



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตรวจวัดหาปริมาณกลูตาไธโอนด้วยเทคนิคการตรวจวัดสี โดยอาศัย  
อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

A COLORIMETRIC APPROACH FOR MEASURING GLUTATHIONE  
USING LABEL-FREE SILVER TRIANGULAR NANOPRISM

นายเอกรัฐ เดชศรี

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2560

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตรวจวัดหาปริมาณกลูตาไธโอนด้วยเทคนิคการตรวจวัดสี โดยอาศัย  
อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

A COLORIMETRIC APPROACH FOR MEASURING GLUTATHIONE  
USING LABEL-FREE SILVER TRIANGULAR NANOPRISM

นายเอกวิรุฒ์ เตชศรี

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **148533**  
ใน.เดือน.ปี **31 ต.ค. 2560**

b.00.26598  
i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2560

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การตรวจวัดหาปริมาณกลูตาไรโอนด้วยเทคนิคการตรวจวัดสี โดยอาศัย  
อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโน

แหล่งเงิน คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2560 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 220,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ เดชศรี

ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมีของซิลเวอร์ไอออนด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ โดยใช้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตเป็นตัวรักษาเสถียรภาพอนุภาคเงินระดับนาโน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใช้เป็นตัวกัดอนุภาคเพื่อให้ได้อนุภาครูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน สีของสารละลายผสมจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีเหลืองเข้มอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นสารละลายคอลลอยด์จะเปลี่ยนเป็นสีส้ม แดง ม่วง และน้ำเงิน ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงคุณลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยมีค่าการการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 602 นาโนเมตร สารละลายคอลลอยด์นี้ถูกนำมาใช้เป็นตัวรับรู้การเปรียบเทียบสี ในการวิเคราะห์หากลูต้าไรโอน โดยอาศัยการเปลี่ยนไปของคุณสมบัติทางแสงของสารละลายคอลลอยด์ที่จะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของลูต้าไรโอน โดยให้ผลการวิเคราะห์หกลูต้าไรโอนในช่วงความเป็นเส้นตรงระหว่าง 0.1 ถึง 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดและขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ มีค่าเท่ากับ  $0.1068 \pm 0.005$  และ  $0.3560 \pm 0.005$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าร้อยละของการคืนกลับให้ผลที่น่าพึงพอใจ อยู่ในช่วง 101.1–112.3% และ 103.7–110.3% เมื่อนำไปตรวจวัดลูต้าไรโอนในสารตัวอย่างน้ำกลั่นและเลือด ตามลำดับ

คำสำคัญ : ลูต้าไรโอน เทคนิคการตรวจวัดเชิงสี วิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title:** A COLORIMETRIC APPROACH FOR MEASURING GLUTATHIONE USING LABEL-FREE SILVER TRIANGULAR NANOPRISM

**Researcher:** Ekarat Detsri

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

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

## ABSTRACT

Silver triangular nanoplates (AgTNPs) were synthesized by chemical reduction of silver ions with  $\text{NaBH}_4$  by using sodium citrate as the stabilizing agent.  $\text{H}_2\text{O}_2$  was used as the etchant for the triangular nanoplates formation. The color of the mixture solution was changed rapidly from light yellow to dark yellow. After that the colloidal solution was turned to orange, red, purple and blue, respectively, indicating the formation of AgTNPs. The extinction spectrum was exhibited a surface plasmon resonance (SPR) at the wavelength 602 nm. As these colloidal solutions are to be used as a glutathione colorimetric sensor, the changes in optical properties of the solutions were evaluated for various glutathione concentrations. The AgTNPs solution was exhibited excellent color changes of glutathione with a linear range between 0.1 and 1.0 ppm. The limit of detection (LOD) and limit of quantitation (LOQ) were  $0.1068 \pm 0.005$  and  $0.3560 \pm 0.005$  ppm, respectively. The recovery values of AgTNPs solution are satisfactory in the range of 101.1–112.3% and 103.7–110.3% when applied to determining glutathione in distilled water and plasma samples, respectively.

**Keywords :** Glutathione, Colorimetric method, Chemical reduction method, Silver triangular nanoplate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน ทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภท เงินอุดหนุนทั่วไป/เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

นายเอกรัฐ เดชศรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 วิทยาศาสตร์นาโนและนาโนเทคโนโลยี.....	4
2.1.1 ประเภทของนาโนเทคโนโลยี.....	6
2.1.1.1 วัสดุนาโน (Nanomaterial).....	6
2.1.1.2 นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (Nanobiotechnology).....	6
2.1.1.3 นาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์ (Nanomedicine).....	7
2.2 อนุภาคเงินระดับนาโน (Silver nanoparticles).....	8
2.2.1 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน.....	8
2.2.1.1 วิธีการยิงเลเซอร์ (Laser ablation).....	8
2.2.1.2 วิธีการใช้ไมโครเวฟ (Microwave).....	9
2.2.1.3 วิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction).....	10
2.2.1.4 วิธีเชิงแสงทางเคมี (Photochemical synthesis).....	10
2.2.2 อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (Silver triangular nanoplates).....	11
2.2.2.1 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน.....	11
2.3 เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance).....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 กลูต้าไธโอน .....	14
2.4.1 ข้อมูลทั่วไปของกลูต้าไธโอน .....	14
2.4.2 โครงสร้างทางเคมีของกลูต้าไธโอน .....	14
2.4.3 คุณสมบัติของกลูต้าไธโอน .....	15
2.4.3.1 Antioxidant .....	15
2.4.3.2 Detoxification .....	15
2.4.3.3 Immune Enhancer .....	15
2.4.4 ประโยชน์ของกลูต้าไธโอน .....	16
2.4.4.1 การรักษาโรค .....	16
2.4.4.2 อาหารเสริมและเครื่องสำอาง .....	16
2.4.5 ข้อห้ามและข้อควรระวัง .....	16
2.4.6 ค่ามาตรฐานความปลอดภัย .....	16
2.4.7 ผลข้างเคียงจากกลูต้าไธโอน .....	17
2.4.7.1 ความผิดปกติต่อดวงตา .....	17
2.4.7.2 โรคเมเร็งผิวหนัง .....	17
2.5 เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) .....	17
2.5.1 โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) .....	18
2.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ (Characterizations) .....	21
2.6.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง .....	21
2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน .....	23
2.6.3 พูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ .....	24
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	25
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>35</b>
3.1 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNP) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) .....	35
3.1.1 สารเคมี .....	35
3.1.2 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ .....	36
3.1.3 การศึกษาสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน .....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การเตรียมแผ่นฟิล์มของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยอาศัยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique).....	38
3.2.1 การเตรียมพื้นผิวแผ่นฟิล์มบางให้มีคุณสมบัติความชอบน้ำ (Primer).....	38
3.2.2 การศึกษากลศาสตร์การดูดซับของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์ม .....	39
3.3 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน	
3.3.1 สารเคมี .....	40
3.3.2 การศึกษาหาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน.....	41
3.3.3 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM ต่อสารละลายกลูต้าไธโอน.....	42
3.3.4 การศึกษาหาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM.....	43
3.4 การศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM....	44
3.4.1 การศึกษาความเป็นเส้นตรง.....	44
3.4.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection) และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation).....	45
3.4.3 การศึกษาหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery).....	46
3.4.4 การศึกษาอิทธิของพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์.....	48
3.4.5 การศึกษาผลกระทบของตัวรบกวนที่มีผลต่อตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์.....	49
3.5 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน.....	50
3.5.1 การศึกษาหาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	52
4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs).....	52
4.1.1 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไซเตียมโบโรไฮไดรด์.....	52
4.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน .....	56
4.1.2.1 การศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน .....	56
4.1.2.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน .....	58
4.2 การศึกษาสภาวะต่างๆ ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique).....	60
4.2.1 การศึกษากลศาสตร์การดูดซับของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์ม (Kinetic adsorption).....	61
4.2.1.1 สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มที่ความเข้มข้นไซเตียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM.....	61
4.2.1.2 สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มที่ความเข้มข้นไซเตียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM.....	62
4.2.1.3 สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มที่ความเข้มข้นไซเตียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM.....	63
4.2.1.4 สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มที่ความเข้มข้นไซเตียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM.....	64
4.3 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายและแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน.....	66
4.3.1 การศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน .....	66
4.3.1.1 การศึกษาอัตราส่วนของปริมาณสารละลายอนุภาครูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอนที่เหมาะสม .....	66
4.3.1.2 การศึกษาความเป็นเส้นตรงของสารละลายกลูต้าไธโอน .....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1.3 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD).....	72
4.3.1.4 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ).....	72
4.3.1.5 การศึกษาค่าร้อยละคืนกลับของสารมาตรฐาน (%Recovery) .....	72
4.3.1.6 การศึกษาผลกระทบของตัวรบกวน (Interference) ที่มีผลต่อการ วิเคราะห์.....	73
4.3.1.7 การศึกษาอิทธิพลค่าพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อการวิเคราะห์ กลูต้าไธโอน .....	76
4.3.2 การศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยแผ่นฟิล์มบาง ขนาดนาโนอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน .....	80
4.3.2.1 การศึกษาคุณลักษณะของการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วย แผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน.....	80
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>86</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	87
เอกสารอ้างอิง .....	88
ภาคผนวก.....	95
ภาคผนวก ก การเตรียมสารละลาย.....	96
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง .....	99
ประวัติผู้เขียน.....	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุบวก (Polycation).....	19
2.2 ตัวอย่างของโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุลบ (Polyanion).....	20
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน .....	35
3.2 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์.....	37
3.3 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์คุณลักษณะของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน....	38
3.4 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมพื้นผิวแผ่นฟิล์มบาง .....	38
3.5 สารเคมีที่ใช้ศึกษาการดูดซับของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์ม.....	39
3.6 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาการดูดซับของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์ม .....	40
3.7 สารเคมีที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน .....	40
3.8 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน.....	41
3.9 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน .....	42
3.10 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน .....	43
3.11 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาความเป็นเส้นตรงของวิธีการหาปริมาณกลูต้าไธโอน.....	45
3.12 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาขีดจำกัดของการตรวจวัดและขีดจำกัดของการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอน .....	46
3.13 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาหาค่าร้อยละของการคืนกลับ .....	48
3.14 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาอิทธิของพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน.....	49
3.15 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาตัวรบกวนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน .....	50
3.16 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน .....	51
4.1 ค่าความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ของการดูดกลืนแสงอนุภาคเงินระดับนาโนที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ .....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.2 จำนวนอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ แตกต่างกัน จากรูปที่ 4.3 .....	57
4.3 หมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิติเรตและหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยม ระดับนาโน จากรูปที่ 4.5.....	59
4.4 ผลของเวลาในการดูดซับอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มบางที่ ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ.....	65
4.5 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่างๆ .....	69
4.6 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)....	72
4.7 ค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ในตัวอย่างน้ำกลั่นและเลือด .....	73
4.8 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ มีตัวรบกวนชนิดต่างๆ .....	75
ก.1 การเตรียมความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน .....	97
ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Blank ที่นำมาคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของ การตรวจวัด (LOD).....	99
ข.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Blank ที่นำมาคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของ การวิเคราะห์ (LOQ).....	100
ข.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่าง.....	101
ข.4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับ นาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 10-800 ppm.....	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ริชาร์ด วิลลิปส์ ไฟน์แมน (ค.ศ. 1918-1988) บิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี .....	4
2.2 ขนาดของนาโนเทคโนโลยี .....	5
2.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน .....	12
2.4 การเกิดเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ .....	13
2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของกลูต้าไธโอน .....	15
2.6 กระบวนการสร้างแผ่นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการขึ้นรูปขั้นต่อขั้น .....	18
2.7 ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ .....	22
2.8 ส่วนประกอบของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน .....	23
3.1 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ .....	37
3.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) .....	37
3.3 การปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุรองรับกระจกสไลด์ .....	39
3.4 การศึกษาหลักการดูดซับของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบน แผ่นฟิล์ม .....	40
3.5 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนใน การวิเคราะห์กลูต้าไธโอน .....	41
3.6 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM ต่อกลูต้าไธโอน .....	42
3.7 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM ในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน .....	43
3.8 การศึกษาความเป็นเส้นตรงของวิธีการหาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงิน รูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM .....	45
3.9 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดและขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ .....	46
3.10 การศึกษาหาร้อยละของการคืนกลับ .....	47
3.11 การศึกษาอิทธิของพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ .....	49
3.12 การศึกษาผลกระทบของตัวรบกวนที่มีผลต่อสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ .....	50
3.13 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนใน การวิเคราะห์กลูต้าไธโอน .....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน และ (b) สีของสารละลายที่สังเคราะห์โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้นต่างๆ.....	53
4.2 กลไกปฏิกิริยาการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs).....	55
4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (a) 0.18 mM, (b) 0.19 mM, (c) 0.21 mM และ (d) 0.24 mM.....	57
4.4 กราฟแท่งแสดง size distribution ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (a) 0.18 mM, (b) 0.19 mM, (c) 0.21 mM และ (d) 0.24 mM.....	58
4.5 FT-IR สเปกตรัมของ (a) ไตรโซเดียมซิเตรต, อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (b) 0.18 mM, (c) 0.19 mM, (d) 0.21 mM และ (e) 0.24 mM.....	59
4.6 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบางที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM.....	61
4.7 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบางที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM.....	62
4.8 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบางที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM.....	63
4.9 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบางที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM.....	64
4.10 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไรโอนในอัตราส่วนปริมาตรต่างๆ.....	67
4.11 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไรโอนที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน.....	69
4.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไธโอน.....	70
4.14 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น (a) blank, (b) 5.0 ppm, (c) 300 ppm และ (d) 700 ppm.....	71
4.15 กราฟแท่งแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุดของตัวรับกวน ( $\lambda_{max}$ ) กับชนิดของตัวรับกวนที่ความเข้มข้นต่างๆ .....	74
4.16 ภาพสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมที่มีตัวรับกวน Glutathione, CaSO <sub>4</sub> , KNO <sub>3</sub> , NaNO <sub>3</sub> , Uric acid, Glucose, Sucrose, Ascorbic acid, MgSO <sub>4</sub> และ FeSO <sub>4</sub> ความเข้มข้น 0.3 ppm.....	74
4.17 ภาพสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมที่มีตัวรับกวน Glutathione, CaSO <sub>4</sub> , KNO <sub>3</sub> , NaNO <sub>3</sub> , Uric acid, Glucose, Sucrose, Ascorbic acid, MgSO <sub>4</sub> และ FeSO <sub>4</sub> ความเข้มข้น 0.7 ppm .....	74
4.18 ภาพสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมที่มีตัวรับกวน Glutathione, CaSO <sub>4</sub> , KNO <sub>3</sub> , NaNO <sub>3</sub> , Uric acid, Glucose, Sucrose, Ascorbic acid, MgSO <sub>4</sub> และ FeSO <sub>4</sub> ความเข้มข้น 1.0 ppm .....	75
4.19 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนช่วงค่า pH ต่างๆ ที่สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.001 M.....	76
4.20 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ(b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนช่วงค่า pH ต่างๆ ที่สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.01 M .....	77
4.21 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ(b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนช่วงค่า pH ต่างๆ ที่สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M .....	78
4.22 ค่าคงที่การแตกตัวที่หมู่ฟังก์ชันต่างของกลูต้าไธโอน .....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 สูตรโครงสร้างทางเคมีของกลูต้าไธโอนเมื่อเกิดเป็น Glutathione protonate-deprotonate ที่ pH ต่างๆ .....	79
4.24 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน .....	81
4.25 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน .....	81
4.26 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน .....	82
4.27 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน .....	82
4.28 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 60 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน .....	83
4.29 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 60 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน .....	84
4.30 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 60 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน .....	84
4.31 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 60 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน .....	85
ข.1 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.1 – 0.9 ppm .....	103
ข.2 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 1 – 500 ppm .....	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.3 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลายเมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไรโอนที่ความเข้มข้น 0.1 – 0.9 ppm .....	105
ข.4 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลายเมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไรโอนที่ความเข้มข้น 1 – 500 ppm .....	106
ข.5 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลายเมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไรโอนที่ความเข้มข้น 0.1 – 0.9 ppm .....	107
ข.6 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลายเมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไรโอนที่ความเข้มข้น 1 – 500 ppm.....	108
ข.7 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลายเมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไรโอนที่ความเข้มข้น 0.1 – 0.9 ppm .....	109
ข.8 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลายเมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไรโอนที่ความเข้มข้น 1 – 500 ppm .....	110
ข.9 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลายเมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไรโอนที่ความเข้มข้น 10 – 800 ppm .....	111
ข.10 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไรโอน .....	112

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
AgTNPs	Silver Triangular Nanoplates
GSH	Glutathione
PDADMAC	Poly (diallyldimethyl ammonium chloride)
PSS	Poly(sodium 4-styrenesulfonate)
UV-vis spectrophotometry	Ultraviolet-visible spectrophotometry
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
TEM	Transmission Electron Microscope
a.u.	Arbitrary unit
nm	Nanometer: หน่วยความยาว นาโนเมตร
mL	Milliliter: หน่วยปริมาตร มิลลิลิตร
mM	Millimolar: หน่วยความเข้มข้น มิลลิโมลาร์
M	Molar: หน่วยความเข้มข้น โมลาร์
mol/L	Mole Per Liter: หน่วยความเข้มข้น ปริมาณสารต่อปริมาตรสารละลาย
ppm	Part Per Million: หน่วยความเข้มข้น หนึ่งในล้านส่วน
% w/w	Percent weight by weight: เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
°C	Degree Celsius: หน่วยวัดอุณหภูมิ องศาเซลเซียส
ND	Not Detected: ตรวจวัดไม่พบ
$\lambda_{\max}$	ค่าความยาวคลื่นสูงสุด
$E^0$	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผล

กลูต้าไธโอน เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญในร่างกาย มีคุณสมบัติเป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง ที่ร่างกายมนุษย์สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้เอง โดยทำหน้าที่สำคัญ คือ สร้างภูมิคุ้มกันให้แก่ร่างกาย ขจัดสารพิษในร่างกาย เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และเป็นโคแฟกเตอร์ให้กับเอนไซม์ต่างๆ ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ทางการแพทย์จึงได้มีการนำกลูต้าไธโอนมาทดลองใช้ในการรักษาโรค เช่น ภาวะเป็นหมันในเพศชาย ปลายเส้นประสาทอักเสบ มะเร็งกระเพาะอาหาร หรือมะเร็งต่อมลูกหมาก วิธีการรักษาทำโดยการฉีดกลูต้าไธโอนเข้าร่างกายทางหลอดเลือดดำหรือเข้าที่กล้ามเนื้อ ผลข้างเคียงอย่างหนึ่งที่น่าแปลกใจ คือ ผู้ป่วยที่ได้รับการรักษาด้วยการฉีดกลูต้าไธโอนนั้นมีสีผิวที่ขาวขึ้น เนื่องมาจากกลูต้าไธโอนสามารถยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส (Tyrosinase) ได้ และส่งผลให้เม็ดสีของผิวหนังเปลี่ยนจากเม็ดสีน้ำตาลดำเป็นเม็ดสีชมพูขาว ด้วยเหตุนี้จึงมีผู้คนพยายามนำผลข้างเคียงของกลูต้าไธโอนนี้มาใช้ในการทำให้ผิวขาวขึ้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและเสริมความงามต่างๆ ที่มีส่วนผสมของกลูต้าไธโอนทั้งในรูปแบบรับประทานและในรูปแบบยาฉีดเข้าร่างกายโดยตรง ออกสู่ท้องตลาดอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากร่างกายสามารถผลิตกลูต้าไธโอนขึ้นเองได้ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องรับประทานหรือฉีดกลูต้าไธโอนเข้าไปในร่างกายเพิ่ม หรือหากต้องการเพิ่มปริมาณกลูต้าไธโอนเข้าสู่ร่างกาย ควรอยู่ที่ปริมาณ 60-250 มิลลิกรัมต่อวัน ซึ่งเป็นปริมาณที่แพทย์อนุญาต ถ้าหากมีปริมาณมากกว่านั้นอาจจะทำให้เกิดอาการแพ้จนถึงขั้นช็อกและเสียชีวิตเฉียบพลัน หรือสะสมอยู่ในร่างกายในระยะยาวจะส่งเกิดผลข้างเคียงเกิดขึ้นกับร่างกายได้ภายหลัง เช่น โรคมะเร็ง เป็นต้น [1, 2]

การวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนในปัจจุบัน มีหนึ่งวิธีที่มีความน่าสนใจ คือการตรวจวัดโดยใช้เทคนิค Stable Isotope Dilution Analysis (SIDA) และ LC-MS/MS [3] ถึงแม้ว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่มีความแม่นยำและรวดเร็วในการตรวจวัด ใช้ปริมาณตัวอย่างในการวิเคราะห์น้อย และให้ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) ที่ต่ำ แต่วิธีการวิเคราะห์นี้มีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างค่อนข้างยาก และใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่มีราคาแพง อีกทั้งมีความยุ่งยากในเรื่องของการเตรียมสารตัวอย่าง

ในยุคแห่งความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นาโนเทคโนโลยี เป็นอีกหนึ่งศาสตร์ที่ได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา นาโนเทคโนโลยี คือเทคโนโลยีประยุกต์ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการ การสังเคราะห์สสารหรือวัสดุในระดับของอะตอมและโมเลกุล ที่มีขนาดเล็กในช่วงประมาณ 1 ถึง 100 นาโนเมตร ด้วยนาโนเทคโนโลยีนี้ทำให้เกิดสสารระดับนาโนหรือเรียกกันว่า อนุภาคระดับนาโน ซึ่งส่งผลให้สสารหรือวัสดุนั้นๆ มีสมบัติที่หลากหลายและมีความเฉพาะตัว ไม่ว่าจะเป็นสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี หรือสมบัติทางแสง เป็นต้น ในหลายปีที่ผ่านมา มีนักวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคในระดับนาโน หนึ่งในนั้นคืออนุภาคเงินระดับนาโน ซึ่งสมบัติทางแสงเป็นหนึ่งในสมบัติที่จำเพาะและมีความน่าสนใจ กล่าวคือ เมื่ออนุภาคเงินระดับนาโนมีรูปร่างกลมจะแสดงสีลักษณะจำเพาะคือ สีเหลือง แต่หากอนุภาคเงินระดับนาโนมีรูปร่างเปลี่ยนไป อาทิเช่น อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน จะแสดงสีที่มีคุณลักษณะจำเพาะที่เปลี่ยนไปคือ สีน้ำเงิน เป็นต้น ด้วยสมบัติทางแสงดังที่กล่าวของอนุภาคเงินระดับนาโน ทำให้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น นำไปใช้เป็นตัวเร่ง ใช้ในแวดวงเทคโนโลยีชีวภาพ อุปกรณ์ทางไฟฟ้า ใช้เป็นตัวตรวจวัดทางการแพทย์ แม้กระทั่งใช้ทำเป็นตัวรับรู้ทางสี เป็นต้น

ด้วยเหตุดังที่กล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนขึ้นจากการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) เพื่อนำคุณสมบัติทางเคมีและทางแสงของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมาสร้างเป็นตัวรับรู้การเปรียบเทียบเชิงสี (Colorimetric sensor) ในการตรวจวัดกลูต้าไธโอน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย มีความไวและมีความจำเพาะสูงในการตรวจวัดกลูต้าไธโอน งานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาเป็น 3 ส่วนคือ การสังเคราะห์สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ส่วนที่สอง คือนำอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมาสร้างแผ่นฟิล์มบาง โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) และส่วนสุดท้าย คือการศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายและแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอน โดยอาศัยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี (Colorimetric method)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method)
- 2) เพื่อสร้างแผ่นฟิล์มบางของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer Technique)
- 3) เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี (Colorimetric method) โดยการใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน
- 4) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนโดยใช้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ศึกษาปริมาณของโซเดียมโบรโมไฮไดรด์ที่มีผลต่อรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method)

2) ศึกษาประสิทธิภาพของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัววิเคราะห์ปริมาณกลูต้าไธโอน

3) ศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัววิเคราะห์ปริมาณกลูต้าไธโอน

### 1.4 สมมติฐานของงานวิจัย

1) สามารถใช้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี (Colorimetric method) ได้

2) สามารถใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี (Colorimetric method) ได้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนและแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่ำได้

2) ทำให้ได้วิธีในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนที่มีประสิทธิภาพ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วิทยาศาสตร์นาโนและนาโนเทคโนโลยี

วิทยาศาสตร์นาโนและนาโนเทคโนโลยี ก่อกำเนิดจากแนวความคิดของนักฟิสิกส์ชาวอเมริกันที่มีชื่อว่า ริชาร์ด ฟิลลิปส์ ฟายน์แมน (Richard Phillips Feynman) ซึ่งได้กล่าวไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1959 ระหว่างการบรรยายทางวิชาการ ณ สถาบันเทคโนโลยีแคลิฟอร์เนีย ในหัวข้อเรื่องที่ว่า “There is plenty of room at the bottom” โดยได้บรรยายถึงแนวความคิดความเป็นไปได้ของนาโนเทคโนโลยี ซึ่งเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงอะตอมให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ และโอกาสของประโยชน์ที่ได้จากการจัดการในระดับอะตอม ซึ่งการบรรยายในครั้งนั้นถือเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มหันมาสนใจและสร้างเครื่องมือในการจัดเรียงอะตอม โดยแนวคิดนี้ทำให้ฟายน์แมนได้รับการยกย่องให้เป็น “บิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี” ในเวลาต่อมา [4]

ต่อมาในปี ค.ศ. 1974 ศาสตราจารย์โนริโอะ ทานิกุชิ (Norio Taniguchi) แห่งมหาวิทยาลัยวิทยาศาสตร์โตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ได้ริเริ่มใช้คำว่า นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) ขึ้นเพื่อที่จะบรรยายว่า เป็นเทคโนโลยีการผลิตที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงเป็นพิเศษและก้าวข้ามพรมแดนมิติของเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบัน [5] และในปี ค.ศ. 1981 เกร็ด บินนิง (Gerd Binnig) และ ไฮน์ริช โรห์เออร์ (Heinrich Rohrer) นักวิจัยในห้องปฏิบัติการของบริษัทไอบีเอ็ม ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ได้มีการพัฒนาและประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในอุโมงค์ (Scanning Tunneling Microscope; STM) เป็นครั้งแรก [6] ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ให้นักวิทยาศาสตร์สามารถที่จะเห็นภาพการจัดเรียงอะตอม หรือโมเลกุลขนาดเล็กได้เป็นครั้งแรก จากผลงานการประดิษฐ์เครื่องมือนี้ทำให้ทั้งสองได้รับรางวัลโนเบล ในปี ค.ศ. 1986 และทำให้คนเริ่มหันมาสนใจและมีการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีมากยิ่งขึ้น

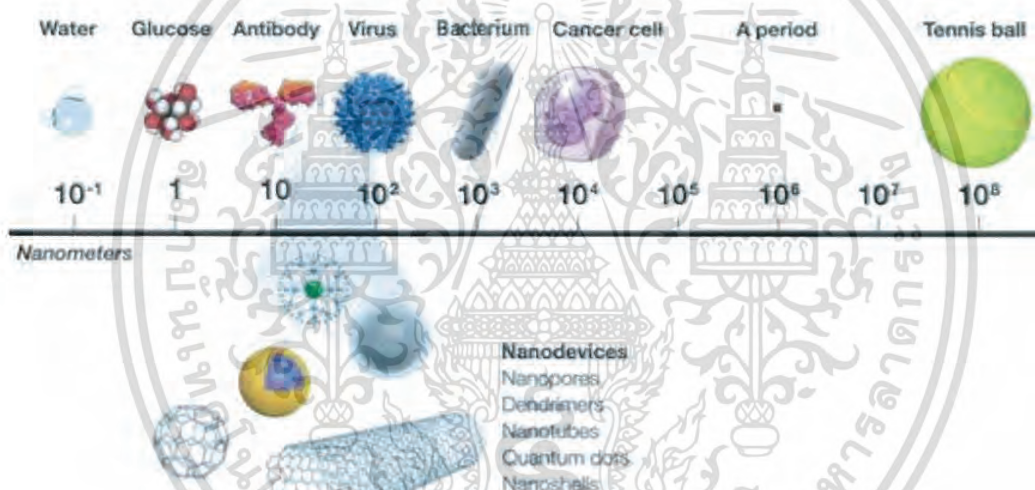


รูปที่ 2.1 ริชาร์ด ฟิลลิปส์ ฟายน์แมน (ค.ศ. 1918-1988) บิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนศาสตร์ (Nanoscience) คือ วิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวัสดุ อินทรีย์ อนินทรีย์ และรวมไปถึงสารชีวโมเลกุล ที่มีโครงสร้างขนาดเล็กประมาณ 1-100 นาโนเมตร โดย 1 นาโนเมตรมีขนาดเท่ากับ 1 ใน 1 พันล้านเมตรหรือยาวเท่ากับบอตะอมของไฮโดรเจนต่อเรียงกัน 10 อะตอม โดยคุณสมบัติของวัสดุนาโนจะแตกต่างจากวัสดุขนาดใหญ่ (bulk materials) ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ล้วนแล้วแต่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว [7]

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้าง การวิเคราะห์ การสังเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมากๆ ในระดับนาโนเมตร รวมถึงการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมากๆ อาทิเช่น การเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติดีขึ้น อาทิคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ซึ่งจะเกิดประโยชน์และตรงต่อความต้องการของผู้นำไปใช้งาน [8]



รูปที่ 2.2 ขนาดของนาโนเทคโนโลยี [9]

จากรูปที่ 2.2 แสดงถึงช่วงของขนาดของนาโนเทคโนโลยีที่มีขนาดอยู่ในช่วง 10-100 นาโนเมตรที่เมื่อเทียบกับขนาดของลูกบอลเทนนิสที่มีขนาด  $10^8$  นาโนเมตรแล้วแสดงให้เห็นเลยว่า วัสดุหรืออนุภาคที่อยู่ในช่วงนาโนเมตรมีขนาดเล็กมากโดยที่สายตาของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้

ในปัจจุบันมีความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยีเป็นอย่างมาก ทำให้เกิดการประยุกต์ใช้ความรู้ในด้านวิทยาศาสตร์กับนาโนเทคโนโลยีในงานด้านต่างๆ มากยิ่งขึ้น อาทิเช่น ในงานทางด้านวัสดุศาสตร์ (Nanomaterial) เทคโนโลยีชีวภาพ (Nanobiotechnology) และเทคโนโลยีทางการแพทย์ (Nanomedicine) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.1 ประเภทของนาโนเทคโนโลยี

### 2.1.1.1 วัสดุนาโน (Nanomaterial)

หมายถึง วัสดุที่มีมิติภายนอกหรือโครงสร้างภายใน หรือโครงสร้างที่พื้นผิวอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยวัสดุนาโนสามารถแบ่งออกได้สองกลุ่ม ตามแหล่งกำเนิด คือ วัสดุนาโนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นวัสดุนาโนที่เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติ ซึ่งอาจพบได้หลังเกิดไฟฟ้าหรือภูเขาไฟระเบิด และวัสดุนาโนที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์เป็นวัสดุที่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติหรือองค์ประกอบที่จำเพาะ [10] ตัวอย่างของวัสดุนาโนที่สำคัญ ได้แก่

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นทั้งสารกึ่งตัวนำและเซรามิก นำไปใช้เป็น ส่วนผสมของเครื่องสำอาง เพื่อให้บริเวณที่ใช้มีความสว่างขึ้นและอยู่ทน เนื่องจากสารนี้มีลักษณะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (photocatalyst) จึงได้ถูกนำมาใช้ฆ่าเชื้อโรคและทำความสะอาดสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำ หรือตัวฟอกอากาศ แต่เมื่ออนุภาคไทเทเนียมมีขนาดเล็กลงจนถึงระดับนาโน ทำให้สัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้นมากและสมบัติสำคัญบางอย่าง เช่น การหักเหแสงนั้นจะเปลี่ยนไป ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาและประโยชน์ต่อการใช้งานมากขึ้น

