.4 แผนผังการเตรียมพื้นผิวแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Primer) โดยการใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique).....	42
3.5 แผนผังการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนใน การจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน.....	43
3.6 แผนผังการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP's ร่วมกับสารละลาย PDADMAC.....	45
3.7 แผนผังการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน.....	46
4.1 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ AgTNP's (a) และภาพแสดงสีของสารละลาย (b) ที่มีความเข้มข้นของไตรโซเดียมซิเตรตที่แตกต่างกัน.....	53
4.2 สมการและแผนผังแสดงกลไกปฏิกิริยาของการสังเคราะห์อนุภาคเงิน รูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน.....	55
4.4 ภาพจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของ AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกันคือ 0.24 (a), 0.43 (b) และ 0.62 (c) มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ .....	57
4.5 กราฟแห่งแสดง size distribution ของ AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกันคือ 0.43 (a) และ 0.62 (b) มิลลิโมลาร์ .....	58
4.6 FTIR สเปกตร้าของไตรโซเดียมซิเตรต (a) และ AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกันคือ 0.24 (b), 0.43 (c) และ 0.62 (d) มิลลิโมลาร์ .....	59
4.7 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่เวลาต่างๆ.....	61
4.8 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ.....	62
4.9 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ.....	63
4.10 กราฟแสดงมุมสัมผัสของของเหลวบนแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ.....	66
4.11 ภาพแสดงการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน .....	67
4.12 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNPs (a) และภาพแสดงสีของสารละลาย (b) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.20 - 0.70 มิลลิกรัมต่อลิตร .....	68
4.13 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNPs (a) และภาพแสดงสีของสารละลาย (b) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.90- 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร .....	69
4.14 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNPs เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆ .....	70
4.15 ภาพจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของสารละลาย AgTNPs ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.40 (a), 10.00 (b) และ 100.00 (c) มิลลิกรัมต่อลิตร .....	71
4.16 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอท ณ เวลาต่างๆ.....	75
4.17 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทแต่ละความเข้มข้น.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC (a) และภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบาง (b) เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน .....	77
4.19 ภาพ FESEM ของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 0.50 (b), 10.00 (c) และ 20.00 (d) มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วน (a) คือ AgTNPs-PDADMAC without mercuric.....	79
4.20 แผนผังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับปรอท.....	80



## คำย่อและสัญลักษณ์

AgTNPs	Silver Triangular Nanoprisms
LBL	Layer-by-Layer
PE-PE	Polyelectrolyte - polyelectrolyte
Hg	Mercury
PDADMAC	Poly (diallyl dimethyl ammoniumchloride)
PSS	Poly (4-styrene sulfonic acid) sodiumsalt
UV-vis spectrophotometry	Ultraviolet-visible spectrophotometry
XRD	X-ray diffractometer
FTIR	Fourier transform infrared spectrophotometer
TEM	Transmission electron microscope
AFM	Atomic force microscope
mL	Milliliter (มิลลิลิตร)
mM	Millimolar (มิลลิโมลาร์)
$\mu$ M	Micromolar (ไมโครโมลาร์)
nm	Nanometer (นาโนเมตร)
mV	Millivolt (มิลลิโวลต์)
%wt	Percent by weight (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
ppm	Milligram per liter (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผล

ปรอท (Mercury) เป็นโลหะหนัก ที่ในปัจจุบันถูกนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมหลายประเภท อาทิเช่น ใช้ออกไซด์ของปรอทในอุตสาหกรรมการผลิตสี หรือใช้สารปรอทในการทำสวิตซ์อัตโนมัติของอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น โดยสารปรอทเหล่านี้มีการปนเปื้อนมากับระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยน้ำเสียลงสู่ธรรมชาติ ทำให้ธรรมชาติมีการปนเปื้อนของสารปรอทในดินและน้ำทั่วไป ปรอทเป็นสารพิษที่ร้ายแรงมาก สามารถดูดซึมผ่านระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร และซึมผ่านผิวหนัง ไอของปรอทที่เข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมเข้าสู่ระบบหมุนเวียนโลหิต และกระจายไปยังสมองและส่วนอื่นๆของร่างกายได้อย่างรวดเร็ว การได้รับสารปรอทเป็นเวลานานจะทำให้มีอาการใบหน้าเกิดการบวมและเจ็บ บางคนอาจเกิดอาการเหน็บชาบางส่วนจนเป็นอัมพาต หรือโรคที่เกิดจากปรอทว่า เรียกว่า โรคมินามาตะ [1]

การวิเคราะห์หาปรอทในแหล่งน้ำ โดยทั่วไปนิยมใช้เทคนิคโคลเวเปอร์ อะตอมมิคแอบซอร์พชัน (Cold vapour atomic absorption spectrometry) เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปรอท โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชัน สเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์หาปรอท เนื่องจากมีความไวสูง และมีความจำเพาะเจาะจงสูง ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) มีค่าเท่ากับ 0.4 นาโนกรัมต่อลิตร แต่วิธีการนี้ใช้ต้นทุนในการวิเคราะห์ที่สูงเพราะเครื่องมือที่ใช้มีราคาแพงและใช้เวลาในการเตรียมตัวอย่างนาน [2] จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์มีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาปรอทที่สะดวกและง่ายขึ้น โดยใช้วิธีการตรวจวัดด้วยตัวรับรู้การเปรียบเทียบสี (Colorimetric sensor) ในการวิเคราะห์หาปรอท เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ทำซ้ำได้ มีความไวในการตรวจวัด และเป็นวิธีที่สะดวก [3]

ซึ่งในปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีได้รับความนิยมสนใจในการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก เนื่องจาก นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้างหรือการวิเคราะห์ รวมถึงการออกแบบหรือประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้าง หรือวิเคราะห์วัสดุที่เล็กมากๆ เช่น การจัดอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ วัสดุนาโน ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาโดยการดัดแปลงการจัดเรียงตัวของ อะตอมหรือโมเลกุลให้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-100 นาโนเมตร ทำให้ที่บริเวณผิวมีจำนวนของอะตอมเพิ่มมากขึ้น การกระจายตัวของอิเล็กตรอนจะมีความแตกต่างจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติของวัสดุนาโนพิเศษเพิ่มมากขึ้น ทำให้โครงสร้างของวัสดุและอุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นและมีหน้าที่ใหม่ๆทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอนุภาคนาโนเงินมีคุณสมบัติหลายๆประการที่น่าสนใจจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย

ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงพัฒนาวิธีการตรวจวัดไอออนปรอท จากการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดยใช้วิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction) ขึ้นมา เพื่อให้มีสมบัติที่พิเศษขึ้น เนื่องจากอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมีคุณสมบัติทางเคมีและทางแสงที่พิเศษ สามารถนำมาใช้ในวิธีการเปรียบเทียบสีที่มีความไว และความเสถียรได้ จึงนำมาสร้างเป็นตัวรับรู้ในการตรวจวัดไอออนปรอท และงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างฟิล์มบางของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) ด้วยการทับถมของชั้นสารโพลีเอ็กโซเล็กโทรไลต์ที่มีความประจุบวกคือ โพลีไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) และประจุลบคือ โพลีไซเตียม-4-สไตรีนซัลโฟเนต (PSS) สลับกัน ซึ่งแผ่นฟิล์มบางของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่ได้นี้ จะถูกนำไปใช้เป็นตัวรับรู้ในการเปรียบเทียบสีของการตรวจวัดไอออนปรอทในน้ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดยการใช้วิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method)
2. เพื่อสร้างฟิล์มบางในระดับนาโนโดยการใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)
3. เพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวิธีตรวจวัดในการหาปริมาณของปรอท

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดยการใช้วิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method)
2. สร้างฟิล์มบางในระดับนาโนโพลีเอ็กโซเล็กโทรไลต์โดยการใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
3. ศึกษาผลของการใช้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนในการตรวจวัดปรอท
4. ศึกษาผลของการใช้แผ่นฟิล์มบางนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนเป็นตัวรับรู้ในการตรวจวัดปรอท
5. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แลพบการดูดกลืนแสง (Surface plasmon resonance) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและแผ่นฟิล์มบางนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
- หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
- รูปร่างของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
- สภาพความเป็นประจวบรอบๆอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
- พื้นผิวของแผ่นฟิล์มบางนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
- โครงสร้างผลึกของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มบางนาโน
- ทดสอบมุมสัมผัสของแผ่นฟิล์มบางนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สารละลายเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่สามารถใช้ในการตรวจวัดปรอทได้
2. ได้แผ่นฟิล์มบางนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่สามารถใช้เป็นตัวรับรู้สำหรับการตรวจวัดปรอท
3. ได้วิธีในการตรวจวัดปรอทที่มีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

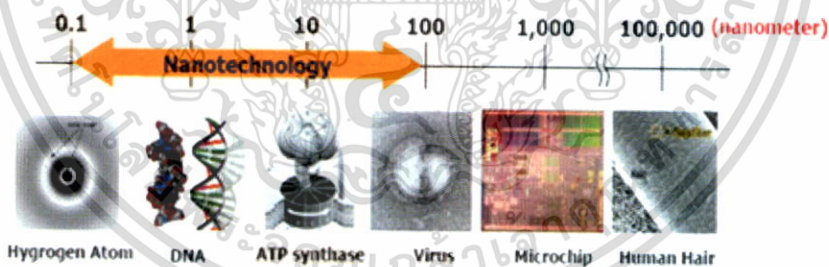
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้างหรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 0.1-100 นาโนเมตร) ดังรูปที่ 2.1 รวมถึงการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมากๆ เช่น การจัดอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

โดยริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Phillips Feynman) เป็นผู้ที่ได้รับการยอมรับว่า เป็นคนแรกที่แสดงความคิดเห็นถึงความเป็นไปได้ และแนวโน้มของนาโนเทคโนโลยี ในการบรรยายเรื่อง “There’s plenty of room at the bottom” ที่สถาบันเทคโนโลยีแคลิฟอร์เนีย เมื่อปี ค.ศ. 1959 โดยการแสดงความคิดเห็นถึงความเป็นไปได้ และโอกาสของประโยชน์ที่จะได้จากการจัดการในระดับอะตอม และปี ค.ศ. 1974 ศาสตราจารย์ โนริโอะ ทานิกูชิ (Norio Taniguchi) แห่งมหาวิทยาลัยวิทยาศาสตร์โตเกียว เป็นคนแรกที่เริ่มใช้คำว่า “Nanotechnology” [5]



รูปที่ 2.1 ขนาดของนาโนเทคโนโลยี [6]

นาโนเทคโนโลยีจึงเป็นสหสาขาวิชา (Multidisciplinary area) ที่ต้องอาศัยความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจากหลากหลายสาขารวมเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ ในงานทางวัสดุศาสตร์ (Nanomaterials) อิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) และวิทยาศาสตร์ชีวภาพ (Nanobiotechnology) ก่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่ได้รับการออกแบบและควบคุมตั้งแต่การจัดเรียงอะตอมหรือโมเลกุลไปจนกลายเป็นชิ้นส่วนขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้วัสดุชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติดีขึ้น [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.1 ประเภทของนาโนเทคโนโลยี

### 2.1.1.1 วัสดุนาโน (Nanomaterial)

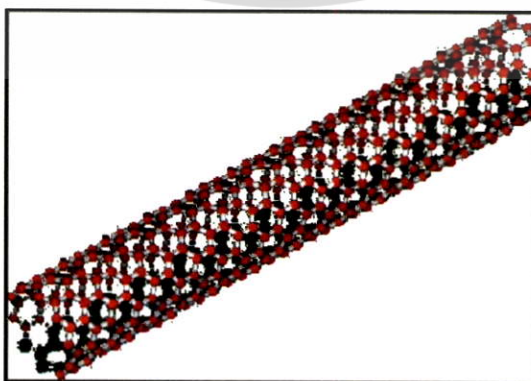
เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ด้านวัสดุ เช่น การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมการพัฒนาฟิล์มพลาสติกนาโนคอมโพสิตที่มีความสามารถในการสกัดกั้นการผ่านของก๊าซบางชนิดและไอน้ำ เพื่อใช้ทำบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุความสดของผักและผลไม้และเพิ่มมูลค่าการส่งออก การผลิตอนุภาคนาโนมาใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส หรือทำให้ไม่เปียกน้ำ เป็นต้น [8] โดยวัสดุนาโนสามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเกิดจากการกระทำของมนุษย์ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ อาจพบได้หลังเกิดไฟฟ้า หรือภูเขาไฟระเบิด บางชนิดอาจอยู่ในรูปของอนุภาคไวรัสที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ส่วนอนุภาคนาโนที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ได้จากการสังเคราะห์โดยตรงและเป็นสารปนเปื้อนออกมา เช่น จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เครื่องจักร หรือยานพาหนะ หรือจากกระบวนการผลิตทั้งทางเคมีและชีวภาพ

วัสดุนาโนมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ที่สำคัญ ได้แก่

#### 1. วัสดุที่มีธาตุคาร์บอนเป็นหลัก (Carbonbased materials) ท่อนาโน

คาร์บอน

มีลักษณะเป็นท่อเปิดรูปทรงกระบอกเหมือนการม้วนพับของแผ่นแกรไฟต์ โดยมีความกว้าง หรือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อประมาณ 4 นาโนเมตร โดยอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของท่อประมาณ 10,000 เท่า สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของท่อนาโนคาร์บอน คือ ความแข็งแรง โดยความแข็งแรงของวัสดุนาโนชนิดนี้เท่ากับความแข็งแรงของเพชร ท่อนาโนคาร์บอนนำความร้อนและนำกระแสไฟฟ้าได้ดีมากเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามสมบัติการนำไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงในช่วงค่อนข้างกว้างมาก คือ สามารถมีสมบัติของตัวนำ ตั้งแต่โลหะ สารกึ่งโลหะ ไปจนถึงฉนวน ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล และเปลี่ยนแปลงได้อีกตามเทคนิคการสังเคราะห์ จากสมบัติที่แข็งแรงและเบา จึงได้มีการนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้ในการสร้างอากาศยาน ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่ใช้สมบัติในระดับจุลภาคของสาร เช่น กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแบบกราด ใช้เป็นส่วนผสมกับวัสดุอื่น เช่น พอลิเมอร์ เพื่อให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงยิ่งขึ้น [9]



รูปที่ 2.2 ท่อนาโนคาร์บอน [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. วัสดุนาโนสารกึ่งตัวนำและโลหะ (Semiconductor and metal nanomaterials)

เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กจิ๋วและมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก จึงได้รับความสนใจเป็นพิเศษในอุตสาหกรรมสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวโดยตรง และยังสามารถนำไปใช้เป็นตัวตามรอย โดยเฉพาะในโครงสร้างที่เล็กมากและยากต่อการติดตาม หากนำอนุภาคนาโนไปติดตั้งหรือวางตามตำแหน่งที่เหมาะสม เช่น ผงสังกะสี เยื่อหุ้มเซลล์ หรือโครโมโซม จะทำให้เราสามารถติดตามการทำงานของระบบเหล่านั้นได้ดี เช่น ซิงก์ซัลไฟด์ (ZnS) และเงิน (Ag)

ซิงก์ซัลไฟด์ (ZnS) เป็นสารกึ่งตัวนำที่เรืองแสง ใช้ในการทำจอภาพ เครื่องรับรู้ อุปกรณ์เกี่ยวกับเลเซอร์ เป็นต้น สำหรับอนุภาคระดับนาโนนั้น ได้มีการใช้ประโยชน์จากสมบัติที่เกี่ยวกับการเรืองแสง เช่น การทำให้เกิดภาพของระบบขนาดเล็ก และใช้ติดตามการทำงานของกลไกต่างๆ โดยเฉพาะในระดับเล็กลงไปจากเซลล์ ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาด้านชีวภาพ และการแพทย์

เงิน (Ag) สมบัติของเงินที่สำคัญคือ การนำความร้อนและนำไฟฟ้า ใช้เป็นตัวทำลายหรือยับยั้งการเจริญของเชื้อโรคได้ โดยอนุภาคเงินในระดับนาโนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งาน ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ปัจจุบันได้มีการนำอนุภาคเงินในระดับนาโนมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องหนัง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการต่อต้านเชื้อโรคที่มีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูง ดังจะเห็นได้จากเสื่อนาโนที่มีจำหน่ายกันในปัจจุบัน [9]

### 2.1.1.2 อุปกรณ์นาโน (Nanodevices)

เป็นการสร้างหรือสังเคราะห์อุปกรณ์ในระดับนาโน และยังมีความสัมพันธ์กับเทคโนโลยีชีวภาพซึ่งมีเป้าหมายที่เลียนแบบปฏิกิริยาของระบบสิ่งมีชีวิต เช่น การเคลื่อนที่ของเซลล์ (Cellular motors) เป็นต้น โดยมีความสำคัญในทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ [10] ตัวอย่างอุปกรณ์นาโน เช่น นาโนเซนเซอร์

นาโนเซนเซอร์ (Nanosensor) เป็นเทคโนโลยีตัวตรวจวัดวิเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร ใช้ในการตรวจวัดได้ในหลากหลายรูปแบบ โดยการตรวจวิเคราะห์ทางการแพทย์และสาธารณสุขมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีความแม่นยำในการตรวจวิเคราะห์ ดังนั้นจึงมีความก้าวหน้าในการวิจัยและพัฒนาระบบตรวจวัดและการถ่ายภาพทางเคมีและชีวภาพด้วยอนุภาคนาโน [11] รวมถึงการพัฒนาเครื่องมือและเทคโนโลยีการวิเคราะห์รูปแบบใหม่ ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านความไวในการตรวจวัด ความถูกต้อง แม่นยำและรวดเร็ว

ตัวอย่างการใช้นาโนเซนเซอร์สำหรับการวินิจฉัยโรคอัลไซเมอร์ นักวิจัยแห่งมหาวิทยาลัย นอร์เวสเทิร์น ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทำการศึกษาโรคอัลไซเมอร์ด้วยเทคนิคใหม่ โดยอาศัยตัวตรวจจับชนิดใหม่ที่เรียกว่า Surface plasmon resonance (LSPR) nanosensor ซึ่งจะทำหน้าที่ตรวจจับโมเลกุลที่นำเชื่อว่าจะเป็นตัวก่อให้เกิดโรคอัลไซเมอร์ขึ้น ในการทดลองนี้อาศัยอันตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิริยาระหว่าง Amyloid  $\beta$ -derived diffusible ligands (ADDL) กับ Anti-ADDL antibody เป็นตัวตรวจวัด ADDLs คือโปรตีนโมเลกุลเล็กๆ จากคุณสมบัติพื้นฐานของ ADDLs ทำให้นักวิทยาศาสตร์ตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับโรคอัลไซเมอร์ว่า ADDLs มีความเป็นพิษอยู่ เป็นตัวการที่ทำให้เกิดโรคอัลไซเมอร์และทำให้เกิดอาการความจำเสื่อมในผู้ที่มีอายุมากกว่า 65 ปีขึ้นไป จากการค้นพบโปรตีนที่ทำให้เกิดโรคอัลไซเมอร์นี้นำไปสู่การพัฒนายาที่จะรักษาผู้ป่วยที่เป็นโรคอัลไซเมอร์ในระยะเริ่มต้นให้หายได้ภายใต้สภาวะที่ทำการทดลอง ADDLs [12]

### 2.1.1.3 นานาเทคโนโลยีชีวภาพ (Bionanotechnology)

นานาเทคโนโลยีชีวภาพ (Bionanotechnology) เป็นนานาเทคโนโลยีแขนงหนึ่ง ซึ่งเป็นการรวมวิทยาการทางด้านวิทยาศาสตร์ชีวภาพ เคมี และวิศวกรรมศาสตร์เข้าด้วยกัน เพื่อใช้ในการตรวจสอบ ควบคุม ดัดแปลง หรือสังเคราะห์ชีวโมเลกุลชิ้นใหม่ เพื่อให้มีคุณสมบัติตามต้องการ [13] เป็นการประยุกต์ใช้นานาเทคโนโลยีศาสตร์ด้านชีวภาพ เช่น การพัฒนานาโนไบโอเซนเซอร์หรือหัวตรวจวัดสารชีวภาพ และสารวินิจฉัยโรคโดยใช้วัสดุชีวโมเลกุล การปรับโครงสร้างระดับโมเลกุลของยาที่สามารถทำลายชีวโมเลกุลที่เป็นเป้าหมายเฉพาะเจาะจง เช่น เซลล์มะเร็ง การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ในการส่งผ่านสารบำรุงเข้าสู่ชั้นใต้ผิวหนังได้ดียิ่งขึ้น เป็นต้น [14]

ตัวอย่างการใช้นานาเทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร เช่น การนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการทางเศรษฐกิจ เช่น คุณภาพหุงต้ม ความหอม ด้านทานโรคใหม่ ด้านทานเพลี้ยชนิดต่างๆ ทนต่อน้ำท่วม มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดย ศ.ดร.ภริพัฒน์ วิสัยทอง ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutron research facility) ณ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ริเริ่มพัฒนาเทคนิคทางนาโนเทคโนโลยีในการปรับปรุงพันธุ์ข้าวไทยโดยใช้ลำอนุภาค (Particle beam) เจาะรูขนาดนาโนชั้นที่ผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ข้าว จากนั้นจะยิงอะตอมของไนโตรเจนผ่านรูที่สร้างขึ้นผ่านเข้าไปในเซลล์ข้าวเพื่อกระตุ้นให้ดีเอ็นเอของข้าวเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงพันธุ์ข้าวให้ตรงตามคุณลักษณะที่ต้องการต่อไป งานวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จขั้นต้นไปแล้วจากการที่สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะของข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่ชื่อว่า ข้าวคาม ซึ่งมีลำต้น ใบ และเมล็ดสีม่วงเข้ม ให้กลายเป็นข้าวคามที่มีลำต้นและใบสีเขียว งานวิจัยในขั้นต่อไปคือการปรับปรุงพันธุ์ข้าวหอมมะลิ (Jasmine rice) ให้สามารถทำการเพาะปลูกได้ตลอดปี มีลำต้นสั้นลง ทนทานต่อแสงแดด และปรับปรุงสีของเมล็ดให้ดีขึ้น ข้าวที่ถูกปรับปรุงพันธุ์โดยวิธีการทางนาโนเทคโนโลยีนี้อาจจัดเป็น ข้าวดัดแปรอะตอม (Atomically modified rice) หรือเรียกสั้นๆ ว่า “ข้าวนาโน (Nano rice)” [7] เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.4 การแพทย์นาโน (Nanomedicine)

การแพทย์นาโน เป็นการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้อย่างหลากหลายทางการแพทย์ โดยมีการพัฒนาอย่างกว้างขวางและรวดเร็ว ได้เริ่มต้นศึกษาวิจัยมาตั้งแต่เมื่อสิบปีที่แล้ว จนถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศสหรัฐอเมริกา กลุ่มประเทศยุโรป กลุ่มประเทศเอเชีย เช่น จีน เกาหลีใต้ อินเดีย และสิงคโปร์ ความรู้ใหม่ๆ เหล่านี้ทำให้เกิดเป็นศาสตร์แขนงใหม่ที่มีชื่อเรียกว่า “NANOMEDICINE” [15] จัดจึงเป็นเทคโนโลยีทางการแพทย์ที่ใหม่มาก

โดยเครื่องมือที่สำคัญของการแพทย์นาโน คือ Medical nanorobot หรือ หุ่นยนต์นาโนการแพทย์ ซึ่งมีขนาดเท่าแบคทีเรีย และประกอบด้วย ชิ้นส่วนขนาดโมเลกุลหลายพันชิ้น (เช่น เกียร์ ฝาประกับเพลลา หรือ ซีพ็องที่ประกอบเข้าด้วยกัน) ประกอบกันเป็นวัสดุรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนที่แข็งแรง หุ่นยนต์นาโนการแพทย์ต้องการมอเตอร์เพื่อการขับเคลื่อน และต้องการแขนกลที่ขยับได้อย่างคล่องแคล่ว ต้องมีพลังงานช่วยผลักดัน มีเซนเซอร์ที่ทำหน้าที่ขึ้นการปฏิบัติการ และมีระบบคอมพิวเตอร์ช่วยควบคุมการทำงานทั้งหมด หุ่นยนต์นาโนจะวิ่งไปตามกระแสเลือด ฉะนั้นจึงต้องมีขนาดเล็กกว่าเซลล์เม็ดเลือดแดง และมีขนาดจิวเพียงพอที่จะบีบอัดและรอดผ่านรูแคบๆ ในร่างกายมนุษย์ได้ [16]



รูปที่ 2.3 หุ่นยนต์นาโนสำหรับการซ่อมแซมเซลล์ (Cell repair nanorobots) [17]

จากการศึกษาวิจัยในปัจจุบันพบว่า มีการเสนอแบบจำลองของหุ่นยนต์นาโนที่เรียกว่า หุ่นยนต์นาโน (Nano robot) สร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์หลายๆ ด้าน เช่น ด้านทันตกรรม มีความสามารถในการตรวจสอบ ซ่อมแซม ทำความสะอาดผิวฟัน โดยการควบคุมผ่านระบบคอมพิวเตอร์ทางไกล ทำให้ความรู้สึกเจ็บปวดในขณะที่ทำฟันลดลงหรือแทบจะไม่มีรู้สึกที่กำลังทำฟันอยู่นอกจากนี้ ยังมีการสร้างหุ่นยนต์นาโนเซลล์เม็ดเลือดแดงเทียม (Respirocyte) ที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นเลือดฝอย เพื่อให้เคลื่อนที่ไปในหลอดเลือดได้เช่นเดียวกับเม็ดเลือดแดง หุ่นยนต์นาโนเซลล์เม็ดเลือดแดงเทียมนี้ทำหน้าที่นำก๊าซออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่างๆ ของร่างกายควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะนำมาใช้เพื่อรักษาผู้ป่วยที่เกิดความผิดปกติของเม็ดเลือดแดงส่งผลให้มีก๊าซออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่างๆ ของร่างกายไม่เพียงพอ หรือการใช้เครื่องมือที่ลักษณะเหมือนหุ่นยนต์นาโนหรือวิสดูนาโนเป็นตัวขนส่งยา (Drug delivery agent) นำเข้าสู่ร่างกายผู้ป่วย เพื่อเพิ่มผลสัมฤทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการรักษา รวมทั้งการรักษาโรคเกี่ยวกับหลอดเลือด โรคเอดส์ โรคมะเร็ง โรคไข้หวัดนก รวมทั้งการตอบสนองในเรื่องอื่นๆ เช่น การสร้างระบบภูมิคุ้มกัน การรักษาเกี่ยวกับความบกพร่องทางด้านประสาทสัมผัสต่างๆ ทั้งระบบผิวหนัง การมองเห็น การได้ยิน และการรับรสหรือกลิ่น เป็นต้น [17]

## 2.2 อนุภาคเงินในระดับนาโน (Silver nanoparticles)

อนุภาคเงินในระดับนาโน หรือ ซิลเวอร์นาโน (Silver nano) เป็นการสังเคราะห์อนุภาคเงินให้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.1-100 นาโนเมตร โดยวิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การรีดิวซ์ทางเคมี (Chemical reduction) การปล่อยประจุสปาร์ก (Spark discharge) การฉายรังสีสารละลาย (Solution irradiation) เป็นต้น [18] คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี จะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของอนุภาค อาจมีรูปร่างหน้าตา เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก พีระมิด และอื่นๆ แต่ที่สังเคราะห์โดยทั่วไปส่วนใหญ่จะมีรูปร่างค่อนข้างเป็นทรงกลม [19]

อนุภาคเงินในระดับนาโนมีลักษณะสมบัติเหมือนกันกับเงินทั่วไป เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ จะอยู่ลักษณะรวมเป็นกลุ่มก้อน เมื่ออนุภาคเงินในระดับนาโนปรากฏในน้ำจะแตกตัวเป็นซิลเวอร์ไอออน ( $Ag^+$ ) และเกิดการออกซิเดชันที่ผิว ซึ่งจะทำได้ไอออนของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์ในรูปซิลเวอร์ไอออน ( $Ag^+$ ) ที่ล้อมรอบด้วยอนุภาคเงินในระดับนาโนที่ยังอยู่ในรูปโลหะหรืออนุภาคนาโนอยู่ในน้ำ อนุภาคเงินในระดับนาโนเมื่อปรากฏในน้ำจึงจะให้ไอออนของซิลเวอร์ด้วย ซึ่งในการพิจารณาถึงเคมีของอนุภาคเงินในระดับนาโน จึงต้องครอบคลุมถึงไอออนของซิลเวอร์ ( $Ag^+$ ) ร่วมด้วย

จากการที่อนุภาคเงินในระดับนาโนมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคเงินทั่วไปมากจึงทำให้มีลักษณะสมบัติในส่วนหนึ่งของพื้นผิวที่แตกต่างกันไป เช่น มีแนวโน้มที่จะระเบิดได้ซึ่งมาจากการที่สารอนุภาคเงินในระดับนาโนมักมีอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และเล็กกว่าเงินทั่วไปอย่างมาก การสะสมหรือรวมตัวเป็นฝุ่นของอนุภาคเงินในระดับนาโนจึงจะทำให้เกิดการระเบิดได้ นอกจากนี้อนุภาคเงินในระดับนาโนสามารถรวมเป็นก้อนกรณูลได้ ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่อนุภาคเงินในระดับนาโนมีขนาดเล็กมารวมกัน แต่ยังคงมีขนาดในระดับเล็กมาก เช่น อนุภาคเงินในระดับนาโนที่รวมกลุ่มมีขนาดเล็ก 15 หรือ 20 นาโนเมตร เป็นต้น ส่งผลให้ลักษณะสมบัติอื่นๆ เช่น พื้นที่ผิว ชนิดประจุบนพื้นผิว รวมทั้งลักษณะควอนตัมแตกต่างจากเงินทั่วไป ซึ่งส่งผลให้เกิดการนำอนุภาคเงินในระดับนาโนไปเป็นวัสดุสำหรับผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น พลาสติก ผ้า กระดาษ สี และสารเคลือบได้

### 2.2.1 คุณสมบัติของอนุภาคเงินในระดับนาโน

#### 2.2.1.1 คุณสมบัติเซอ์เฟอเพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon resonance)

เป็นคุณสมบัติของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีขนาดเล็กมากที่ส่งผลให้อนุภาคของเงินในระดับนาโนมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มากกระทบ ทำให้เกิดปรากฏการณ์เชิงแสงเรียกว่า Surface plasmon resonance ส่งผลให้อนุภาคเงินในระดับนาโนดูดกลืนแสงสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยช่วงความยาวคลื่นของแถบคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนจะเป็นช่วงความยาวคลื่นที่สั้นลงกว่าเดิม คุณสมบัติของเงินในระดับนาโนได้ถูกนำไปใช้ในการผลิตเซนเซอร์สำหรับการแพทย์ และเซนเซอร์ในรูปแบบห้องปฏิบัติการจิ๋ว (Lap-on-a-chip) [20] โดยพบว่าขนาดของอนุภาคเงินในระดับนาโนจะส่งผลต่อคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืน โดยยังมีขนาดเล็กจะทำให้ช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมของแสงที่ถูกดูดกลืนจะสั้นลง โดยอนุภาคเงินในระดับนาโนที่เล็กลง (ขนาดน้อยกว่า 10 นาโนเมตร) จะสอดคล้องกับการดูดกลืนคลื่นในแถบแสงสีแดงและช่วยขยายความกว้างของตำแหน่งคลื่นการดูดซับด้วย นอกจากนี้คุณสมบัตินี้ก็ยังนำไปใช้ในการทำเลเซอร์และระบบการนำพายา (Drug delivery) ซึ่งอนุภาคเงินในระดับนาโนไม่เพียงแต่ดูดซับโฟตอนแม้ว่าจะอยู่ห่างจากต้นกำเนิดแสงเท่านั้น แต่ช่วยส่งผ่านความร้อนไปยังโพลีเมอร์โดยรอบ ทำให้ยาที่ถูกห่อหุ้ม (Encapsulated) สามารถกระจายตัวออกมาจากแคปซูลโพลีเมอร์ได้ คุณสมบัติของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ถูกนำไปใช้ในการรักษาด้วยเลเซอร์โดยช่วงระยะเวลาในการรักษาโรคด้วยเลเซอร์ร่วมกับ Polyelectrolyte multilayer capsul จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์อีกด้วย [21-22]

### 2.2.1.2 คุณสมบัติการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย

ขนาดของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีขนาดเล็กมาก มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ทำให้สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ โดยอนุภาคเงินในระดับนาโนกระจายอยู่ตามผนังเซลล์และแทรกเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรีย และเกิดการรวมตัวของดีเอ็นเอภายในเซลล์ เช่นเดียวกับการใช้ซิลเวอร์ไอออน ขนาดของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่สามารถฆ่าเชื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 1 - 10 นาโนเมตร เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจะแสดงอิทธิพลของอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic effect) ได้ดียิ่งขึ้นทำให้ความว่องไวของพื้นผิวของอนุภาคนาโนในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น อีกทั้งความแข็งแรงในการจับของอนุภาคนาโนของเงินกับแบคทีเรียขึ้นกับพื้นที่ผิวที่เกิดอันตรกิริยา ดังนั้นพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง ทำให้ประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนของเงินเพิ่มขึ้น ผิวหน้าของอนุภาคนาโนของเงินที่สามารถจับกับแบคทีเรียได้ [23]

## 2.2.2 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโน

### 2.2.2.1 วิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction)

สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนนั้น วิธีรีดักชันทางเคมีเป็นวิธีที่นิยมใช้ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ใช้สารเคมีน้อย และสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคเงินในระดับนาโนได้ [24] วิธีรีดักชันทางเคมีเกี่ยวข้องกับการเกิดรีดักชันของซิลเวอร์ไนเตรต [25] โดยการใช้ตัวรีดิวซ์ เช่น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ และตัวรักษาเสถียรภาพ เช่น โซเดียมโอดีซิลซิลเฟต โดยมีปัจจัยในการป้องกันการเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโน ซึ่งวิธีนี้มีตัวแปรที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคและการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโน หลายตัวแปร เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของซิลเวอร์ไนเตรต , ตัวรีดิวซ์/อัตราส่วนโมลของซิลเวอร์ไนเตรต และความเข้มข้นของตัวรักษาเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยของ กีซาง ซอง,ซองมิน ลี,แทซุน ปาร์ค,และบอมซุก ลี [25] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี เกิดการรีดักชันของซิลเวอร์ไนเตรตในน้ำด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์โดยมีโซเดียมโอดีทิลซัลเฟตเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ซึ่งมีสมการดังนี้



โดยขั้นตอนการสังเคราะห์คือ ใส่สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์พร้อมกับตัวรักษาเสถียรภาพ ซึ่งไอออนของเงินจะถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ไปเป็นธาตุเงิน โดยโซเดียมโบโรไฮไดรด์จะเกิดการไฮโดรไลซิสเป็น  $\text{BH}_4^-$  แล้วทำการรีดิวซ์  $\text{Ag}^+$  ไปเป็น  $\text{Ag}^0$  เกิดเป็นคอลลอยด์ของอนุภาคเงินในระดับนาโน และทำการศึกษาขนาดอนุภาค,ระดับการรวมตัวของอนุภาคเงินในระดับนาโนโดยดูจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยูวี-วิสิเบิลและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนตามลำดับ

#### 2.2.2.2 วิธีเชิงแสงทางเคมี (Photochemical synthesis)

จากการศึกษาของ เค.มาลิก,เอ็ม.เจ.วิทคอม,เอ็ม.เอส.สเคิลเรลล์ [26] การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนที่มีพอลิเมอร์เป็นตัวรักษาเสถียรภาพโดยใช้วิธีเชิงแสงทางเคมี ได้ทำการเตรียมอนุภาคเงินโดยการฉายแสงด้วยรังสียูวี มีซิลเวอร์ไนเตรตเป็นแหล่งกำเนิดอนุภาคเงิน ใช้เมทอกซีโพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นตัวรีดิวซ์ไอออนของเงินซึ่งจะเกิดอนุภาคลอิสระโดยการใช้รังสียูวีและยังทำหน้าที่เป็นตัวรักษาเสถียรภาพของการเกิดอนุภาคเงินในระดับนาโนด้วย

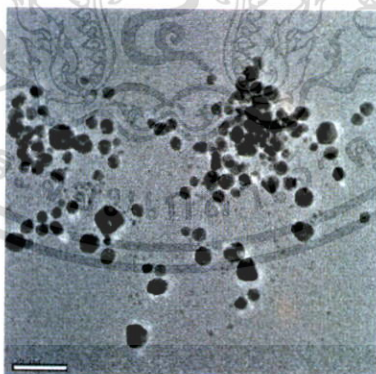
โดยขั้นตอนการสังเคราะห์จะทำการเติมสารละลายเมทอกซีโพลีเอทิลีนไกลคอลผสมกับสารละลายเตตระคลอโรอโรเท ทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันและขจัดออกซิเจนออกด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วนำไปตั้งใต้แหล่งยูวีให้มีระยะห่าง 10 เซนติเมตรระหว่างพื้นผิวบนสุดของสารละลายกับแหล่งยูวี ในขั้นตอนแรกที่ทำกรผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดการสร้างอนุภาคเงินในระดับนาโนโดยการใช้อุณหภูมิของยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรสโกปี สีของสารละลายเริ่มต้นเกิดการเปลี่ยนจากไม่มีสีไปเป็นสีเหลืองหลังจากเกิดปฏิกิริยาประมาณ 10 นาที ซึ่งมีความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยได้ในช่วง 7-15 นาโนเมตร เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปประมาณ 15 นาที สีของสารละลายจะเป็นสีแดงเหลือง มีค่าความยาวคลื่นสูงขึ้นเป็น 420 นาโนเมตร หลังจากการฉายรังสี 25 นาที สเปกตรัมที่มองเห็นสุดท้ายจะคงที่ที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร และขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 35-60 นาโนเมตร แต่ขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 50-60 นาโนเมตร นอกจากนี้ การฉายรังสีไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงใดๆมากนักในสเปกตรัมหรือขนาดอนุภาค ซึ่งบ่งชี้ว่าไอออนของเงินนั้นถูกรีดิวซ์ทั้งหมดและถูกนำมาใช้สำหรับการรวมตัวเป็นอนุภาคเงินในระดับนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.3 วิธีการใช้ไมโครเวฟ (Microwave treatment)

