

การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและการสร้าง
ฟิล์มบางนาโนโพลีโอเล็กโทไรต์โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นเพื่อ
เป็นตัวรับรู้สำหรับไอออนของปรอท

SYNTHESIS OF SILVER TRIANGULAR NANOPRISMS AND ITS LAYER-
BY-LAYER ASSEMBLY INTO POLYELECTROLYTE NANO-THIN FILMS
FOR MERCURIC IONS SENSOR

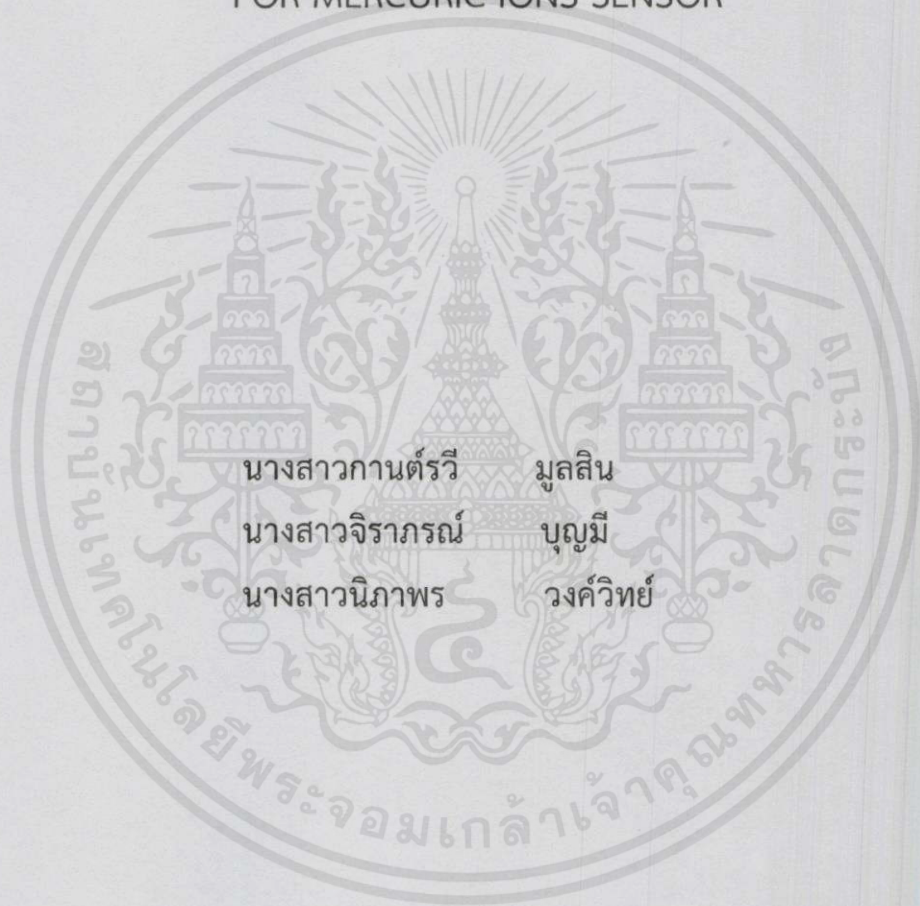


นางสาวกานต์วี มุลสิน
นางสาวจิราภรณ์ บุญมี
นางสาวนิภาพร วงศ์วิทย์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและการสร้าง
ฟิล์มบางนาโนโพลีอิเล็กโทรไลต์โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นเพื่อ
เป็นตัวรับรู้สำหรับไอออนของปรอท

SYNTHESIS OF SILVER TRIANGULAR NANOPRISMS AND ITS LAYER-
BY-LAYER ASSEMBLY INTO POLYELECTROLYTE NANO-THIN FILMS
FOR MERCURIC IONS SENSOR



นางสาวกานต์วี มุลสิน
นางสาวจิราภรณ์ บุญมี
นางสาวนิภาพร วงศ์วิทย์

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF SILVER TRIANGULAR NANOPRISMS AND ITS LAYER-BY-LAYER ASSEMBLY INTO POLYELECTROLYTE NANO-THIN FILMS FOR MERCURIC IONS SENSOR



MISS KANRAWEE MOOLSIN
MISS JIRAPORN BOONMEE
MISS NIPAPORN WONGWIT

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ FACULTY OF SCIENCE ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG การนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2014

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและการสร้างฟิล์มบางนาโนโพลีอิเล็กโทรไลต์โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นเพื่อเป็นตัวรับรู้สำหรับไอออนของปรอท

Synthesis of Silver Triangular Nanoprisms and Its Layer-by-Layer Assembly into Polyelectrolyte Nano-Thin Films For Mercuric Ions Sensor

ชื่อนักศึกษา นางสาวกานต์วี มุลสิน รหัสนักศึกษา 54050129
นางสาวจิราภรณ์ บุญมี รหัสนักศึกษา 54050145
นางสาวนิภาพร วงศ์วิทย์ รหัสนักศึกษา 54050196
ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2557
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เอกรัฐ เดชศรี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ ประธานกรรมการ	
ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติคุณ กรรมการ	กิตติมนต์
ดร.เอกรัฐ เดชศรี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	เอกรัฐ 1๐๕๐๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและการสร้างฟิล์มบางนาโนโพลีเอเล็กโทรไลต์โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นเพื่อเป็นตัวรับรู้สำหรับไอออนของปรอท

Synthesis of Silver Triangular Nanoprisms and Its Layer-by-Layer Assembly into Polyelectrolyte Nano-Thin Films For Mercuric Ions Sensor

ชื่อนักศึกษา	นางสาวกานต์รวี	มุลลิน	รหัสนักศึกษา 54050129
	นางสาวจิราภรณ์	บุญมี	รหัสนักศึกษา 54050145
	นางสาวนิภาพร	วงศ์วิทย์	รหัสนักศึกษา 54050196
ปริญญา ภาควิชา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ปีการศึกษา	เคมี		
อาจารย์ที่ปรึกษา	2557		
	ดร.เอกรัฐ เตชศรี		

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) มาใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน โดยแผ่นฟิล์มบางหลายชั้นจะถูกสร้างขึ้นจากการทับถมสลับกันระหว่างประจุลบของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและประจุบวกของโพลีไคแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ จากนั้นได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มบางหลายชั้นที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-visible spectrophotometry), เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD), การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope, FESEM) ต่อมาเมื่อแผ่นฟิล์มเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นตัวรับรู้สำหรับการตรวจวัดไอออนของปรอท การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแสงของแผ่นฟิล์มจะเกิดขึ้นต่างกันไปตามความเข้มข้นของไอออนของปรอทที่แตกต่างกัน โดยสามารถสังเกตได้จากสีของแผ่นฟิล์มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำเงินไปเป็นสีม่วงจนกระทั่งใสไม่มีสี ทั้งนี้พบว่าแผ่นฟิล์มบางหลายชั้นที่ถูกสร้างขึ้นนั้นสามารถให้การเปลี่ยนแปลงสีได้อย่างดีเยี่ยมเนื่องจากมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วกับไอออนของปรอท 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 ± 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1.52 ± 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อนำแผ่นฟิล์มบาง

หลายชั้นของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์หาไอออนของ
ปรอทในตัวอย่างน้ำ พบว่าค่าร้อยละของการคืนกลับอยู่ในช่วง 100.1 - 106.4

คำสำคัญ : เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น ปรอท พิล์มบางขนาดนาโน อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยม
ปริซึมในระดับนาโน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Synthesis of Silver Triangular Nanoprisms and Its Layer-by-Layer Assembly into Polyelectrolyte Nano-Thin Films For Mercuric Ions Sensor		
Students	Miss Kanrewee	Moolsin	Student ID 54050129
	Miss Jiraporn	Boonmee	Student ID 54050145
	Miss Nipaporn	Wongwit	Student ID 54050196
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2014		
Advisor	Dr. Ekarat Detsri		

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 ± 0.002 ppm and 1.52 ± 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

กิตติกรรมประกาศ

ที่โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณในความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่
ปรึกษา ดร.เอกรัฐ เดชศรี ที่ให้การอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ให้ทุนและกำลังใจ พร้อมทั้ง
ช่วยเหลือและดูแลเอาใจใส่อย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ดร.ชาวลย์ ศรีวงษ์ และ ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติคุณ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบ
ตลอดจนให้คำปรึกษาและแก้ไขโครงการพิเศษให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ที่ช่วยติดต่อประสานงาน ทำให้โครงการพิเศษนี้ดำเนินลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ช่วยติดต่อประสานงาน ทำให้โครงการพิเศษนี้ดำเนิน
ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์สาร

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และคนในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและคอย
เป็นกำลังใจในการทำโครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วง รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้อง ที่คอยให้
กำลังใจและช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

นางสาวกานต์รวี

มุลสิน

นางสาวจิราภรณ์

บุญมี

นางสาวนิภาพร

วงศ์วิทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ต
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 วิธีกรยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation).....	13
2.2.3 อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (Silver triangular nanoprism).....	14
2.2.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3.2 ตัวรับรู้การเปรียบเทียบสี (Colorimetric sensor) ของอนุภาค เงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน.....	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 ฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (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
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน เอกสารนี้เป็นเอกสาร (AgTNP) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method).....	37
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 3.1.1 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมไซเตรต.....	37
3.1.1.1 สารเคมี.....	37

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 ₂)	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปทำประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD).....	47
3.4.1.3 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of guantitation, LOQ).....	47
3.4.1.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy).....	48
3.4.1.5 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์.....	48
3.4.2 การตรวจวัดปรอทโดยใช้แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน	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 guantitation, LOQ).....	50
3.4.2.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy).....	50
3.4.2.5 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์.....	51
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	52
4.1 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยม สามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน	52
4.1.1 ผลจากการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ ไตรโซเดียมซิเตรต.....	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 สามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs).....	58
4.1.3.3 ผลจากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่าง สามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs)	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปทรงสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs) ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งการนำเอกสารนี้ไปใช้ในทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

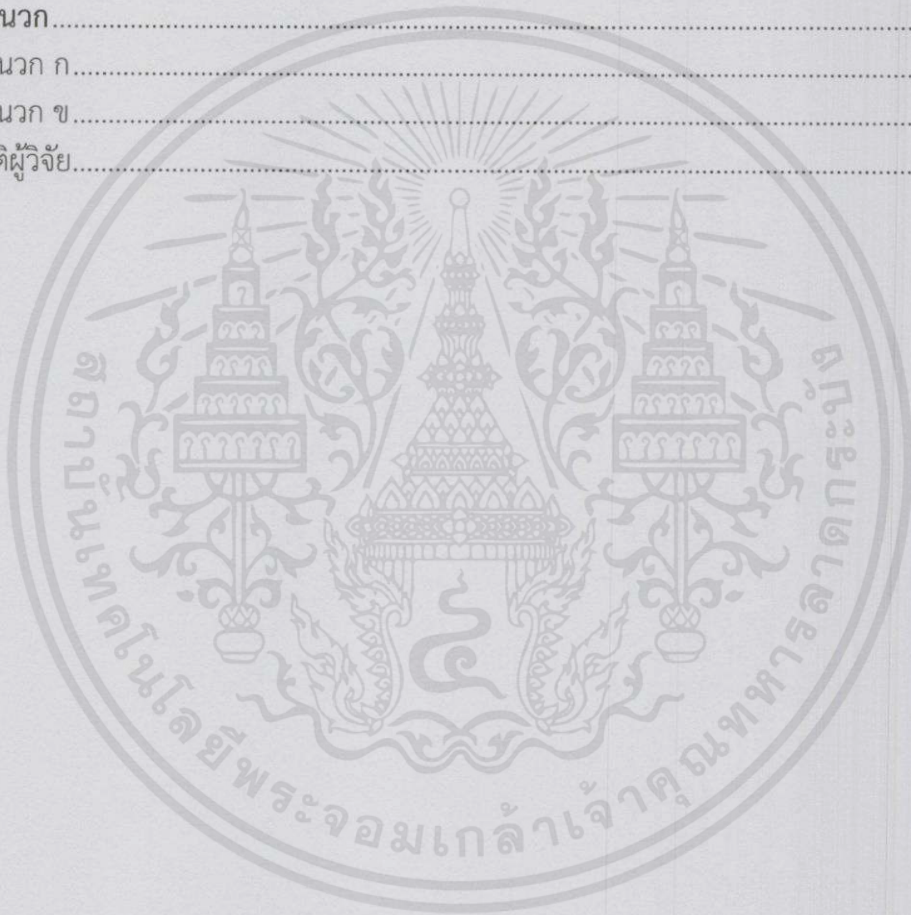
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique).....	60
4.2.1 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (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 การนำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท	67
4.3.1 การตรวจวัดปรอทโดยการใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs).....	67
4.3.1.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท (HgCl ₂).....	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 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่ใช้ในการจุ่มสารละลายมาตรฐานปรอท.....	74
4.3.2.1.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท (HgCl ₂)	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของโพลีไอเล็กโตรไลต์ชนิดประจุบวก (Polycation).....	20
2.2 ตัวอย่างของโพลีไอเล็กโตรไลต์ชนิดประจุลบ (Polyanion).....	21
4.1 ตารางแสดงค่าศักย์ซีต้าของ AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน	58
4.2 ตารางแสดงหมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิเตรตและหมู่ฟังก์ชันของAgTNPs.....	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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 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 ที่ใช้แปงเป็นตัวรีดิวซ์ด้วยวิธีการใช้รังสีไมโครเวฟ	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 วิธีการสร้างฟิล์มบางโพลีเอเล็กโทรไลต์โดยการสลับประจุบวก 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) โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (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

สารบัญรูป (ต่อ)

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

สารบัญรูป (ต่อ)

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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)
μ M	Micromolar (ไมโครโมลาร์)
nm	Nanometer (นาโนเมตร)
mV	Millivolt (มิลลิโวลต์)
%wt	Percent by weight (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
ppm	Milligram per liter (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ปรอท (Mercury) เป็นโลหะหนัก ที่ในปัจจุบันถูกนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมหลายประเภท อาทิเช่น ใช้ออกไซด์ของปรอทในอุตสาหกรรมการผลิตสี หรือใช้สารปรอทในการทำสวิตช์อัตโนมัติของอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น โดยสารปรอทเหล่านี้มีการปนเปื้อนมากับระบบกำจัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยน้ำเสียลงสู่ธรรมชาติ ทำให้ธรรมชาติมีการปนเปื้อนของสารปรอทในดินและน้ำทั่วไป ปรอทเป็นสารพิษที่ร้ายแรงมาก สามารถดูดซึมผ่านระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร และซึมผ่านผิวหนัง ไอของปรอทที่เข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมเข้าสู่ระบบหมุนเวียนโลหิต และกระจายไปยังสมองและส่วนอื่นๆของร่างกายได้อย่างรวดเร็ว การได้รับสารปรอทเป็นเวลานานจะทำให้มีอาการไอหน้าเกิดการบวมและเจ็บ บางคนอาจเกิดการเหน็บชาบางส่วนจนเป็นอัมพาต 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 มีความไวสูงในการตรวจวัด และเป็นวิธีที่สะดวก [3]

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

เนื่องจากอนุภาคนาโนเงินมีคุณสมบัติหลายๆประการที่น่าสนใจจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย

ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงพัฒนาวิธีการตรวจวัดไอออนปรอท จากการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดยใช้วิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction) ขึ้นมา เพื่อให้มีสมบัติที่พิเศษขึ้น เนื่องจากอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมีคุณสมบัติทางเคมีและทางแสงที่พิเศษ สามารถนำมาใช้ในวิธีการเปรียบเทียบสีที่มีความไว และความเสถียรได้ จึงนำมาสร้างเป็นตัวรับรู้ในการตรวจวัดไอออนปรอท และงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างฟิล์มบางของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) ด้วยการทับถมของชั้นสารโพลีอเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกคือ 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. สร้างฟิล์มบางในระดับนาโนโพลีอเล็กโทรไลต์โดยการใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
3. ศึกษาผลของการใช้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนในการตรวจวัดปรอท
4. ศึกษาผลของการใช้แผ่นฟิล์มบางนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนเป็นตัวรับรู้ในการตรวจวัดปรอท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่การพิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ได้แก่ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แถบการดูดกลืนแสง (Surface plasmon resonance) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและแผ่นฟิล์มบางนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
- หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
- รูปร่างของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
- สภาพความเป็นประจวบของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
- พื้นผิวของแผ่นฟิล์มบางนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน
- โครงสร้างผลึกของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มบางนาโน
- ทดสอบมุมสัมผัสของแผ่นฟิล์มบางนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สารละลายเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่สามารถใช้ในการตรวจวัดปรอทได้
2. ได้แผ่นฟิล์มบางนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่สามารถใช้เป็นตัวรับรู้สำหรับการตรวจวัดปรอท
3. ได้วิธีในการตรวจวัดปรอทที่มีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

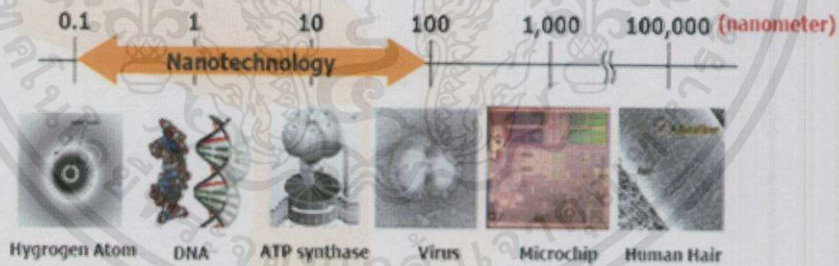
บทที่ 2

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 เป็นคนแรกที่แสดงความเห็นถึงความเป็นไปได้ 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 ที่ได้รับการออกแบบและควบคุมตั้งแต่การ จัดเรียงอะตอมหรือโมเลกุลไปจนกลายเป็นชิ้นส่วนขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้วัสดุชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ที่มี คุณสมบัติดีขึ้น [7]

2.1.1 ประเภทของนาโนเทคโนโลยี

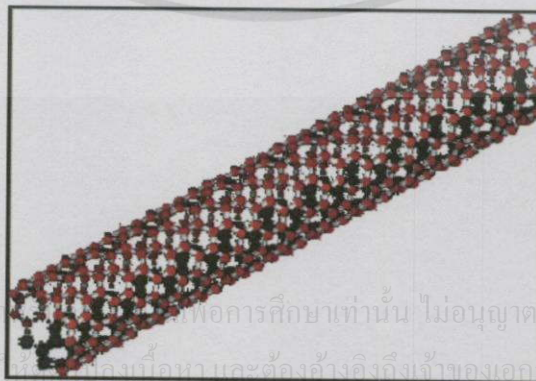
2.1.1.1 วัสดุนาโน (Nanomaterial)

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

วัสดุนาโนมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ที่สำคัญ ได้แก่

1. วัสดุที่มีธาตุคาร์บอนเป็นหลัก (Carbonbased materials) ท่อนาโนคาร์บอน

มีลักษณะเป็นท่อเปิดรูปร่างกระบอกเหมือนการม้วนพับของแผ่นแกรไฟต์ โดยมีความกว้าง หรือเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อประมาณ 4 นาโนเมตร โดยอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของท่อประมาณ 10,000 เท่า สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของท่อนาโนคาร์บอน คือ ความแข็งแรง โดยความแข็งแรงของวัสดุนาโนชนิดนี้เท่ากับความแข็งแรงของเพชร ท่อนาโนคาร์บอนนำความร้อนและนำกระแสไฟฟ้าได้ดีมากเมื่ออยู่ในสถานะที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามสมบัติการนำไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงในช่วงค่อนข้างกว้างมาก คือ สามารถมีสมบัติของตัวนำ ตั้งแต่โลหะ สารกึ่งโลหะ ไปจนถึงฉนวน ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล และเปลี่ยนแปลงได้อีกตามเทคนิคการสังเคราะห์ จากสมบัติที่แข็งแรงเบา จึงได้มีการนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้ในการสร้างอากาศยาน ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่ใช้สมบัติในระดับจุลภาคของสาร เช่น กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแบบกราด ใช้เป็นส่วนผสมกับวัสดุอื่น เช่น พอลิเมอร์ เพื่อทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงยิ่งขึ้น [9]



รูปที่ 2.2 ท่อนาโนคาร์บอน [9]

2. วัสดุนาโนสารกึ่งตัวนำและโลหะ (Semiconductor and metal nanomaterials)

เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กจิ๋วและมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก จึงได้รับความสนใจเป็นพิเศษในอุตสาหกรรมสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวโดยตรง และยังนำไปใช้เป็นตัวตามรอย 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 ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาด้านชีวภาพและการแพทย์

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

2.1.1.2 อุปกรณ์นาโน (Nanodevices)

เป็นการสร้างหรือสังเคราะห์อุปกรณ์ในระดับนาโน และยังคงมีความสัมพันธ์กับเทคโนโลยีชีวภาพซึ่งมีเป้าหมายที่เรียนแบบปฏิกิริยาของระบบสิ่งมีชีวิต 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 นอร์ทเวสเทิร์น ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทำการศึกษารอคอลไซเมอร์ด้วยเทคนิคใหม่ โดยอาศัยตัวตรวจจับชนิดใหม่ที่เรียกว่า Surface plasmon resonance (LSPR) nanosensor ซึ่งจะทำให้หน้าที่ตรวจจับโมเลกุลที่น่าเชื่อว่าจะเป็นตัวก่อให้เกิดโรคอัลไซเมอร์ขึ้น ในการทดลองนี้อาศัยอันตร

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

2.1.1.3 นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (Bionanotechnology)

นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (Bionanotechnology) เป็นนาโนเทคโนโลยีแขนงหนึ่ง ซึ่งเป็นการรวมวิทยาการทางด้านวิทยาศาสตร์ชีวภาพ เคมี และวิศวกรรมศาสตร์เข้าด้วยกัน เพื่อใช้ในการตรวจสอบ ควบคุม ดัดแปลง หรือสังเคราะห์ชีวโมเลกุลชั้นใหม่ เพื่อให้มีคุณสมบัติตามต้องการ [13] เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ด้านชีวภาพ เช่น การพัฒนานาโนไบโอเซนเซอร์หรือหัวตรวจวัดสารชีวภาพ และสารวินิจฉัยโรคโดยใช้วัสดุชีวโมเลกุล การปรับโครงสร้างระดับโมเลกุลของยาที่สามารถทำลายชีวโมเลกุลที่เป็นเป้าหมายเฉพาะเจาะจง เช่น เซลล์มะเร็ง การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ในการส่งผ่านสารบำรุงเข้าชั้นได้ผิวหนังได้ดียิ่งขึ้น เป็นต้น [14]