เงิน (Ag) เป็นโลหะทรานซิชันมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ การนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดีจึงมีการนำมาประยุกต์ใช้ทำเป็นส่วนประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้าหลากหลายชนิด แต่เมื่อทำให้อนุภาคเงินมีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตร ทำให้พบว่า อนุภาคเงินในระดับนาโนเมตรสามารถต้านการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่อยู่ตามธรรมชาติได้ โดยจะเข้าไปเกาะที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถหายใจได้และตายไปในที่สุดด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้ผลิตตู้เย็น และผลิตภัณฑ์ในการเก็บผัก ผลไม้และอาหารอื่นๆ เนื่องจากสามารถช่วยรักษาความเย็นและช่วยยืดอายุของอาหารได้ และยังนำไปประยุกต์ใช้ผสมในน้ำยาบ้วนปากเพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรียในช่องปาก และใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุทำหน้ากากปิดปาก ปิดจมูก และนอกจากนี้ยังนำไปใช้เป็นส่วนผสมในสีทาบ้านซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดเชื้อราได้อีกด้วย [11] ในอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มนำอนุภาคเงินในระดับนาโนเมตรไปประยุกต์ใช้ในการผลิตผ้ากันน้ำ ในการผสมอนุภาคเงินระดับนาโนลงในเส้นใยผ้ามักจะใช้อัตราส่วน อนุภาคเงินระดับนาโน 1 ส่วนต่อเส้นใย 1 ล้านส่วนเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและช่วยระงับกลิ่นเหม็น และคุณสมบัติที่น่าสนใจอีกหนึ่งของอนุภาคเงินระดับนาโน คือ เมื่อขนาดและรูปร่างเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อสมบัติทางแสง ซึ่งจะมีความจำเพาะสูงทำให้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ทำตัวรับรู้ทางสีในการตรวจหาโลหะหนักในตัวอย่าง เช่น พรอท ตะกั่ว เป็นต้น

### 2.1.1.2 นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (Nanobiotechnology)

เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีในด้านชีวภาพและด้านการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากในปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ทำให้มีการพัฒนาและคิดค้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆขึ้น เพื่อนำมาใช้ช่วยแก้ปัญหาและอำนวยความสะดวกในด้านชีวภาพและการเกษตรของมนุษย์มากยิ่งขึ้น [10]

ตัวอย่างการนำนาโนเทคโนโลยีชีวภาพมาประยุกต์ใช้ในการเกษตร ได้แก่ การสร้างฟองนาโน (Nano bubbles) เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถผลิตฟองนาโน ที่มีความเสถียรสูงได้เป็นครั้งแรก โดยคณะผู้วิจัยจากสถาบันความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST) โดย Nano bubbles คือฟองก๊าซที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ซึ่งโดยปกติมักจะเกิดขึ้นอย่างชั่วคราวในระหว่างการผลิต micro bubbles แต่จะสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสภาวะที่ไม่เหมาะสมและมีเสถียรภาพต่ำ จึงได้มีการพัฒนาและคิดค้นทำให้สามารถผลิตฟองอากาศนาโนที่มีเสถียรภาพสูงได้สำเร็จ มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ แดกตัวได้ยากในน้ำและยังสามารถกักเก็บก๊าซโอโซน (ozone) ไว้ภายในฟองได้นาน ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้จึงได้มีการนำเอาไปประยุกต์ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้ได้เป็นระยะเวลาานานนอกจากนี้ได้นำเอาฟองนาโนมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการประมง และการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเศรษฐกิจ เช่น ปลา หอย และกุ้ง [12]

### 2.1.1.3 นาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์ (Nanomedicine)

การนำนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์เป็นไปอย่างรวดเร็วและกว้างขวางและรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศสหรัฐอเมริกา กลุ่มประเทศยุโรป กลุ่มประเทศเอเชีย เช่น จีน เกาหลี อินเดีย และสิงคโปร์ ความรู้ใหม่ๆเหล่านี้ทำให้เกิดเป็นศาสตร์แขนงใหม่ที่มีชื่อเรียกว่า “NANOMEDICINE” ซึ่งหมายถึง การนำเอานาโนเทคโนโลยีมาใช้เกี่ยวกับทางด้านสุขภาพไม่ว่าจะเป็นการป้องกัน การคัดกรอง และการรักษาโรคต่างๆ [13] การนำนาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์มาประยุกต์ใช้นั้นได้มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก

ตัวอย่างการนำนาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์มาประยุกต์ใช้ ได้แก่ พลาสแตอร์นาโน เป็นพลาสแตอร์สำหรับปิดบาดแผลที่เกิดจากการถูกไฟไหม้และบาดแผลเรื้อรังต่างๆ โดยการผสมอนุภาคเงินในระดับนาโน (silver nanoparticle) ที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ถึง 150 ชนิด ลงไปเป็นส่วนประกอบของพลาสแตอร์ ซึ่งพบว่า พลาสแตอร์นาโนนี้สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาอย่างรวดเร็วเพียง 30 นาทีเท่านั้นนับจากที่ติดพลาสแตอร์นาโนนี้ลงบนบาดแผล อีกทั้งอนุภาคเงินในระดับนาโนที่เคลือบไว้กับพลาสแตอร์ ยังสามารถคงประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้อย่างต่อเนื่องนานหลายวัน ซึ่งพลาสแตอร์นาโนนี้ได้ถูกนำมาใช้ในโรงพยาบาลที่อเมริกาเหนือเพื่อรักษาผู้ป่วยที่ได้รับบาดแผลจากไฟไหม้อย่างรุนแรงและบาดแผลเรื้อรังที่เสี่ยงสำหรับการติดเชื้อ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 อนุภาคเงินระดับนาโน (Silver nanoparticles)

อนุภาคเงินระดับนาโน มีคุณสมบัติเด่นในเรื่องของสมบัติทางแสงที่มีความสัมพันธ์กับขนาดและรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไป สมบัติทางแสงก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อนุภาคเงินระดับนาโนเป็นที่สนใจและมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกิดขึ้นมากมายที่ได้มีการนำอนุภาคเงินระดับนาโนไปประยุกต์ใช้เป็นเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี (Colorimetric method) เนื่องจากสมบัติทางแสงเป็นสิ่งที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ทำให้ง่ายต่อการสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้น และวัสดุที่ใช้มีราคาไม่แพง [15]

การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนจะมีด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีทางกายภาพ (Physical approach) ได้แก่ วิธีการยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) และวิธีการใช้ไมโครเวฟ (Microwave) วิธีที่สองจะเป็นวิธีทางเคมี (Chemical approach) ได้แก่ วิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) และวิธีเชิงแสงทางเคมี (Photochemical synthesis) [16]

ในแต่ละวิธีการสังเคราะห์จะได้รูปร่างและขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติต่างๆอีกด้วย รูปร่างที่พบบ่อย ได้แก่ รูปทรงกลม รูปทรงสี่เหลี่ยม และพีระมิด เป็นต้น [17]

### 2.2.1 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโน

#### 2.2.1.1 วิธีการยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation)

การสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนโดยการยิงด้วยเลเซอร์ของสารที่เป็นโลหะในสารละลาย คุณลักษณะเฉพาะของรูปแบบอนุภาคโลหะและการยิงที่มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่กระทบกับโลหะเป้าหมาย ระยะเวลาพัลส์ของเลเซอร์ ระยะเวลาการยิงและผลกระทบจากของเหลวที่เกิดจากสารลดแรงตึงผิว พลูเออนซ์ของเลเซอร์เป็นหนึ่งตัวแปรที่สำคัญที่สุด โดยอนุภาคโลหะที่ออกมาจากเป้าหมายต้องใช้พลังงานต่ำที่สุด ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนที่พบโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่อพลูเออนซ์ของเลเซอร์เพิ่มขึ้น นอกจากพลูเออนซ์ของเลเซอร์แล้วจำนวนภาพเลเซอร์ เช่น เวลาที่ใช้ในระหว่างการกลายเป็นไอเลเซอร์ มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นและสัญญาณวิทยาของอนุภาคโลหะที่ปล่อยออกมาในของเหลว ความเข้มข้นของอนุภาคโลหะภายใต้แสงเลเซอร์คาดว่า จะเพิ่มขึ้น แต่สามารถทำให้อิ่มตัวได้เนื่องจากการดูดกลืนแสงในคอลลอยด์ที่มีความเข้มข้นสูงในอนุภาคโลหะ [18]

จากงานวิจัยของบาวทินกิชซาและคณะ [19] ได้ทำการเตรียมอนุภาคนาโนรูปร่างกลมระดับนาโนด้วยวิธีการยิงด้วยเลเซอร์ในอากาศ ในขั้นตอนการสังเคราะห์จะต้องทำการเตรียมแผ่นซิลเวอร์ก่อน โดยนำไปทำความสะอาดด้วยเอทานอลและล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ และจากนั้นนำแผ่นซิลเวอร์ที่เตรียมไว้แล้วยึดให้อยู่กับที่และห่างจากขั้วสเตรทประมาณ 0.5 ถึง 1.5 เซนติเมตรในการยิงลำแสงเลเซอร์จะยิงทำมุม 60 องศากับแนวระนาบและจะโฟกัสไปที่พื้นผิวของแผ่นซิลเวอร์เพื่อที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เก็บอนุภาคที่ออกมาไว้บนซับสเตรท แหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่ใช้คือ Nd:YVO<sub>4</sub> และใช้ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ 532 นาโนเมตร ระยะเวลาในการปล่อยเลเซอร์คือ 10 นาที ผลที่ได้พบว่า อนุภาคเงินระดับนาโนที่ได้มีรูปร่างโค้งมนและมีขนาดไม่ถึง 50 นาโนเมตรและมีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมตัวกัน ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากระยะเวลาที่ปล่อยเลเซอร์น้อยเกินไป

จากงานวิจัยของทาเคชิ ชูจิและคณะ [20] ได้ทำการเตรียมอนุภาคนาโนรูปร่างกลมระดับนาโนด้วยวิธีการยิงด้วยเลเซอร์ในสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ในการสังเคราะห์จะนำแผ่นซิลเวอร์ใส่ลงในเซลล์ควอตซ์ จากนั้นเติมสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน และทำการยิงเลเซอร์เข้าไปที่แผ่นซิลเวอร์ โดยอนุภาคนาโนจะตกลงไปในสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน แหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่ใช้คือ Nd:YAG และใช้ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ 355 นาโนเมตร ระยะเวลาในการปล่อยเลเซอร์คือ 10 นาที ผลที่ได้พบว่า อนุภาคนาโนรูปร่างกลมระดับนาโนที่ได้มีขนาดเล็กกว่า 5 นาโนเมตร ประสิทธิภาพของการเกิดอนุภาคเพิ่มมากขึ้นซึ่งเทียบจากการยิงด้วยเลเซอร์ในน้ำ

#### 2.2.1.2 วิธีการใช้ไมโครเวฟ (Microwave)

การสังเคราะห์โดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟเป็นวิธีที่ง่าย แต่ยังไม่เป็นที่นิยมใช้แต่จากงานวิจัยของเค เจ ศรีราม และคณะ [21] พบว่า ข้อดีของวิธีการสังเคราะห์โดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟคือ สามารถให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาค่อนข้างสั้นในการสังเคราะห์ ทำให้ได้สารประกอบที่มีความบริสุทธิ์ และขนาดอนุภาคที่ได้เฉลี่ยมีขนาด 12 นาโนเมตร

วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยใช้ไมโครเวฟ จะทำโดยใช้แปรงทำเป็นแผ่นแม่แบบและเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ซึ่งแปรงที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นแม่แบบ และจะช่วยป้องกันการรวมตัวของอนุภาคนาโนอีกด้วย และจะใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโซเดียมเป็นตัวรีดิวซ์ โดยจะเกิดปฏิกิริยาภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟภายในเตาไมโครเวฟที่ใช้ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองน้ำตาลไปเป็นสีเทาดำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เกิดเป็นอนุภาคนาโนแล้ว โดยขนาดของอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโซเดียมและซิลเวอร์ไนเตรต

จากงานวิจัยของอูซึ จ้าวและคณะ [22] ได้กล่าวว่า การสังเคราะห์โดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟเป็นวิธีที่ง่ายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยจะใช้โซเดียมอัลจินเตเป็นตัวรีดิวซ์และตัวรักษาเสถียรภาพ เนื่องจากโซเดียมอัลจินเตจัดเป็นพอลิเมอร์ในธรรมชาติซึ่งมีราคาที่ไม่แพงและมีความเป็นพิษน้อย โดยจะเกิดปฏิกิริยาภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟภายในเตาไมโครเวฟโดยในการสังเคราะห์จะมีการควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 5 ถึง 11 สารละลายจะมีการเปลี่ยนสีอย่างช้าๆจากใสไม่มีสีไปเป็นสีน้ำตาลอ่อนเนื่องจากเกิดการรีดักชันของ Ag<sup>+</sup> ไปเป็น Ag<sup>0</sup> ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เกิดเป็นอนุภาคนาโนในระดับนาโนแล้ว โดยขนาดของอนุภาคเฉลี่ยแล้วอยู่ที่ 12 นาโนเมตรซึ่งขนาดที่ได้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรตและโซเดียมอัลจินेट และยังขึ้นอยู่กับค่าพีเอช รวมถึงเวลาในการฉายรังสีไมโครเวฟอีกด้วย

### 2.2.1.3 วิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction)

วิธีรีดักชันทางเคมีเป็นวิธีที่นิยมใช้ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ใช้สารเคมีน้อย และสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคเงินในระดับนาโนได้ [23] ด้วยวิธีรีดักชันทางเคมีจะเกี่ยวข้องกับเกิดรีดักชันของซิลเวอร์ไนเตรต โดยการใช้ตัวรีดิวซ์เป็นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ และตัวรักษาเสถียรภาพ เป็นไตรโซเดียมซิเตรท ไดไฮเดรท โดยมีปัจจัยในการป้องกันการเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโน ซึ่งวิธีนี้มีตัวแปรที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาค และการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโน หลายตัวแปร เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้นของตัวรักษาเสถียรภาพ และปริมาณของตัวรีดิวซ์ [24]

จากงานวิจัยของฮวงจู้ย วังและคณะ [25] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี เกิดการรีดักชันของซิลเวอร์ไนเตรตในสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) โดยมีกลูโคสเป็นตัวรีดิวซ์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยขั้นตอนการสังเคราะห์คือ จะแบ่งสารละลายออกเป็นสองส่วนได้แก่ ส่วนที่หนึ่งจะเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตโดยละลายในน้ำปราศจากไอออน และส่วนที่สองจะเตรียมสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) โดยละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) กลูโคส และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำสารในส่วนที่สองไปให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึง 60 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำสารละลายที่สังเคราะห์ได้ลงไปทิ้งหยด หลังจากเติมลงไปหมดแล้วให้ปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที จะพบว่า ขนาดของอนุภาคเงินในระดับนาโนอยู่ในช่วง 20 ถึง 80 นาโนเมตร และค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 420 นาโนเมตร และในงานวิจัยยังพบว่า โพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เป็นสารที่ช่วยเพิ่มความคงตัวของคอลลอยด์ของอนุภาคเงินในระดับนาโน และยังช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโนอีกด้วย

### 2.2.1.4 วิธีเชิงแสงทางเคมี (Photochemical synthesis)

การสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนโดยวิธีเชิงแสงทางเคมี จะอาศัยการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ เช่น หลอดโซเดียม หลอดซีนอน และจากรังสียูวี เป็นต้น วิธีการสังเคราะห์เชิงแสงเป็นอีกวิธีที่ง่าย และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้เชิงแสงได้ โดยขนาดของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการฉายแสง

จากงานวิจัยของสเตฟราน ที ดูเบสและวิลลวธรณ พิมพ์พันธุ์ [26] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยวิธีเชิงแสงทางเคมี โดยจะเกิดการรีดักชันของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตภายใต้การฉายรังสียูวี โดยจะใช้โพลีเมทาอะคริลิก (PMA) เป็นตัวรีดิวซ์และตัวรักษาเสถียรภาพของอนุภาคเงินระดับนาโนซึ่งจะอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตและอาศัยผลจากความเกะกะของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่ฟังก์ชัน และเมื่อนำไปฉายรังสียูวีได้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลของสีที่เกิดขึ้นจะได้สารละลายสีม่วง ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร และภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะแสดงให้เห็นขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 10 นาโนเมตร และจากงานวิจัยพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาการฉายรังสีมากยิ่งขึ้นจะส่งผลให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น [27]

## 2.2.2 อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน (Silver triangular nanoplates)

อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน (AgTNPs) มีรูปแบบของการดูดกลืนแสงเป็นแบบเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่เข้ม (Strong Plasmon Resonance; SPR) และมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างออกไปคือ ประกอบด้วย 3 มุมหรือจุดปลายที่แหลมคม ทำให้คุณสมบัติที่สำคัญของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน (AgTNPs) คือ คุณสมบัติทางแสง อิเล็กทรอนิกส์ และคุณสมบัติทางเคมี มีความพิเศษขึ้น [28] และอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน (AgTNPs) สามารถนำมาเป็นตัวตรวจวัดเชิงแสงที่ดี ซึ่งจะเหมาะสำหรับสร้างเป็นตัวรับรู้โดยวิธีเปรียบเทียบสี (Colorimetric method) ที่มีความเสถียรและว่องไว [29]

### 2.2.2.1 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน

วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโนมีหลากหลายวิธี แต่จะเลือกใช้วิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) เป็นส่วนมาก เพราะเป็นวิธีที่ง่าย และสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคเงินในระดับนาโนที่จะทำการสังเคราะห์ได้

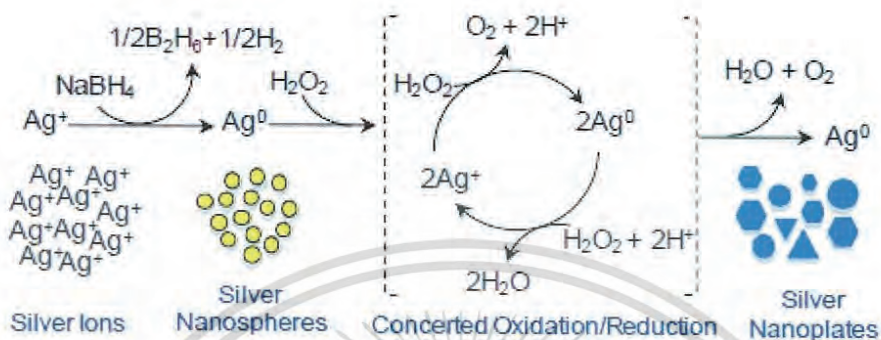
#### 1. วิธีรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method)

เป็นวิธีที่ใช้ทั่วไป และเป็นที่ยอมรับนำมาใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ใช้สารเคมีน้อยและสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนเงินได้ ตัวรีดิวซ์ที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ กรดแอสคอร์บิกและเซลลูโลส เป็นต้น ตัวรักษาเสถียรภาพที่นิยมใช้ได้แก่ ไตรโซเดียมซิเตรต และโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ซึ่งรูปร่างและขนาดที่เปลี่ยนไปของอนุภาคนาโนจะส่งผลทำให้สมบัติทางแสงเปลี่ยนไปด้วย

ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโนด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี ทำโดยเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท ( $\text{AgNO}_3$ ) ผสมกับสารละลายโซเดียมซิเตรต พร้อมกับปั่นกววน จากนั้นเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ลงไป แล้วค่อยๆ หยดสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ( $\text{NaBH}_4$ ) ลงไป ปฏิกิริยาจะเริ่มเกิดขึ้นหลังจากเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ( $\text{NaBH}_4$ ) โดยซิลเวอร์ไนเตรท ( $\text{Ag}^+$ ) จะถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ( $\text{NaBH}_4$ ) ได้เป็น  $\text{Ag}^0$  ในขณะเดียวกัน  $\text{Ag}^0$  นี้จะถูกล้อมรอบด้วยไตรโซเดียมซิเตรตซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ไม่ให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโน [30] ในขั้นตอนนี้จะได้อนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมในระดับนาโนซึ่งสารละลายที่ได้จะมีสีเหลือง และในขั้นต่อมาอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมในระดับนาโนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นจะค่อยๆถูกกัด (Etching) โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) [31] และเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดลง จะได้สารละลายสีน้ำเงินเกิดขึ้น ซึ่งเมื่อนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) จะพบอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโนปรากฏอยู่



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน [28]

จากรูปที่ 2.3 กล่าวถึงขั้นตอนการเกิดเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดย  $Ag^+$  จะถูกรีดิวซ์โดยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ( $NaBH_4$ ) กลายเป็น  $Ag^0$  ซึ่งรูปร่างที่ได้จะเป็นทรงกลม และสีของสารละลายที่ได้จะมีสีเหลือง จากนั้นปฏิกิริยาต่อมาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) จะเข้าไปกัด (Etching) อนุภาคเงินที่มีรูปร่างกลมในระดับนาโน ให้กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยสีของสารละลายจะมีสีน้ำเงิน

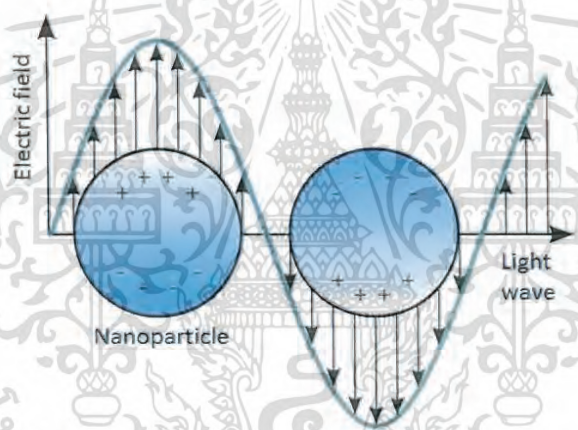
## 2. วิธีการฉายแสง (Light irradiation method)

การเตรียมอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนด้วยวิธีการฉายแสง เป็นอีกกระบวนการที่ง่าย สะดวก ประหยัดพลังงาน และสามารถทำปฏิกิริยาได้ในอุณหภูมิห้อง แต่ยังไม่เป็นวิธีที่นิยมมากนัก จากงานวิจัยของฮุยหิง เจียและคณะ [32] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนด้วยวิธีการฉายแสง โดยเตรียมสารละลายผสมของซิลเวอร์ไนเตรทกับสารละลายโซเดียมซิเตรทและทำการปั่นกววน จากนั้นค่อยๆหยดโซเดียมโบโรไฮไดรด์ลงไป สารละลายจะเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองทันที หลังจากปั่นกววนได้ 30 วินาที จึงนำสารละลายที่ได้มาฉายแสงโดยจะใช้หลอดโซเดียม (OSRAM NAV-T 70 Watt, Wavelength 589 nm) ในการฉายแสง โดยเวลาในการฉายแสงจะใช้เวลา 1 3 และ 5 ชั่วโมง ซึ่งจะพบว่า เวลาในการฉายแสงที่แตกต่างกัน รูปร่างและขนาดที่ได้ก็แตกต่างกันไปด้วย ในงานวิจัยนี้ได้สรุปผลว่า เวลาในการฉายแสงที่เหมาะสมคือ 3 ชั่วโมง เนื่องจากรูปร่างสามเหลี่ยมที่ได้มีความเป็นรูปร่างสามเหลี่ยมมากที่สุด และขนาดของอนุภาคที่ได้อยู่ระหว่าง 40 ถึง 100 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance)

เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance) เป็นปรากฏการณ์ที่อธิบายถึงสมบัติทางแสงของอนุภาคโลหะระดับนาโน เป็นปรากฏการณ์ที่แสงตกกระทบพื้นผิวของอนุภาคโลหะระดับนาโน แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งจึงเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งการสั่นของอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดการแยกระหว่างประจุบวกและประจุลบ การสั่นสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นที่จำเพาะ ปรากฏการณ์นี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดแถบการดูดกลืนแสงเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ซึ่งสามารถวัดได้ในช่วงความยาวคลื่นยูวีไปจนถึงวิสิเบิลไลต์ โดยความเข้มของการดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของโลหะชนิดนั้นๆ ประเภทของวัสดุ ขนาดของอนุภาค และรูปร่างของอนุภาค [33] สำหรับอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนจะมีแถบการดูดกลืนอยู่ที่ 598 นาโนเมตร ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ทำให้อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรถูกนำไปใช้เป็นตัวรับรู้ทางแสง



รูปที่ 2.4 การเกิดเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ [34]

จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงการเกิดเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ โดยเมื่อแสงตกกระทบที่โครงสร้างระดับนาโนของอนุภาค อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปยังแถบเหนี่ยวนำและจะเกิดการสั่นพ้องกับแสงที่มาตกกระทบ ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดอยู่บริเวณเปลือกชั้นนอกของอนุภาคนาโน เพราะแสงจากภายนอกไม่สามารถส่องทะลุผ่านเข้าไปภายในวัสดุได้

สมบัติในการดูดกลืนแสง เป็นสมบัติที่น่าสนใจของอนุภาคโลหะระดับนาโน ตัวอย่างเช่น อนุภาคนาโนของเงิน จะมีสีเหลืองเข้มแทนที่จะเป็นสีเงินวาวที่เราคุ้นเคย อย่างไรก็ตามโลหะส่วนใหญ่ จะมีความถี่เรโซแนนซ์ อยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรดซึ่งอยู่นอกสเปกตรัมของช่วงแสงที่มองเห็น นอกจากนี้อนุภาคนาโนของโลหะเกือบทุกชนิด ไม่สามารถคงตัวอยู่ในรูปอนุภาคนาโนได้นานในสภาวะแวดล้อมตามปกติ ทำให้เราไม่ค่อยพบปรากฏการณ์นี้ในโลหะชนิดอื่นๆ [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 กลูต้าไธโอน

กลูต้าไธโอน (Glutathione, GSH) เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญชนิดหนึ่งที่ร่างกายสามารถสร้างขึ้นเองได้จากอาหารประเภทโปรตีน ไข่ และนม โดยร่างกายจะเก็บกลูต้าไธโอนที่สร้างขึ้นได้ไว้ที่ตับ ในส่วนของภายนอกเซลล์จะพบกลูต้าไธโอนในปริมาณน้อย เช่น ในเลือดพบ 2-20 มิลลิโมลต่อลิตรเท่านั้น [36] และมีคุณสมบัติเป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง มีหน้าที่ปกป้องเนื้อเยื่อของอวัยวะทุกส่วน โดยการต่อต้านอนุมูลอิสระที่สะสมอยู่ตามส่วนต่างๆ โดยใช้หมู่ไฮดรอกซิล (-SH) ในการรีดิวซ์อนุมูลอิสระชนิดต่างๆ และกระตุ้นภูมิคุ้มกันของร่างกาย

อีกทั้ง ยังเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญในพืช สัตว์ เห็ดรา และแบคทีเรีย และอาร์เคียบางชนิด ทำหน้าที่ป้องกันองค์ประกอบสำคัญของเซลล์ที่เกิดจากออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive oxygen species) เช่น อนุมูลอิสระหรือเปอร์ออกไซด์ [37]

### 2.4.1 ข้อมูลทั่วไปของกลูต้าไธโอน [36]

#### 2.4.1.1 ชื่อทาง IUPAC

(2S)-2-amino-4-[[[(1R)-1-[(carboxymethyl) carbamoyl]-2-sulfanylethyl] carbamoyl] butanoic acid

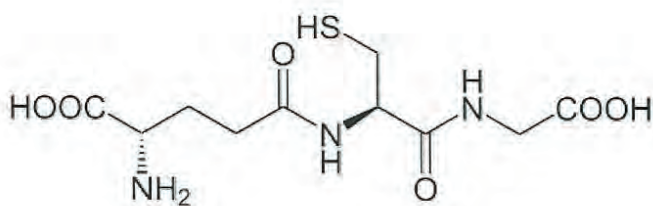
#### 2.4.1.2 ชื่อเรียกอื่น

$\gamma$ -L-Glutamyl-L-cysteinylglycine(2S)-2-Amino-5-[[[(2R)-1-(carboxymethylamino)-1-oxo-3-sulfanylpropan-2-yl]amino]-5-oxopentanoic acid

2.4.1.3 สูตรโมเลกุล  $C_{10}H_{17}N_3O_6S$       มวลโมเลกุล 307.32 g/mol

### 2.4.2 โครงสร้างทางเคมีของกลูต้าไธโอน

กลูต้าไธโอนจะประกอบด้วยเพปไทด์สามโมเลกุล (tripeptide) เรียงต่อกันคือ ซีสเตอีน (cysteine) กรดกลูตามิก (glutamic) และไกลซีน (glycine) และมีพันธะเพปไทด์แกมมาระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของหมู่ข้างกลูตามิกและหมู่เอมีนของซีสเตอีน และพันธะเพปไทด์ธรรมดาระหว่างซีสเตอีนกับไกลซีน ดังรูปที่ 2.5 โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลช่วยในการรักษาสมดุลของปฏิกิริยารีดอกซ์และเกี่ยวข้องกับการให้อิเล็กตรอน



รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของกลูต้าไธโอน [36]

### 2.4.3 คุณสมบัติของกลูต้าไธโอน

#### 2.4.3.1 Antioxidant

กลูต้าไธโอนมีคุณสมบัติเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ที่มีความสำคัญในร่างกาย โดยกลูต้าไธโอนจะถูกเปลี่ยนเป็นเอนไซม์กลูต้าไธโอนเปอร์ออกซิเดส (Glutathione peroxidase) [1] มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ทำหน้าที่เปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้กลายเป็นน้ำ ซึ่งจะช่วยลดการเกิดความเสียหายต่อสารชีวโมเลกุลโดยเฉพาะดีเอ็นเอ (DNA) ซึ่งจะเป็นสาเหตุของการพัฒนาไปเป็นเซลล์มะเร็งได้ [38]

#### 2.4.3.2 Detoxification

กลูต้าไธโอนช่วยสร้างเอนไซม์ชนิดต่างๆในร่างกาย โดยเฉพาะเอนไซม์ Glutathione-S-transferase (GSTs) ที่ตับ จะทำหน้าที่ช่วยในการกำจัดพิษออกจากร่างกายโดยจะไปเปลี่ยนสารพิษชนิดที่ไม่ละลายในน้ำ เช่น พริกโลหะหนัก สารระเหย ยาฆ่าแมลง หรือแม้แต่ยาบางชนิด ให้เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดีขึ้นซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการกำจัดออกจากร่างกาย [39] นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันตับจากการถูกทำลายโดยแอลกอฮอล์ สารพิษจากบุหรี่ และจากการรับประทานยาพาราเซตามอลที่มากเกินไปขนาด

#### 2.4.3.3 Immune Enhancer

กลูต้าไธโอน จะช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดสิ่งแปลกปลอมและเชื้อโรคของเม็ดเลือดขาวชนิดนิวโทรฟิล (Neutrophils) ซึ่งทำหน้าที่ต่อต้านเชื้อโรคที่เข้าสู่ร่างกาย และเป็นเม็ดเลือดขาวชนิดแรกไปถึงเนื้อเยื่อที่มีการติดเชื้อ [37] และยังเพิ่มความสามารถในการทำงานของเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย ทำให้ร่างกายมีภูมิคุ้มกันเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์หลายชนิดเพื่อให้ร่างกายต่อต้านสิ่งแปลกปลอม รวมถึงเชื้อแบคทีเรียและไวรัส นอกจากนี้กลูต้าไธโอนยังช่วยซ่อมแซมดีเอ็นเอ (DNA) และสร้างโปรตีน [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.4 ประโยชน์ของกลูต้าไธโอน

### 2.4.4.1 การรักษาโรค

โรคมะเร็ง เนื่องจากกลูต้าไธโอนเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยป้องกันการเกิดเซลล์มะเร็ง และยังเป็นสารต้านการเกิดเนื้องอก (Antitumor) และใช้ลดพิษจากยารักษามะเร็งซึ่งเป็นเคมีบำบัด (Chemo protectant)

โรคทางระบบหลอดเลือดและหัวใจ พบว่า ในผู้ป่วยที่เป็นโรคกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือดฉับพลัน หรือโรคหลอดเลือดหัวใจ จะมีปริมาณกลูต้าไธโอนในเลือดต่ำกว่าปกติ และนอกจากกลูต้าไธโอนจะทำหน้าที่ทำลายอนุมูลอิสระแล้วยังพบว่า การจับกันระหว่างไนตริกออกไซด์กับกลูต้าไธโอนกลายเป็นไนโตรโซกลูต้าไธโอน (S-nitrosoglutathione) นั้นจะช่วยทำให้เกร็ดเลือดทำงานดีขึ้นและป้องกันการเกิดลิ่มเลือด รวมทั้งทำให้หลอดเลือดเกิดการขยายตัวได้ดีขึ้น

### 2.4.4.2 อาหารเสริมและเครื่องสำอาง

เนื่องจากกลูต้าไธโอนสามารถที่จะเข้าไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไทโรซิน (Tyrosinase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สร้างเม็ดสียูเมลานินซึ่งมีสีน้ำตาลให้กลายเป็นฟีโอเมลานิน (Pheomelanin) ซึ่งมีสีขาว ซึ่งจะทำให้ผิวดูขาวกระจ่างขึ้น [40] ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางอ้อมของกลูต้าไธโอนที่ยังไม่เป็นที่ยอมรับในการนำมาผลิตเป็นอาหารเสริมและยารักษาฝ้า เนื่องจากหากได้รับในปริมาณที่มากเกินไปจะเป็นอันตรายถึงแก่ชีวิตได้