การสังเคราะห์โดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟ มีข้อดีหลายประการ เช่น ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วใช้เวลาค่อนข้างสั้นในการสังเคราะห์ เป็นวิธีที่ง่าย ใช้พลังงานค่อนข้างต่ำ และทำให้ได้สารประกอบที่มีความบริสุทธิ์สูง จากงานวิจัยของ เค เจ ศรีราม, เอ็ม นิติิน, และปิ ยู เนียร์ [27] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนโดยใช้ไมโครเวฟ จะใช้แบ่งทำเป็นแผ่นแม่แบบและเป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งแบ่งที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นแม่แบบนี้จะช่วยป้องกันการรวมตัวของอนุภาคเงินระดับนาโนด้วยการใช้ไมโครเวฟช่วยให้การสังเคราะห์เร็วขึ้นและขนาดอนุภาคที่ได้เฉลี่ยมีขนาด 12 นาโนเมตร

ขั้นตอนการสังเคราะห์จะใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโซเดียมเป็นตัวรีดิวซ์ โดยจะเกิดปฏิกิริยาภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟภายในเตาไมโครเวฟที่ใช้ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองน้ำตาลไปเป็นสีเทาดำซึ่งแสดงว่าเกิดเป็นอนุภาคเงินในระดับนาโนแล้ว โดยขนาดของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโซเดียมและซิลเวอร์ไนเตรต ประโยชน์หลักๆของวิธีการใช้ไมโครเวฟที่เหนือกว่าวิธีการสังเคราะห์ทั่วไปคือ จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโดย ให้ความร้อนเริ่มต้นไวขึ้นและการกำจัดของความร้อนที่ถูกจำกัดที่บริเวณที่ให้ความร้อน จึงช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา การสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนโดยการใช้ไมโครเวฟ ดำเนินการโดยการฉายรังสีที่ส่วนผสมของซิลเวอร์ไนเตรตและแบ่งที่เวลา 30-120 วินาที การฉายรังสีไมโครเวฟจะให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กลง แม้จะใช้ระยะเวลาสั้นๆ หมูไฮดรอกซิลในแบ่งช่วยให้เกิดการรีดักชันไอออนของเงิน อนุภาคนาโนจะเกิดจากการรีดักชันไอออนของเงินภายในแผ่นแม่แบบขนาดนาโน หมูไฮดรอกซิลของแบ่งจะทำหน้าที่เป็นชั้นฟิล์มที่รักษาเสถียรภาพของอนุภาคนาโน เกิดการรีดักชันจากไอออนเงินไปเป็นธาตุเงินโดยการฉายรังสีไมโครเวฟภายในเวลา 120 วินาที



รูปที่ 2.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ของอนุภาคเงินระดับนาโนขนาดเฉลี่ย 12 นาโนเมตร ที่ใช้แบ่งเป็นตัวรีดิวซ์ด้วยวิธีการใช้รังสีไมโครเวฟ [27]

### 2.2.2.4 วิธีไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

ไมโครอิมัลชัน เกิดจากการผสมของน้ำกับน้ำมัน ที่ได้สัดส่วนพอเหมาะจนทำให้เกิดเป็นของเหลวใส ที่มีอนุภาคเล็กขนาด 10-100 นาโนเมตรเท่านั้น [28] ซึ่งไมโครอิมัลชันของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในน้ำมันหรือไมเซลล์ที่ตรงกันข้าม ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมอนุภาคนาโนประเภทต่างๆ เนื่องจากมีความสามารถละลายสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์น้ำขนาดนาโนได้ และทำให้อนุภาคนาโนมีความเสถียรโดยชั้นป้องกันการลดแรงตึงผิว การเกิดอนุภาคนาโนโดยการใช้ไมโครอิมัลชัน ใช้การรวมกันของไมโครอิมัลชันที่เหมือนกัน 2 ตัว แต่จะมีการละลายหนึ่งในสารตั้งต้นที่ใช้สร้างอนุภาคในน้ำ เมื่อไมโครอิมัลชัน 2 ตัวรวมกัน ไมเซลล์ที่ตรงกันข้ามจะมีการกระจายตัวของสารตั้งต้นและคอลลอยด์ที่ต่างกัน ชั้นลดแรงตึงผิวจะให้สารตั้งต้นทั้งสองตัวเข้ามาผสมกันและทำปฏิกิริยาต่อไป สำหรับปฏิกิริยาที่มีความไว ชั้นพื้นผิวของสารลดแรงตึงผิวจะเป็นขั้นตอนการกำหนดอัตรา โดยชั้นที่มีความแข็งแรงมีแนวโน้มที่จะต้านทาน ดังนั้น การเกิดปฏิกิริยาจึงช้าลง ก่อให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคเป็นนิวเคลียส [29] ในทางกลับกันผลของการสร้างอนุภาคนาโนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น

จากงานวิจัยของ เมียน เอ็ม.ฮูซอน และคณะ [30] ได้ทำการเตรียมอนุภาคนาโนของซิลเวอร์โบรไมด์ด้วยวิธีไมโครอิมัลชันโดยการเกิดปฏิกิริยาของซิลเวอร์ไนเตรตกับซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยเตรียมจากการตกตะกอนของซิลเวอร์โบรไมด์ในน้ำของไมโครอิมัลชันที่ประกอบด้วย n-butanol (นอร์มอลบิวทานอล), ไอโซออกเทนและน้ำ เติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในไมโครอิมัลชัน เกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์โบรไมด์ในไมโครอิมัลชัน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับแคโรทีนของสารลดแรงตึงผิว โดยความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว, จำนวนโมลซิลเวอร์ไนเตรตที่เติม มีผลต่อขนาดของอนุภาค

#### 2.2.2.5 วิธีการยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation)

การสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนโดยการยิงด้วยเลเซอร์ของสารที่เป็นโลหะในสารละลาย คุณลักษณะเฉพาะของรูปแบบอนุภาคโลหะและการยิงที่มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่กระทบกับโลหะเป้าหมาย ระยะเวลาพัลส์ของเลเซอร์ ระยะเวลาการยิงและผลกระทบจากของเหลวที่เกิดจากสารลดแรงตึงผิว ฟลูเอนซ์ของเลเซอร์เป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญที่สุด โดยอนุภาคโลหะที่ออกมาจากเป้าหมายต้องใช้พลังงานต่ำที่สุด ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนที่พบโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่อฟลูเอนซ์ของเลเซอร์เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปขนาดฟลูเอนซ์ที่เล็กที่สุดจะต้องไม่ต่ำกว่าเกณฑ์การสลายของเลเซอร์ นอกจากฟลูเอนซ์ของเลเซอร์แล้วจำนวนภาพเลเซอร์ เช่น เวลาที่ใช้ในระหว่างการกลายเป็นไอเลเซอร์ มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นและสัญญาณวิทยาของอนุภาคโลหะที่ปล่อยออกมาในของเหลว ความเข้มข้นของอนุภาคโลหะภายใต้แสงเลเซอร์คาดว่าจะเพิ่มขึ้น แต่สามารถทำให้อิ่มตัวได้เนื่องจากการดูดกลืนแสงในคอลลอยด์ที่มีความเข้มข้นสูงในอนุภาคโลหะ [31] เช่น ในปี 2003 ซูจิได้ทำการเตรียมอนุภาคเงินรูปร่างกลมระดับนาโน (ขนาด 20-50 nm) โดยวิธีขจัดด้วยเลเซอร์ในน้ำด้วยพัลส์แสงเลเซอร์ชนิดพิเศษ ที่ 800 nm [32] ผลที่ได้คือประสิทธิภาพของการเกิดอนุภาคลดลง และขนาดอนุภาคคอลลอยด์มีการกระจายตัวต่ำ นอกจากนี้ประสิทธิภาพการขจัดที่เกิดขึ้นในน้ำยังต่ำกว่าในอากาศอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

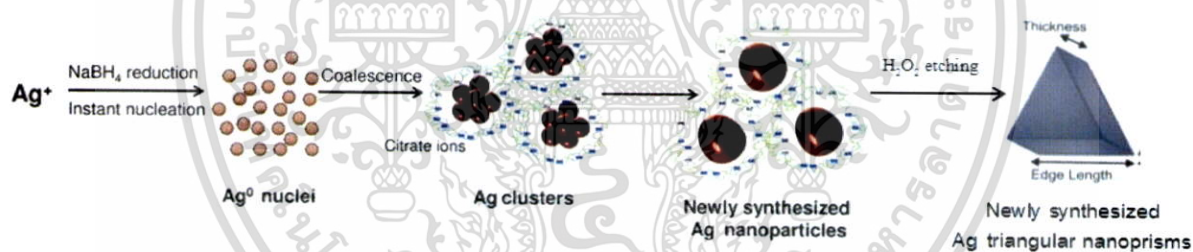
### 2.2.3 อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (Silver triangular nanoprisms)

อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTPs) มีรูปแบบของการดูดกลืนแสงเป็นแบบเซอร์เฟอพลาสมอนเรโซแนนซ์ ที่เข้ม (Strong SPR absorption) แถบการดูดกลืนแสงจะถูกควบคุมโดยความยาว ความหนาของขอบนาโนเพลทและจุดปลายของรูปร่าง AgTPs

AgTPs มีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างออกไปคือ ประกอบด้วย 3 มุมหรือจุดปลายที่แหลมคม ทำให้คุณสมบัติที่สำคัญของ AgTPs คุณสมบัติทางแสง, อิเล็กทรอนิกส์ และคุณสมบัติทางเคมี มีความพิเศษขึ้น AgTPs เป็นตัวตรวจวัดแสง (Plasmonic probes) ที่ดี เหมาะสำหรับการสร้างเป็นตัวรับรู้ โดยวิธีเปรียบเทียบสี (Colorimetric method) ที่มีความเสถียรและไว [33]

#### 2.2.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

โดยทั่วไปจะมีวิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างปริซึมในระดับนาโน 2 วิธี ได้แก่ วิธีเชิงแสงทางเคมี (Photochemical method) และวิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งนิยมใช้วิธีรีดักชันทางเคมีมากกว่าเพราะเป็นวิธีที่ง่ายสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคในระดับนาโนที่จะทำการสังเคราะห์ได้ [34]

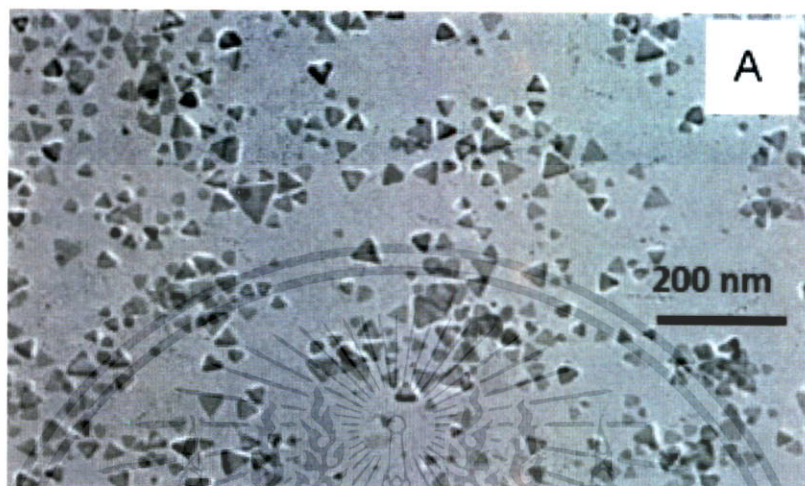


รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction) [35-36]

จากรูปที่ 2.5 เป็นการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี โดยเริ่มจาก  $Ag^+$  ถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ( $NaBH_4$ ) ได้เป็นอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมในระดับนาโนที่มีสีเหลือง ซึ่งมีไตรโซเดียมซิเตรต ทำหน้าที่เป็นตัวรักษาเสถียรภาพ หลังจากนั้นอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมในระดับนาโนที่เกิดขึ้นจะค่อยๆ เริ่มถูกกัด (Etch) โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเท่ากับ 1.763 โวลต์ ในสารละลายมีภาวะที่เป็นกรด 0.867 โวลต์ ในสารละลายที่มีภาวะที่เป็นเบส จะเห็นได้ว่าแม้ในสารละลายที่มีภาวะต่างกันค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ยังคงมีค่าสูงกว่าของ  $Ag^+/Ag$  ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน เท่ากับ 0.7996 โวลต์ ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

( $H_2O_2$ ) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกัดอนุภาค (Etchant) สำหรับอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมในระดับนาโนได้ และเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดลงจะได้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่มีสีน้ำเงิน [33]



รูปที่ 2.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (TEM) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน โดยใช้วิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction) ทำการสังเคราะห์ [33]

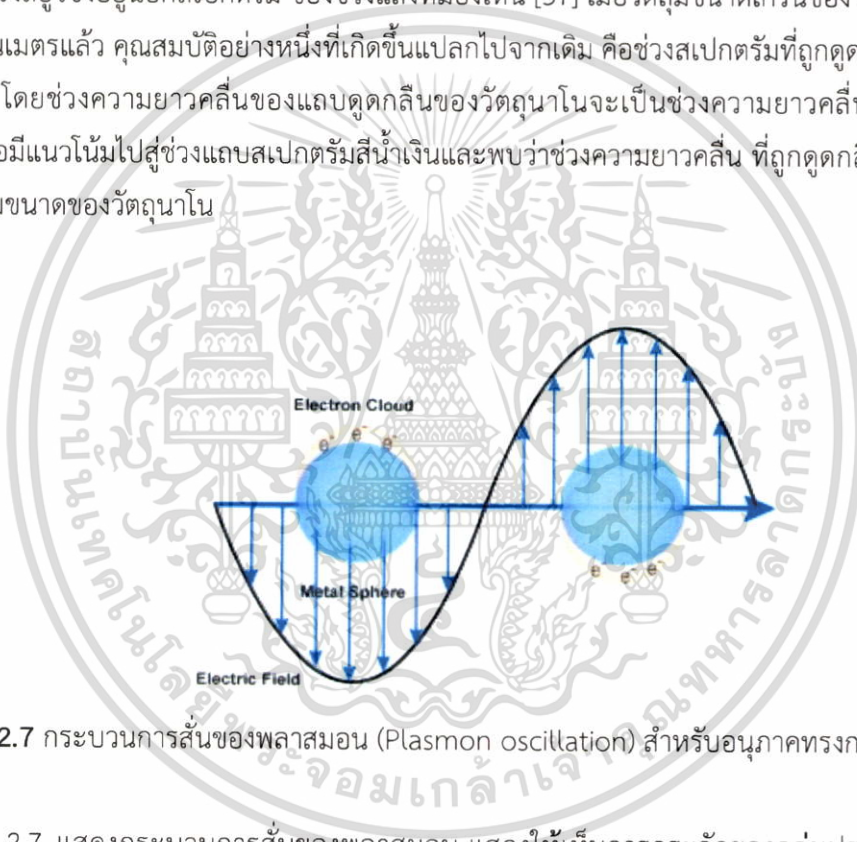
### 2.2.3.2 ตัวรับรู้การเปรียบเทียบสี (Colorimetric sensor) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ชวย ฮัว ยาง และคณะ [33] ได้พัฒนาวิธีการเปรียบเทียบสี (Colorimetric method) ที่ไม่ยุ่งยากและมีความแน่นอนในการตรวจวัดไอโอดีนที่มีความแม่นยำและความไวสูงในการทดลองจะเริ่มจากการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน ซึ่งเตรียมจากการผสมซิลเวอร์ไนเตรต, ไตรโซเดียมซิเตรต และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ เข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ เข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดก็จะได้เป็นสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่มีสีน้ำเงิน หลังจากนั้นจะนำสารละลายที่ได้ไปใช้ในการตรวจวัดไอโอดีน ผลการทดลองพบว่าไอโอดีนที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆสามารถทำให้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนเกิดการเปลี่ยนสีได้ โดยจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปจนถึงสีเหลืองจากการใช้วิธีเปรียบเทียบสีโดยการหาช่วงสี (Critical color) ในกระบวนการเปลี่ยนสีนี้พบว่าไอโอดีนที่มีความเข้มข้น  $0.1 \mu M$  จะสามารถเห็นสีที่เกิดขึ้นได้ภายใน 30 นาทีโดยการสังเกตด้วยตาเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance)

เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance (SPR)) เป็นคลื่น ความหนาแน่นของประจุที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระ ที่มีลักษณะการสั่นพร้อมเพรียงกัน เป็นปรากฏการณ์ ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยผิวต่อของโลหะกับสารไดอิเล็กทริก เช่น ระหว่างทองหรือเงินกับอากาศหรือสารละลาย โดยที่ขนาด ยอดคลื่น และความกว้าง ของสเปกตรัมพลาสมอนเรโซแนนซ์ของวัสดุต่างๆ จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ประเภทของวัสดุ และสภาพแวดล้อมรอบๆวัสดุนั้น โลหะชนิดอื่น นอกเหนือไปจากทองคำ ก็สามารถแสดงปรากฏการณ์เชิงแสง ในลักษณะเดียวกันนี้ได้เช่นกัน เช่น อนุภาคเงินนาโน จะมีสีเหลืองเข้ม แทนที่จะเป็นสีเงินวาว โลหะส่วนใหญ่ จะมีความถี่เรโซแนนต์ อยู่ในช่วงใกล้รังสียูวีซึ่งอยู่นอกสเปกตรัม ของช่วงแสงที่มองเห็น [37] เมื่อวัตถุมีขนาดเกรนของวัตถุอยู่ในระดับนาโนเมตรแล้ว คุณสมบัติอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นแปลกไปจากเดิม คือช่วงสเปกตรัมที่ถูกดูดกลืนของวัสดุนาโน โดยช่วงความยาวคลื่นของแถบดูดกลืนของวัสดุนาโนจะเป็นช่วงความยาวคลื่นที่สั้นลงกว่าเดิม คือมีแนวโน้มไปสู่ช่วงแถบสเปกตรัมสีน้ำเงินและพบว่าช่วงความยาวคลื่น ที่ถูกดูดกลืนนี้แปรผันตรงตามขนาดของวัสดุนาโน



รูปที่ 2.7 กระบวนการสั่นของพลาสมอน (Plasmon oscillation) สำหรับอนุภาคทรงกลม [38]

รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการสั่นของพลาสมอน แสดงให้เห็นการกระจัดของกลุ่มประจุอิเล็กตรอน (Conduction charge cloud) สัมพันธ์กับนิวเคลียสเมื่อได้รับแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนอิสระจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นพ้อง โดยความถี่ของการสั่นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron density) มวลสัมพัทธ์อิเล็กตรอน (Effective electron mass) ขนาดรูปร่างของการกระจายของประจุ (Charge distribution) สำหรับการสั่นของอิเล็กตรอนสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก เรียกว่า ไดโพล พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Dipole plasmon resonance) ซึ่งจะแตกต่างจาก พลาสมอน เอกซ์ไซเตชัน (Plasmon excitation) ของโลหะแบบก้อน (Bulk metal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ตัวรับรู้เชิงแสงของอนุภาคนาโน (Nanoparticle as optical sensor)

เซนเซอร์เชิงแสง (Optical sensors) เป็นหลักการหนึ่งของนาโนเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างกว้างขวางและประยุกต์ใช้งานในวงการอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการควบคุมคุณภาพ, การติดตามสิ่งแวดล้อมหรือความปลอดภัย เช่น สารเคมีที่สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตเป็นอาวุธในการทำสงครามได้หรือใช้ติดตามระบบความปลอดภัยในครัวเรือน เซนเซอร์เชิงแสงเป็นหลักการฟลูออเรสเซนซ์ที่ถูกจับอยู่ในอนุภาคนาโนของพอลิอะคริลเอไมด์ และใช้สำหรับการตรวจวัดพีเอช ฟลูออเรสเซนซีโมเซนเซอร์ประกอบด้วยโมเลกุลของซีสเตรทอย่างน้อยหนึ่งหน่วยและโฟโตแคทไฟคอมโพเนนท์ ลูมินเอสเซนส์ฟิโนมีโนนเป็นกระบวนการที่ฟลูออโรฟอร์ [39] เกิดการดูดกลืนแสงของความยาวคลื่นที่แน่นอน ซึ่งตามด้วยการคายแสงของควอนตัมของแสงที่มีพลังงานต่างกันระหว่างสถานะพื้นและสถานะกระตุ้น ในช่วงไม่กี่ปีมานี้คุณสมบัติของอนุภาคเงินในระดับนาโนได้ถูกนำมาศึกษาอย่างมากในเรื่องของความพิเศษเชิงแสง, ตัวรับรู้และคุณสมบัติในการต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ ขณะที่เทคนิคการใช้แสงในการตรวจวัดโมเลกุลของสิ่งมีชีวิตที่มีความไวสูง (Surface enhance raman scattering, SERS) มีความน่าจะเป็นไปได้มากสำหรับการประยุกต์ใช้ของอนุภาคเงินในระดับนาโน ตัวรับรู้วิธีอื่นที่มีการพัฒนาด้วยหลักการทั่วไปโดยการกระจายของสเปกตรัมของสารละลายอนุภาคเงิน แม้ว่าสารละลายอนุภาคนาโนมีขีดจำกัดในการตรวจวัดต่ำมากแต่ยังสามารถสร้างตัวรับรู้โดยใช้อนุภาคนาโนบนแผ่นฟิล์มบางได้ คุณสมบัติของตัวรับรู้อนุภาคนาโนเมื่อทำการประกอบเป็นแผ่นฟิล์มบางมีการประเมินผลสำหรับทองเท่านั้นและประเภทตัวทำละลาย, สารเคมีค่อนข้างจำกัดมาก สำหรับปฏิริยาระหว่างตัวทำละลายและโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการหุ้มแบบชั้นต่อชั้นยังไม่ได้ทำการตรวจสอบฟิล์มบางนาโนโลหะของเงินถูกรายงานโดยรับเบอร์ เอท ออล แต่มีเป้าหมายการใช้งานสำหรับการออกแบบพื้นผิวที่ต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย ไม่มีการรายงานค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวรับรู้อนุภาคนาโนที่ถูกฝังลงไปในเรื่องพอลิเมอร์แต่ระบบนี้การพองของเนื้อพอลิเมอร์ไม่มีการเชื่อมโยงกันของอนุภาคนาโนและการเปลี่ยนแปลงสี [40]

## 2.5 พรอท (Hg ; Mercury)

### 2.5.1 ข้อมูลทั่วไป

ชื่อ พรอท (Mercury)	ชื่ออื่น Quicksilver, Liquid silver
สัญลักษณ์อะตอม Hg	น้ำหนักอะตอม 200.59 amu

พรอทเป็นโลหะ มีสีขาวคล้ายเงิน ที่อุณหภูมิห้องเป็นของเหลว พรอทในธรรมชาติมีหลายรูปแบบมักพบปะปนอยู่กับธาตุอื่นในแร่ ถูกนำมาใช้ในการใช้ประโยชน์ในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมและมาตรวัดต่าง ๆ เช่น เทอร์มิสเตอร์ บาโรมิเตอร์ โดยอาศัยสมบัติความเสถียรการไหลได้ ความถ่วงจำเพาะสูง และสมบัติการนำไฟฟ้า [41] อีกทั้งตัวกรองอากาศของระบบแอร์,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบดเดอรี, หนังสือพิมพ์, ยารักษาโรค, สารเคมี, ยาฆ่าแมลง, หลอดไฟนีออน, ครีมบำรุงผิว และ อื่นๆ อีกมากมาย

### 2.5.2 การปนเปื้อนของสารปรอท

เนื่องจากสมบัติของสารปรอทที่ระเหยง่าย ทำให้สามารถปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมและธรรมชาติ อาทิ แหล่งน้ำ และพื้นดินได้หลายทาง เมื่อปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม แบคทีเรียสามารถเปลี่ยนรูปของปรอทอินทรีย์ให้กลายเป็นปรอทอินทรีย์และสะสมตัวในสัตว์น้ำได้ การระบาดของสารปรอทส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการรับประทานอาหารและน้ำดื่ม พิษของสารปรอทจะร้ายแรงต่อสุขภาพแค่นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปแบบทางเคมีของสารปรอท ปริมาณของปรอท ระยะเวลาที่ได้รับ และวิธีที่ได้รับ อาทิ หายใจ รับประทานและสัมผัสทางผิวหนัง

### 2.5.3 พิษรูปแบบทางเคมีของปรอท

เมทิลเมอร์คิวรี จะมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกัน การเปลี่ยนแปลงพันธุกรรม ระบบการทำงานของเอนไซม์ ทำลายระบบประสาท รวมถึงระบบประสาทสัมผัส

โลหะปรอท เมื่อได้รับไอของปรอททางการหายใจเป็นระยะเวลานานจะทำให้เกิดอาการสั้น ประสาทกล้ามเนื้อ และการตอบสนองของระบบประสาทเปลี่ยนแปลง หากได้รับในปริมาณที่มากจะมีผลกระทบต่อไต ระบบการหายใจ และอาจถึงตายได้

สารประกอบอื่นๆของปรอท หากรับประทานเข้าไปจะทำลายกระเพาะและลำไส้ ระบบประสาท และการทำงานของไต [42]

### 2.5.4 โรคมินามาตะ

ในปี ค.ศ. 1955 เกิดโรคมินามาตะ บริเวณอ่าวมินามาตะ ประเทศญี่ปุ่น สาเหตุเกิดจากการปล่อยน้ำเสียของโรงงานพลาสติกที่มีสารปรอท ปนเปื้อนลงสู่อ่าวมินามาตะ ทำให้สารดังกล่าวถูกสะสมอยู่ในตัวปลา เมื่อชาวบ้านนำมาบริโภค ปรอทจากสัตว์น้ำ จึงสะสมในร่างกายของชาวบ้าน จนถึงปริมาณที่เป็นอันตราย โดยตรวจพบมากบริเวณเนื้อเยื่อไต เส้นผมและเลือด อาการเมื่อพบสารปรอทสะสมอยู่ในร่างกายมาก คือ มือ เท้า ริมฝีปากชา ม่านตาหรี่เล็ก หงุดหงิด กระวนกระวาย พูดช้าไม่เป็นภาษา ประสาทรับเสียงมีปัญหา กล้ามเนื้อแขนขาไม่สัมพันธ์กัน ควบคุมตัวเองไม่ได้ และเป็นอัมพาตในที่สุด [43]

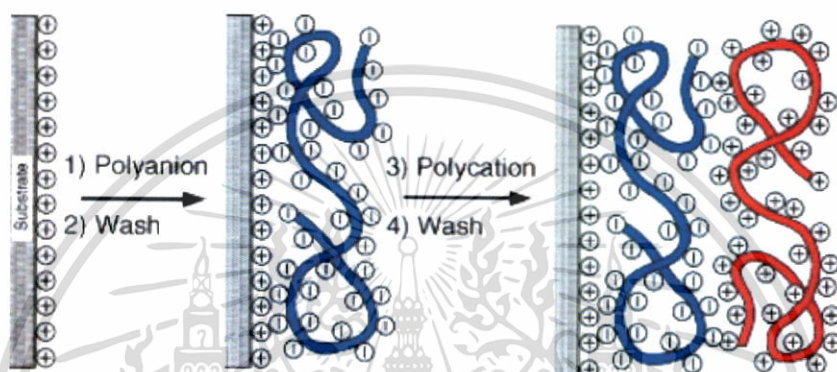
### 2.5.5 ค่ามาตรฐานความปลอดภัย

ตามประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี) กำหนดให้ปริมาณความเข้มข้นสูงสุด ในสิ่งแวดล้อมที่ยอมให้มีได้ไม่ว่าระยะเวลาใดของการทำงานปกติ ต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

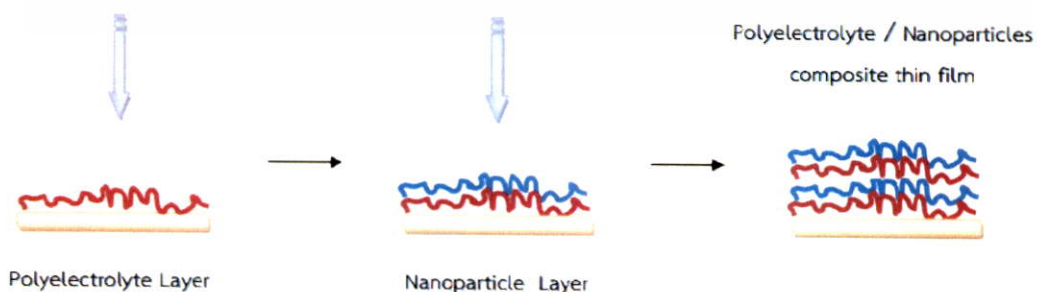
เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) เป็นการสร้างฟิล์มบางโดยวิธีการประกอบแบบชั้นต่อชั้น ฟิล์มถูกสร้างขึ้นโดยการทับถมของวัสดุที่มีประจุต่างกันสลับกัน โดยดีเทอร์ นำเสนอวิธีที่ง่าย ๆ โดยการสลับประจุที่ตรงข้ามกันคือ ประจุบวก และประจุลบ และทำการล้าง ในระหว่างการสลับประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 การนำเสนอที่สำคัญของการสร้างฟิล์มบางโดยการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) คือการสร้างฟิล์มหลายๆชั้นขึ้นตามกลไกการเกิดไฟฟ้าสถิต [45-47]



รูปที่.2.8 วิธีการสร้างฟิล์มบางโพลีอิเล็กโทรไลต์โดยการสลับประจุบวก และประจุลบ [48]

เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) มีข้อดีหลากหลาย สามารถทำได้ง่ายและมีราคาที่ไม่แพง สามารถเลือกใช้วัสดุได้หลากหลายชนิดที่สามารถประกอบกันรวมไอออน โดยเทคนิคการประกอบแบบชั้นต่อชั้น เช่น โลหะ เซรามิกซ์ อนุภาคนาโน และชีวโมเลกุล

ฟิล์มบางโพลีอิเล็กโทรไลต์สามารถรวมเข้าด้วยกันได้กับ โปรตีน พอลิเมอร์นำไฟฟ้า และอนุภาคนาโน มีการประกอบกันแบบชั้นต่อชั้นของ อนุภาคนาโน โดย Kotov et al. เป็นผลงานความสำเร็จแรกของการประกอบกันของ PDADMAC และ อนุภาคแคดเมียมในระดับนาโน (CdS nanoparticles) เข้าสู่ฟิล์มบาง



รูปที่.2.9 การประกอบกันแบบชั้นต่อชั้นของอนุภาคนาโนโดยการเคลือบตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

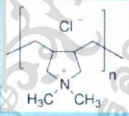
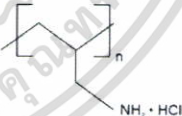
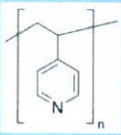
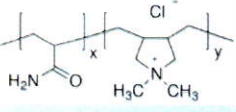
จากรูปที่ 2.9 แสดงการสร้างฟิล์มบางของอนุภาคโลหะในระดับนาโนโดยเทคนิคการประกอบแบบชั้นต่อชั้น โดยการทับถมของชั้นโพลีอิเล็กโทรไลต์และตามด้วยอนุภาคโลหะในระดับนาโนที่เตรียมในรูปของสารละลาย อนุภาคโลหะในระดับนาโนที่ทับถมอยู่บนพื้นผิวสามารถเข้าสู่ฟิล์มบางหลายชั้นโดยการทับถมตามลำดับ ด้วยประจุที่ตรงกันข้ามของโพลีอิเล็กโทรไลต์

### 2.6.1 โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte)

โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) คือ กลุ่มของสารโมเลกุลใหญ่ (Macromolecules) เป็นการรวมโพลีแคทไอออนกับโพลีแอนไอออน เป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ กลุ่มอิเล็กโทรไลต์สามารถแตกตัวได้เมื่ออยู่ในของเหลว เกิดเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

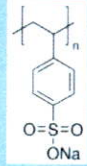
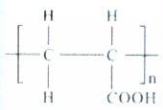
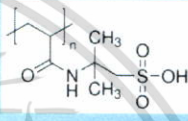
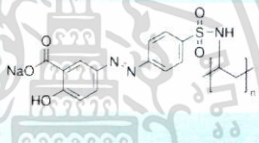
การเกิด PE-PE (Polyelectrolyte-polyelectrolyte) เป็นการเกิดปฏิกิริยาโดยการผสมพอลิเมอร์ที่มีประจุตรงกันข้าม และละลายในตัวทำละลายที่เป็นน้ำเข้าด้วยกัน การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน จะเกิดขึ้นด้วยตนเอง (Spontaneous formation) ขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วงไมโครจนถึงนาโนเมตร [49]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุบวก (Polycation) [50]

ชื่อโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุบวก (Polycation)	โครงสร้าง
Poly (diallyldimethyl-ammonium)chloride (PDADMAC)	
Poly (allylamine hydrochloride) (PAH)	
Poly (4-Vinyl Pyridine) (P4VP)	
Poly (acrylamide-co-diallyldimethylammonium chloride)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุลบ (Polyanion) [50]

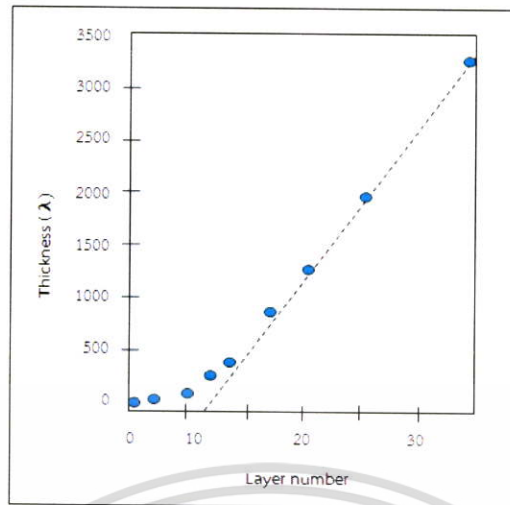
ชื่อโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุลบ (Polyanion)	โครงสร้าง
Poly(so-dium 4-strenesulfonate) (PSS)	
Polyacrylic acid (PAA)	
Poly (2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid) (PAMPS)	
Poly [1-[4-(3-carboxy-4-hydroxyphenylazo) benzenesulfonamido]-1,2-ethanediy], sodium salt] (PAZO)	

## 2.7 ตัวแปรที่ทำการควบคุมโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Parameter to control Polyelectrolyte)

ตัวแปรที่ต้องทำการควบคุมในการสร้างฟิล์มบางแบบชั้นต่อชั้น คือ การเปลี่ยนแปลงของจำนวนชั้น (Number of Layer), เวลาในการจุ่ม (Dipping time) และ ค่าความแรงไอออน (Ionic strength)

### 2.7.1 จำนวนชั้น (Number of Layer)

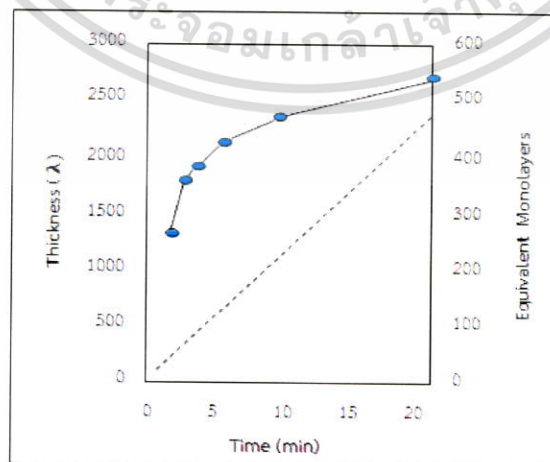
ความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์และเวลาในการจุ่มจะต้องคงที่ แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและจำนวนชั้น จะสามารถเห็นการทับถมของจำนวนชั้นหลังจากมีการทับถมกันมากขึ้นหลังจาก 6-8 ชั้นเล็กน้อย เพราะที่ 6-8 ชั้น ความหนาของการจุ่มโพลีอิเล็กโทรไลต์แต่ละรอบจะยังคงที่อยู่ การเพิ่มขึ้นของความหนาเมื่อความสัมพันธ์ของระบบตัวแปรคงที่และ ถ้ารักษาระบบตัวแปรให้คงที่ได้ ก็จะสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้เช่นกัน [40]



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและจำนวนชั้นของ PSS/PDADMAC

### 2.7.2 เวลาในการจุ่ม (Dipping Time)

เวลาในการจุ่ม (Dipping Time) เป็นการควบคุมเวลาในการจุ่มเพราะว่า การดูดซับของ โพลีอิเล็กโทรไลต์ฟิล์มบางสัมผัสกับน้ำจะถูกควบคุมโดยเวลาของการแพร่กระจายซึ่งมีบทบาทที่สำคัญในการสร้างฟิล์มหลายชั้น เมื่อได้พื้นผิวที่มีประจุลบแล้วนำไปจุ่มในโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่เป็น ประจุบวกจะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต ที่เพียงพอให้เกิดคอมเพล็กซ์ระหว่างพื้นผิวโพลีอิเล็กโทรไลต์และ ประจุของโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ตรงกันข้ามในสารละลาย ในระหว่างการทับถมที่เกิดขึ้น ประจุบนพื้นผิว จะมีประจุที่น้อยและประจุบวกมากเปรียบเสมือนการดูดซับของโพลีแคทไอออนิก โพลีอิเล็กโทรไลต์ที่บนพื้นผิว เมื่อพื้นผิวถูกเคลือบเสร็จสิ้นด้วยโพลีแคทไอออนิก โพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ดูดซับของโพลีอิเล็กโทรไลต์ใหม่จะถูกหยุดเพราะว่า เกิดไฟฟ้าสถิตขึ้น กลไกนี้อธิบายกระบวนการถูกจำกัดด้วยมันเองซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการประกอบฟิล์มหลายชั้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์ [40]



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาจุ่มของ PSS/PDADMAC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการจุ่มของโพลีเอ็กโพลีโพรไพลีนที่มีประจุตรงข้ามกัน PSS/PDADMAC เพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มบางก็จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆเกิดจากการทับถมกันที่เพิ่มขึ้นของโพลีเอ็กโพลีโพรไพลีนที่มีประจุตรงข้ามกันด้วยปฏิกิริยาการเกิดไฟฟ้าสถิต