ตัวอย่างการใช้นาโนเทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร เช่น การนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการทางเศรษฐกิจ เช่น คุณภาพหุงต้ม ความหอม ด้านทานโรคไหม้ ด้านทานเพลี้ยชนิดต่างๆ ทนต่อน้ำท่วม มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดย ศ.ดร.ภรตพัฒน์ วิสัยทอง ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutron research facility) ณ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ริเริ่มพัฒนาเทคนิคทางนาโนเทคโนโลยีในการปรับปรุงพันธุ์ข้าวไทยโดยใช้ลำอนุภาค (Particle beam) เจาะรูขนาดนาโนขึ้นที่ผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ข้าว จากนั้นจะยิงอะตอมของไนโตรเจนผ่านรูที่สร้างขึ้นผ่านเข้าไปในเซลล์ข้าวเพื่อกระตุ้นให้ดีเอ็นเอของข้าวเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงพันธุ์ข้าวให้ตรงตามคุณลักษณะที่ต้องการต่อไป งานวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จขั้นต้นไปแล้วจากการที่สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะของข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่ชื่อว่า ข้าวคาม ซึ่งมีลำต้น ใบ และเม็ดสีม่วงเข้ม ให้กลายเป็นข้าวคามที่มีลำต้นและใบสีเขียว งานวิจัยในขั้นต่อไปคือการปรับปรุงพันธุ์ข้าวหอมมะลิ (Jasmine rice) ให้สามารถทำการเพาะปลูกได้ตลอดปี มีลำต้นสั้นลง ทนทานต่อแสงแดด และปรับปรุงสีของเม็ดให้ดีขึ้น ข้าวที่ถูกปรับปรุงพันธุ์โดยวิธีการทางนาโนเทคโนโลยีนี้อาจจัดเป็น ข้าวตัดแประอะตอม (Atomically modified rice) หรือเรียกสั้นๆ ว่า “ข้าวนาโน (Nano rice)” [7] เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 ซีเฟืองที่ประกอบเข้าด้วยกัน) ประกอบกันเป็นวัสดุรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนที่แข็งแรง หุ่นยนต์นาโนการแพทย์ต้องการมอเตอร์เพื่อการขับเคลื่อน และต้องการแขนกลที่ขยับได้อย่างคล่องแคล่ว ต้องมีพลังงานช่วยผลักดัน มีเซนเซอร์ที่ทำหน้าที่ชี้้นำการปฏิบัติการ และมีระบบคอมพิวเตอร์ช่วยควบคุมการทำงานทั้งหมด หุ่นยนต์นาโนจะวิ่งไปตามกระแสเลือด ฉะนั้นจึงต้องมีขนาดเล็กกว่าเซลล์เม็ดเลือดแดง และมีขนาดจิวเพียงพอที่จะบีบอัดและรอดผ่านรูแคบๆ ในร่างกายมนุษย์ได้ [16]



รูปที่ 2.3 หุ่นยนต์นาโนสำหรับการซ่อมแซมเซลล์ (Cell repair nanorobots) [17]

จากการศึกษาวิจัยในปัจจุบันพบว่า มีการเสนอแบบจำลองของหุ่นยนต์นาโนที่เรียกว่า หุ่นยนต์นาโน (Nano robot) สร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์หลายๆด้าน เช่น ด้านทันตกรรม มีความสามารถในการตรวจสอบ ซ่อมแซม ทำความสะอาดผิวฟัน โดยการควบคุมผ่านระบบคอมพิวเตอร์ทางไกล ทำให้ความรู้สึกเจ็บปวดในขณะที่ทำฟันลดลงหรือแทบจะไม่มีรู้สึกที่กำลังทำฟันอยู่ นอกจากนี้ ยังมีการสร้างหุ่นยนต์นาโนเซลล์เม็ดเลือดแดงเทียม (Respirocyte) ที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นเลือดฝอย เพื่อให้เคลื่อนที่ไปในหลอดเลือดได้เช่นเดียวกับเม็ดเลือดแดง หุ่นยนต์นาโนเซลล์เม็ดเลือดแดงเทียมนี้ทำหน้าที่นำก๊าซออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่างๆของร่างกายควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะนำมาใช้เพื่อรักษาผู้ป่วยที่เกิดความผิดปกติของเม็ดเลือดแดงส่งผลให้มีก๊าซออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่างๆของร่างกายไม่เพียงพอ หรือการใช้เครื่องมือที่ลักษณะเหมือนหุ่นยนต์นาโนหรือวัสดุนาโนเป็นตัวขนส่งยา (Drug delivery agent) นำเข้าสู่ร่างกายผู้ป่วย เพื่อเพิ่มผลสัมฤทธิ์

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 ซึ่งจะทำให้ได้ไอออนของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์ในรูปซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ที่ล้อมรอบด้วยอนุภาคเงินในระดับนาโนที่ยังอยู่ในรูปโลหะหรืออนุภาคนาโนอยู่ในน้ำ อนุภาคเงินในระดับนาโนเมื่อปรากฏในน้ำจึงจะให้ไอออนของซิลเวอร์ด้วย ซึ่งในการพิจารณาถึงเคมีของอนุภาคเงินในระดับนาโน จึงต้องครอบคลุมถึงไอออนของซิลเวอร์ (Ag^+) รวมด้วย

จากการที่อนุภาคเงินในระดับนาโนมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคเงินทั่วไปมากจึงทำให้มีลักษณะสมบัติในส่วนของพื้นผิวที่แตกต่างกันไป เช่น มีแนวโน้มที่จะระเบิดได้ซึ่งมาจากการที่สารอนุภาคเงินในระดับนาโนมักมีอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และเล็กกว่าเงินทั่วไปอย่างมาก การสะสมหรือรวมตัวเป็นฝุ่นของอนุภาคเงินในระดับนาโนจึงจะทำให้เกิดการระเบิดได้ นอกจากนี้อนุภาคเงินในระดับนาโนสามารถรวมเป็นก้อนกรานูลได้ ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่อนุภาคเงินในระดับนาโนมีขนาดเล็กมารวมกัน แต่ยังคงมีขนาดในระดับเล็กมาก เช่น อนุภาคเงินในระดับนาโนที่รวมกลุ่มมีขนาดเล็ก 15 หรือ 20 นาโนเมตร เป็นต้น ส่งผลให้ลักษณะสมบัติอื่นๆ เช่น พื้นผิว ชนิดประจุบนพื้นผิว รวมทั้งลักษณะควอนตัมแตกต่างจากเงินทั่วไป ซึ่งส่งผลให้เกิดการนำอนุภาคเงินในระดับนาโนไปเป็นวัสดุสำหรับผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น พลาสติก ผ้า กระดาษ สี และสารเคลือบได้

2.2.1 คุณสมบัติของอนุภาคเงินในระดับนาโน

2.2.1.1 คุณสมบัติเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon resonance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เป็นคุณสมบัติของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีขนาดเล็กมากที่ส่งผลให้อนุภาคเงินในระดับนาโนมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มาจากกระทบ ทำให้เกิดปรากฏการณ์เชิงแสงเรียกว่า Surface plasmon resonance ส่งผลให้อนุภาคเงินในระดับนาโนดูดกลืนแสงสเปกตรัม

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

2.2.1.2 คุณสมบัติการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย

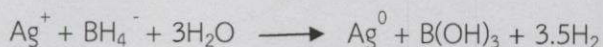
ขนาดของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีขนาดเล็กมาก มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ทำให้สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ โดยอนุภาคเงินในระดับนาโนกระจายอยู่ตามผนังเซลล์และแทรกเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรีย และเกิดการรวมตัวของดีเอ็นเอภายในเซลล์ เช่นเดียวกับการใช้ซิลเวอร์ไอออน ขนาดของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่สามารถฆ่าเชื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 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 โซเดียมโอดีซิลซัลเฟต โดยมีปัจจัยในการป้องกันการเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโน ซึ่งวิธีนี้มีตัวแปรที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคและการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโน หลายตัวแปร เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของซิลเวอร์ไนเตรต , ตัวรีดิวซ์/อัตราส่วนโมลของซิลเวอร์ไนเตรต และความเข้มข้นของตัวรักษาเสถียรภาพ

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



โดยขั้นตอนการสังเคราะห์คือ ใส่สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์พร้อมกับตัวรักษาเสถียรภาพ ซึ่งไอออนของเงินจะถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ไปเป็นธาตุเงิน โดยโซเดียมโบโรไฮไดรด์จะเกิดการไฮโดรไลซิสเป็น BH_4^- แล้วทำการรีดิวซ์ Ag^+ ไปเป็น Ag^0 เกิดเป็นคอลลอยด์ของอนุภาคเงินในระดับนาโน และทำการศึกษานาโนอนุภาค, ระดับการรวมตัวของอนุภาคเงินในระดับนาโนโดยดูจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยูวี-วิสิเบิลและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนตามลำดับ

2.2.2.2 วิธีเชิงแสงทางเคมี (Photochemical synthesis)

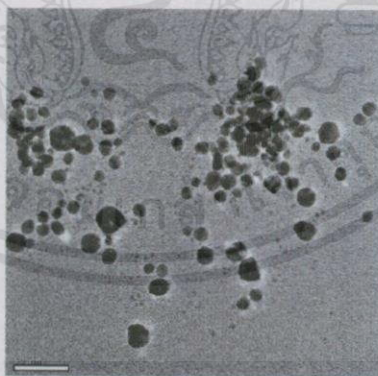
จากการศึกษาของ เค.มาลิก, เอ็ม.เจ.วิทคอม, เอ็ม.เอส.สเคิลเรลล์ [26] การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนที่มีพอลิเมอร์เป็นตัวรักษาเสถียรภาพโดยใช้วิธีเชิงแสงทางเคมี ได้ทำการเตรียมอนุภาคเงินโดยการฉายแสงด้วยรังสียูวี มีซิลเวอร์ไนเตรตเป็นแหล่งกำเนิดอนุภาคเงิน ใช้เมทอกซีโพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นตัวรีดิวซ์ไอออนของเงินซึ่งจะเกิดอนุภาคนิวเคลียสโดยการใช้อิทธิพลของรังสียูวีและยังทำ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

โดยขั้นตอนการสังเคราะห์จะทำการเติมสารละลายเมทอกซีโพลีเอทิลีนไกลคอลผสมกับสารละลายเตตระคลอโรออร์เทอ ทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันและขจัดออกซิเจนออกด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วนำไปตั้งใต้แหล่งยูวีให้มีระยะห่าง 10 เซนติเมตรระหว่างพื้นผิวบนสุดของสารละลายกับแหล่งยูวี ในขั้นตอนแรกที่ทำกรผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดการสร้างอนุภาคเงินในระดับนาโนโดยการใช้อิทธิพลของยูวี-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 การฉายรังสีไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงใด ๆ มากนักในสเปกตรัมหรือขนาดอนุภาค ซึ่งบ่งชี้ว่าไอออนของเงินนั้นถูกรีดิวซ์ทั้งหมดและถูกนำมาใช้สำหรับการรวมตัวเป็นอนุภาคเงินในระดับนาโน

2.2.2.3 วิธีการใช้ไมโครเวฟ (Microwave treatment)

การสังเคราะห์โดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟ มีข้อดีหลายประการ เช่น ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วใช้เวลาน้อยกว่าในการสังเคราะห์ เป็นวิธีที่ง่าย ใช้พลังงานค่อนข้างต่ำ และทำให้ได้สารประกอบที่มีความบริสุทธิ์สูง จากงานวิจัยของ เค เจ ศรีราม, เอ็ม นิติน, และปี ยู เนียร์ [27] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนโดยใช้ไมโครเวฟ จะใช้แบ่งทำเป็นแผ่นแม่แบบและเป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งแบ่งที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นแม่แบบนี้จะช่วยป้องกันการรวมตัวของอนุภาคเงินระดับนาโนด้วยการใช้ไมโครเวฟช่วยให้การสังเคราะห์เร็วขึ้นและขนาดอนุภาคที่ได้เฉลี่ยมีขนาด 12 นาโนเมตร

ขั้นตอนการสังเคราะห์จะใช้คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสโซเดียมเป็นตัวรีดิวซ์ โดยจะเกิดปฏิกิริยาภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟภายในเตาไมโครเวฟที่ใช้ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองน้ำตาลไปเป็นสีเทาดำซึ่งแสดงว่าเกิดเป็นอนุภาคเงินในระดับนาโนแล้ว โดยขนาดของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสโซเดียมและซิลเวอร์ไนเตรต ประโยชน์หลักๆของวิธีการใช้ไมโครเวฟที่เหนือกว่าวิธีการสังเคราะห์ทั่วไปคือ จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโดย การให้ความร้อนเริ่มต้นไวขึ้นและการกำเนิดของความร้อนที่ถูกจำกัดที่บริเวณที่ให้ความร้อน 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)

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

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] ได้ทำการเตรียมอนุภาคนาโนของซิลเวอร์โบรไมด์ด้วยวิธีไมโครอิมัลชันโดยการเกิดปฏิกิริยาของซิลเวอร์ไนเตรตกับซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยเตรียมจากการตกตะกอนของซิลเวอร์โบรไมด์ในน้ำของไมโครอิมัลชันที่ประกอบด้วย n-butanol (นอร์มอลบิวทานอล), ไอโซออกเทนและน้ำ เติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในไมโครอิมัลชัน เกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์โบรไมด์ในไมโครอิมัลชัน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับแคโรทีนของสารลดแรงตึงผิว โดยความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว, จำนวนโมลซิลเวอร์ไนเตรตที่เติม มีผลต่อขนาดของอนุภาค

2.2.2.5 วิธีการยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation)

การสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนโดยการยิงด้วยเลเซอร์ของสารที่เป็นโลหะในสารละลาย คุณสมบัติเฉพาะของรูปแบบอนุภาคโลหะและการยิงที่มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่กระทบกับโลหะเป้าหมาย ระยะเวลาพัลส์ของเลเซอร์ ระยะเวลาการยิงและผลกระทบจากของเหลวที่เกิดจากสารลดแรงตึงผิว ฟลูเอนซ์ของเลเซอร์เป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด โดยอนุภาคโลหะที่ออกมาจากเป้าหมายต้องใช้พลังงานต่ำที่สุด ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนที่พบโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่อฟลูเอนซ์ของเลเซอร์เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปขนาดฟลูเอนซ์ที่เล็กที่สุดจะต้องไม่ต่ำกว่าเกณฑ์การสลายของเลเซอร์ นอกจากฟลูเอนซ์ของเลเซอร์แล้วจำนวนภาพเลเซอร์ เช่น เวลาที่ใช้ในระหว่างการกลายเป็นไอเลเซอร์ มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นและสัญญาณวิทยาของอนุภาคโลหะที่ปล่อยออกมาในของเหลว ความเข้มข้นของอนุภาคโลหะภายใต้แสงเลเซอร์คาดว่าจะเพิ่มขึ้น แต่สามารถทำให้อิ่มตัวได้เนื่องจากการดูดกลืนแสงในคอลลอยด์ที่มีความเข้มข้นสูงในอนุภาคโลหะ [31] เช่น ในปี 2003 ซูลิได้ทำการเตรียมอนุภาคเงินรูปร่างกลมระดับนาโน (ขนาด 20-50 nm) โดยวิธีฉีดด้วยเลเซอร์ในน้ำด้วยพัลส์แสงเลเซอร์ชนิดพิเศษ ที่ 800 nm [32] ผลที่ได้คือประสิทธิภาพของการเกิดอนุภาคลดลง และขนาดอนุภาคคอลลอยด์มีการกระจายตัวต่ำ นอกจากนี้การคำนวณประสิทธิภาพการขจัดที่เกิดขึ้นในน้ำยังต่ำกว่าในอากาศอีกด้วย

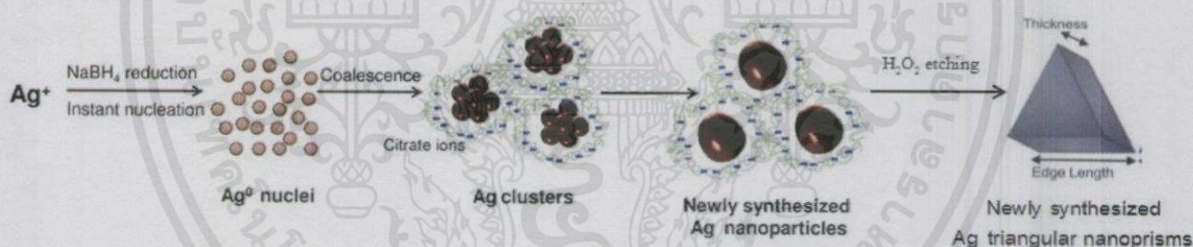
2.2.3 อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (Silver triangular nanoprisms)

อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTPs) มีรูปแบบของการดูดกลืนแสงเป็นแบบเซอร์เฟจพลาสมอนเรโซแนนซ์ 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

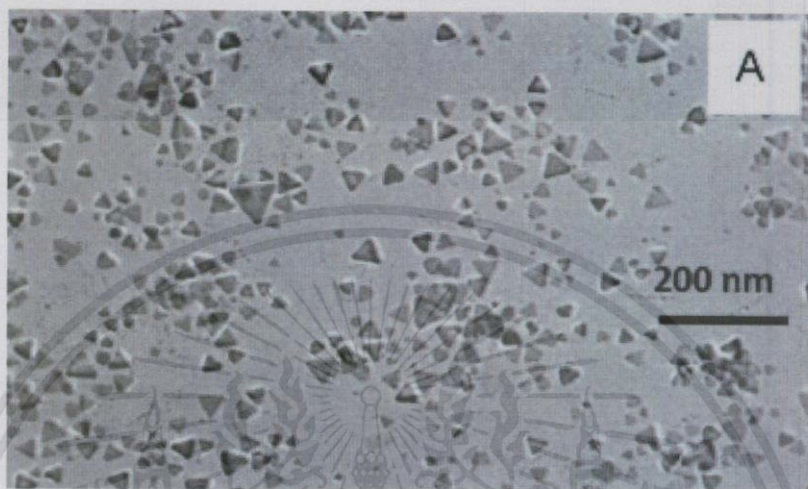
โดยทั่วไปจะมีวิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างปริซึมในระดับนาโน 2 วิธี ได้แก่ วิธีเชิงแสงทางเคมี (Photochemical method) และวิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งนิยมใช้วิธีรีดักชันทางเคมีมากกว่าเพราะเป็นวิธีที่ง่าย สามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนที่จะทำการสังเคราะห์ได้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



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

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

(H_2O_2) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกัดอนุภาค (Etchant) สำหรับอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมในระดับนาโนได้ และเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงจะได้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่มีสีน้ำเงิน [33]



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

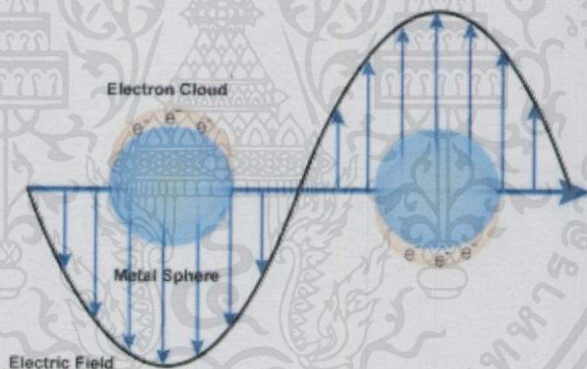
2.2.3.2 ตัวรับรู้การเปรียบเทียบสี (Colorimetric sensor) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ชุย ฮัว ยาง และคณะ [33] ได้พัฒนาวิธีการเปรียบเทียบสี (Colorimetric method) ที่ไม่ยุ่งยากและมีความแน่นอนในการตรวจวัดไอโอดีนที่ให้ความแม่นยำและความไวสูงในการทดลองจะเริ่มจากการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน ซึ่งเตรียมจากการผสมซิลเวอร์ไนเตรต, ไตรโซเดียมซิเตรต และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ เข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ เข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดก็จะได้เป็นสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่มีสีน้ำเงิน หลังจากนั้นจะนำสารละลายที่ได้ไปใช้ในการตรวจวัดไอโอดีน ผลการทดลองพบว่าไอโอดีนที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆสามารถทำให้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนเกิดการเปลี่ยนสีได้ โดยจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปจนถึงสีเหลืองจากการใช้วิธีเปรียบเทียบสีโดยการหาช่วงสี (Critical color) ในกระบวนการเปลี่ยนสีนี้พบว่าไอโอดีนที่มีความเข้มข้น $0.1 \mu M$ จะสามารถเห็นสีที่เกิดขึ้นได้ภายใน 30 นาทีโดยการสังเกต

เอกสารนี้ด้วยตาเปล่าที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เซอร์เฟจพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance)

เซอร์เฟจพลาสมอนเรโซแนนซ์ (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 แทนที่จะเป็นสีเงินขาว โลหะส่วนใหญ่ จะมีความถี่เรโซแนนต์ อยู่ในช่วงใกล้รังสียูวีซึ่งอยู่นอกสเปกตรัม ของช่วงแสงที่มองเห็น [37] เมื่อวัสดุมีขนาดเกรนของวัสดุอยู่ในระดับนาโนเมตรแล้ว 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) สำหรับการสั่นของอิเล็กตรอน สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก เรียกว่า ไดโพล พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Dipole plasmon resonance) ซึ่ง

เอกสารนี้จะแตกต่างจาก พลาสมอน เอกซ์ไซเตชัน (Plasmon excitation) ของโลหะแบบก้อน (Bulk metal) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ตัวรับรู้เชิงแสงของอนุภาคนาโน (Nanoparticle as optical sensor)