## 2.4.5 ข้อห้ามและควรระวัง

### 2.4.5.1 ห้ามใช้กับผู้ที่มีแพ้ยาฉีดกลูต้าไธโอน

### 2.4.5.2 ห้ามใช้กับผู้ที่มีปลุกถ่ายอวัยวะ

## 2.4.6 ค่ามาตรฐานความปลอดภัย

อาหารเสริมที่มีส่วนผสมของกลูต้าไธโอนจัดเป็นอาหารเสริมชนิดกรดอะมิโนถูกขึ้นทะเบียนในบัญชีรายชื่อส่วนประกอบที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารเสริมที่กำหนดตามประกาศของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา ฉบับราชกิจจานุเบกษา 18 ตุลาคม 2549 ที่กำหนดให้มีส่วนประกอบของแอล-กลูต้าไธโอน (L-glutathione) ไม่เกิน 250 มิลลิกรัมต่อเม็ด และเป็นผลิตภัณฑ์ที่แนะนำให้รับประทานได้ไม่เกิน 250 มิลลิกรัม/วัน [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.7 ผลข้างเคียงจากกอลลูต้าโธอิน

### 2.4.7.1 ความผิดปกติต่อดวงตา

จากการที่ร่างกายได้รับสารกอลลูต้าโธอินเป็นเวลานานๆจะทำให้เม็ดสีเมลานิน บริเวณจอตา (ตาดำ) มีปริมาณลดลง ทำให้จอตาได้รับแสงได้น้อยลงและเสี่ยงต่อการมองไม่เห็นได้ในอนาคต ทางวารสารทางการแพทย์ของประเทศสหรัฐอเมริกาจึงได้จัดว่า กอลลูต้าโธอินเป็นสารที่อาจก่อให้เกิดผลข้างเคียงทางตา [42]

### 2.4.7.2 โรคมะเร็งผิวหนัง

เนื่องจากร่างกายก็จะขาดเกราะป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ซึ่งจะทำให้ผิวหนังเหี่ยวและแก่เร็วขึ้น เป็นผลมาจากการสะสมปริมาณของกอลลูต้าโธอินที่มีมากเกินไปทำให้เม็ดสีเมลานินมีปริมาณลดลง รวมทั้งยังเพิ่มความเสี่ยงของการเกิดโรคมะเร็งผิวหนังอีกด้วย

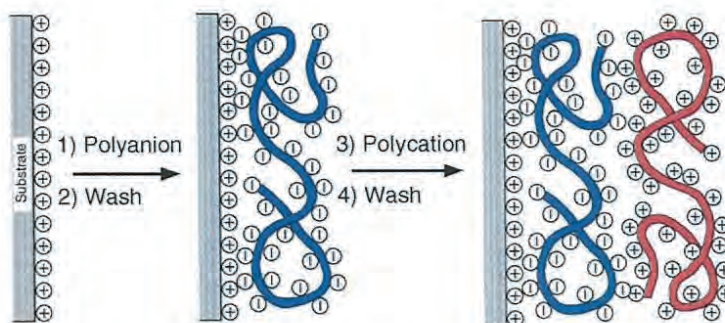
ดังนั้นถึงแม้ตัวกอลลูต้าโธอินเองจะเป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระก็ตาม แต่การได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ตในปริมาณมากกลับอันตรายยิ่งกว่าอนุมูลอิสระเสียอีก [33]

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

เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นเป็นการสร้างฟิล์มบาง โดยวิธีการประกอบแบบชั้นต่อชั้น แผ่นฟิล์มบางนั้นเกิดจากการเรียงตัวกันของสารที่มีประจุต่างชนิดกันสลับกัน โดยเทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1966 โดยอาเค ไอเลอร์ (R.K. Iler) การสร้างแผ่นฟิล์มบางโดยการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น คือการสร้างฟิล์มหลายๆชั้นขึ้นตามกลไกการเกิดไฟฟ้าสถิต [43] และยังสามารถเกิดขึ้นตามกลไกของพันธะไฮโดรเจน พันะไอออนิก และยังเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ได้อีกด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่นำมาใช้ในการสร้างแผ่นฟิล์มบาง

หลักการของเทคนิคนี้ อาศัยแรงดึงดูดของประจุที่แตกต่างกันของโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) สลับกันบนซับสเตรท (Substrate) เช่น กระดาษ แก้วหรือโลหะ ข้อดีของเทคนิคการขึ้นรูปชั้นต่อชั้นคือ สามารถทำได้ง่ายและอุปกรณ์หาไม่ยาก มีความยืดหยุ่นสูงกับวัสดุที่มีรูปร่างและขนาดผิดปกติ และสามารถควบคุมความหนาของแต่ละชั้นได้ตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 กระบวนการสร้างแผ่นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการขึ้นรูปชั้นต่อชั้น [44]

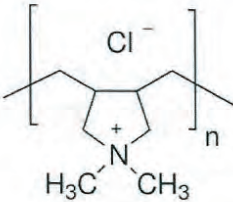
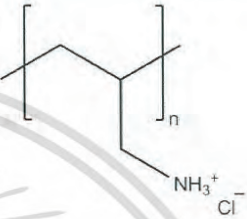
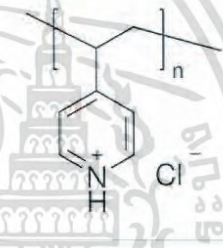
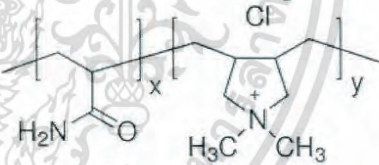
จากรูปที่ 2.6 อธิบายถึงการสร้างแผ่นฟิล์มบางโดยในขั้นแรกจะนำไปจุ่มในสารละลายโพลีแอนไอออนซึ่งมีประจุเป็นบวก แล้วนำไปล้างน้ำ จากนั้นนำไปจุ่มต่อในสารละลายโพลีแคทไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบแล้วนำไปล้างน้ำ โดยจำนวนชั้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์ขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการและนำไปใช้ในด้านต่างๆ

### 2.5.1 โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte)

โพลีอิเล็กโทรไลต์ คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยโมโนเมอร์ที่มีฟังก์ชันซึ่งสามารถเกิดประจุได้ โดยโพลีอิเล็กโทรไลต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ โพลีแคทไอออน (Polycation) และโพลีแอนไอออน (Polyanion) สมบัติของโพลีอิเล็กโทรไลต์จะสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้เมื่อละลายน้ำ ทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้า

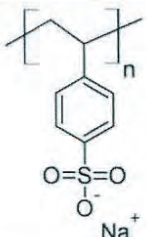
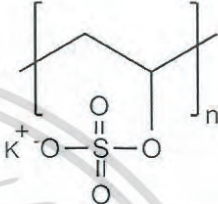
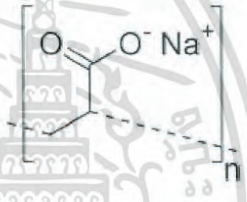
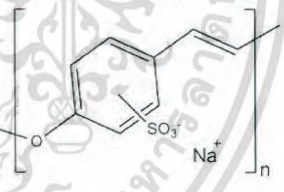
โพลีแอนไอออน (Polyanion) คือโพลีที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถแตกตัวได้เป็นประจุลบ ส่วนโพลีแคทไอออน (Polycation) คือโพลีที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดประจุบวกได้ โดยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นจะเป็นการนำโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามกันมาเคลือบไว้บนผิวของซับสเตรท โดยจำนวนชั้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่เคลือบขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่เราต้องการ และขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งเรียกสิ่งที่เกิดขึ้นนี้ว่า โพลีอิเล็กโทรไลต์หลายชั้น (Polyelectrolyte multilayers) [44][45]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุบวก (Polycation)

ชื่อโพลีอิเล็กโทรไลต์	โครงสร้าง
Poly (diallyldimethyl ammonium chloride) (PDADMAC)	
Poly (diallyl amine hydrochloride) (PAH)	
Poly (4-Vinyl Pyridine) (P4VP)	
Poly(acrylamide-co-diallyldimethyl ammonium chloride) (PADAC)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุลบ (Polyanion)

ชื่อโพลีอิเล็กโทรไลต์	โครงสร้าง
Poly(sodium 4-styrenesulfonate) (PSS)	
Poly (potassium vinyl sulfate) (PVS)	
Polyacrylate (PA)	
Poly(sodium anetholesulfonic acid)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ (Characterizations)

### 2.6.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง

เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible spectrophotometer) เป็นเทคนิคหนึ่งทางสเปกโทรสโกปี ซึ่งจะศึกษาถึงการดูดกลืนแสงของสารละลายและเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสง (Intensity) ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยสารตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ [46]

คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้เกิดทรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของเบียร์ แลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ [47]

ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

#### 1. Light source

แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย หลอดกำเนิดแสงมีหลากหลายชนิดตามความยาวคลื่นที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ตามความเหมาะสมของสารตัวอย่างที่นำมาตรวจวัด

#### 2. Monochromator

ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆหรือมีความยาวคลื่นเดียวจะใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (prism) หรือเกรตติ้ง (grating)

#### 3. Cell sample

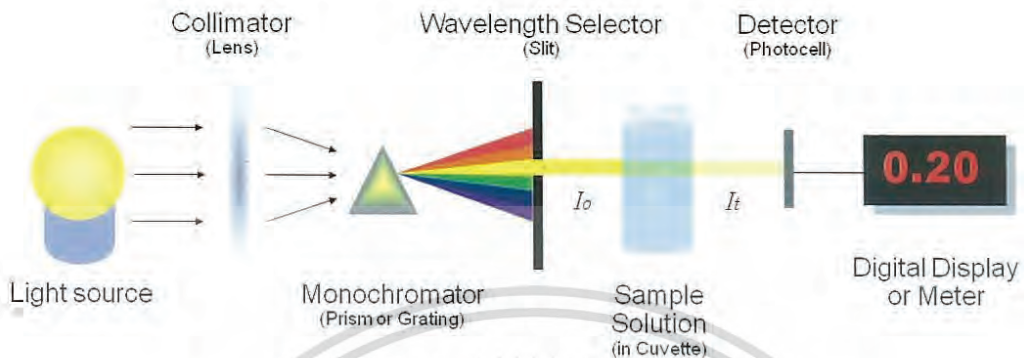
เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (cell sample) บางครั้งอาจเรียกว่า คิวเวทท์ (cuvettes) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดาจะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกาและควอตซ์ (quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

#### 4. Detector

ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง ถึงแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (silicon diode detector)



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ [48]

จากรูปที่ 2.7 แสดงถึงองค์ประกอบของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยจะเริ่มต้นจากแหล่งกำเนิดแสงเมื่อลำแสงออกมาจะผ่านเลนส์ซึ่งจะทำหน้าที่รวมแสงให้ลำแสงไปกระทบกับโมโนโครเมเตอร์ แล้วผ่านไปยังสารตัวอย่าง และจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ ค่าที่ได้จะแสดงผลในหน้าจอคอมพิวเตอร์

#### รูปแบบของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (types of Spectrophotometer)

##### 1. สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงเดี่ยว (single beam spectrophotometer)

หลักการของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงเดี่ยวนั้น เมื่อแสงออกจากแหล่งกำเนิดแสงแล้ว จะผ่านโมโนโครเมเตอร์ที่เป็นเกรตติง และสารตัวอย่างตามลำดับ แล้วจึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ตลอดเส้นทางของลำแสงนี้จะมีลำแสงเดียวจึงเรียก สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ว่า แบบลำแสงเดี่ยว เนื่องจากสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำแสงเพียงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดและเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณเลย

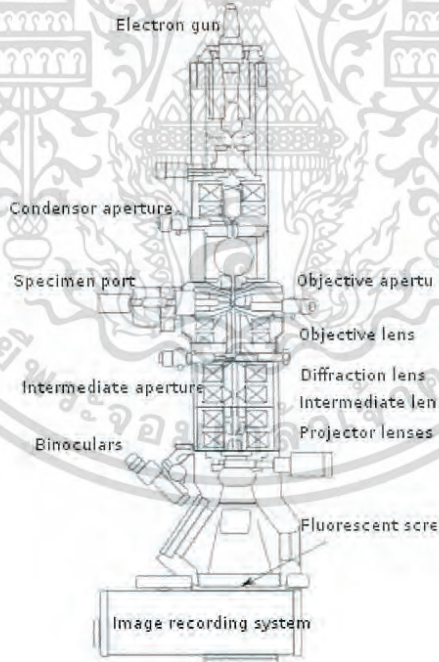
##### 2. สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงคู่ (double beam spectrophotometer)

สำหรับสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงคู่ เมื่อลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงออกจากช่องแสงออก (exit slit) แล้ว ลำแสงจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำแสง (beam chopper) ซึ่งจะทำหน้าที่สะท้อนลำแสงไปผ่านสารตัวอย่าง และต่อมาจะสะท้อนลำแสงไปผ่านสารอ้างอิง (reference) ซึ่งก็คือแบบล้นเอง โดยที่ลำแสงทั้งสองจะมีความเข้มแสงเท่ากันก่อนที่จะผ่านสารตัวอย่างหรือสารอ้างอิง เมื่อลำแสงทั้งสองนี้ไปตกกระทบบนตัวตรวจจับสัญญาณ ความแตกต่างของความเข้มแสงหลังจากผ่านสารตัวอย่างหรือสารอ้างอิงจะกลายเป็นค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษ เพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงเนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านนี้จะประกอบด้วย แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา (Specimen) ไป ซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก (บ่อยครั้งที่พบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงของอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป และอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด [49]



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [50]

จากรูปที่ 2.8 แสดงถึงส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope) โดยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนมาจาก electron gun และอิเล็กตรอนที่ได้จะผ่าน condenser lens เพื่อรวมแสงให้ตกกระทบมายังตัวอย่าง ลำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์จะผ่านตัวอย่างไปยัง objective lens และ intermediate lens ซึ่งทำหน้าที่ในการขยายภาพ และจะถูกขยายต่อโดย projector lens แล้วฉายภาพขยายลงบนฉากเรืองแสง (screen)

### 2.6.3 ฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

ฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer; FT-IR) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบและศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร โดยเป็นการทำเชิงคุณภาพวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น หาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ เป็นต้น การทำงานจะทำได้โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดซึ่งเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งเป็น 3 ช่วงได้แก่ Near Infrared ( $12,800 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$ ) Middle Infrared ( $4,000 - 200 \text{ cm}^{-1}$ ) และ Far Infrared ( $200 - 10 \text{ cm}^{-1}$ ) ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ในการวิเคราะห์ตัวอย่างจะใช้เวลาน้อยและไม่สิ้นเปลืองสารเคมี จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพหรือเพื่อยืนยันสูตรโครงสร้างของตัวอย่าง [51]

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลโดยเกิดการสั่นแบบยืด (stretching) และแบบงอ (bending) ของพันธะในโมเลกุลของสาร การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเป็นขบวนการควอนไทส์ (quantized) กล่าวคือที่สารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะนั้น การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (Wave number) กับค่าการส่องผ่านของแสง (%Transmittance) ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 การตรวจวัดเชิงสีของนิกเกิลโดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ดัดแปรด้วยกลูต้าไธโอนและแอล-ซิสเตอีน

(Glutathione and L-cysteine modified silver nanoplates based colorimetric assay for a simple, fast, sensitive and selective determination of nickel)

ัญญาภรณ์ เกียรติกำจร และคณะ [52] ได้นำเสนอการตรวจวัดเชิงสีของนิกเกิลโดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ดัดแปรด้วยกลูต้าไธโอนและแอล-ซิสเตอีน โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์สารสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนหนึ่งทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นสารรีดิวซ์และใช้เมทิลเซลลูโลสเป็นสารรักษาเสถียรภาพ และขั้นตอนที่สองคือ การดัดแปรอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรด้วยด้วยกลูต้าไธโอนและแอล-ซิสเตอีนโดยนำสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่มีความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 44 มิลลิลิตรที่ได้จากขั้นตอนที่หนึ่งมาเติมสารละลายกลูต้าไธโอนที่มีความเข้มข้น 50 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเติมแอล-ซิสเตอีนที่มีความเข้มข้น 50 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตรจะได้คอลลอยด์สีชมพูที่มีการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรกับกลูต้าไธโอนและแอล-ซิสเตอีน

จากการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค ยูวี-วิสิเบิล แอบซอร์พชัน สเปกโทรสโกปีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ยังไม่ได้ดัดแปรพบว่า มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 487 นาโนเมตร แต่เมื่อนำมาดัดแปรด้วยกลูต้าไธโอนและแอล-ซิสเตอีนพบว่า มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 501 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันระหว่างหมู่ไทออลของกลูต้าไธโอนและแอลซิสเตอีนกับอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร และเมื่อนำสารละลายนี้ไปทดสอบกับสารละลายนิกเกิลที่มีความเข้มข้นต่างๆพบว่า สีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ดัดแปรด้วยกลูต้าไธโอนและแอลซิสเตอีนมีการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายสีชมพูเป็นสารละลายสีม่วงที่มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร ซึ่งสีที่เปลี่ยนไปเกิดจากนิกเกิลเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนและหมู่คาร์บอกซิลิก โดยมีภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) ช่วยยืนยันว่า เมื่อยังไม่ได้ทดสอบกับสารละลายนิกเกิลอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรจะมีการกระจายตัว แต่เมื่อนำนิกเกิลมาทดสอบพบว่าจะมีการรวมตัวของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรเกิดขึ้น จากการทดลองสามารถวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิลในช่วงความเข้มข้น 10 ถึง 150 ppb ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9971 และพบว่า ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้ (LOD) เท่ากับ 7.02 ppb และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ (LOQ) เท่ากับ 23.01 ppb โดยคณะผู้วิจัยได้สรุปว่าการวิเคราะห์นิกเกิลโดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ดัดแปรด้วยกลูต้าไธโอนและแอล-ซิสเตอีนนี้มีความจำเพาะเจาะจงและมีความไวในการวิเคราะห์นิกเกิลไอออน โดยวิธีสามารถตรวจวัดได้ง่ายและรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.2 การใช้กลูต้าไธโอนเป็นสื่อกลางในการเชื่อมอนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโนให้เป็นสายโซ่ยาวสำหรับตรวจวัดตะกั่ว

(Sensing of lead ions using glutathione mediated end to end assembled gold nanorod chains)

C.V. Durgadasa และคณะ [53] ได้ศึกษาการตรวจวัดตะกั่วโดยใช้อนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโนที่มีการเชื่อมระหว่างอนุภาคด้วยกลูต้าไธโอนให้เป็นสายโซ่ยาว โดยทั่วไปแล้วกลูต้าไธโอนจะเป็นสารที่ช่วยในการขับสารพิษที่สำคัญในร่างกายมนุษย์ จึงเป็นแนวทางในการนำกลูต้าไธโอนมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดตะกั่ว ขั้นตอนการสังเคราะห์จะแบ่งเป็นสามขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนหนึ่งทำการสังเคราะห์เมล็ดทอง โดยการผสมสารละลายเตตระคลอโรออร์เท ไตรไฮเดรต ( $\text{HAuCl}_4$ ) ที่ความเข้มข้น 2.2 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายซิทีลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ( $\text{NaBH}_4$ ) ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 4 ชั่วโมงจะได้สารละลายสีน้ำตาล ขั้นตอนที่สองทำการสังเคราะห์อนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโนโดยการนำสารละลายที่ได้จากขั้นตอนที่หนึ่งมา 100 ไมโครลิตร เติมลงในสารละลายที่ผสมระหว่างสารละลาย  $\text{HAuCl}_4$  ความเข้มข้น 2.2 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย CTAB ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตรและสารละลายแอสคอร์บิกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตรตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายสีน้ำเงินของอนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโน และในขั้นตอนที่สามทำการสังเคราะห์อนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโนร่วมกับกลูต้าไธโอน โดยผสมสารละลายอนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโนเข้มข้น 2.5 mg/ml ที่ได้จากขั้นตอนที่สองกับสารละลายกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้สารละลายอนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโนที่เชื่อมระหว่างอนุภาคด้วยกลูต้าไธโอนเป็นสายโซ่ยาวสำหรับนำไปตรวจวัดตะกั่ว

จากการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล แอบซอร์พชัน สเปกโทรสโกปีของสารละลายอนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโน พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสง 2 ช่วงคือที่ความยาวคลื่น 717 และ 532 นาโนเมตร และเมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านชนิดความละเอียดสูง (HRTEM) พบว่า มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโนเท่ากับ 3.25 นาโนเมตรและจากการศึกษาถึงอิทธิพลของกลูต้าไธโอนที่ทำให้อนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโนเชื่อมกันเป็นสายโซ่ยาวพบว่า ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร จะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการเติมสารละลายกลูต้าไธโอนลงไป แต่ที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 717 นาโนเมตรมีการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงไปที่ 843 นาโนเมตร ทั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าอนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโนได้รวมตัวกับกลูต้าไธโอน (GNR-GSH) เป็นสายโซ่ยาว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว จากการนำสารละลาย GNR-GSH ไปตรวจวัดตะกั่วพบว่า เมื่อนำสารละลายที่ตรวจวัดตะกั่วไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านชนิดความละเอียดสูง (HRTEM) พบว่าสายโซ่ของอนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโนมีการแตกหักที่บริเวณหมู่ฟังก์ชันของเอมีนและหมู่คาร์บอกซิลิกซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของกลูต้าไธโอนที่เชื่อมระหว่างอนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโนกับกลูต้าไธโอนซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารละลาย GNR-GSH สามารถตรวจวัดตะกั่วได้ และจากการศึกษาความจำเพาะของวิธีนี้พบว่า อนุภาคของรูปทรงแท่งระดับนาโนที่มีกลูต้าไธโอนอยู่จะมีความจำเพาะเจาะจงสูงเนื่องจากตัวรบกวนที่นำมาวิเคราะห์ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ และงานวิจัยนี้สามารถตรวจวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกั่วได้ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.025 มิลลิโมลาร์และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้ (LOD) เท่ากับ 0.025 มิลลิโมลาร์

### 2.7.3 การใช้อนุภาคเงินระดับนาโนที่ดัดแปรด้วยกลูต้าไธโอนเพื่อให้ความจำเพาะต่อการตรวจวัดปรอทที่ความเข้มข้นในระดับนาโนโมลาร์ โดยวิธีการตรวจวัดเชิงสี

(Highly selective colorimetric detection and estimation of  $Hg^{2+}$  at nano-molar concentration by silver nanoparticles in the presence of glutathione)

Ayesha Alam และคณะ [54] ศึกษาการตรวจวัดเชิงสีของปรอทโดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนที่ดัดแปรด้วยกลูต้าไธโอน โดยทำการสังเคราะห์สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ใช้สารทางชีวภาพ โดยใช้สารสกัดจากใบโศกอินเดีย (*Polyalthia longifolia*) และใช้สารละลายกลูต้าไธโอนเข้ามามีส่วนร่วมในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน เพื่อให้มีความจำเพาะต่อการตรวจวัดปรอทที่ความเข้มข้นระดับนาโนโมลาร์ โดยในขั้นการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนทำได้โดยการผสมสารละลายที่ได้จากการสกัดจากใบไม้ 5 มิลลิลิตร กับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 45 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อน 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีสีเหลืองน้ำตาลเกิดขึ้น

จากการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล แอปซอร์พชัน สเปกโทรสโกปีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ได้ซึ่งเป็นสารละลายสีเหลืองน้ำตาล พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 432 นาโนเมตร และเมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่าอนุภาคเงินมีลักษณะทรงกลม ขนาดประมาณ 5 นาโนเมตร จากนั้นนำสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนไปตรวจวัดปรอทโดยการเติมสารละลายกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 1 โมลาร์ลงในสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 แล้วเติมสารละลายปรอทลงไปที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 10 จนถึง 100 นาโนโมลาร์ พบว่ายิ่งความเข้มข้นของสารละลายปรอทสูงขึ้นจะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ดัดแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกลูต้าไธโอนมีค่าการดูดกลืนแสงลดลง จากการทดลองคณะผู้วิจัยจึงสรุปได้ว่า วิธีในการวิเคราะห์นี้สามารถตรวจวัดปริมาณปรอทได้ตั้งแต่ช่วงความเข้มข้น 10 จนถึง 100 นาโนโมลาร์ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9741 และโดยวิธีการวิเคราะห์นี้มีความสะดวก รวดเร็ว ประหยัด และมีความจำเพาะต่อการตรวจวัดปรอทสูง

#### 2.7.4 การใช้สารละลายเงินที่สังเคราะห์ร่วมกับ 3,3',5,5'-tetramethylbenzidine (TMB)

เพื่อให้มีความไวและจำเพาะต่อการตรวจวัดกลูต้าไธโอนด้วยวิธีการตรวจวัดเชิงสี (Highly sensitive and selective colorimetric detection of glutathione based on Ag [I] ion-3,3',5,5'-tetramethylbenzidine (TMB) )

งานวิจัยของ Pengjuan Ni และคณะ [55] ได้นำเสนอการตรวจวัดกลูต้าไธโอนโดยใช้สารละลายเงินที่สังเคราะห์ร่วมกับ 3,3',5,5'-tetramethylbenzidine (TMB) ซึ่งเป็นสารอินดิเคเตอร์ที่ทำให้สารละลายเงินเป็นสีน้ำเงิน เมื่อนำสารละลายที่สังเคราะห์ได้มาตรวจวัดกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่างๆพบว่า สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปเป็นสารละลายใสไม่มีสีเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น ในขั้นตอนการสังเคราะห์สารละลายเงินร่วมกับสารละลาย 3,3',5,5'-tetramethylbenzidine (TMB) โดยผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเข้มข้น 1.5 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร กับสารละลาย TMB เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 200 ไมโครลิตรจะได้สารละลายสีน้ำเงิน (TMB-Ag<sup>+</sup>) ซึ่งใช้สำหรับตรวจวัดกลูต้าไธโอน

เมื่อทำการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล แอบซอร์พชัน สเปกโทรสโกปีพบว่าสารละลาย TMB-Ag<sup>+</sup> มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 652 นาโนเมตร และเมื่อนำสารละลาย TMB-Ag<sup>+</sup> ไปตรวจวัดกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนเพิ่มมากขึ้นสีของสารละลาย TMB-Ag<sup>+</sup> มีแนวโน้มเปลี่ยนจากสารละลายสีน้ำเงินเป็นสารละลายใสไม่มีสี โดยค่าการดูดกลืนแสงจะลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากสาเหตุสองประการดังนี้คือ เมื่อมีการเติมกลูต้าไธโอนลงในสารละลาย TMB-Ag<sup>+</sup> กลูต้าไธโอนอาจจะไปทำปฏิกิริยากับ TMB หรืออาจจะเกิดจากกลูต้าไธโอนเข้าทำปฏิกิริยากับ Ag<sup>+</sup> ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยานี้จะไปยับยั้งกระบวนการออกซิไดซ์ของสารละลาย TMB จึงทำให้สารละลายมีสีจางลงเมื่อความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาความจำเพาะในการตรวจวัดของวิธี โดยทำการนำสารละลาย TMB-Ag<sup>+</sup> ไปทำการตรวจวัดซีสเทอีนและโฮโมซีสเทอีน ซึ่งสารทั้งมีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยากับ Ag<sup>+</sup> ได้เหมือนกับกลูต้าไธโอนพบว่า สารละลายทั้งสองมีการตอบสนองต่อสารละลาย TMB-Ag<sup>+</sup> ได้น้อยมากเมื่อเทียบกับสารละลายกลูต้าไธโอน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า วิธีที่ใช้ในการตรวจวัดกลูต้าไธโอนนี้มีความไวและมีความจำเพาะต่อการตรวจวัดกลูต้าไธโอนสูงกว่าซีสเทอีนและโฮโมซีสเทอีน และสามารถวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาปริมาณคลูต้าไธโอนได้ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 0.05 ถึง 8 ไมโครโมลาร์ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสีในใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9996 และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้ (LOD) เท่ากับ 0.05 ไมโครโมลาร์

### 2.7.5 การตรวจวัดไอโอไดต์ด้วยวิธีตรวจวัดเชิงสีที่มีความแม่นยำและความไวสูงโดยใช้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการหากระบวนการเปลี่ยนสี

(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)

งานวิจัย Xiu-Hua Yang และคณะ [56] ได้ทำการศึกษาการตรวจวัดไอโอไดต์ที่มีความแม่นยำและความไวสูง โดยใช้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมาศึกษากระบวนการเปลี่ยนแปลงสี โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนด้วยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี ซึ่งจะใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นสารรีดิวซ์และไตรโซเดียมซิเตรทเป็นสารรักษาเสถียรภาพ ในขั้นตอนการสังเคราะห์เริ่มจากผสมซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ไตรโซเดียมซิเตรทความเข้มข้น 30 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30 wt% ปริมาตร 120 ไมโครลิตร ผสมกันพร้อมปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เย็นความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 250 ไมโครลิตร จะได้สารละลายสีน้ำเงินสำหรับนำไปตรวจวัดไอโอไดต์

จากการศึกษาด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล แอบซอร์พชัน สเปกโทรสโกปี และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) พบว่าสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมสามารถตรวจวัดไอโอไดต์ที่มีความเข้มข้นต่ำๆได้ โดยเมื่อนำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนไปตรวจวัดไอโอไดต์สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปเป็นสีเหลือง ทั้งนี้เกิดจากไอโอไดต์เข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนแล้วทำให้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเป็นทรงกลมจึงเกิดเป็นสารละลายสีเหลืองเกิดขึ้น และจากการการตรวจวัดไอโอไดต์พบว่าที่ความเข้มข้น 0.1 ไมโครโมลาร์ ซึ่งสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีได้ด้วยตาเปล่า แต่ที่ความเข้มข้นต่ำกว่านี้จนถึง 8.8 นาโนโมลาร์ สามารถตรวจวัดได้โดยการใส่สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ วิธีการวิเคราะห์นี้มีความแม่นยำ ความไว มีเสถียรภาพสูงและความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) ที่ดีเมื่อเทียบกับวิธีการตรวจวัดเชิงสีตามปกติ นอกจากนี้แล้วเชื่อว่า วิธีการตรวจวัดเชิงสีนี้จะ เป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดเชิงสีอีกมากมายในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.6 การเปลี่ยนแปลงอนุภาคเงินระดับนาโนรูปทรงต่างๆ ให้เป็นอนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมอย่างรวดเร็วโดยอาศัย PVP, Citrate และ $H_2O_2$

(Rapid Transformation from Spherical Nanoparticles, Nanorods, Cubes, or Bipyramids to Triangular Prisms of Silver with PVP, Citrate and  $H_2O_2$ )

Masaharu Tsuji และคณะ [57] ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนรูปทรงสามเหลี่ยมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอนุภาคเงินระดับนาโนรูปทรงแท่ง รูปทรงสี่เหลี่ยม และรูปทรงพีระมิดคู่ โดยอาศัยสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ไตรโซเดียมซิเตรท และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยควบคุมให้เกิดอนุภาครูปทรงต่างๆ งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี โดยแบ่งขั้นตอนการศึกษาดังนี้ ขั้นตอนหนึ่งคือการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปทรงต่างๆ ได้แก่ อนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยม (วิธีพื้นฐาน) รูปทรงแท่ง และรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือรูปทรงพีระมิดคู่ ขั้นตอนที่สองศึกษาอิทธิพลของ โพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ไตรโซเดียมซิเตรท และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ที่ทำให้เกิดอนุภาครูปทรงสามเหลี่ยม โดยศึกษาจากสารละลายอนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีพื้นฐาน โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีการเติมโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ไตรโซเดียมซิเตรทและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) แล้วนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ขั้นตอนที่สามศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนรูปทรงแท่ง รูปทรงสี่เหลี่ยมและรูปทรงพีระมิดคู่เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสารตั้งต้นจากการเติมและไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ในขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมระดับนาโน

จากการศึกษาอิทธิพลของโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ไตรโซเดียมซิเตรทและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ที่ทำให้เกิดอนุภาครูปทรงสามเหลี่ยมในขั้นตอนที่สอง โดยนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่าอนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมมีขนาดเฉลี่ย 45 นาโนเมตร แต่เมื่อทำการสังเคราะห์โดยไม่เติมโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) พบว่าอนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมมีขนาดเฉลี่ย 20 ถึง 120 นาโนเมตร ต่อมาสังเคราะห์โดยไม่เติมไตรโซเดียมซิเตรทพบว่าอนุภาคเงินรูปทรงกลมที่มีขนาดเฉลี่ย  $14 \pm 4$  นาโนเมตรและทำการสังเคราะห์โดยไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ลงไปพบว่า อนุภาคเงินรูปทรงกลมที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  และ  $3 \pm 1$  นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งไตรโซเดียมซิเตรทและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดอนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมระดับนาโนขึ้น แต่โพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารที่ช่วยให้เกิดอนุภาคสามเหลี่ยมแต่จะช่วยให้อนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมเกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น และจากการศึกษาในขั้นตอนที่สามโดยนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่า เมื่อยังไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) สารตั้งต้นยังคงเป็นรูปทรงเดิม แต่เมื่อมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ลงไปในสารตั้งต้น พบว่าอนุภาคของสารตั้งต้นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นรูปร่างสามเหลี่ยมได้จริง จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่า ไตรโซเดียมซิเตรท และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนขึ้นโดยไตรโซเดียมซิเตรทเป็นตัวช่วยควบคุมอนุภาคให้มีความเสถียรภาพเพื่อให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) กัดกร่อนอนุภาคเป็นรูปร่างสามเหลี่ยมได้ง่ายขึ้น

### 2.7.7 การตรวจวัดเชิงสีของไอออนโคบอลต์ ( $Co^{2+}$ ) โดยใช้อนุภาคเงินรูปร่างกลม รูปร่างสามเหลี่ยม และรูปร่างในระดึบนาโน

(Colorimetric Detection of  $Co^{2+}$  Ion Using Silver Nanoparticles with Spherical, Plate, and Rod Shapes)

Hwa Kyung Sung และคณะ [58] ศึกษาการตรวจวัดเชิงสีของไอออนโคบอลต์ ( $Co^{2+}$ ) โดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนที่รูปร่างต่างๆ เพื่อหารูปร่างที่เหมาะสมในการตรวจวัดไอออนโคบอลต์ ( $Co^{2+}$ ) ทำโดยเตรียมเมล็ดของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร โดยผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 18 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร กับสารละลายไตรโซเดียมซิเตรท ความเข้มข้น 17 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร ค่อยๆหยดลงพร้อมกับปั่นกวน จะได้ในเมล็ดของอนุภาคเงินระดับนาโน จากนั้นสังเคราะห์รูปร่างต่างๆได้แก่ อนุภาคเงินรูปร่างกลมระดับนาโนเมตรสังเคราะห์โดยใช้ซิลเวอร์ไนเตรต 85 มิลลิกรัมและโพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP) 83 มิลลิกรัม จากนั้นเติมเอทิลีน ไกลคอล (EG) 10 mL นำสารละลายที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยล้างเอาเอทิลีน ไกลคอลออกและนำไปผสมกับน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 19.4 มิลลิลิตรและโซเดียมโบโรไฮไดรด์เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร จะได้ออกมาเป็นอนุภาคเงินรูปร่างกลมระดับนาโนเมตร อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมตรสังเคราะห์โดยเตรียมละลายไตรโซเดียมซิเตรท 0.1 กรัมผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 18 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.14 มิลลิลิตร และกรดแอสคอร์บิกเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรแล้วตามด้วยน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมเมล็ดของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เตรียมไว้ในตอนแรกลงไปจะได้สารละลายสีน้ำเงิน และทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างระดับนาโนจะใช้สารละลายซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เป็นสารรักษาเสถียรภาพ โดยเตรียมเมล็ดของอนุภาคเงินระดับนาโนมาปริมาตร 0.25 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เข้มข้น 25 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.125 มิลลิลิตรและกรดแอสคอร์บิกเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.125 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ จะได้สารละลายสีน้ำเงินจางๆ จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมไว้ทั้งสามมาเติมกลูต้าไธโอน (GSH)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.025 กรัม แล้วเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ จะได้อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรรูปร่างต่างๆที่มีกลูต้าไธโอน

จากการศึกษาเมื่อนำมาตรวจวัดไอออนโคบอลต์ ( $\text{Co}^{2+}$ ) พบว่า อนุภาคเงินรูปร่างกลมระดับนาโนเมตรพบว่า มีความไวในการตรวจไอออนของโลหะทุกชนิด แต่ไม่มีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัด และอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมตรไม่เหมาะแก่การนำมาทำการตรวจวัดเชิงสี และอนุภาคเงินรูปร่างระดับนาโนเมตรมีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดกับไอออนโคบอลต์ ( $\text{Co}^{2+}$ ) สูง เพราะสารละลายซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เกิดพันธะกับไอออนโคบอลต์ ทำให้สารละลายซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ถูกแยกออกจากพื้นผิวของอนุภาคเงินรูปร่างระดับนาโนเมตร โดยคณะผู้วิจัยนี้ได้สรุปว่า อนุภาคเงินรูปร่างกลมระดับนาโนเมตรสามารถนำไปทำเป็นตัวตรวจวัดเชิงสีได้กับไอออนของโลหะต่างๆได้ดี และอนุภาคเงินรูปร่างระดับนาโนเมตรที่นำมาปรับปรุงด้วยกลูต้าไธโอนมีความไวในการตรวจวัดไอออนโคบอลต์สูง

### 2.7.8 การตรวจวัดไอออนของตะกั่วด้วยเทคนิคเชิงสีโดยใช้อนุภาคเงิน

(Colorimetric Detection of Lead Ions Using Glutathione Stabilized Silver Nanoparticles)

I.V. Anambiga, และคณะ [59] ได้นำเสนอการศึกษาการตรวจวัดไอออนของตะกั่วจากอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีกลูต้าไธโอนช่วยรักษาเสถียรภาพอยู่ด้วยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ ซิลเวอร์ไนเตรต และใช้กลูต้าไธโอนเป็นสารรักษาเสถียรภาพ ขั้นตอนในการสังเคราะห์ทำโดยนำสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์มาผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตด้วยการปั่นกวนในอุณหภูมิห้องจะได้สารละลายมีสีเหลือง หลังจากปั่นกวนได้ประมาณ 5 นาทีจึงเติมสารละลายกลูต้าไธโอนลงไป 2 มิลลิลิตรค่อยๆหยดลง จากนั้นปั่นกวนในที่มืดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์ จากนั้นนำไปตรวจวัดกับไอออนของตะกั่วที่ความเข้มข้น  $10^{-3}$  ถึง  $10^{-9}$  โมลาร์ และศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีกลูต้าไธโอนรักษาเสถียรภาพอยู่นั้นในช่วงความเป็นกรด-เบสที่พีเอชต่างๆ

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล แอปซอร์พชัน สเปกโทรสโกปีและการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) พบว่า ความเข้มข้นของไอออนของตะกั่วที่ต่ำที่สุดที่อนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีกลูต้าไธโอนรักษาเสถียรภาพอยู่สามารถตรวจวัดได้ เท่ากับ  $10^{-9}$  โมลาร์ และในสภาวะในช่วงความเป็นกรด-เบสที่พีเอช 3 ถึง 7 โดยสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้มซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันระหว่างไอออนของตะกั่ว ( $\text{Pb}^{2+}$ ) กับหมู่เอมีนและหมู่คาร์บอกซิลิก จึงทำให้วิธีนี้มีไวในการวิเคราะห์และมีความจำเพาะกับไอออนของตะกั่ว ( $\text{Pb}^{2+}$ ) ซึ่งในอนาคตต่อไปงานวิจัยนี้จะถูกนำไปพัฒนาวิธีเป็นตัวรับรู้บนแผ่นชิป โดยอาศัยเทคนิค MEMS ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.9 การตรวจวัดเชิงสีสำหรับไอออนนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) โดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรโดยใช้กลูต้าไธโอนเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ

(Glutathione-stabilized silver nanoparticles as colorimetric sensor for  $\text{Ni}^{2+}$  ion)

Haibing Li และคณะ [60] ได้ทำการศึกษาการตรวจวัดเชิงสีของไอออนนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) โดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโน โดยมีกลูต้าไธโอนเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ซึ่งทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.012 กรัมแล้วใส่ลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตพร้อมทำการปั่นกวนจะได้เป็นสารละลายสีเหลือง หลังจากปั่นกวนผ่านไป 5 นาทีจึงเติมสารละลายกลูต้าไธโอนเข้มข้น  $10^{-3} \text{ molL}^{-1}$  ปริมาณ 2 มิลลิลิตรโดยค่อยๆเติมลงไปจากนั้นปั่นกวนทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมงในที่มืด

จากการศึกษาพบว่า เมื่อนำสารละลายนี้ไปทดสอบกับไอออนนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ที่ความเข้มข้นต่างๆพบว่า สีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ใช้กลูต้าไธโอนเป็นตัวรักษาเสถียรภาพมีการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายสีเหลืองเป็นสารละลายสีส้ม ซึ่งเกิดจากไอออนนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนและหมู่คาร์บอกซิล โดยมีภาพถ่ายจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) ช่วยยืนยันว่า เมื่อยังไม่ได้ทดสอบกับไอออนนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) อนุภาคจะมีการกระจายตัว แต่เมื่อนำมาทดสอบกับไอออนนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) พบว่าจะมีการรวมตัวของอนุภาคเกิดขึ้น จากการทดลองสามารถวิเคราะห์ไอออนนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ในช่วงความเข้มข้น  $10^{-6}$  ถึง  $10^{-4}$  โมลลาร์ และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้ (LOD) เท่ากับ  $7.5 \times 10^{-5}$  โมลลาร์

### 2.7.10 การรวมตัวของกลูต้าไธโอนกับอนุภาคทองระดับนาโน โดยเหนี่ยวนำของไอออนนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ )

(Aggregation of glutathione-functionalized Au nanoparticles induced by  $\text{Ni}^{2+}$  ions)

W. Yang และคณะ [61] ศึกษาการรวมตัวของกลูต้าไธโอนกับอนุภาคทองระดับนาโน โดยเหนี่ยวนำของไอออนนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) โดยขั้นตอนการสังเคราะห์ทำโดยนำสารละลายเตตระคลอโรออเรท ไตรไฮเดรต ( $\text{HAuCl}_4$ ) ที่ความเข้มข้น 0.37 มิลลิโมลลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตรไปให้ความร้อนพร้อมปั่นกวน จากนั้นเติมไตรโซเดียมไซเตรทเข้มข้น 1.9 มิลลิโมลลาร์ โดยเมื่อเติมไตรโซเดียมไซเตรทลงไปสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองกลายเป็นสีแดง หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงโดยใช้เครื่อง centrifugation (8,000 rpm) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้อนุภาคทองระดับนาโนเกิดการกระจายตัว หลังจากนั้นเติมสารละลายกลูต้าไธโอนเติมลงไปและนำอนุภาคทองนาโนที่ได้ไปศึกษา

จากการศึกษาพบว่า ที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการรวมตัวกันของกลูต้าไธโอนกับอนุภาคทองระดับนาโน โดยพบว่า ที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 9 หมู่คาร์บอกซิลิกของกลูต้าไธโอนจะเข้าไปจับกับไอออนของนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพน้อยที่จะทำให้เกิดการรวมตัวกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากหมู่คาร์บอซิลิกไม่มีความสามารถพอที่จะยึดเหนี่ยวกับอนุภาคของระดับนาโน และที่ค่าพีเอชประมาณ 9.8 พบว่า หมู่คาร์บอซิลิกและหมู่เอมีนของกลูต้าไรโอนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคทองในระดับนาโน เนื่องจากหมู่เอมีนชอบที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตัวได้มาก และที่ค่าพีเอชสูงกว่า 10.5 เมื่อเติมนิกเกิลลงไปพบว่า ประสิทธิภาพที่จะทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคทองระดับนาโนเกิดได้เพียงชั่วคราวเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิล คณะผู้ทำการวิจัยได้จัดทำงานวิจัยขึ้นเพื่อให้เป็นประโยชน์สำหรับการทำความเข้าใจเกี่ยวกับความไวในการวิเคราะห์และความจำเพาะของกลูต้าไรโอนกับอนุภาคทองระดับนาโนในการนำมาวิเคราะห์ไอออนโลหะชนิดต่างๆ เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้ ขั้นตอนที่หนึ่งคือ การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ ไตรโซเดียมซิเตรตเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวกัด (Etchant) อนุภาคเงินรูปร่างกลมให้เป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยม ขั้นตอนที่สองคือ การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางระดับนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) โดยการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางระดับนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และในขั้นตอนสุดท้ายคือ การนำสารละลายและฟิล์มบางของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ที่กลุ่มตัวไอออน

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

#### 3.1.1 สารเคมี

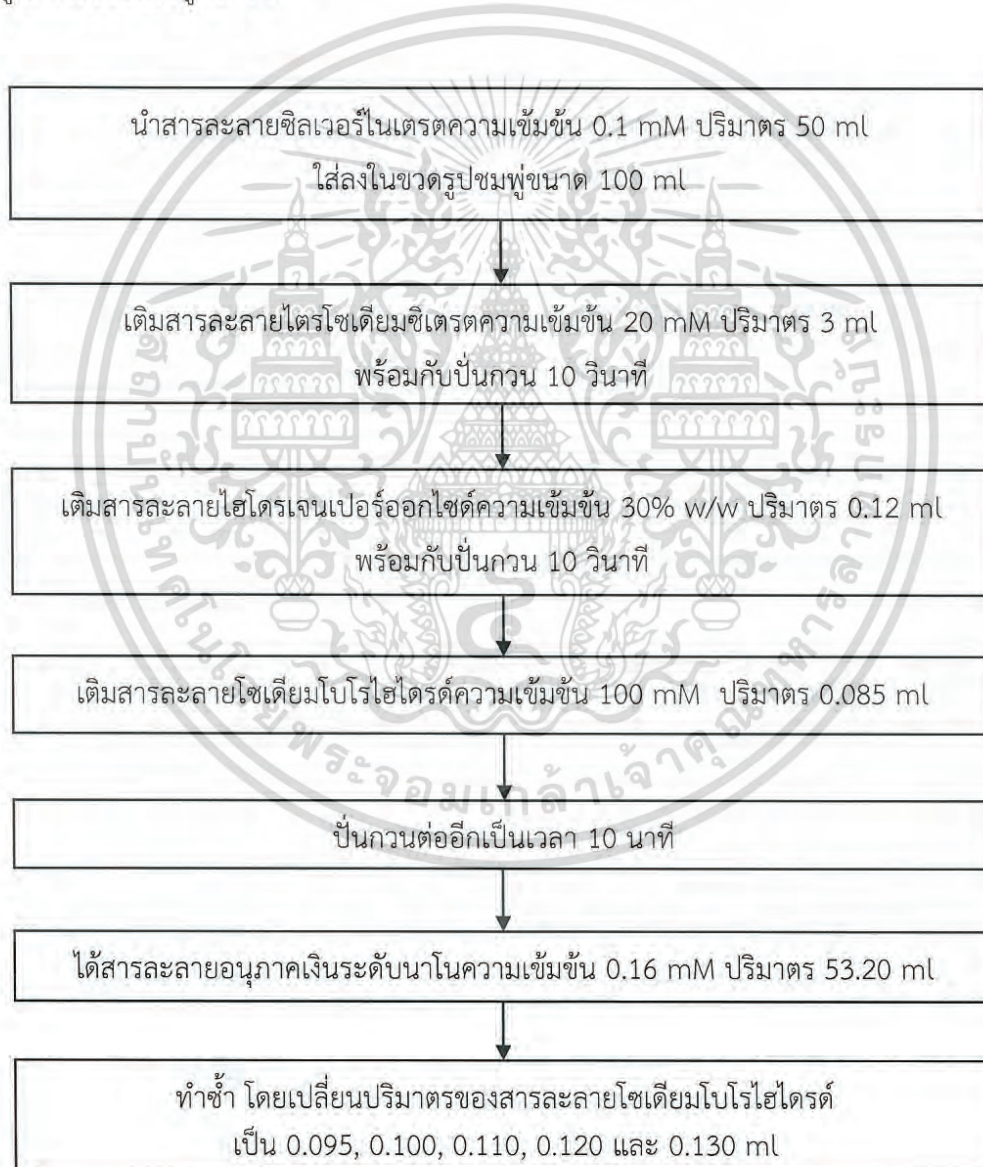
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

สารเคมี	สูตรโครงสร้าง/ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต, ประเทศ
ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate)	$\text{AgNO}_3$	Carlo Erba, France
โซเดียมซิเตรตไตรเบสิกไดไฮเดรต (Sodium citrate tribasic dihydrate)	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Sigma-Aldrich, Belgium
โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride)	$\text{NaBH}_4$	Sigma-Aldrich, USA
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)	$\text{H}_2\text{O}_2$	Carlo Erba, France
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	DI water	RHK Group, Thailand

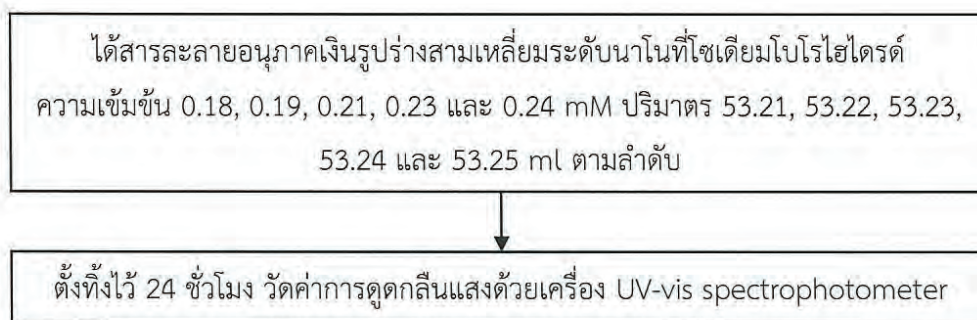
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์

ปีเปตสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 50 ml ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 ml เติมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้น 20 mM ปริมาตร 3 ml พร้อมกับปั่นกวน 10 วินาที แล้วเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30% w/w ปริมาตร 0.12 ml พร้อมกับปั่นกวน 10 วินาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่อุณหภูมิ 18 °C ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 0.085, 0.095, 0.100, 0.110, 0.120 และ 0.130 ml ตามลำดับ จากนั้นปั่นกวนต่ออีกเป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-350 nm ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



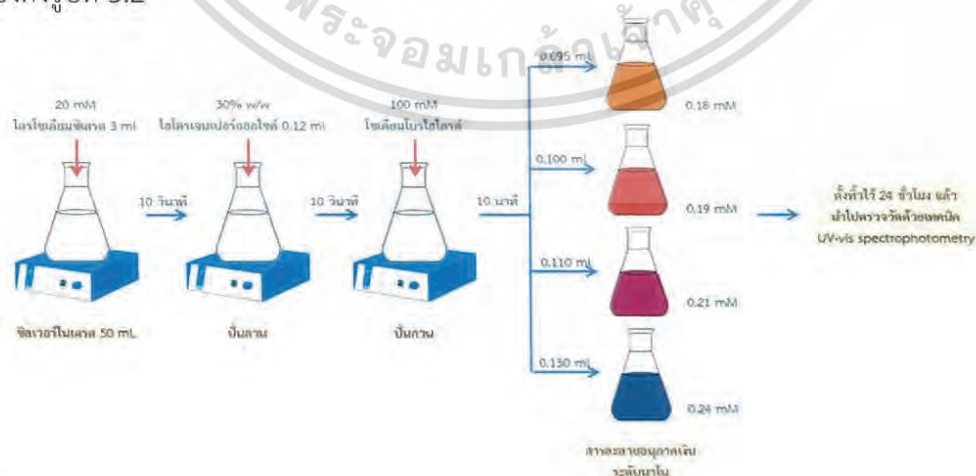
รูปที่ 3.1 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ทำให้เกิดสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน	UV-vis spectrophotometry

### 3.1.3 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs)

เปิดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 50 ml ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 ml เติมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้น 20 mM ปริมาตร 3 ml พร้อมกับปั่นจน 10 วินาที จากนั้นเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30% w/w ปริมาตร 0.12 ml พร้อมปั่นจน 10 วินาที แล้วเติมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่อุณหภูมิ 18 °C ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 0.095, 0.100, 0.110 และ 0.130 ml ตามลำดับ จากนั้นปั่นจนต่ออีกเป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-350 nm ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี

(Chemical reduction method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์คุณลักษณะของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ทำให้เกิดสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน	UV-vis spectrophotometry
ศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน	Transmission Electron Microscopy (TEM)
ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนและไตรโซเดียมซิเตรต	Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

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

#### 3.2.1 การเตรียมพื้นผิวแผ่นฟิล์มบางให้มีคุณสมบัติความชอบน้ำ (Primer)

##### 3.2.1.1 สารเคมี

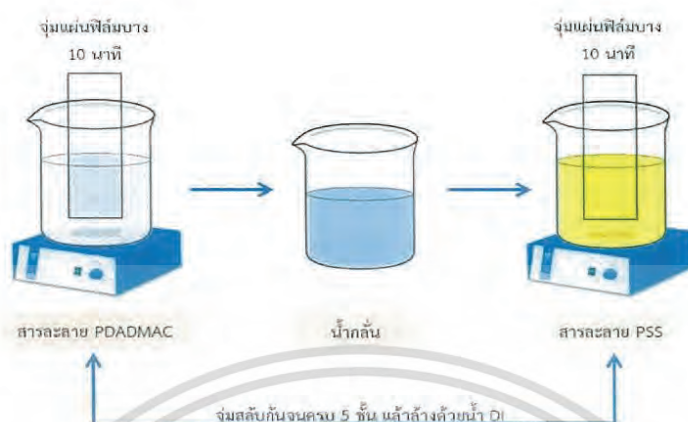
ตารางที่ 3.4 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมพื้นผิวแผ่นฟิล์มบาง

สารเคมี	สูตรโครงสร้าง/ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต, ประเทศ
โพลีไดอัลริลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Poly(diallyldimethylammonium chloride))	$(C_8H_{16}ClN)_n$ / PDADMAC	Sigma-Aldrich, USA
โพลีสไตรีนซัลโฟเนต (Poly (sodium 4-styrenesulfonate))	$(C_8H_7NaO_3S)_n$ / PSS	Sigma-Aldrich, USA
โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride)	NaCl	Carlo Erba, France
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	DI water	RHK Group, Thailand

##### 3.2.1.2 การปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุรองรับกระจกสไลด์ให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ

เตรียมสารละลาย PDADMAC และสารละลาย PSS ความเข้มข้น 10 mM ปริมาตร 1000 ml แล้วชั่งเกลือโซเดียมคลอไรด์ 58.50 กรัม (ความเข้มข้น 1 M) เติมน้ำลงในสารละลายทั้งสองจากนั้นนำแผ่นกระจกมาจุ่มลงในสารละลาย PDADMAC เป็นเวลา 10 นาที พร้อมปั่นกวนตลอดเวลา เมื่อครบ 10 นาที นำแผ่นกระจกขึ้นจากสารละลายแล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นต่อนำไปจุ่มลงในสารละลาย PSS เป็นเวลา 10 นาที พร้อมปั่นกวนตลอดเวลา เมื่อครบ 10 นาที นำแผ่นกระจกขึ้นจากสารละลายแล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น ทำการจุ่มสลับระหว่างสารละลายทั้งสองจนได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนชั้นเท่ากับ 5 ชั้น จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำ DI โดยขั้นสุดท้ายเป็นชั้นของสารละลาย PDADMAC ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุรองรับกระจกใส

### 3.2.2 การศึกษาการดูดซับของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์ม

#### 3.2.2.1 สารเคมี

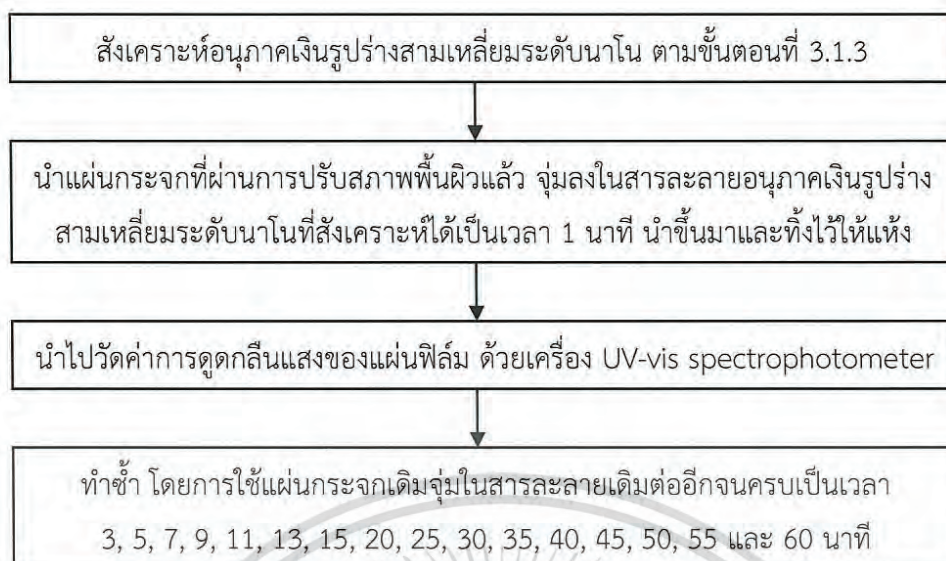
ตารางที่ 3.5 สารเคมีที่ใช้ศึกษาการดูดซับของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์ม

สารเคมี	สูตรโครงสร้าง/ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต, ประเทศ
สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ (จากขั้นตอนที่ 3.1.3)	AgTNPs	-
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	DI water	RHK Group, Thailand

#### 3.2.2.2 การศึกษาการดูดซับของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์ม

สังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนตามขั้นตอนที่ 3.1.3 จากนั้นนำแผ่นกระจกที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวแล้ว จุ่มลงในสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ทุกความเข้มข้น เป็นเวลา 1 นาที นำขึ้นมาและทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-350 nm ทำซ้ำโดยใช้แผ่นกระจกเดิมจุ่มในสารละลายเดิมต่ออีกจนครบเป็นเวลา 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 นาที ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การศึกษากลศาสตร์การดูดซับของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์ม

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษากลศาสตร์การดูดซับของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์ม

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ศึกษาสีของแผ่นฟิล์มเมื่อจุ่มในสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ระยะเวลา 1 - 60 นาที	UV-vis spectrophotometry

3.3 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลุ่มต้าไฮโอน

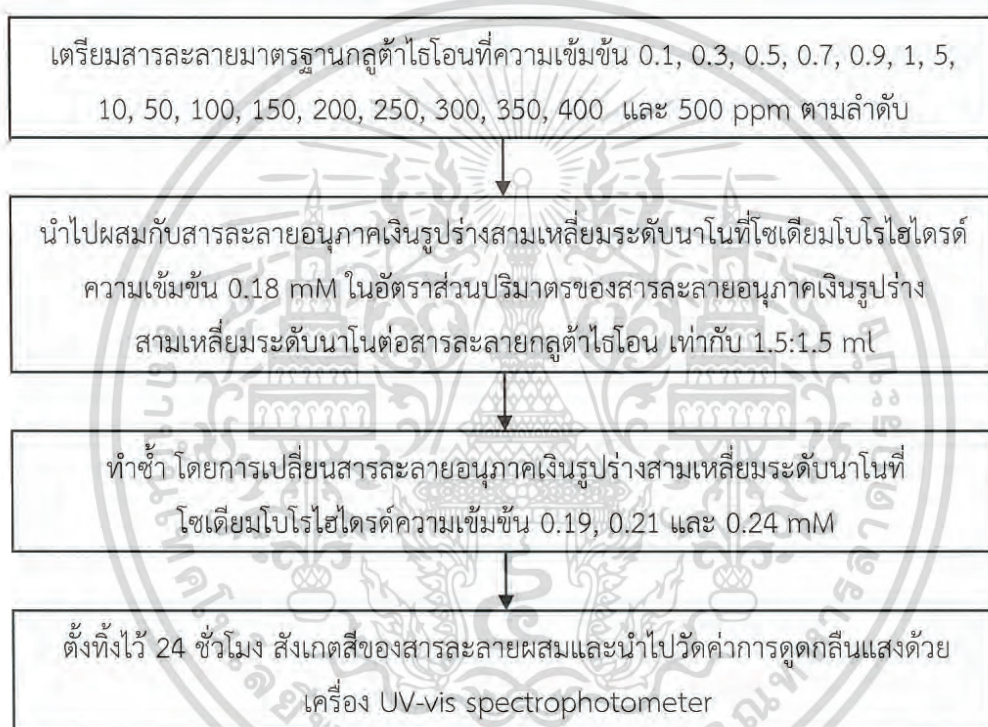
3.3.1 สารเคมี

ตารางที่ 3.7 สารเคมีที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลุ่มต้าไฮโอน

สารเคมี	สูตรโครงสร้าง/ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต, ประเทศ
สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (จากขั้นตอนที่ 3.1.3)	AgTNPs	-
กลูต้าไธโอน (Glutathione)	$C_{10}H_{17}N_3O_6S$	Sigma-Aldrich, Japan
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	DI water	RHK Group, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การศึกษาหาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1, 5, 10, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 และ 500 ppm ตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นดังกล่าวผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.18, 0.19, 0.21 และ 0.24 mM ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน เท่ากับ 1.5:1.5 ml จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1000-350 nm ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

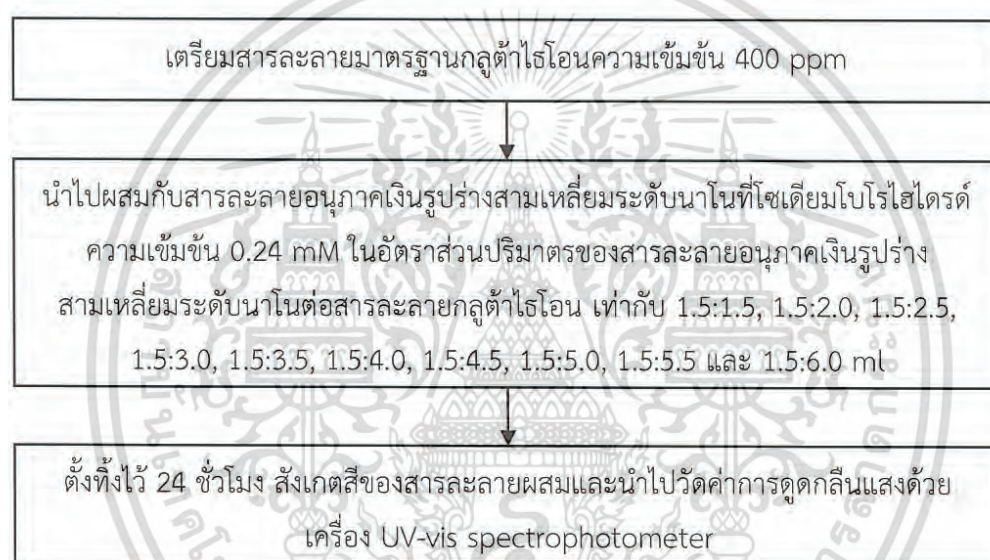
ตารางที่ 3.8 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน	UV-vis spectrophotometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM ต่อสารละลายกลูต้าไรโอน

เตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไรโอนที่ความเข้มข้น 400 ppm จากนั้นนำสารละลายกลูต้าไรโอนที่ความเข้มข้นดังกล่าวผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไรโอน เท่ากับ 1.5:1.5, 1.5:2.0, 1.5:2.5, 1.5:3.0, 1.5:3.5, 1.5:4.0, 1.5:4.5, 1.5:5.0, 1.5:5.5 และ 1.5:6.0 ml จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1000-350 nm ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM ต่อกลูต้าไรโอน

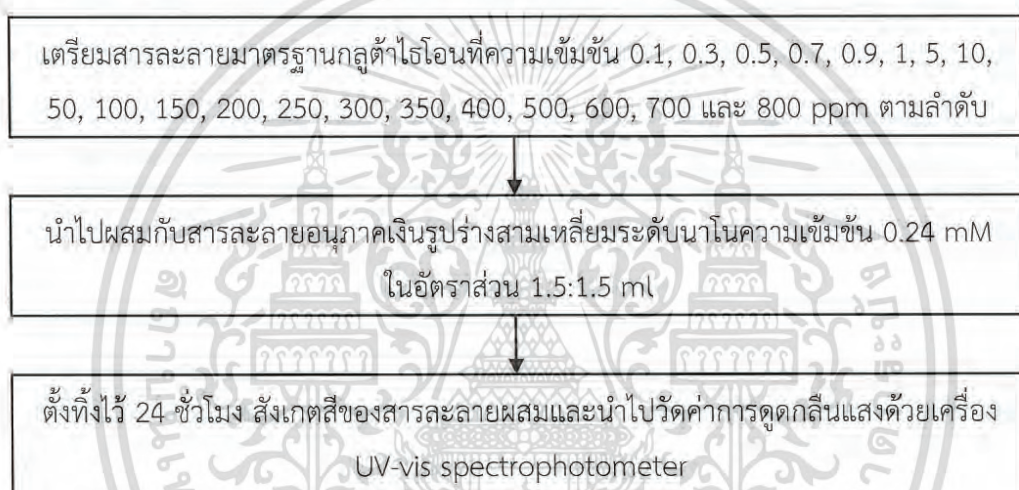
ตารางที่ 3.9 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไรโอน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไรโอน โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายผสม	UV-vis spectrophotometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การศึกษาหาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM

เตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1, 3, 5, 10, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 700 และ 800 ppm ตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นดังกล่าวผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน เท่ากับ 1.5:1.5 ml จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1000-350 nm ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM ในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

ตารางที่ 3.10 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

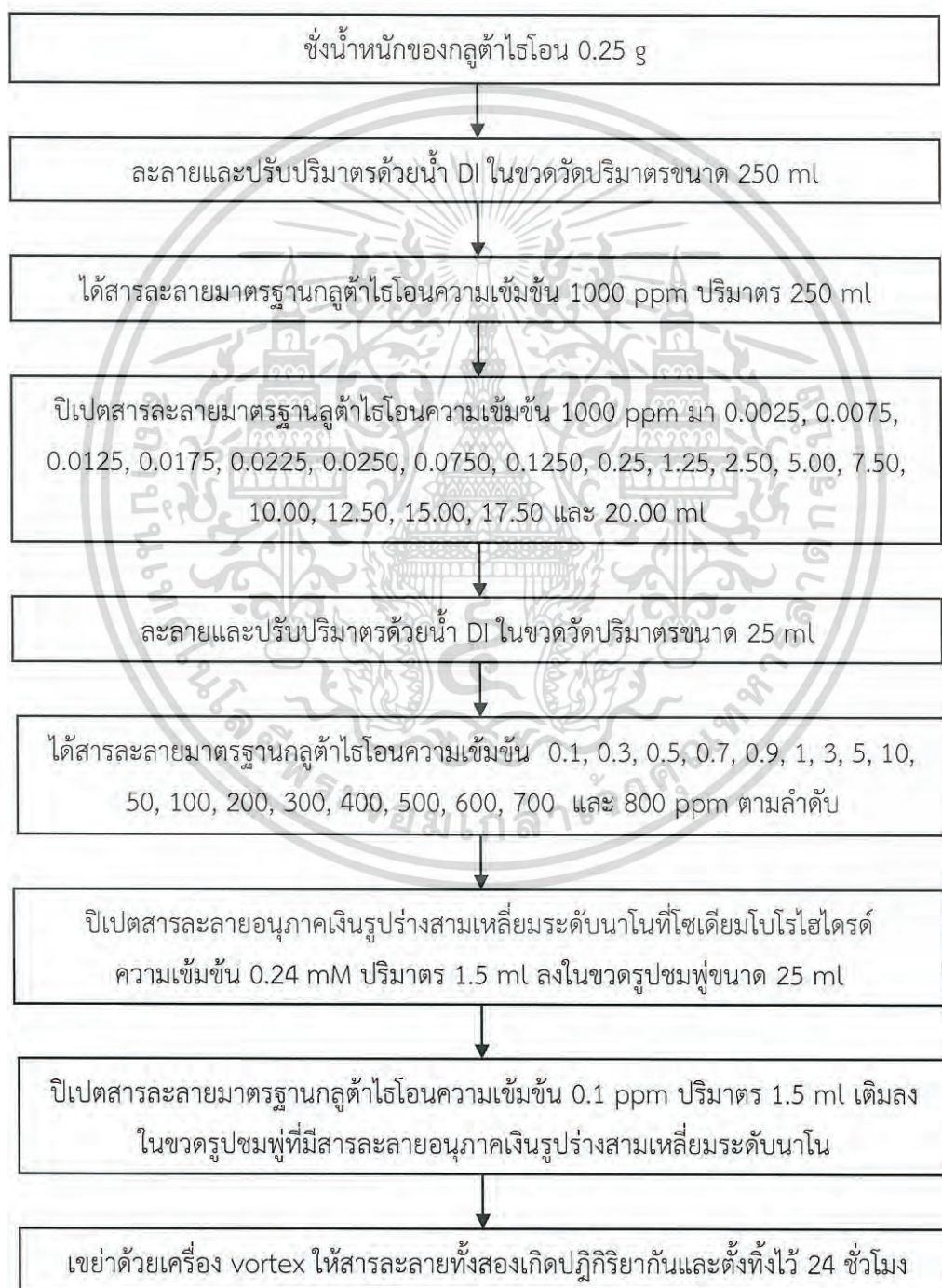
ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนความเข้มข้น 0.24 mM เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน	UV-vis spectrophotometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

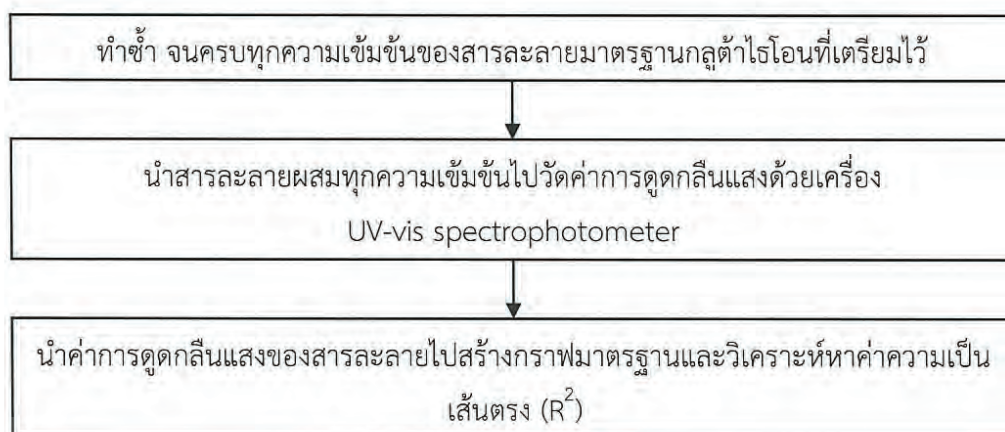
### 3.4 การศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM

#### 3.4.1 การศึกษาความเป็นเส้นตรง

ศึกษาโดยการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1, 3, 5, 10, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 และ 800 ppm จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นเส้นตรง ( $R^2$ ) ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การศึกษาความเป็นเส้นตรงของวิธีการหาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM

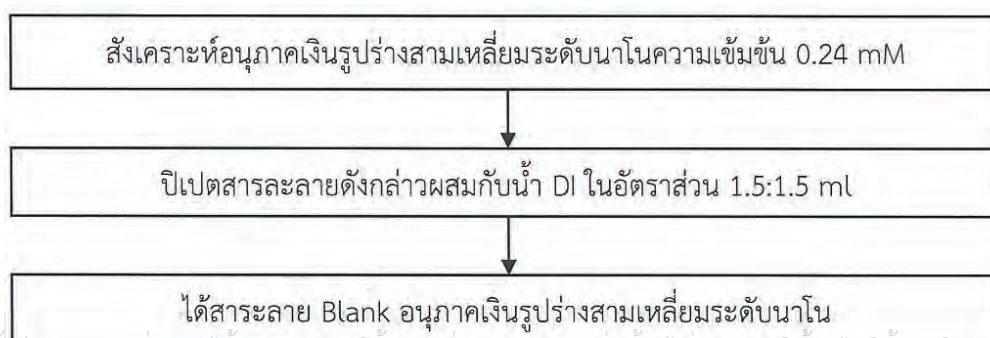
ตารางที่ 3.11 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาความเป็นเส้นตรงของวิธีการหาปริมาณกลูต้าไธโอน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ศึกษาความเป็นเส้นตรงของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM	UV-vis spectrophotometry

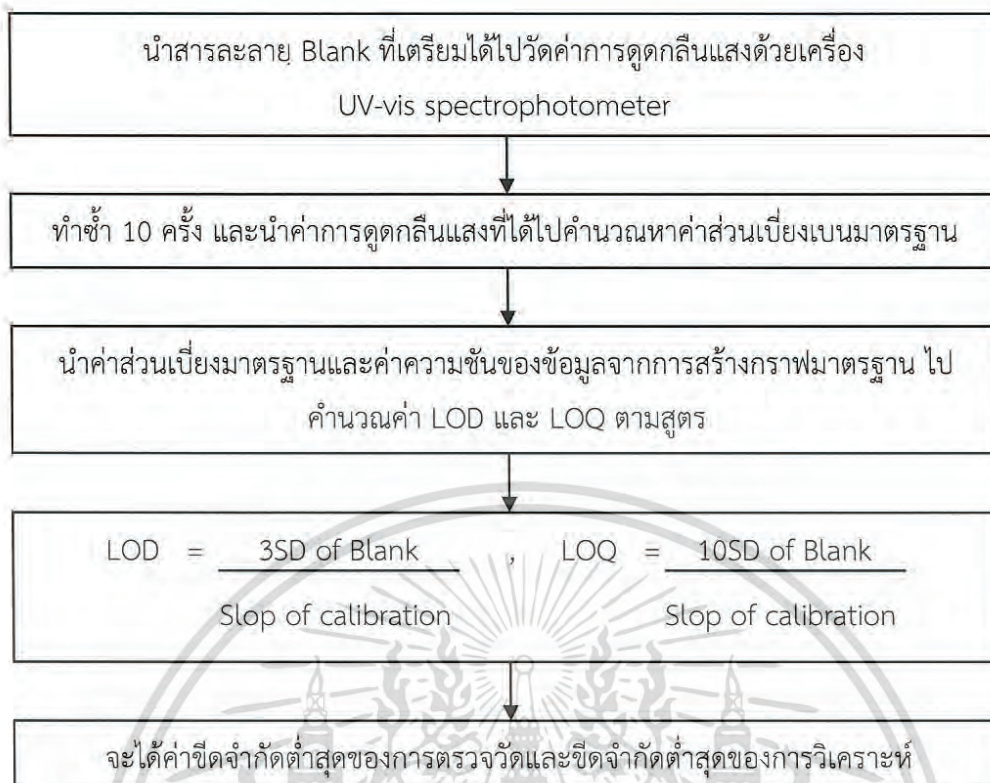
### 3.4.2 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection) และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation)

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection) เป็นการศึกษาปริมาณที่ต่ำที่สุดของกลูต้าไธโอนที่ตรวจวัดได้ และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation) เป็นการศึกษาปริมาณต่ำที่สุดของกลูต้าไธโอนที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยข้อมูลจากการสร้างกราฟมาตรฐาน

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection) และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation) ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดและขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์

ตารางที่ 3.12 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดและขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดและขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM	UV-vis spectrophotometry

### 3.4.3 การศึกษาหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery)

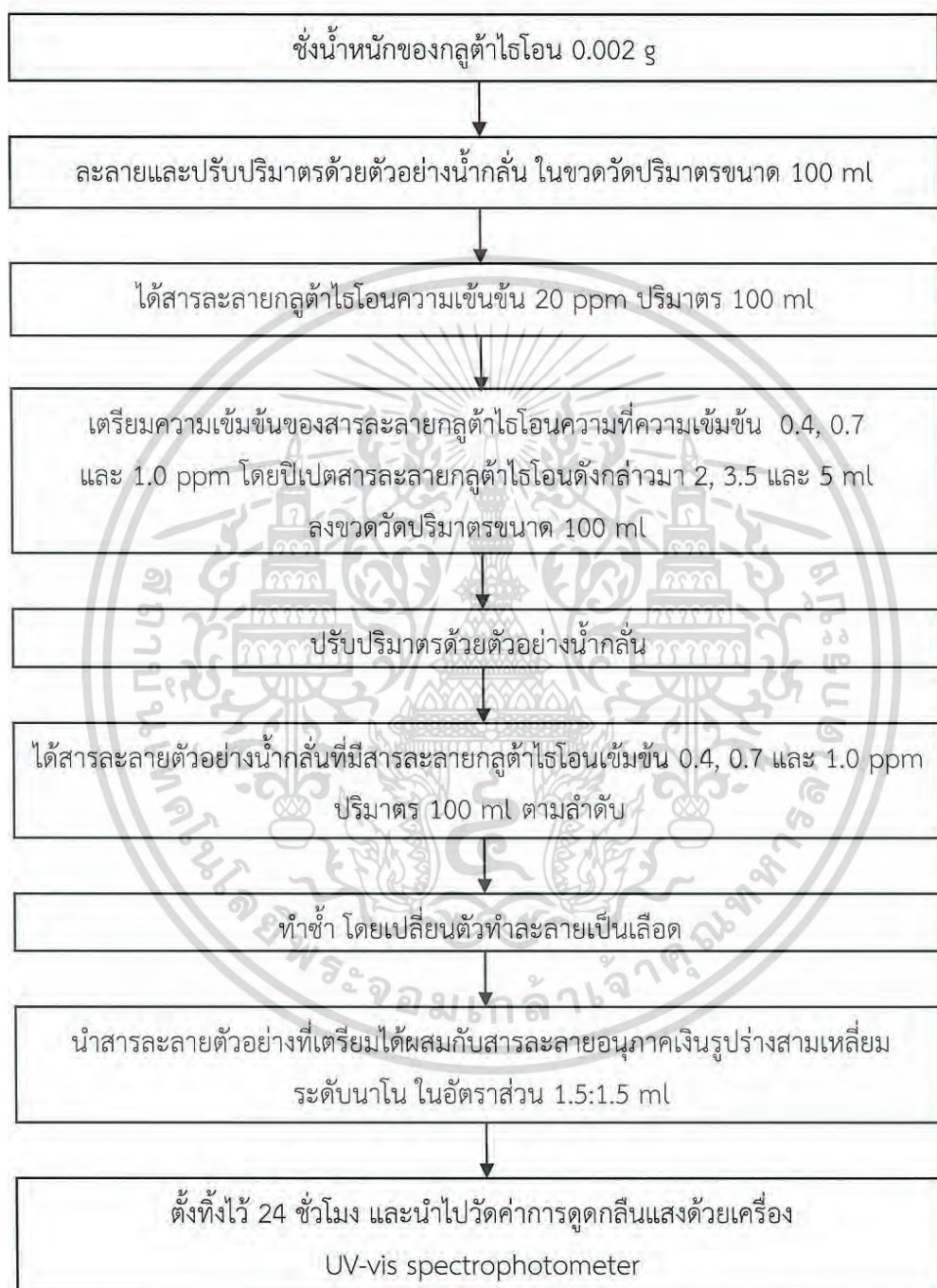
ตัวอย่าง : น้ำกลั่น (Distilled water) และเลือด (Plasma) ที่เจือจางด้วยน้ำ DI 1000 เท่า

ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่เติมลงไป : 0.4, 0.7 และ 1.0 ppm

ทำได้โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.4, 0.7 และ 1.0 ppm ด้วยตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด จากนั้นนำสารละลายกลูต้าไธโอนแต่ละความเข้มข้นผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5:1.5 ml จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1000-350 nm ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การศึกษาหาร้อยละของการคืนกลับ

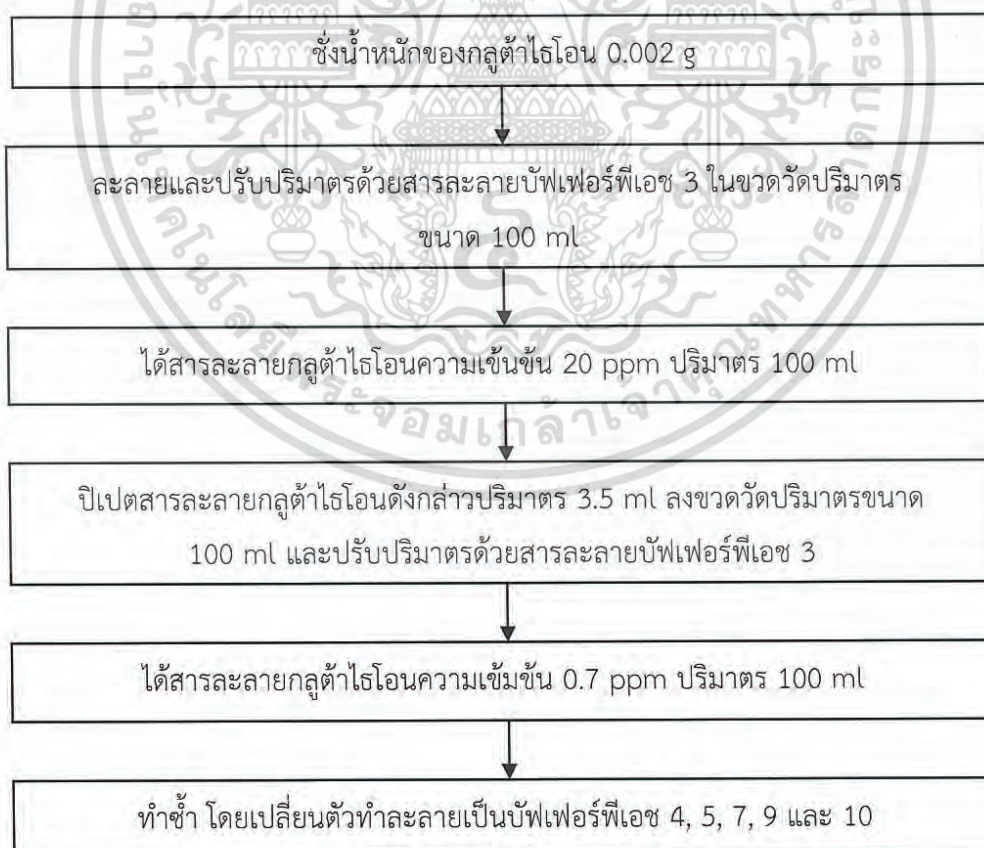
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.13 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาหาค่าร้อยละของการคืนกลับ

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ศึกษาหาค่าร้อยละการคืนกลับของสารมาตรฐานกลูต้าไธโอนด้วยอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM	UV-vis spectrophotometry

#### 3.4.4 การศึกษาอิทธิของพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์

เตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 0.7 ppm โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่ พีเอชเท่ากับ 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 เป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนต่อสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเท่ากับ 1.5:1.5 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1000-350 nm ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



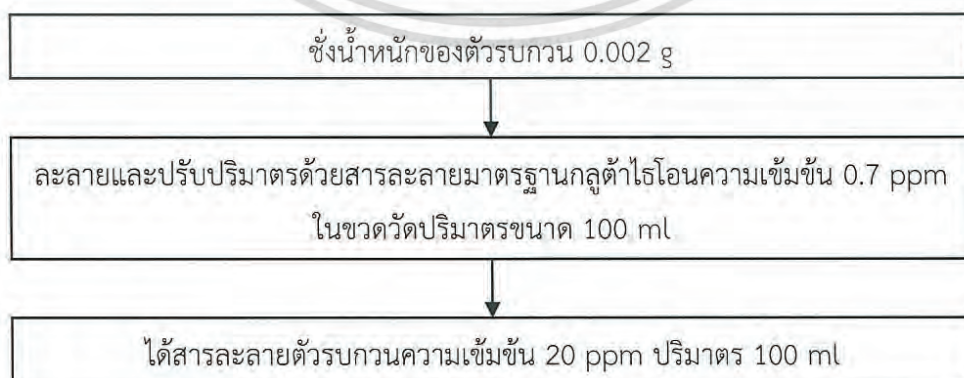
รูปที่ 3.11 การศึกษาอิทธิทธิของพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 3.14 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาอิทธิทธิของพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

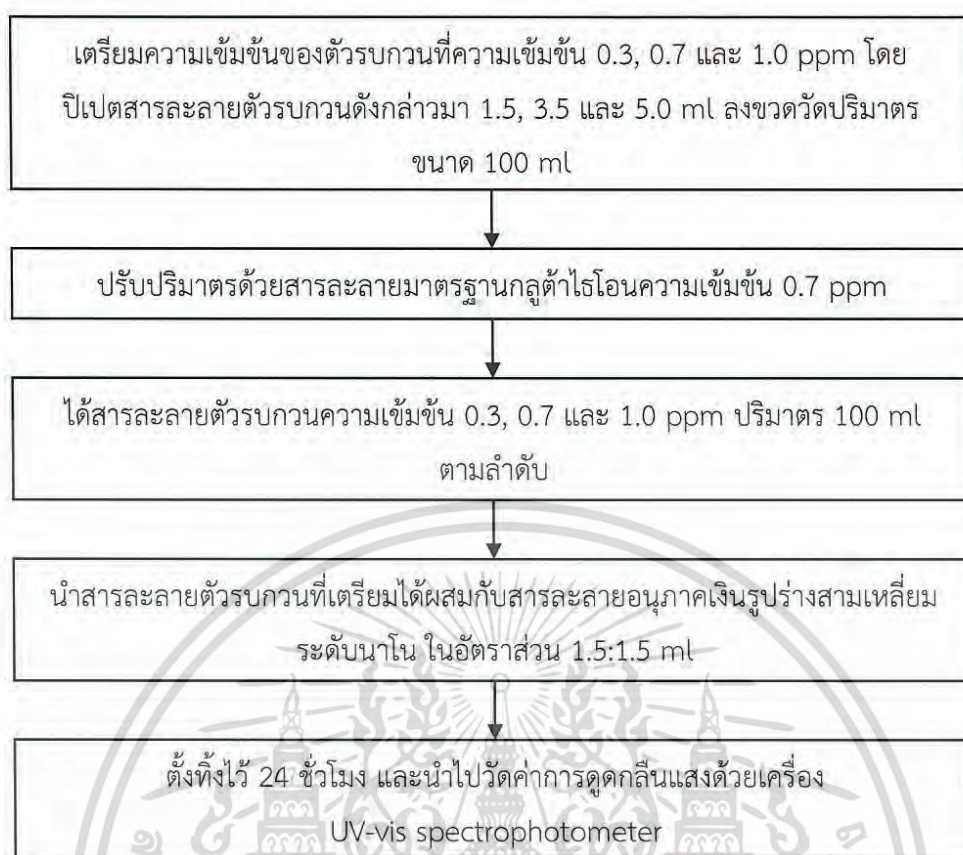
ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ศึกษาอิทธิทธิของพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน	UV-vis spectrophotometry

### 3.4.5 การศึกษาผลกระทบของตัวรบกวนที่มีผลต่อสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์

เตรียมสารละลายโซเดียมไนเตรต, โพแทสเซียมไนเตรต, แมกนีเซียมซัลเฟต, แคลเซียมซัลเฟต, กรดยูริก, กรดแอสคอร์บิก, ไอออน(II)ซัลเฟต, กลูโคส และซูโคส ความเข้มข้น 0.3, 0.7 และ 1.0 ppm โดยใช้สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 0.7 ppm เป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.24 mM ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายของตัวรบกวนเท่ากับ 1.5:1.5 ml แล้วสังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1000-350 nm ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การศึกษาผลกระทบของตัวรบกวนที่มีผลต่อสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์

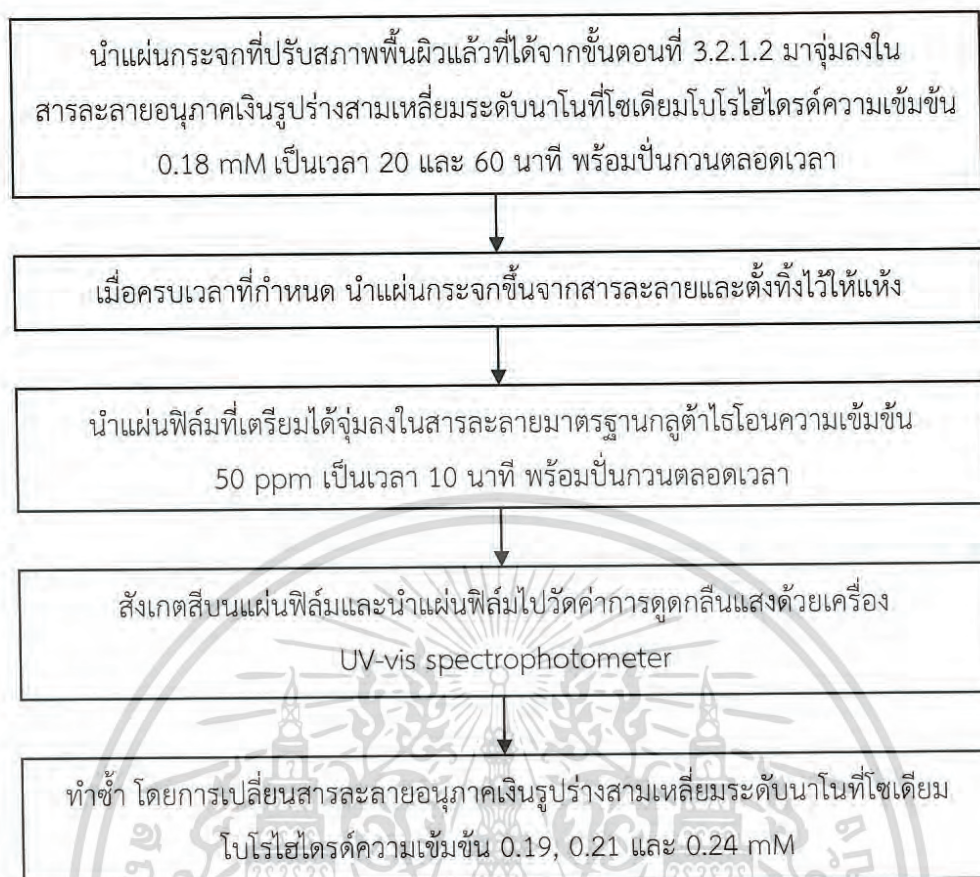
ตารางที่ 3.15 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาตัวรบกวนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ศึกษาตัวรบกวนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน	UV-vis spectrophotometry

### 3.5 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

3.5.1 การศึกษาหาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ทำการสร้างแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนความเข้มข้น 0.18, 0.19, 0.21 และ 0.24 mM จากนั้นเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 50 ppm และนำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มาจุ่มลงในสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่เตรียมไว้ สังเกตสีของแผ่นฟิล์มและนำแผ่นฟิล์มไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1000-350 nm ซึ่งสามารถแสดงการทดลองดังรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

ตารางที่ 3.16 ตัวแปรและเทคนิคที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน	UV-vis spectrophotometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยารีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) เพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้ในการวิเคราะห์ปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี (Colorimetric method) สามารถแบ่งผลการวิจัยและการอภิปรายผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ดังต่อไปนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือ การวิจัยและอภิปรายผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ส่วนที่สอง คือ การวิจัยและอภิปรายผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสร้างแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) และส่วนสุดท้าย คือ การวิจัยและอภิปรายผลการศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายและแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอน

#### 4.1 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs)

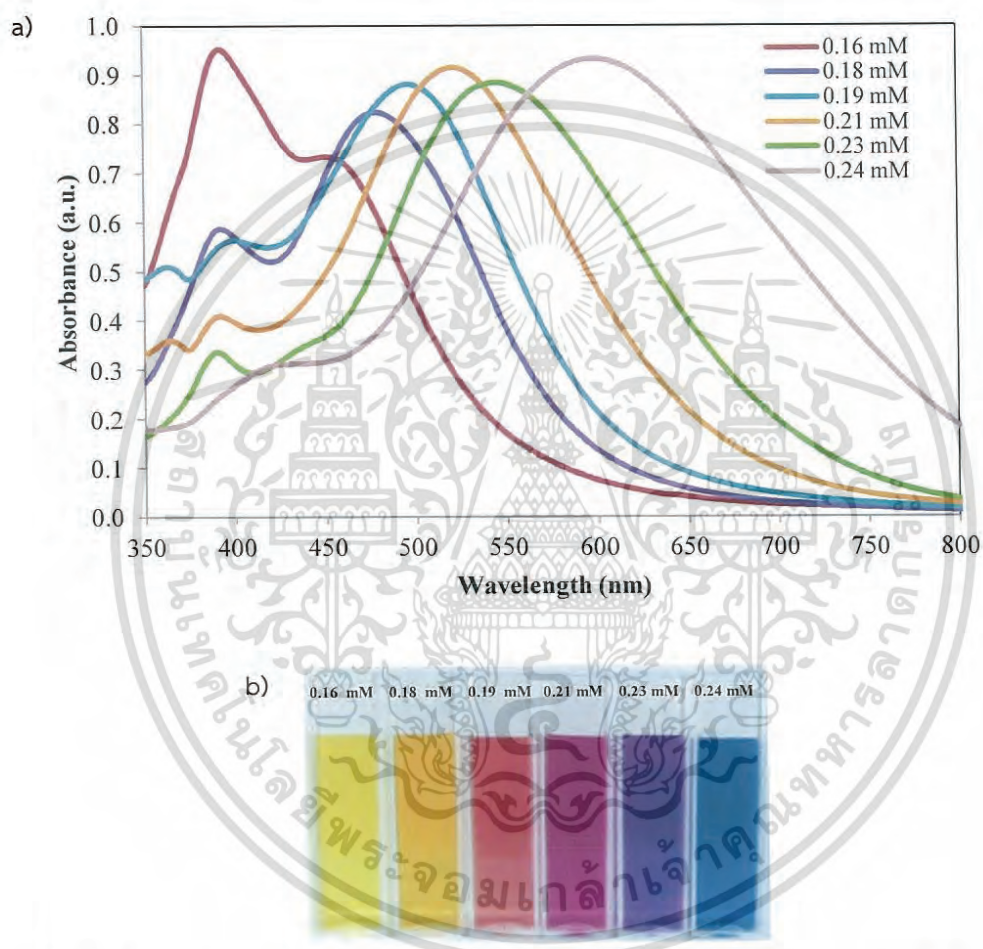
งานวิจัยนี้ต้องการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยารีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) โดยใช้สารละลายไตรโซเดียมไซเตรตทำหน้าที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพ และใช้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ อีกทั้งใช้สารละลายไฮโดเจนเปอร์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวกัด (Etchant) อนุภาคเงินรูปร่างกลมให้กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) โดยทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-vis spectrophotometry) และศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR) และเพื่อยืนยันผลการสังเคราะห์สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) จึงทำการศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM)

##### 4.1.1 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์

ในการทดลองนี้ ทำโดยเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.10 mM ผสมกับสารละลายไตรโซเดียมไซเตรตความเข้มข้น 20 mM และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30% w/w เข้าด้วยกัน แล้วเติมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ใช้ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 0.16, 0.18, 0.19, 0.21, 0.23 และ 0.24 mM โดยเตรียมจากสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์เข้มข้น 100 mM อุณหภูมิ 18°C ในปริมาตร 0.085, 0.095, 0.100, 0.110, 0.120 และ 0.130 ml ตามลำดับ จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ปฏิกิริยาการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมเกิดได้สมบูรณ์ แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-vis spectrophotometry โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-350 nm ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน และ (b) สีของสารละลายที่สังเคราะห์โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

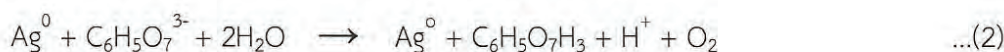
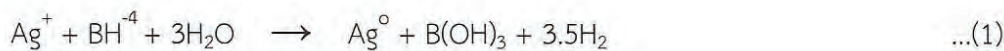
ตารางที่ 4.1 ค่าความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{\max}$ ) ของการดูดกลืนแสงอนุภาคเงินระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของไซเตียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ

ความเข้มข้นไซเตียมโบโรไฮไดรด์ (mM)	ความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{\max}$ )
0.16	451
0.18	479
0.19	497
0.21	522
0.23	546
0.24	602

จากรูปที่ 4.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและสีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายไซเตียมโบโรไฮไดรด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออน ( $Ag^+$ ) ให้เป็นอนุภาคเงินระดับนาโน ( $Ag^0$ ) ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไซเตียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น พฤติกรรมการปรากฏสีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนจะเปลี่ยนไป โดยเริ่มจากสารละลายใสไม่มีสีของซิลเวอร์ไนเตรต ( $Ag^+$ ) เปลี่ยนเป็นสีเหลือง ส้ม แดง ม่วง และน้ำเงินตามลำดับ ส่งผลให้สเปกตรัมค่าการดูดกลืนแสงเคลื่อนที่จากความยาวคลื่นสั้นไปยังความยาวคลื่นยาว (Red shift) ดังตารางที่ 4.1 พฤติกรรมการแสดงสีที่แตกต่างกันนี้เป็นไปตามทฤษฎีเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance) ซึ่งเป็น ปรากฏการณ์เชิงแสง ที่เกิดจากอันตรกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอิเล็กตรอนที่อยู่ในโลหะระดับนาโน กล่าวคือ เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมาตกกระทบโลหะ กลุ่มอิเล็กตรอนที่ถูกจำกัดอยู่ในอนุภาคระดับนาโนจะเกิดการสั่นรวม (Collective oscillation) และเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่อิเล็กตรอนสั่นในอนุภาคนาโน จะทำให้เกิดการกำทอนขึ้น ซึ่งอันตรกิริยาที่แสงกระทำต่อโลหะจะเกิดได้สองแบบ คือ แสงจะตกกระทบและสะท้อนออกไปด้วยความยาวคลื่นเท่าเดิมทุกทิศทุกทาง เรียกว่าการกระเจิง (Scattering) และในขณะเดียวกันบางโฟตอนก็จะถูกดูดกลืนและถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการสั่น ซึ่งเรียกว่าการดูดกลืนแสง (Absorption) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างระดับนาโนของอนุภาคเงินจะเกิดทั้งกระบวนการกระเจิงแสงและการดูดกลืนแสง ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน นั้นหมายความว่า สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นได้มีการแสดงสีที่แตกต่างกันนั้น เนื่องจากอนุภาคที่อยู่ในสารละลายมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกัน นั้นเป็นเพราะอิทธิพลจากความเข้มข้นของสารละลายไซเตียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน [62] เพื่อเป็นการยืนยันขนาดและรูปร่างของอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ขึ้น จึงทำการศึกษาด้วยเทคนิคการตรวจวัดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) ซึ่งแสดงผลในหัวข้อ 4.1.2.1 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