### 2.7.3 ค่าความแรงไอออน (Ionic strength)

ตัวแปรสุดท้ายที่ทำการควบคุมความหนาของการประกอบฟิล์มหลายชั้นโดยการทับถมแบบชั้นต่อชั้นของโพลีเอ็กโพลีโพรไพลีนหลายชั้นคือ ค่าความแรงของไอออน (Ionic strength) การเพิ่มความแรงไอออน ส่งผลต่อการเกิด PE-PE กล่าวคือเมื่อความแรงของไอออนเพิ่มขึ้น การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนชนิดไม่ละลายน้ำจะมีมากขึ้น จากการศึกษาของ เฟรดเฮียม และคริสเตนเซน พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด PE-PE ระหว่างลิกโนซัลโฟเนต-โคโตแซน ได้แก่ ความเป็นกรดต่าง, สัดส่วนของการผสม, น้ำหนักโมเลกุลของลิกโนซัลโฟเนต และอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา สำหรับการเปลี่ยนความแรงไอออนิกโดยการเติมเกลือเข้าไบนั้นสามารถปรับอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตในสารละลายโพลีเอ็กโพลีโพรไพลีนได้ โดยที่ อันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตจะอ่อนลงเมื่อมีการเติมเกลืออนินทรีย์ลงไปในสารละลาย เช่น การเติม อะคริลาไมด์ (Acrylamide) ซึ่งมีประจุบวกลงไป ใน โซเดียมโพลีสไตรีนซัลโฟเนต หรือ โซเดียมโพลีเมทาคริเลต ซึ่งมีประจุลบ และเติมเกลือลงไปปริมาณเล็กน้อย จะทำให้ลดการเกิด PE-PE เนื่องจากการเกิด PE-PE เป็นการสร้างพันธะระหว่างพอลิเมอร์และเกลือมากกว่าการสร้างพันธะระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ สัดส่วนในการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิด PE-PE หากผสมพอลิเมอร์ที่มีประจุชนิดหนึ่งมากเกินไป ลักษณะสารประกอบเชิงซ้อน ที่ได้จะเป็นอยู่ในรูปที่เป็น สารประกอบปริมาณไม่สัมพันธ์ (Non-stoichiometric) และถ้าหากผลต่างของประจุทั้งสองชนิดของพอลิเมอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ ลักษณะสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จะอยู่ในรูป สารประกอบปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric) ที่อยู่ในรูปไม่ละลายน้ำ และตกตะกอนออกมา [49]

## 2.8 การพิสูจน์เอกลักษณ์ (Characterization)

### 2.8.1 ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-visible spectrophotometry)

ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-visible spectrophotometry) เป็นเทคนิคหนึ่งทางสเปกโตรสโคปี ซึ่งจะศึกษาถึงการดูดกลืนแสงของสารละลาย เป็นการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้ม (Intensity) ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ

โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ทั้งที่มีสีและไม่มีสีที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสง

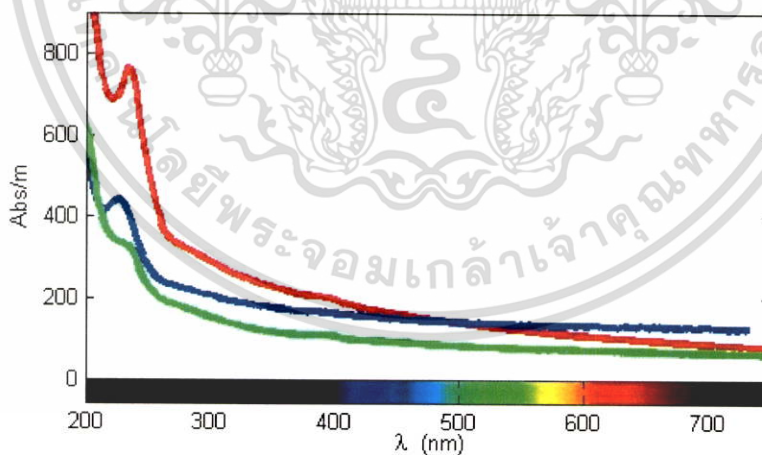
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของเบียร์ แลมเบิร์ต ดังสมการ (2.1)

$$\text{Abs} = \epsilon \times b \times c \quad (2.1)$$

เมื่อ	Abs	คือ	ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (Absorbance)
	$\epsilon$	คือ	ค่าคงที่ของการดูดกลืนแสงของสารละลายเข้มข้น 1 โมล/ลิตร
	b	คือ	ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง หรือความกว้างของเซลล์ (cm)
	c	คือ	ความเข้มข้นเป็น โมล/ลิตร หรือโมลาร์ (M)

จากสมการที่ (2.1) เป็นการรวมกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตเข้าด้วยกัน สำหรับรังสีที่เป็นรังสีชนิดลำแสงขนาน (Parallel beam) และความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic radiation) ที่ผ่านตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous solution) ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (Absorbance) จะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของตัวอย่าง (Concentration) และระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (Pathlength)



รูปที่ 2.12 ยูวี-วิซิเบิลสเปกตรัม (UV-vis spectrum) [51]

จากรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่าสเปกตรัม (Spectrum)

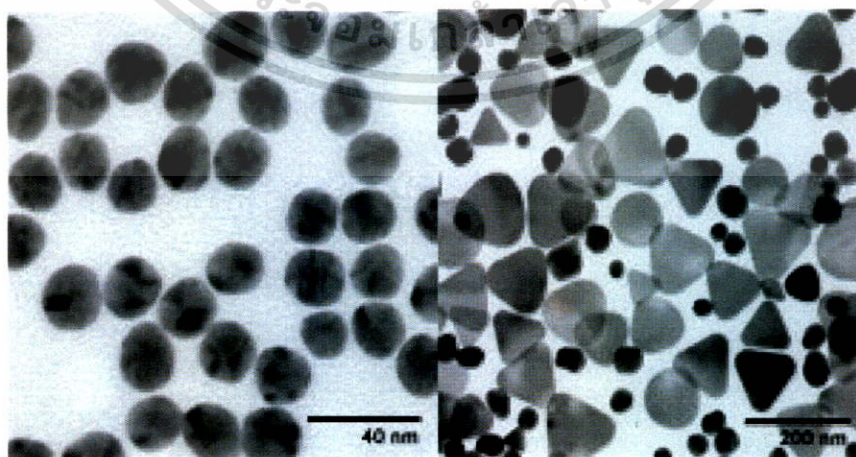
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุนิตและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ในที่นี้จะใช้เพื่อแสดงให้เห็นถึงแถบการดูดกลืนแสง (Plasmon band) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและแผ่นฟิล์มอนุภาคนาโนรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมบางนาโน

## 2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Transmission electron microscopy)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Transmission electron microscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง ซึ่งจะให้รายละเอียดสูง เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1นาโนเมตร) TEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา (Specimen) ไป ซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก (บ่อยครั้งที่พบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป และอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด

จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอรับ (Projector lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากรังแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้ ดังนั้นแล้วการศึกษารูปร่างของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนจึงใช้ TEM ในการตรวจสอบ



รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายอนุภาคเงินในระดับนาโนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (TEM) [52]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายของอนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยกำลังขยาย 40 นาโนเมตร และภาพถ่ายของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนด้วยกำลังขยาย 200 นาโนเมตร จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (TEM)

### 2.8.3 ศักย์ซีต้า (Zeta potential)

ศักย์ซีต้า (Zeta potential) คือ ความแตกต่างของประจุไฟฟ้าระหว่างชั้นความหนาแน่นของไอออนที่อยู่รอบๆอนุภาคและประจุในของเหลวที่อยู่ล้อมรอบ เพื่อบอกแนวโน้มว่าอนุภาคจะมีการเกาะตัวกันเป็นก้อนหรือไม่ อนุภาคเกิดขึ้นในกระบวนการโคแอกกูเลชันฟล็อกคูเลชัน (มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์) การวัดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อทำให้อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า โดยใช้ Laser doppler velocimetry ค่าศักย์ซีต้าขึ้นกับค่าพีเอช ซึ่งอนุภาคแขวนลอยจะเสถียรเมื่อศักย์ซีต้ามักมีค่ามากกว่า +30 มิลลิโวลต์ หรือน้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ สภาวะที่ค่าพีเอชต่ำ (กรด) จะให้ค่าศักย์ซีต้าสูงกว่าสภาวะที่ค่าพีเอชสูง (เบส) ถ้าศักย์ซีต้ามักอยู่ในช่วง -30 ถึง 30 มิลลิโวลต์ หรือประมาณศูนย์ สารแขวนลอยจะไม่เสถียร จะมีการเกาะตัวกันเป็นก้อนและตกตะกอน เรียกจุดที่ศักย์ซีต้าเท่ากับศูนย์ว่า “Isoelectric point” [53]

### 2.8.4 พูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy)

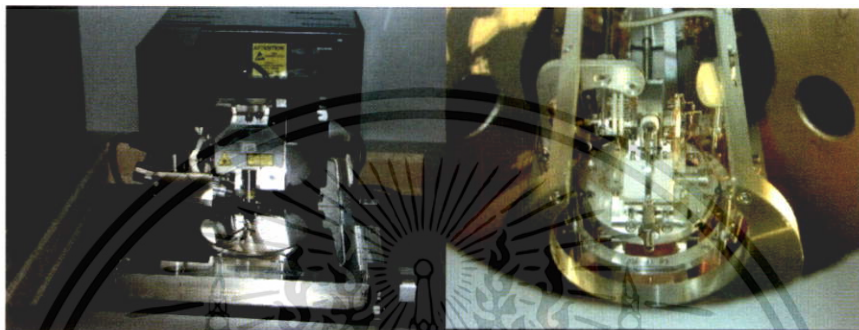
ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy) หรือ FTIR เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่ยิยมใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบและศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร การทำคุณภาพวิเคราะห์ใช้สำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น ยาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ เป็นต้น FTIR spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ  $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$

ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR ( $4000-200 \text{ cm}^{-1}$ ) เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum ในที่นี้ FTIR จะถูกใช้ในการพิสูจน์โครงสร้างของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน [54-55]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.5 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy) เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน (Scanning probe microscopy หรือ SPM) ประเภทหนึ่งที่สามารถใช้ในการถ่ายภาพวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร หรือถ่ายภาพอะตอมของสสารได้ โดยที่กล้อง AFM จะมีลักษณะการทำงานที่พิเศษเฉพาะตัวคือจะใช้หัวอ่านขนาดเล็กวัดแรงผลึกและแรงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิวของวัตถุ เพื่อมาสร้างเป็นภาพของพื้นผิวของวัตถุนั้นได้



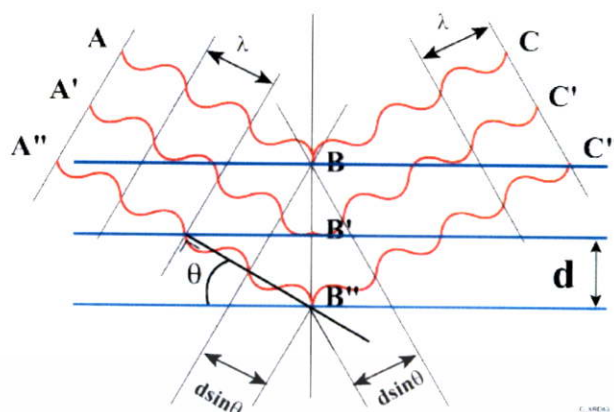
รูปที่ 2.14 เครื่อง Atomic force microscope [56]

โดยที่กล้อง AFM สามารถนำมาใช้ในการถ่ายภาพขยายในระดับนาโนเมตรของวัตถุที่นำไฟฟ้าและวัตถุที่ไม่นำไฟฟ้าลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ แผ่นฟิล์มบาง คอลลอยด์ อนุภาคนาโนในเครื่องสำอางค์ เซลล์แบคทีเรีย ชิ้นงานที่เป็นผงระดับนาโน โดยมีขนาดชิ้นงานไม่เกิน  $2 \times 2$  เซนติเมตร หนาไม่เกิน 1 เซนติเมตร ความขรุขระ ไม่เกิน 4 ไมโครเมตร และ ขนาดภาพสแกนใหญ่ไม่เกิน  $100 \times 100 \times 4$  เซนติเมตร (กว้าง ยาว สูง) โดยสามารถบอกความสูง-ต่ำของพื้นผิวในรูปแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่ AFM จะสามารถใช้ในการดูลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนได้ [57]

### 2.8.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-ray diffraction (XRD)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆโดยจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray โดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิดปริมาณคุณภาพของสารประกอบแบบผลึกต่างๆในชิ้นงานได้โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบดังรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก [58]

จากรูปที่ 2.15 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg's law ดังสมการที่ (2.2)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.2)$$

โดยที่  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์  
 $n$  คือ ลำดับการสะท้อน  
 $2d_{hkl}$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

จากสมการที่ (2.2) โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึก ที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ตัวตรวจวัดสัญญาณ รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ

สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาลำดับของระนาบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย และยังสามารถทำการวิเคราะห์ องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย โดยในที่นี้จะใช้ XRD ในการตรวจสอบแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน [58-59]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.7 ทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle)

มุมสัมผัส (Contact angle) คือมุมระหว่างหยดของของเหลววัดเทียบกับผิววัสดุ ณ จุดที่ผิวทั้งสองเกาะติดกัน และนักวิทยาศาสตร์ใช้มุมนี้เป็นเกณฑ์แบ่งการเปียกของเหลวบนของแข็งว่าเปียกได้ดีหรือไม่ดี เกณฑ์มีดังนี้

1. มุมสัมผัสเท่ากับ 0 องศา คือการเปียกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ เมื่อของเหลวถูกหยดลงบนผิว ของเหลวจะกระจายไปตามผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบางๆ ครอบคลุมผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้างที่สุด
2. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 90 องศา คือ เกิดการเปียกได้ดี ของเหลวจะกระจายไปบนผิวได้เป็นบริเวณกว้าง แต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดนูนขึ้นเล็กน้อยจากผิวของของแข็ง
3. มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 90 แต่ไม่ถึง 180 องศา เรียกว่าผิวเปียกยาก คือของเหลวจะรวมกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลม จะมีบริเวณเล็กๆ ที่ฐานของหยดที่ของเหลวยังคงแตะกับผิวของแข็ง
4. มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 180 องศา เรียกว่า ผิวไม่เปียก เกิดขึ้นเมื่อแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ ดังนั้นเหลวจะรวมกันเป็นหยดทรงกลม บริเวณที่ของเหลวแตะกับผิวของแข็งจะอยู่ที่ฐานของทรงกลม ซึ่งเล็กมากจนแทบจะเป็นจุด เมื่อเป็นแบบนี้ ของเหลวสามารถลื่นไปมาบนผิวได้อิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นเรียบ [60-61] โดยในที่นี้จะใช้ในการทดสอบมุมสัมผัสของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

### 2.8.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope) หรือ FESEM เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัย และการผลิตภาคอุตสาหกรรม FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectrometer ; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้ อีกทั้ง FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือหัววัดอื่นๆ เพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป เช่น เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของผลึกโดยใช้สัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Electron backscatter diffraction; EBSD) นอกจากนี้ FESEM ยังสามารถประยุกต์โดยเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์ควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้เขียนลวดลายขนาดเล็กลงบนชิ้นงาน (Electron beam lithography) จะเห็นได้ว่า FESEM เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นต่อการศึกษาวิจัย ด้วยกำลังขยายที่สูง และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายและครอบคลุมการศึกษาวิจัยในระดับจุลภาค [62]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.9.1 การตรวจวัดไอโอดีนด้วยวิธีเปรียบเทียบสีที่มีความแม่นยำและความไวสูงโดยใช้ซิลเวอร์นาโนเพลทรูปร่างสามเหลี่ยมเพื่อหาคริติคอลคัลเลอร์ในกระบวนการเปลี่ยนสี (A colorimetric method for highly sensitive and accurate detection of iodide by finding the critical color change process using silver triangular nanoplates)

ชีวะ-หวั หยาง และคณะ [33] ศึกษาการตรวจวัดไอโอดีนด้วยวิธีเปรียบเทียบสีที่มีความแม่นยำและความไวสูงโดยใช้ซิลเวอร์นาโนเพลทรูปร่างสามเหลี่ยมเพื่อหาช่วงสีในกระบวนการเปลี่ยนสีด้วยการใช้ซีเตรทเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ทำการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนเพลทรูปร่างสามเหลี่ยมด้วยการใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.1 mM, ไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 30 mM, และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 %wt ผสมกันโดยใช้สเตอริออร์ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้น 100 mM 250  $\mu$ L จะได้คอลลอยด์ของนาโนเพลทที่มีสีน้ำเงินและจะเกิดการรวมตัวของซิลเวอร์นาโนเพลทไปเป็นอนุภาคนาโน จากนั้นนำไปใช้ในการตรวจวัดไอโอดีน

ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้ยูวี-วิสิเบิล แอปซอร์พชัน สเปกโทรสโกปี และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน จากผลการทดลองพบว่า ไอโอดีนที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆ สามารถทำให้สารละลายซิลเวอร์นาโนเพลทรูปร่างสามเหลี่ยมเกิดการเปลี่ยนสีได้ โดยจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปจนถึงสีเหลือง จากการใช้วิธีเปรียบเทียบสีโดยการหาคริติคอลคัลเลอร์ในกระบวนการเปลี่ยนสีนี้ พบว่าไอโอดีนที่มีความเข้มข้น 0.1  $\mu$ M จะสามารถเห็นสีที่เกิดขึ้นได้ภายใน 30 นาทีโดยการสังเกตด้วยตาเปล่า และไอโอดีนที่มีความเข้มข้นต่ำลงไปจนถึง 8.8 nM สามารถตรวจวัดได้โดยการใส่สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ นอกจากนี้วิธีวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบสีที่มีความไวสูงนี้ยังให้ความแม่นยำ (Accuracy), เสถียรภาพ (Stability) และความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) ที่ดีเมื่อเทียบกับวิธีเปรียบเทียบสีตามปกติ และเชื่อว่าวิธีเปรียบเทียบสีใหม่นี้จะเป็นส่วนในการค้นพบการตรวจวัดไอโอดีนเชิงลึกที่มีความง่าย ไม่ยุ่งยาก รวดเร็ว และมีความน่าเชื่อถือ อีกทั้งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการวิเคราะห์ทางชีวเคมีหรือการวินิจฉัยทางคลินิกได้ในอนาคต

### 2.9.2 การเตรียมฟิล์มบางของอนุภาคนาโนซิลเวอร์สำหรับการประยุกต์ทางการรับรู้

#### (Preparation of silver nanoparticle thin films for sensing application)

สเตฟาน เทียร์ ดูเบส [40] ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางของอนุภาคนาโนซิลเวอร์สำหรับการประยุกต์ทางการรับรู้ โดยการทำตัวรับรู้ที่เตรียมจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ทำเป็นแผ่นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นด้วยหลักการจุ่มทั่วไป ทำการเตรียมอนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยใช้ซิลเวอร์ไนเตรต, โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ และใช้โพสลิเล็กโทรไลต์เป็นตัวรักษาเสถียรภาพ จากนั้นเตรียมแผ่นฟิล์มบางของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น ใช้โพสลิเล็กโทร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไลท์เพื่อทำให้เกิดการทับถมของแผ่นฟิล์มบาง โดยทำการจุ่มในสารละลายโพลีแคทไอออนิกคือ PDADMAC 2 นาที่ จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน 1 นาที่ แล้วนำไปจุ่มในสารละลายโพลีแอนไอออนิกพอลิเมอร์ 2 นาที่ ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนอีก 1 นาที่ ทำแบบนี้สลับกันไปจนได้จำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางที่ต้องการ

แผ่นฟิล์มบางที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวรับรู้เชิงแสงสำหรับการตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ คุณสมบัติตัวรับรู้ของแผ่นฟิล์มนี้ใช้คุณสมบัติทางแสงที่พิเศษของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่แสดงผลประมาณ 400 นาโนเมตร ซึ่งตัวรับรู้จะถูกนำไปทดสอบครั้งแรกในสารละลายที่มีสารประกอบอินทรีย์ได้แก่ เมทานอล,เอทานอล, โพรพานอลและอะซิโตน อนุภาคนาโนที่ถูกเตรียมจากสารละลายที่มีจำนวนโพลีอิเล็กโทรไลท์ต่ำสุดจะแสดงผลสเปกตรัมในช่วงสีแดง ซึ่งต่างจากอนุภาคนาโนที่เตรียมจากสารละลายที่มีโพลีอิเล็กโทรไลท์สูงสุด สเปกตรัมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากผลของไฮโดรโฟบิกของการเคลือบด้วยโพลีอิเล็กโทรไลท์ แถบการดูดกลืนแสงจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคนาโนถูกประกอบจากโพลีอิเล็กโทรไลท์ 0.5 mM สุดท้ายตัวรับรู้เชิงแสงโดยการประกอบฟิล์มบางของอนุภาคนาโน นำไปทดสอบอีกครั้งด้วยเมทานอลและเอทานอล โดยฟิล์มบางที่เตรียมจากอนุภาคนาโน 0.1 mM จะตอบสนองได้ไวต่อการเพิ่มขึ้นของเมทานอลหรือเอทานอล

### 2.9.3 การสังเคราะห์ทางเคมีและความสามารถในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีรูปร่างใหม่ๆ (Chemical synthesis and antibacterial activity of novel-shaped silver nanoparticles)

พาร์ม แวน ดอง และคณะ [63] ศึกษาการสังเคราะห์ทางเคมีและความสามารถในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีรูปร่างใหม่ๆ ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันโดยวิธีทางสารละลาย และศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดกับ E.coli โดยเตรียมอนุภาคนาโนรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน ด้วยวิธีการเกิดรีดักชันของซิลเวอร์ในเตรตที่อุณหภูมิห้อง อันเป็นผลมาจากโพลีไวนิลไพโรลิโดน, โซเดียมซิเตรต, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโซเดียมโบโรไฮไดรด์ เตรียมอนุภาคนาโนรูปร่างกลมในระดับนาโนได้จากซิลเวอร์ในเตรตเป็นโลหะตั้งต้น, โซเดียมซิเตรตรวมทั้งใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์

ทำการศึกษาคณะลักษณะเฉพาะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างของอนุภาคนาโนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน , ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปีและการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ผลที่ได้คืออนุภาคนาโนรูปร่างกลมในระดับนาโนมีขนาดเฉลี่ยแตกต่างกัน คือ 4, 21, และ 40 นาโนเมตร อนุภาคนาโนรูปร่างปริซึมในระดับนาโนมีรูปแบบระนาบผิวนิกเป็น {111} มีขนาดอยู่ในช่วง 25 – 400 นาโนเมตร เมื่อนำไปทดสอบการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียนั้น อนุภาคนาโนรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่มีระนาบผิวนิกเป็น {111} มีคุณสมบัติต่อต้านเชื้อแบคทีเรียได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนที่มีรูปร่างกลม และอนุภาคนาโนรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่มีขอบคมและจุดยอดที่คมนี้มีผลในการต่อต้านแบคทีเรียได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนรูปร่างอื่นๆ ดังนั้น การสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างเงินระดับนาโนเกี่ยวกับสัณฐานใหม่นี้ จึงได้รับความสนใจ สำหรับการสร้างเป็นวัสดุต่อต้านแบคทีเรีย

#### 2.9.4 การเกิดออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของธาตุเงินและผลของการเกิด ปฏิกริยาระหว่างอนุภาคเงินในระดับนาโน, ไอออนของเงินและปฏิกิริยาของออกซิเจน ( $H_2O_2$ -Mediated oxidation of zero valent silver and resultant interactions among silver nanoparticles, silver ions, and reactive oxygen species)

โด ฮี และคณะ [64] ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของธาตุเงิน และผลของการเกิดปฏิกริยาระหว่างอนุภาคเงินในระดับนาโน, ไอออนของเงินและปฏิกิริยาของออกซิเจน อนุภาคเงินในระดับนาโนเริ่มต้นจากการเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นซิลเวอร์ไอออนที่มีประจุบวกและเกิดออกซิเจนที่มีประจุลบ จากนั้นจะทำปฏิกริยากันเกิดเป็นอนุภาคเงินในระดับนาโนผ่านกลไกของอิเล็กตรอนที่มีประจุและไม่มีประจุ

ผลที่ได้ คือ อนุภาคเงินในระดับนาโนที่เกิดจากปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีการแปรผันของพีเอชแตกต่างกันไป โดยการเปลี่ยนแปลงที่ค่าพีเอชสูงมากกว่า 10 ปฏิกริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะแตกต่างกันและเกิดการคอนจูเกตของเบส  $HO_2^-$  กับอนุภาคเงินในระดับนาโน แต่ที่พีเอชต่ำกว่า (3-10) ค่าพีเอชขึ้นกับการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือค่าพีเอชอาจขึ้นกับอัตราของซูเปอร์ออกไซด์ ( $O_2^-$ ) ที่ไม่ได้สัดส่วน อนุภาคเงินในระดับนาโนที่เป็นผลมาจากการรีดักชัน  $Ag^+$  ที่มีซูเปอร์ออกไซด์ ( $O_2^-$ ) เป็นตัวกลางจะมีขนาดและการเกิดปฏิกิริยาที่ต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่ใช้ซีเตรตเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ความถี่ในการหมุนของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่ต่างกันมีความสำคัญมากต่อค่าพีเอช โดยที่พีเอช 11 มีค่าสูงถึง  $1776.0 \text{ min}^{-1}$  ลดลงเป็น  $144.2 \text{ min}^{-1}$  ที่พีเอช 10 และ  $3.2 \text{ min}^{-1}$  ที่พีเอช 3

#### 2.9.5 ตัวรับรู้เชิงสีโดยใช้อนุภาคเงินในระดับนาโนสำหรับการตรวจวัดปรอทที่ง่ายและรวดเร็ว (Selective colorimetric sensors based on the monitoring of an unmodified silver nanoparticles (AgNPs) reduction for a simple and rapid determination of mercury)

ปุริม จารุจรัส และคณะ [65] ศึกษาตัวรับรู้เชิงสีโดยใช้อนุภาคเงินในระดับนาโน สำหรับการตรวจวัดปรอทที่ง่ายและรวดเร็ว โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีขนาด  $8.3 \pm 1.4$  นาโนเมตร ด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี ใช้ซิลเวอร์ไนเตรต, โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ และใช้ไตรโซเดียมซีเตรตเป็นสารรักษาเสถียรภาพ เมื่อได้อนุภาคเงินในระดับนาโนแล้วจึงนำไปตรวจวัดกับสารละลายปรอทที่มีความเข้มข้น 50 ppm โดยผสมลงในสารละลายอนุภาคเงินในระดับนาโน 1.5 mL และน้ำปราศจากไอออน 5 mL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้คือ เมื่อความเข้มข้นของปรอท(II) เพิ่มขึ้น การดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินในระดับนาโนจะลดลงอย่างต่อเนื่องและเปลี่ยนเป็นความยาวคลื่นช่วงสีฟ้า แสดงให้เห็นถึงการเกิดออกซิเดชันของ Ag(0) เป็น Ag(I) ปรากฏว่า อนุภาคเงินในระดับนาโนจะถูกออกซิไดส์โดยปรอท(II) ส่งผลให้อนุภาคเงินในระดับนาโนเกิดการสลายตัวเป็นอนุภาคที่เล็กลง ตลอดจนตัวกลางทำการรีดักชัน Hg(II) เป็น Hg(0) แล้วถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคเงินในระดับนาโน ซึ่งการดูดซับของปรอททำให้พื้นผิวของอนุภาคเงินในระดับนาโนขาดประจุ เนื่องจากการลดลงของประจุลบของโมเลกุลซิเตรตที่ครอบคลุมพื้นผิวนั้นทำให้อนุภาคเงินในระดับนาโนขยายใหญ่ขึ้น จากการทดลองได้ค่า  $r^2 = 0.995$ , ค่า LOD 0.06 ppm ค่าความแม่นยำ 3.24-4.53 โดยเทคนิคที่ศึกษานี้มีความไวรวดเร็วและง่ายสำหรับการตรวจวัดปรอทในตัวอย่างน้ำ

### 2.9.6 ตัวรับรู้เชิงสีสำหรับตรวจวัดไอออนของปรอทโดยใช้การสังเคราะห์สีเขียวและอนุภาคเงินในระดับนาโน (Highly selective Hg<sup>2+</sup> colorimetric sensor using green synthesized and unmodified silver nanoparticles)

คาลิล ฟาฮาดี และคณะ [66] ศึกษาตัวรับรู้เชิงสีสำหรับตรวจวัดไอออนของปรอทโดยใช้การสังเคราะห์สีเขียวและอนุภาคเงินในระดับนาโน ทำการเตรียมอนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยชีววิทยาหรือการสังเคราะห์สีเขียว โดยเติมสารสกัดของรากพืช 10 mL ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 3 mM 100 mL และเก็บในเครื่องเขย่าแบบหมุน 2 ชั่วโมง ในความมืดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมตัวรีดิวซ์ คือสารสกัดของพืชสมุนไพรกลุ่มไฮเดรชัน 15 mL ในส่วนผสมที่อุณหภูมิ 86 องศาเซลเซียส ทำส่วนผสมให้บริสุทธิ์ด้วยการหมุนซ้ำที่ 12,000 rpm 20 นาที จะได้สารละลายอนุภาคเงินในระดับนาโน สำหรับการเปรียบเทียบสีของการตรวจวัดไอออนปรอท ทำการเจือจางสารละลายอนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยน้ำปราศจากไอออน 3 ครั้ง และเติมไอออนโลหะลงไป ได้แก่ Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup>, Hg<sup>+</sup> เป็นต้น

ทำการศึกษาคณะลักษณะเฉพาะด้วยเซอร์เฟอพลาสมอนเรโซแนนซ์ (SPR) ยูวี - วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ อนุภาคเงินในระดับนาโนที่ถูกสังเคราะห์ทางชีววิทยาแบบนี้จะมีสีเหลืองปนน้ำตาล เนื่องจากแถบการดูดซับ SPR ที่เข้มข้น เมื่อนำไปตรวจวัดกับไอออนปรอทจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์อย่างง่ายระหว่างอนุภาคเงินในระดับนาโนและไอออนปรอทในสารละลาย สารละลายอนุภาคเงินในระดับนาโนจะเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นไม่มีสี ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าและใช้ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ แถบ SPR จะกว้างและเปลี่ยนไปอยู่ในช่วงสีฟ้า ค่า LOD ของไอออนปรอทคือ  $2.2 \times 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$  นอกจากนี้ยังมีความไวและความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดไอออนโลหะทรานซิชัน, โลหะอัลคาไลน์, และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ทอีกด้วย โดยวิธีนี้ได้ประสบผลสำเร็จสำหรับใช้ในการตรวจหาไอออนปรอทในตัวอย่างน้ำต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.7 ตัวรับรู้เชิงสีที่มีการทำงานเชิงคู่สำหรับไอออนปรอทและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้คุณสมบัติการรีดักชันตัวเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคเงินในระดับนาโน (Ultrasensitive and dual functional colorimetric sensors for mercury(II) ions and hydrogen peroxide based on catalytic reduction property of silver nanoparticles)

กวง-ลี หวัง และคณะ [67] ศึกษาตัวรับรู้เชิงสีที่มีการทำงานเชิงคู่สำหรับไอออนปรอทและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้คุณสมบัติการรีดักชันตัวเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคเงินในระดับนาโน วิธีการนี้เป็นการหาอัตราการวัดตัวรับรู้ที่มีการทำงานเชิงคู่สำหรับไอออนปรอทและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีซีเตรตเป็นตัวรักษาสภาพ โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์, ไตรโซเดียมซีเตรตและซิลเวอร์ไนเตรต โซเดียมโบโรไฮไดรด์จะรีดิวซ์  $Ag^+$  ไปเป็น  $Ag^0$  เกิดเป็นอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีสีเหลืองซีด จากนั้นตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสีของไอออนปรอทและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผสมกับอนุภาคเงินในระดับนาโนและไอออนปรอท

ผลที่ได้คือ ไอออนปรอทที่มีความเข้มข้น 2.0 nM จะเกิดการเปลี่ยนสีของสารละลายภายในไม่กี่วินาที โดยไอออนของโลหะอื่นจะไม่เกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้น 10  $\mu$ M ตัวรับรู้เชิงสีที่มีการทำงานเชิงคู่นี้ไม่ประสบผลสำเร็จในการใช้ตรวจหาไอออนปรอทเสมอไป แต่มักจะใช้เป็นตัวรับรู้สำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำสุดที่ 50 nM โดยมีคุณสมบัติที่ไวและมีความเฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนปรอทและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคเงินในระดับนาโนเกิดการรีดักชันของไอออนปรอทไปเป็นธาตุปรอท เนื่องจากการประพุดตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้มีผลต่อการรวมตัวและสีของอนุภาคเงินในระดับนาโน ดังนั้น วิธีการเปรียบเทียบสีที่มีความไวและความเฉพาะเจาะจงนี้จึงเป็นการพัฒนาวิธีใหม่และเป็นวิธีที่มีความเร็วในการตรวจวัดสำหรับการตรวจหาไอออนโลหะและสารชีวโมเลกุล โดยการใช้อนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแบบพิเศษในการทำปฏิกิริยา

### 2.9.8 การเตรียมคอลลอยด์อนุภาคเงินในระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี (Preparation of colloidal silver nanoparticles by chemical reduction method)

กีซาง ซอง และคณะ [25] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี เกิดการรีดักชันของซิลเวอร์ไนเตรตในน้ำด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ โดยมีโซเดียมโอดีซิลซัลเฟตเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ขั้นตอนการสังเคราะห์คือ ใส่สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์พร้อมกับโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต ซึ่งไอออนของเงินจะถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ไปเป็นธาตุเงิน เกิดคอลลอยด์ของอนุภาคเงินในระดับนาโน

ทำการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนโดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงยูวีและภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ผลที่ได้คือ สีของสารละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สารละลายซิลเวอร์ไนเตรดที่เติม เมื่อความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรดเพิ่มขึ้นสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นสีน้ำตาล โดยพิศการดูดกลืนแสงอยู่ที่ประมาณ 400 nm โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์จะป้องกันการรวมตัวของอนุภาคเงินในระดับนาโน เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้นอนุภาคเกิดการกระจายตัวได้ดี และเมื่อใช้โซเดียมโอดีซิลซัลเฟตในปริมาณที่เหมาะสม โซเดียมโอดีซิลซัลเฟตจะถูกดูดกลืนบนพื้นผิวของอนุภาคเงินในระดับนาโนและป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโนซึ่งเป็นผลมาจากสเตอริกเอฟเฟกซ์ นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นโซเดียมโอดีซิลซัลเฟตเพิ่มขึ้น สีของสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลไปเป็นสีเหลือง

### 2.9.9 การสังเคราะห์โครงสร้างเงินในระดับนาโนโดยวิธีหลายขั้นตอน (Synthesis of nanostructures by multistep methods)

ตง ฉาง และคณะ [34] ได้ศึกษาว่ารูปร่างของโครงสร้างในระดับนาโน เช่น เงินและทอง มีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีรวมถึงศักยภาพในการใช้งาน จึงทำการเตรียมโครงสร้างเงินระดับนาโนที่มีการควบคุมรูปร่างด้วยวิธีสามขั้นตอน ประกอบด้วย วิธีรีดิวซ์ช้า, เทคนิคการกัด และการสร้างแกนกลางและเปลือกหุ้มของโครงสร้างนาโน โดยการรีดิวซ์ช้าใช้  $N,N$ -dimethylformamide (DMF) หรือโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในการรีดิวซ์ซิลเวอร์ไนเตรดสำหรับการเตรียมโครงสร้างเงินระดับนาโน สำหรับเทคนิคการกัด ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำการกัดสารละลายโลหะเงิน เพื่อควบคุมรูปร่างของอนุภาคเงินระดับนาโน และขั้นตอนการสร้างแกนกลางและเปลือกหุ้มของโครงสร้างนาโน โดยการสร้างแกนกลางและเปลือกหุ้มของโครงสร้างนาโนของทองที่เงิน

ผลที่ได้คือ กลไกของวิธีรีดิวซ์ช้านั้นได้ผลึกนาโนของเงินที่มีเหลี่ยมแตกต่างกันตามตัวรีดิวซ์ที่ต่างกัน ซึ่งสามารถใช้เตรียมโครงสร้างนาโนที่ซับซ้อนได้ เช่น โครงสร้างนาโนรูปธง (Nanoflags) ด้วยแถบเรโซแนนซ์ที่แคบมาก เทคนิคการกัดสามารถคัดเลือกอนุภาคนาโนที่จะสามารถควบคุมรูปร่างได้และมีการใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนรูปร่างดอกไม้ (Nanoflowers) และโครงสร้างนาโนลักษณะกลวง นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวของโครงสร้างเงินระดับนาโนได้ การสร้างแกนกลางและเปลือกหุ้มของโครงสร้างนาโนไม่เพียงแต่เพื่อเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมรูปร่างและขนาดเท่านั้น แต่ยังแสดงคุณสมบัติทางแสงที่พิเศษ ทั้ง 3 วิธีนี้ไม่เพียงแต่ใช้เตรียมโครงสร้างนาโนที่มีการควบคุมขนาดแบบต่างๆเท่านั้น ยังมีคุณสมบัติทางแสงที่พิเศษ เช่น ผลจาก Strong surface-enhanced raman scattering (SERS) และคุณสมบัติทาง Localized surface plasmon resonance (LSPR) โดยโครงสร้างเงินในระดับนาโนนี้มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้งานโดยการพัฒนาเป็นอุปกรณ์นาโนพลาสมอนิกและตัวตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.10 อนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีซิลเจลของซิลิเกตเป็นสารรักษาเสถียรภาพสำหรับการใช้เป็นตัวรับรู้ของไอออนปรอท ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไนโตรเบนซีน (Silicate sol-gel stabilized silver nanoparticles for sensor applications toward mercuric ions, hydrogen peroxide and nitro benzene)

เปรมมาล ราเมศคุมาร์ และคณะ [68] ได้พัฒนาอนุภาคเงินในระดับนาโนเพื่อเป็นตัวรับรู้สำหรับการตรวจวัดไอออนปรอท, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไนโตรเบนซีน โดยการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีซิลเจลของซิลิเกตเป็นสารรักษาเสถียรภาพ ผ่านการสังเคราะห์โดยการผสมไฮดรอกซิล, แอมโมเนียมคลอไรด์และกรดไนตริกซึ่งเป็นสารละลายที่ทำให้การรีดักชัน

ทำการศึกษาคูณลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินในระดับนาโน โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสง, การวิเคราะห์ด้วย XRD, SEM, TEM EDX และ SAED จากสเปกตรัมและวิธีการเปรียบเทียบสีทำให้เห็นประสิทธิภาพของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่ใช้ตรวจวัดไอออนปรอท และขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดคือ 5  $\mu\text{M}$  อนุภาคเงินในระดับนาโนมีความจำเพาะเจาะจงเฉพาะไอออนปรอทในสิ่งแวดล้อมที่มีโลหะหนักตัวอื่นปนอยู่ด้วย สำหรับตัวรับรู้เอนไซม์เชิงไฟฟ้าเคมีในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เตรียมโดยทำการปรับเปลี่ยนขั้วแก้วไฟฟ้าคาร์บอนด้วยอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีซิลเจลของซิลิเกตเป็นสารรักษาเสถียรภาพ ใช้เทคนิคเส้นตรง สวิทช์ โวลแทมเมทรี (Sweep voltammetry, LSV) และดิฟเฟอเรนทอล พัลส์ โวลแทมเมทรี (Differential pulse voltammetry, DPV) มีขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ 0.5 และ 0.1  $\mu\text{M}$  และตัวรับรู้ทางเคมีไฟฟ้าของไนโตรเบนซีนโดยใช้การปรับปรุงขั้วเช่นเดียวกัน ระบุขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดโดยใช้ Square wave voltammetry (SWV) ได้ 1  $\mu\text{M}$

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้ ขั้นตอนที่หนึ่ง คือ การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์และโซเดียมซิเตรตเป็นตัวรักษาสถียรภาพ ขั้นตอนที่สอง คือ การศึกษาสถานะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) อันได้แก่ การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนขั้นตอนที่สาม คือ การนำค่าสถานะต่างๆที่ได้จากการศึกษาข้างต้นมาใช้ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และในขั้นตอนสุดท้าย คือ การนำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท

#### 3.1 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method)

##### 3.1.1 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรต

###### 3.1.1.1 สารเคมี

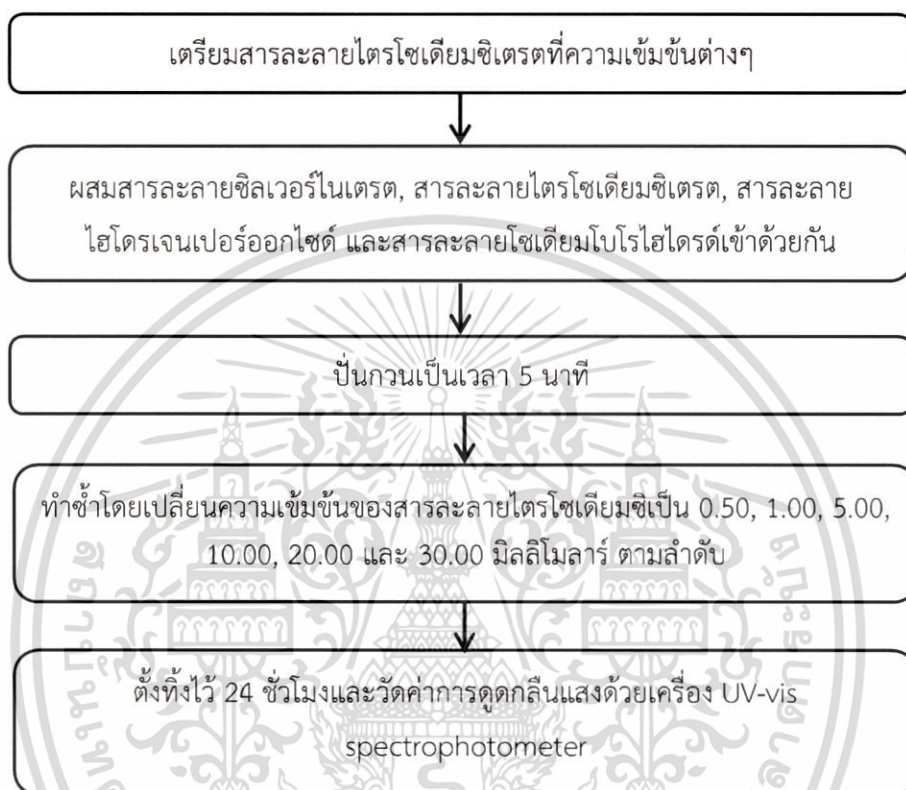
สารเคมี	ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต
ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate)	AgNO <sub>3</sub>	Merck KGaA
โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride)	NaBH <sub>4</sub>	Fisher Scientific
โซเดียมซิเตรตไตรเบสิกไดไฮเดรต (Sodium citrate tribasic dihydrate)	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Na <sub>3</sub> O <sub>7</sub> · 2H <sub>2</sub> O	Sigma - Aldrich
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Carlo Erba
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	DI water	RHK Group

###### 3.1.1.2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต

เตรียมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่ความเข้มข้น 0.10, 0.50, 1.00, 5.00, 10.00, 20.00 และ 30.00 มิลลิโมลาร์ แล้วทำการผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตที่ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร, สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 3.00 มิลลิลิตร, สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30.00 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 0.12 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.23 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที และทำซ้ำโดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายไตรโซเดียมซีเตรตเป็น 0.50, 1.00, 5.00, 10.00, 20.00 และ 30.00 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไตรโซเดียมซีเตรตที่ความเข้มข้นต่างๆ

การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไตรโซเดียมซีเตรตในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์
ศึกษาอิทธิพลจากความเข้มข้นของไตรโซเดียมซีเตรต (สีของสารละลาย)	UV-visible spectrophotometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

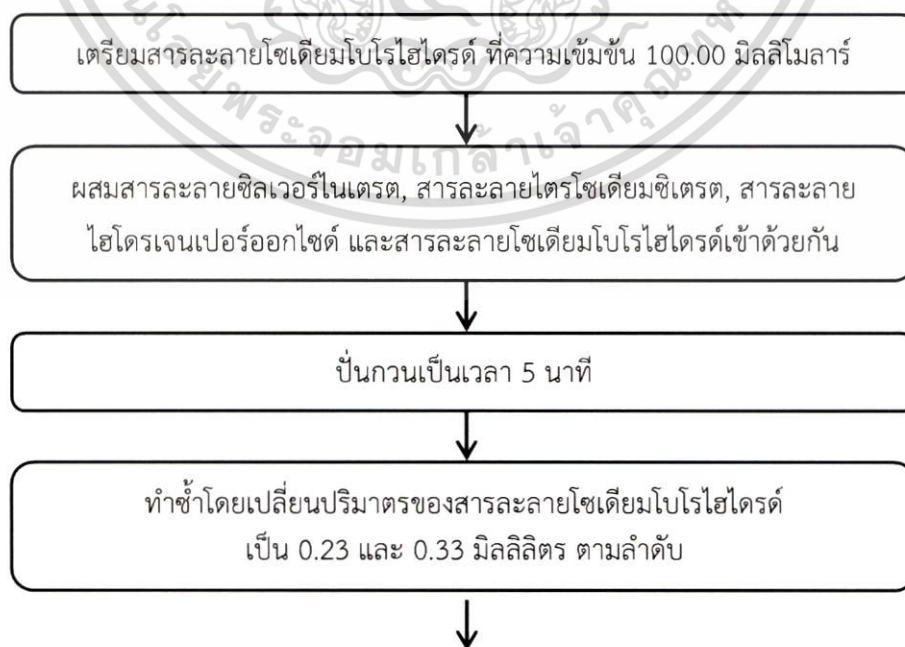
### 3.1.2 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์

#### 3.1.2.1 สารเคมี

สารเคมี	ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต
ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate)	AgNO <sub>3</sub>	Merck KGaA
โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride)	NaBH <sub>4</sub>	Fisher Scientific
โซเดียมซิเตรตไตรเบสิกไดไฮเดรต (Sodium citrate tribasic dihydrate)	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Na <sub>3</sub> O <sub>7</sub> · 2H <sub>2</sub> O	Sigma - Aldrich
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Carlo Erba
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	DI water	RHK Group

#### 3.1.2.2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์

เตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่มีความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์ แล้วทำการผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตที่มีความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร, สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่มีความเข้มข้น 20.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 3.00 มิลลิลิตร, สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30.00 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 0.12 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่มีความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.13 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที และทำซ้ำโดยการเปลี่ยนปริมาตรของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ เป็น 0.23 และ 0.33 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงและวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer

รูปที่ 3.2 แผนผังการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์
ศึกษาอิทธิพลจากความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (สีของสารละลาย)	UV-visible spectrophotometry
ศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน	Transmission electron microscopy (TEM)
ศึกษาสภาพความเป็นประจุของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน	Zeta potential
ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน	Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

### 3.1.3 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs)

#### 3.1.3.1 สารเคมี

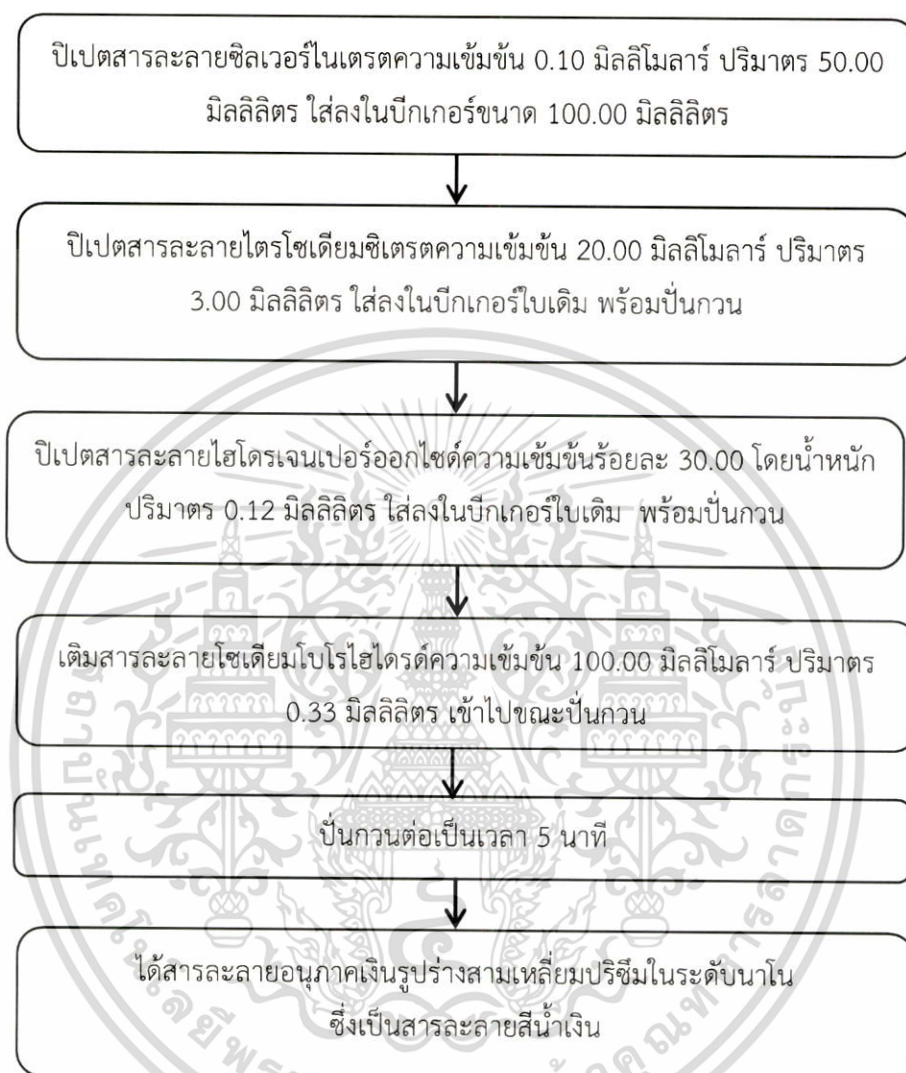
สารเคมี	ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต
ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate)	AgNO <sub>3</sub>	Merck KGaA
โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride)	NaBH <sub>4</sub>	Fisher Scientific
โซเดียมซิเตรตไตรเบสิกไดไฮเดรต (Sodium citrate tribasic dihydrate)	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Na <sub>3</sub> O <sub>7</sub> · 2H <sub>2</sub> O	Sigma - Aldrich
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Carlo Erba
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	DI water	RHK Group

#### 3.1.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

เปิดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในปิอกเกอร์ขนาด 100.00 มิลลิลิตร จากนั้นเปิดสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้น 20.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 3.00 มิลลิลิตร และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30.00 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 0.12 มิลลิลิตร ใส่ลงในปิอกเกอร์ ใบเติม พร้อมปั่นกวน หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิลิตร เข้าไปขณะปั่นกวน และปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที จนได้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนซึ่งเป็นสารละลายสีน้ำเงิน ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

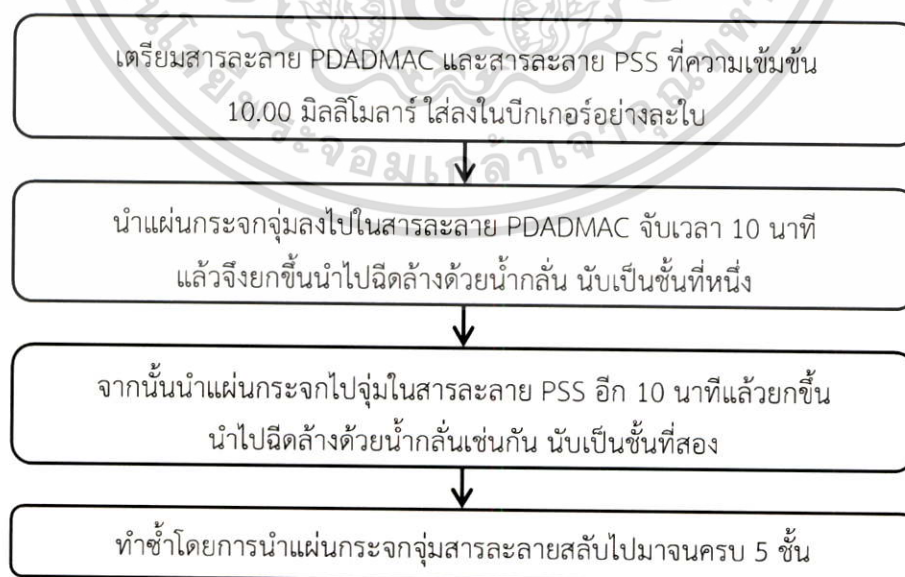
### 3.2.1 การเตรียมพื้นผิวแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Primer)

#### 3.2.1.1 สารเคมี

สารเคมี	ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต
โพลีไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Poly(diallyldimethylammonium chloride))	PDADMAC	Sigma - Aldrich
โพลีโซเดียมสไตรีนซัลโฟเนต (Poly(sodium 4-styrenesulfonate))	PSS	Sigma - Aldrich
โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride)	NaCl	Carlo Erba, Rankem
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	DI water	RHK Group

#### 3.2.1.2 การเตรียมพื้นผิวแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Primer) โดยการใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

เตรียมสารละลายโพลีไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ และสารละลายโพลีโซเดียมสไตรีนซัลโฟเนตความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ใส่ลงในบีกเกอร์อย่างละใบ แล้วนำแผ่นกระจกจุ่มลงไปในสารละลาย PDADMAC จับเวลา 10 นาทีแล้วจึงยกขึ้นนำไปจืดล้างด้วยน้ำกลั่น นับเป็นชั้นที่หนึ่ง จากนั้นนำแผ่นกระจกไปจุ่มในสารละลาย PSS อีก 10 นาทีแล้วยกขึ้น นำไปจืดล้างด้วยน้ำกลั่นเช่นกัน นับเป็นชั้นที่สอง ทำซ้ำโดยการนำแผ่นกระจกจุ่มสารละลายสลับไปมาจนครบ 5 ชั้น และทิ้งไว้ให้แห้ง ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังการเตรียมพื้นผิวแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Primer) โดยการใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

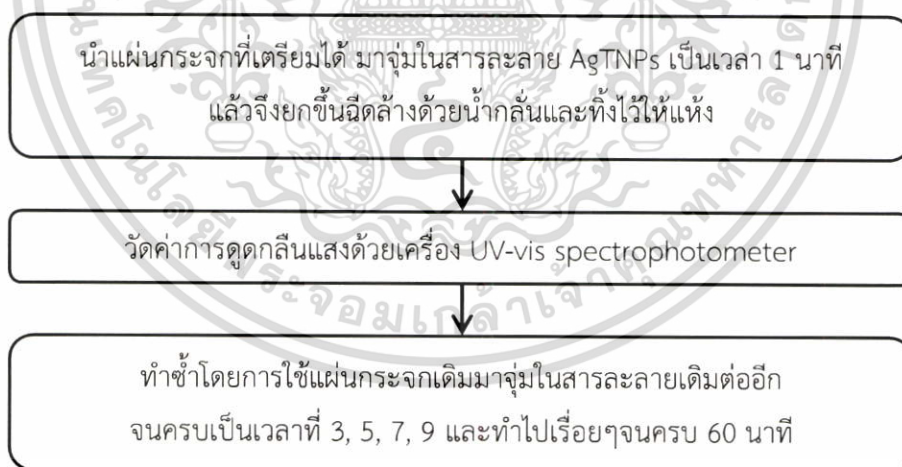
### 3.2.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

#### 3.2.2.1 สารเคมี

สารเคมี	ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต
สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ (จากขั้นตอนที่ 3.1.3.2)	AgTNPs	-
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	DI water	RHK Group

#### 3.2.2.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

นำแผ่นกระจกที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.2.1.2 มาจุ่มในสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ในขั้นตอนที่ 3.1.3.2 เป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงยกขึ้นฉีดล้างด้วยน้ำกลั่นและทิ้งไว้ให้แห้ง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ทำซ้ำโดยใช้แผ่นกระจกเดิมมาจุ่มในสารละลายเดิมต่ออีกจนครบเป็นเวลา 3, 5, 7, 9 และทำไปเรื่อยๆจนครบ 60 นาที ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังแสดงรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนผังการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์
ศึกษาสีของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน เวลาต่างๆ (1-60 นาที)	UV-visible spectrophotometry

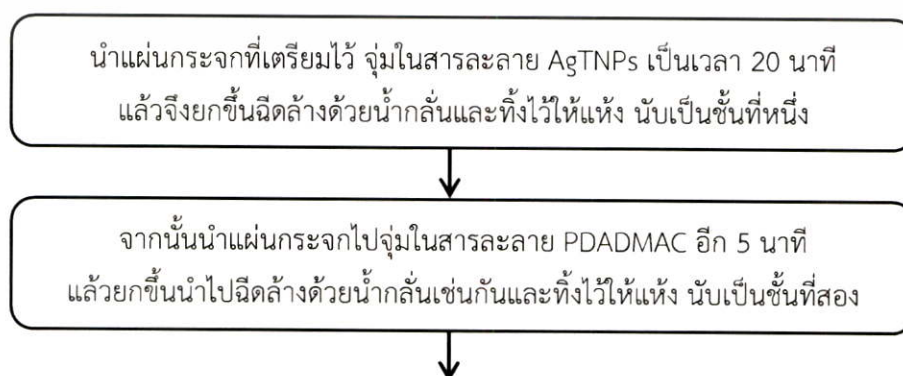
### 3.2.3 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

#### 3.2.3.1 สารเคมี

สารเคมี	ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต
สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ (จากขั้นตอนที่ 3.1.3.2)	AgTNPs	-
สารละลายโพลีไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Poly(diallyldimethylammonium chloride)) (จากขั้นตอนที่ 3.2.1.1)	PDADMAC	-
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	DI water	RHK Group

#### 3.2.3.2 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs ร่วมกับสารละลาย PDADMAC

นำแผ่นกระจกที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 3.2.1.2 ลงจุ่มในสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ในขั้นตอนที่ 3.1.3.2 เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงยกขึ้นฉีดล้างด้วยน้ำกลั่นและทิ้งไว้ให้แห้ง นับเป็นชั้นที่หนึ่ง จากนั้นนำไปจุ่มต่อในสารละลาย PDADMAC ต่ออีกเป็นเวลา 5 นาที ฉีดล้างด้วยน้ำกลั่นเช่นกันและทิ้งไว้ให้แห้ง นับเป็นชั้นที่สอง และทำการจุ่มสลับไปมาจนได้ตามจำนวนชั้นที่ต้องการ โดยจะทำการเตรียมแผ่นฟิล์มบางที่จำนวน 1, 3, 5, 7, 9, 11 และ 13 ชั้น ตามลำดับ ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังแสดง ในรูปที่ 3.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการจุ่มสลับไปมาจนได้ตามจำนวนชั้นที่ต้องการ โดยจะทำการเตรียมแผ่นฟิล์มบางที่จำนวน 1, 3, 5, 7, 9, 11 และ 13 ชั้น ตามลำดับ

รูปที่ 3.6 แผนผังการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs ร่วมกับสารละลาย PDADMAC

การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs ร่วมกับสารละลาย PDADMAC

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์
ศึกษาสีของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่จำนวนชั้นต่างๆ	UV-visible spectrophotometry
ศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ	Atomic force microscopy (AFM)
ศึกษามุมสัมผัสของของเหลวบนแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ	Contact angle
ศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน	X-ray diffraction (XRD)

### 3.3 การนำค่าสถานะต่างๆที่ได้จากการศึกษาข้างต้นมาใช้ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

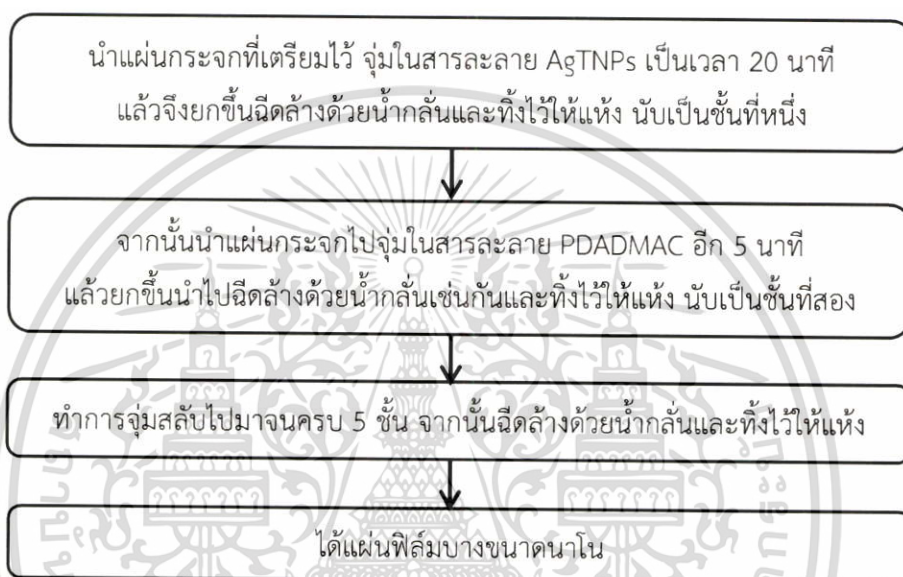
#### 3.3.1 สารเคมี

สารเคมี	ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต
สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ (จากขั้นตอนที่ 3.1.3.2)	AgTNPs	-
สารละลายโพลีไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Poly(diallyldimethylammonium chloride) (จากขั้นตอนที่ 3.2.1.1)	PDADMAC	-
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	DI water	RHK Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

นำแผ่นกระจกที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 3.2.1.2 ลงจุ่มในสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ในขั้นตอนที่ 3.1.3.2 เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงยกขึ้นฉีกล้างด้วยน้ำกลั่นและทิ้งไว้ให้แห้ง นับเป็นขั้นที่หนึ่ง จากนั้นนำไปจุ่มต่อในสารละลาย PDADMAC ต่ออีกเป็นเวลา 5 นาที ฉีกล้างด้วยน้ำกลั่นเช่นกันและทิ้งไว้ให้แห้ง นับเป็นขั้นที่สอง และทำการจุ่มสลับไปมาจนครบ 5 ชั้น ฉีกล้างด้วยน้ำกลั่นและทิ้งไว้ให้แห้ง ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังแสดง ในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนผังการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

## 3.4 การนำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท

### 3.4.1 การตรวจวัดปรอทโดยการใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

#### 3.4.1.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท ( $\text{HgCl}_2$ )

เตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.90, 1.00, 3.00, 5.00, 10.00, 50.00, 70.00 และ 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลาย ทำการวิเคราะห์ปรอทโดยการผสมสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนเข้ากับสารละลายมาตรฐานในแต่ละความเข้มข้น แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารละลาย AgTNPs เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์
ศึกษาสีของสารละลาย AgTNPs เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท	UV-visible spectrophotometry
ศึกษาสภาพความเป็นประจุของสารละลาย AgTNPs เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท	Zeta potential
ศึกษาลักษณะรูปร่างของสารละลาย AgTNPs เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท	Transmission electron microscopy (TEM)

#### 3.4.1.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด เป็นการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของปรอทที่ตรวจวัดได้ โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน กับค่าการดูดกลืนแสงของสาร และการวัดสารละลายแบลนด์ (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{LOD} = \frac{3\text{SD of blank}}{\text{Slope}}$$

เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank  
Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

#### 3.4.1.3 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ เป็นการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของปรอทที่สามารถวิเคราะห์ได้ โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงของสาร และการวัดสารละลายแบลนด์ (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{LOQ} = \frac{10\text{SD of blank}}{\text{Slope}}$$

เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank  
Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของปรอทในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่มทำได้โดยเริ่มจากการนำน้ำประปาและน้ำดื่มมาเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้น 0.40, 0.50 และ 0.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน แล้วทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV - vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร

การศึกษาค่าความแม่นยำ (Accuracy) จะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, RSD) ซึ่งสามารถทำได้โดยการตรวจวัดซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$RSD = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100$$

เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้  
 $\bar{x}$  คือ ค่าเฉลี่ย (Mean) ของความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้

### 3.4.1.5 การศึกษาดัรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์

เป็นการศึกษาว่าในการวิเคราะห์มีตัวรบกวนใดที่รบกวนการวิเคราะห์หรือไม่ โดยการเติมตัวรบกวนต่าง ๆ ลงไปในสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่มีสารละลายมาตรฐานปรอทอยู่ จากนั้นทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร โดยตัวรบกวนที่จะทำการเติมลงไป ได้แก่ Magnesium sulfate, Nickel (II) sulfate, Lead (II) nitrate, Iron (II) sulfate และ Copper (II) nitrate

## 3.4.2 การตรวจวัดปรอทโดยใช้แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

### 3.4.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท ( $HgCl_2$ )

#### 3.4.2.1.1 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่ใช้ในการจุ่มสารละลายมาตรฐานปรอท

เตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่เตรียมได้ในขั้นตอนที่ 3.3.2 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ก่อนนำมาจุ่มลงในสารละลายมาตรฐานปรอทที่เตรียมไว้ เป็น

เวลา 5 นาที และนำกลับไปวัดค่าการดูดกลืนแสงอีกครั้ง จากนั้นทำซ้ำโดยการใส่แผ่นฟิล์มเดิมจุ่มสารละลายเดิมต่อจนครบเป็นเวลา 10, 15, 20, 25, 30 และทำไปเรื่อยๆจนครบ 60 นาที

#### 3.4.2.1.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท ( $\text{HgCl}_2$ )

เตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.50, 1.00, 5.00, 7.00, 9.00, 10.00, 15.00, 20.00 และ 25.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลายทำการวิเคราะห์ปรอทโดยการจุ่มแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่เตรียมได้ในขั้นตอนที่ 3.3.2 ลงในสารละลายมาตรฐานปรอทในแต่ละความเข้มข้น แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร

#### การศึกษาลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนเมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์
ศึกษาสีของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท	UV-visible spectrophotometry
ศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP- $\text{PDADMAC}$ เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท	Atomic force microscopy (AFM)
ศึกษาลักษณะสัณฐานของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP- $\text{PDADMAC}$ เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท	Field emission scanning electron microscopy (FESEM)

#### 3.4.2.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด เป็นการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของปรอทที่ตรวจวัดได้ โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน กับค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และการวัดแบบลบล้าง (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งการวัดแบบลบล้างในที่นี้ จะวัดจากแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่ยังไม่ได้จุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอท หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{LOD} = \frac{3\text{SD of blank}}{\text{Slope}}$$

เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank

Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2.3 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ เป็นการศึกษาค้นหาความเข้มข้นต่ำสุดของปรอทที่สามารถวิเคราะห์ได้ โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และการวัดแบลงค์ (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งการวัดแบลงค์ในที่นี้ จะวัดจากแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่ยังไม่ได้จุ่มในสารละลายมาตรฐาน หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{LOQ} = \frac{10\text{SD of blank}}{\text{Slope}}$$

เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank

Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

### 3.4.2.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของปรอทในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่มทำได้โดยเริ่มจากการนำน้ำประปาและน้ำดื่ม มาเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้น 5.00, 10.00 และ 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นนำแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่เตรียมได้ในขั้นตอนที่ 3.3.2 จุ่มลงในสารละลายมาตรฐานปรอทที่เตรียมได้ แล้วทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร

การศึกษาค่าความแม่นยำ (Accuracy) จะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, RSD) ซึ่งสามารถทำได้โดยการตรวจวัดซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{RSD} = \frac{\text{SD}}{\bar{x}} \times 100$$

เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้

$\bar{x}$  คือ ค่าเฉลี่ย (Mean) ของความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2.5 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์

เป็นการศึกษาว่าในการวิเคราะห์หมีตัวรบกวนใดที่รบกวนการวิเคราะห์หรือไม่ โดยจุ่มแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่เตรียมได้ในขั้นตอนที่ 3.3.2 ลงสารละลายมาตรฐานปรอทที่เติมตัวรบกวนต่างๆลงไป จากนั้นทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร โดยตัวรบกวนที่จะทำการเติมลงไป ได้แก่ Magnesium sulfate, Nickel (II) sulfate, Lead (II) nitrate, Iron (II) sulfate และ Copper (II) nitrate



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งผลการทดลองและการอภิปรายผลออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ดังต่อไปนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือ ผลการทดลองและการอภิปรายผลจากการศึกษาสภาวะในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน อันได้แก่ การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรต และการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน ส่วนที่สอง คือ ผลการทดลองและการอภิปรายผลจากการศึกษาสภาวะต่างๆ ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) อันได้แก่ การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และส่วนสุดท้าย คือ ผลการทดลองและการอภิปรายผลจากการนำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท

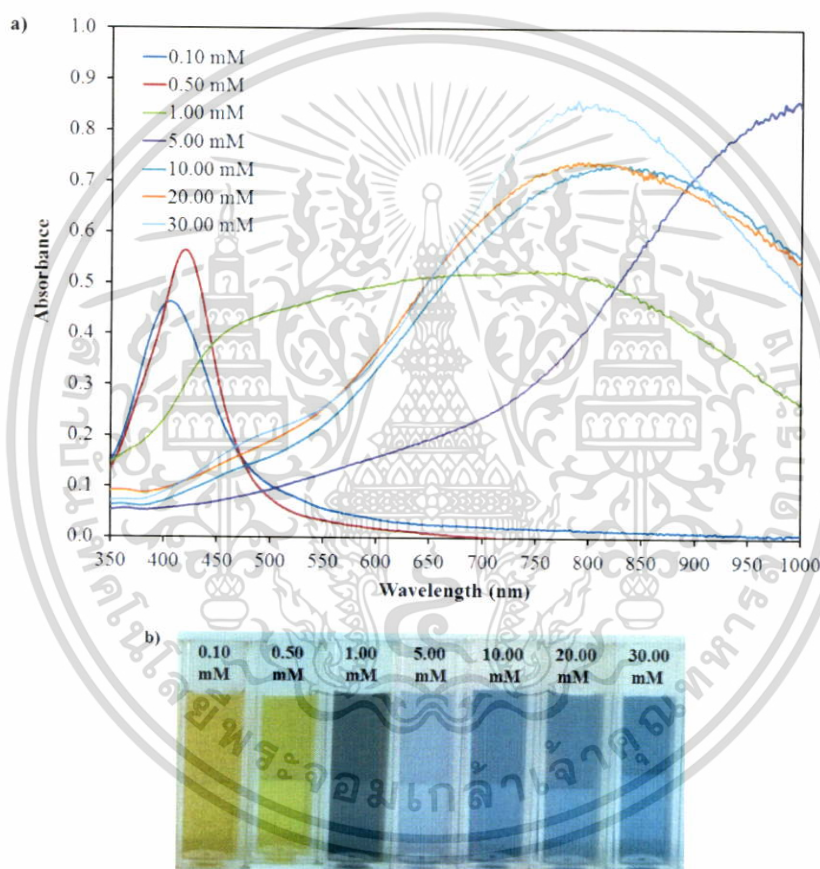
#### 4.1 การศึกษาสภาวะในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ในงานวิจัยนี้มีความต้องการที่จะสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (Silver triangular nanoprism, AgTNPs) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) โดยการใช้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ จึงต้องมีการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรตและโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ที่จะใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดยจะใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-visible spectrophotometry) ในการตรวจสอบผลที่ได้ และเพื่อเป็นการยืนยันว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน ได้จริง จึงได้มีการศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดยการนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM), ศึกษาสภาพความเป็นประจุของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดยการวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) และศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดยใช้เทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรต

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่มีความเข้มข้น 0.10, 0.50, 1.00, 5.00, 10.00, 20.00 และ 30.00 มิลลิโมลาร์ แล้วทำการผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์, สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 30.00 โดยน้ำหนัก และสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที และตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1

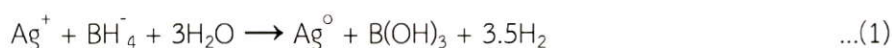


รูปที่ 4.1 สเปกตราแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ AgTNP (a) และภาพแสดงสีของสารละลาย (b) ที่มีความเข้มข้นของไตรโซเดียมซิเตรตที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของไตรโซเดียมซิเตรตเพิ่มมากขึ้น สีของสารละลายมีแนวโน้มที่เปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งสีน้ำเงินเป็นคุณลักษณะของสามเหลี่ยม [33] จากรูปจะเห็นว่าความเข้มข้นของไตรโซเดียมซิเตรตที่มีแนวโน้มทำให้สีของสารละลายเป็นสีน้ำเงิน คือ 10.00, 20.00 และ 30.00 มิลลิโมลาร์ และในที่นี้เราจะเลือกใช้ไตรโซเดียมซิเตรตที่มีความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

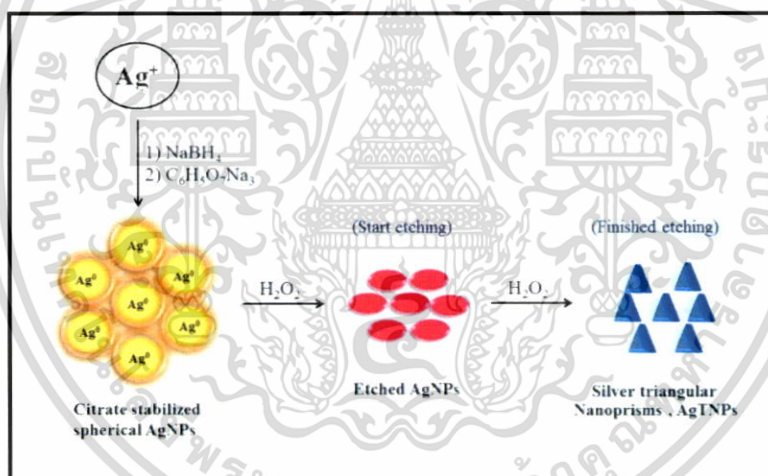
20.00 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากถ้าใช้ความเข้มข้นสูงมากไปจะทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กเกินไป และจะทำให้เกิดปัญหาในขั้นตอนการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน เพราะอนุภาคของไตรโซเดียมซิติเรต อาจเกิดโอกาสเกาะบนแผ่นฟิล์มได้มากกว่าอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ขึ้น หรือถ้าใช้ความเข้มข้นต่ำมากไปจะทำให้มีความเข้มข้นที่ไม่เพียงพอในการทำหน้าที่เป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ซึ่งปฏิกิริยาของการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนเป็นดังแสดงในสมการด้านล่างและรูปที่ 4.2



In acidic solutions:



In alkaline solutions:



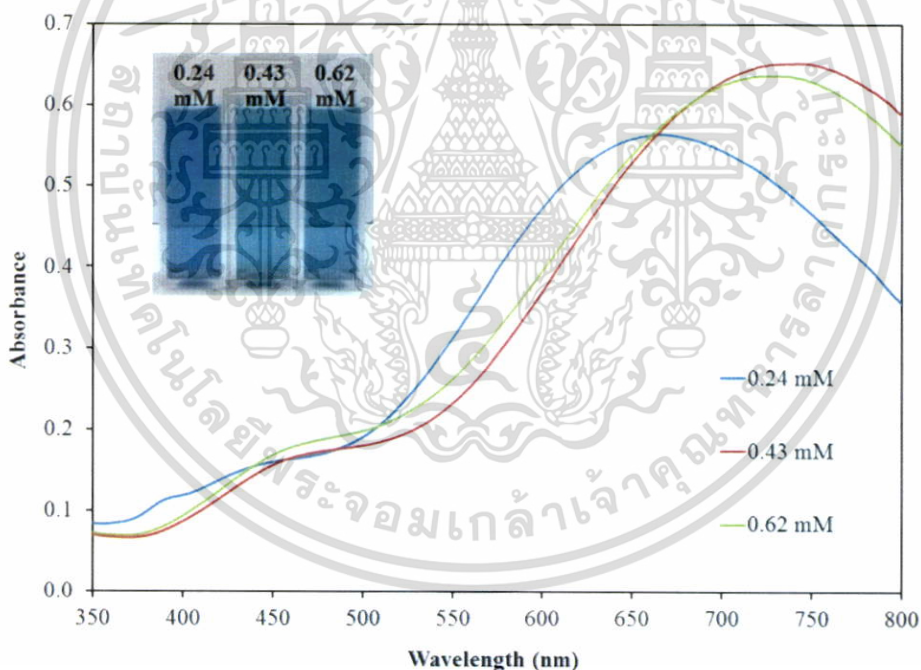
รูปที่ 4.2 แผนผังแสดงกลไกปฏิกิริยาของการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

จากรูปที่ 4.2 กลไกปฏิกิริยาจะเริ่มขึ้นจาก  $\text{Ag}^+$  ถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ตามสมการ (1) ได้เป็นอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมในระดับนาโนซึ่งมีไตรโซเดียมซิติเรตทำหน้าที่เป็นตัวรักษาเสถียรภาพตามสมการ (2) หลังจากนั้นอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมในระดับนาโนที่เกิดขึ้นจะถูกกัด (Etch) โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเท่ากับ 1.763 โวลต์ ในสารละลายที่มีภาวะเป็นกรด และ 0.867 โวลต์ ในสารละลายที่มีภาวะเป็นด่างดังสมการ (3) และ (4) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแม้ในสารละลายที่มีภาวะต่างกันค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็ยังคงมีค่าสูงกว่าของ  $\text{Ag}^+/\text{Ag}$  ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน เท่ากับ 0.7996 โวลต์ ทำให้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกัดอนุภาค (Etchant) สำหรับอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมในระดับนาโนได้ ดังนั้นเมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมในระดับนาโนแล้ว หลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดก็จะได้เป็นอนุภาครูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน [34, 69]