เซนเซอร์เชิงแสง (Optical sensors) เป็นหลักการหนึ่งของนาโนเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างกว้างขวางและประยุกต์ใช้งานในวงการอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการควบคุมคุณภาพ, การติดตามสิ่งแวดล้อมหรือความปลอดภัย เช่น สารเคมีที่สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตเป็นอาวุธในการทำสงครามได้หรือใช้ติดตามระบบความปลอดภัยในครัวเรือน เซนเซอร์เชิงแสงเป็นหลักการฟลูออเรสเซนซ์ที่ถูกจับอยู่ในอนุภาคนาโนของพอลิอะคริลเอไมด์ และใช้สำหรับการตรวจวัดพีเอช ฟลูออเรสเซนซีโม่ เซนเซอร์ประกอบด้วยโมเลกุลของซีสเตรทอย่างน้อยหนึ่งหน่วยและโฟโต้แอคทีฟคอมโพเนนท์ ลูมินเอสเซนส์ฟิโนโนนเป็นกระบวนการที่ฟลูออโรฟอร์ [39] เกิดการดูดกลืนแสงของความยาวคลื่นที่แน่นอน ซึ่งตามด้วยการคายแสงของควอนตัมของแสงที่มีพลังงานต่างกันระหว่างสถานะพื้นและสถานะกระตุ้น ในช่วงไม่กี่ปีมานี้คุณสมบัติของอนุภาคเงินในระดับนาโนได้ถูกนำมาศึกษาอย่างมากในเรื่องของความพิเศษเชิงแสง, ตัวรับรู้และคุณสมบัติในการต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ ขณะที่เทคนิคการใช้แสงในการตรวจวัดโมเลกุลของสิ่งมีชีวิตที่มีความไวสูง (Surface enhance raman scattering, SERS) มีความน่าจะเป็นไปได้มากสำหรับการประยุกต์ใช้ของอนุภาคเงินในระดับนาโน ตัวรับรู้วิธีอื่นที่มีการพัฒนาด้วยหลักการทั่วไปโดยการกระจายของสเปกตรัมของสารละลายอนุภาคเงิน แม้ว่าสารละลายอนุภาคนาโนมีขีดจำกัดในการตรวจวัดต่ำมากแต่ยังสามารถสร้างตัวรับรู้โดยใช้อนุภาคนาโนบนแผ่นฟิล์มบางได้ คุณสมบัติของตัวรับรู้อนุภาคนาโนเมื่อทำการประกอบเป็นแผ่นฟิล์มบางมีการประเมินผลสำหรับทองเท่านั้นและประเภทตัวทำละลาย, สารเคมีค่อนข้างจำกัดมาก สำหรับปฏิกิริยาระหว่างตัวทำละลายและโพสทีอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทาบถมแบบชั้นต่อชั้นยังไม่ได้ทำการตรวจสอบฟิล์มบางนาโนโลหะของเงินถูกรายงานโดยรับเบอร์ เอท ออล แต่มีเป้าหมายการใช้งานสำหรับการออกแบบพื้นผิวที่ต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย ไม่มีการรายงานค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวรับรู้อนุภาคนาโนที่ถูกฝังลงไปในเรื่องของพอลิเมอร์แต่ระบบนี้การพองของเนื้อพอลิเมอร์ไม่มีการเชื่อมโยงกันของอนุภาคนาโนและการเปลี่ยนแปลงสี [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 เทอร์โมมิเตอร์ บาโรมิเตอร์ โดยอาศัยสมบัติความเสถียรการไม่จำกรณืไหลได้ ความถ่วงจำเพาะสูง และสมบัติการนำไฟฟ้า [41] อีกทั้งตัวกรองอากาศของระบบแอร์,

แบคทีเรีย, 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 เมื่อได้รับไอของปรอททางการหายใจเป็นระยะเวลานานจะทำให้เกิดอาการคัน ประสาทกล้ามเนื้อ และการตอบสนองของระบบประสาทเปลี่ยนแปลง หากได้รับในปริมาณที่มากจะมีผลกระทบต่อระบบการหายใจ และอาจถึงตายได้

สารประกอบอื่นๆของปรอท หากรับประทานเข้าไปจะทำลายกระเพาะและลำไส้ ระบบประสาท และการทำงานของไต [42]

2.5.4 โรคมินามาตะ

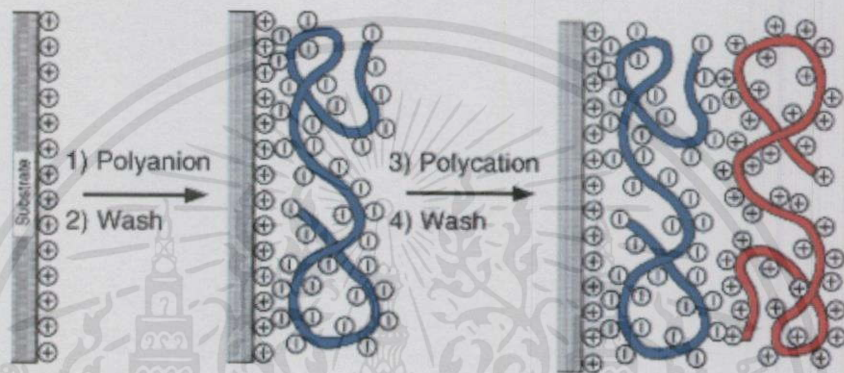
ในปี ค.ศ. 1955 เกิดโรคมินามาตะ บริเวณอ่าวมินามาตะ ประเทศญี่ปุ่น สาเหตุเกิดจากการปล่อยน้ำเสียของโรงงานพลาสติกที่มีสารปรอท ปนเปื้อนลงสู่อ่าวมินามาตะ ทำให้สารดังกล่าวถูกสะสมอยู่ในตัวปลา เมื่อชาวบ้านนำมาบริโภค ปรอทจากสัตว์น้ำ จึงสะสมในร่างกายของชาวบ้านจนถึงปริมาณที่เป็นอันตราย โดยตรวจพบมากบริเวณเนื้อเยื่อไต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

2.5.5 ค่ามาตรฐานความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตามประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะอันตรายที่
ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ (สารเคมี) กำหนดให้ปริมาณความเข้มข้นสูงสุด ในสิ่งแวดล้อมที่ยอมให้มีได้ไม่ว่าระยะเวลา
ใดของการทำงานปกติ ต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร [44]

2.6 เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

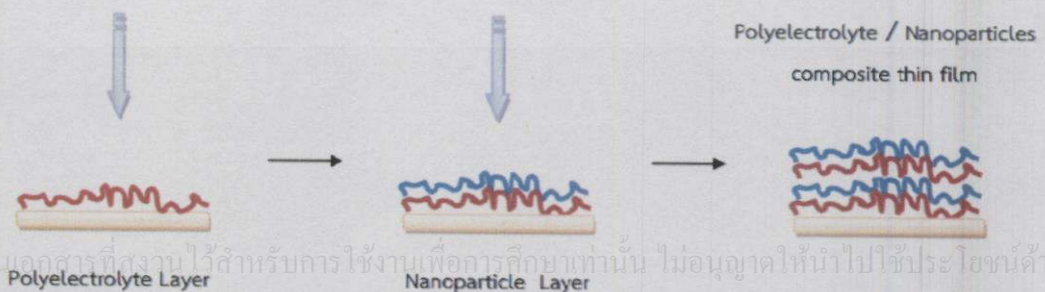
เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) เป็นการสร้างฟิล์มบางโดยวิธีการประกอบแบบชั้นต่อชั้น ฟิล์มถูกสร้างขึ้นโดยการทับถมของวัสดุที่มีประจุต่างกันสลับกัน โดยติเซอร์ นำเสนอวิธีที่ง่าย ๆ โดยการสลับประจุที่ตรงข้ามกันคือ ประจุบวก และประจุลบ และทำการล้างในระหว่างการสลับประจุ ดังแสดงในรูปที่ 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 โพรตีน พอลิเมอร์นำไฟฟ้า และอนุภาคนาโน มีการประกอบกันแบบชั้นต่อชั้นของ อนุภาคนาโน โดย Kotov et al. เป็นผลงานความสำเร็จแรกของการประกอบกันของ PDADMAC และ อนุภาคแคดเมียมในระดับนาโน (CdS nanoparticles) เข้าสู่ฟิล์มบาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่.2.9 การประกอบกันแบบชั้นต่อชั้นของอนุภาคนาโนโดยการเคลือบตามลำดับ

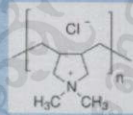
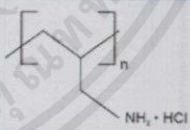
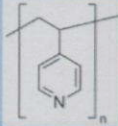
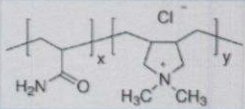
จากรูปที่ 2.9 แสดงการสร้างฟิล์มบางของอนุภาคโลหะในระดับนาโนโดยเทคนิคการประกอบแบบชั้นต่อชั้น โดยการทับถมของชั้นโพลีอิเล็กโทรไลต์และตามด้วยอนุภาคโลหะในระดับนาโนที่เตรียมในรูปของสารละลาย อนุภาคโลหะในระดับนาโนที่ทับถมอยู่บนพื้นผิวสามารถเข้าสู่ฟิล์มบางหลายชั้นโดยการทับถมตามลำดับ ด้วยประจุที่ตรงกันข้ามของโพลีอิเล็กโทรไลต์

2.6.1 โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte)

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

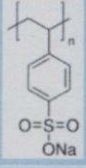
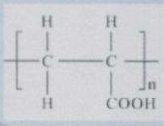
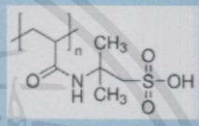
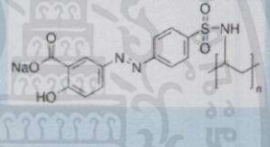
การเกิด PE-PE (Polyelectrolyte-polyelectrolyte) เป็นการเกิดปฏิกิริยาโดยการผสมพอลิเมอร์ที่มีประจุตรงกันข้าม และละลายในตัวทำละลายที่เป็นน้ำเข้าด้วยกัน การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน จะเกิดขึ้นด้วยตนเอง (Spontaneous formation) ขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วงไมโครจนถึงนาโนเมตร [49]

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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุลบ (Polyanion) [50]

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

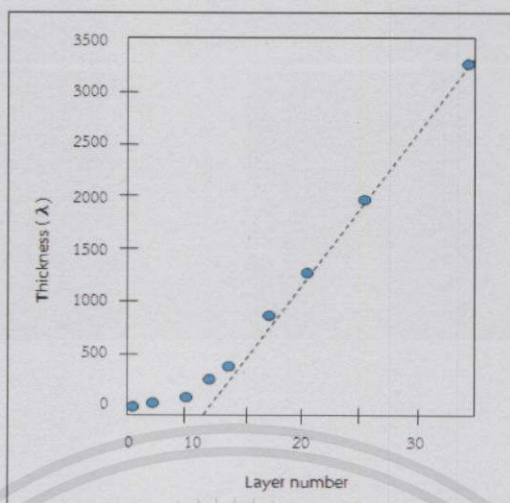
2.7 ตัวแปรที่ทำการควบคุมโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Parameter to control Polyelectrolyte)

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]

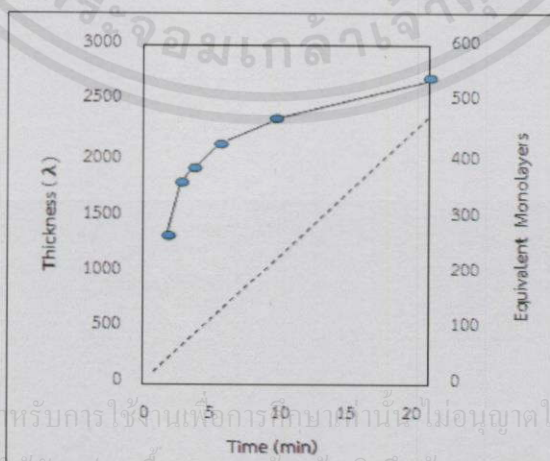
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและจำนวนชั้นของ PSS/PDADMAC

2.7.2 เวลาในการจุ่ม (Dipping Time)

เวลาในการจุ่ม (Dipping Time) เป็นการควบคุมเวลาในการจุ่มเพราะว่า การดูดซับของ โพลีอิเล็กโทรไลต์ฟิล์มบางสัมผัสกับน้ำจะถูกควบคุมโดยเวลาของการแพร่กระจายซึ่งมีบทบาทที่สำคัญในการสร้างฟิล์มหลายชั้น เมื่อได้พื้นผิวที่มีประจุลบแล้วนำไปจุ่มในโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นประจุบวกจะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต ที่เพียงพอให้เกิดคอมเพล็กซ์ระหว่างพื้นผิวโพลีอิเล็กโทรไลต์และประจุของโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ตรงกันข้ามในสารละลาย ในระหว่างการทับถมที่เกิดขึ้น ประจุบนพื้นผิวจะมีประจุลบที่น้อยและประจุบวกมากเปรียบเสมือนการดูดซับของโพลีแคทไอออนิก โพลีอิเล็กโทรไลต์ที่บนพื้นผิว เมื่อพื้นผิวถูกเคลือบเสร็จสิ้นด้วยโพลีแคทไอออนิก โพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ดูดซับของโพลีอิเล็กโทรไลต์ใหม่จะถูกหยุดเพราะว่า เกิดไฟฟ้าสถิตขึ้น กลไกนี้อธิบายกระบวนการถูกจำกัดด้วยมันเองซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการประกอบฟิล์มหลายชั้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์ [40]



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาจุ่มของ PSS/PDADMAC

จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการจุ่มของโพลีเอทิลีนทรีโพลีที่มีประจุตรงข้ามกัน PSS/PDADMAC เพิ่มมากขึ้น ความหนาของฟิล์มบางก็จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆเกิดจากการทับถมกันที่เพิ่มขึ้นของโพลีเอทิลีนทรีโพลีที่มีประจุตรงข้ามกันด้วยปฏิกิริยาการเกิดไฟฟ้าสถิต

2.7.3 ค่าความแรงไอออน (Ionic strength)

ตัวแปรสุดท้ายที่ทำการควบคุมความหนาของการประกอบฟิล์มหลายชั้นโดยการทับถมแบบชั้นต่อชั้นของโพลีเอทิลีนทรีโพลีหลายชั้นคือ ค่าความแรงของไอออน (Ionic strength) การเพิ่มความแรงไอออน ส่งผลต่อการเกิด PE-PE กล่าวคือเมื่อความแรงของไอออนเพิ่มขึ้น การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนชนิดไม่ละลายน้ำจะมีมากขึ้น จากการศึกษาของ เฟรดเฮียม และคริสเตนเซน พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด PE-PE ระหว่างลิกโนซัลโฟเนต-โคโคเดแซน ได้แก่ ความเป็นกรดต่าง, สัดส่วนของการผสม, น้ำหนักโมเลกุลของลิกโนซัลโฟเนต และอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา สำหรับการเปลี่ยนความแรงไอออนิกโดยการเติมเกลือเข้าไบนั้นสามารถปรับอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตในสารละลายโพลีเอทิลีนทรีโพลีได้ โดยที่ อันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตจะอ่อนลงเมื่อมีการเติมเกลืออนินทรีย์ลงไปในสารละลาย เช่น การเติม อะคริลามิด (Acrylamide) ซึ่งมีประจุลบลงไป ใน โซเดียมโพลีสไตรีนซัลโฟเนต หรือ โซเดียมโพลีเมทาคริเลต ซึ่งมีประจุลบ และเติมเกลือลงไป ในปริมาณเล็กน้อย 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

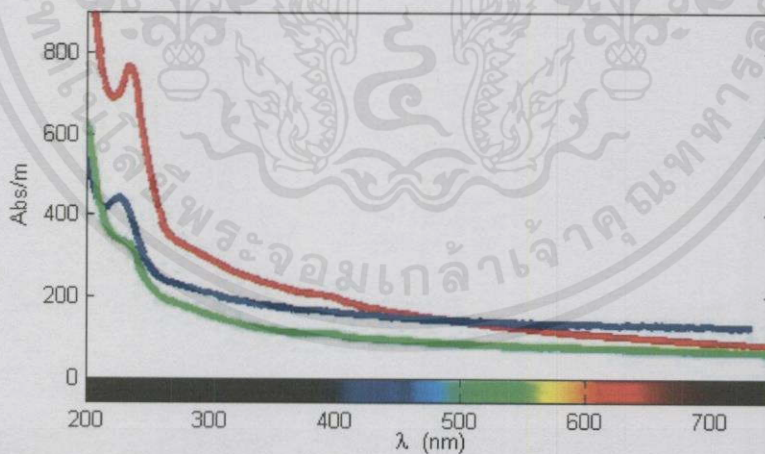
โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ทั้งที่มีสีและไม่มีสีที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสง

แล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของเบียร์ แลมเบิร์ต ดังสมการ (2.1)

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

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

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



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

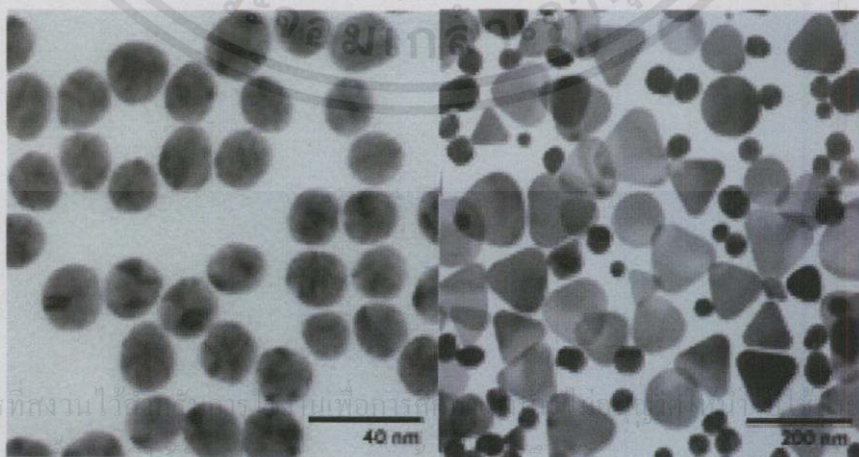
จากรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ของสารนี้ ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า "ไม่ว่ากรณีสเปกตรัม (Spectrum)" ให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ในที่นี้จะใช้เพื่อแสดงให้เห็นถึงแถบการดูดกลืนแสง (Plasmon band) ของอนุภาคนาโนรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและแผ่นฟิล์มอนุภาคนาโนรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมบางนาโน

2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Transmission electron microscopy)

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

จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอร์บ (Projector lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้ ดังนั้นแล้วการศึกษารูปร่างของอนุภาคนาโนรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนจึงใช้ TEM ในการตรวจสอบ



รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายอนุภาคนาโนในระดับนาโนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (TEM) [52]

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 ซึ่งอนุภาคแขวนลอยจะเสถียรเมื่อศักย์ซีต้ามียค่ามากกว่า +30 มิลลิโวลต์ หรือน้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ สภาวะที่ค่าพีเอชต่ำ (กรด) จะให้ค่าศักย์ซีต้าสูงกว่าสภาวะที่ค่าพีเอชสูง (เบส) ถ้าศักย์ซีต้ามียค่าอยู่ในช่วง -30 ถึง 30 มิลลิโวลต์ หรือประมาณศูนย์ สารแขวนลอยจะไม่เสถียร จะมีการเกาะตัวกันเป็นก้อนและตกตะกอน เรียกจุดที่ศักย์ซีต้าเท่ากับศูนย์ว่า “Isoelectric point” [53]

2.8.4 ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy)

ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy) หรือ FTIR เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่ยิยมใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบและศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร การทำคุณภาพวิเคราะห์ใช้สำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น หามุมฟังก์ชันต่างๆ 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 การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดง

เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum ในที่นี้ FTIR จะถูกใช้ในการพิสูจน์โครงสร้างของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน [54-55]

2.8.5 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy)

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



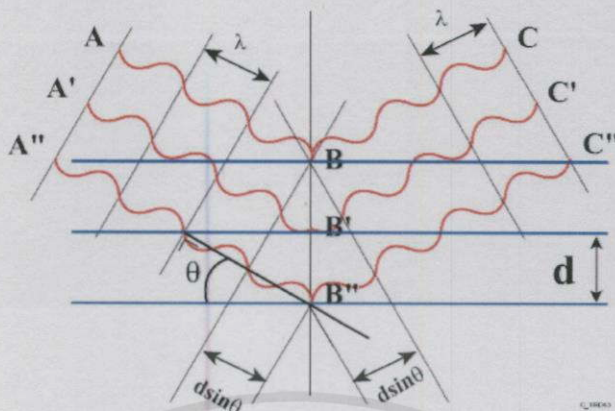
รูปที่ 2.14 เครื่อง Atomic force microscope [56]

โดยที่กล้อง AFM สามารถนำมาใช้ในการถ่ายภาพขยายในระดับนาโนเมตรของวัตถุที่นำไฟฟ้าและวัตถุที่ไม่นำไฟฟ้าลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ แผ่นฟิล์มบาง คอลลอยด์ อนุภาคนาโนในเครื่องสำอางค์ เซลล์แบคทีเรีย ชิ้นงานที่เป็นผงระดับนาโน โดยมีขนาดชิ้นงานไม่เกิน 2×2 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 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 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 λ 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 จะสามารถหาลำดับของสารประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย และยังสามารถทำการวิเคราะห์ องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย โดยในที่นี้จะใช้ XRD ในการตรวจสอบแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน [58-59]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้บนแพลตฟอร์มเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.7 ทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle)

มุมสัมผัส (Contact angle) คือมุมระหว่างหยดของของเหลววัดเทียบกับผิววัสดุ ณ จุดที่ผิวทั้งสองเกาะติดกัน และนักวิทยาศาสตร์ใช้มุมนี้เป็นเกณฑ์แบ่งการเปียกของเหลวบนของแข็งว่าเปียกได้ดีหรือไม่ดี เกณฑ์มีดังนี้

1. มุมสัมผัสเท่ากับ 0 องศา คือการเปียกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ เมื่อของเหลวถูกหยดลงบนผิว ของเหลวจะกระจายไปตามผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบางๆ คลุมพื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้างที่สุด
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 ดังนั้นของเหลวจะรวมกันเป็นหยดทรงกลม บริเวณที่ของเหลวแตะกับผิวของแข็งจะอยู่ที่ฐานของทรงกลม ซึ่งเล็กมากจนแทบจะเป็นจุด เมื่อเป็นแบบนี้ ของเหลวสามารถลื่นไปมาบนผิวได้อย่างอิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นเรียบ [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]