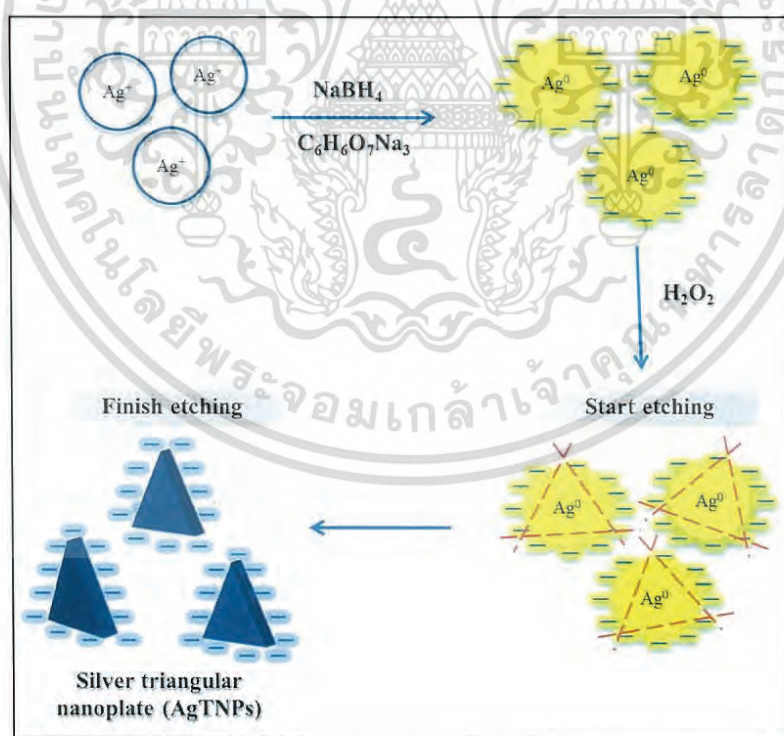
การสังเคราะห์ห่อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) สามารถแสดงการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.2 และสมการดังต่อไปนี้



In acidic solution:



In alkaline solution:



รูปที่ 4.2 กลไกปฏิกิริยาการสังเคราะห์ห่อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

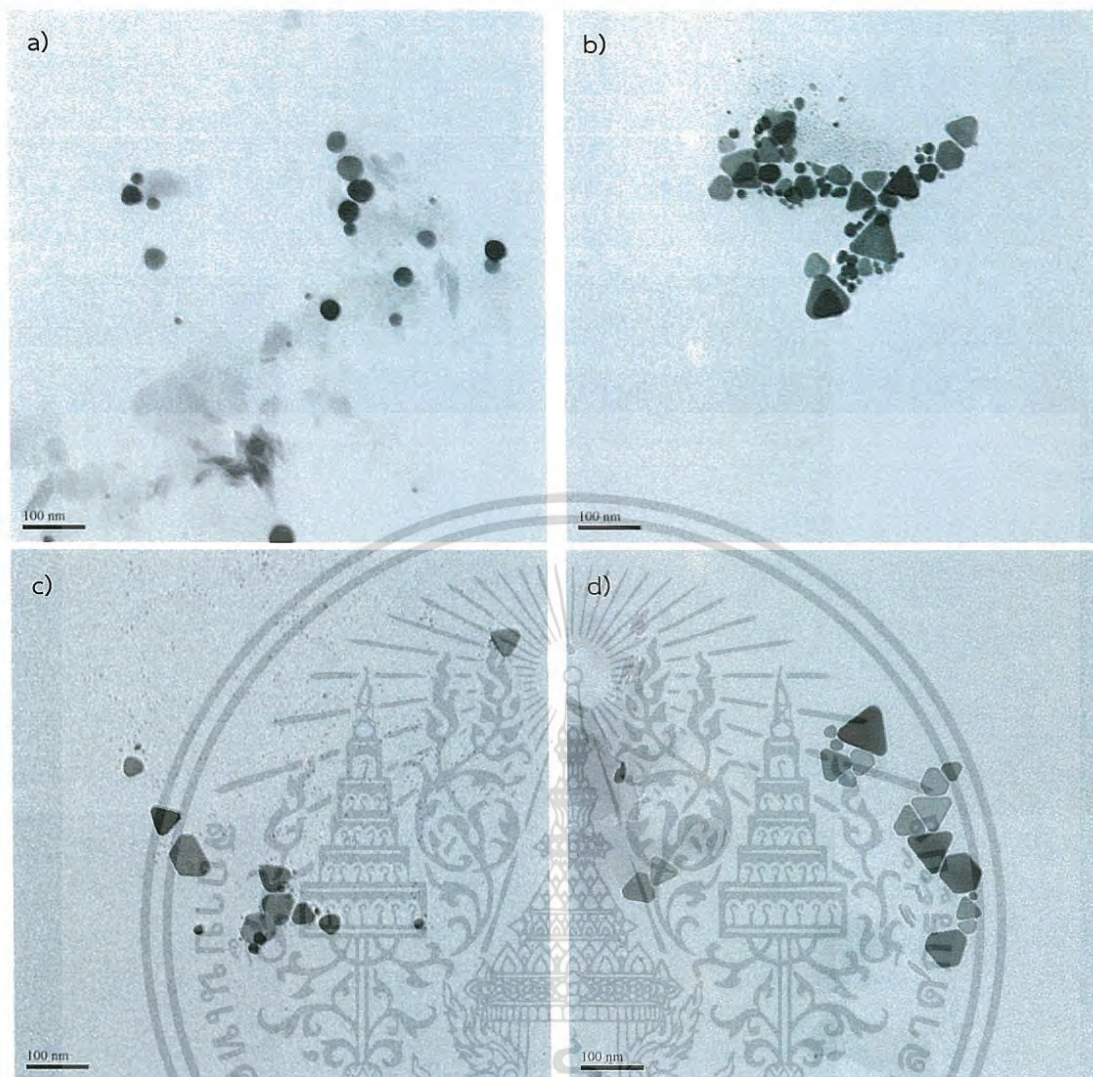
จากรูปที่ 4.2 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ( $\text{AgTNP}$ s) ปฏิกิริยาจะเริ่มหลังจากเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ลงในสารละลายโดย  $\text{Ag}^+$  จะถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ให้กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างกลม ( $\text{Ag}^0$ ) ดังสมการที่ (1) จากนั้นไตรโซเดียมไซเตรตจะเข้ารักษาเสถียรภาพของอนุภาคเงินรูปร่างกลม ดังสมการที่ (2) ส่งผลให้อนุภาคเงินมีประจุลบของหมู่คาร์บอกซิลิก ( $\text{COO}^-$ ) จากโครงสร้างไตรโซเดียมไซเตรต จากนั้นอนุภาคเงินรูปร่างกลมถูกกัด (Etchant) โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ( $\text{AgTNP}$ s)

เมื่อพิจารณาการทำงานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าในสารละลายที่มีภาวะเป็นกรด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน เท่ากับ 1.763 โวลต์ ดังสมการที่ (4) และในสารละลายที่มีภาวะเป็นด่าง สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน เท่ากับ 0.867 โวลต์ ดังสมการที่ (5) จะเห็นได้ว่า ไม่ว่าสารละลายจะอยู่ในสภาวะที่เป็นกรดหรือเป็นด่าง ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็ยังคงมีค่าสูงกว่าของ  $\text{Ag}^+/\text{Ag}$  ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน เท่ากับ 0.7996 โวลต์ ดังสมการที่ (3) นั้นหมายความว่า ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีในปฏิกิริยาการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน [29, 63]

#### 4.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

##### 4.1.2.1 การศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

ในการทดลองนี้ ทำโดยการเตรียมสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ต่างกัน คือ 0.18, 0.19, 0.21 และ 0.24 mM ตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายทั้ง 4 หยดลงบนกริด แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมระดับนาโน ซึ่งผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.3, 4.4 และตารางที่ 4.2

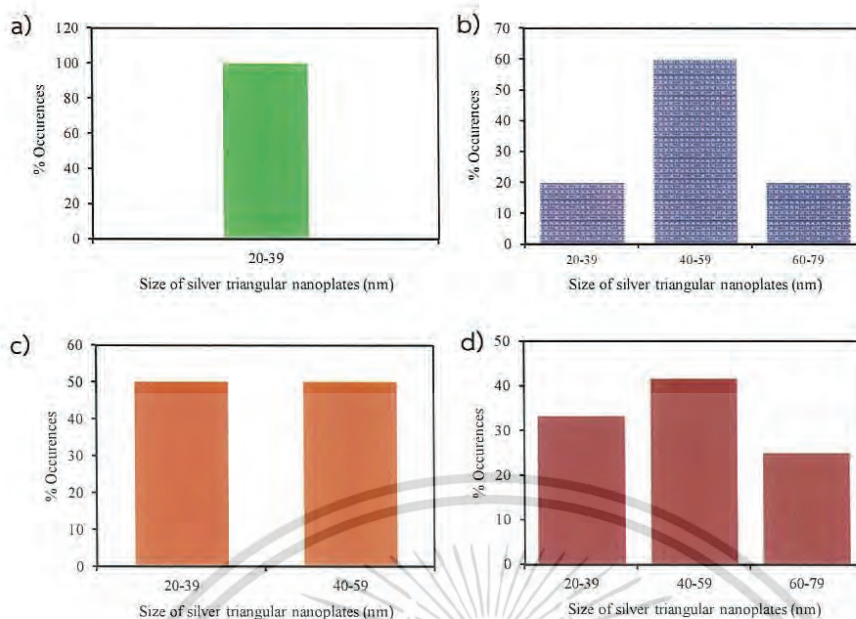


รูปที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (a) 0.18 mM, (b) 0.19 mM, (c) 0.21 mM และ (d) 0.24 mM

ตารางที่ 4.2 จำนวนอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ แตกต่างกัน จากรูปที่ 4.3

ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (mM)	จำนวนอนุภาค รูปร่างสามเหลี่ยม (อนุภาค)	จำนวนอนุภาค รูปร่างอื่นๆ (อนุภาค)	จำนวนอนุภาค รูปร่างสามเหลี่ยม (%)
0.18	1	15	6.25
0.19	10	41	19.61
0.21	6	7	46.15
0.24	12	6	66.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



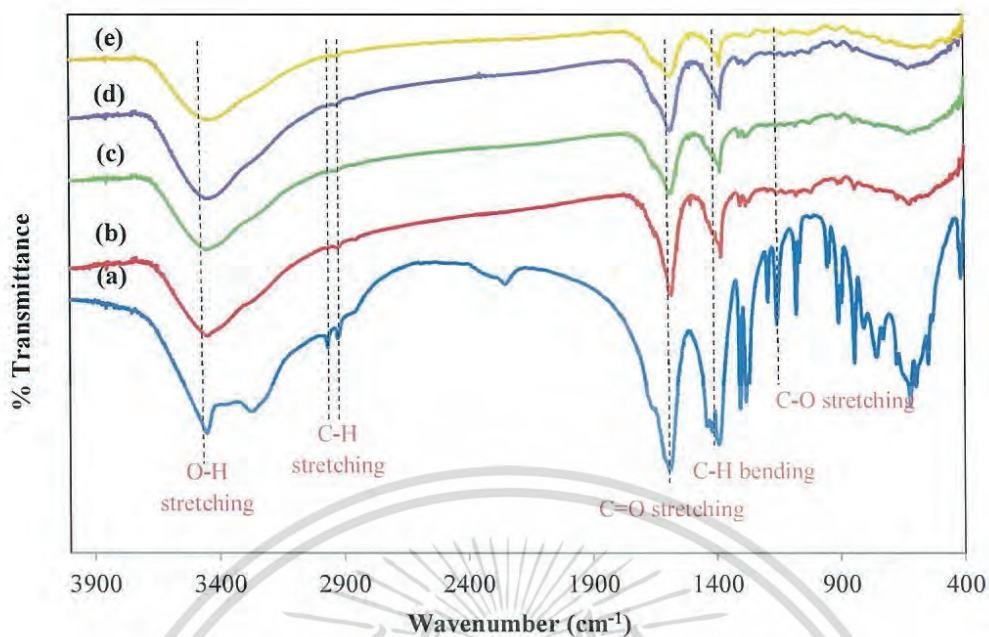
รูปที่ 4.4 กราฟแท่งแสดง size distribution ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (a) 0.18 mM, (b) 0.19 mM, (c) 0.21 mM และ (d) 0.24 mM

จากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น อนุภาคเงินระดับนาโนจะแสดงลักษณะรูปร่างสามเหลี่ยมมากขึ้น และการเกิดอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโนก็มีจำนวนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากที่สุดนั้นคือ 0.24 mM จะแสดงคุณลักษณะรูปร่างสามเหลี่ยมมากที่สุด และมีจำนวนอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมเกิดขึ้นในสารละลายมากที่สุด ซึ่งสามารถเห็นได้ดังตารางแสดงอัตราการเกิดรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน ตารางที่ 4.1

เมื่อทำการศึกษานาโนของอนุภาคที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า ขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมที่เกิดจากความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ กัน นั้น มีขนาดใกล้เคียงกันที่ประมาณ 40-59 nm แสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่มีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกันแต่รูปร่างเปลี่ยนไป ส่งผลต่อพฤติกรรมการแสดงสีของสารนั้นๆ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance) ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น

#### 4.1.2.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

ในการทดลองนี้ ทำโดยเตรียมสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 0.18, 0.19, 0.21 และ 0.24 mM จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้ รวมถึงไตรโซเดียมซิเตรตไปอบแห้งในตู้อบความร้อน ควบคุมอุณหภูมิที่ 80-90 °C แล้วนำไปตรวจวัดด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 FT-IR สเปกตรัมของ (a) ไตรโซเดียมซิเตรต, อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (b) 0.18 mM, (c) 0.19 mM, (d) 0.21 mM และ (e) 0.24 mM

ตารางที่ 4.3 หมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิเตรตและหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน จากรูปที่ 4.5

Peak assignment	Trisodium citrate (a) Peaks (cm <sup>-1</sup> )	AgTNPs (b) Peaks (cm <sup>-1</sup> )	AgTNPs (c) Peaks (cm <sup>-1</sup> )	AgTNPs (d) Peaks (cm <sup>-1</sup> )	AgTNPs (e) Peaks (cm <sup>-1</sup> )
O-H stretching	3453	3454	3446	3445	3466
C-H stretching	2965	-	-	-	-
C=O stretching	1587	1588	1587	1587	1577
C-H bending	1418,1393	1385	1385	1380	1384
C-O stretching	1194	1187	1073	1122	1132
C-O stretching	1156				
C-O stretching	1073				

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงค่า FT-IR สเปกตรัมของไตรโซเดียมซิเตรตและอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ และตารางที่ 4.3 (a) แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิเตรต โดยปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ O-H ที่เลขคลื่น 3453 cm<sup>-1</sup> ปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ C=O ที่เลขคลื่น 1587 cm<sup>-1</sup> ปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ C-O ที่เลขคลื่น 1073 cm<sup>-1</sup> และ ปรากฏลักษณะการสั่นแบบงอ (bending) ของพันธะ C-H ที่เลขคลื่น 1418 และ 1393 cm<sup>-1</sup>

เมื่อนำค่า FT-IR สเปกตรัมของไตรโซเดียมซิเตรตที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ทั้งสิ้น พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่ขึ้นที่เดียวกับหมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิเตรตบริสุทธิ์ โดยใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนทั้ง (b), (c), (d) และ (e) ปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ O-H ที่เลขคลื่น 3454, 3446, 3445 และ 3466  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ ปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ C=O ที่เลขคลื่น 1588, 1587, 1587 และ 1577  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ ปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ C-O ที่เลขคลื่น 1187, 1073, 1122 และ 1132  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ และปรากฏลักษณะการสั่นแบบงอ (bending) ของพันธะ C-H ที่เลขคลื่น 1385, 1385, 1380 และ 1384  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโพรไฮโดรด์ทั้งสี่ปรากฏลักษณะการสั่นแบบเดียวกันกับไตรโซเดียมซิเตรต จึงสามารถยืนยันได้ว่าสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้มีสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่ทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพอยู่จริง

จากผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNP) ในการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโพรไฮโดรด์ จะเลือกที่ความเข้มข้น 0.24 mM เพื่อทำการศึกษารากฏการณ์รับรู้กับสารละลายกลูตาไรโอนต่อไป เนื่องจากสารที่เกิดจากการรีดิวซ์ที่ความเข้มข้นนี้ ให้สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นสถานะที่ทำให้เกิดอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNP) มากที่สุด และมีจำนวนอนุภาคสามเหลี่ยมมากที่สุด และจากการศึกษางานวิจัยอื่นๆ พบว่าสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนสีน้ำเงินเป็นสารที่มีความเสถียรมากที่สุด [64]

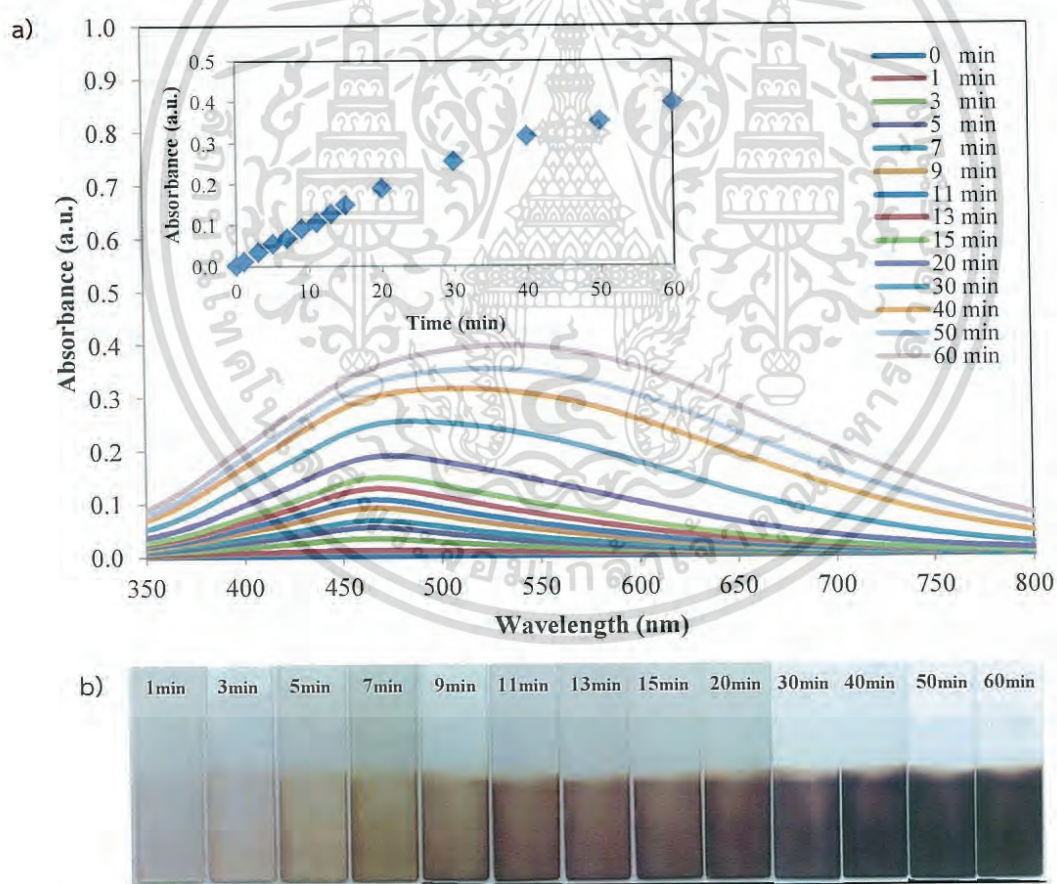
#### 4.2 การศึกษาสถานะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

ในงานวิจัยนี้ต้องการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) โดยเริ่มจากการปรับสภาพพื้นผิวของแผ่นฟิล์มบางให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ด้วยสารโพลีอิเล็กโทไลต์ที่มีประจุบวก (Polycation) คือ PDADMAC และสารโพลีอิเล็กโทไลต์ที่มีประจุลบ (Polyanion) คือ PSS ให้ได้จำนวนชั้นของสารโพลีอิเล็กโทไลต์ 5 ชั้น ซึ่งชั้นสุดท้ายจะแสดงประจุบวก (Polycation) ของ PDADMAC จากนั้นนำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้มาเคลือบบนแผ่นฟิล์มบางที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้ว โดยอาศัยประจุลบ (Polyanion) ของไตรโซเดียมซิเตรตที่รักษาเสถียรภาพบนอนุภาคเงินระดับนาโนในการยึดเกาะบนแผ่นฟิล์มบาง โดยตรวจวัดผลการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-vis spectrophotometry)

#### 4.2.1 การศึกษากลศาสตร์การดูดซับของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มบาง (Kinetic adsorption)

ในการทดลองนี้ ทำโดยการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายไซเตียมโบโรไฮไดรด์เท่ากับ 0.18 mM, 0.19 mM, 0.21 mM และ 0.24 mM จากนั้นนำแผ่นกระจกที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวแล้ว จุ่มลงในสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ที่ได้ เป็นเวลา 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 นาที ที่ทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-vis spectrophotometry โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-350 nm ซึ่งผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9

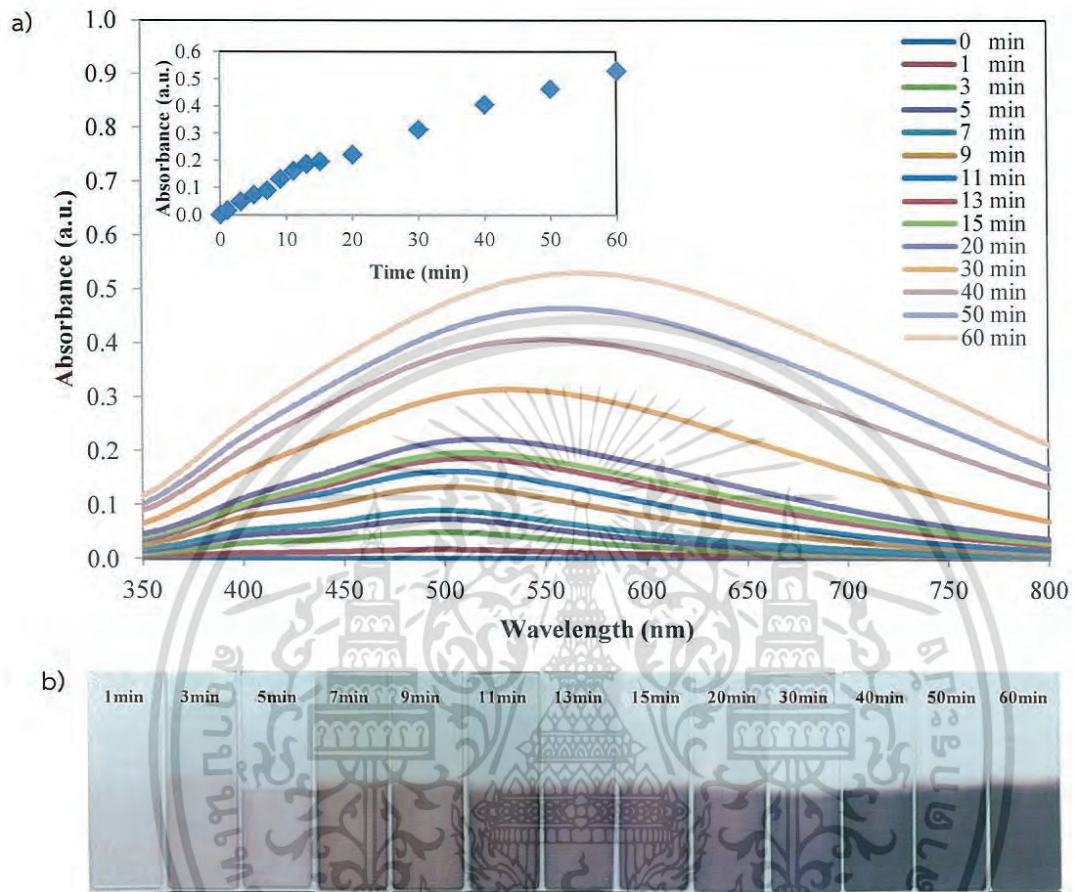
##### 4.2.1.1 สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มบาง ที่ความเข้มข้นไซเตียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบางที่ความเข้มข้นของสารละลายไซเตียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM

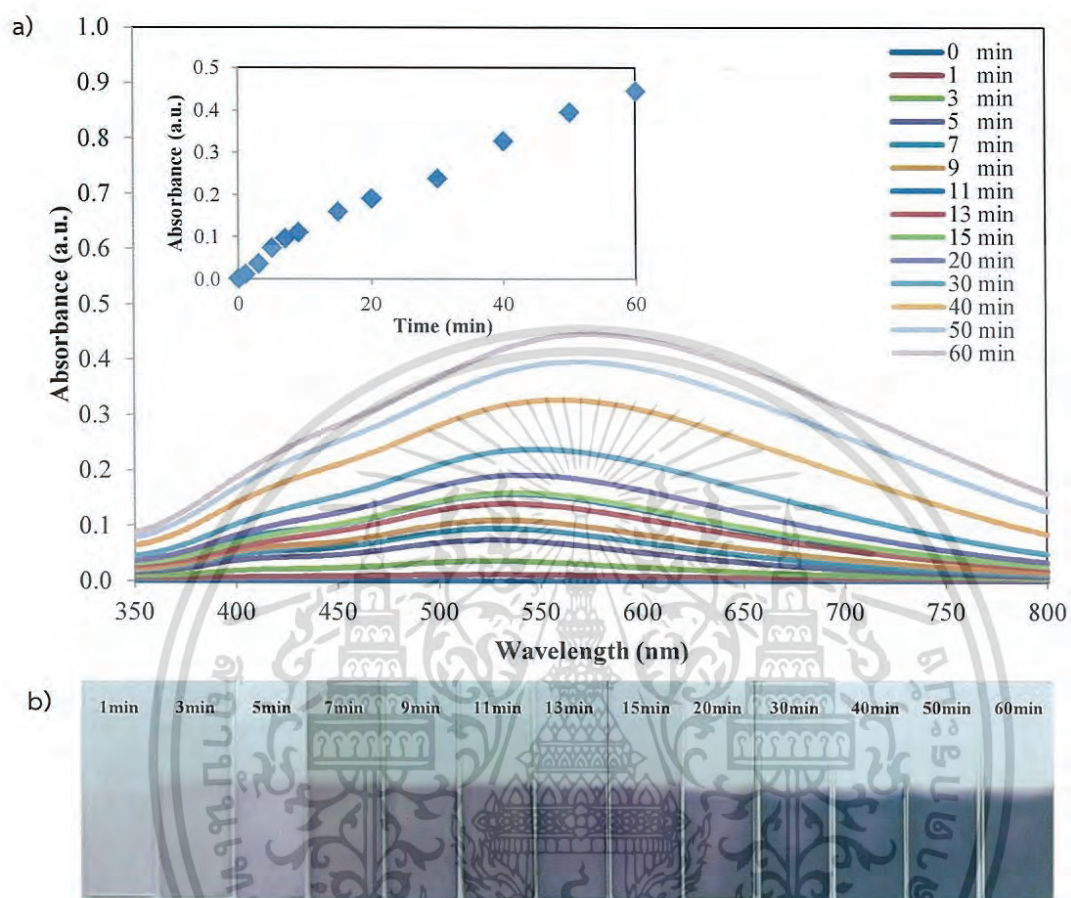
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มบาง ที่  
ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM



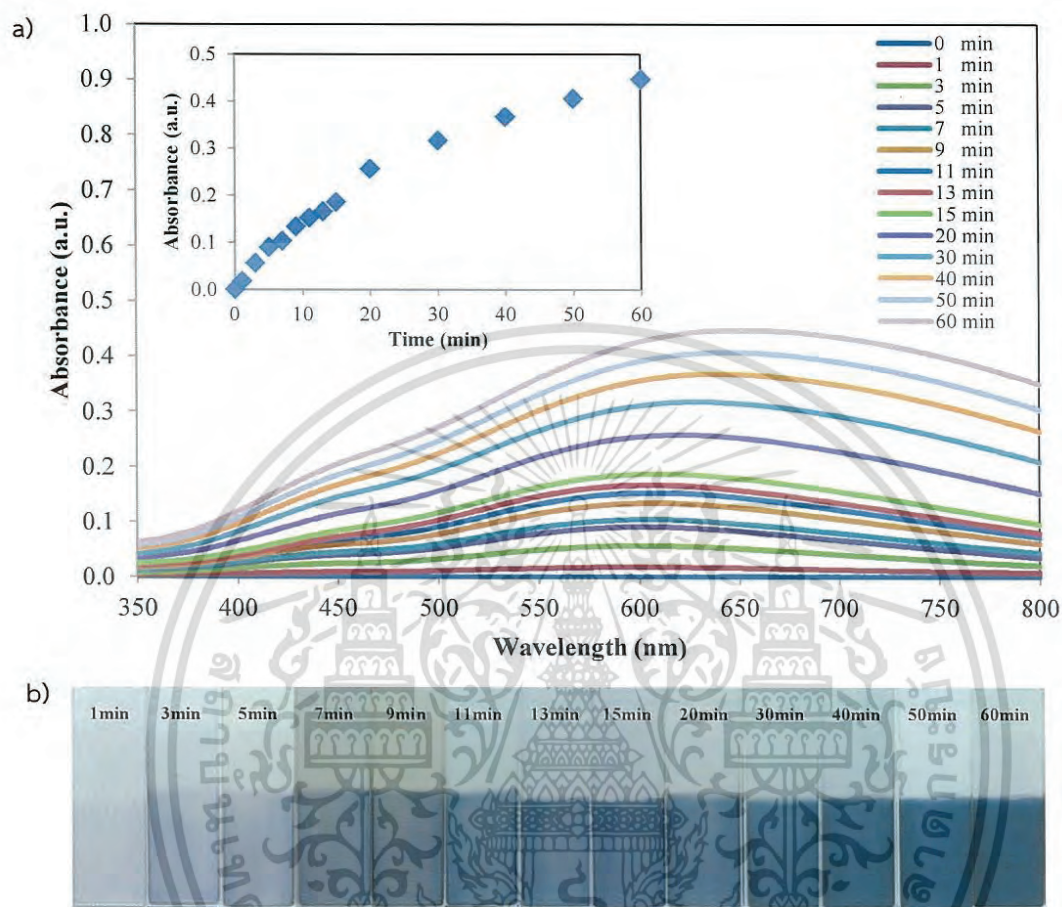
รูปที่ 4.7 สเปกตร้าแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบางที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM

#### 4.2.1.3 สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มบาง ที่ ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM



รูปที่ 4.8 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบางที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM

4.2.1.4 สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มบาง ที่  
ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM



รูปที่ 4.9 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบางที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM

ตารางที่ 4.4 ผลของเวลาในการดูดซับอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มบาง ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ

ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (mM)	สีสารละลาย	เวลาการดูดซับอนุภาคเงินบนแผ่นฟิล์มบาง (min)	ความยาวคลื่นสูงสุด, $\lambda_{\max}$ (nm)	สีแผ่นฟิล์ม
0.18	ส้ม	20	474	ส้มอิฐ
		60	536	ดำอมส้ม
0.19	แดง	20	518	ส้มอมม่วง
		60	566	ดำอมส้ม
0.21	ม่วง	20	536	ม่วง
		60	573	ดำอมม่วง
0.24	น้ำเงิน	20	618	ฟ้าน้ำทะเล
		60	650	น้ำเงิน