#### 4.1.2 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์ แล้วทำการผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์, สารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ความเข้มข้น 20.00 มิลลิโมลาร์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 30.00 โดยน้ำหนัก เข้าด้วยกัน โดยจะทำการเติมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาตรที่ต่างกัน คือ 0.13, 0.23 และ 0.33 มิลลิลิตร หรือเท่ากับความเข้มข้น 0.24, 0.43 และ 0.62 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาทีและตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ AgTNP's ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน

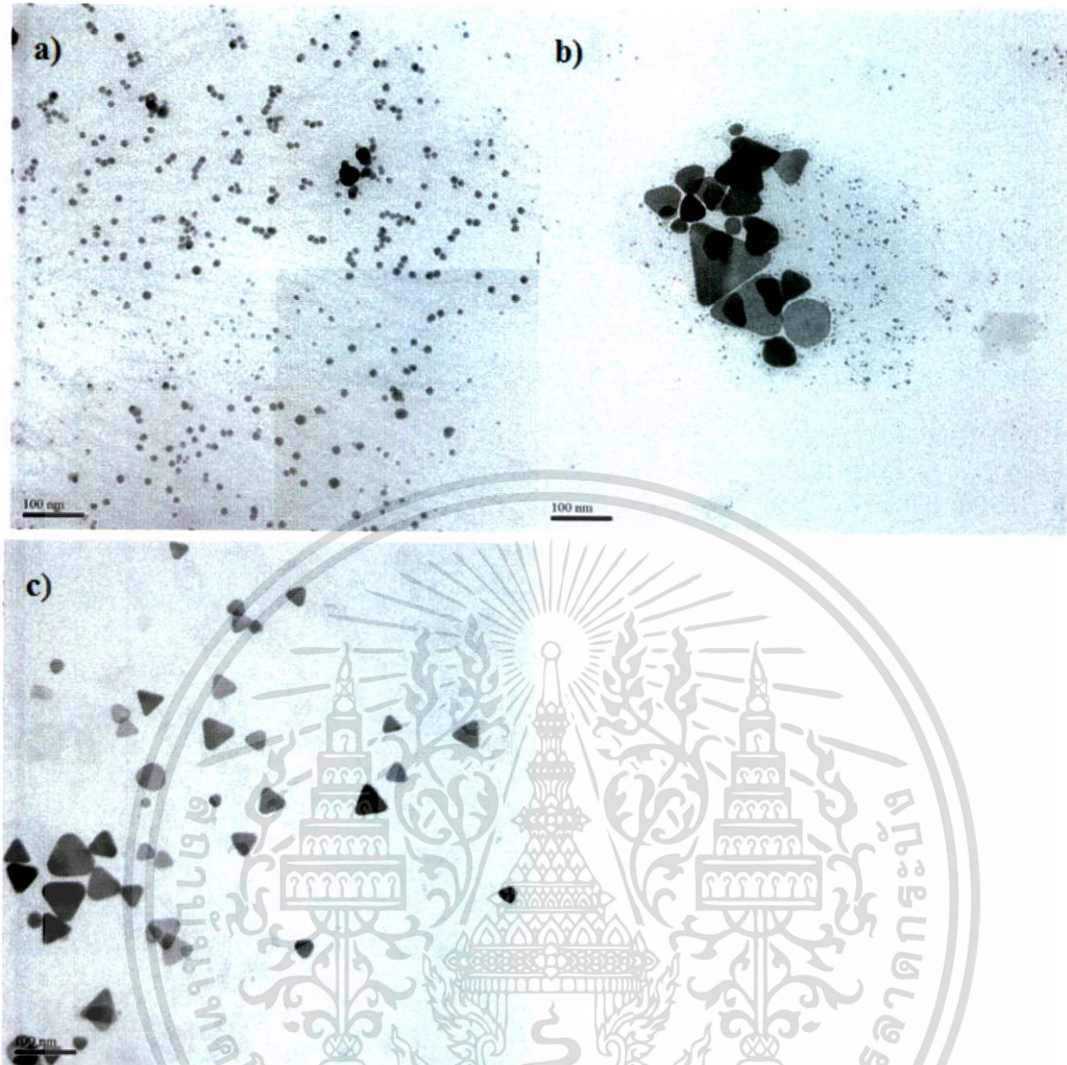
จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น สีของสารละลายมีแนวโน้มที่จะเป็นสีน้ำเงินเข้มมากขึ้น สังเกตได้จากเส้นสเปกตรัมที่จะเคลื่อนจากความยาวคลื่นสั้นไปยังความยาวคลื่นยาว ซึ่งที่ความยาวคลื่นยาวนั้น เมื่อสารละลายเกิดการดูดกลืนแสงจะ

ทำให้เราเห็นสีของสารละลายเป็นสีน้ำเงิน และในที่นี้หลังจากที่ได้นำสารละลาย AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกันไปศึกษาลักษณะเฉพาะแล้วได้ผลตามข้อ 4.1.3 จึงได้เลือกใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่มีความเข้มข้น 0.62 มิลลิโมลาร์ เพราะเป็นความเข้มข้นที่สามารถให้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนได้มากที่สุด รวมทั้งยังให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองความเข้มข้น เนื่องจากเมื่อโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์อย่างแรงเข้าทำปฏิกิริยากับ  $Ag^+$  (Silver ion) อนุภาคเงินในระดับนาโนที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation) ในขณะเดียวกันระหว่างที่มีการรีดิวซ์  $Ag^+$  (Silver ion) ไปเป็น  $Ag^0$  (Silver nanoparticles , AgNPs) อนุภาคของ  $Ag^0$  ก็จะเกิดการรวมตัวกัน (Aggregation) ด้วย ทำให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่ แต่เมื่อปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น อนุภาคที่ได้ก็จะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากจะมีชั้นของ  $BH_4^-$  ที่หนาพอที่จะป้องกันไม่ให้โบรอนไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ตามสมการ (1) ไปดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค AgTNPs รวมทั้งทำให้ไม่เกิดการรวมตัวกัน (Aggregation) ของอนุภาค AgTNPs ด้วย [25]

#### 4.1.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

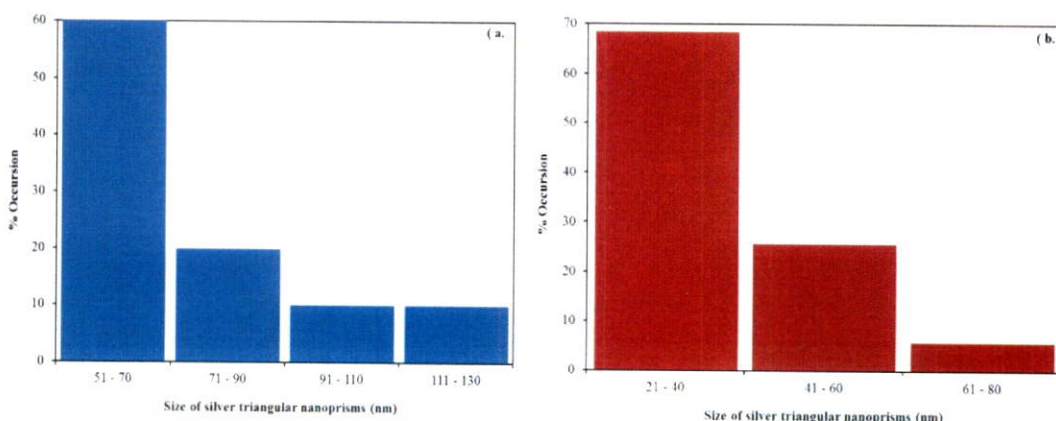
##### 4.1.3.1 การศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ต่างกัน คือ 0.24, 0.43 และ 0.62 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ จากนั้นนำไปหยดลงบนกริดแต่ละอัน แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 ภาพจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของ AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของไซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน คือ 0.24 (a), 0.43 (b) และ 0.62 (c) มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของไซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น อนุภาคเงินที่เกิดขึ้นก็จะมีคุณลักษณะที่เป็นสามเหลี่ยมเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังมีผลทำให้ขนาดของอนุภาคเปลี่ยนไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแท่งแสดง size distribution ของ AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน คือ 0.43 (a) และ 0.62 (b) มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น การเกิดอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน อีกทั้งอนุภาคที่เกิดขึ้นก็มีขนาดเล็กลงด้วย เนื่องจากเมื่อปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น ชั้นของ  $BH_4^-$  ก็จะหนามากขึ้นส่งผลให้โบรอนไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ตามสมการ (1) ไม่สามารถดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค AgTNPs ได้ รวมทั้งทำให้ไม่เกิดการรวมตัวกัน (Aggregation) ของอนุภาค AgTNPs ด้วย [25] เนื่องจากการเกิดแรงผลัทางไฟฟ้า (Repulsive electrostatic force) ซึ่งการที่อนุภาคมีขนาดเล็กนั้นมีข้อดี คือ จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น

#### 4.1.3.2 การศึกษาสภาพความเป็นประจุของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่มีสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน คือ 0.24, 0.43 และ 0.62 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ จากนั้นนำไปวัดค่าศักย์ซีต้า ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าศักย์ซีต้าของ AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน

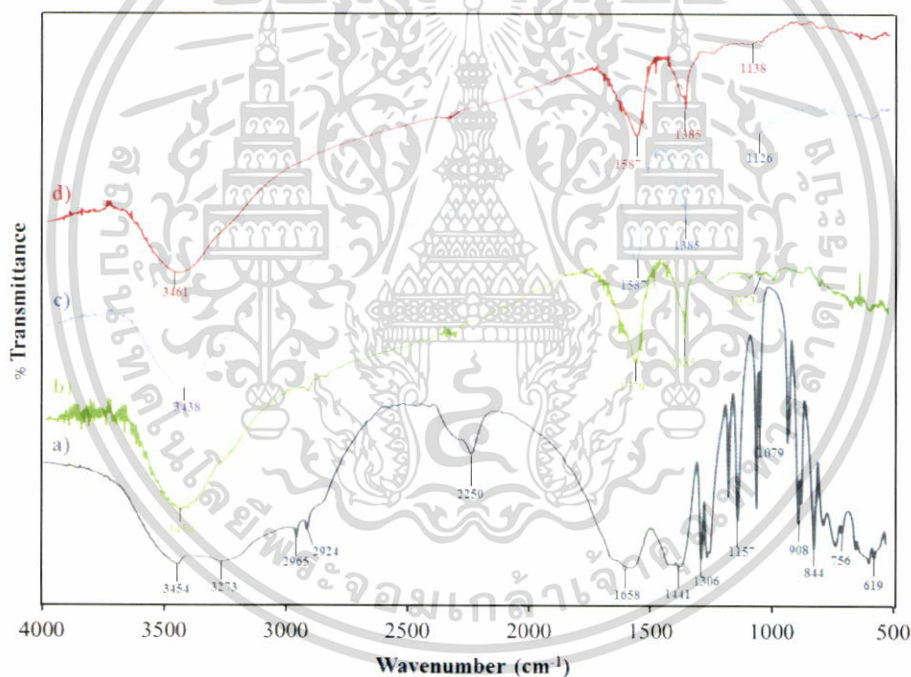
Concentration of $NaBH_4$ (mM)	Zeta potentials (mV)
0.24	-41.8
0.43	-39.1
0.62	-39.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นมีประจุเป็นลบแม้จะใช้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน เพราะอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนถูกเหนี่ยวนำไปเป็นประจุลบ เนื่องจากการใช้ไตรโซเดียมซิเตรตเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ

#### 4.1.3.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่มีสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 0.24, 0.43 และ 0.62 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้ รวมถึงไตรโซเดียมซิเตรตไปอบแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปตรวจวัดด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.6 และสามารถอธิบายได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.6 FTIR สเปกตราของไตรโซเดียมซิเตรต (a) และ AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ต่างกัน คือ 0.24 (b), 0.43 (c) และ 0.62 (d) มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงหมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิเตรตและหมู่ฟังก์ชันของ AgTNPs จากรูปที่ 4.6

Trisodium citrate (a)		AgTNPs (b)		AgTNPs (c)		AgTNPs (d)	
Peaks	Peak assignment	Peaks	Peak assignment	Peaks	Peak assignment	Peaks	Peak assignment
3454	O-H stretching	3450	O-H stretching	3438	O-H stretching	3461	O-H stretching
3273	O-H stretching	1579	C=O stretching	1587	C=O stretching	1587	C=O stretching
2965	C-H bending	1385	C-H bending	1385	C-H bending	1385	C-H bending
2924	C-H bending	1073	C-O stretching	1126	C-O stretching	1138	C-O stretching
2250	C=O stretching						
1658	C=O stretching						
1441	C-H bending						
1306	C-O stretching						
1157	C-O stretching						
1079	C-O stretching						
908	C-H bending						
844	C-H bending						
756	C-H bending						
619	C-H deformation						

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงสเปกตรัม FTIR ของไตรโซเดียมซิเตรตและสารละลาย AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน และจากในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิเตรต ซึ่งมีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H ที่เลขคลื่น  $3454 \text{ cm}^{-1}$ , การสั่นแบบงอของพันธะ C-H ที่เลขคลื่น  $1441 \text{ cm}^{-1}$  และการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O ที่เลขคลื่น  $1079 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในสารละลาย AgTNPs ทั้งสาม พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นเหมือนกับหมู่ฟังก์ชันที่มีอยู่ในไตรโซเดียมซิเตรต โดยในสารละลาย AgTNPs ทั้ง (b), (c) และ (d) จะมีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H ที่เลขคลื่น  $3450$ ,  $3438$  และ  $3461 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ มีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=O ที่เลขคลื่น  $1579$  และ  $1587 \text{ cm}^{-1}$  มีการสั่นแบบงอของพันธะ C-H ที่เลขคลื่น  $1385 \text{ cm}^{-1}$  และการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O ที่เลขคลื่น  $1073$ ,  $1126$  และ  $1138 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ มีไตรโซเดียมซิเตรตอยู่ [70]

## 4.2 การศึกษาสถานะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

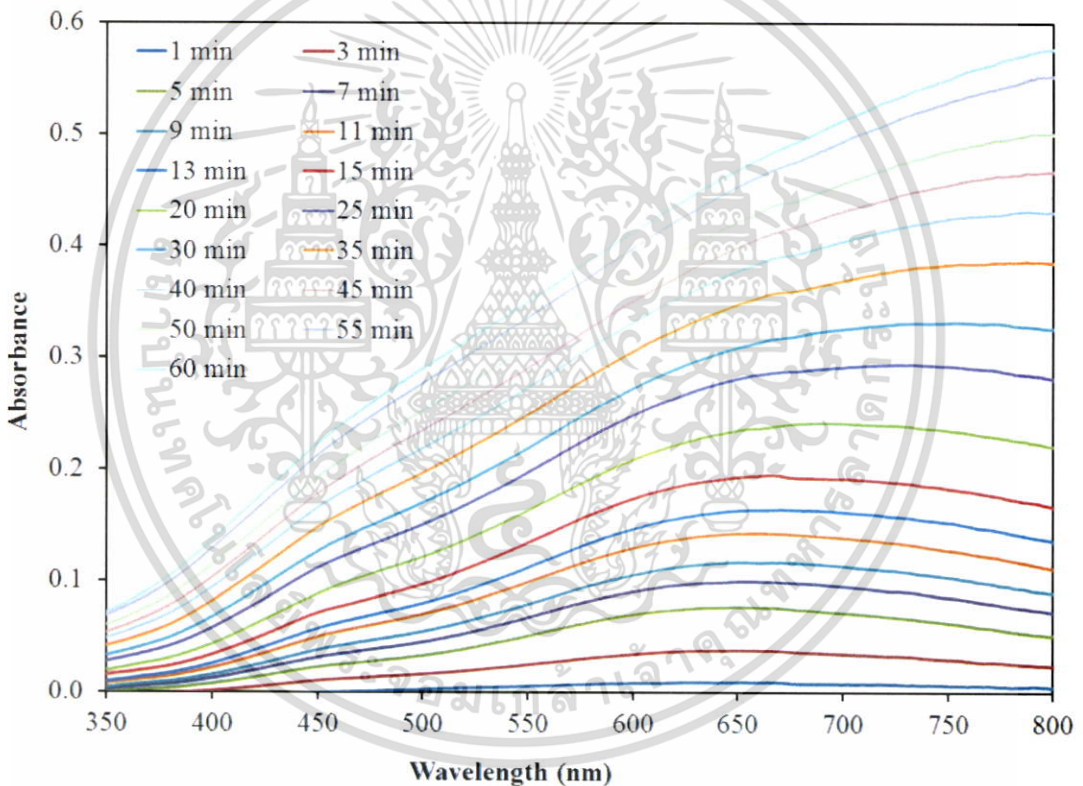
ในงานวิจัยนี้มีความต้องการที่จะสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) จึงได้มีการศึกษาสถานะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน อันได้แก่ การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนขึ้น โดยจะใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-visible spectrophotometry) ในการตรวจสอบสีของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน, ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDADMAC, ใช้เทคนิค Contact angle ในการตรวจสอบมุมสัมผัสของของเหลวบนแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PPADMAC และใช้เทคนิค X-ray diffraction (XRD) ในการตรวจสอบการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

#### 4.2.1 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยนำแผ่นกระจกที่เตรียมพื้นผิวแล้ว (Primer) มาจุ่มในสารละลาย AgTNP เวลา 1 นาที แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง ทำซ้ำโดยใช้แผ่นกระจกเดิมมาจุ่มในสารละลายเดิมต่ออีกจนครบเป็นเวลา 3, 5, 7, 9 และทำไปเรื่อยๆจนครบ 60 นาที ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สเปกตราแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PPADMAC ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งเมื่อทำการวัดไปเรื่อยๆจนครบ 60 นาที ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนก็ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ ดังนั้นจึงทำการเลือกเวลาที่ 20 นาทีในการจุ่มสารละลาย

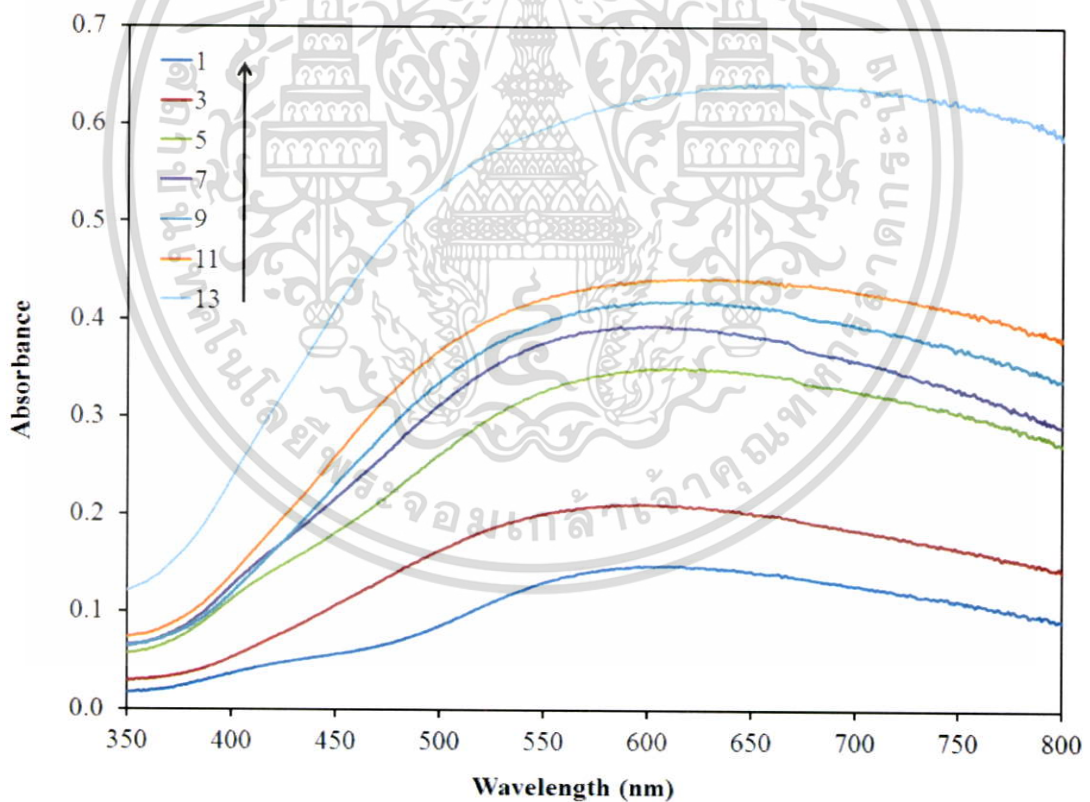
อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนเนื่องจากเวลาที่ 20 นาทีเป็นเวลาที่ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

#### 4.2.2 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่มีจำนวนชั้นที่แตกต่างกัน และทำการศึกษาลักษณะเฉพาะ ดังต่อไปนี้

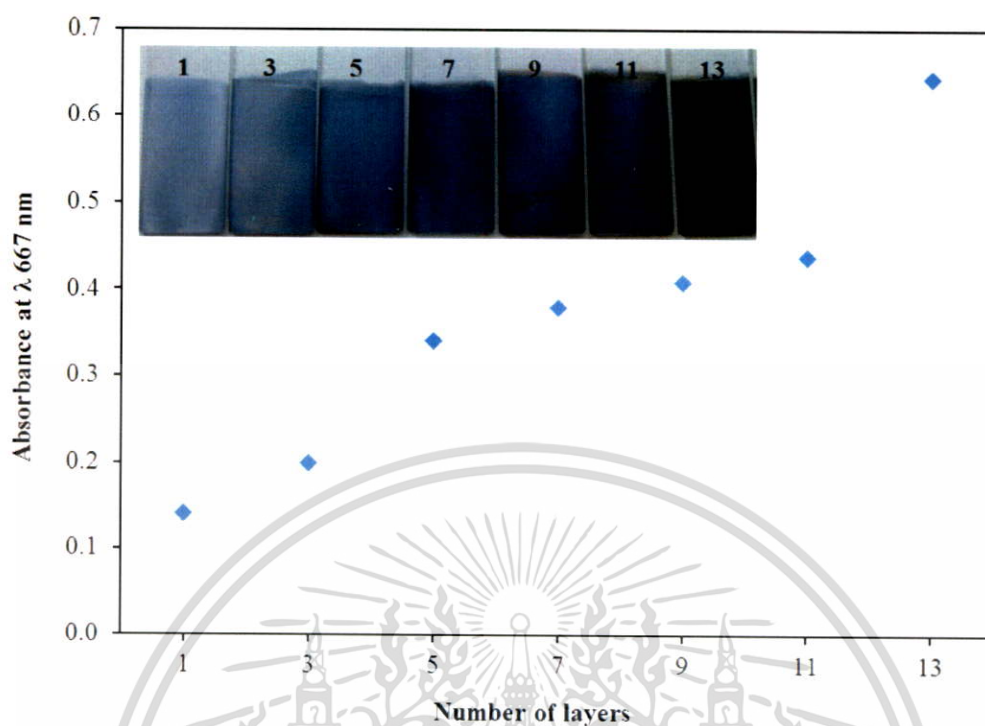
##### 4.2.2.1 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยนำแผ่นกระจกที่เตรียมพื้นผิวแล้ว (Primer) ลงจุ่มในสารละลาย AgTNPs สลับกับสารละลาย PDADMAC เป็นเวลา 20 นาทีและ 5 นาทีตามลำดับ โดยจะทำการจุ่มสลับไปมาจนได้ตามจำนวนชั้นที่ต้องการ คือ 1, 3, 5, 7, 9, 11 และ 13 ชั้น แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PPADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ

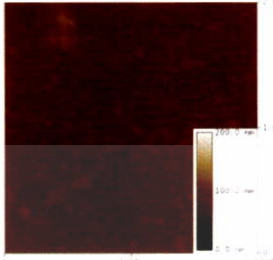





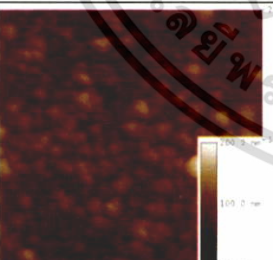

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น เพราะการใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) ในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโน จะอาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction) ระหว่างประจุบวกของ PPADMAC และประจุลบของ AgTNPs ทำให้การสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่มีจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น มีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้น เพราะเมื่อแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนเกิดการสะสม (Deposition) ของสารละลายทั้งสองเพิ่มมากขึ้น แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนจะมีการเติบโต (Growth) เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และในที่นี้จะเลือกใช้แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่มี 5 ชั้น เนื่องจากเป็นชั้นที่มีค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับที่จำนวนชั้นอื่นๆที่น้อยกว่า และไม่จำเป็นต้องเลือกใช้แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่มีจำนวนชั้นมากกว่าแต่มีแนวโน้มการให้สัญญาณเหมือนกันกับจำนวนชั้นที่น้อยกว่า เพราะมีผลเสีย คือ ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์นานมากขึ้น ซึ่งไม่ตรงตามเป้าหมายของวิธีวิเคราะห์นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยนำแผ่นกระจกที่เตรียมพื้นผิวแล้ว (primer) ลงจุ่มในสารละลาย AgTNPs สลับกับสารละลาย PDADMAC เป็นเวลา 20 นาทีและ 5 นาทีตามลำดับ โดยจะทำการจุ่มสลับไปมาจนได้ตามจำนวนชั้นที่ต้องการ คือ 1, 5, 9 และ 13 ชั้น แล้วนำไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่มีจำนวนชั้นที่ต่างกัน ค่าความหนาที่วัดได้จะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่เพิ่มขึ้น สามารถสังเกตได้จากจำนวนของอนุภาคของ AgTNPs ที่เพิ่มมากขึ้น เพราะเมื่อจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนเพิ่มขึ้น อนุภาคบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนจะเกิดการรวมตัวกัน (Aggregation) เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งการรวมตัวกัน (Aggregation) ที่เกิดขึ้นนี้อาจบ่งบอกถึงการเติบโตในแนวรัศมี (Radial growth) ของอนุภาคบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนหลังจากเกิดการสะสม (Deposition) [71]

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP's-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ

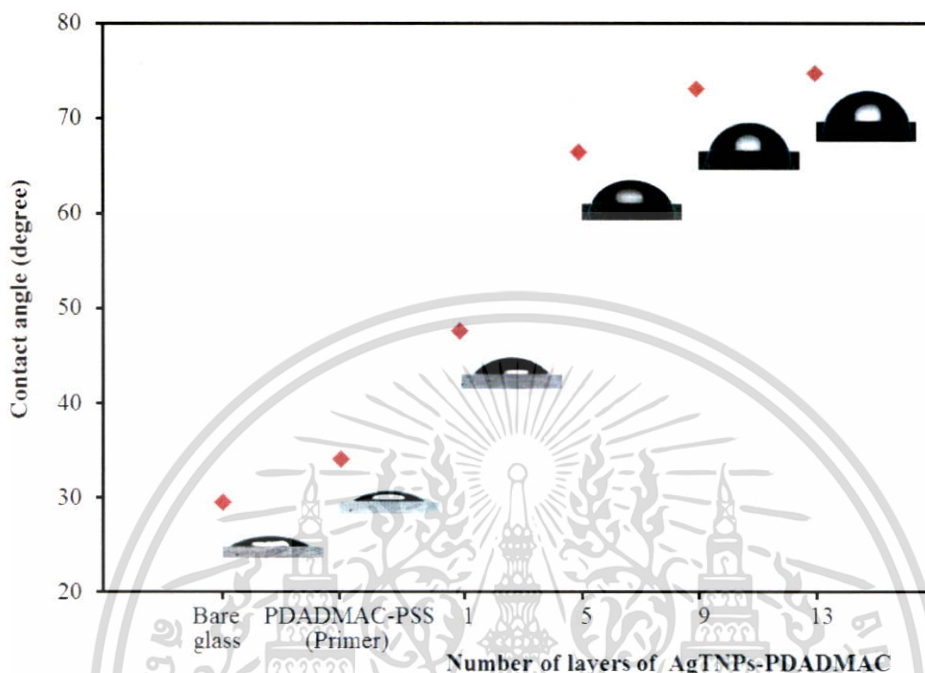
No. of layers	Morphological Evolution		RMS roughness (nm)	Thickness (nm)
	Two - dimensional (scanned at 2 $\mu$ m)	Three - dimensional (scanned at 2 $\mu$ m)		
1			3.923	2.613
5			5.486	7.490
9			9.840	12.120
13			13.448	21.928

#### 4.2.2.3 การศึกษามุมสัมผัสของของเหลวบนแผ่นฟิล์มบาง AgTNP's-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยนำแผ่นกระจกที่เตรียมพื้นผิวแล้ว (Primer) ลงจุ่มในสารละลาย AgTNP's สลับกับสารละลาย PDADMAC เป็นเวลา 20 นาทีและ 5 นาที ตามลำดับ โดยจะทำการจุ่มสลับไปมาจนได้ตามจำนวนชั้นที่ต้องการ คือ 1, 5, 9 และ 13 ชั้น แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปตรวจสอบมุมสัมผัสของของเหลวบนแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ ด้วยเทคนิค Contact angle ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10



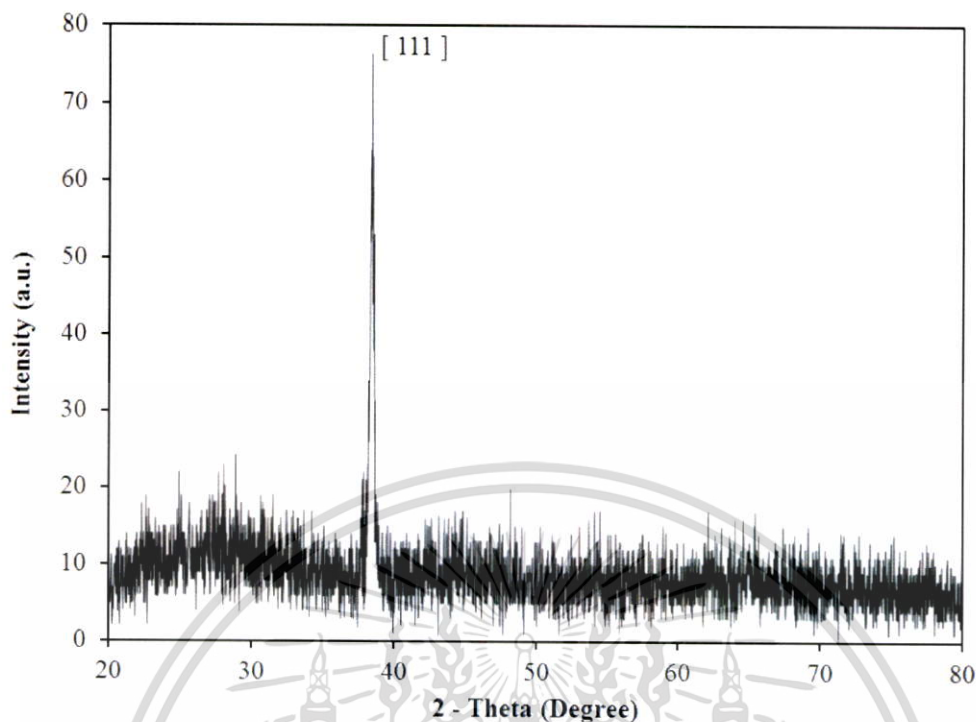
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงมุมสัมผัสของของเหลวบนแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนเพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากเมื่อจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนเพิ่มขึ้น อนุภาคบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนจะเกิดการปกคลุม (Coverage) เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความขรุขระเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสะสม (Deposition) ของอนุภาค AgTNPs บนแผ่นฟิล์มบาง และเมื่อค่าความขรุขระเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Robert N. Wenzel [72 - 73]

#### 4.2.2.4 การศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยนำแผ่นกระจกที่เตรียมพื้นผิวแล้ว (Primer) ลงจุ่มในสารละลาย AgTNPs สลับกับสารละลาย PDADMAC แล้วนำไปตรวจสอบการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ภาพแสดงการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

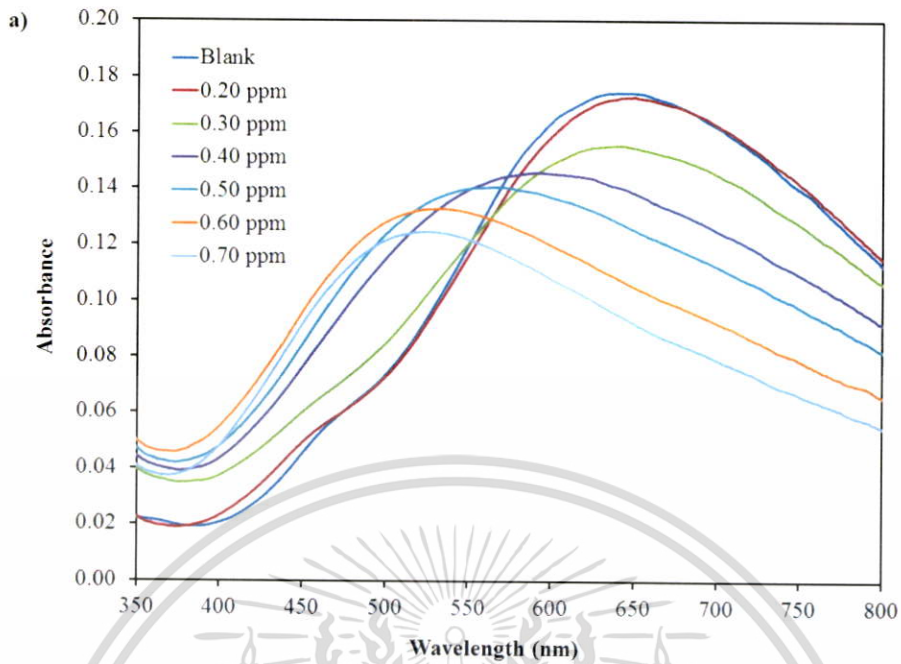
จากรูปที่ 4.11 เป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์หามุมของสามเหลี่ยมของอนุภาคเงินในระดับนาโน โดยการใช้เทคนิค XRD พบว่าที่พีกเอกลักษณ์ซึ่งมีค่า 2 - Theta เท่ากับ 38.4 องศา จะแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered cubic (FCC) ของอนุภาคเงิน ที่มีระนาบในผลึกเป็น [111] [74] แสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคเงินในระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้อยู่บนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

### 4.3 การนำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท

#### 4.3.1 การตรวจวัดปรอทโดยการใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs)

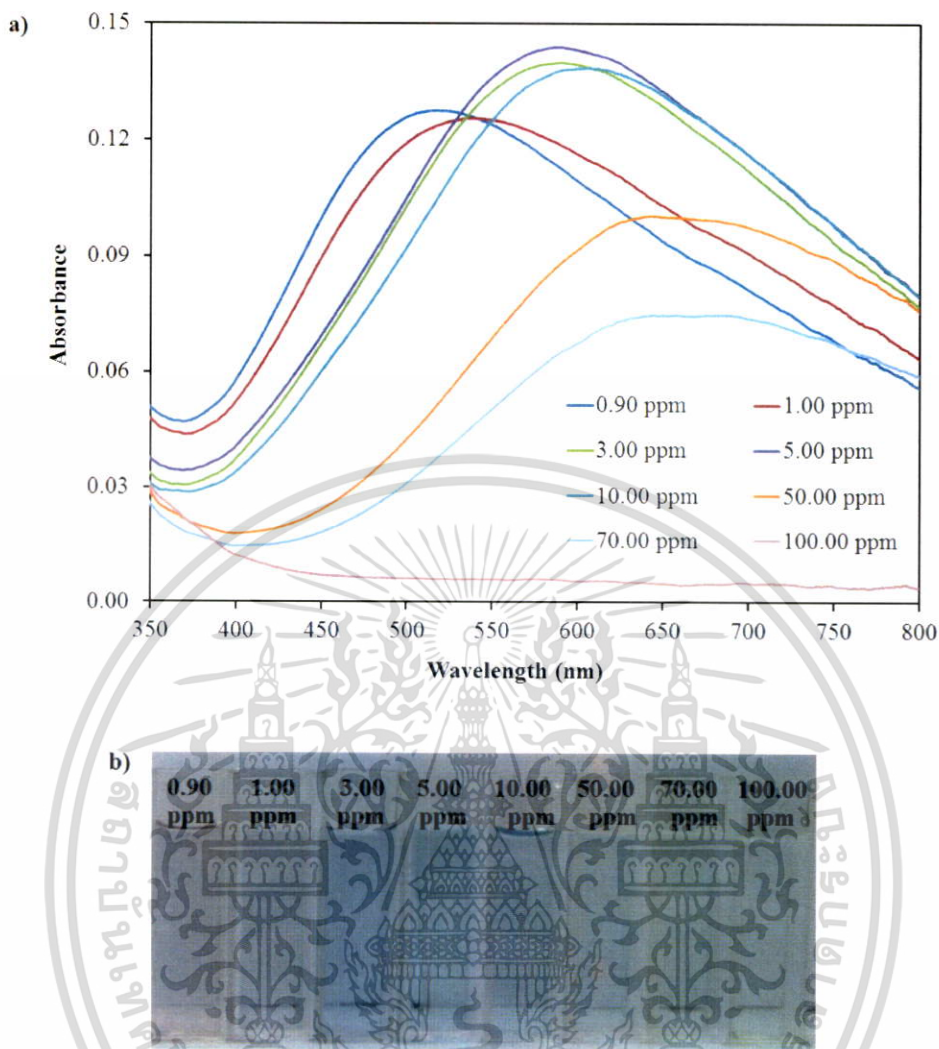
##### 4.3.1.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท ( $\text{HgCl}_2$ )

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.90, 1.00, 3.00, 5.00, 10.00, 50.00, 70.00 และ 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แล้วทำการวิเคราะห์ปรอทโดยการผสมสารละลาย AgTNPs เข้ากับสารละลายมาตรฐานในแต่ละความเข้มข้น แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14