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)

ชีว-ห้ว หยาง และคณะ [33] ศึกษาการตรวจวัดไอโอดีนด้วยวิธีเปรียบเทียบสีที่มีความแม่นยำและความไวสูงโดยใช้ซิลเวอร์นาโนเพลทรูปร่างสามเหลี่ยมเพื่อหาช่วงสีในกระบวนการเปลี่ยนสีด้วยการใช้ซีเตรทเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ทำการสังเคราะห์ซิลเวอร์นาโนเพลทรูปร่างสามเหลี่ยมด้วยการใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.1 mM, ไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 30 mM, และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 %wt ผสมกันโดยใช้สเตอริออร์ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้น 100 mM 250 μ L จะได้คอลลอยด์ของนาโนเพลทที่มีสีน้ำเงินและจะเกิดการรวมตัวของซิลเวอร์นาโนเพลทไปเป็นอนุภาคนาโน จากนั้นนำไปใช้ในการตรวจวัดไอโอดีน

ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยการใช่วิธีวิลเลียม แอบซอร์พชัน สเปกโทรสโกปี และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน จากผลการทดลองพบว่า ไอโอดีนที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆ สามารถทำให้สารละลายซิลเวอร์นาโนเพลทรูปร่างสามเหลี่ยมเกิดการเปลี่ยนสีได้ โดยจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปจนถึงสีเหลือง จากการใช่วิธีเปรียบเทียบสีโดยการหาคริติคอลคัลเลอร์ในกระบวนการเปลี่ยนสีนี้ พบว่าไอโอดีนที่มีความเข้มข้น 0.1 μ 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 และใช้โพลีเอทิลีนไกล์คอลเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ จากนั้นเตรียมแผ่นฟิล์มบางของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น ใช้โพลีเอทิลีนไกล์

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 สูดท้ายตัวรับรู้เชิงแสงโดยการประกอบฟิล์มบางของอนุภาคนาโน 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 และศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับ E.coli โดยเตรียมอนุภาคนาโนรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน ด้วยวิธีการเกิดรีดักชันของซิลเวอร์ไนเตรตที่อุณหภูมิห้อง อันเป็นผลมาจากโพลีไวนิลไพโรลิโดน, โซเดียมซิเตรต, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโซเดียมโบโรไฮไดรด์ เตรียมอนุภาคนาโนรูปร่างกลมในระดับนาโนได้จากซิลเวอร์ไนเตรตเป็นโลหะตั้งต้น, โซเดียมซิเตรตรวมทั้งโซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์

ทำการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างของอนุภาคนาโนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน , ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปีและการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ผลที่ได้คืออนุภาคนาโนรูปร่างกลมในระดับนาโนมีขนาดเฉลี่ยแตกต่างกัน คือ 4, 21, และ 40 นาโนเมตร อนุภาคเงินรูปร่างปริซึมในระดับนาโนมีรูปแบบระนาบผืนเป็น {111} มีขนาดอยู่ในช่วง 25 – 400 นาโนเมตร เมื่อนำไปทดสอบการต่อต้านเชื้อแบคทีเรานั้น อนุภาคนาโนรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่มีระนาบผืนเป็น {111} มีคุณสมบัติต่อต้านเชื้อแบคทีเรียได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนที่มีรูปร่างกลม และอนุภาคนาโนรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่มีขอบคมและจุดยอดที่คมนี้ มีผลในการต่อต้านแบคทีเรียได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนรูปร่างอื่นๆ ดังนั้น การสังเคราะห์

และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างเงินระดับนาโนเกี่ยวกับสัณฐานใหม่นี้ จึงได้รับความสนใจสำหรับการสร้างเป็นวัสดุต่อต้านแบคทีเรีย

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)

โต ฮี และคณะ [64] ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของธาตุเงินและผลของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคเงินในระดับนาโน, ไอออนของเงินและปฏิกิริยาของออกซิเจน อนุภาคเงินในระดับนาโนเริ่มต้นจากการเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นซิลเวอร์ไอออนที่มีประจุบวกและเกิดออกซิเจนที่มีประจุลบ จากนั้นจะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นอนุภาคเงินในระดับนาโนผ่านกลไกของอิเล็กตรอนที่มีประจุและไม่มีประจุ

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

2.9.5 ตัวรับรู้เชิงสีโดยใช้อนุภาคเงินในระดับนาโนสำหรับการตรวจวัดปรอทที่ง่ายและ

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

บุริม จารุจรัส และคณะ [65] ศึกษาตัวรับรู้เชิงสีโดยใช้อนุภาคเงินในระดับนาโนสำหรับการตรวจวัดปรอทที่ง่ายและรวดเร็ว โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีขนาด 8.3 ± 1.4 นาโนเมตร ด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี ใช้ซิลเวอร์ไนเตรต, โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ และใช้ไตรโซเดียมซีเตรตเป็นสารรักษาเสถียรภาพ เมื่อได้อนุภาคเงินในระดับนาโนแล้วจึงนำไปตรวจวัดกับสารละลายปรอทที่มีความเข้มข้น 50 ppm โดยผสมลงในสารละลายอนุภาคเงินในระดับนาโน 1.5 mL และน้ำปราศจากไอออน 5 mL

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

2.9.6 ตัวรับรู้เชิงสีสำหรับตรวจวัดไอออนของปรอทโดยใช้การสังเคราะห์สีเขียวและอนุภาคเงินในระดับนาโน (Highly selective Hg²⁺ colorimetric sensor using green synthesized and unmodified silver nanoparticles)

คาลิล ฟาฮาดิ 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⁺, K⁺, Mg⁺, Ca⁺, Hg⁺ เป็นต้น

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

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)

กวาง-ลี หวัง และคณะ [67] ศึกษาตัวรับรู้เชิงสีที่มีการทำงานเชิงคู่สำหรับไอออนปรอทและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้คุณสมบัติการรีดักชันตัวเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคเงินในระดับนาโน วิธีการนี้เป็นการหาขนาดของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีการทำงานเชิงคู่สำหรับไอออนปรอทและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีซีเตรตเป็นตัวรักษาสภาพ โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์, ไตรโซเดียมซีเตรตและซิลเวอร์ไนเตรต โซเดียมโบโรไฮไดรด์จะรีดิวซ์ Ag^+ ไปเป็น Ag^0 เกิดเป็นอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีสีเหลืองซีด จากนั้นตรวจวัดการเปรียบเทียบสีของไอออนปรอทและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผสมกับอนุภาคเงินในระดับนาโนและไอออนปรอท

ผลที่ได้คือ ไอออนปรอทที่มีความเข้มข้น 2.0 nM จะเกิดการเปลี่ยนสีของสารละลายภายในไม่กี่วินาที โดยไอออนของโลหะอื่นจะไม่เกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้น 10 μ M ตัวรับรู้เชิงสีที่มีการทำงานเชิงคู่นี้ไม่ประสบผลสำเร็จในการใช้ตรวจหาไอออนปรอทเสมอไป แต่มักจะใช้เป็นตัวรับรู้สำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำสุดที่ 50 nM โดยมีคุณสมบัติไวและมีความเฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนปรอทและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 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 ซึ่งไอออนของเงินจะถูก

รีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ไปเป็นธาตุเงิน เกิดคอลลอยด์ของอนุภาคเงินในระดับนาโน

การศึกษาค้นคว้าลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนโดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงยูวีและภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ผลที่ได้คือ สีของสารละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ

สารละลายซิลเวอร์ในเตรตที่เติม เมื่อความเข้มข้นของซิลเวอร์ในเตรตเพิ่มขึ้นสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นสีน้ำตาล โดยที่การดูดกลืนแสงอยู่ที่ประมาณ 400 nm โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์จะป้องกันการรวมตัวของอนุภาคเงินในระดับนาโน เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้นอนุภาคเกิดการกระจายตัวได้ดี และเมื่อใช้โซเดียมโอดีซิลลัลเฟตในปริมาณที่เหมาะสม โซเดียมโอดีซิลลัลเฟตจะถูกดูดกลืนบนพื้นผิวของอนุภาคเงินในระดับนาโนและป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโนซึ่งเป็นผลมาจากสเตอริกเอฟเฟกซ์ นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นโซเดียมโอดีซิลลัลเฟตเพิ่มขึ้น 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 ในการรีดิวซ์ซิลเวอร์ในเตรตสำหรับการเตรียมโครงสร้างเงินระดับนาโน สำหรับเทคนิคการกัด ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำการกัดสารละลายโลหะเงิน เพื่อควบคุมรูปร่างของอนุภาคเงินระดับนาโน และขั้นตอนการสร้างแกนกลางและเปลือกหุ้มของโครงสร้างนาโน โดยการสร้างแกนกลางและเปลือกหุ้มของโครงสร้างนาโนของทองที่เงิน

ผลที่ได้คือ กลไกของวิธีรีดิวซ์ช้ามันได้ผลึกนาโนของเงินที่มีเหลี่ยมแตกต่างกันตามตัวรีดิวซ์ที่ต่างกัน 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เปรมมาล ราเมศ कुमार และคณะ [68] ได้พัฒนาอนุภาคเงินในระดับนาโนเพื่อเป็นตัวรับรู้สำหรับการตรวจวัดไอออนปรอท, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไนโตรเบนซีน โดยการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีซิล เจลของซิลิเกตเป็นสารรักษาเสถียรภาพ ผ่านการสังเคราะห์โดยการผสมไฮดรอกซิล, แอมโมเนียมคลอไรด์และกรดไนตริกซึ่งเป็นสารละลายที่ทำกรรี้ดักชัน

ทำการศึกษาคูณลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินในระดับนาโน โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสง, การวิเคราะห์ด้วย XRD, SEM, TEM EDX และ SAED จากสเปกตรัมและวิธีการเปรียบเทียบสีทำให้เห็นประสิทธิภาพของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่ใช้ตรวจวัดไอออนปรอท และขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดคือ 5 μM อนุภาคเงินในระดับนาโนมีความจำเพาะเจาะจงเฉพาะไอออนปรอทในสิ่งแวดล้อมที่มีโลหะหนักตัวอื่นปนอยู่ด้วย สำหรับตัวรับรู้เอนไซม์เชิงไฟฟ้าเคมีในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เตรียมโดยทำการปรับเปลี่ยนขั้วแก้วไฟฟ้าคาร์บอนด้วยอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีซิลเจลของซิลิเกตเป็นสารรักษาเสถียรภาพ ใช้เทคนิคเส้นตรง สวิฟท์ โวลแทมเมทรี (Sweep voltammetry, LSV) และดิฟเฟอเรนทอล พัลส์ โวลแทมเมทรี (Differential pulse voltammetry, DPV) มีขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ 0.5 และ 0.1 μM และตัวรับรู้ทางเคมีไฟฟ้าของไนโตรเบนซีนโดยใช้การปรับปรุงขั้วเช่นเดียวกัน ระบุขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดโดยใช้ Square wave voltammetry (SWV) ได้ 1 μM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้ ขั้นตอนหนึ่ง คือ การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์และใช้ไตรโซเดียมซิเตรตเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ขั้นตอนที่สอง คือ การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปร่างแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) อันได้แก่ การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนขั้นตอนที่สาม คือ การนำค่าสภาวะต่างๆที่ได้จากการศึกษาข้างต้นมาใช้ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาด นาโน และในขั้นตอนสุดท้าย คือ การนำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท

3.1 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method)

3.1.1 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรต

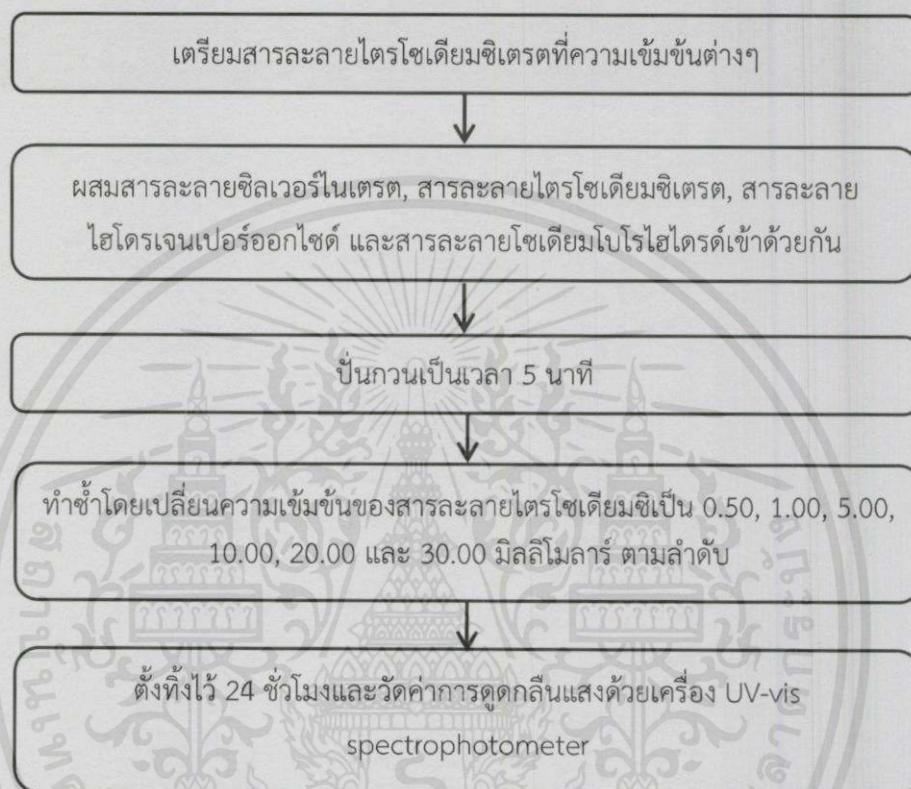
3.1.1.1 สารเคมี

สารเคมี	ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต
ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate)	AgNO ₃	Merck KGaA
โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride)	NaBH ₄	Fisher Scientific
โซเดียมซิเตรตไตรเบสิกไดไฮเดรต (Sodium citrate tribasic dihydrate)	C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇ · 2H ₂ O	Sigma - Aldrich
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)	H ₂ O ₂	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

สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตเป็น 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 ซึ่งมีแผนผังการทดลองดัง แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่ความเข้มข้นต่างๆ

การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์
ศึกษาอิทธิพลจากความเข้มข้นของไตรโซเดียมซิเตรต (สีของสารละลาย)	UV-visible spectrophotometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

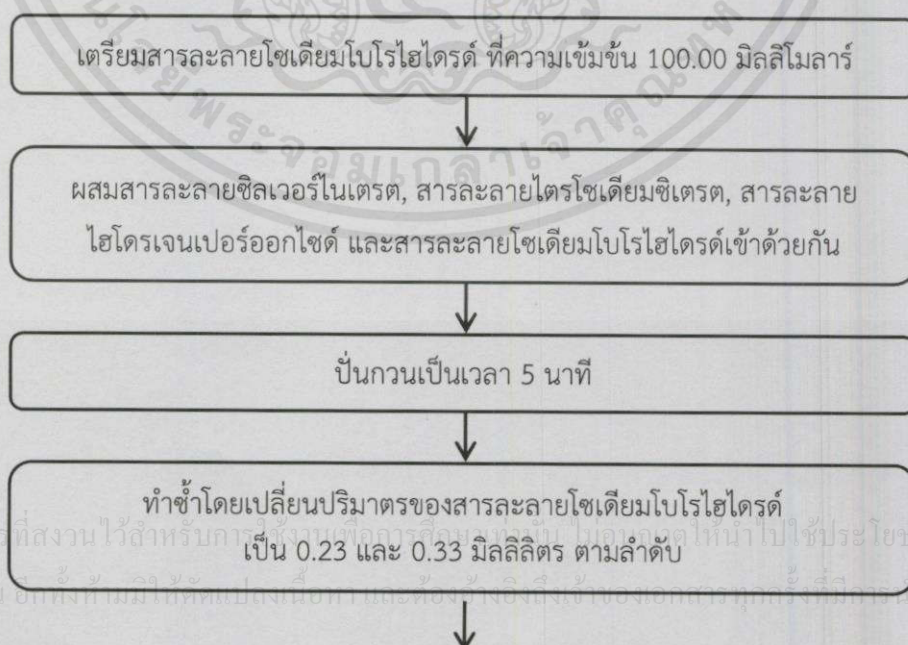
3.1.2 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์

3.1.2.1 สารเคมี

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

3.1.2.2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์

เตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์ แล้วทำการผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตที่ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร, สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่ความเข้มข้น 20.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 3.00 มิลลิลิตร, สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30.00 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 0.12 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีที่ใช้เพื่อการศึกษาวิจัยเฉพาะทางเท่านั้น

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)

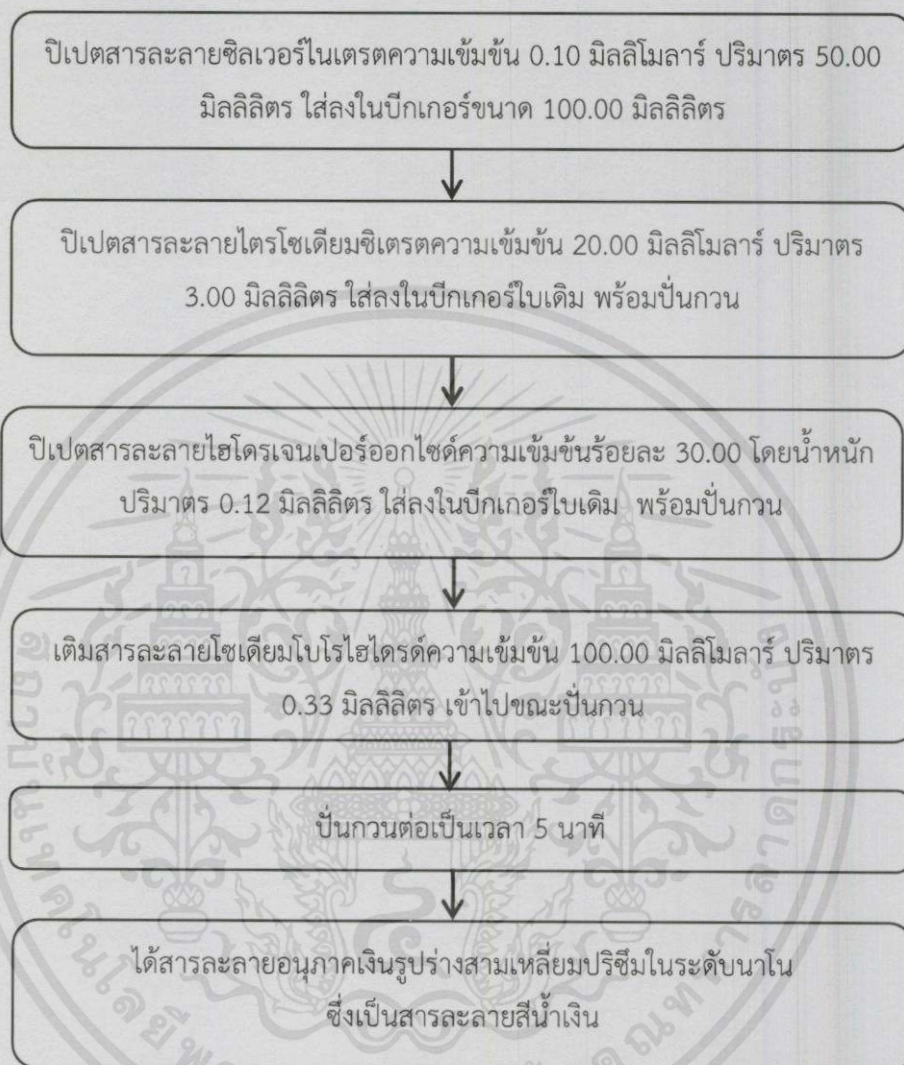
3.1.3.1 สารเคมี

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

3.1.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ปีเปตสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100.00 มิลลิลิตร จากนั้นปีเปตสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้น 20.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 3.00 มิลลิลิตร และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30.00 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 0.12 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ใบเดิม พร้อมปั่นกวน หลังจากนั้น เติมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.33

มิลลิลิตร เข้าไปขณะปั่นกวน และปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที จนได้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนซึ่งเป็นสารละลายสีน้ำเงิน ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนโดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

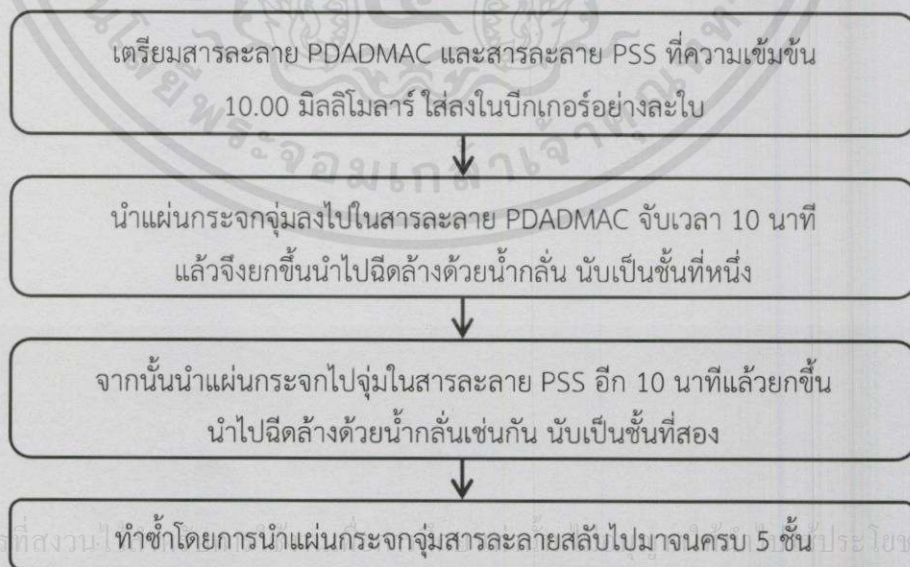
3.2.1 การเตรียมพื้นผิวแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Primer)