จากรูปที่ 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ พบว่าสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนสามารถเคลือบบนแผ่นฟิล์มบางได้ เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic force) ระหว่างประจุลบ ( $\text{COO}^-$ ) ของไตรโซเดียมซิเตรตที่รักษาเสถียรภาพของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และประจุบวกของ PDADMAC ที่อยู่บนพื้นผิวของแผ่นฟิล์ม เมื่อนำสารละลายอนุภาคเงินมาสร้างแผ่นฟิล์มบาง ผลที่ได้แผ่นฟิล์มบางมีแนวโน้มสีเข้มขึ้น เนื่องจากเกิดการรวมตัวของอนุภาคเงินระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มบาง จึงแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางเพิ่มมากขึ้น เมื่อเวลาการจุ่มแผ่นฟิล์มบางในสารละลายอนุภาคเงินเพิ่มขึ้น และค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หากยังคงเพิ่มเวลาในการจุ่มมากขึ้น แสดงถึงความไม่อิ่มตัวในการดูดซับอนุภาคเงินระดับนาโนของสารละลาย PDADMAC ที่อยู่บนผิวหน้าของแผ่นฟิล์ม [65]

ในการเลือกเวลาการดูดซับของอนุภาคเงินบนแผ่นฟิล์มบางที่เหมาะสมเพื่อนำไปศึกษาปรากฏการณ์รับรู้กับสารละลายกลูตาไรโอนั้น จะเลือกเวลาที่แผ่นฟิล์มบางมีค่าการดูดกลืนแสงคงที่ เนื่องจาก PDADMAC ที่อยู่บนผิวหน้าของแผ่นฟิล์มดูดซับอนุภาคเงินระดับนาโนได้ อิ่มตัวยังยวด ไม่ดูดซับอนุภาคเงินระดับนาโนได้อีก แต่จากผลการศึกษาเมื่อทำการจุ่มแผ่นฟิล์มบางจนครบ 60 นาที ค่าการดูดกลืนแสงยังคงมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาในการดูดซับของอนุภาคเงินบนแผ่นฟิล์มบางที่เวลา 20 นาทีและ 60 นาที เนื่องจากช่วงเวลาที่ 20 นาทีเป็นเวลาที่มียค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเลือกเวลา 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเป็นเวลาสูงสุดในการศึกษาและมีความหนาแน่นอนุภาคเงินบนแผ่นฟิล์มบางมากที่สุด เพื่อนำไปศึกษาปรากฏการณ์รับรู้กับสารละลายกลูต้าไธโอนต่อไป

### 4.3 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายและแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

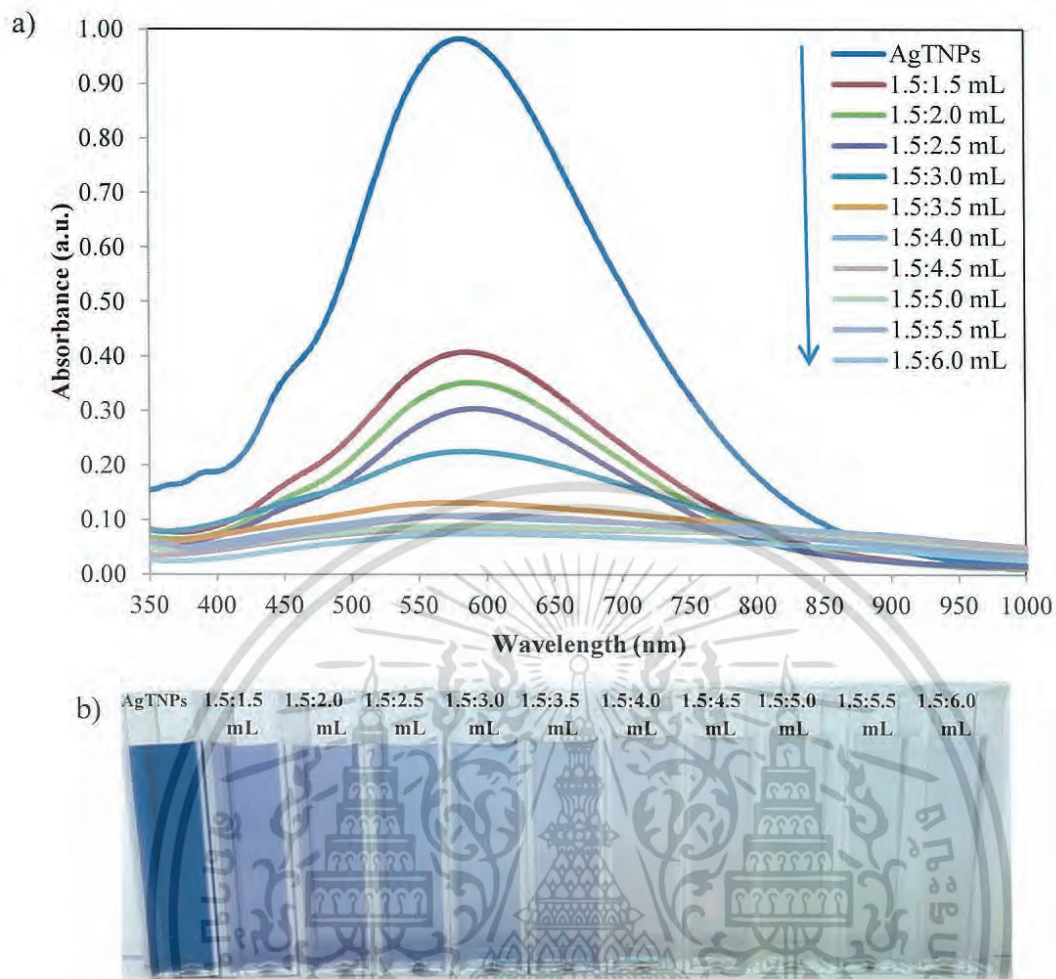
ในงานวิจัยนี้ต้องการนำสารละลายและแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) มาทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูต้าไธโอนเพื่อศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์ต่างๆ เช่น ศึกษาอัตราส่วนของสารละลายกลูต้าไธโอนต่อสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่เหมาะสม ศึกษาความเป็นเส้นตรงของสารละลายกลูต้าไธโอน ศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อการวิเคราะห์หากกลูต้าไธโอน การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD) ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ) ศึกษาหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และศึกษาผลกระทบของตัวรบกวน (Interference) ที่มีผลต่อการวิเคราะห์ เป็นต้น โดยตรวจวัดผลการเกิดปฏิกิริยาด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-vis spectrophotometry)

#### 4.3.1 การศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

##### 4.3.1.1 การศึกษาอัตราส่วนของปริมาณสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอนที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้ ทำโดยเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 400 ppm ผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน (AgTNPs:GSH) เท่ากับ 1.5:1.5, 1.5:2.0, 1.5:2.5, 1.5:3.0, 1.5:3.5, 1.5:4.0, 1.5:4.5, 1.5:5.0, 1.5:5.5 และ 1.5:6.0 ml จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-vis spectrophotometry โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1000-350 nm ซึ่งผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



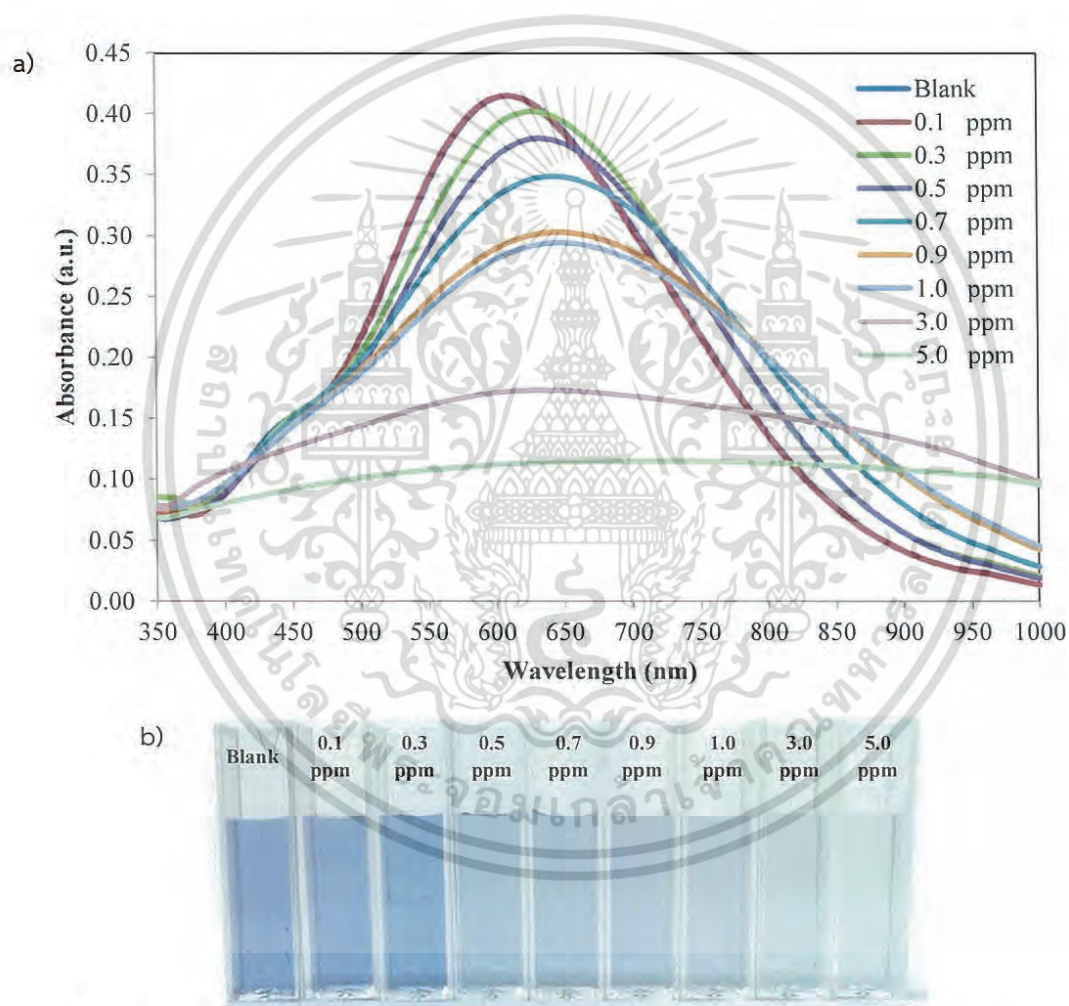
รูปที่ 4.10 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนในอัตราส่วนปริมาตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่มีความเข้มข้น 400 ppm ในอัตราส่วนปริมาตรต่างๆ พบว่าเมื่อสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน (AgTNPs:GSH) 1.5:1.5 mL จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงสี โดยเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีฟ้า และเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายกลูต้าไธโอนมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนมีค่าลดลง และสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสารละลายใสไม่มีสีที่อัตราส่วนปริมาตร 1.5:5.0 mL ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนปริมาตรสารละลายอนุภาครูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน (AgTNPs:GSH) ที่ปริมาตรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5:1.5 ml เพื่อนำไปศึกษาความเป็นเส้นตรงของสารละลายกลูต้าไธโอนต่อไป เนื่องจากในอัตราส่วนนี้สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของสีของสารละลายได้ชัดเจน ไม่มีความจำเป็นต้องเลือกใช้อัตราส่วนที่ใช้ปริมาณกลูต้าไธโอนสูงกว่านี้ เนื่องจากจะเป็นการสิ้นเปลืองสารในการทดลอง

#### 4.3.1.2 การศึกษาความเป็นเส้นตรงของสารละลายกลูต้าไธโอน

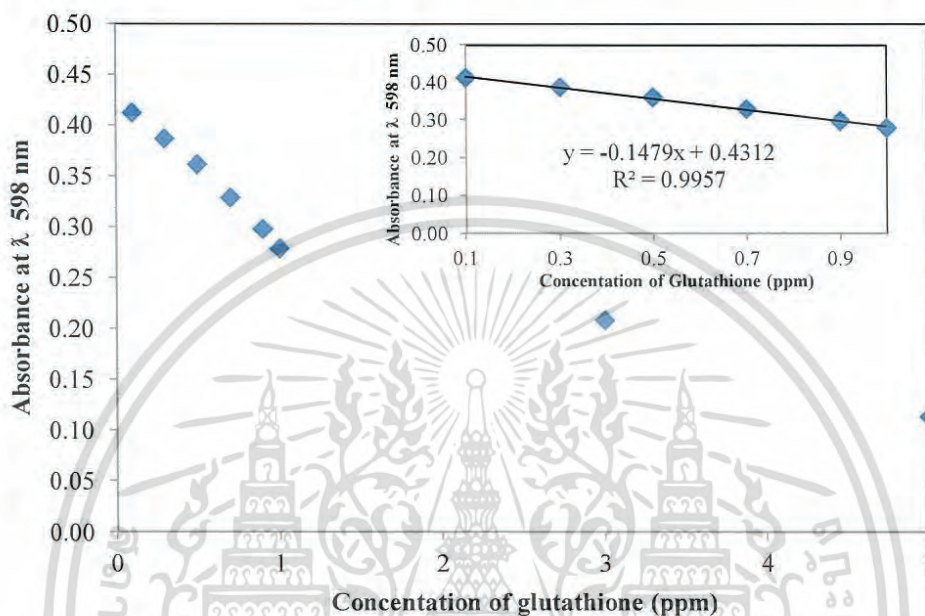
ในการทดลองนี้ ทำโดยการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่มีความเข้มข้น 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0 และ 5.0 ppm จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ )



รูปที่ 4.11 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่มีความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM เมื่อทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.1 – 5.0 ppm จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนมีค่าลดลง และภาพแสดงสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสารละลายใสไม่มีสี



รูปที่ 4.12 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่างๆ

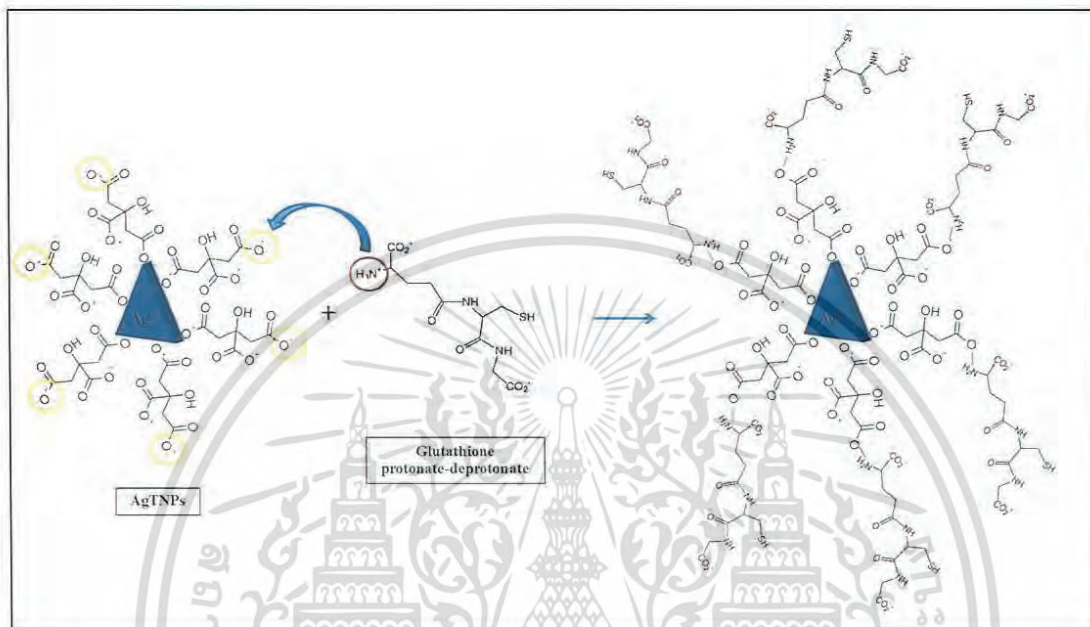
ตารางที่ 4.5 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นสารละลายกลูต้าไธโอน (ppm)	ความยาวคลื่นสูงสุด, $\lambda_{\max}$ (nm)
0.1	610
0.3	627
0.5	633
0.7	643
0.9	646
1.0	647
3.0	627
5.0	700

จากรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.5 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์

ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายกลูต้าไธโอนกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปโฆษณาการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

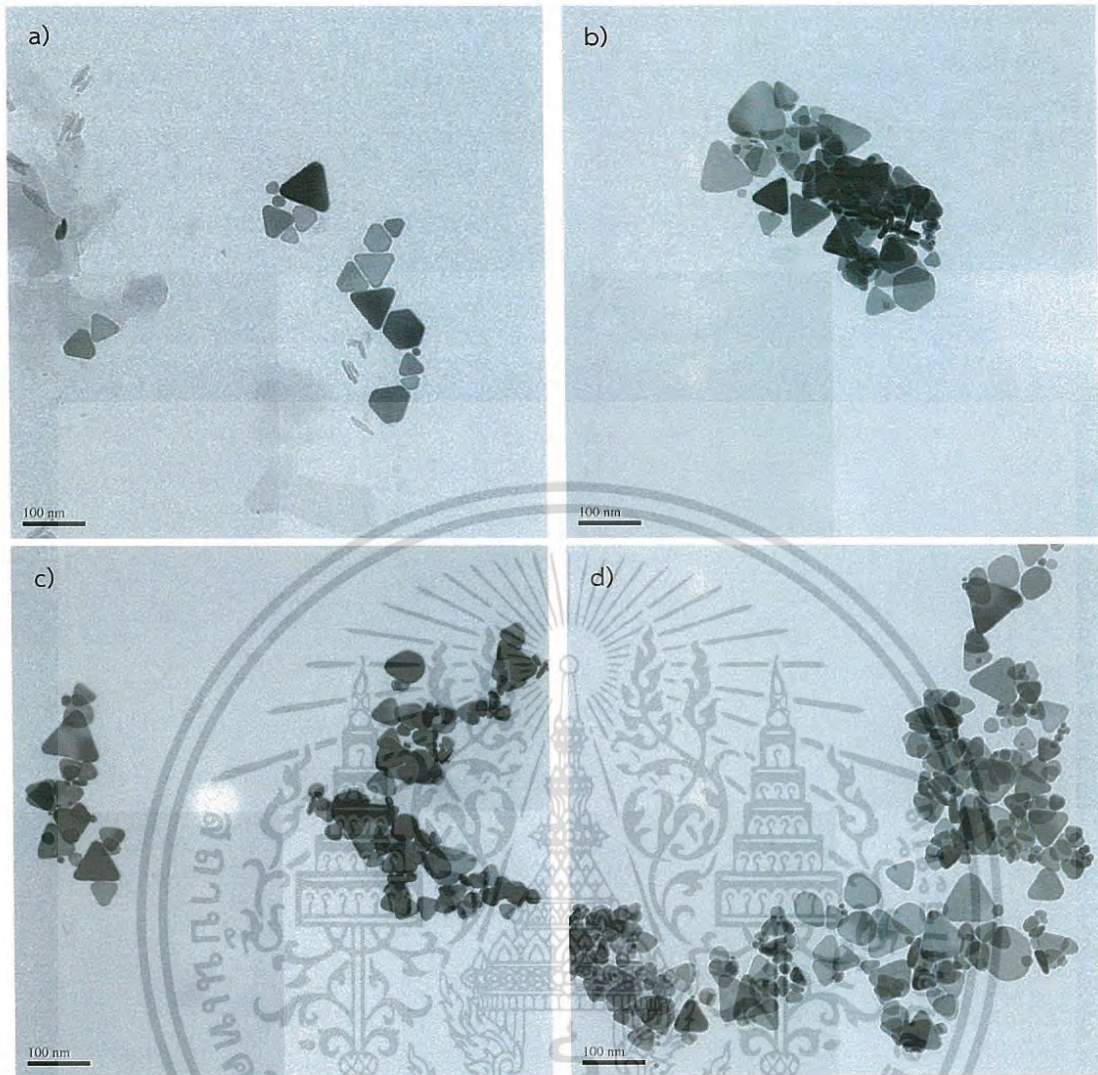
รูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนช่วงความเข้มข้น 0.1-1.0 ppm พบว่าได้สมการถดถอยเชิงเส้นตรง เท่ากับ  $y = -0.1479x + 0.4312$  ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9957 และค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเคลื่อนจากความยาวคลื่นสั้นไปยังความยาวคลื่นยาว (Red shift) ซึ่งสามารถแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไธโอน

จากรูปที่ 4.11, 4.12 และตารางที่ 4.5 สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไธโอน ดังรูปที่ 4.13 กล่าวคือสารละลายกลูต้าไธโอนที่เกิด Protonate ของหมู่เอมีนเข้าทำปฏิกิริยากับประจุลบ ( $\text{COO}^-$ ) ของหมู่คาร์บอกซิลิกในโครงสร้างไตรโซเดียมซีเตรตที่รักษาเสถียรภาพอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเกิดการรวมกัน (Aggregation) ของทั้งสองโครงสร้าง ทำให้ได้โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่

เพื่อเป็นการยืนยันการรวมตัวของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนและสารละลายกลูต้าไธโอน สามารถอธิบายได้ด้วยการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope ; TEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น (a) blank, (b) 5.0 ppm, (c) 300 ppm และ (d) 700 ppm

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นการรวมกลุ่มของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ซึ่งเป็นผลจากการรวมตัวกัน (Aggregation) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และกลูต้าไธโอน และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูต้าไธโอนมากขึ้น จะสังเกตเห็นการรวมตัวกัน (Aggregation) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมมากขึ้นเช่นกัน

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

ผลจากการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงของสาร และการวัดสารละลายแบลนด์ (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร  $3SD$  of blank/Slope of calibration เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank และ Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6

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

ผลจากการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงของสาร และการวัดสารละลายแบลนด์ (Blank) ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร  $10SD$  of blank/Slope of calibration เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank และ Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)

ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธี	ความเข้มข้น (ppm)
ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)	$0.1068 \pm 0.005$
ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)	$0.3560 \pm 0.005$

จากตารางที่ 4.6 พบว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด มีค่าเท่ากับ  $0.1068 \pm 0.005$  ppm และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ เท่ากับ  $0.3560 \pm 0.005$  ppm

#### 4.3.1.5 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery)

ในการทดลองนี้ ทำโดยเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.4, 0.7 และ 1.0 ppm ด้วยสารตัวอย่าง จากนั้นนำสารละลายกลูต้าไธโอนแต่ละความเข้มข้นผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนต่อสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เท่ากับ 1.5:1.5 ml จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-vis spectrophotometry โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-350 nm ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.7

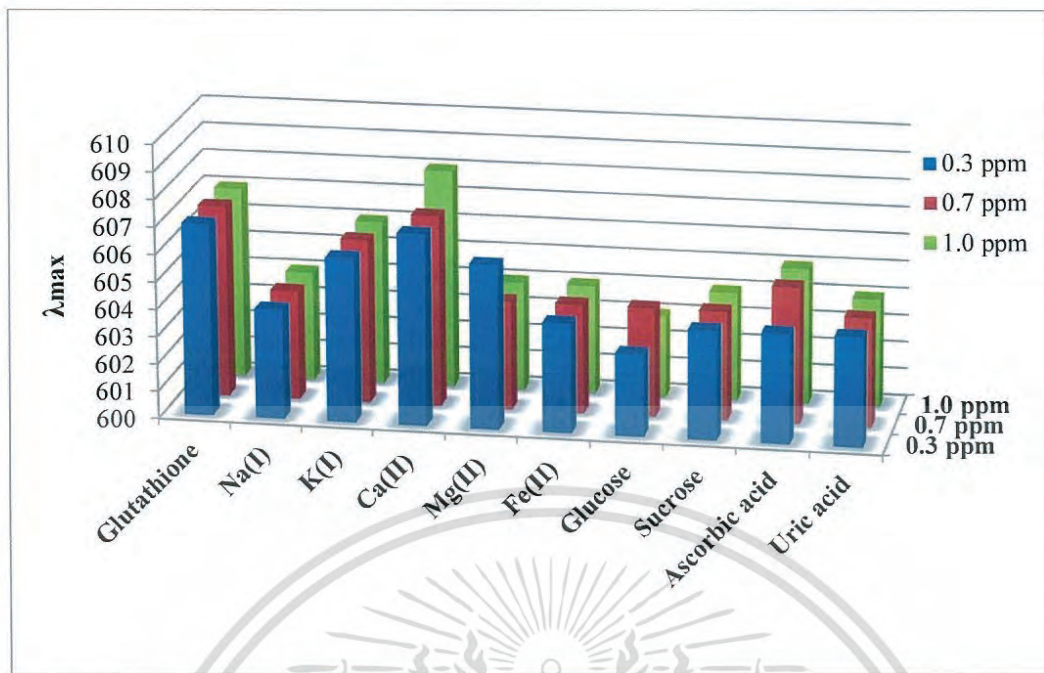
ตารางที่ 4.7 ค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ในตัวอย่างน้ำกลั่นและเลือด

Sample	Concentration of glutathione (ppm)		% Recovery
	Add	Found	
Distilled water	0	ND.	-
	0.4	0.4043 ± 0.0034	101.1
	0.7	0.7861 ± 0.0557	112.3
	1.0	1.0944 ± 0.2397	109.4
Plasma	0	ND.	-
	0.4	0.4413 ± 0.0192	110.3
	0.7	0.7572 ± 0.1128	108.2
	1.0	1.0374 ± 0.0116	103.7

จากตารางที่ 4.7 แสดงค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ในตัวอย่างน้ำกลั่นและเลือด พบว่าในตัวอย่างน้ำกลั่น สามารถหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ได้เท่ากับ 101.1–112.3% และในตัวอย่างเลือด สามารถหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ได้เท่ากับ 103.7–110.3% จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละของการคืนกลับของการตรวจวัดสารทั้งสองนี้มีค่ามากกว่า 100 นั้นหมายความว่า ในสารตัวอย่างมีตัวรบกวนที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ เนื่องจากค่าร้อยละการคืนกลับ (%Recovery) ของวิธีที่สามารถยอมรับได้อยู่ในช่วง 80.0–120.0% [66] และค่าที่ได้จากการตรวจวัดสารตัวอย่างทั้งสองนี้มีค่าอยู่ในช่วงเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นการหาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยวิธีนี้ถือว่าเป็นวิธีที่ยอมรับได้

#### 4.3.1.6 การศึกษาผลกระทบของตัวรบกวน (Interference) ที่มีผลต่อการวิเคราะห์

การทดลองนี้ ทำโดยเตรียมสารละลายตัวรบกวนแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 0.3, 0.7 และ 1.0 ppm โดยใช้สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 0.7 ppm เป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วย UV-vis spectrophotometry และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของตัวรบกวน ( $\lambda_{max}$ ) กับชนิดของตัวรบกวน เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของตัวรบกวนแต่ละชนิดและแต่ละความเข้มข้นดังแสดงในรูปที่ 4.15-4.18 และตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.15 กราฟแท่งแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุดของตัวรบกวน ( $\lambda_{max}$ ) กับชนิดของตัวรบกวนที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.16 ภาพสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีตัวรบกวน Glutathione,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ , Uric acid, Glucose, Sucrose, Ascorbic acid,  $\text{MgSO}_4$  และ  $\text{FeSO}_4$  ความเข้มข้น 0.3 ppm



รูปที่ 4.17 ภาพสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีตัวรบกวน Glutathione,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ , Uric acid, Glucose, Sucrose, Ascorbic acid,  $\text{MgSO}_4$  และ  $\text{FeSO}_4$  ความเข้มข้น 0.7 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ภาพสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีตัวรบกวน Glutathione,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ , Uric acid, Glucose, Sucrose, Ascorbic acid,  $\text{MgSO}_4$  และ  $\text{FeSO}_4$  ความเข้มข้น 1.0 ppm

ตารางที่ 4.8 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีตัวรบกวนชนิดต่างๆ

Interference	$\lambda_{\text{max}}$ at 0.3 ppm	$\lambda_{\text{max}}$ at 0.7 ppm	$\lambda_{\text{max}}$ at 1.0 ppm
Glutathione	607	607	607
$\text{NaNO}_3$	604	604	604
$\text{KNO}_3$	606	606	606
$\text{CaSO}_4$	607	607	608
$\text{MgSO}_4$	606	604	604
$\text{FeSO}_4$	604	604	604
Glucose	603	604	603
Sucrose	604	604	604
Ascorbic acid	604	605	605
Uric acid	604	604	604

จากกราฟรูปที่ 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 และตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ไม่มีตัวรบกวนและสารละลายที่มีตัวรบกวนนั้นๆ อยู่ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ตรวจวัดได้ มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อสังเกตสีที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นเดียวกันของตัวรบกวนต่างๆ พบว่าการตรวจวัดกลูตาไธโอนมีความจำเพาะเจาะจงสูงมากเมื่อเทียบกับไอออนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์อื่นๆ เนื่องจากสีของสารละลายที่มีตัวรบกวนไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนจากสีของสารละลายที่ไม่มีตัวรบกวน จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวรบกวนนั้นๆ ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์

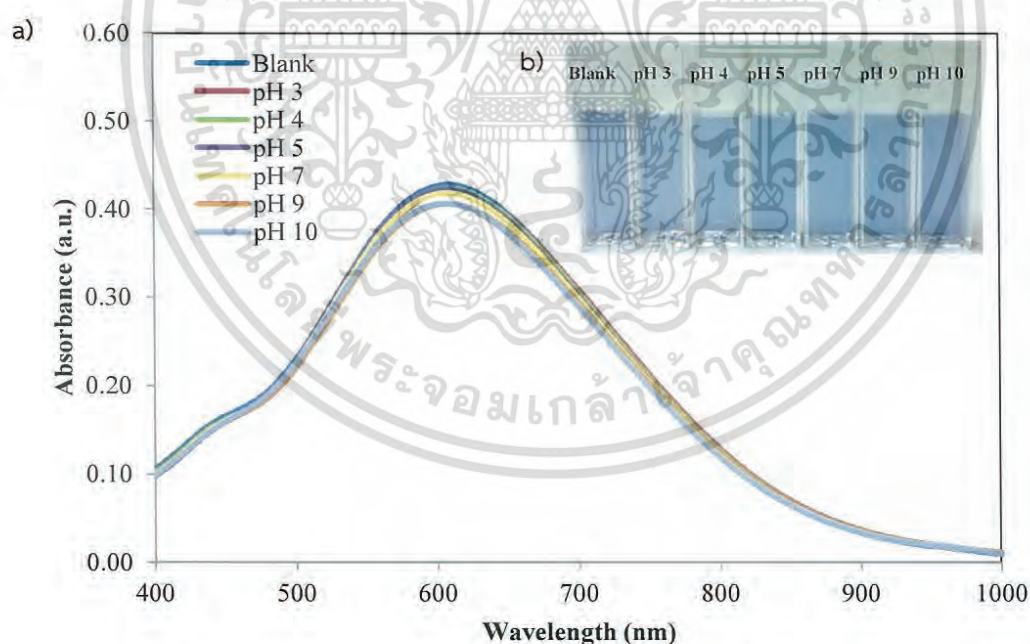
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1.7 การศึกษาอิทธิพลค่าพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อการวิเคราะห์กลุ่มต้าไธโอน

ในการทดลองนี้ ทำได้โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานกลุ่มต้าไธโอนความเข้มข้น 0.7 ppm โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่ พีเอชเท่ากับ 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 เป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายมาตรฐานกลุ่มต้าไธโอน (AgTNPs:GSH) เท่ากับ 1.5:1.5 ml จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-vis spectrophotometry โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1000-400 nm ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.19-4.21

##### 1. การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.001 M

ในการทดลองนี้ ทำโดยเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.001 M ที่มีพีเอชเท่ากับ 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 เป็นตัวทำละลายสารละลายมาตรฐานกลุ่มต้าไธโอนความเข้มข้น 0.7 ppm จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายมาตรฐานกลุ่มต้าไธโอน (AgTNPs:GSH) เท่ากับ 1.5:1.5 ml

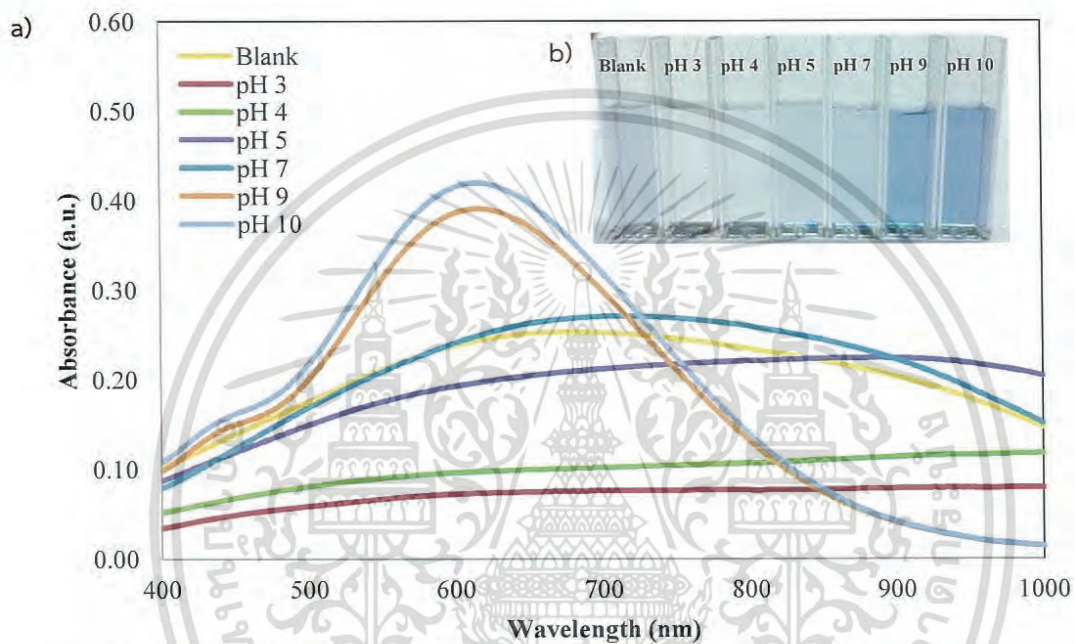


รูปที่ 4.19 สเปกตร้าแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลุ่มต้าไธโอนช่วงค่า pH ต่างๆ ที่สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.001 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.01 M