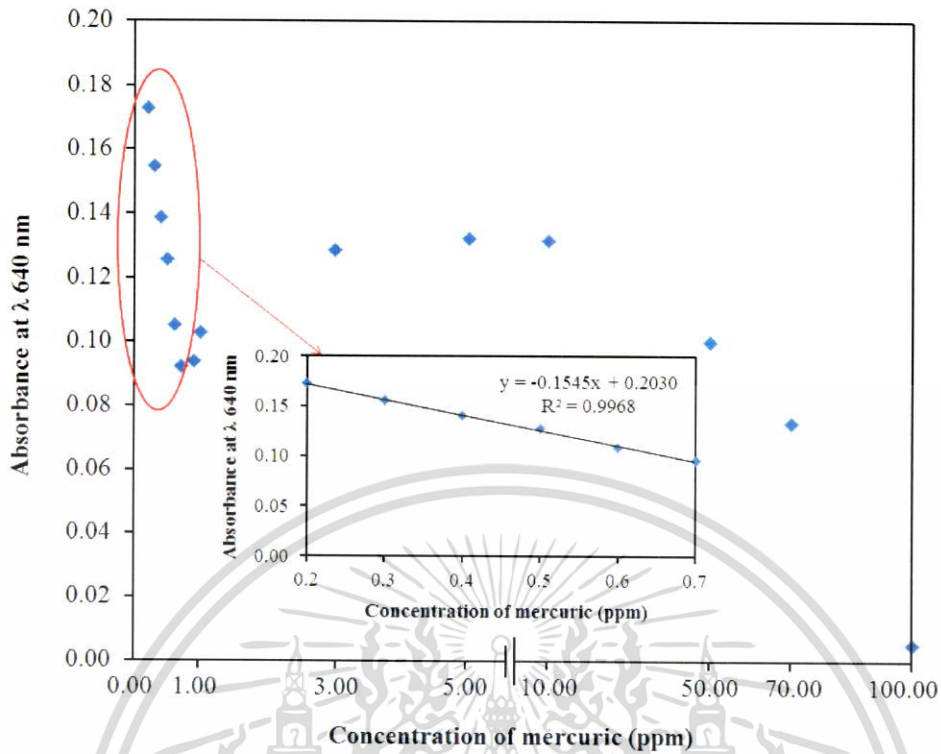
รูปที่ 4.12 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNPs (a) และภาพแสดงสีของสารละลาย (b) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.20 - 0.70 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNPs (a) และภาพแสดงสีของสารละลาย (b) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.90 - 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทเพิ่มมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNPs ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทจะมีค่าลดลง และสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปเป็นสารละลายสีม่วงอ่อน, สารละลายสีฟ้าและสารละลายใสไม่มีสี แสดงว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแปรผกผันกับค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอท



รูปที่ 4.14 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNP's เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNP's เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทในช่วงความเข้มข้น 0.20 - 0.70 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นเส้นตรง ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9968

จากผลการศึกษาสภาพความเป็นประจุกับลักษณะรูปร่างของสารละลาย AgTNP's เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4 และในรูปที่ 4.15 ตามลำดับ

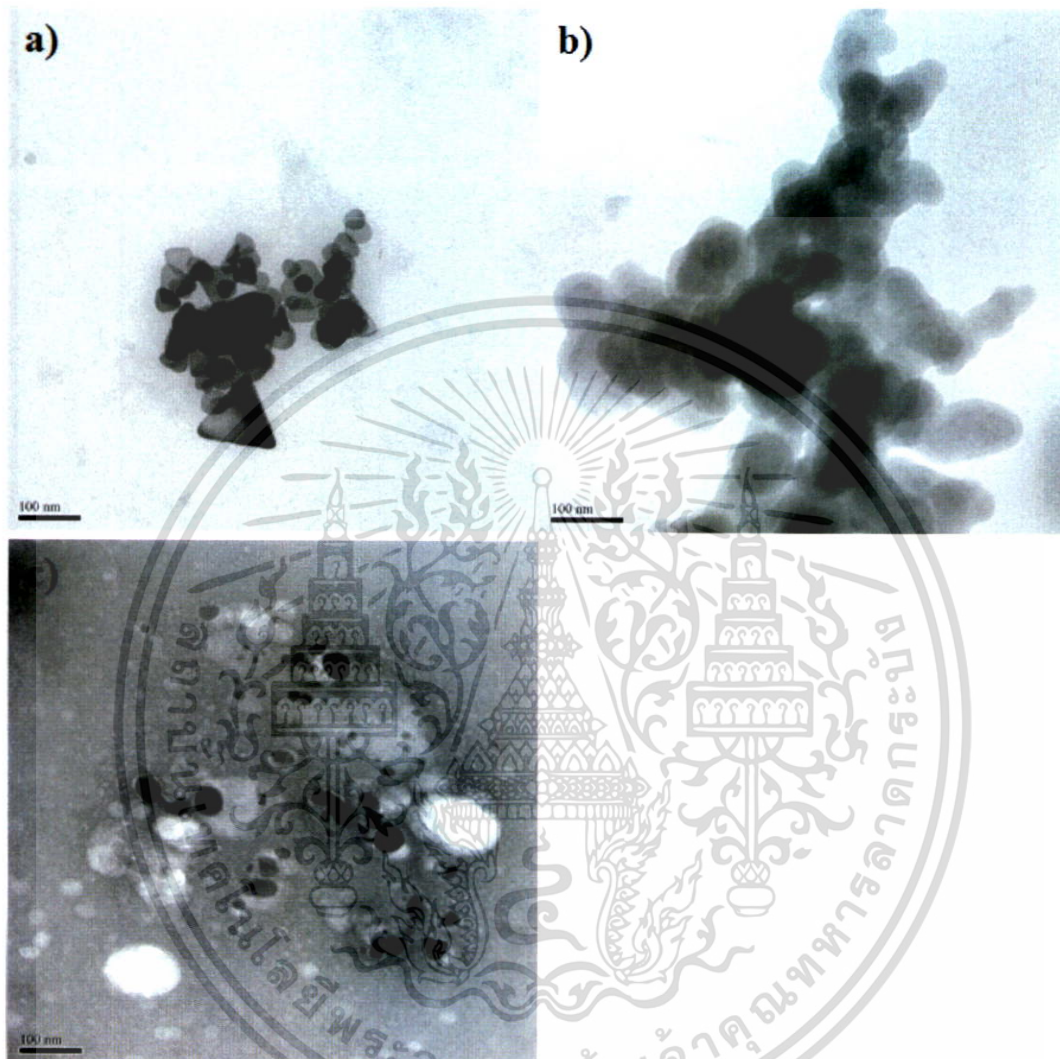
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าศักย์ซีต้าของสารละลาย AgTNP's ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.40 , 10.00 และ 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

Concentration of mercuric (ppm)	Zeta potentials (mV)
0.40	-36.9
10.00	-36.4
100.00	-40.9

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำสารละลาย AgTNP's ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆ และนำไปตรวจวัดค่าศักย์ซีต้า พบว่าสภาพความเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจักษ์ยังคงเป็นลอบอยู่ และสภาพความเป็นประจุลบลดลงเมื่อสารละลาย AgTNPs ทำปฏิกิริยากับ สารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้น 10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยากับ สารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.15 ภาพจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของ สารละลาย AgTNPs ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้น 0.40 (a), 10.00 (b) และ 100.00 (c) มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสารละลาย AgTNPs ทำปฏิกิริยากับ สารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น อนุภาคของ AgTNPs จะค่อยๆ สูญเสีย คุณสมบัติที่เป็นรูปร่างสามเหลี่ยมไปเป็นอนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายทรงกลมพร้อมทั้งเกิดการสลายตัวของอนุภาคด้วย ซึ่งสมการแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาค AgTNPs กับปรอท ( $Hg^{2+}$ ) เป็นไปดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากสมการ (5) จะแสดงให้เห็นว่าปรอท ( $\text{Hg}^{2+}$ ) จะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาค AgTNP หรือ  $\text{Ag}^0$  โดยการออกซิไดซ์จนทำให้กลายเป็น  $\text{Ag}^+$  หรือ Silver ion ทำให้รูปร่างของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปและที่ความเข้มข้นของปรอทสูงๆ อนุภาคของ AgTNP ก็จะมีการสลายตัวไปเนื่องจากถูกปรอทออกซิไดซ์จนหมด นอกจากนี้เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวยังส่งผลให้เกิดอนุภาค Hg-Ag หรือ Amalgam ขึ้นอีกด้วย [65]

#### 4.3.1.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

ผลจากการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงของสาร และการวัดสารละลายแบลนด์ (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร  $3SD$  of blank/Slope เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank และ Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5

#### 4.3.1.3 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

ผลจากการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงของสาร และการวัดสารละลายแบลนด์ (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร  $10SD$  of blank/Slope เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank และ Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่า LOD และ LOQ

ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธี	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)	$0.12 \pm 0.006$ มิลลิกรัมต่อลิตร
ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)	$0.39 \pm 0.006$ มิลลิกรัมต่อลิตร

จากตารางที่ 4.5 พบว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด มีค่าเท่ากับ  $0.12 \pm 0.006$  มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ เท่ากับ  $0.39 \pm 0.006$  มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 4.3.1.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

ผลจากการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของปรอทในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่ม ที่ทำโดยการนำน้ำประปาและน้ำดื่มมาเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.40, 0.50 และ 0.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นนำไปผสมกับสารละลาย AgTNP แล้วทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6

ผลจากการศึกษาค่าความแม่นยำ (Accuracy) ซึ่งจะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, RSD) ที่สามารถทำได้โดยการตรวจวัดซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร  $(SD/\bar{x}) \times 100$  เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้และ  $\bar{x}$  คือค่าเฉลี่ย (Mean) ของความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy) ในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่ม

Water Samples	Concentration of mercuric (ppm)		%Recovery	RSD
	Added	Found		
Tap water	0.00	ND.	-	-
	0.40	0.410 ± 0.010	102.5	2.4
	0.50	0.503 ± 0.010	100.5	2.0
	0.70	0.699 ± 0.006	99.9	0.9
Drinking water	0.00	ND.	-	-
	0.40	0.414 ± 0.006	103.6	1.6
	0.50	0.507 ± 0.007	101.4	1.5
	0.70	0.703 ± 0.016	100.5	2.3

จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าในตัวอย่างน้ำประปาสามารถหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ได้เท่ากับ 99.9 - 102.5 % และในตัวอย่างน้ำดื่มสามารถหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ได้เท่ากับ 100.5 - 103.6 % ซึ่งค่าที่ได้จากการตรวจวัดน้ำตัวอย่างทั้งสองนี้ มีค่าใกล้เคียง 100 % แสดงให้เห็นว่าไม่มีตัวรบกวนที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ และจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของปรอทเพิ่มขึ้นค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) จะมีค่าใกล้เคียง 100 % มากขึ้น นอกจากนี้จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าความแม่นยำ (Accuracy) ที่ได้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่า RSD ที่มีค่าไม่เกิน 5 ทั้งนี้ยิ่งค่า RSD มีค่าน้อย จะแสดงให้เห็นว่าวิธีนั้นมีความแม่นยำที่ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1.5 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์

ผลจากการศึกษาว่าในการวิเคราะห์หมีตัวรบกวนใดที่รบกวนการวิเคราะห์หรือไม่ โดยการเติมตัวรบกวนต่างๆไปในสารละลาย AgTNPs ที่มีสารละลายมาตรฐานปรอทอยู่ จากนั้นทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุด เมื่อเติมตัวรบกวนต่างๆลงไป

Interference	$\lambda_{\max}$
Standard	673
Nickel (II) sulfate	678
Magnesium sulfate	671
Iron (II) sulfate	678
Copper (II) nitrate	673
Lead (II) nitrate	670

จากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมตัวรบกวนต่างๆลงในสารละลาย AgTNPs ที่มีสารละลายมาตรฐานปรอทอยู่ จากนั้นทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีค่าทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง แต่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ตรวจวัดได้ ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายที่ไม่มีการเติมตัวรบกวนลงไป (Standard) จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวรบกวนนั้นๆไม่มีผลต่อการวิเคราะห์

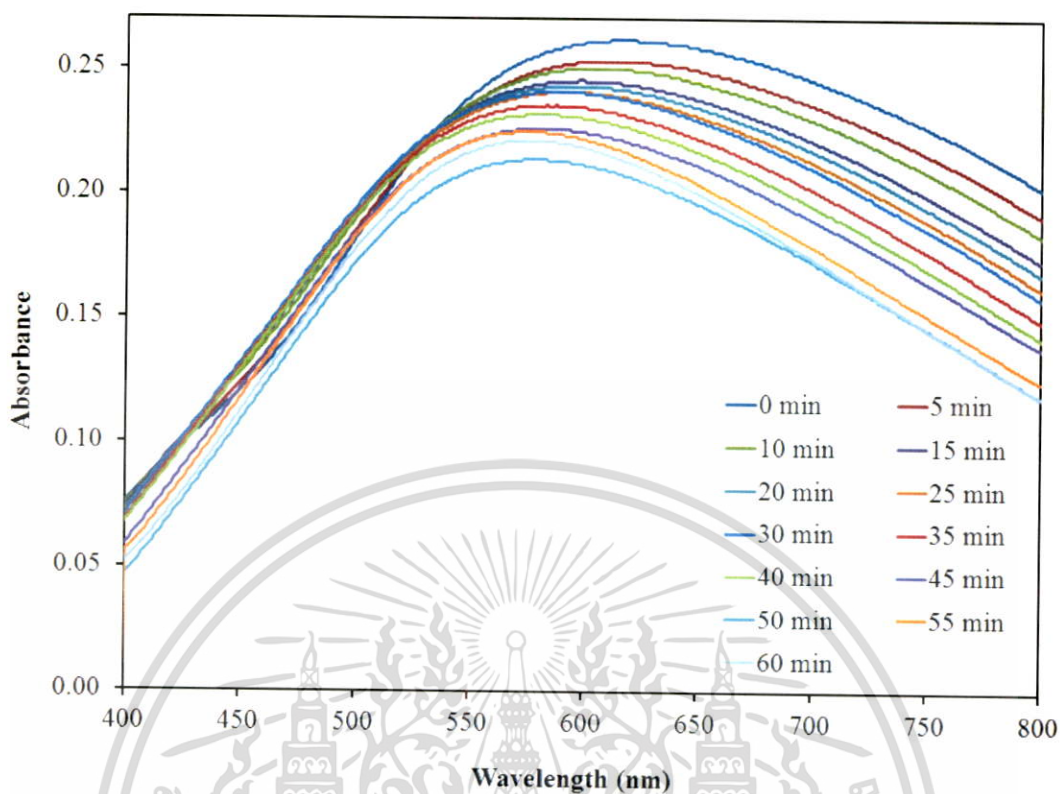
#### 4.3.2 การตรวจวัดปรอทโดยใช้แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

##### 4.3.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท

###### 4.3.2.1.1 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่ใช้ในการจุ่มสารละลายมาตรฐานปรอท

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ก่อนนำมาจุ่มลงในสารละลายมาตรฐานปรอทที่เตรียมไว้ เป็นเวลา 5 นาที และนำกลับไปวัดค่าการดูดกลืนแสงอีกครั้ง จากนั้นทำซ้ำโดยใช้แผ่นฟิล์มเดิมจุ่มสารละลายเดิมต่อจนครบเป็นเวลา 10, 15, 20, 25, 30 และทำไปเรื่อยๆจนครบ 60 นาที ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

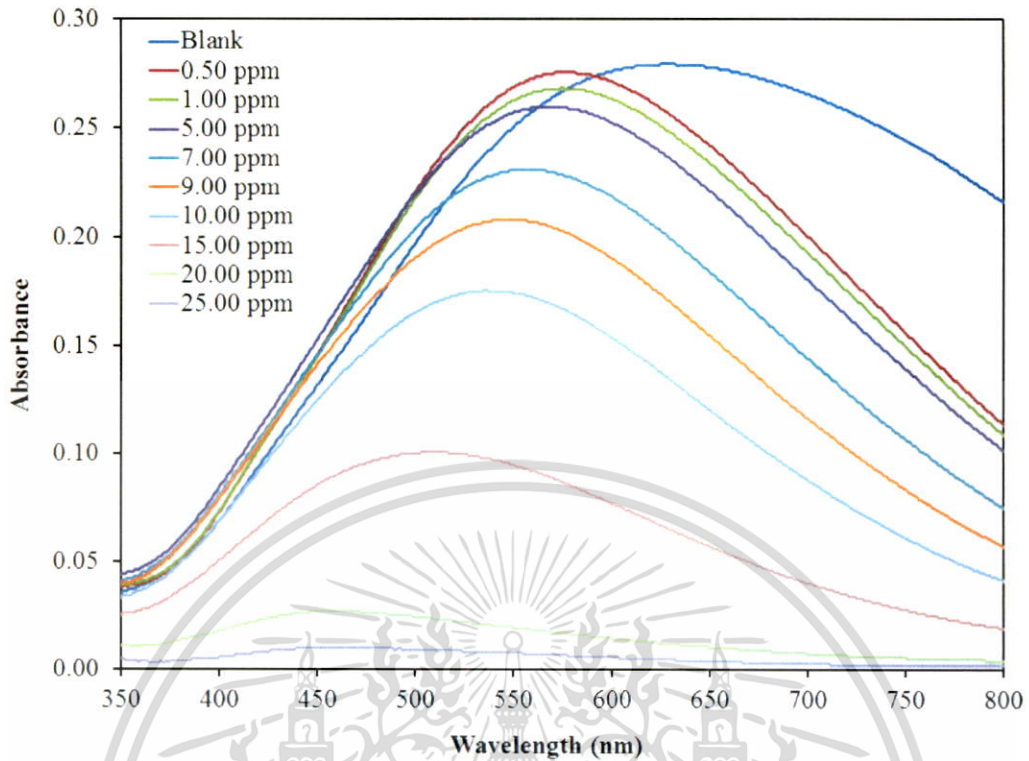


รูปที่ 4.16 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PAADMAC เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอท ณ เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทเป็นเวลานานมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงจะลดน้อยลง และเมื่อทำการวัดไปเรื่อยๆจนครบ 60 นาที ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนก็ยังมีแนวโน้มลดลงอยู่ จึงได้ทำการเลือกเวลาที่ 15 นาทีในการจุ่มสารละลายมาตรฐานปรอท เนื่องจากเวลาที่ 15 นาทีเป็นเวลาที่ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างชัดเจน

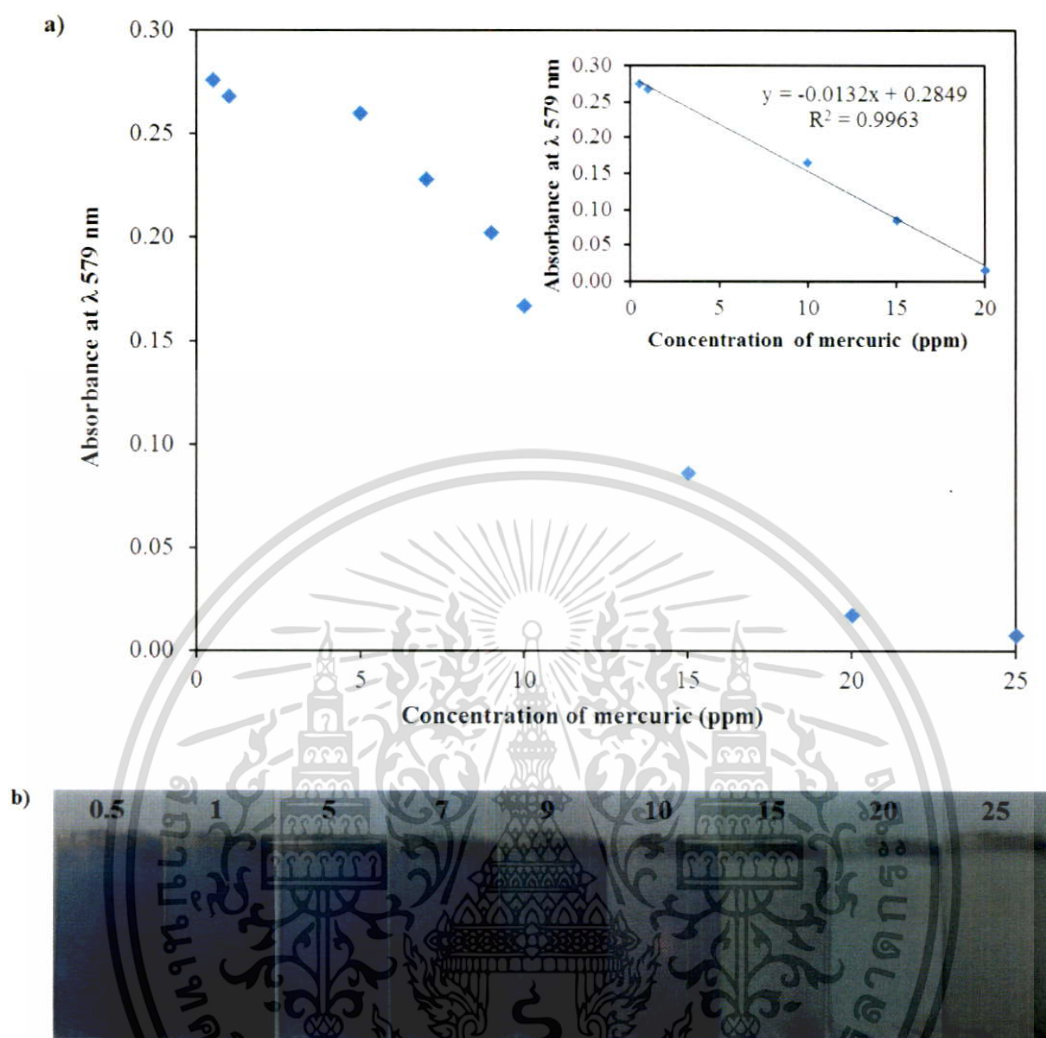
#### 4.3.2.1.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท ( $\text{HgCl}_2$ )

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.50, 1.00, 5.00, 7.00, 9.00, 10.00, 15.00, 20.00 และ 25.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แล้วทำการวิเคราะห์ปรอทโดยการจุ่มแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PAADMAC กับสารละลายมาตรฐานปรอทในแต่ละความเข้มข้น แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PAADMAC เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทแต่ละความเข้มข้น

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงจะลดน้อยลง แสดงว่าค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนแปรผกผันกับค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอท



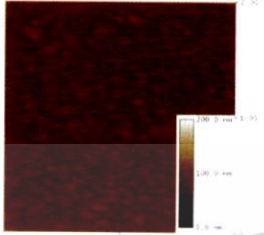
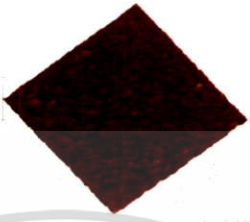
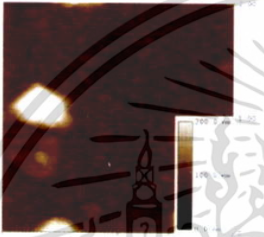

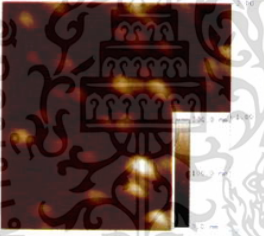

รูปที่ 4.18 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PPADMAC (a) และภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบาง (b) เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงกราฟมาตรฐานที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทกับค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงจะลดลง แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปเป็นสีม่วงจนกระทั่งใสไม่มีสี อีกทั้งยังพบว่าในกราฟมาตรฐานในช่วงความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอท 0.50 - 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความเป็นเส้นตรง ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9963

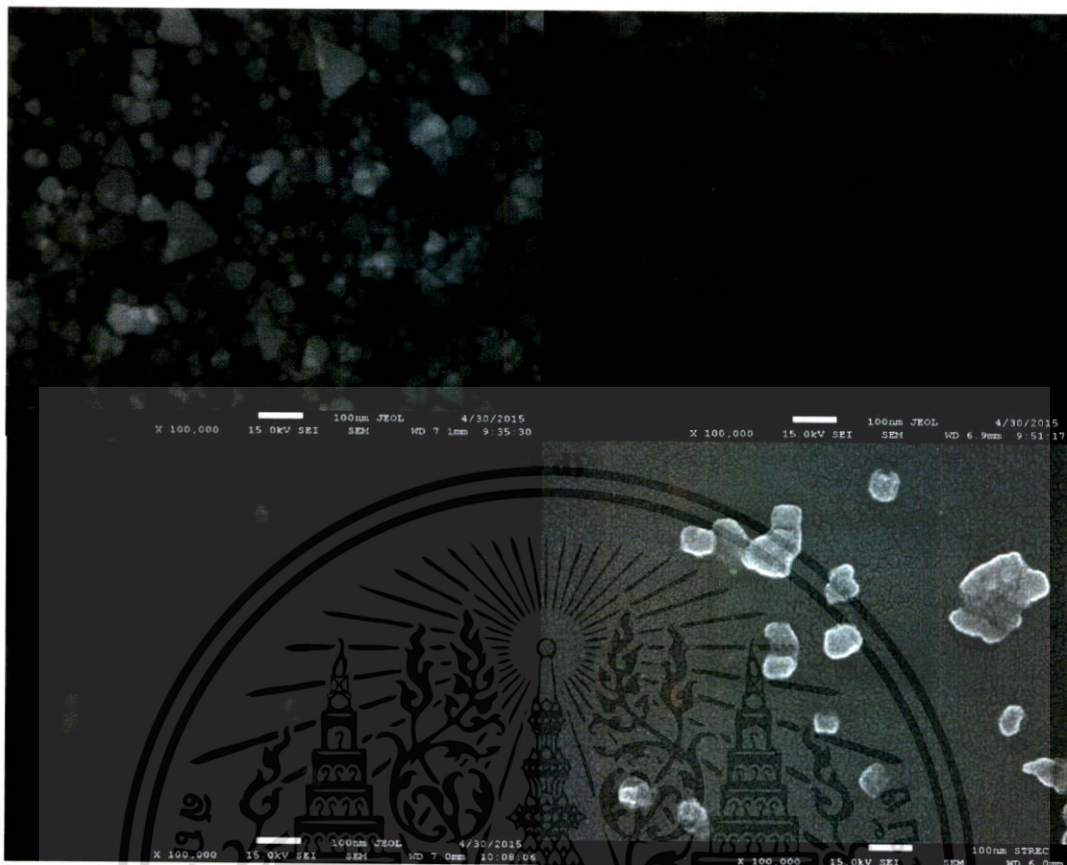
จากผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนา รวมถึงลักษณะสัญญาณของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PPADMAC เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.19 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-*PDADMAC* เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

Concentration of mercuric (ppm)	Morphological Evolution		RMS roughness (nm)	Thickness (nm)
	Two - dimensional (scanned at 2 $\mu\text{m}$ )	Three - dimensional (scanned at 2 $\mu\text{m}$ )		
0.50			5.762	6.896
10.00			12.841	9.972
20.00			19.072	12.957

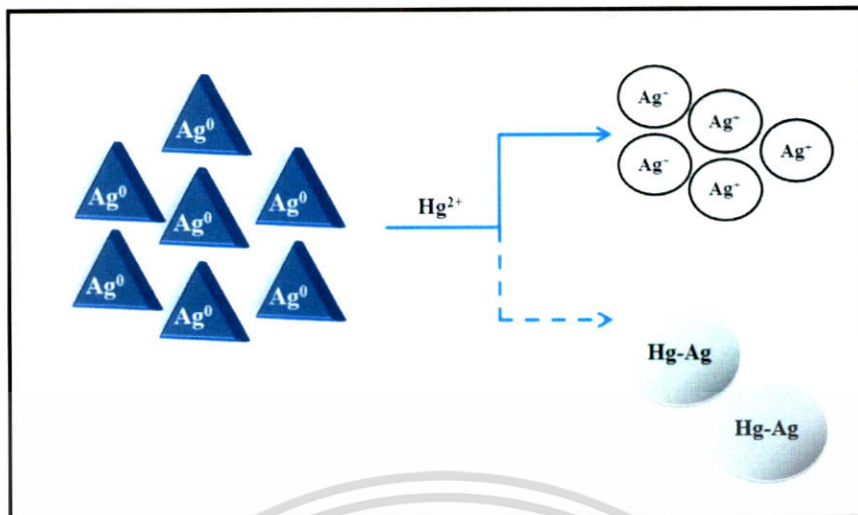
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ภาพ FESEM ของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PPADMAC เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 0.50 (b), 10.00 (c) และ 20.00 (d) มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วน (a) คือ AgTNPs-PPADMAC without mercuric

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทเพิ่มมากขึ้น ความหนาของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แสดงว่าความหนาของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนแปรผันตรงตามความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอท

จากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น อนุภาคของ AgTNPs บนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนจะค่อยๆสูญเสียคุณลักษณะที่เป็นรูปร่างสามเหลี่ยมไปเป็นอนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายทรงกลมพร้อมทั้งเกิดการสลายตัวของอนุภาคด้วย ซึ่งเป็นไปตามกลไกปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แผนผังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับปรอท

จากรูปที่ 4.20 จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมปรอท ( $\text{Hg}^{2+}$ ) เข้าไป  $\text{Hg}^{2+}$  จะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาค AgTNPs ( $\text{Ag}^0$ ) ทำให้  $\text{Ag}^0$  กลายเป็น  $\text{Ag}^+$  พร้อมทั้งเกิดอนุภาค Hg - Ag (Amalgam) ขึ้น [65] ส่งผลให้รูปร่างของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปและที่ความเข้มข้นของปรอทสูงๆ อนุภาคของ AgTNPs ก็เกิดสลายตัวไปเนื่องจากถูกปรอทออกซิไดซ์จนหมด

#### 4.3.2.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

ผลจากการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน กับค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และการวัดแบล็ค (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งการวัดแบล็คในที่นี้ จะวัดจากแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่ยังไม่ได้จุ่มในสารละลายมาตรฐาน หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร  $3SD$  of blank/Slope เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank และ Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.9

#### 4.3.2.3 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

ผลจากการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และการวัดแบล็ค (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งการวัดแบล็คในที่นี้ จะวัดจากแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่ยังไม่ได้จุ่มในสารละลายมาตรฐาน หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร  $10SD$  of blank/Slope เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank และ Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงค่า LOD และ LOQ

ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธี	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)	$0.45 \pm 0.002$ มิลลิกรัมต่อลิตร
ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)	$1.52 \pm 0.002$ มิลลิกรัมต่อลิตร

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด มีค่าเท่ากับ  $0.45 \pm 0.002$  มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ เท่ากับ  $1.52 \pm 0.002$  มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 4.3.2.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

ผลจากการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของปรอทในตัวอย่างน้ำประปา และน้ำดื่มที่ทำโดยการนำน้ำประปาและน้ำดื่มมาเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐาน ปรอทที่ความเข้มข้น 5.00, 10.00 และ 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นนำแผ่นฟิล์มบาง AgTNP- PDADMAC จุ่มกับสารละลายมาตรฐานในแต่ละความเข้มข้น แล้วทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.10

ผลจากการศึกษาค่าความแม่นยำ (Accuracy) ซึ่งจะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, RSD) ที่สามารถทำได้โดยการตรวจวัดซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร  $(SD/\bar{x}) \times 100$  เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้และ  $\bar{x}$  คือค่าเฉลี่ย (Mean) ของความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy) ในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่ม

Water Samples	Concentration of mercuric (ppm)		%Recovery	RSD
	Added	Found		
Tap water	0.00	ND.	-	-
	5.00	$5.321 \pm 0.087$	106.4	1.6
	10.00	$10.043 \pm 0.044$	100.4	0.4
	20.00	$20.018 \pm 0.087$	100.1	0.4
Drinking water	0.00	ND.	-	-
	5.00	$5.194 \pm 0.116$	103.9	2.2
	10.00	$10.396 \pm 0.044$	104.0	0.4
	20.00	$20.043 \pm 0.087$	100.2	0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าในตัวอย่างน้ำประปาสามารถหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ได้เท่ากับ 100.1 - 106.4 % และในตัวอย่างน้ำดื่มสามารถหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ได้เท่ากับ 100.2 - 104.0 % ซึ่งค่าที่ได้จากการตรวจวัดน้ำตัวอย่างทั้งสองนี้ มีค่าใกล้เคียง 100 % แสดงให้เห็นว่าไม่มีตัวรบกวนที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ และจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของปรอทเพิ่มขึ้นค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) จะมีค่าใกล้เคียง 100 % มากขึ้น นอกจากนี้จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าความแม่นยำ (Accuracy) ที่ได้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่า RSD ที่มีค่าไม่เกิน 5 ทั้งนี้ยังค่า RSD มีค่าน้อย จะแสดงให้เห็นว่าวิธีนั้นมีความแม่นยำที่ดียิ่งขึ้น

#### 4.3.2.5 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์

ผลจากการศึกษาว่าในการวิเคราะห์มีตัวรบกวนใดที่รบกวนการวิเคราะห์หรือไม่ โดยการจุ่มแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PPADMAC ลงสารละลายมาตรฐานปรอทที่เติมตัวรบกวนต่างๆลงไป จากนั้นทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุด เมื่อเติมตัวรบกวนต่างๆลงไป

Interference	$\lambda_{\max}$
Standard	592
Magnesium sulfate	592
Iron (II) sulfate	601
Copper (II) nitrate	603
Lead (II) nitrate	594
Nickel (II) sulfate	590

จากตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่จุ่มในสารละลายที่ไม่มีตัวรบกวนและสารละลายที่มีตัวรบกวนตัวนั้นๆอยู่ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ตรวจวัดได้ มีค่าใกล้เคียงกัน ที่ความเข้มข้นของตัวรบกวนต่างกัน และเมื่อทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความเข้มข้นเดียวกันของตัวรบกวนต่างๆ พบว่าการตรวจวัด  $Hg^{2+}$  มีความจำเพาะเจาะจงสูงมากเมื่อเทียบกับไอออนของโลหะอัลคาไลเอิร์ทและโลหะทรานซิชันอื่นๆ [65, 75] จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวรบกวนนั้นๆไม่มีผลต่อการวิเคราะห์

#### 4.3.2.6 ศึกษาเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์นี้กับวิธีอื่น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทหนักกับวิธีอื่นๆ ซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงการเปรียบเทียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอท

Method	Probe	Limit of detection ( $\mu\text{M}$ )	Ref.
Voltammetry	Carbon nanotubes/ Glassy carbon electrode	10	[76]
Colorimetry/Fluorescence	Dichlorofluorescein- piperazinyl-coumarin	4.3	[77]
Fluorescence	Rhodamine	2.5	[78]
Colorimetry	Silver nanoparticles	2.2	[66]
Phosphorescence	Iridium (III) complex	2.14	[79]
Colorimetry	Silver triangular nanoprisms	1.7	This work