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 นาทีแล้วจึงยกขึ้นนำไปฉีดล้างด้วยน้ำกลั่น นับเป็นชั้นที่หนึ่ง จากนั้นนำแผ่นกระจกไปจุ่มในสารละลาย PSS อีก 10 นาทีแล้วยกขึ้น นำไปฉีดล้างด้วยน้ำกลั่นเช่นกัน นับเป็นชั้นที่สอง ทำซ้ำโดยการนำแผ่นกระจกจุ่มสารละลายสลับไปมาจนครบ 5 ชั้น และทิ้งไว้ให้แห้ง ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ทำซ้ำโดยการนำแผ่นกระจกจุ่มสารละลายสลับไปมาจนครบ 5 ชั้น ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม รูปที่ 3.4 แผนผังการเตรียมพื้นผิวแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Primer) โดยการใช้

เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

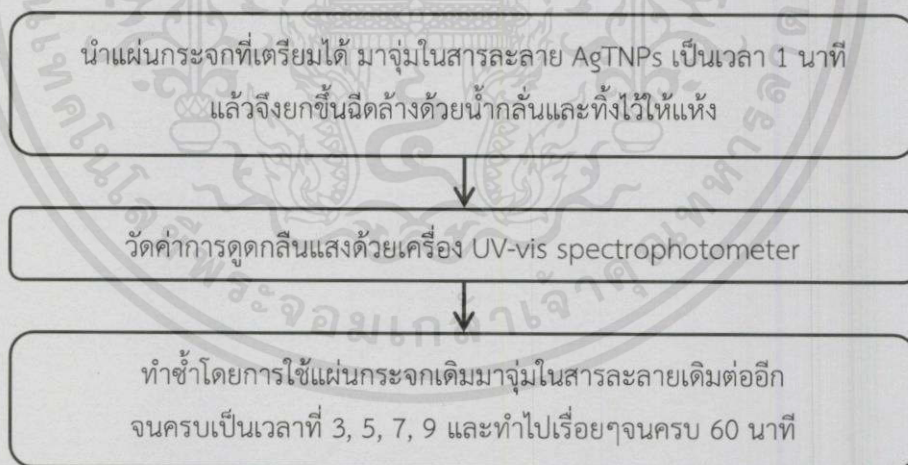
3.2.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

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 แล้วจึงยกขึ้นผึ่งด้วยน้ำกลั่นและทิ้งไว้ให้แห้ง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ทำซ้ำโดยการใช้แผ่นกระจกเดิมมาจุ่มในสารละลายเดิมต่ออีกจนครบเป็นเวลา 3, 5, 7, 9 และทำไปเรื่อยๆจนครบ 60 นาที ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังแสดงรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนผังการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์
ศึกษาสีของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน ณ 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	-
สารละลายโพลีไดอัลลิทไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (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

นำแผ่นกระจกที่เตรียมไว้ จุ่มในสารละลาย AgTNPs เป็นเวลา 20 นาที
แล้วจึงยกขึ้นฉีดล้างด้วยน้ำกลั่นและทิ้งไว้ให้แห้ง นับเป็นชั้นที่หนึ่ง

จากนั้นนำแผ่นกระจกไปจุ่มในสารละลาย PDADMAC อีก 5 นาที

แล้วจึงยกขึ้นนำไปฉีดล้างด้วยน้ำกลั่นเช่นกันและทิ้งไว้ให้แห้ง นับเป็นชั้นที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการวิจัย การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ออกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการจุ่มสลัไปมาจนได้ตามจำนวนชั้นที่ต้องการ โดยจะทำการ
เตรียมแผ่นฟิล์มบางที่จำนวน 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

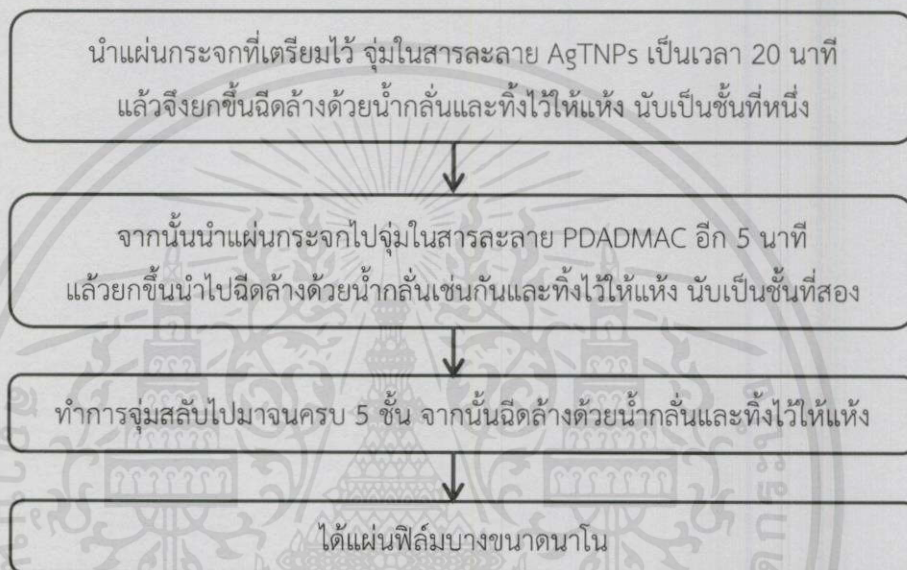
3.3.1 สารเคมี

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

นำแผ่นกระจกที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 3.2.1.2 ลงจุ่มในสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ในขั้นตอนที่ 3.1.3.2 เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงยกขึ้นฉีดล้างด้วยน้ำกลั่นและทิ้งไว้ให้แห้ง นับเป็นขั้นที่หนึ่ง จากนั้นนำไปจุ่มต่อในสารละลาย PDADMAC ต่ออีกเป็นเวลา 5 นาที ฉีดล้างด้วยน้ำกลั่นเช่นกันและทิ้งไว้ให้แห้ง นับเป็นขั้นที่สอง และทำการจุ่มสลับไปมาจนครบ 5 ชั้น ฉีดล้างด้วยน้ำกลั่นและทิ้งไว้ให้แห้ง ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังแสดง ในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนผังการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

3.4 การนำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท

3.4.1 การตรวจวัดปรอทโดยการใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

3.4.1.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท ($HgCl_2$)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารละลาย AgTNP's เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์
ศึกษาสีของสารละลาย AgTNP's เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท	UV-visible spectrophotometry
ศึกษาสภาพความเป็นประจุของสารละลาย AgTNP's เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท	Zeta potential
ศึกษาลักษณะรูปร่างของสารละลาย AgTNP's 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารเมื่อ SD นั้นไว้คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank ซึ่งเป็นการคำนวณออกมาจากค่าความเข้มข้นที่ได้จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ซึ่งมีการนำไปใช้

3.4.1.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของปรอทในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่มทำได้โดยเริ่มจากการนำน้ำประปาและน้ำดื่มมาเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 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 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์

เป็นการศึกษาว่าในการวิเคราะห์ที่มีตัวรบกวนใดที่รบกวนการวิเคราะห์หรือไม่ 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

เตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่เตรียมได้ในขั้นตอนที่ 3.3.2 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer สแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ก่อนนำมาจุ่มลงในสารละลายมาตรฐานปรอทที่เตรียมไว้ เป็น

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

3.4.2.1.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท (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 AgTNPs-PDADMAC เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท	Atomic force microscopy (AFM)
ศึกษาลักษณะสัณฐานของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท	Field emission scanning electron microscopy (FESEM)

3.4.2.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด เป็นการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของปรอทที่ตรวจวัดได้ โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน กับค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และการวัดแบลนด์ (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งการวัดแบลนด์ในที่นี้ จะวัดจากแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่ยังไม่ได้จุ่มในสารละลายมาตรฐาน หลังจากนั้นก็นำมาคำนวณโดยใช้สูตร

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

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

Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.3 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ เป็นการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของปรอทที่สามารถวิเคราะห์ได้ 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 มาเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์บุรีรัมย์ เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.5 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์

เป็นการศึกษาว่าในการวิเคราะห์ที่มีตัวรบกวนใดที่รบกวนการวิเคราะห์หรือไม่ 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

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

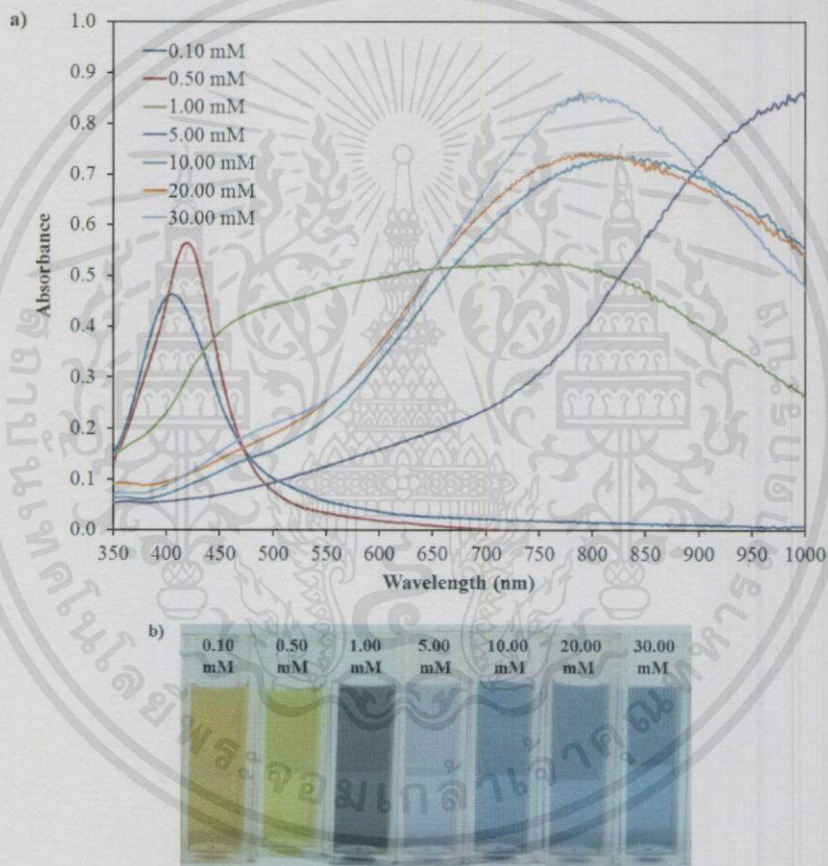
4.1 การศึกษาสภาวะในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรต

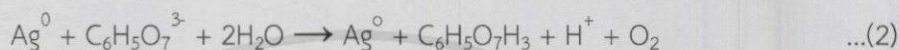
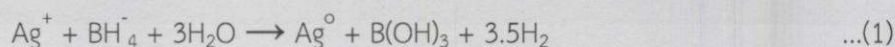
ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่มีความเข้มข้น 0.10, 0.50, 1.00, 5.00, 10.00, 20.00 และ 30.00 มิลลิโมลาร์ แล้วทำการผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์, สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 30.00 โดยน้ำหนัก และสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้น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



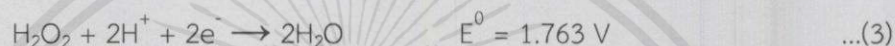
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ AgTNPs (a) และภาพแสดงสีของสารละลาย (b) ที่มีความเข้มข้นของไตรโซเดียมซิเตรตที่แตกต่างกัน

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

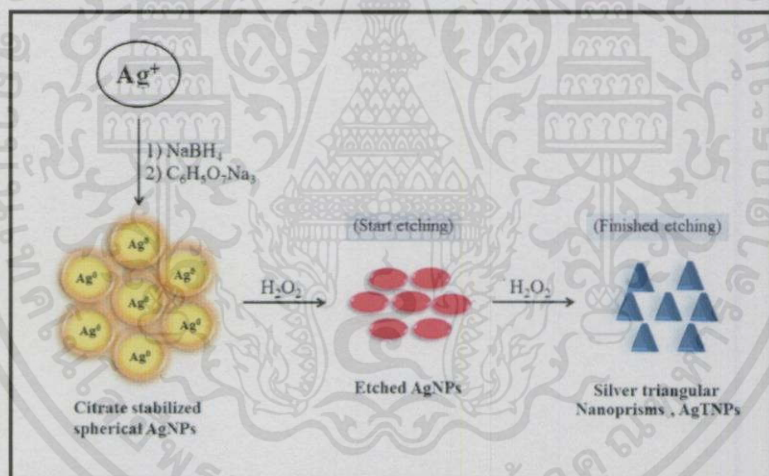
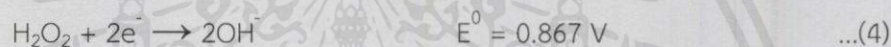
20.00 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากถ้าใช้ความเข้มข้นสูงมากไปจะทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กเกินไป และจะทำให้เกิดปัญหาในขั้นตอนการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน เพราะอนุภาคของไตรโซเดียมซิติเตรต อาจเกิดโอกาสเกาะบนแผ่นฟิล์มได้มากกว่าอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ขึ้น หรือถ้าใช้ความเข้มข้นต่ำมากไปจะทำให้มีความเข้มข้นที่ไม่เพียงพอในการทำหน้าที่เป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ซึ่งปฏิกิริยาของการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนเป็นดังแสดงในสมการด้านล่างและรูปที่ 4.2



In acidic solutions:



In alkaline solutions:



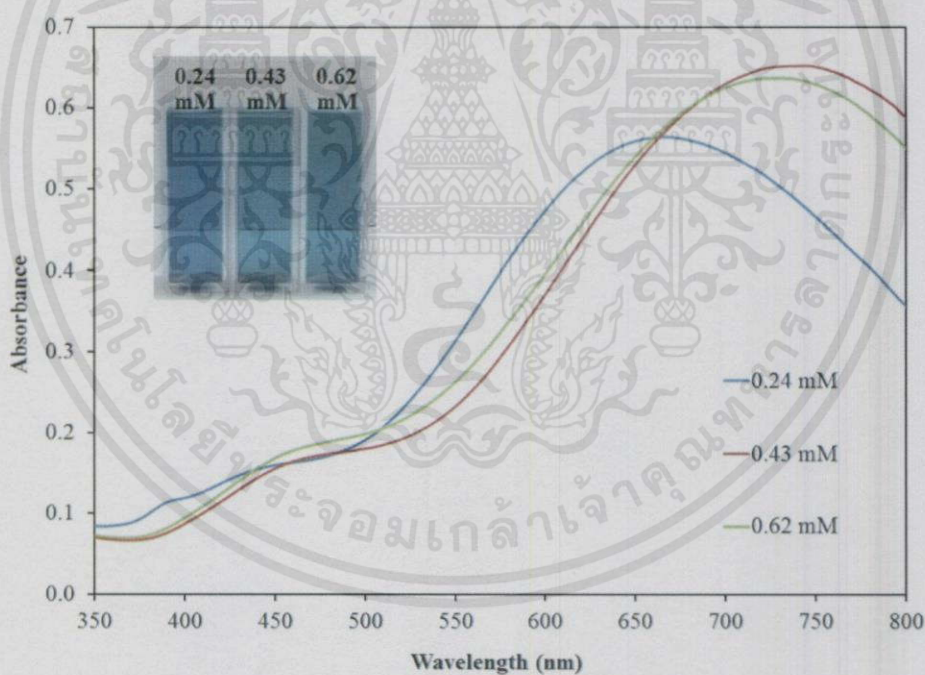
รูปที่ 4.2 แผนผังแสดงกลไกปฏิกิริยาของการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

จากรูปที่ 4.2 กลไกปฏิกิริยาจะเริ่มขึ้นจาก Ag^+ ถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ตามสมการ (1) ได้เป็นอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมในระดับนาโนซึ่งมีไตรโซเดียมซิติเตรตทำหน้าที่เป็นตัวรักษาเสถียรภาพตามสมการ (2) หลังจากนั้นอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมในระดับนาโนที่เกิดขึ้นจะถูกกัด (Etch) โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเท่ากับ 1.763 โวลต์ ในสารละลายที่มีภาวะเป็นกรด และ 0.867 โวลต์ ในสารละลายที่มีภาวะเป็นด่างดังสมการ (3) และ (4) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแม้ในสารละลายที่มีภาวะต่างกันค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็ยังคงมีค่าสูงกว่าของ Ag^+/Ag ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน เท่ากับ 0.7996 โวลต์ ทำให้

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

4.1.2 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่มีความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์ แล้วทำการผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์, สารละลายไตรโซเดียมไซเตรต 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 จากนั้นปั่นจนเป็นเวลา 5 นาทีและตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น สีของสารละลายมีแนวโน้มที่จะเป็นสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้น สังเกตได้จากเส้นสเปกตรัมที่จะเคลื่อนจากความยาวคลื่นสั้นไปยังความยาวคลื่นยาว ซึ่งที่ความยาวคลื่นยาวนั้น เมื่อสารละลายเกิดการดูดกลืนแสงจะ

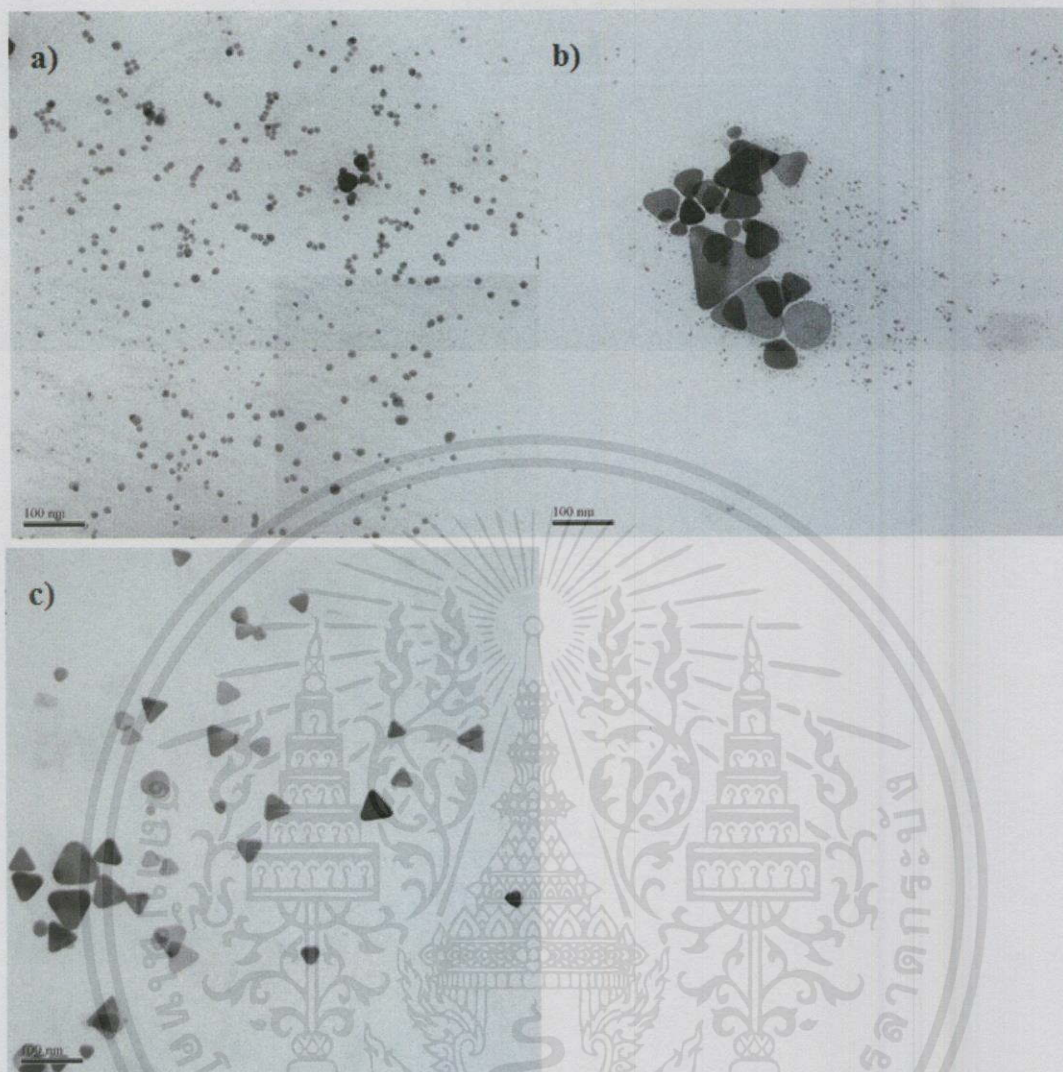
ทำให้เราเห็นสีของสารละลายเป็นสีน้ำเงิน และในที่นี้หลังจากที่ได้นำสารละลาย AgTNP's ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกันไปศึกษาลักษณะเฉพาะแล้วได้ผลตามข้อ 4.1.3 จึงได้เลือกใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่มีความเข้มข้น 0.62 มิลลิโมลาร์ เพราะเป็นความเข้มข้นที่สามารถให้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนได้มากที่สุด 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^- ที่หนามากพอที่จะป้องกันไม่ให้โบรอนไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ตามสมการ (1) ไปดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค AgTNP's รวมทั้งทำให้ไม่เกิดการรวมตัวกัน (Aggregation) ของอนุภาค AgTNP's 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

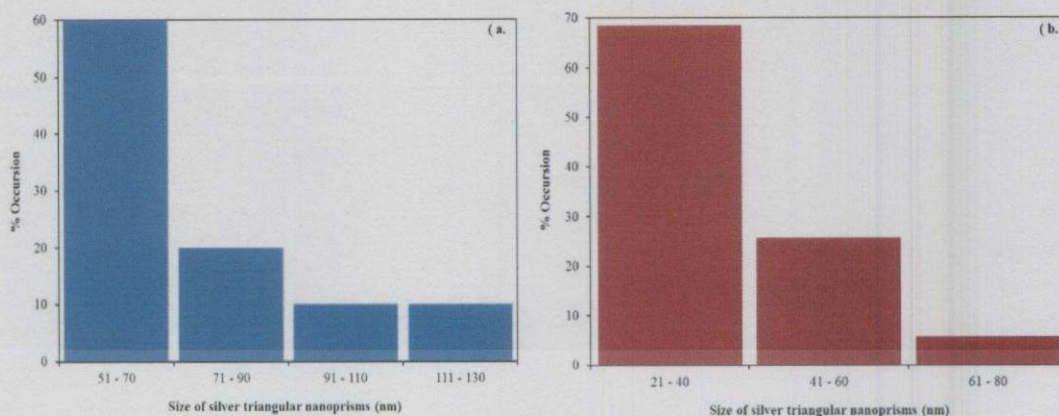
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น อนุภาคเงินที่เกิดขึ้นก็จะมีคุณลักษณะที่เป็นสามเหลี่ยมเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังมีผลทำให้ขนาดของอนุภาคเปลี่ยนไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น การเกิดอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน อีกทั้งอนุภาคที่เกิดขึ้นก็มีขนาดเล็กลงด้วย เนื่องจากเมื่อปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น ชั้นของ BH₄⁻ ก็จะหนามากขึ้นส่งผลให้โบรอนไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ตามสมการ (1) ไม่สามารถดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค AgTNPs ได้ รวมทั้งทำให้ไม่เกิดการรวมตัวกัน (Aggregation) ของอนุภาค AgTNPs ด้วย [25] เนื่องจากการเกิดแรงผลักทางไฟฟ้า (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 ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ต่างกัน

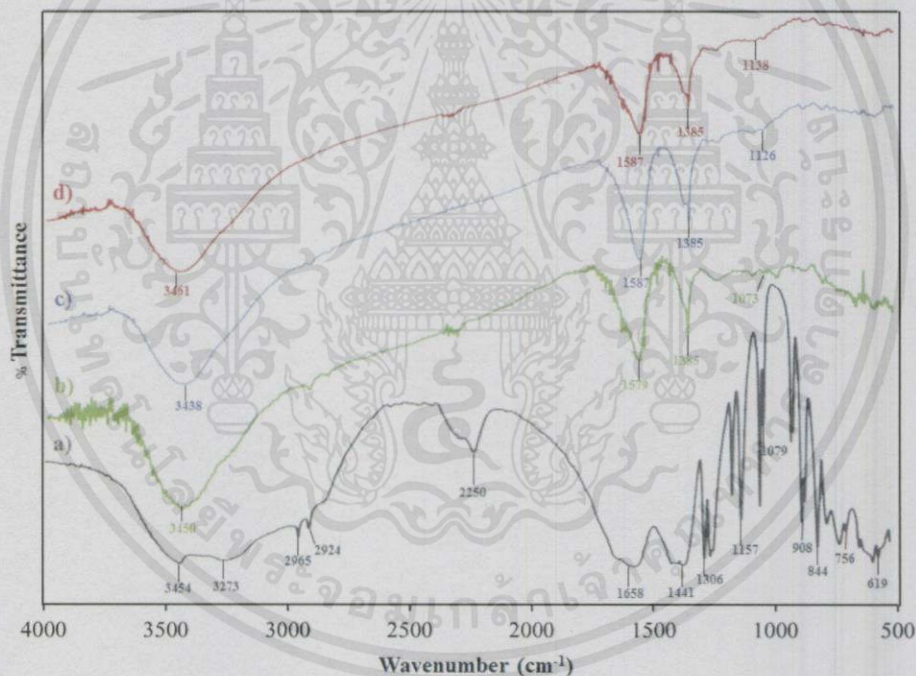
Concentration of NaBH ₄ (mM)	Zeta potentials (mV)
0.24	-41.8
0.43	-39.1
0.62	-39.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 สเปกตรัมของไตรโซเดียมซิเตรต (a) และ AgTNPs ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน คือ 0.24 (b), 0.43 (c) และ 0.62 (d) มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 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 cm^{-1} , การสั่นแบบงอของพันธะ C-H ที่เลขคลื่น 1441 cm^{-1} และการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O ที่เลขคลื่น 1079 cm^{-1} ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในสารละลาย AgTNPs ทั้งสาม พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นเหมือนกับหมู่ฟังก์ชันที่มีอยู่ในไตรโซเดียมซิเตรต โดยในสารละลาย AgTNPs ทั้ง (b), (c) และ (d) จะมีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H ที่เลขคลื่น 3450 , 3438 และ 3461 cm^{-1} ตามลำดับ มีการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=O ที่เลขคลื่น 1579 และ 1587 cm^{-1} มีการสั่นแบบงอของพันธะ C-H ที่เลขคลื่น 1385 cm^{-1} และการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O ที่เลขคลื่น 1073 , 1126 และ 1138 cm^{-1} ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ มีไตรโซเดียมซิเตรตอยู่ [70]

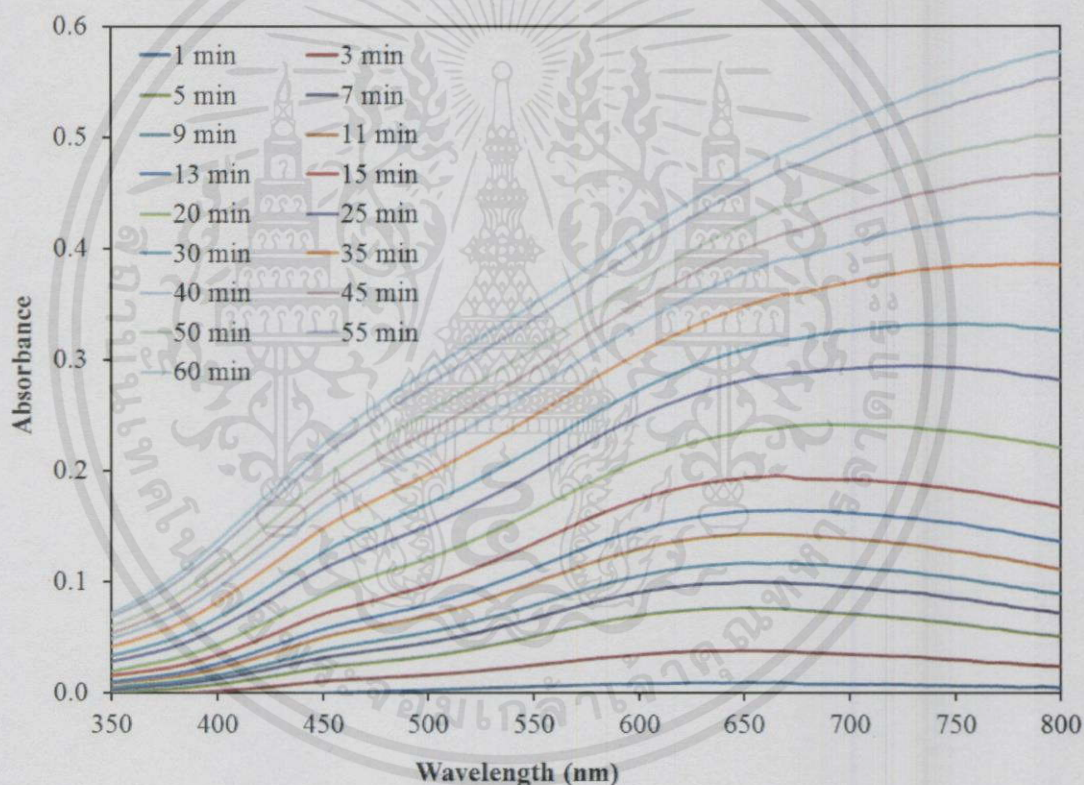
4.2 การศึกษาสถานะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

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

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

4.2.1 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

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



รูปที่ 4.7 สเปกตราแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งเมื่อทำการวัดไปเรื่อยๆจนครบ 60 นาที ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนก็ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ ดังนั้นจึงทำการเลือกเวลาที่ 20 นาทีในการจุ่มสารละลายเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในสารละลาย AgTNPs-PDADMAC และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

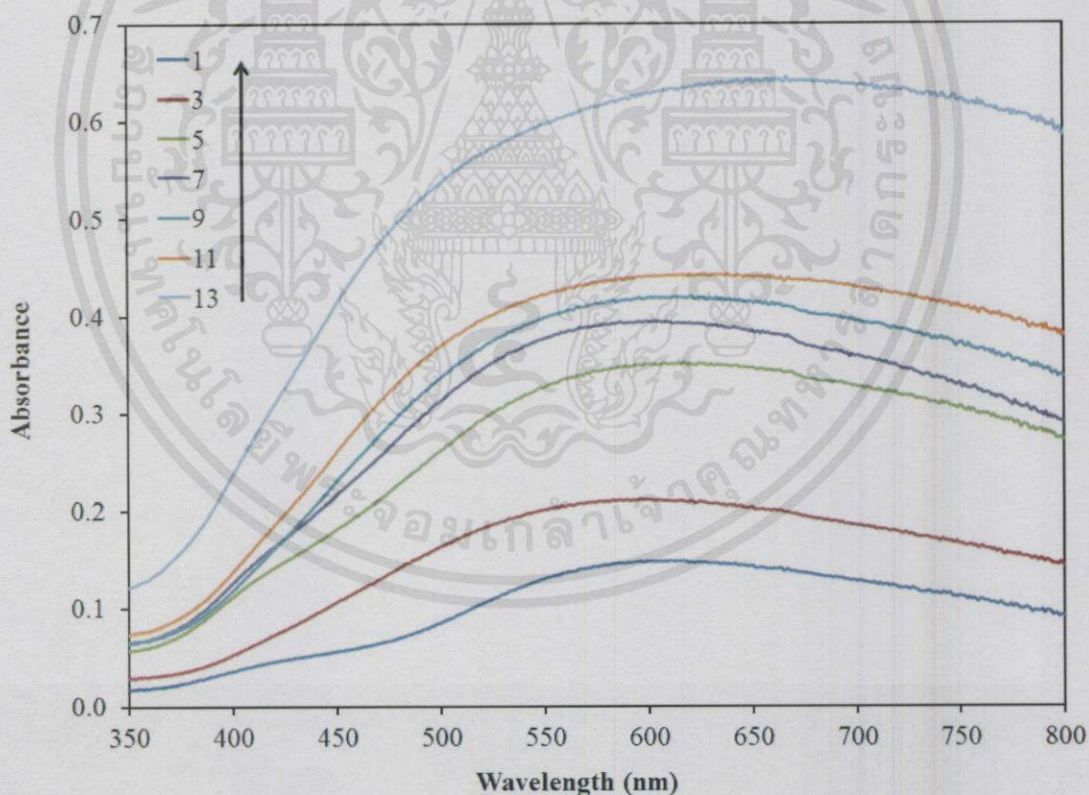
อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนเนื่องจากเวลาที่ 20 นาทีเป็นเวลาที่ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

4.2.2 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

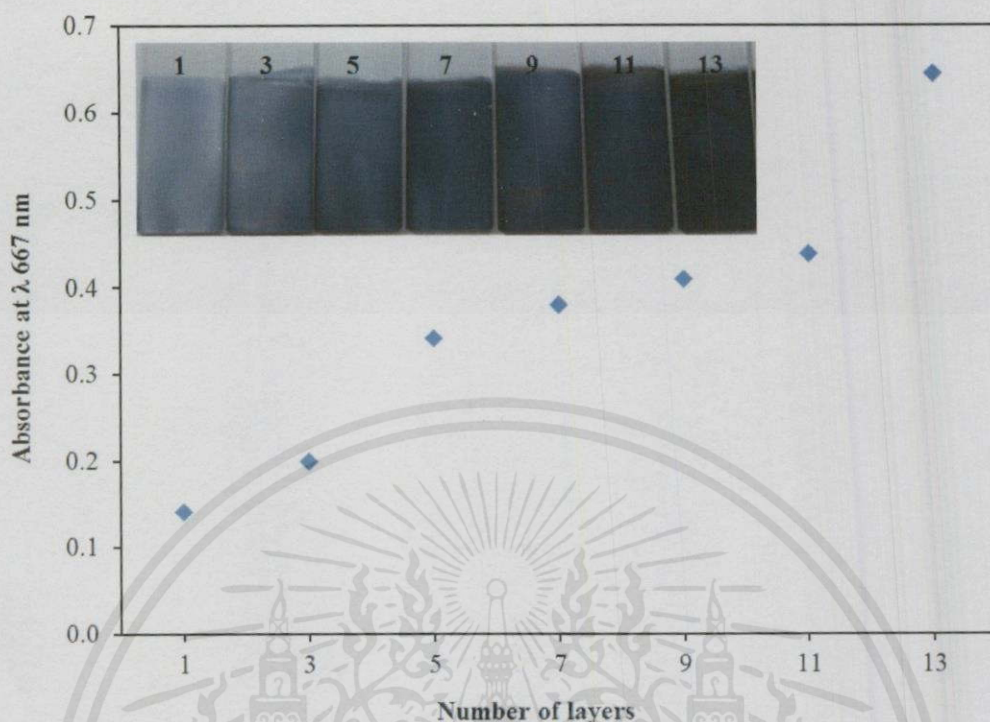
ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่มีจำนวนชั้นที่แตกต่างกัน และทำการศึกษาลักษณะเฉพาะ ดังต่อไปนี้

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 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ที่
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 จำนวนชั้นต่างๆ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 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

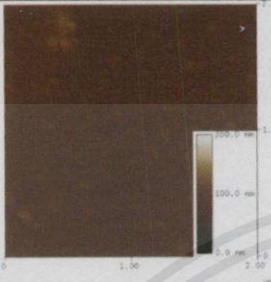
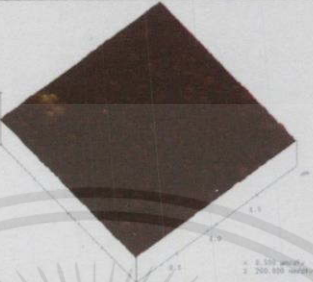




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP- PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

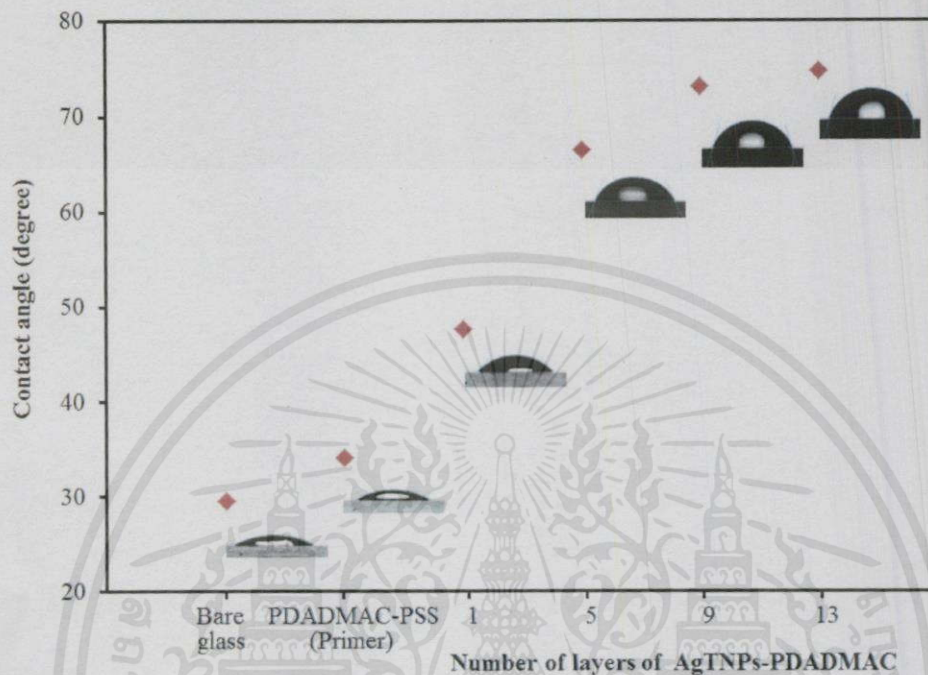
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP- PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ

No. of layers	Morphological Evolution		RMS roughness (nm)	Thickness (nm)
	Two - dimensional (scanned at 2 μm)	Three - dimensional (scanned at 2 μm)		
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- PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยนำแผ่นกระจกที่เตรียมพื้นผิวแล้ว (Primer) ลงจุ่มในสารละลาย AgTNP สลับกับสารละลาย PDADMAC เป็นเวลา 20 นาทีและ 5 นาที ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกหนึ่งที เติมน้ำที่ลดลงไปลงน้ำที่สะอาดของเอ็กสเตรกทีฟที่มิใช่ตามลำดับ โดยจะทำการจุ่มสลับไปมาจนได้ตามจำนวนชั้นที่ต้องการ คือ 1, 5, 9 และ 13 ชั้น แล้ว

นำไปตรวจสอบมุมสัมผัสของของเหลวบนแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ ด้วยเทคนิค Contact angle ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10

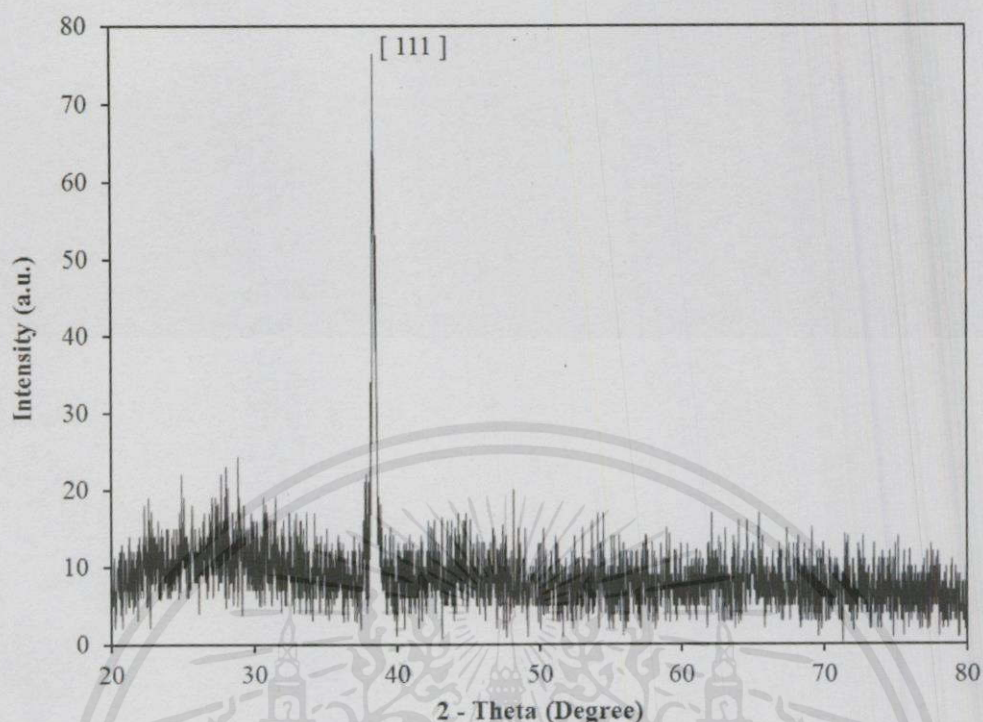


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงมุมสัมผัสของของเหลวบนแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ

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

4.2.2.4 การศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยนำแผ่นกระจกที่เตรียมพื้นผิวแล้ว (Primer) ลงจุ่มในสารละลาย AgTNP สลับกับสารละลาย PDADMAC แล้วนำไปตรวจสอบการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในการคำนวณค่า d ในรูปที่ 4.11 กทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ภาพแสดงการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

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

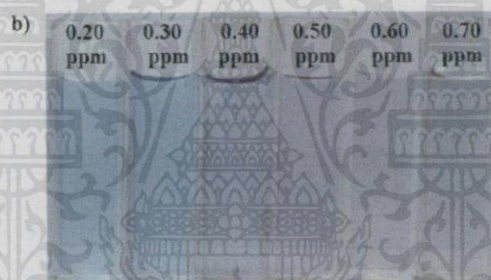
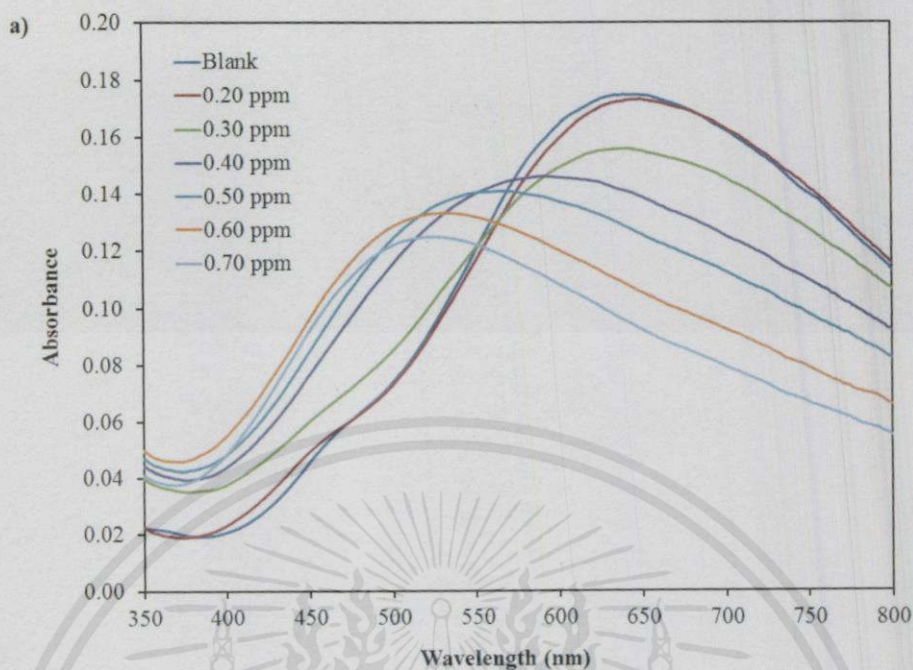
4.3 การนำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท

4.3.1 การตรวจวัดปรอทโดยการใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs)

4.3.1.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท ($HgCl_2$)