จากตารางที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทนี้กับวิธีอื่นๆ พบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นมานี้มีประสิทธิภาพสามารถใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทได้จริง สามารถพิจารณาได้จากค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection) ที่มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น บ่งบอกถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่าของวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งสรุปผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ดังต่อไปนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือ การศึกษาสภาวะต่างๆในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน อันได้แก่ การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรตและการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน พบว่าค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรตและโซเดียมโบโรไฮไดรด์ เท่ากับ 20.00 มิลลิโมลาร์ และ 0.62 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ส่วนที่สอง คือ จากการศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) อันได้แก่ การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน พบว่าเวลาที่ 20 นาที และจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่ 5 ชั้น เป็นสภาวะที่เหมาะสมเพียงพอที่จะใช้ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนสำหรับการตรวจวัดปรอท และส่วนสุดท้าย คือ จากการนำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท พบว่าในส่วนของการวิเคราะห์ กราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทกับค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งมีสมการ คือ  $y = -0.1545x + 0.2030$  มีความเป็นเส้นตรง เท่ากับ 0.9968 ในช่วงความเข้มข้น 0.20 - 0.70 มิลลิกรัมต่อลิตร, ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ  $0.12 \pm 0.006$  มิลลิกรัมต่อลิตร, ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ) เท่ากับ  $0.39 \pm 0.006$  มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) เท่ากับ 99.9 - 102.5 % ซึ่งมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) เท่ากับ 0.9 - 2.4 % สำหรับตัวอย่างน้ำประปา ส่วนตัวอย่างน้ำดื่มมีค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) เท่ากับ 100.5 - 103.6 % และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) เท่ากับ 1.5 - 2.3 % ทั้งนี้ในส่วนของการศึกษาแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนพบว่า กราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทกับค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งมีสมการ คือ  $y = -0.0132x + 0.2849$  มีความเป็นเส้นตรง เท่ากับ 0.9963 ในช่วงความเข้มข้น 0.50 - 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร, ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ  $0.45 \pm 0.002$  มิลลิกรัมต่อลิตร, ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ) เท่ากับ  $1.52 \pm 0.002$  มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) เท่ากับ 100.1 - 106.4 % ซึ่งมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) เท่ากับ 0.4 - 1.6 % สำหรับตัวอย่างน้ำประปา ส่วนตัวอย่างน้ำดื่มมีค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) เท่ากับ 100.2 - 104.0 % และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) เท่ากับ 0.4 - 2.2 % ซึ่งสิ่งเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นมานี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ และมีข้อดีกว่าเทคนิคอื่นๆที่ใช้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบปรอทเช่นเดียวกัน คือ เป็นวิธีที่สะดวก ใช้งานง่าย รวดเร็ว และมีค่าใช้จ่ายไม่สูงนักเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น รวมทั้งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มตัวแปรศึกษาเกี่ยวกับสภาวะของการทดลองให้มากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง, การศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของเกลือ เป็นต้น เพื่อให้การทดลองมีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้น
2. ควรทำการศึกษาสารตัวอื่นที่มีคุณสมบัติเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ
3. การนำสารละลาย AgTNP<sub>s</sub> ที่สังเคราะห์ได้และแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น ตัวอย่างทางด้านชีวภาพ, ตัวอย่างทางการแพทย์ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] 2015. โรคมินะมาตะ. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/>.
- [2] Mandiwana, K.L. Kalumba, M.M. and Panichev, N. 2014. “Solid phase extraction of trace amount of mercury from natural waters on silver and gold nanoparticle.” *Analytica Chimica Acta*. 813(2014) : 56-62.
- [3] Zhang, J. Sun, Y. Zhang, H. Xu, B. Zhang, H. and Song, D. 2013. “Preparation and application of triangular silver nanoplates/chitosan composite in surface plasmon resonance biosensing.” *Analytica Chimica Acta*. 769(2013) : 114-120.
- [4] Hou, X. Chen, S. Tang, T. Xiong, Y. and Long, Y. 2014. “Silver nanoplates-based colorimetric iodide recognition and sensing using sodium thiosulfate as a sensitizer.” *Analytica Chimica Acta*. 825(2014) : 57-62.
- [5] นาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/นาโนเทคโนโลยี>.
- [6] SC-nano technology. [online]. Available : <http://www.scworksthailand.com/nano/index.php>.
- [7] 2006. นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ. [Online]. Available : <http://bio510.blogspot.com/2006/01/bionanotechnology-21-3-21.html>.
- [8] supading77. 2015. นาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/supading77/nano-thechnologi>.
- [9] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2558. วัสดุนาโน. [Online]. Available : [http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=32&chap=8&page=t\\_32-8-infodetail04.html](http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=32&chap=8&page=t_32-8-infodetail04.html).
- [10] การประยุกต์ใช้งานนาโน. [Online]. Available : <http://202.28.92.26/e-learning/614351/nanotoxicology/application.htm>.
- [11] Teik,-C. L. and Seeram, R. 2006. **A Conceptual Review of Nanosensors.** [Online]. Available : <http://znaturforsch.com/aa/v61a/s61a0402.pdf>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] นาโนเซ็นเซอร์ เทคโนโลยีใหม่ในการวินิจฉัยโรคอัลไซเมอร์. [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/vcafe/20091>.
- [13] ศิริศักดิ์ เทพาคำ. 2015. NANOTECHNOLOGY. [Online]. Available : <http://www.rmutphysics.com/charud/specialnews/2/nano1/nano.pdf>.
- [14] Bouapram-nano. 2008. NANO. [Online]. Available : <http://bourpram-nano.blogspot.com/2008/02/3.html>.
- [15] 2015. อนาคตของ NANOMEDICINE. [Online]. Available : [http://www.ostc.thaie mbdc.org/news\\_us/Dec52\\_8.html](http://www.ostc.thaie mbdc.org/news_us/Dec52_8.html).
- [16] 2015. การสร้างเครื่องยนต์นาโน. [Online]. Available : [http://www.ostc.thaie mbdc.org/news\\_us/May52\\_7.html](http://www.ostc.thaie mbdc.org/news_us/May52_7.html).
- [17] Robert A. Freitas Jr. 2010. The Future of Nanomedicine. [Online]. Available : <http://www.wfs.org/Dec09-Jan10/freitas.htm>.
- [18] สวทช. 2015. มาร์จิกนาโนซิลเวอร์. [Online]. Available : <http://www.nstda.or.th/nstda-knowledge/18889-silver-nano>.
- [19] พิริยธร สุวรรณมาลา และ เกศินี เหมวิเชียร. 2015. การเตรียมอนุภาคนาโนเงินที่ทำให้เสถียรโดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยการฉายรังสีแกมมา. [Online]. Available : <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5104/nkc5104p.html>.
- [20] 2007. Silver nanoparticle. [Online]. Available : <https://promgong.wordpress.com/2007/06/12/>.
- [21] Moores, A. and Goettmann, F. 2015. The plasmon band in noble metal nanoparticles an introduction to theory and applications. [Online]. Available : <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2006/NJ/b604038c#!divAbstract>.
- [22] โครงการพัฒนาฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน สถาบันวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการ ด้านวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2015. ฐานข้อมูลความปลอดภัยวัสดุนาโน. [Online]. Available : [http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat\\_id=8&p\\_id=235](http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat_id=8&p_id=235).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] 2013. อนุภาคนาโนของเงินฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้อย่างไร. [Online]. Available : <http://www.prime-nano.com/#!untitled/c1hh1>.
- [24] เณศรา แก้วคง, เลิศณรงค์ ศรีพนม, เจ๊ะฮาซัน เจ๊ะอุบง, และ ศิริวรรณ ตี๋ภู. 2014. การสังเคราะห์และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์โดยวิธีรีดักชันทางเคมี. [Online]. Available : <http://www.sci.rmutt.ac.th/stj/index.php/Volume5/article/viewFile/64/87>.
- [25] Song, K. C. Lee, S. M. Park, T. S. and Lee, B. S. 2009. "Preparation of colloidal silver nanoparticles by chemical reduction method." *Korean J. Chem. Eng.* 26(1) : 153-155.
- [26] Mallick, K. Witcomb, M. J. and Scurrrell, M. S. 2004. Polymer stabilized silver nanoparticles: A photochemical synthesis route. [Online]. Available : <http://link.springer.com/article/10.1023%2FB%3AJMSC.0000034138.80116.50#page-1>.
- [27] SREERAM, K. J. NIDHIN, M. and NAIR, B. U. 2008. Microwave assisted template synthesis of silver nanoparticles. [Online]. Available : <http://www.ias.ac.in/matersci/bmsdec2008/937.pdf>.
- [28] 2015. microemulsion. [Online]. Available : <http://www.i-rashi.com/knowledge/Detail.asp?knowledgeID=6>.
- [29] ปิ่นฉัตร ภัทรสถาพรกุล. 2015. การทำให้เป็นเม็ดด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง. [Online]. Available : [http://www.thairefrig.or.th/download/thairefrig\\_or\\_th/freeze%20granulation.pdf](http://www.thairefrig.or.th/download/thairefrig_or_th/freeze%20granulation.pdf).
- [30] Husein, M. M. Rodil, E. Vera, J. H. 2007. Preparation of AgBr Nanoparticles in Microemulsions Via Reaction of AgNO<sub>3</sub> with CTAB Counterion. [Online]. Available : <http://link.springer.com/article/10.1007%2F978-1-4020-6910-7-4#page-2>.
- [31] Abou El-Nour, K. M. M. Eftaiha, A. Al-Warthan, A. Ammar, R. A. A. 2010. "Synthesis and applications of silver nanoparticles." *Arabian Journal of Chemistry.* 3(2010) : 135-140.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] Korbekandi, H. and Iravani, S. 2015. **Silver Nanoparticles**. [Online]. Available : [http://www.academia.edu/6997269/Silver\\_Nanoparticles](http://www.academia.edu/6997269/Silver_Nanoparticles).
- [33] Yang, X. H. Ling, J. Peng, J. Cao, Q. E. Ding, Z. T. Bian, L. C. 2013. “A colorimetric method for highly sensitive and accurate detection of iodide by finding the critical color in a color change process using silver triangular nanoplates.” *Analytica Chimica Acta*. 798(2013) : 74-81.
- [34] Zhang, T. Song Y. J Zhang, X. Y. and Wu, J. Y. 2014. “Synthesis of Silver Nano structure by Multistep Methods.” *Sensors*. 2014(14) : 5860-5889.
- [35] Agnihotri, S. Mukherji, S. and Mukherji, S. 2013. “Size-controlled silver nanoparticles synthesized over the range 5–100 nm using the same protocol and their antibacterial efficacy.” *RSC Advances*. 4(2014) : 3974-3983.
- [36] Métraux, G. S. and Mirkin, C. A. 2005. “Rapid thermal synthesis of silver nanoprisms with chemically tailorable thickness.” *ADVANCED MATERIALS*. 4(2005) : 412-415.
- [37] 2015. **ไซบริตนา...นาโนเทคโนโลยี**. [Online]. Available : [http://www.neutron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com\\_content&task=view&id=470&Itemid=0&limit=1&limitstart=7](http://www.neutron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com_content&task=view&id=470&Itemid=0&limit=1&limitstart=7)
- [38] 2015. **Plasmonics and Nanophotonics**. [Online]. Available : <http://nanocomposix.com/pages/plasmonics-and-nanophotonics>.
- [39] 2015. **Fluorophore**. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Fluorophore>.
- [40] Dubas, S.T. 2007. “Preparation of silver nanoparticle thin films for sensing applications.” Ph.D. dissertation, Chulalongkorn University.
- [41] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2015. **ปรอท**. [Online]. Available : <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Hg.html>.
- [42] อรรธรณ สัมฤทธิ์เดชขจร. 2015. **เซ็นเซอร์ตรวจวัดสารปรอทในน้ำดื่ม**. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-05-29-09-38-47/486->.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [43] ศูนย์ศึกษาธรรมชาติและระบบนิเวศเกษตร. 2015. สารปรอท. [Online]. Available : <http://www.naeccentre.com/article/mercury.php>.
- [44] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์. 2015. Mercury/ปรอท. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2031/mercury-ปรอท>.
- [45] Tang, Z. Wang, Y. Podsiadlo, P. Kotov, N. A. “Biomedical Applications of Layer-by-Layer Assembly.” *Advanced Materials*. 24(2006) : 3203–3224.
- [46] Zhang, J. Chen, D. Li, Y. Sun, J. “Layer-by-layer assembled highly adhesive microgel films.” *Polymer*. 54(2013) : 4220-4226.
- [47] Marc, M. Valérie, T. David, R. and Vincent, B. 2012. “Deposition Mechanisms in Layer-by-Layer or Step-by-Step Deposition Methods.” *ISRN Materials Science*. Volume 2012(2012) : 13 pages.
- [48] Gero, D. Layer-by-Layer Assembly (Putting Molecules to Work). [Online]. Available : [http://www.wiley-vch.de/books/sample/3527316485\\_c01.pdf](http://www.wiley-vch.de/books/sample/3527316485_c01.pdf).
- [49] ดวงกมล ศักดิ์เลิศสกุล. 2012. การใช้สารประกอบเชิงซ้อนพอลิเล็กโทรไลต์ในทางเภสัชกรรม. [Online]. Available : <http://pharm.kku.ac.th/isan-journal/journal/volume8-no2/01.pdf>.
- [50] SIGMA – ALDRICH. 2015. Anion,Cation. [Online]. Available : <http://www.sigmaaldrich.com/singapore.html>.
- [51] 2015. UVVIS spectrum of bisulphide in sewage. [Online]. Available : [http://en.wikipedia.org/wiki/File:UVVIS\\_spectrum\\_of\\_bisulphide\\_in\\_sewage.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:UVVIS_spectrum_of_bisulphide_in_sewage.jpg).
- [52] 2015. Silver Nanoparticles: Physical Properties. [Online]. Available : <http://nanocomposix.com/pages/silver-nanoparticles-physical-properties>.
- [53] จิระพงศ์ อารินทร์. และคณะ. 2015. Zeta potential. [Online]. Available : [www.chem.science.cmu.ac.th/userfiles/file/zeta\\_potential.ppt](http://www.chem.science.cmu.ac.th/userfiles/file/zeta_potential.ppt).
- [54] 2015. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). [Online]. Available : [http://www.sc.chula.ac.th/department/Chemical\\_Technology/Analytical\\_unit/FTIR.html](http://www.sc.chula.ac.th/department/Chemical_Technology/Analytical_unit/FTIR.html).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [55] 2015. AIM-8000. [Online]. Available : <http://www.barascientific.com/products/shimadzu/analytical/spectro/thai/FTIR/AIM-8000.php>.
- [56] 2015. AFM Atomic Force Microscope. [Online]. Available : <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/page/Unit4-3.html>.
- [57] 2015. Atomic Force Microscope (AFM). [Online]. Available : <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/219-atomic-force-microscope-afm-.html>.
- [58] เกียรติพงษ์ ไต้การ. 2012. X-ray Diffractometer XRD. [Online]. Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument-menu-xrd.html>.
- [59] 2008. การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD. [Online]. Available : <http://www.bloggang.com/mainblog.php?id=hostclub&month=08-09-2008&group=4&gblog=1>.
- [60] 2011. กระจกทำความสะอาดตัวเองได้ด้วยวิธีไม่ขบน้ำ. [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/varticle/43544>.
- [61] 2015. Contact angle. [Online]. Available : <http://ceramic.dss.go.th/index.php/en/services/test/237-contact-angle-measurement>.
- [62] ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2015. เครื่อง FESEM. [Online]. Available : <http://thep-center.org/src2/views/central-equipment.php?eq=FES-EM>.
- [63] Van Dong, P. Hoang Ha, C. Tran Binh, L. and Kasbohm, Jörn 2012. “Chemical synthesis and antibacterial activity of novel-shaped silver nanoparticles.” *International Nano Letters*. 2012(2).
- [64] He, D. Garg, S. and Waite, D. T. 2012. “H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> –Mediated oxidation of zero valent silver and resultant interactions among silver nanoparticles, silver ions, and reactive oxygen species.” *Langmuir*. 28(2012) : 10266-10275.
- [65] Jarujamrus, P. Amatatongchai, M. Thima, A. and Khongrangdee, T. 2015. “Selective 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*. 142(2015) : 86-93.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [66] Farhadi, K. Forough, M. Molaei, R. Hajizadeh, S. and Rafipour, A. 2011. “Highly selective  $\text{Hg}^{2+}$  colorimetric sensor using green synthesized and unmodified silver nanoparticles.” *Sensors and Actuators B:Chemical*. 161(2012) : 880-885.
- [67] Wang, G. L. Zhu, X. Y. Jiao, H. J. Dong, Y. M. and Li, Z. J. 2011. “Ultrasensitive and dual functional colorimetric sensors for mercury(II) ions and hydrogen peroxide based on catalytic reduction property of silver nanoparticles.” *Biosensors and Bioelectronics*. 31(2012) : 337-342.
- [68] Rameshkumar, P. Viswanathan, P. and Ramaraj, R. 2014. “Silicate sol-gel stabilized silver nanoparticles for sensor applications toward mercuric ions, hydrogen peroxide and nitrobenzene.” *Sensors and Actuators B*. 202(2014) : 1070-1077.
- [69] Zhang, Q. Li, Na. Goebel, J. Lu, Z. and Yin, Y. 2011. “A Systematic Study of the Synthesis of Silver Nanoplates: Is Citrate a “Magic” Reagent?.” *Journal of the American Chemical Society*. 133(2011) : 18931-18939.
- [70] Prathna, T. C. Chandrasekaran, N. and Mukherjee, A. 2011. “Studies on aggregation behaviour of silver nanoparticles in aqueous matrices: Effect of surface functionalization and matrix composition.” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 390(2011) : 216-224.
- [71] Basarir, F. and Yoon, T. H. 2010. “Preparation of gold patterns on polyimide coating via layer-by-layer deposition of gold nanoparticles.” *Journal of Colloid and Interface Science*. 352(2010) : 11-18.
- [72] Safaee, A. Sarkar, D. K. and Farzaneh, M. 2007. “Superhydrophobic properties of silver-coated films on copper surface by galvanic exchange reaction.” *Applied Surface Science*. 254(2008) : 2493-2498.
- [73] Jürgen, J. Holger, G. and Rachel, Y. R. 2004. “Wetting Behavior of Water Droplets on Hydrophobic Microtextures of Comparable Size.” *Langmuir*. 20(2004) : 10015-10019.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [74] Van Dong, P. Hoang Ha, C. Tran Binh, L. and Kasbohm, Jörn 2012. “Chemical synthesis and antibacterial activity of novel-shaped silver nanoparticles.” *International Nano Letters*. 2012(2).
- [75] Fan, Y. Liu, Z. Wang, L. and Zhan, J. 2009. “Synthesis of Starch-Stabilized Ag Nanoparticles and  $Hg_2^+$  Recognition in Aqueous Media.” *Nanoscale Res Lett*. 4(2009) : 1230–1235.
- [76] Tan, W. T. Radhi, M. M. Ab Rahman, M. Z. B. and Kassim, A.B. 2011. “Application Studies to Voltammetric Detection of Trace Hg (II) by Different Modified Solid Glassy Carbon Electrode.” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 5(12) : 2475-2481.
- [77] Kim, H. J. Park, J. E. Choi, M. G. Ahn, S. and Chang, S. K. 2009. “Selective chromogenic and fluorogenic signalling of  $Hg^{2+}$  ions using a fluorescein-coumarin conjugate.” *Dyes and Pigments*. 84(2010) : 54–58.
- [78] Liu, W. Chen, J. Xu, L. Wu, J. Xu, H. Zhang, H. and Wang, P. 2011. “Reversible “off-on” fluorescent chemosensor for  $Hg^{2+}$  based on rhodamine derivative.” *Spectrochimica Acta Part A*. 85(2012) : 38–42.
- [79] Yan, F. Mei, Q. Wang, L. Tong, B. Xu, Z. Weng, J. Wang, L. and Huang, W. 2012. “A highly selective and ratiometric sensor for  $Hg^{2+}$  based on a phosphorescent iridium (III) complex.” *Inorganic Chemistry Communications*. 22(2012) : 178–181.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### การเตรียมสารละลาย

#### 1. การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method)

##### 1.1 การเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต

###### 1.1.1 การเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์

ชั่งซิลเวอร์ไนเตรตมา 1.6990 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

###### 1.1.2 การเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์

ปิเปตสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์ ที่เตรียมได้มา 1 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

##### 1.2 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต

###### 1.2.1 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ความเข้มข้น 30.00 มิลลิโมลาร์

ชั่งไตรโซเดียมซิเตรตมา 0.4412 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ความเข้มข้น 30.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

###### 1.2.2 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ความเข้มข้น 20.00 มิลลิโมลาร์

ชั่งไตรโซเดียมซิเตรตมา 0.2941 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ความเข้มข้น 20.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

###### 1.2.3 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์

ปิเปตสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ความเข้มข้น 20.00 มิลลิโมลาร์ มา 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

#### 1.2.4 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 5.00 มิลลิโมลาร์

ปิเปตสารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ มา 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนก็จะได้สารละลายไตรโซเดียมซีเตรตความเข้มข้น 5.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

#### 1.2.5 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลาร์

ปิเปตสารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 5.00 มิลลิโมลาร์ มา 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

#### 1.2.6 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์

ปิเปตสารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลาร์ มา 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

#### 1.2.7 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์

ปิเปตสารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์ มา 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

#### 1.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์

ชั่งไตรโซเดียมโบโรไฮไดรด์มา 0.3780 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

### 2. การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

#### 2.1 การเตรียมสารละลายโพลีไดแอลกิลไธเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์

ปิเปตสารละลาย PDADMAC มา 7.48 มิลลิลิตร พร้อมทั้งชั่งโซเดียมคลอไรด์มา 58.5000 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน และปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ก็จะได้สารละลาย PDADMAC ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การเตรียมสารละลายโพสิโซเดียมสไตรีนซัลโฟเนต ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์

ซึ่ง PSS และโซเดียมคลอไรด์มา 2.0600 และ 58.5000 กรัม ตามลำดับ ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนและปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ก็จะได้สารละลาย PSS ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

## 3. การนำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึม ในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท

### 3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอท

#### 3.1.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 1000.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

ซึ่งปรอท(II)คลอไรด์มา 0.1000 กรัม จากนั้นละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจะได้สารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 1000.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

#### 3.1.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 50.00, 70.00 และ 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 1000.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 5, 7 และ 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรแต่ละขวด และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 50.00, 70.00 และ 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ

#### 3.1.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 3.00, 5.00 และ 10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 3, 5 และ 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรแต่ละขวด และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 3.00, 5.00 และ 10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ

#### 3.1.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.90 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 และ 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรแต่ละขวด และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.90 และ 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทสำหรับการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

3.2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร  
ชั่งปรอท(II)คลอไรด์ มา 0.0100 กรัม จากนั้นละลายด้วยน้ำประปาและ/หรือน้ำดื่ม แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำประปา และ/หรือน้ำดื่ม จะได้สารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

### 3.2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 0.40, 0.50, 0.70, 5.00, 10.00 และ 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 0.40, 0.50, 0.70, 5.00, 10.00 และ 20.00 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรแต่ละขวด และปรับปริมาตรด้วยน้ำประปาและ/หรือน้ำดื่ม ก็จะได้สารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 0.40, 0.50, 0.70, 5.00, 10.00 และ 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การคำนวณผลการทดลอง

1. การตรวจวัดปรอทโดยใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs)

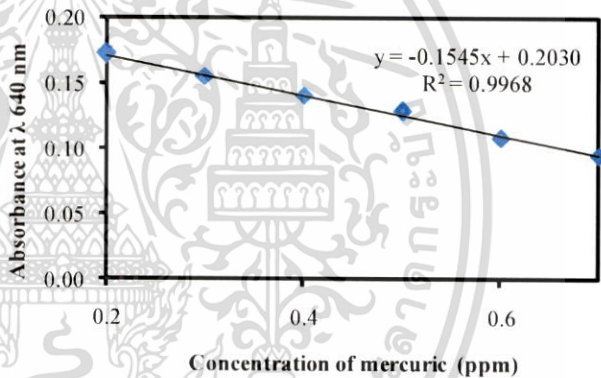
1.1 การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

สูตร

$$\text{LOD} = \frac{3\text{SD of blank}}{\text{Slope}}$$

การคำนวณ

No.	Absorbance
1	0.175
2	0.174
3	0.171
4	0.166
5	0.168
6	0.174
7	0.183
	0.181
9	0.173
10	0.181
<b>AVR</b>	<b>0.175</b>
<b>SD</b>	<b>0.006</b>



$$\begin{aligned} \text{LOD} &= \frac{3\text{SD of blank}}{\text{Slope}} \\ &= \frac{3 \times 0.006}{0.1545} \\ &= 0.12 \text{ ppm} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

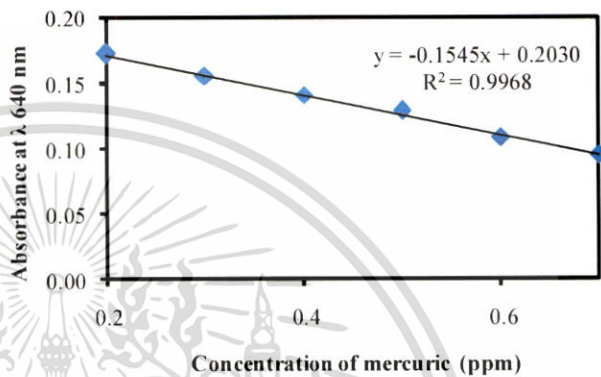
1.2 การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

สูตร

$$LOQ = \frac{10SD \text{ of blank}}{\text{Slope}}$$

การคำนวณ

No.	Absorbance
1	0.175
2	0.174
3	0.171
4	0.166
5	0.168
6	0.174
7	0.183
8	0.181
9	0.173
10	0.181
AVR	0.175
SD	0.006



$$\begin{aligned}
 LOD &= \frac{10SD \text{ of blank}}{\text{Slope}} \\
 &= \frac{10 \times 0.006}{0.1545} \\
 &= 0.39 \text{ ppm}
 \end{aligned}$$

1.3 การคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

สูตร

$$\%Recovery = \frac{\text{Spiked sample} - \text{Sample}}{\text{Standard}} \times 100$$

$$RSD = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณ

Water Samples	Concentration of mercuric (ppm)	Absorbance (n = 3)		
		1	2	3
Tap water	0.00	-	-	-
	0.40	0.141	0.140	0.138
	0.50	0.127	0.124	0.125
	0.70	0.096	0.095	0.094
Drinking water	0.00	-	-	-
	0.40	0.139	0.138	0.14
	0.50	0.126	0.124	0.124
	0.70	0.097	0.094	0.092

ตัวอย่างการคำนวณ %Recovery และ RSD ของสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร (น้ำประปา)

1) การหาค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

$$\text{จากสมการเส้นตรง } y = -0.1545x + 0.2030$$

แทนค่า Absorbance 1 ลงใน y

$$\text{จะได้เป็น } 0.141 = -0.1545x + 0.2030$$

$$\text{ดังนั้น } x = 0.401 \text{ ppm}$$

จากนั้นทำการคำนวณซ้ำโดยเปลี่ยนจาก Absorbance 1 เป็น Absorbance 2 และ 3  
จะได้ค่า x เท่ากับ 0.408 และ 0.421 ppm ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ ) และค่า  
เบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่า x ทั้งสามได้ เท่ากับ 0.410 และ 0.010 ppm ตามลำดับ

2) การหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (RSD)

$$\% \text{Recovery} = \frac{0.410 - 0.000}{0.40} \times 100$$

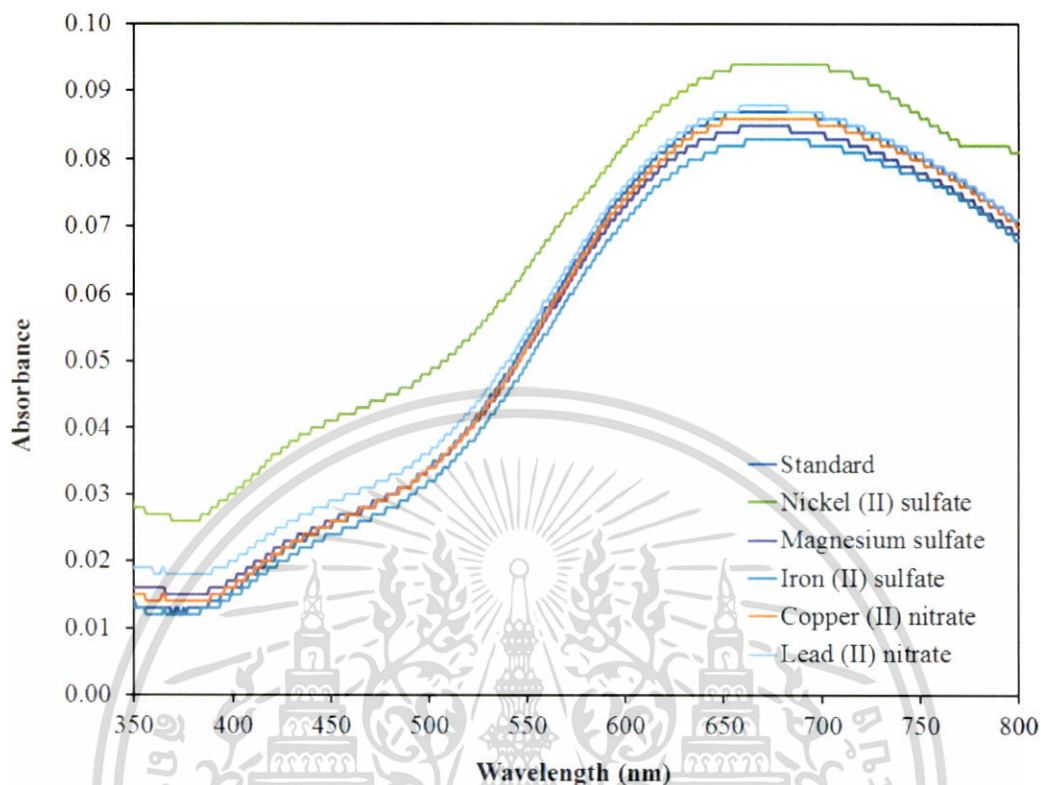
$$= 102.5 \%$$

$$\text{RSD} = \frac{0.010}{0.410} \times 100$$

$$= 2.4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์



สเปกตรัมจากการศึกษาตัวรบกวนในการวิเคราะห์ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การตรวจวัดปรอทโดยใช้แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

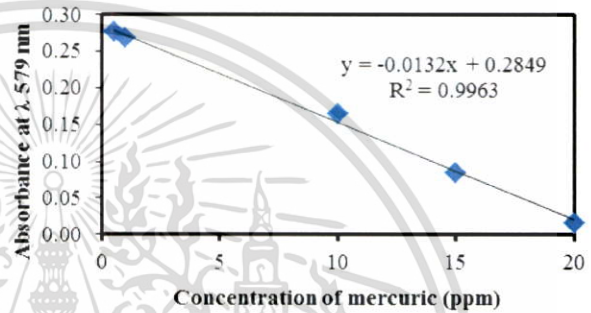
### 2.1 การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

สูตร

$$\text{LOD} = \frac{3\text{SD of blank}}{\text{Slope}}$$

การคำนวณ

No.	Absorbance
1	0.259
2	0.263
3	0.259
4	0.257
5	0.265
6	0.261
7	0.260
8	0.260
9	0.259
10	0.262
<b>AVR</b>	<b>0.261</b>
<b>SD</b>	<b>0.002</b>



$$\begin{aligned} \text{LOD} &= \frac{3\text{SD of blank}}{\text{Slope}} \\ &= \frac{3 \times 0.002}{0.1545} \\ &= 0.45 \text{ ppm} \end{aligned}$$

### 2.2 การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

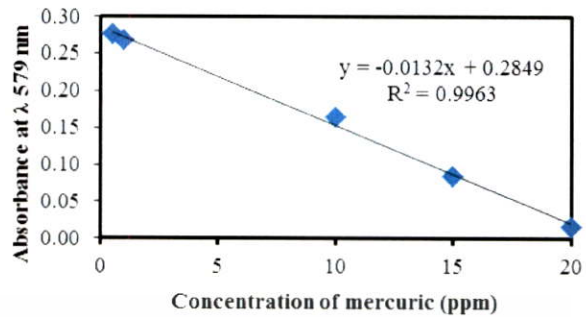
สูตร

$$\text{LOQ} = \frac{10\text{SD of blank}}{\text{Slope}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณ

No.	Absorbance
1	0.259
2	0.263
3	0.259
4	0.257
5	0.265
6	0.261
7	0.260
8	0.260
9	0.259
10	0.262
AVR	0.261
SD	0.002



$$\begin{aligned} \text{LOD} &= \frac{10\text{SD of blank}}{\text{Slope}} \\ &= \frac{10 \times 0.002}{0.132} \\ &= 1.52 \text{ ppm} \end{aligned}$$

## 2.3 การคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

สูตร

$$\% \text{Recovery} = \frac{\text{Spiked sample} - \text{Sample}}{\text{Standard}} \times 100$$

$$\text{RSD} = \frac{\text{SD}}{\bar{x}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณ

Water Samples	Concentration of mercuric (ppm)	Absorbance (n = 3)		
		1	2	3
Tap water	0.00	-	-	-
	5.00	0.214	0.214	0.216
	10.00	0.153	0.152	0.152
	20.00	0.020	0.022	0.020
Drinking water	0.00	-	-	-
	5.00	0.216	0.215	0.218
	10.00	0.148	0.148	0.147
	20.00	0.021	0.019	0.021

ตัวอย่างการคำนวณ %Recovery และ RSD ของสารละลายมาตรฐานปรอทความเข้มข้น 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร (น้ำประปา)

1) การหาค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

$$\text{จากสมการเส้นตรง } y = -0.0132x + 0.2849$$

แทนค่า Absorbance 1 ลงใน y

$$\text{จะได้เป็น } 0.214 = -0.0132x + 0.2849$$

$$\text{ดังนั้น } x = 5.371 \text{ ppm}$$

จากนั้นทำการคำนวณซ้ำโดยเปลี่ยนจาก Absorbance 1 เป็น Absorbance 2 และ 3 จะได้ค่า x เท่ากับ 5.371 และ 5.220 ppm ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่า x ทั้งสามได้ เท่ากับ 5.321 และ 0.087 ppm ตามลำดับ

2) การหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (RSD)

$$\% \text{Recovery} = \frac{5.321 - 0.000}{5.00} \times 100$$

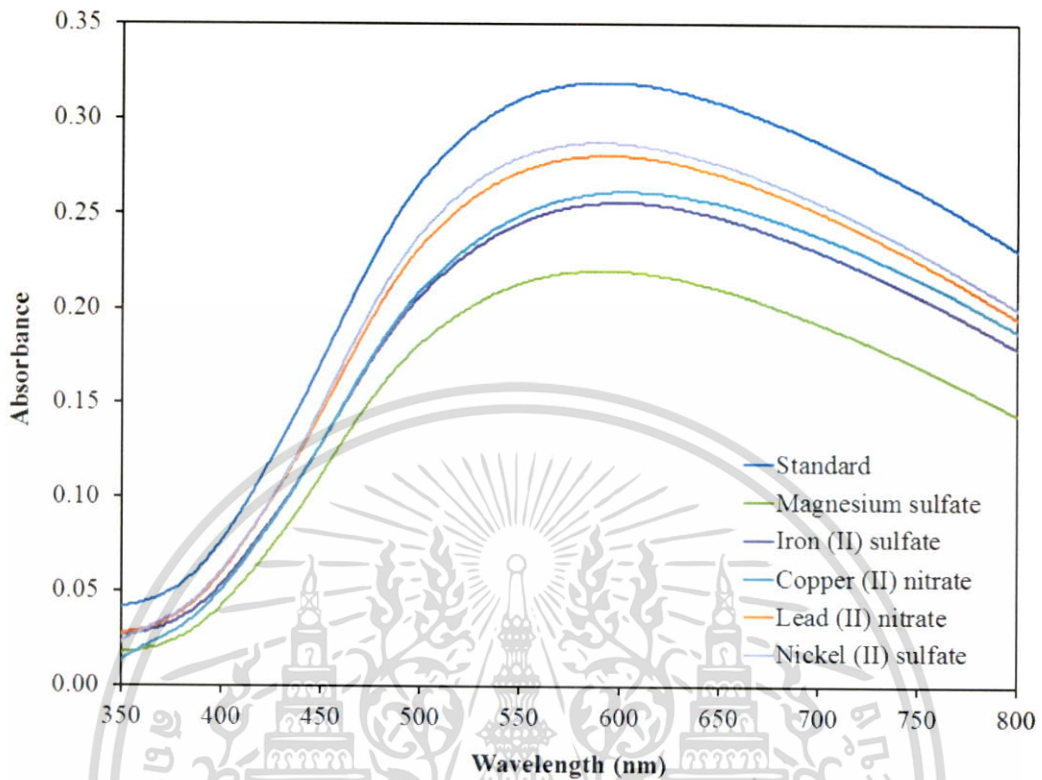
$$= 106.4 \%$$

$$\text{RSD} = \frac{0.087}{5.321} \times 100$$

$$= 1.6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์



สเปกตรัมจากการศึกษาตัวรบกวนในการวิเคราะห์ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ - สกุล นางสาวกานต์รวี มุลสิน  
 วัน เดือน ปีเกิด 07 เมษายน 2536  
 ประวัติการศึกษา  
 ระดับมัธยมศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย  
 จากโรงเรียนสตรีวีรนาถบางเขน  
 ปีการศึกษา 2553  
 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
 ลาดกระบัง



ชื่อ - สกุล นางสาวจิราภรณ์ บุญมี  
 วัน เดือน ปีเกิด 11 พฤศจิกายน 2535  
 ประวัติการศึกษา  
 ระดับมัธยมศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย  
 จากโรงเรียนประเทียวิทยาทาน  
 ปีการศึกษา 2553  
 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
 ลาดกระบัง



ชื่อ - สกุล นางสาวนิภาพร วงศ์วิทย์  
 วัน เดือน ปีเกิด 27 กันยายน 2535  
 ประวัติการศึกษา  
 ระดับมัธยมศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย  
 จากโรงเรียนแม่พระกวิทยา  
 ปีการศึกษา 2553  
 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
 ลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Name (Thai):** เอกรรู้ เดตศรี

**Name (Eng):** EKARAT DETSRI

**Branch:** Analytical Chemistry /เคมีวิเคราะห์

**Position:** Asst. Prof. (Chemistry) /ผู้ช่วยศาสตราจารย์ (สาขาเคมี)

**Tel:** 02-3298400-11 ext. 6234

**Fax:** 02-3298428

**E-mail:** [Ekarat.de@Kmitl.ac.th](mailto:Ekarat.de@Kmitl.ac.th)



**Office address:** Chulabhorn 1 Building, 5<sup>th</sup> Floor, Room 501/2, Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang 1 Chalongkrung Road, Ladkrabang District, Bangkok 10520, Thailand

**Education:**

- 2002 B.S. Chemistry, Khon Kaen University, Thailand  
2545 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- 2005 M.S. Analytical Chemistry, Chiang Mai University, Thailand  
2548 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- 2012 Ph.D. International Program in Nanoscience and Technology, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand  
2555 วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิทยาศาสตร์นาโนและเทคโนโลยี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**Current research activities:**

- Electro-optical sensor based on plasmonic devices
- Surface modification of carbon based materials
- Polyelectrolyte multilayer nano thin films
- Electrochemistry

**International publications:**

1. **Detsri, E.**, Kamhom, K., Detsri C., Microwave-assisted synthesis of unmodified gold nanoparticles for colorimetric detection of dopamine, Key Eng Mat. 2017 30(1662-9795), 167-171. (Impact factor: 0.216/2015), Content provided by Scopus
2. **Detsri, E.**, Rujipornsakul, R., Treetasayoot, T., Siriwattanamethanon, P., Nanostructured multilayer thin films of multiwalled carbon nanotubes/gold nanoparticles/glutathione for the electrochemical detection of dopamine, Int J Min Met Mater. 2016 23(10), 1204-1214. (Impact factor: 0.882/2016), Content provided by ISI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. **Detsri, E.**, Kamhom, K., Ruen-ngam, D., Layer-by-layer deposition of green synthesised silver nanoparticles on polyester air filters and its antimicrobial activity, *J. Exp. Nanosci.* 2016 11(12), 930-939. (Impact factor: 0.832/2016), Content provided by ISI
4. **Detsri, E.**, Novel colorimetric sensor for mercury (II) based on layer-by-layer assembly of unmodified silver triangular nanoplates, *Chin. Chem. Lett.* 2016, 27(10), 1635-1640. (Impact factor: 1.947/2016), Content provided by ISI
5. **Detsri, E.**, Popanyasak, J., Fabrication of silver nanoparticles/polyaniline composite thin films using Layer-by-Layer self-assembly technique for ammonia sensing, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 2015, 467, 57–65. (Impact factor: 2.763/2015), Content provided by ISI
6. **Detsri, E.**, Popanyasak, J., Laomaneenopparat, N., Warngbun, K., UV-assisted synthesis of silver nanoparticles using poly(acrylic acid) for colorimetric ammonia sensing, *Advanced Materials Research* 2015, 1105, 225-230. (Impact factor: 0.077/2015)
7. **Detsri, E.**, Dubas, S. T, Layer-by-layer deposition of cationic and anionic carbon nanotubes into thin films with improved electrical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 2014, 444, 89–94. (Impact factor: 2.495/2014), Content provided by ISI
8. **Detsri, E.**, Dubas, S. T, Interfacial polymerization of polyaniline and its layer-by-layer assembly into polyelectrolytes multilayer thin-film, *Journal of Applied Polymer Science.* 2013, 128, 558-565. (Impact factor: 1.754/2013), Content provided by ISI
9. **Detsri, E.**, Dubas, S. T, Dispersion of multiwalled carbon nanotubes with water-soluble polyaniline blend poly(sodium 4-styrenesulfonate), *Applied Mechanics and Materials.* 2012, 229, 223-227. (Impact factor: 0.099/2012), Content provided by Scopus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปการใช้จ่ายเงิน

หมวดค่าใช้จ่าย	ค่าใช้จ่าย (บาท)
งบบุคลากร :ค่าจ้างชั่วคราว	
งบดำเนินงาน	
ค่าตอบแทน	-
ค่าใช้สอย	20,000
ค่าวัสดุ	30,000
ค่าสาธารณูปโภค	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-
รวมงบประมาณที่จ่ายไปแล้ว	50,000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

## International publication

1. Detsri, E., Novel colorimetric sensor for mercury (II) based on layer-by-layer assembly of unmodified silver triangular nanoplates, Chin. Chem. Lett. 2016, 27(10), 1635-1640. (Impact factor: 1.947/2016), Content provided by ISI



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Original article

## Novel colorimetric sensor for mercury (II) based on layer-by-layer assembly of unmodified silver triangular nanoplates

Ekarat Detsri<sup>a,b,\*</sup><sup>a</sup> Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand<sup>b</sup> Advanced Materials Research Unit, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

## ARTICLE INFO

Article history:  
Received 11 April 2016  
Received in revised form 4 May 2016  
Accepted 10 May 2016  
Available online 18 May 2016

Keywords:  
Silver triangular nanoplates  
Layer-by-Layer  
Mercury (II)  
Colorimetric sensor

## ABSTRACT

A simple layer-by-layer deposition technique was used to fabricate the multilayer thin films of unmodified silver triangular nanoplates (AgTNPs). The multilayer of AgTNPs thin films were fabricated by alternate deposition of each anionic sodium citrate stabilized AgTNPs and cationic poly(diallyldimethylammonium chloride). All prepared AgTNPs multilayer thin films were exhibited a strong plasmon band at the wavelength of 667 nm, which confirmed the formation of AgTNPs onto the substrate. The characteristics of the multilayer thin films were investigated using contact angle measurement, UV–visible spectroscopy, X-ray diffraction analysis (XRD), atomic force microscope (AFM) and field emission scanning electron microscope (FESEM). As these films are to be used as a mercury (II) colorimetric sensor, the changes in optical properties of the films were evaluated for various mercury (II) concentrations. AgTNPs assembled into thin films showed a strong color shift from blue to mauve and colorless when exposed to mercury (II). The constructed multilayer thin films exhibited excellent color changes of mercury (II) with a linear range between 0.5 and 20 ppm. The limit of detection (LOD) and limit of quantitation (LOQ) were  $0.45 \pm 0.002$  and  $1.52 \pm 0.002$  ppm, respectively. The recovery values of AgTNPs multilayer thin films are satisfactory in the range of 100.1%–106.4% when applied to determining mercury (II) in water samples.