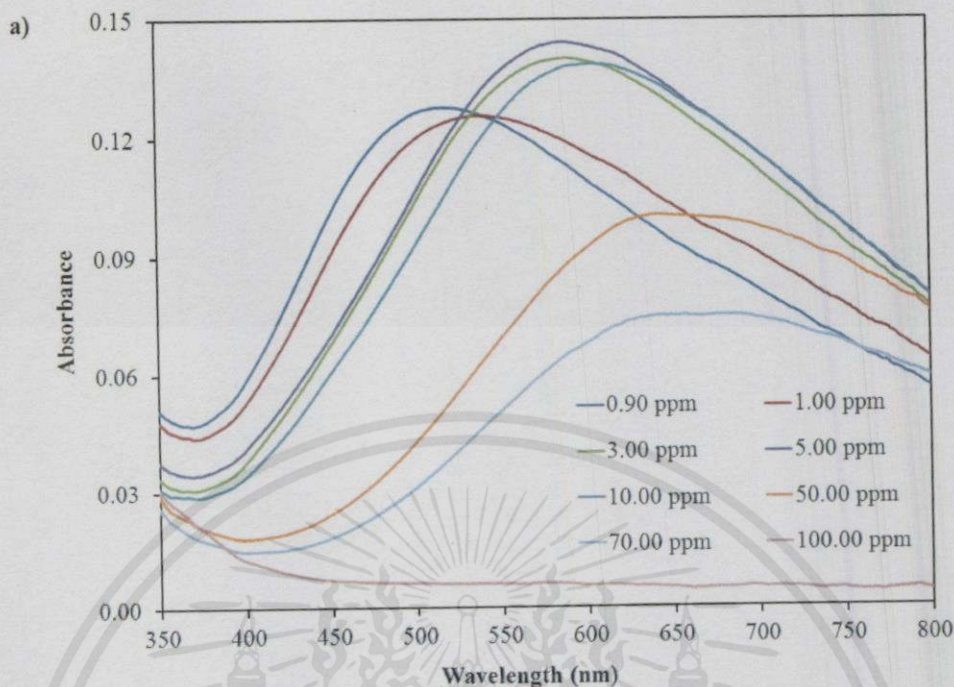
ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.90, 1.00, 3.00, 5.00, 10.00, 50.00, 70.00 และ 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แล้วทำการวิเคราะห์ปรอทโดยการผสมสารละลาย AgTNPs เข้ากับสารละลายมาตรฐานในแต่ละความเข้มข้น แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNPs (a) และภาพแสดงสีของสารละลาย (b) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้น 0.20 - 0.70 มิลลิกรัมต่อลิตร

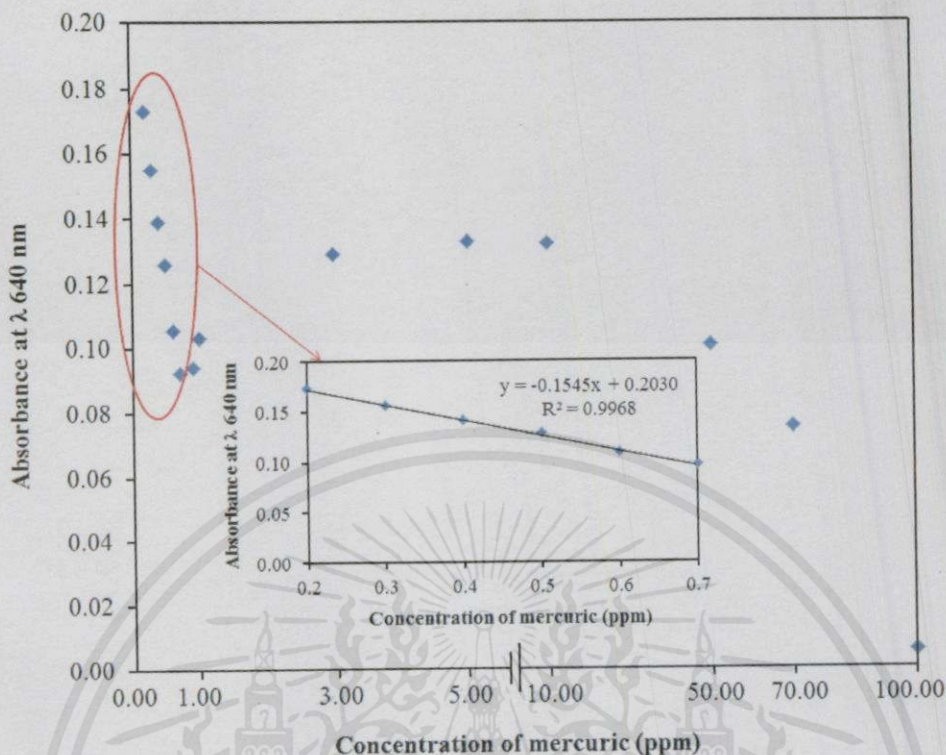
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"



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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNPs เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNPs เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทในช่วงความเข้มข้น 0.20 - 0.70 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นเส้นตรง (R^2) เท่ากับ 0.9968

จากผลการศึกษาลักษณะความเป็นประจุกับลักษณะรูปร่างของสารละลาย AgTNPs เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4 และในรูปที่ 4.15 ตามลำดับ

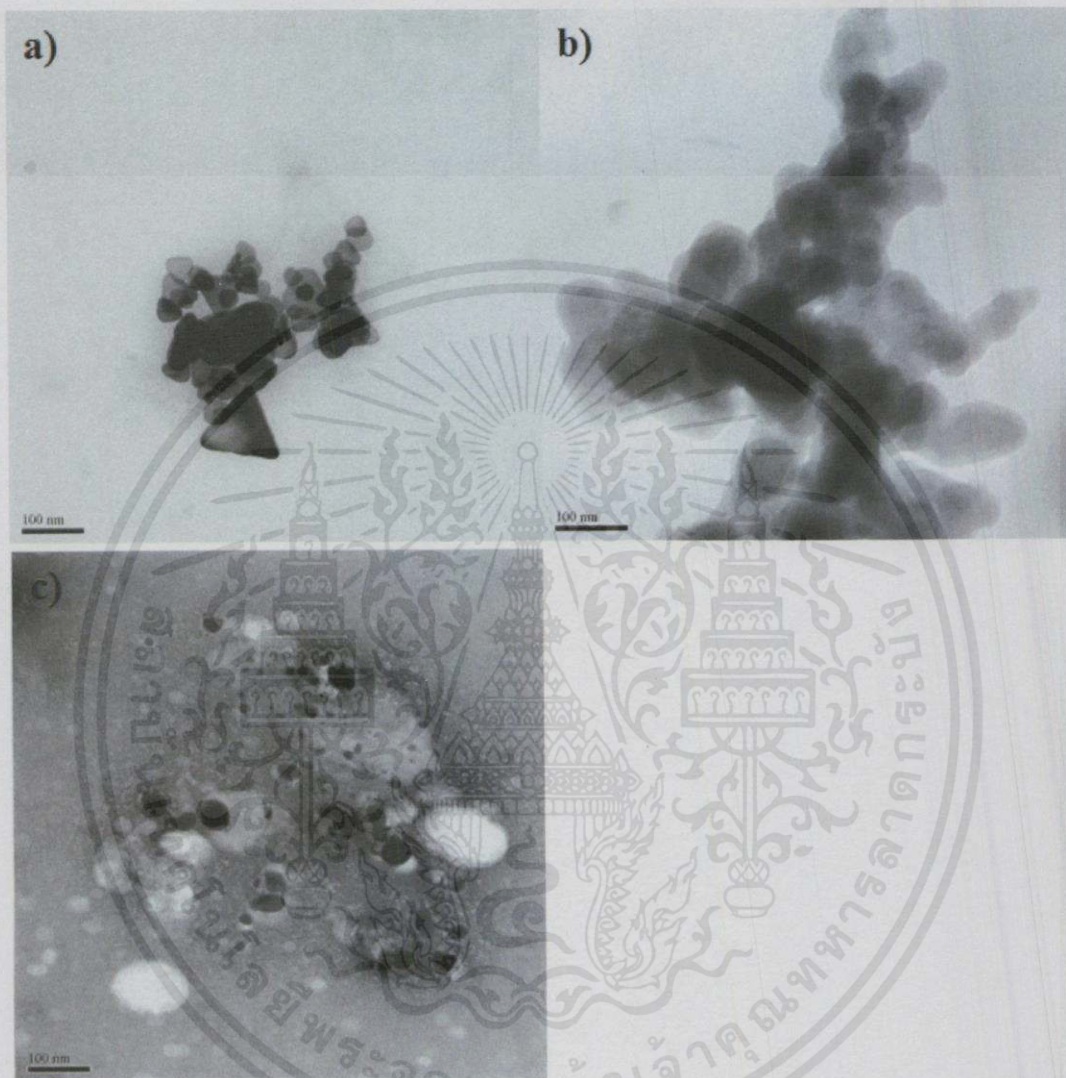
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าศักย์ซีต้าของสารละลาย AgTNPs ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 0.40 , 10.00 และ 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

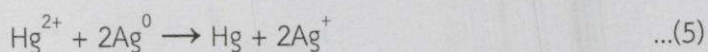
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลใดๆ ในเอกสารฉบับนี้ ซึ่งได้จัดทำขึ้นจากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำสารละลาย AgTNPs ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆ และนำไปตรวจวัดค่าศักย์ซีต้า พบว่าสภาพความเป็น

ประจักษ์คงเป็นลบอยู่ 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 คุณลักษณะที่เป็นรูปร่างสามเหลี่ยมไปเป็นอนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายทรงกลมพร้อมทั้งเกิดการสลายตัว ของอนุภาคด้วย ซึ่งสมการแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาค AgTNPs กับปรอท (Hg^{2+}) เป็นไปดังนี้



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

4.3.1.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

ผลจากการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงของสาร และการวัดสารละลายแบบล่งค์ (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 และการวัดสารละลายแบบล่งค์ (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 ± 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตร
ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)	0.39 ± 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากตารางที่ 4.5 พบว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด มีค่าเท่ากับ 0.12 ± 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ เท่ากับ 0.39 ± 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

ผลจากการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของปรอทในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่ม ที่ทำโดยการนำน้ำประปาและน้ำดื่มมาเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้น 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 ทั้งนี้ยังค่า RSD มีค่าน้อย จะแสดงให้เห็นว่าวิธีนั้นมีความแม่นยำที่ดียิ่งขึ้น

4.3.1.5 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์

ผลจากการศึกษาว่าในการวิเคราะห์ที่มีตัวรบกวนใดที่รบกวนการวิเคราะห์หรือไม่ โดยการเติมตัวรบกวนต่างๆลงในสารละลาย AgTNP ที่มีสารละลายมาตรฐานปรอทอยู่ จากนั้นทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุด เมื่อเติมตัวรบกวนต่างๆลงไป

Interference	λ_{\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 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมตัวรบกวนต่างลงไปในการวิเคราะห์ AgTNP ที่มีสารละลายมาตรฐานปรอทอยู่ จากนั้นทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีค่าทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง แต่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ตรวจวัดได้ ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายที่ไม่มีการเติมตัวรบกวนลงไป (Standard) จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวรบกวนนั้นๆไม่มีผลต่อการวิเคราะห์

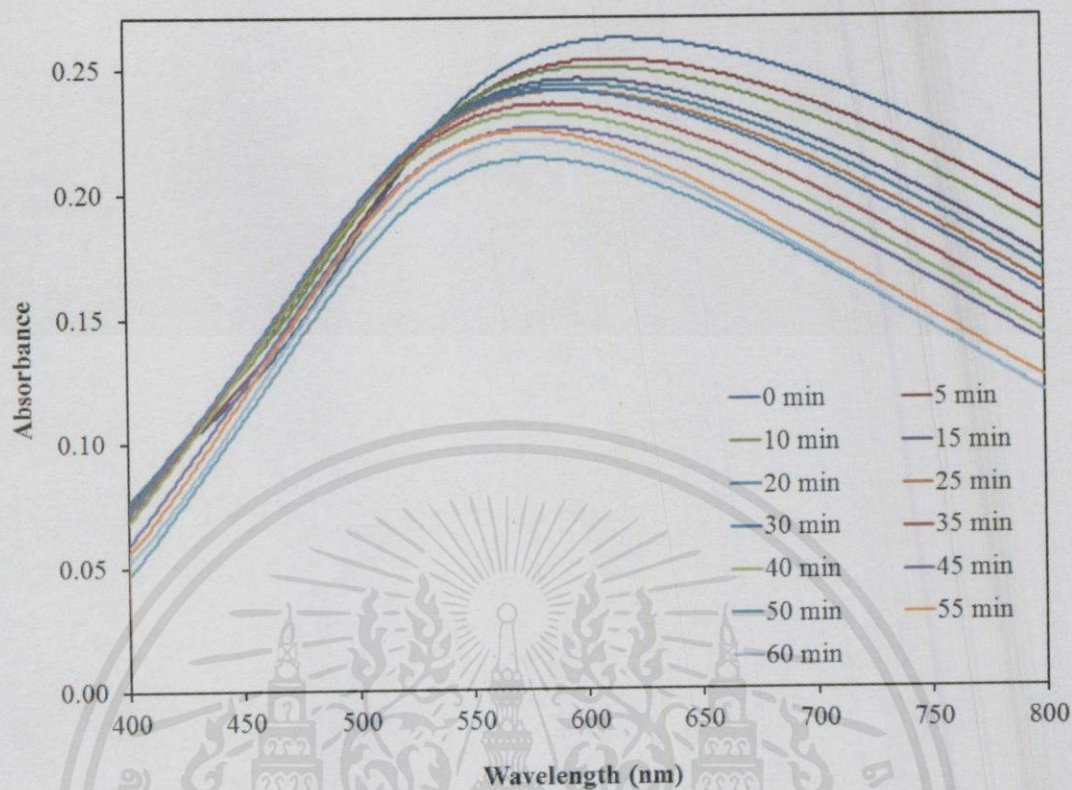
4.3.2 การตรวจวัดปรอทโดยการใช้แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



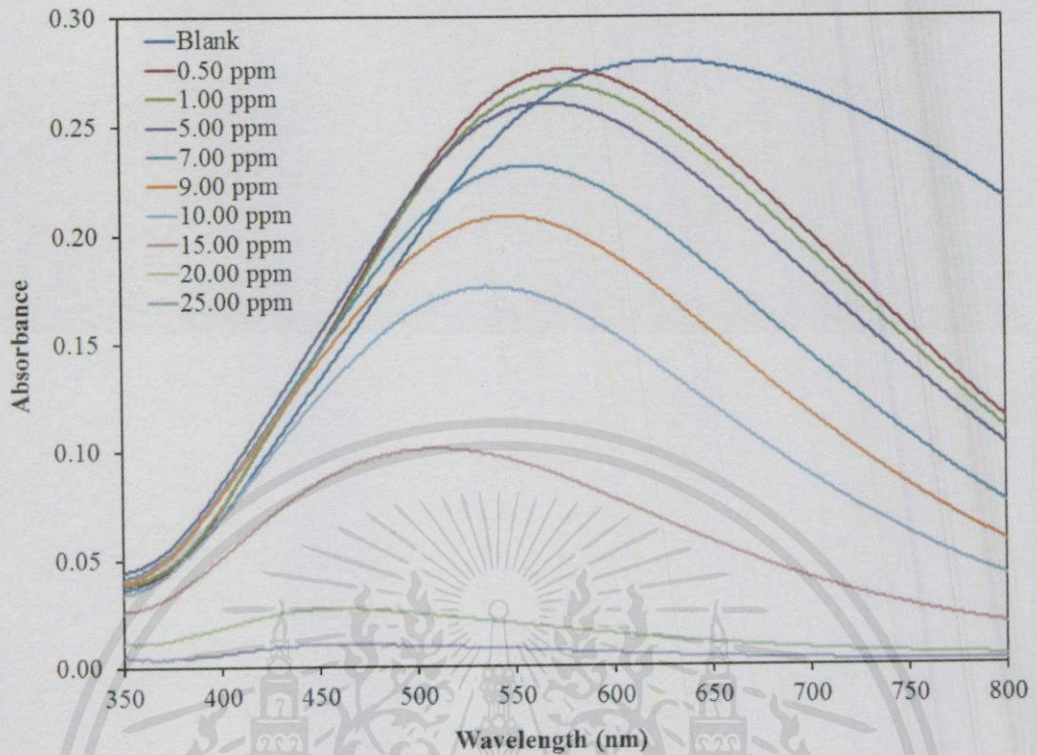
รูปที่ 4.16 สเปกตร้าแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PPADMAC เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอท ณ เวลาต่างๆ

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

4.3.2.1.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปรอท ($HgCl_2$)

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้น 0.50, 1.00, 5.00, 7.00, 9.00, 10.00, 15.00, 20.00 และ 25.00 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ แล้วทำการวิเคราะห์ปรอทโดยการจุ่มแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PPADMAC กับสารละลายมาตรฐานปรอทในแต่ละความเข้มข้น แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18

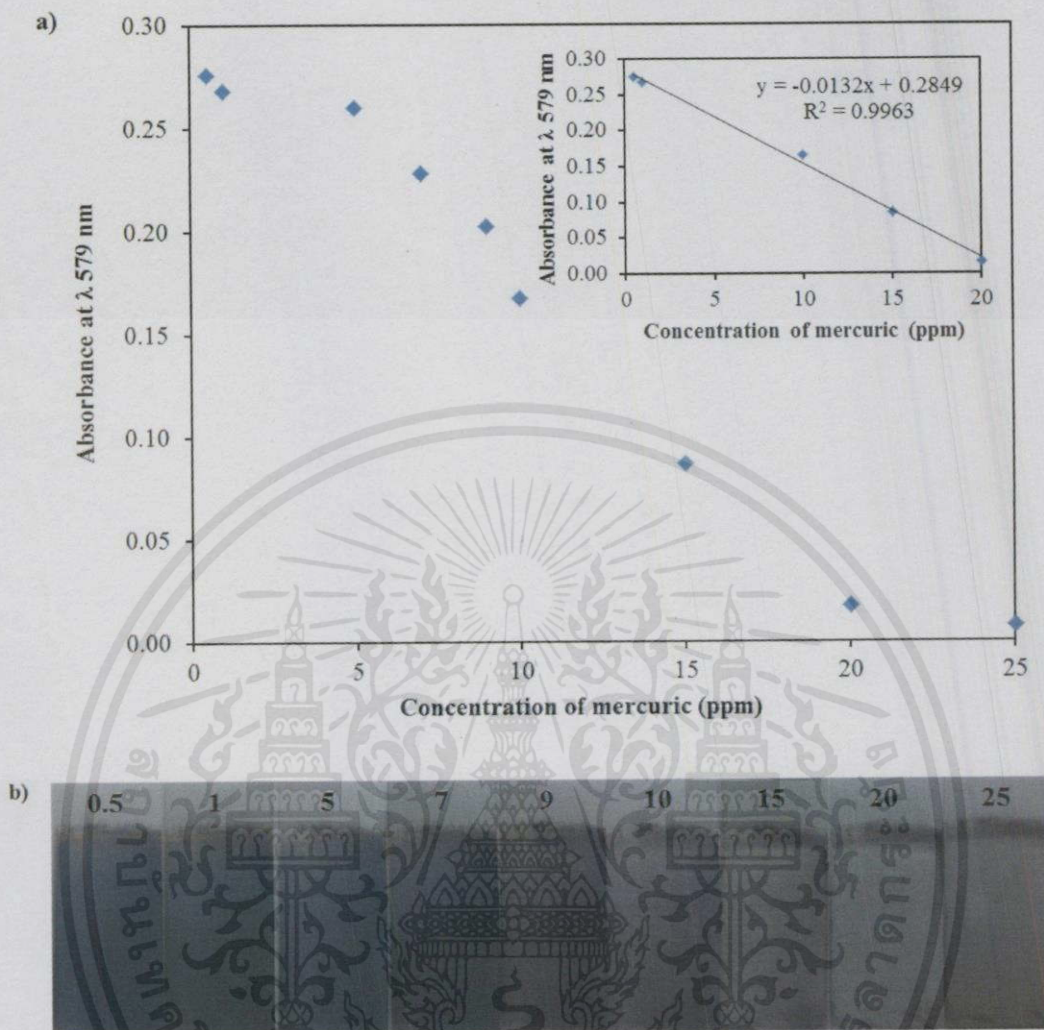
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PPADMAC เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทแต่ละความเข้มข้น

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงจะลดน้อยลง แสดงว่าค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนแปรผกผันกับค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



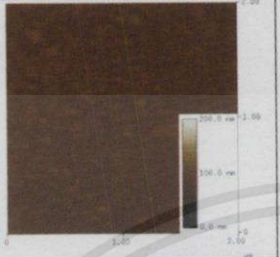
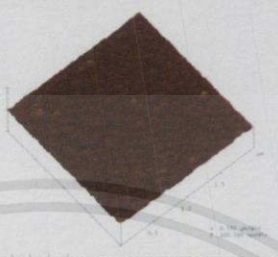




รูปที่ 4.18 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC (a) และภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบาง (b) เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

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

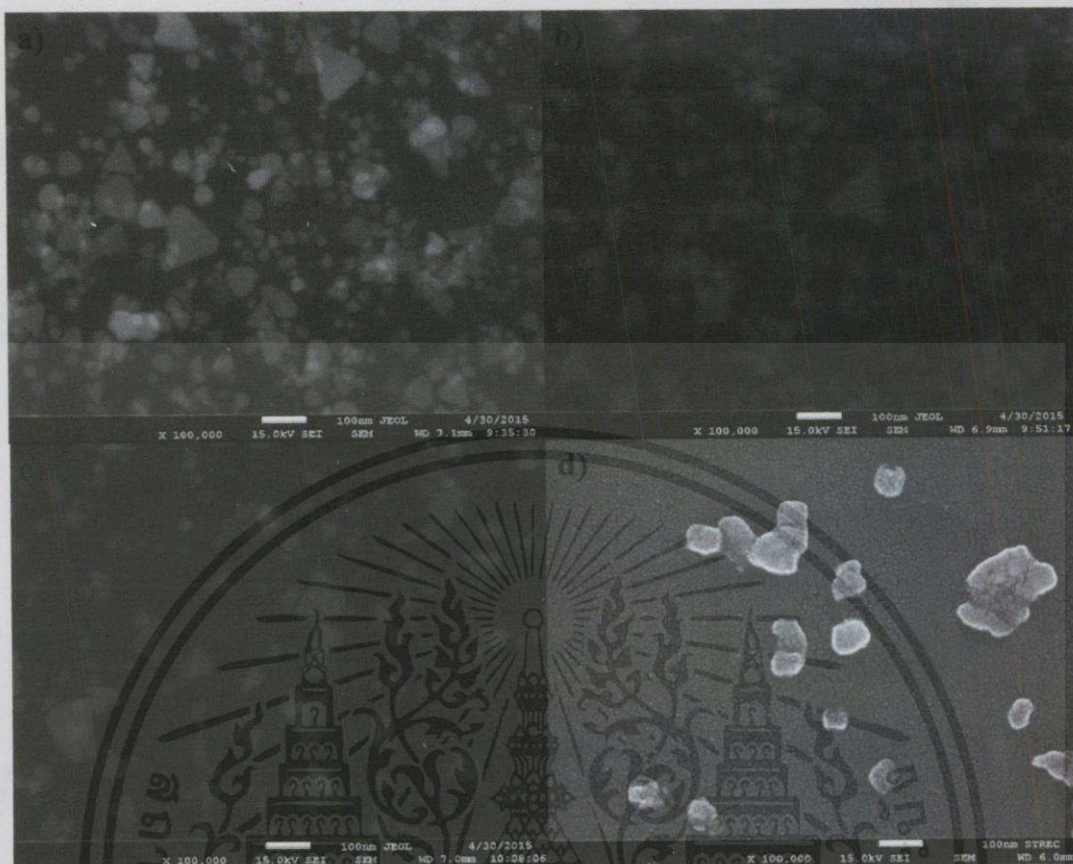
จากผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนา รวมถึงลักษณะสัณฐานของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC เมื่อนำไปตรวจวัดกับปรอท ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.19 ตามลำดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMACเมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