© 2016 Chinese Chemical Society and Institute of Materia Medica, Chinese Academy of Medical Sciences. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Mercury (II) is one of the most harmful elements for mammalian bodies. The toxicity of mercury (II) can cause several health problems such as damage to the nervous system, kidneys and brain [1]. The determination of toxic mercury (II) in environmental and biological fluids mainly relies on atomic fluorescence spectroscopy [2], atomic absorption/emission spectroscopy [3], electrochemical spectroscopy [4] and inductive coupled plasma mass spectrometry [5]. Although, all of these techniques provide excellent sensitivity and selectivity, they are rather expensive instruments, tests are time-consuming, have high operating costs and there is some difficulty in the preparation of samples [6]. Recently, the advancement of nanomaterials has received great research interest because of their unique optical properties. The optical properties of nanomaterials depend on size,

shape and geometry. They are well-known for their characteristic colors due to the surface plasmon resonance (SPR) [7]. Among nanomaterials, silver nanoparticles (AgNPs) have been widely applied in optical sensors or colorimetric sensors due to their intriguing electronic, chemical and optical properties [8]. AgNPs exploit the phenomena of SPR which is endowed with unique light scattering and absorption properties [9]. The SPR absorption band of AgNPs is found to be more sensitive to changes due to the fluctuations in the dielectric surrounding medium of nanoparticles such as inter-particle distances, solvent and adsorbents [10]. For example, previously our group developed a colorimetric sensor of AgNPs/polyaniline composite multilayer thin films for ammonia sensing [11]. The strong color shift of multilayer thin films from orange-red to yellow was visible when exposed to an ammonia solution. Farhadi *et al.* [12] presented a sensitive SPR for mercury (II) based on an AgNPs solution. The SPR shifts are linearly related to mercury (II) concentration. The color of AgNPs could be directly observed by the naked eye, resulting in inter-particle distance, aggregation and decomposed state in the solution. Jarujamrus *et al.* [13] reported a selective unmodified AgNPs probe solution for colorimetric sensing of mercury (II). The unmodified AgNPs probe

\* Correspondence to: Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.  
E-mail address: [Ekarat.de@kmitl.ac.th](mailto:Ekarat.de@kmitl.ac.th)

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ccllet.2016.05.008>

1001-8417/© 2016 Chinese Chemical Society and Institute of Materia Medica, Chinese Academy of Medical Sciences. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

was found to display color shifts from yellow to light yellow with increasing mercury (II) concentration. The color changes could be ascribed to the oxidation of AgNPs by mercury (II). Upon the addition of mercury (II) with increasing concentration, the SPR progressively decreased, which shows a slight shift of  $\lambda_{\max}$  to the blue wavelength.

Although many AgNPs have been used widely in optical or colorimetric sensors for mercury (II) detection [14–17], no study has been published for mercury (II) colorimetric sensor based on a layer-by-layer (LbL) assembly of silver triangular nanoplates (AgTNPs). For this reason the objective was to develop a sensor, which could function in liquid mercury (II) using AgTNPs multilayer thin films. For the fabrication of the sensor, AgTNPs were prepared and assembled into multilayer thin films using a LbL deposition technique. Based on a simple electrostatic interaction between cationic poly(diallyldimethylammonium chloride) (PDADMAC) and anionic AgTNPs in the dipping step. The LbL deposition technique allows the fabrication of AgTNPs multilayer thin films and provides outstanding control over surface and thickness properties. AgTNPs were prepared using sodium citrate dihydrate as the stabilizing agent in order to deposit them into multilayer thin films. The resulting multilayer thin films were used as an optical sensor for mercury (II). The optical properties of AgTNPs multilayer thin films were characterized by a UV–visible spectroscopy. Surface morphology and thickness of multilayer thin films were evaluated by atomic force microscopy (AFM) and field emission scanning electron microscope (FESEM). The SPR spectra of AgTNPs sensing probe when exposed in different concentrations of mercury (II) were determined by UV–visible spectroscopy.

## 2. Experimental

### 2.1. Materials

Silver nitrate ( $\text{AgNO}_3$ ), sodium borohydride ( $\text{NaBH}_4$ ), sodium citrate dihydrate ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), poly (diallyldimethylammonium chloride) ( $\text{Mw } 200,000\text{--}350,000 \text{ gmol}^{-1}$ ), poly(sodium 4-vinylpyridinesulphonate) (PSS, Average  $\text{Mw } 70,000 \text{ gmol}^{-1}$ ), mercuric chloride ( $\text{HgCl}_2$ ) were purchased from Sigma-Aldrich Co., Ltd USA. Hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ , 30 wt.%) was purchased from Carlo Erba Co., Ltd. All chemicals used were of analytical reagent grade (AR grade) and used without further purification. All solutions were prepared with double distilled water with a measured resistivity of  $8.2 \text{ M}\Omega\text{cm}^{-1}$ .

### 2.2. Synthesis of unmodified silver triangular nanoplates

Unmodified AgTNPs were prepared by the well-described method [18] using a chemical reduction process. For a typical synthesis, 50 mL of 1 mmol/L silver nitrate was mixed with 3 mL of 10 mmol/L sodium citrate dihydrate. The solution was stirred for 10 min to get a homogeneous solution. Then 0.12 mL of 30 wt.%  $\text{H}_2\text{O}_2$  was injected into the homogeneous solution. Freshly prepared  $\text{NaBH}_4$  (100 mmol/L, 0.33 mL) was rapidly added to the solution. The mixture was stirred for 30 min. The color of the mixture changed rapidly from light yellow to dark yellow. After that the colloidal solution turned to red, green and blue, respectively, indicating the formation of AgTNPs. The colloidal AgTNPs were stored at 4 °C. The SPR characteristic of colloidal nanoparticles was measured by UV–visible spectroscopy. The size and morphology of nanoparticles were confirmed by transmission electron microscope (TEM).

### 2.3. Multilayer thin films assembly

The multilayer thin films of AgTNPs were assembled onto a glass slide substrate. The cleaned glass slide substrate was

immersed in 10 mmol/L PDADMAC for 5 min in order to generate a positively charged substrate. Then the substrate was rinsed three times with deionized water in order to remove the excess of PDADMAC. The glass slide substrates, which were positively charged, were immersed in a 10 mmol/L PSS solution for 5 min followed by rinsing three times in water. The electrostatic interaction between cationic PDADMAC and anionic PSS generated the hydrophilic glass slide substrates. In order to fabricate the AgTNPs multilayer thin films, the top layer of positively charged PDADMAC was dipped in an AgTNPs solution. The multilayer thin films of AgTNPs were achieved by repeating the number of layers with PDADMAC. The multilayer thin films were rinsed with deionized water and dried with air before being kept in a dark area.

### 2.4. Colorimetric detection of mercury (II)

The prepared AgTNPs multilayer thin films were tested for their sensing properties in solution when exposed to solutions of different mercury (II) concentrations. The multilayer thin films of AgTNPs were then cut into 0.5 cm sections in order to fit in the cuvette and immersed in a 3 mL solution containing various concentrations of mercury (II) (0.5, 1, 5, 10, 15, 20, 25 and 30 ppm). The sensor was allowed to react for 5 min for the color of the sensor to be stable. Great care was taken to insure complete color change by recording UV–visible spectra until no changes in absorbance could be seen.

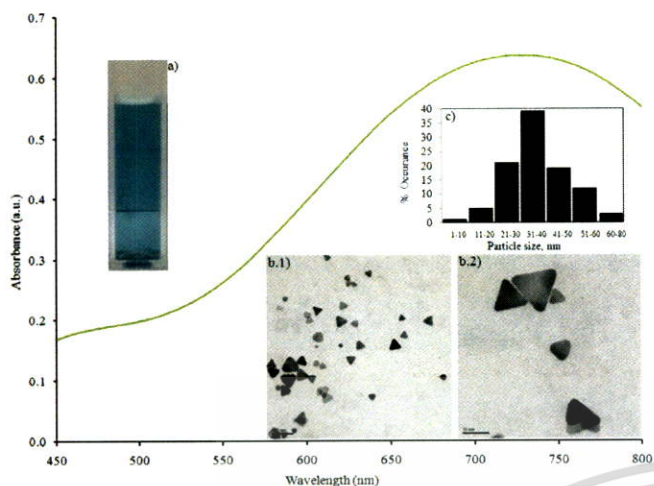
### 2.5. Characterization

The SPR of AgTNPs was measured in the 350–800 nm range by using a double beam UV1800, Shimadzu, China. This absorption wavelength was chosen because it covers the nanoparticles SPR located around 667 nm. A TEM model Jeol JEM 100SX was used to analyze the particle size and morphology of a fresh solution of AgTNPs. The surface charges and size distribution of AgTNPs were characterized using a NanoZS-Malvern instrument, UK. An atomic force microscopy model NanoScope IV–Veeco Instrument, USA, was used to study the surface topography and thickness of the multilayer thin films. AFM analysis was performed in air using a scanning probe microscope (SPM) multimode unit with a type RTESP silicon tip with a 125  $\mu\text{m}$  length and 300 kHz resonance in tapping mode. X-ray diffractometer (XRD) was used to analyze the crystal structure of AgTNPs multilayer thin films ( $\text{CuK}\alpha$  radiation,  $2\theta = 20\text{--}80^\circ$ , Bruker D8 Advance,). The FESEM (JSM-7001F, JEOL Solution for Innovation, Germany) was used to analyze the surface and morphology of AgTNPs multilayer thin films.

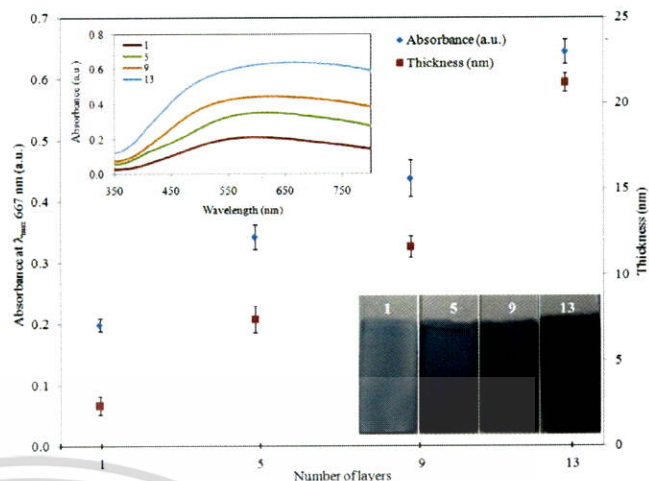
## 3. Results and discussion

Unmodified AgTNPs were synthesized by chemical reduction of silver ions with  $\text{NaBH}_4$  by using sodium citrate as the stabilizing agent.  $\text{H}_2\text{O}_2$  was used as the etchant for the triangular nanoplates formation [19]. The choice of sodium citrate for the stabilizing of AgTNPs was motivated by the chemistry of the substance which possesses the carboxylic functional groups. The carboxylic functional groups are well-known to adsorb and interact onto the surface of the nanoparticles [11]. These carboxylic functional groups are necessary to the design of the LbL system, which needs to target films assembled. UV–visible absorption spectra of AgTNPs are shown in Fig. 1. The AgTNPs formed in the solution, through nucleation growth, displayed a characteristic vivid blue color (Fig. 1a), which is due to the surface plasmon absorbance phenomenon. The extinction spectrum exhibited a single peak around 730 nm. The size and morphology of AgTNPs were confirmed by TEM and their images are shown in Fig. 1b(1–2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Fig. 1.** The UV-visible absorption spectra of AgTNPs. Insert (a) Digital image of AgTNPs solution, (b1–2) Typical TEM images of AgTNPs at scale 100 and 50 nm and (c) Size distribution of AgTNPs.



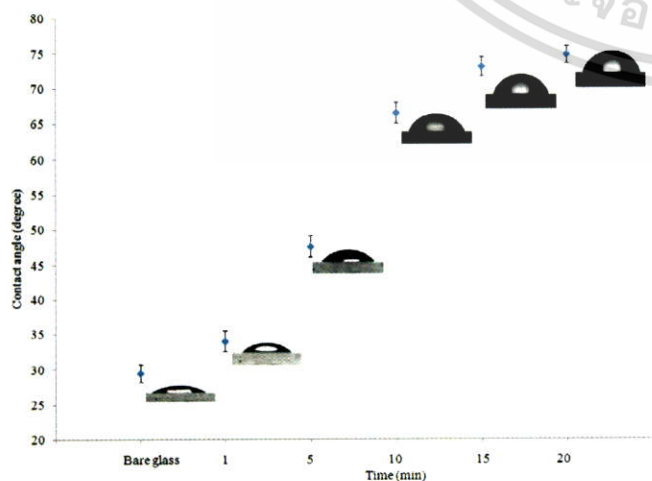
**Fig. 3.** The thickness and absorbance values as the function of number of layers of AgTNPs multilayer thin films and the representative digital images of AgTNPs multilayer thin films at 1, 5, 9 and 13 layers.

revealing an average particle size of  $35.14 \pm 1.18$  nm ( $n = 100$ ) (Fig. 1c). The shape of nanoparticles appeared to be triangular nanoplates and no sign of aggregation was visible, confirming the good capping effect provided by sodium citrate. The zeta potential of AgTNPs stabilized with 20 mmol/L of sodium citrate was found to be  $-39.7$  mV, which indicated the surface charge of sodium citrate stabilized nanoparticles.

As mentioned earlier, the main point in using sodium citrate as the stabilizing agent for the preparation of AgTNPs is that they can be later assembled into a monolayer and later multilayer onto the substrate. The AgTNPs multilayer thin films were fabricated by alternate depositions of anionic sodium citrate stabilized AgTNPs and cationic PDADMAC. The main electrostatic interaction between quaternary ammonium groups of PDADMAC and carboxylic groups of sodium citrate stabilized AgTNPs is fundamental for the buildup of the multilayer thin films. Fig. 2 shows the kinetic adsorption of the nanoparticles onto the glass slide substrate by plotting the contact angle of the monolayer of sodium citrate stabilized AgTNPs as the function of time. It can be

seen from 1 to 10 min the contact angle of the nanoparticles films increased sharply, which suggest quick adsorption of the nanoparticles onto the glass slide substrate, but stable when the deposition time was increased to 15 min. As suggested in previous work [20], the increase in the contact angle of nanoparticles onto the substrate surface found more hydrophobic nanoparticles adsorbed in a more packed and dense fashion. The adsorption process is mainly controlled by two independent steps, which are the diffusion of the nanoparticles from the solution to the substrate and the complexation process. By taking advantage of electrostatic attraction between oppositely charged species, a film can be built with the desired thickness by controlling the number of dipping cycles. Fig. 3 shows the changes in thickness and absorbance as the function of the number of deposit layers of AgTNPs. The thickness and absorbance of multilayer thin films were characterized using AFM and UV-visible spectrophotometry, respectively. The multilayer thin films shown in the cartouche of Fig. 3 display a striking blue color due to the nanoparticles adsorption onto the surface of the substrate. The increase in thickness and absorbance are constant in each deposition step; probably due to the fact that the amount of nanoparticles is thermodynamically constant. The prepared multilayer thin films had a faster growth indicating an excellent bonding of the anionic sodium citrate stabilized AgTNPs and cationic PDADMAC.

More evidence of the AgTNPs growth on the polyelectrolyte glass substrate can be seen from AFM images (Fig. 4). The surface morphology of the AgTNPs multilayer thin films is increasingly dense with individual AgTNPs when the number of layers is increased. The interconnection network between nanoparticle-nanoparticle had an impact on the root mean square (RMS) roughness values of the multilayer thin films. The RMS roughness values at 1, 5, 9 and 13 layers were found to increase from  $3.923 \pm 1.028$ ,  $5.486 \pm 0.925$ ,  $9.840 \pm 0.983$  and  $13.448 \pm 0.847$  nm, respectively. In order to confirm the growth of AgTNPs onto the substrate surface, crystalline information of the nanoparticles was obtained by XRD measurement. The X-ray diffraction measurement (Fig. 5) indicated the prominent peaks at  $2\theta$  values of AgTNPs multilayer thin films at  $38.4^\circ$  corresponds to the reflection of the metallic silver particles crystallized in the FCC structure with basal [111] lattice plans. Based on these observations, the crystalline structure of AgTNPs multilayer thin films was found to be in



**Fig. 2.** Plot of contact angle of the monolayer of AgTNPs as the function of time (Insert: Images of water droplets).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

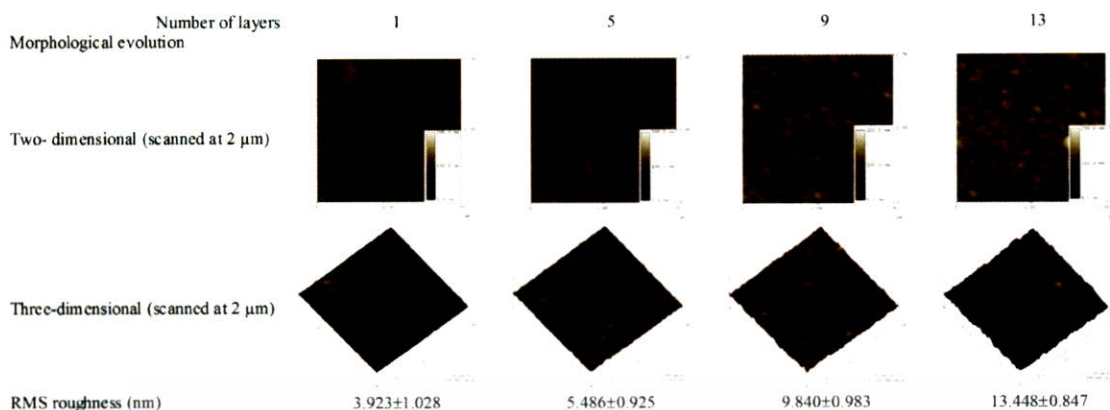


Fig. 4. Surface topography images and the RMS roughness of AgTNPs multilayer thin films as the function of number of layers.

agreement with previous reports [21,22], which confirm the LbL assembly of AgTNPs onto the glass slide substrate.

Using the LbL technique, 5 layers of sodium citrate stabilized AgTNPs and PDADMAC were sequentially deposited for evaluating the sensing efficiency toward mercury (II). In order to characterize the sensing properties of the films, the changes in SPR when exposed to increasing mercury (II) content (0, 0.5, 1, 5, 10, 15, 20, 5 and 30 ppm) were monitored and plotted in Fig. 6. It can be seen that the characteristic blue peak centered at 667 nm gradually shifts to mauve peak centered at 570–452 nm as the mercury (II) content is increased from 0.50 ppm to 25 ppm and appeared colorless when the concentration of mercury (II) is increased to 30 ppm. This color shift between blue to mauve and colorless was found to be very fast. The justification of such optical shift is probably due to the redox reaction between zero-valents of AgTNPs and mercury (II). The AgTNPs deposited on glass slide substrate were oxidized by mercury (II), resulting in the decomposition of AgTNPs into smaller particles and amalgam (Hg-Ag) particles. This phenomenon was consisted with the previous studies [23–25]. For reference, the standard reduction potential of  $\text{Hg}^{2+}/\text{Hg}$  and  $\text{Ag}^+/\text{Ag}$  are 0.851 and 0.799 V, respectively [26]. In order to confirm this phenomenon, FESEM was executed to investigate the surface morphology of AgTNPs multilayer thin films before and after the addition of mercury (II). The FESEM images shown in Fig. 7 were found the disintegration of AgTNPs particles into smaller particles and

amalgam compound (Fig. 7b–d) when compared with the original AgTNPs multilayer thin films (Fig. 7a).

As shown in the cartouche of Fig. 6, a linear relationship between the concentration of mercury (II) and absorbance at  $\lambda_{\text{max}}$  579 was obtained in the range of 0.5–20 ppm, with a regression equation of  $y = -0.0132x + 0.2849$  and a correlation coefficient ( $r^2$ ) of 0.9963. The limit of detection (LOD) at a signal to noise ratio of 3 and limit of quantitation (LOQ) at a signal to noise ratio of 10 were  $0.45 \pm 0.002$  and  $1.52 \pm 0.002$  ppm, respectively. Comparison with other types of mercury (II) sensing probe, the LOD reached by our approach is also much lower than 20 ppm for silver nanoliposome [27], 0.86 ppm for dichlorofluorescein-coumarin derivative [28] and 0.80 ppm for 1-pyrene-carboxaldehyde thiosemicarbazone [29].

Although films prepared from 5 layers of sodium citrate stabilized AgTNPs and PDADMAC were sufficiently sensitive to be used as a mercury (II) sensor, the 7 and 9 layers displayed similar phenomenon with mercury (II) in the range of 0.5–20 ppm and the corresponding data is shown in Table 1. The similarity in linear range could be explained by thickness of AgTNPs multilayer thin films. The thickness of AgTNPs multilayer thin films at the number of layers of 5, 7 and 9 were found in the range of 7.414–11.638 nm. The inclusion of the thickness results serves to show that there is no significant difference between the thickness of AgTNPs multilayer thin films at the number of layers of 5, 7 and 9. Thus, the number of mercury (II) that achieve contact with the sensing sites on the films were found constant and therefore induce similar detection of mercury (II) from the AgTNPs multilayer thin films.

The selectivity of the AgTNPs multilayer thin films colorimetric sensor was evaluated through testing the response of assay toward the common cations such as  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  and  $\text{Zn}^{2+}$  at a concentration of 20 ppm. As shown in Fig. 8, the  $\lambda_{\text{max}}$  of AgTNPs multilayer thin films when exposed to each of the common cations were lower by  $\pm 2\%$  than  $\lambda_{\text{max}}$  of AgTNPs multilayer thin films, indicating that the AgTNPs multilayer thin films can selectively target for the detection of mercury (II). In order to evaluate the validity of our AgTNPs multilayer thin films colorimetric sensor toward mercury (II), two water samples were analyzed by spike different concentrations of mercury (II). As shown in Table 2, mercury (II) in concentrations of 5, 10 and 20 ppm spiked in tap water and drinking water. The recovery values of AgTNPs multilayer thin films at three concentrations are in the range of 100.1%–106.4% for tap water and 100.2%–104.0% for drinking water. Moreover the relative standard deviation (RSD) was found to be in the range of 0.4–1.6 and 0.4–2.2 for tap water and drinking water, respectively.

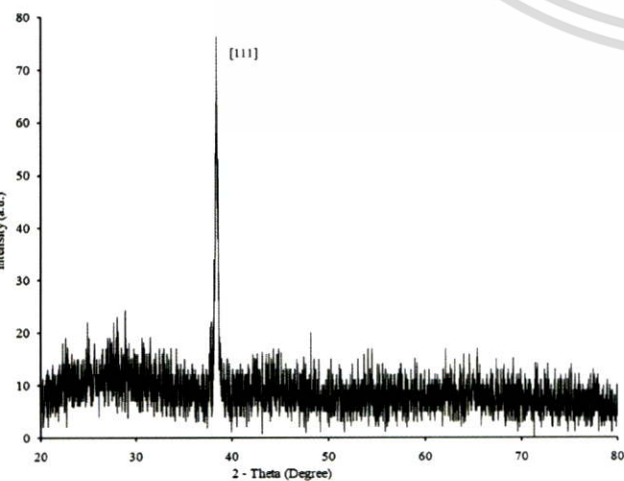
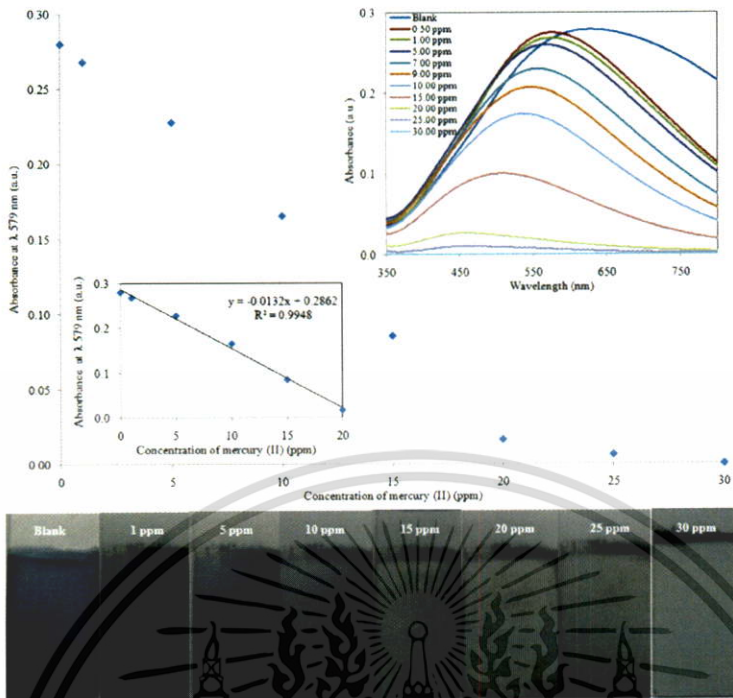
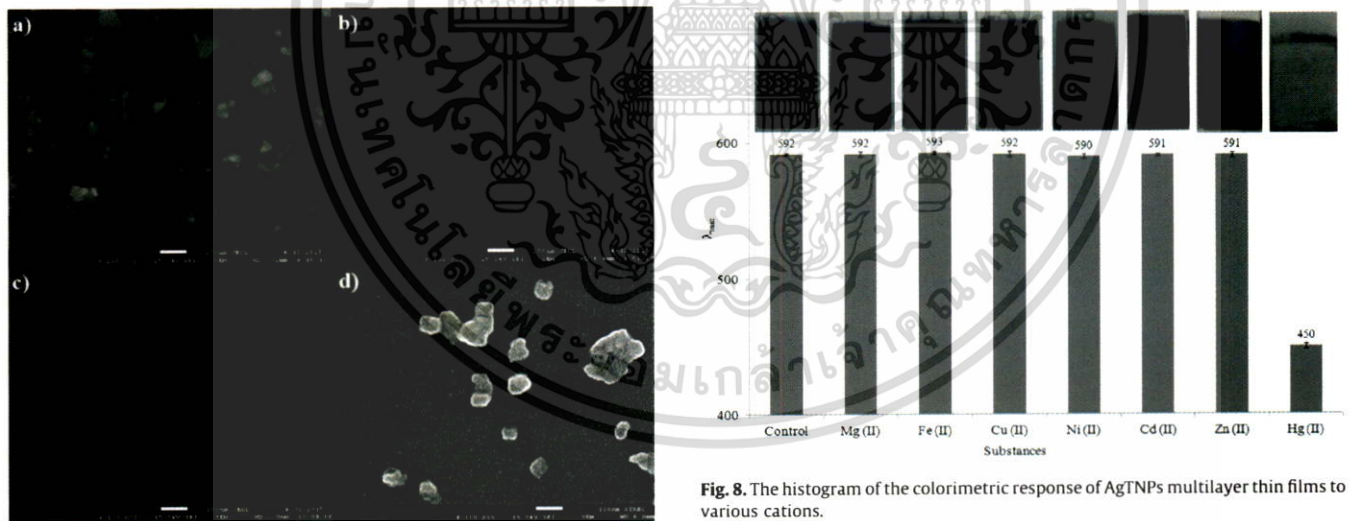


Fig. 5. XRD patterns of AgTNPs multilayer thin films.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Fig. 6.** UV-visible spectrum of AgTNPs multilayer thin films when exposed to various concentrations of mercury (II) (1, 5, 10, 15, 20, 25 and 30 ppm) and the linearity for the detection of mercury (II) in the dynamic range of 0.5–20 ppm. Insert image is the photograph of AgTNPs multilayer thin films when exposed to various concentrations of mercury (II).



**Fig. 8.** The histogram of the colorimetric response of AgTNPs multilayer thin films to various cations.

**Fig. 7.** FESEM images of (a) AgTNPs multilayer thin films and (b–d) are the FESEM images of AgTNPs multilayer thin films when exposed to mercury (II) concentrations from 1, 10 and 25 ppm.

**Table 1**  
Comparison of the performance of different AgTNPs surface onto the mercury (II) sensing properties.

Number of layers	Analytical parameters				
	Linear range (ppm)	Regression equation	Correlation coefficient ( $r^2$ )	LOD (ppm)	LOQ (ppm)
5	0.5–20	$y = -0.0132x + 0.2849$	0.9963	$0.45 \pm 0.002$	$1.52 \pm 0.002$
7	0.5–20	$y = -0.0211x + 0.4328$	0.9803	$0.56 \pm 0.004$	$1.89 \pm 0.002$
9	0.5–20	$y = -0.0265x + 0.6174$	0.9937	$0.45 \pm 0.004$	$1.51 \pm 0.003$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table 2**  
Determination of mercury (II) in real water samples.

Water samples	Concentration of mercury (II) (ppm)		Recovery (%)	RSD
	Added	Found		
Tap water	0	Not detection	–	–
	5	5.3 ± 0.1	106.4	1.6
	10	10.0 ± 0.1	100.4	0.4
	20	20.0 ± 0.1	100.1	0.4
Drinking water	0	Not detection	–	–
	5	5.2 ± 0.1	103.9	2.2
	10	10.4 ± 0.1	104.0	0.4
	20	20.0 ± 0.1	100.2	0.4

## Conclusion

A LbL self-assembly technique was used to fabricate the multilayer thin films of unmodified AgTNPs. The deposition of the nanoparticles on glass slide substrate was controlled by the electrostatic interaction between cationic PDADMAC and anionic AgTNPs. The growth of the films was then pushed from the level of monolayer to the level of multilayer by alternating the dipping of the glass slide substrate in each cationic and anionic polyelectrolytes. A linear growth was observed for each dipping cycle. The optical sensing of AgTNPs multilayer thin films were tested against mercury (II) concentration. The color of AgTNPs multilayer thin films was observed from blue in the initial state to mauve and colorless when the concentration of mercury (II) increased from 5 to 30 ppm. The performance of the LbL assembly of unmodified AgTNPs multilayer thin films is attributed to high selectivity and sensitivity for mercury (II), which could be used as a colorimetric sensor for mercury (II) in aqueous environments.

## Acknowledgment

This work was supported by Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand (No. 2559-1-05-033).

## References

- Y. Wang, F. Yang, X.R. Yang, Colorimetric biosensing of mercury (II) ion using unmodified gold nanoparticle probes and thrombin-binding aptamer, *Biosens. Bioelectron.* 25 (2010) 1994–1998.
- L. Beaudin, S.C. Johannessen, R.W. Macdonald, Coupling laser ablation and atomic fluorescence spectrophotometry: an example using mercury analysis of small sections of fish scales, *Anal. Chem.* 82 (2010) 8785–8788.
- N. Pourreza, K. Ghanemi, Determination of mercury in water and fish samples by cold vapor atomic absorption spectrometry after solid phase extraction on agar modified with 2-mercaptobenzimidazole, *J. Hazard Mater.* 161 (2009) 982–987.
- H.J. Kim, D.S. Park, M.H. Hyun, Y.B. Shim, Determination of Hg<sup>II</sup> ion with a 1,11-bis(8-quinoyloxy)-3,6,9-trioxundecane-modified glassy carbon electrode using spin-coating technique, *Electroanalysis* 10 (1998) 303–306.
- D. Karunasagar, J. Arunachalam, S. Gangadharan, Development of a 'collect and punch' cold vapour inductively coupled plasma mass spectrometric method for the direct determination of mercury at nanograms per litre levels, *J. Anal. At. Spectrom.* 13 (1998) 679–682.
- Z.B. Chen, T.H. Lou, Q. Wu, et al., A facile label-free colorimetric sensor for Hg<sup>2+</sup> based on Hg-triangular silver nanoplates with amalgam-like structure, *Sens. Actuators B: Chem.* 221 (2015) 365–369.
- D. van Lierop, Ž. Krpetić, L. Guerrini, et al., Positively charged silver nanoparticles and their effect on surface-enhanced Raman scattering of dye-labelled oligonucleotides, *Chem. Commun.* 48 (2012) 8192–8194.
- Y. Yang, S. Matsubara, L.M. Xiong, T. Hayakawa, M. Nogami, Solvothermal synthesis of multiple shapes of silver nanoparticles and their SERS properties, *J. Phys. Chem. C* 111 (2007) 9095–9104.
- N. Chauhan, S. Gupta, N. Singh, et al., Aligned nanogold assisted one step sensing and removal of heavy metal ions, *J. Colloid Interface Sci.* 363 (2011) 42–50.
- N. Bi, Y.H. Chen, H.B. Qi, et al., A sensitive localized surface plasmon resonance sensor for determining mercury (II) ion using noble metal nanoparticles as probe, *Spectrochim. Acta A: Mol. Biomol. Spectrosc.* 95 (2012) 276–281.
- E. Detsri, J. Popanyasak, Fabrication of silver nanoparticles/polyaniline composite thin films using layer-by-layer self-assembly technique for ammonia sensing, *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspect.* 467 (2015) 57–65.
- K. Farhadia, M. Forougha, R. Molaiea, S. Hajizadeha, A. Rafipourb, Highly selective Hg<sup>2+</sup> colorimetric sensor using green synthesized and unmodified silver nanoparticles, *Sens. Actuators. B: Chem.* 161 (2012) 880–885.
- P. Jarujamrus, M. Amatatongchai, A. Thima, T. Khongrangdee, C. Mongkontong, Selective colorimetric sensors based on the monitoring of an unmodified silver nanoparticles (AgNPs) reduction for a simple and rapid determination of mercury, *Spectrochim. Acta A: Mol. Biomol. Spectrosc.* 142 (2015) 86–93.
- L. Rastogi, R.B. Sashidhar, D. Karunssagar, J. Arunachalam, Gum kondagogu reduced/stabilized silver nanoparticles as direct colorimetric sensor for the sensitive detection of Hg<sup>2+</sup> in aqueous system, *Talanta* 118 (2014) 111–117.
- S.Y. Gao, X.X. Jia, Y.L. Chen, Old tree with new shoots: silver nanoparticles for label-free and colorimetric mercury ions detection, *J. Nanopart. Res.* 15 (2013) 1385.
- G.L. Wang, X.Y. Zhu, H.J. Jiao, Y.M. Dong, Z.J. Li, Ultrasensitive and dual functional colorimetric sensors for mercury (II) ions and hydrogen peroxide based on catalytic reduction property of silver nanoparticles, *Biosens. Bioelectron.* 31 (2012) 337–342.
- Y. Li, P. Wu, H. Xu, Z.P. Zhang, X.H. Zhong, Highly selective and sensitive visualizable detection of Hg<sup>2+</sup> based on anti-aggregation of gold nanoparticles, *Talanta* 84 (2011) 508–512.
- G.S. Métraux, C.A. Mirkin, Rapid thermal synthesis of silver nanoprisms with chemically tailorable thickness, *Adv. Mater.* 17 (2005) 412–425.
- J. Zhang, Y. Sun, H. Zhang, et al., Preparation and application of triangular silver nanoplates/chitosan composite in surface plasmon resonance biosensing, *Anal. Chim. Acta* 769 (2013) 114–120.
- N.A. Katov, L. Dekany, J.H. Fendler, Layer-by-layer self-assembly of polyelectrolyte-semiconductor nanoparticle composite films, *J. Phys. Chem.* 99 (1995) 13065–13069.
- P.K. Khanna, N. Singh, S. Charan, A.K. Viswanath, Synthesis of Ag/polyaniline nanocomposite via an in situ photo-redox mechanism, *Mater. Chem. Phys.* 92 (2005) 214–219.
- S.K. Pillaiammarri, F.D. Blum, A.T. Tokuhira, M.F. Bertino, One-pot synthesis of polyaniline-metal nanocomposites, *Chem. Mater.* 17 (2005) 5941–5944.
- T. Morris, H. Copeland, E. McLinden, S. Wilson, G. Szulcowski, The effects of mercury adsorption on the optical response of size-selected gold and silver nanoparticles, *Langmuir* 18 (2002) 7261–7264.
- A. Henglein, C. Brancewicz, Absorption spectra and reactions of colloidal bimetallic nanoparticles containing mercury, *Chem. Mater.* 9 (1997) 2164–2167.
- L. Katsikas, M. Gutiérrez, A. Henglein, Bimetallic colloids: silver and mercury, *J. Phys. Chem.* 100 (1996) 11203–11206.
- Y.J. Fan, Z. Liu, L. Wang, J.H. Zhan, Synthesis of starch-stabilized Ag nanoparticles and Hg<sup>2+</sup> recognition in aqueous media, *Nanoscale Res. Lett.* 4 (2009) 1230–1235.
- E. Priyadarshini, N. Pradhan, A.K. Pradhan, P. Pradhan, Label free and high specific detection of mercury ions based on silver nano-liposome, *Spectrochim. Acta A: Mol. Biomol. Spectrosc.* 163 (2016) 127–133.
- H.J. Kim, E.J. Park, M.G. Choi, S. Ahn, S.K. Chang, Selective chromogenic and fluorogenic signalling of Hg<sup>2+</sup> ions using a fluorescein-coumarin conjugate, *Dyes Pigments* 84 (2010) 54–58.
- X.M. Wang, H. Yan, X.L. Feng, Y. Chen, 1-Pyrene-carboxaldehyde thiosemicarbazone: a novel fluorescent molecular sensor towards mercury (II) ion, *Chin. Chem. Lett.* 21 (2010) 1124–1128.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้