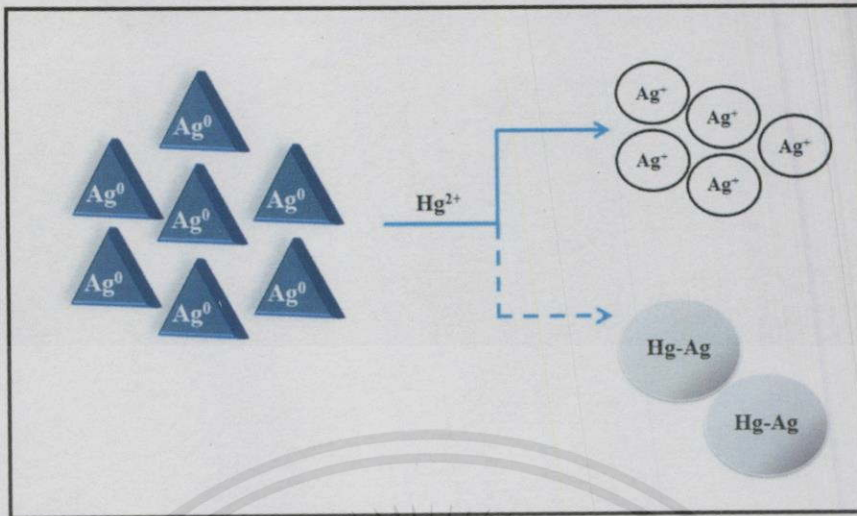


รูปที่ 4.19 ภาพ FESEM ของแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-PPADMAC เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 0.50 (b), 10.00 (c) และ 20.00 (d) มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วน (a) คือ AgTNP-PPADMAC without mercuric

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทเพิ่มมากขึ้น ความหนาของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แสดงว่าความหนาของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนแปรผันตรงตามความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอท

จากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนไปจุ่มในสารละลายมาตรฐานปรอทที่มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น อนุภาคของ AgTNPs บนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนจะค่อยๆสูญเสียคุณลักษณะที่เป็นรูปร่างสามเหลี่ยมไปเป็นอนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายทรงกลม พร้อมทั้งเกิดการสลายตัวของอนุภาคด้วย ซึ่งเป็นไปตามกลไกปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แผนผังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับปรอท

จากรูปที่ 4.20 จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมปรอท (Hg^{2+}) เข้าไป Hg^{2+} จะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาค AgTNP (Ag^0) ทำให้ Ag^0 กลายเป็น Ag^+ พร้อมทั้งเกิดอนุภาค Hg - Ag (Amalgam) ขึ้น [65] ส่งผลให้รูปร่างของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปและที่ความเข้มข้นของปรอทสูงๆ อนุภาคของ AgTNP ก็จะมีการสลายตัวไปเนื่องจากถูกปรอทออกซิไดซ์จนหมด

4.3.2.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

ผลจากการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด โดยใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน กับค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และการวัดแบลนด์ (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งการวัดแบลนด์ในที่นี้ 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 โดยใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และการวัดแบลนด์ (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งการวัดแบลนด์ในที่นี้ จะวัดจากแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่ยังไม่ได้จุ่มในสารละลายมาตรฐาน หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร $10SD$ of $blank/Slope$ เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank และ Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงค่า LOD และ LOQ

ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธี	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)	0.45 ± 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร
ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)	1.52 ± 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด มีค่าเท่ากับ 0.45 ± 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ เท่ากับ 1.52 ± 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.2.4 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

ผลจากการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของปรอทในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่มที่ทำโดยการนำน้ำประปาและน้ำดื่มมาเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทที่ความเข้มข้น 5.00, 10.00 และ 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นนำแผ่นฟิล์มบาง AgTNPs-PDADMAC ร่วมกับสารละลายมาตรฐานในแต่ละความเข้มข้น 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 ± 0.087	106.4	1.6
	10.00	10.043 ± 0.044	100.4	0.4
	20.00	20.018 ± 0.087	100.1	0.4
Drinking water	0.00	ND.	-	-
	5.00	5.194 ± 0.116	103.9	2.2
	10.00	10.396 ± 0.044	104.0	0.4
	20.00	20.043 ± 0.087	100.2	0.4

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 ทั้งนี้ยิ่งค่า RSD มีค่าน้อย จะแสดงให้เห็นว่าวิธีนั้นมีความแม่นยำที่ดียิ่งขึ้น

4.3.2.5 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์

ผลจากการศึกษาว่าในการวิเคราะห์หามีตัวรบกวนใดที่รบกวนการวิเคราะห์หรือไม่ โดยการจุ่มแผ่นฟิล์มบาง AgTNP-*PDADMAC* ลงสารละลายมาตรฐานปรอทที่เติมตัวรบกวนต่างๆลงไป จากนั้นทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุด เมื่อเติมตัวรบกวนต่างๆลงไป

Interference	λ_{\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

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณ

ปรอทนี้กับวิธีอื่นๆ ซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงการเปรียบเทียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอท

Method	Probe	Limit of detection (μM)	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 อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งสรุปผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ดังต่อไปนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือ การศึกษาสภาวะต่างๆในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน อันได้แก่ การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรตและการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน 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 จากการทำสารละลายและฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอท พบว่าในส่วนของการวิเคราะห์ กราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทกับค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งมีสมการ คือ $y = -0.1545x + 0.2030$ มีค่าความเป็นเส้นตรง เท่ากับ 0.9968 ในช่วงความเข้มข้น 0.20 - 0.70 มิลลิกรัมต่อลิตร, ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 0.12 ± 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตร, ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ) เท่ากับ 0.39 ± 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 % ทั้งนี้ในส่วนของการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนพบว่า กราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปรอทกับค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งมีสมการ คือ $y = -0.0132x + 0.2849$ มีค่าความเป็นเส้นตรง เท่ากับ 0.9963 ในช่วงความเข้มข้น 0.50 - 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร, ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 0.45 ± 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร, ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ) เท่ากับ 1.52 ± 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

การตรวจสอบปรอทเช่นเดียวกัน คือ เป็นวิธีที่สะดวก ใช้งานง่าย รวดเร็ว และมีค่าใช้จ่ายไม่สูงนักเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น รวมทั้งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มตัวแปรศึกษาเกี่ยวกับสภาวะของการทดลองให้มากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง, การศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของเกลือ เป็นต้น เพื่อให้การทดลองมีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้น
2. ควรทำการศึกษาสารตัวอื่นที่มีคุณสมบัติเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ
3. การนำสารละลาย AgTNP_s ที่สังเคราะห์ได้และแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น ตัวอย่างทางด้านชีวภาพ, ตัวอย่างทางด้านทางการแพทย์ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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.
- [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>.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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.
- [16] 2015. การสร้างเครื่องยนต์นาโน. [Online]. Available : 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. มาร์ูจักนาโนซิลเวอร์. [Online]. Available : <http://www.nstda.or.th/nstda-knowledge/18889-silver-nano>.
- [19] พริยารช 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 สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการ ด้านวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2015. ฐานข้อมูลความปลอดภัยวัสดุนาโน. [Online]. Available : http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat_id=8&p_id=235.

- [23] 2013. อนุภาคนาโนของเงินฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้อย่างไร. [Online]. Available : <http://www.prime-nano.com/#!untitled/c1hh1>.
- [24] เณศรา แก้วคง, เลิศณรงค์ ศรีพนม, เจ๊ะฮาซัน เจ๊ะอุบง, และ ศิริวรรณ ตั๊ญ. 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 Scurrall, 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/maternal/bmsdec2008/937.pdf>.
- [28] 2015. microemulsion. [Online]. Available : <http://www.i-rashi.com/knowledge/Detail.asp?knowledgeID=6>.
- [29] ปิ่นฉัตร ภักธรสถาพรกุล. 2015. การทำให้เป็นเม็ดด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง. [Online]. Available : 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 AgNO₃ with CTAB Counterion. [Online]. Available : <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11051-006-9107-4#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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] Korbekandi, H. and Iravani, S. 2015. **Silver Nanoparticles**. [Online]. Available : 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. **ไซบริคนา...นาโนเทคโนโลยี**. [Online]. Available : 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 เจนวาณิชย์. 2015. **ปรอท**. [Online]. Available : <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Hg.html>.
- [42] อรรณ 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->

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [43] ศูนย์ศึกษาธรรมชาติและระบบนิเวศเกษตร. 2015. สารปรอท. [Online]. Available : <http://www.naeccentre.com/article/mercury.php>.
- [44] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. 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.
- [49] ดวงกมล ศักดิ์เลิศสกุล. 2012. การใช้สารประกอบเชิงซ้อนพอลิอเล็กโทรไลต์ในทางเภสัชกรรม. [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.
- [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.
- [54] 2015. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). [Online]. Available : http://www.sc.chula.ac.th/departement/Chemical_Technology/Analytical_unit/FTIR.html.

- [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 ได้การ. 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. กระจกทำความสะอาดตัวเองได้ด้วยวิธีไม่ชอบน้ำ. [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=FESM>.
- [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. "H₂O₂ -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.

- [66] Farhadi, K. Forough, M. Molaei, R. Hajizadeh, S. and Rafipour, A. 2011. "Highly selective 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] Safaei, 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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 Hg₂⁺ 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 Hg²⁺ 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 Hg²⁺ 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 Hg²⁺ based on a phosphorescent iridium (III) complex." *Inorganic Chemistry Communications*. 22(2012) : 178–181.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การเตรียมสารละลาย

1. การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNP) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method)

1.1 การเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต

1.1.1 การเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 100.00 มิลลิโมลาร์

ซึ่งซิลเวอร์ไนเตรตมา 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 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมไซเตรต

1.2.1 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมไซเตรต ความเข้มข้น 30.00 มิลลิโมลาร์

ซึ่งไตรโซเดียมไซเตรตมา 0.4412 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายไตรโซเดียมไซเตรต ความเข้มข้น 30.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

1.2.2 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมไซเตรต ความเข้มข้น 20.00 มิลลิโมลาร์

ซึ่งไตรโซเดียมไซเตรตมา 0.2941 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายไตรโซเดียมไซเตรต ความเข้มข้น 20.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

1.2.3 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมไซเตรต ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์

ปิเปตสารละลายไตรโซเดียมไซเตรต ความเข้มข้น 20.00 มิลลิโมลาร์ มา 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายไตรโซเดียมไซเตรต ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.4 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 5.00 มิลลิโมลาร์

ปิเปตสารละลายไตรโซเดียมซีเตรต ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ มา 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ก็จะได้สารละลายไตรโซเดียมซีเตรตความเข้มข้น 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 จากนั้นปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน 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 และปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกริมาตร 1000 มิลลิลิตร ก็จะได้สารละลาย PDADMAC ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การเตรียมสารละลายโพธิโซเดียมสไตรีนซัลโฟเนต ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์

ชั่ง 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

ชั่งปรอท(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

3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทสำหรับการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

3.2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอท ความเข้มข้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปรอท(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 อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การคำนวณผลการทดลอง

1. การตรวจวัดปรอทโดยการใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน (AgTNPs)

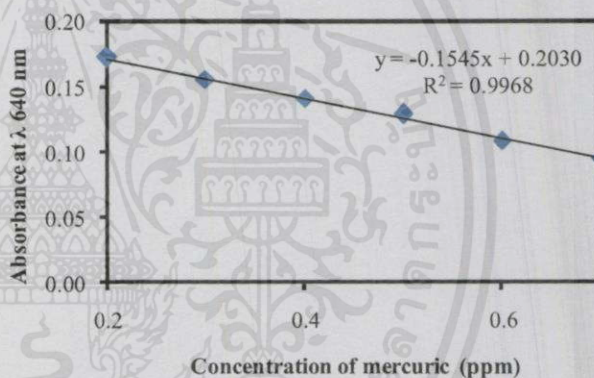
1.1 การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

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
AVR	0.175
SD	0.006



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

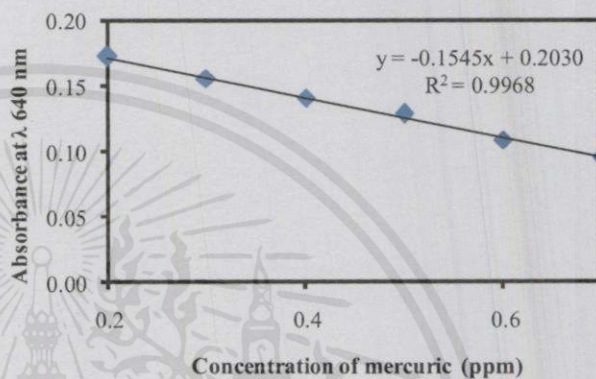
1.2 การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

สูตร

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

การคำนวณ

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



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

1.3 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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}) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่า x ทั้งสามได้ เท่ากับ 0.410 และ 0.010 ppm ตามลำดับ

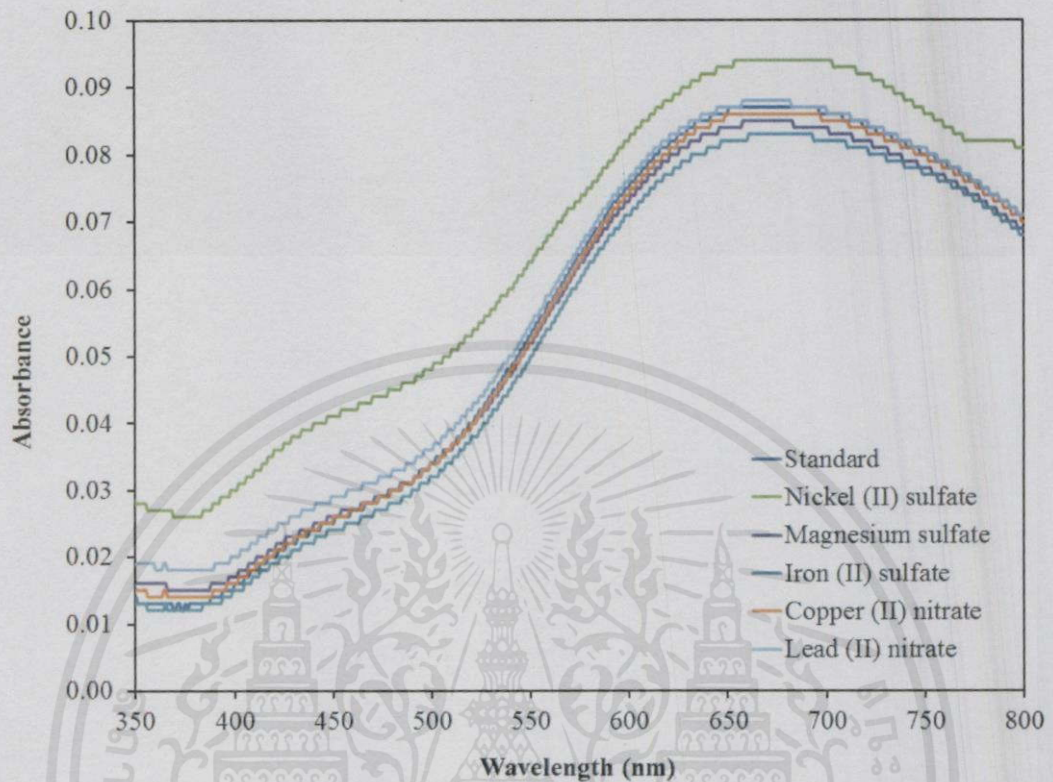
2) การหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (RSD)

$$\begin{aligned} \% \text{Recovery} &= \frac{0.410 - 0.000}{0.40} \times 100 \\ &= 102.5 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RSD} &= \frac{0.010}{0.410} \times 100 \\ &= 2.4 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 การศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์



สเปกตรัมจากการศึกษาตัวรบกวนในการวิเคราะห์ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การตรวจวัดปรอทโดยการใชแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

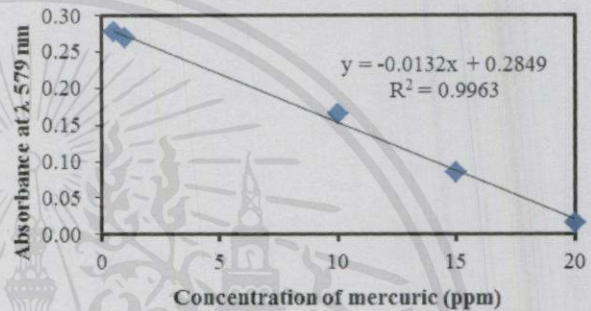
2.1 การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

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
AVR	0.261
SD	0.002



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

2.2 การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

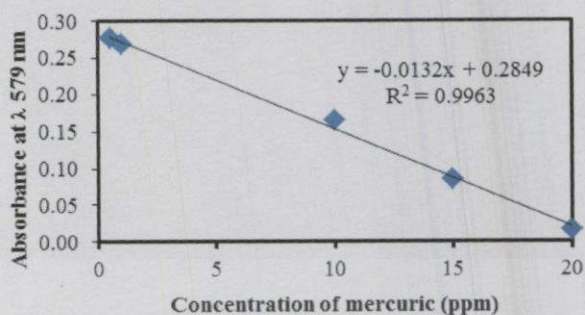
สูตร

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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

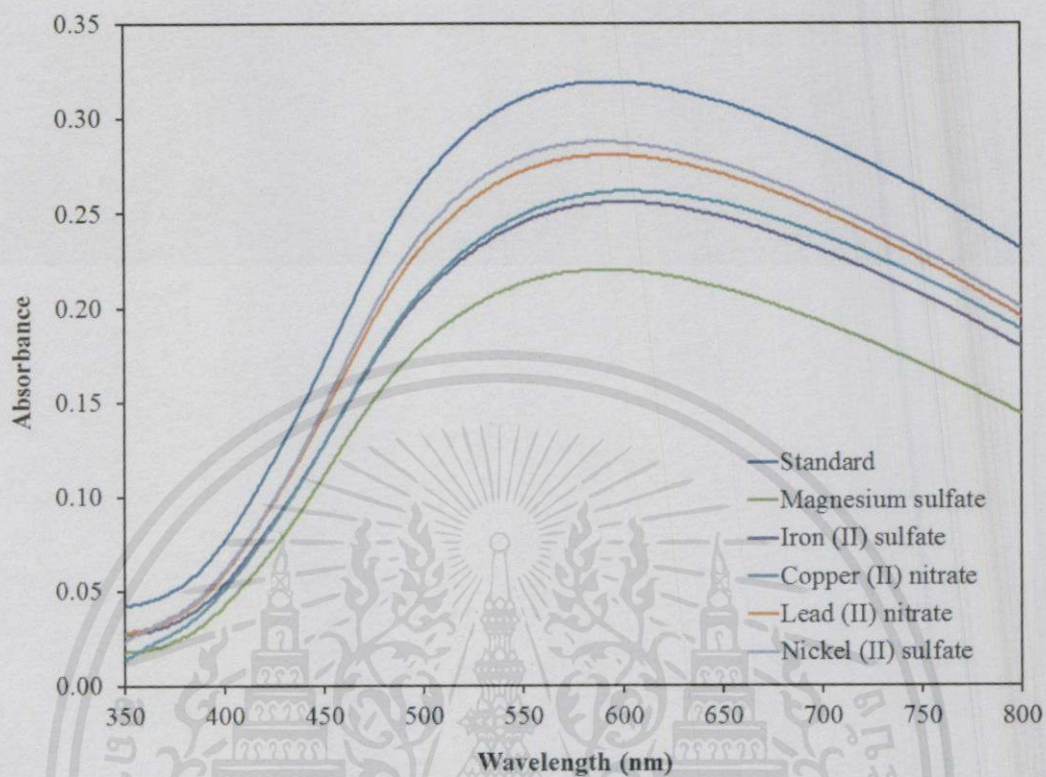
2) การหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (RSD)

$$\begin{aligned} \% \text{Recovery} &= \frac{5.321 - 0.000}{5.00} \times 100 \\ &= 106.4 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1.6$$

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
 จากโรงเรียนสตรีวรนาถบางเขน
 ปีการศึกษา 2553
 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง
 อีเมลล์ lily_kanrawee@hotmail.com
 เบอร์โทรศัพท์ 087-679-1293



ชื่อ - สกุล นางสาวจิราภรณ์ บุญมี
 วัน เดือน ปีเกิด 11 พฤศจิกายน 2535
 ประวัติการศึกษา
 ระดับมัธยมศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย
 จากโรงเรียนประเทียบวิทยาทาน
 ปีการศึกษา 2553
 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง
 อีเมลล์ jirapornboonmee@gmail.com
 เบอร์โทรศัพท์ 088-492-1668



ชื่อ - สกุล นางสาวนิภาพร วงศ์วิทย์
 วัน เดือน ปีเกิด 27 กันยายน 2535
 ประวัติการศึกษา
 ระดับมัธยมศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย
 จากโรงเรียนแม่พระกวิทยา
 ปีการศึกษา 2553
 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง
 อีเมลล์ nipawongwit@gmail.com
 เบอร์โทรศัพท์ 080-550-4085

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้นฉบับของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้