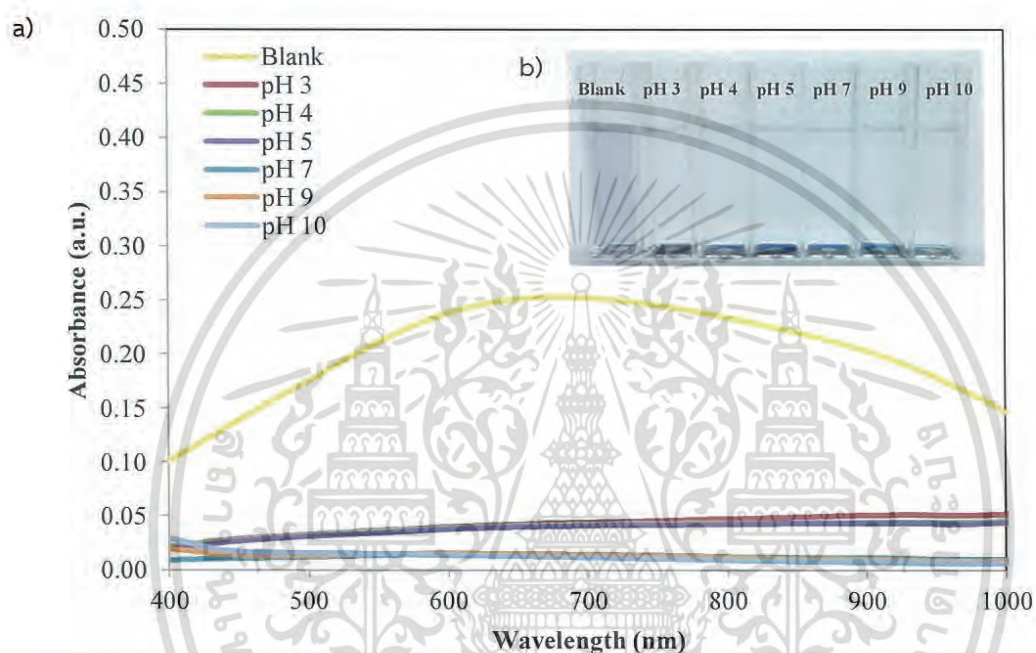
ในการทดลองนี้ ทำโดยเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.01 M ที่มีพีเอชเท่ากับ 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 เป็นตัวทำละลายสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 0.7 ppm จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน (AgTNPs:GSH) เท่ากับ 1.5:1.5 ml



รูปที่ 4.20 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนช่วงค่า pH ต่างๆ ที่สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.01 M

### 3. การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M

ในการทดลองนี้ ทำได้โดยเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M ที่มีพีเอชเท่ากับ 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 เป็นตัวทำละลายสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 0.7 ppm จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน (AgTNPs:GSH) เท่ากับ 1.5:1.5 ml

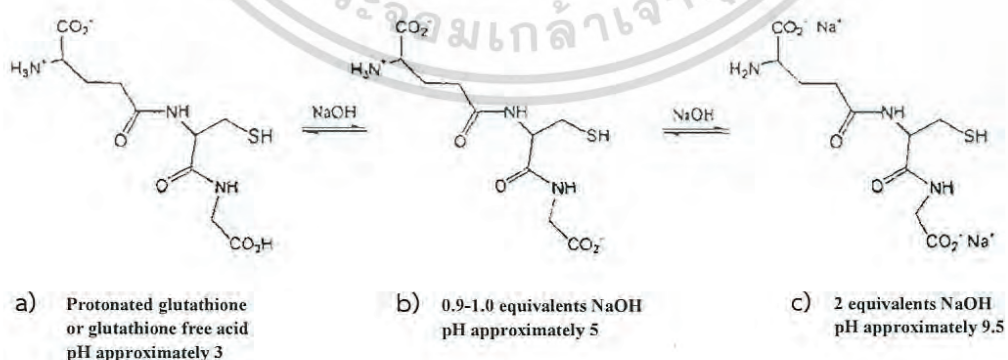
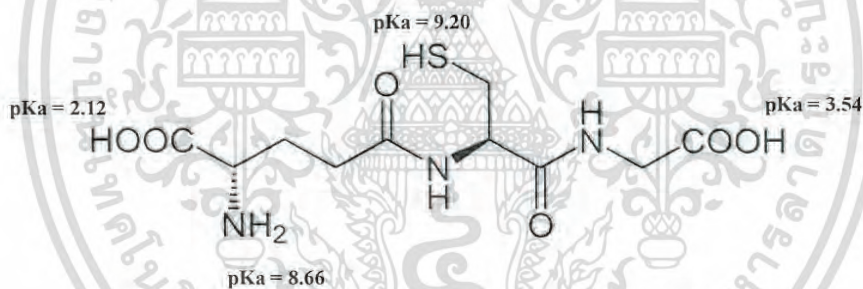


รูปที่ 4.21 สเปกตร้าแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนช่วงค่า pH ต่างๆ ที่สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M

จากรูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.21 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูต้าไธโอนในช่วงค่า pH ต่างๆ เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ที่ต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์มากขึ้น จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ 0.001 M, 0.01 M และ 0.1 M พบว่า สารละลายเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสีฟ้าอ่อน และได้สารละลายใสไม่มีสีในที่สุด

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ เท่ากับ 0.01 M พบว่าสีของสารละลายในช่วง pH 9 และ 10 สีของสารละลายไม่เปลี่ยนแปลง และค่า pH 5 และ 7 สีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีฟ้าอ่อนเช่นเดียวกับสีของ Blank และค่า pH 3 และ 4 สีของสารละลายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนเป็นไอไม่มีสี นั้นแสดงให้เห็นว่าค่า pH มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารทั้งสอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยค่าคงที่การแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของกลูต้าไธโอน ดังรูปที่ 4.22 กล่าวคือในสภาวะ pH เท่ากับ 9 และ 10 โครงสร้างกลูต้าไธโอนสามารถเกิด Deprotonated ของหมู่ COOH ทั้งสองตำแหน่ง แสดงดังรูป 4.23(c) ซึ่งโครงสร้างของกลูต้าไธโอนรูปแบบนี้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปว่างสามเหลี่ยมระดับนาโนได้ จึงไม่เกิดการเปลี่ยนสีเกิดขึ้น ในสภาวะ pH เท่ากับ 5 และ 7 โครงสร้างกลูต้าไธโอนสามารถเกิด Deprotonated ของหมู่ COOH ทั้งสองตำแหน่ง และเกิด Protonated ของหมู่ NH<sub>2</sub> เกิดเป็น NH<sub>3</sub><sup>+</sup> แสดงดังรูป 4.23(b) ซึ่ง NH<sub>3</sub><sup>+</sup> สามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปว่างสามเหลี่ยมระดับนาโนได้ จึงทำให้ได้สารละลายสีฟ้าอ่อน และในสภาวะ pH เท่ากับ 3 และ 4 โครงสร้างกลูต้าไธโอนจะเกิด Deprotonated ของหมู่ COOH ทั้งสองตำแหน่ง และเกิด Protonated ของหมู่ NH<sub>2</sub> เกิดเป็น NH<sub>3</sub><sup>+</sup> แสดงดังรูป 4.23(a) เมื่อพิจารณาโครงสร้างกลูต้าไธโอน NH<sub>3</sub><sup>+</sup> สามารถเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปว่างสามเหลี่ยมระดับนาโนได้ แต่เนื่องด้วยในสภาวะที่เป็นกรดแก่ ส่งผลทำให้อะซิเตทไอออน (COO<sup>-</sup>) ที่รักษาเสถียรภาพอนุภาคเงินรูปว่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเปลี่ยนมาอยู่ในรูปกรดซิติค (COOH) ทำให้อนุภาคเงินรูปว่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเกิดการตกตะกอน และส่งผลให้กลูต้าไธโอนไม่สามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปว่างสามเหลี่ยมระดับนาโนได้ สารละลายจึงเปลี่ยนเป็นสารละลายใสไม่มีสี



รูปที่ 4.23 สูตรโครงสร้างทางเคมีของกลูต้าไธโอนเมื่ออยู่ในรูป Glutathione protonate-deprotonate ที่ pH ต่างๆ [67]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

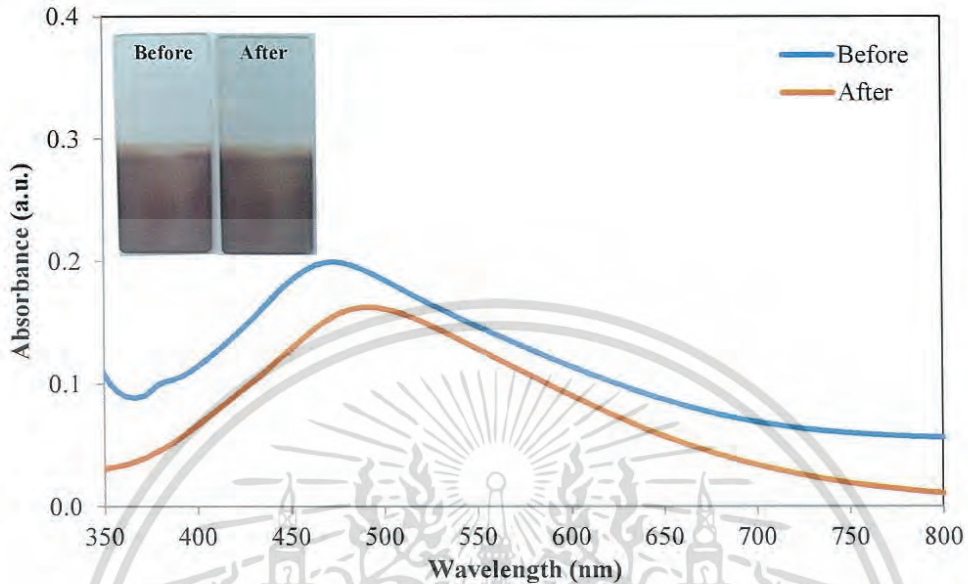
ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์ สามารถอธิบายและสนับสนุนกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไธโอนในข้อ 4.3.1.2 ได้ โดยการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไธโอนในงานวิจัยนี้ เกิดขึ้นในสภาวะ pH ประมาณ 7.6-8.2 เมื่อพิจารณาค่าคงที่การแตกตัวที่หมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของกลูต้าไธโอน พบว่ากลูต้าไธโอนในสภาวะ pH 7.6-8.2 จะเกิดการแตกตัว ดังรูปที่ 4.23(b) ซึ่ง  $\text{NH}_3^+$  ในโครงสร้างกลูต้าไธโอนสามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนได้ ทำให้เกิดการรวมตัวกันของโครงร่าง ซึ่งได้แสดงกลไกดังรูป 4.13

#### 4.3.2 การศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

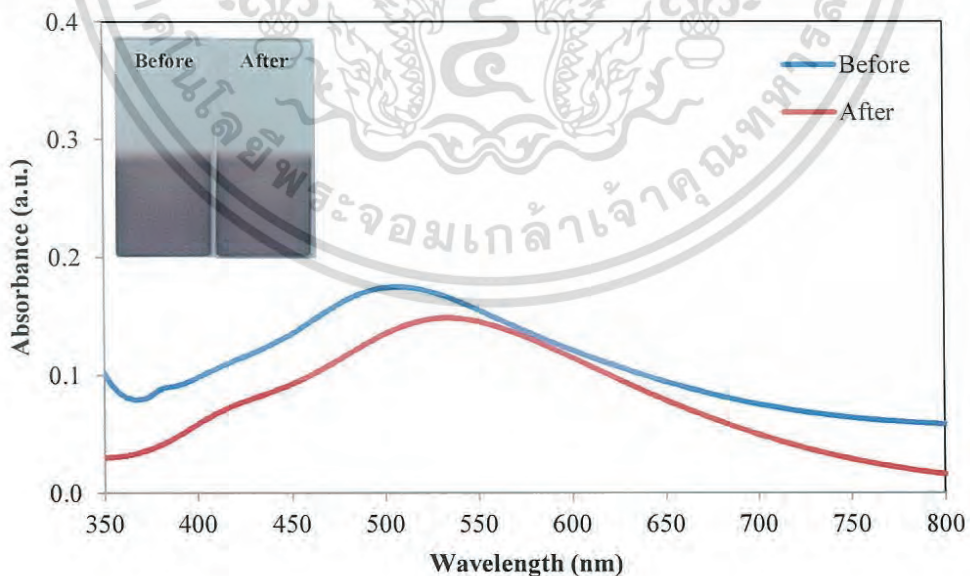
##### 4.3.2.1 การศึกษาคุณลักษณะของการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

การทดลองนี้ ทำโดยสร้างแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้น 0.18, 0.19, 0.21 และ 0.24 mM (สีส้ม สีแดง สีม่วง และสีน้ำเงินตามลำดับ) ที่จุ่มด้วยเวลา 20 นาที และ 60 นาที จากนั้นจุ่มลงในสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 50 ppm สังเกตสีแผ่นฟิล์มและนำแผ่นฟิล์มไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-vis spectrophotometry โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-350 nm ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.24-4.31

1. แผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs-PDADMAC) ที่เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที

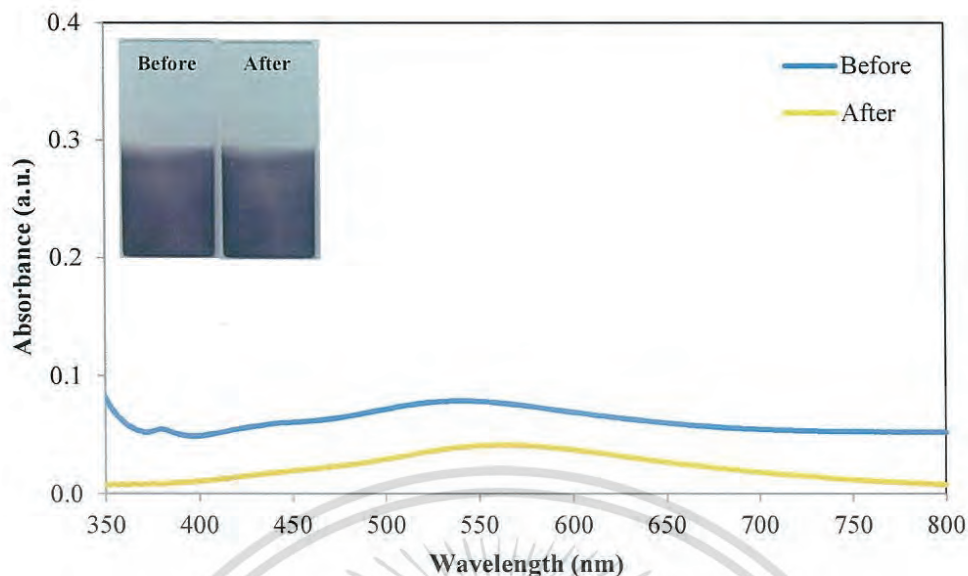


รูปที่ 4.24 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 0.18 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับคลอรีน

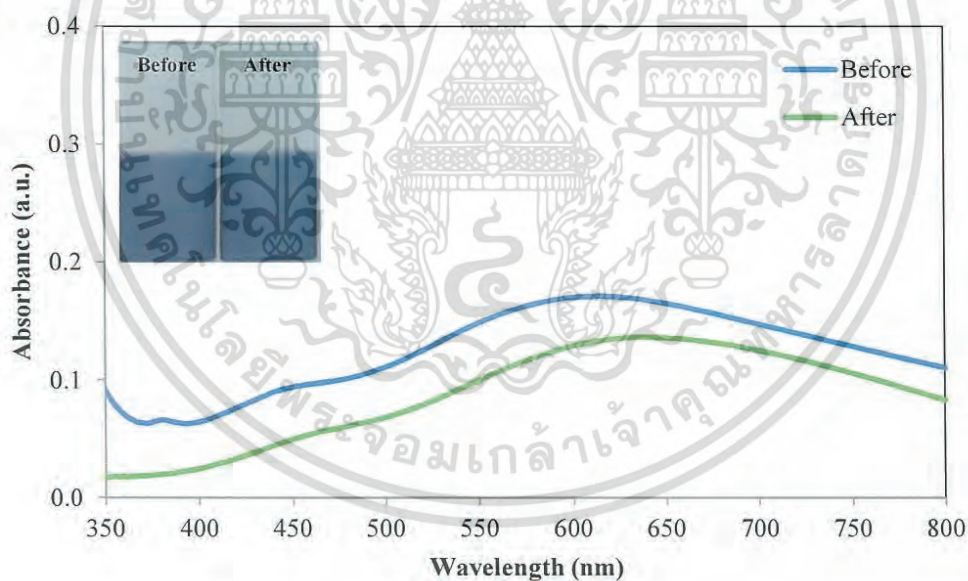


รูปที่ 4.25 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 0.19 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับคลอรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 0.21 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับคลอรีน



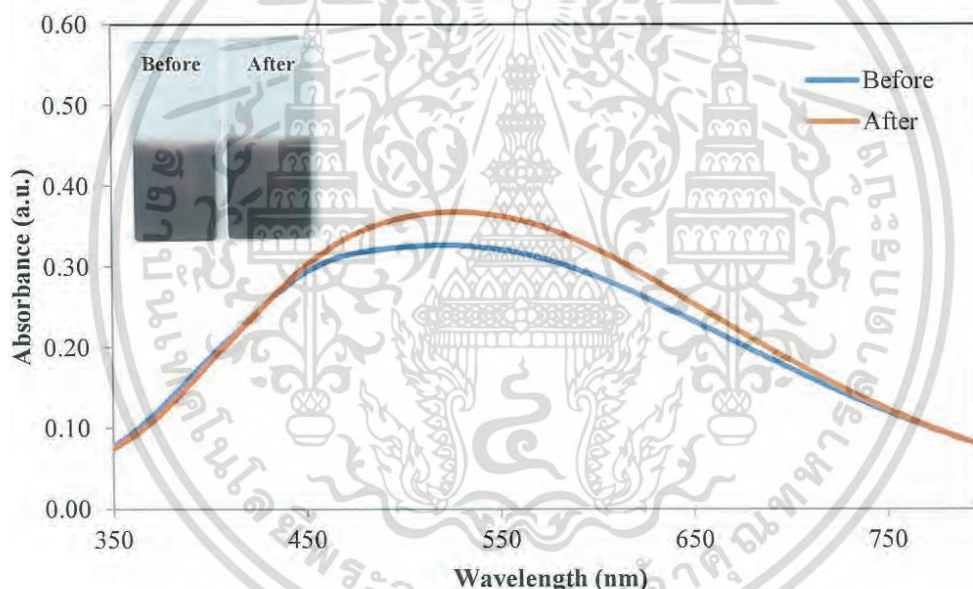
รูปที่ 4.27 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 0.24 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับคลอรีน

จากรูปที่ 4.24, 4.25, 4.26 และ 4.27 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs-PDADMAC) ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮโป

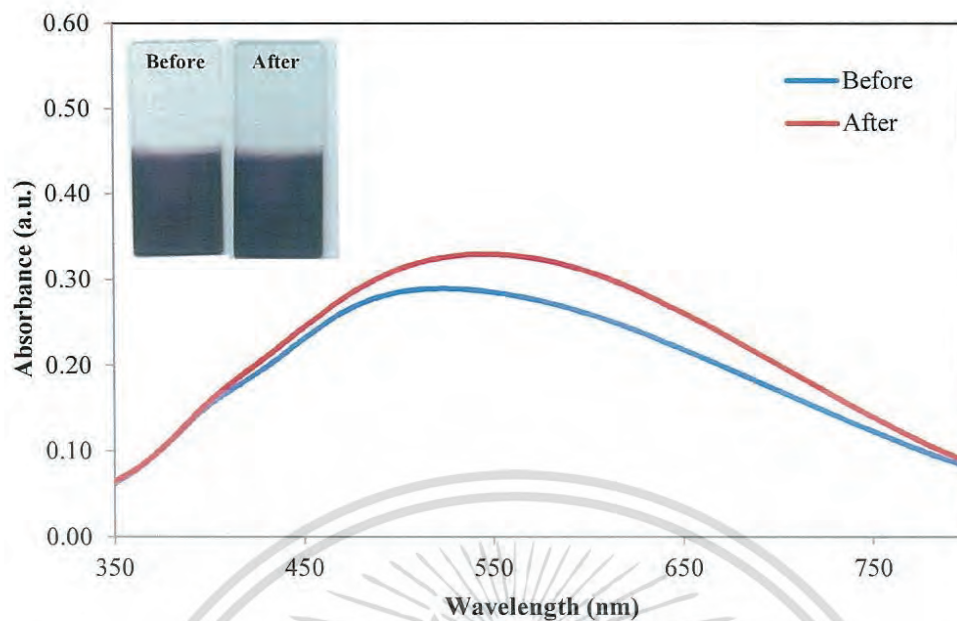
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรไฮโดรด์ต่างๆ ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูต้าไธโอน พบว่าค่าการดูดกลืนของแผ่นฟิล์มบางหลังตรวจวัดกลูต้าไธโอนมีค่าลดลงและเคลื่อนที่จากความยาวคลื่นสั้นไปยังความยาวคลื่นยาว (Red shift) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงเมื่อกลูต้าไธโอนเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมที่อยู่บนแผ่นฟิล์มบาง แต่เมื่อสังเกตพฤติกรรมของการแสดงสีของแผ่นฟิล์มบาง พบว่าสีของแผ่นฟิล์มบางก่อนและหลังการทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นฟิล์มอย่างชัดเจน นั้นแสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่เวลาในการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาทีทั้ง 4 ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ไม่เหมาะต่อการนำมาตรวจวัดสารละลายกลูต้าไธโอนด้วยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี

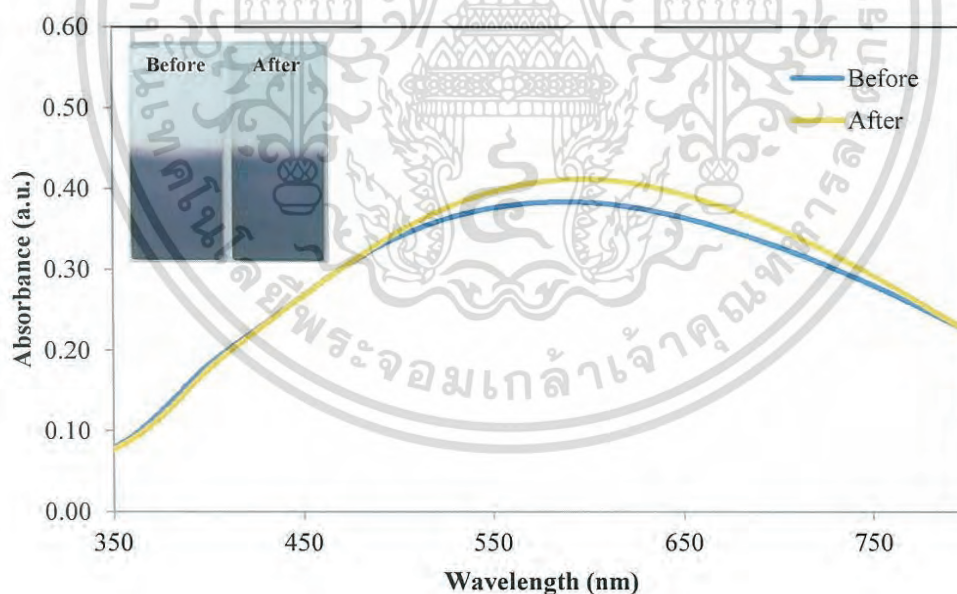
## 2. แผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNP- PDADMAC) ที่เวลาการสร้างแผ่นฟิล์มบาง 60 นาที



รูปที่ 4.28 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 60 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน

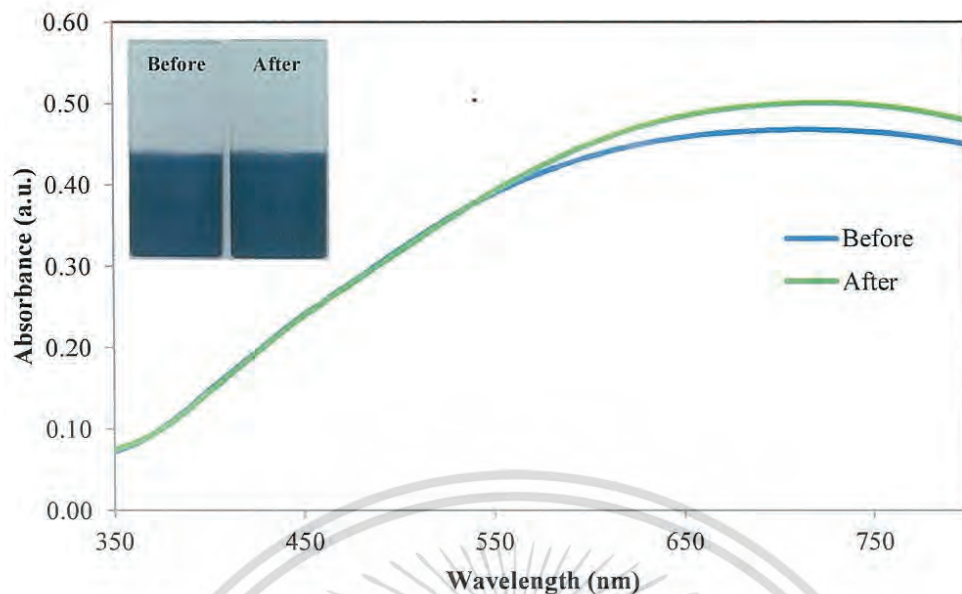


รูปที่ 4.29 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 0.19 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 60 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน



รูปที่ 4.30 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 0.21 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 60 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 60 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน

จากรูปที่ 4.28, 4.29, 4.30 และ 4.31 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs-PDADMAC) ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูต้าไธโอน พบว่า ค่าการดูดกลืนของแผ่นฟิล์มบางก่อนและหลังตรวจวัดกลูต้าไธโอนมีค่าใกล้เคียงกันมาก และเมื่อสังเกตพฤติกรรมการแสดงสีของแผ่นฟิล์มก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงสีอย่างเห็นได้ชัดเจน นั้นแสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่เวลาในการสร้างแผ่นฟิล์ม 60 นาทีทั้ง 4 ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ไม่เหมาะต่อการนำมาตรวจวัดสารละลายกลูต้าไธโอนด้วยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี เนื่องจากจะเห็นได้ว่าแผ่นฟิล์มที่สร้างจากการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนนั้น มีสีที่เข้มขึ้นมากกว่าสีเดิมของสารละลาย ซึ่งแสดงถึงการรวมตัวกันของอนุภาคที่ยึดเกาะกันบนแผ่นฟิล์ม ทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อทำการตรวจวัดกลูต้าไธโอนจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และสร้างแผ่นฟิล์มบางของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้ในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอน โดยอาศัยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี (Colorimetric method) การศึกษาในครั้งนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้ ขั้นตอนหนึ่งคือ การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ ใช้ไตรโซเดียมซิเตรตเป็นสารรักษาเสถียรภาพและใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวกัด (Etchant) อนุภาคเงินรูปร่างกลมให้กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ขั้นตอนที่สองคือ การศึกษาสภาวะต่างๆ ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางระดับนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) โดยการศึกษเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางระดับนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และในขั้นตอนสุดท้ายคือ การนำสารละลายและแผ่นฟิล์มบางของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอน

ขั้นตอนที่หนึ่ง ได้เลือกศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 4 ความเข้มข้น คือ 0.18, 0.19, 0.21 และ 0.24 mM พบว่า เกิดสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีสีส้ม แดง ม่วงและน้ำเงิน ตามลำดับ และความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เหมาะสม คือ 0.24 mM ให้สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้เกิดอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) มากที่สุดและมีจำนวนอนุภาคสามเหลี่ยมมากที่สุด อีกทั้งสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนสีน้ำเงินเป็นคุณลักษณะเฉพาะของการเกิดรูปร่างสามเหลี่ยมของอนุภาคเงินระดับนาโน

ขั้นตอนที่สอง จากการศึกษาสภาวะต่างๆ ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) ได้แก่ การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน พบว่า PDADMAC ที่อยู่บนผิวหน้าของแผ่นฟิล์มบางดูดซับอนุภาคเงินระดับนาโนได้ไม่เต็มที่ ทำให้เมื่อเวลาการจุ่มแผ่นฟิล์มบางนานขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกเวลาที่ 20 นาที และ 60 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เพียงพอที่จะใช้ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนสำหรับนำไปศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ในการตรวจวัดกลูต้าไธโอน

ขั้นตอนสุดท้าย คือ การนำสารละลายและฟิล์มบางของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณกลูต้าไธโอน จากผลการศึกษาการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนโดยใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน พบว่า กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนกับค่าการดูดกลืนแสง ในช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ระหว่าง 0.1-1.0 ppm มีสมการถดถอยเชิงเส้นตรง คือ  $y = -0.1479x + 0.4312$  มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9957 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของตรวจวัด (LOD) เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.10 ± 0.005 ppm ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ) เท่ากับ 0.35 ± 0.005 ppm ค่าร้อยละของการคืนกลับได้เท่ากับ 101.1–112.3% และ 103.7–110.3% ในสารตัวอย่างน้ำกลั่นและเลือด ตามลำดับ ผลการศึกษาผลกระทบของตัวรบกวน พบว่าตัวรบกวนไม่มีผลต่อการวิเคราะห์กลุ่มต้าไฮโอน แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจวัดนี้มีความจำเพาะต่อการวิเคราะห์กลุ่มต้าไฮโอน และจากผลการศึกษาการวิเคราะห์กลุ่มต้าไฮโอนโดยใช้แผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน พบว่าแผ่นฟิล์มบางอนุภาคนาโนไม่ตอบสนองต่อสารละลายกลุ่มต้าไฮโอน กล่าวคือ สีของแผ่นฟิล์มบางหลังจากการตรวจวัดกลุ่มต้าไฮโอนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ยึดเกาะบนแผ่นฟิล์มบางมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารละลายกลุ่มต้าไฮโอนได้ ดังนั้นแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนจึงไม่เหมาะต่อการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณกลุ่มต้าไฮโอนด้วยวิธีการตรวจวัดเชิงสี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การสังเคราะห์สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนให้ได้สีสารของสารละลายที่เหมือนกันทุกครั้งค่อนข้างยาก ควรเพิ่มการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการวิเคราะห์ เช่น การควบคุมอุณหภูมิ และอัตราการเติมสารละลายแต่ละตัวที่มีผลต่อการสังเคราะห์ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น
2. ควรเพิ่มการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในการเกิดรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนของอนุภาคเงินระดับนาโน
3. ควรเพิ่มการศึกษาสารตัวอื่นที่ช่วยรักษาเสถียรภาพ เช่น PVP และ methyl cellulose
4. ควรทำการศึกษาค่า Zeta potentials เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้
5. ควรนำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ ไปการศึกษาด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy เพื่อยืนยันชนิดและจำนวนธาตุองค์ประกอบชนิดพันธะทางเคมี และสถานะออกซิเดชันของอะตอมที่มีในสารละลาย
6. การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลุ่มต้าไฮโอนควรป้องกันให้ออกซิเจนเข้าไปในขวดสารตั้งต้นขณะทำการชั่งสารให้น้อยที่สุด เพราะออกซิเจนจะให้ประสิทธิภาพของกลุ่มต้าไฮโอนลดลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร. นพ. ประสงค์ เทียนบุญ, ดร. ญัฐกานัล ลีลารุ่งระยับ. 2550. **Glutathione and health benefits**. วารสารคณิศรคณาอาหารและโภชนาการ.
- [2] คณาจารย์คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2553. **กลูต้าไธโอน (glutathione) ทำให้ชาวจริงหรือ**. [Online]. Available: <http://www.pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge/article/6/กลูต้าไธโอน-glutathione-ทำให้ชาวจริงหรือ>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 เม.ย. 2559
- [3] Aurélie Roland, Rémi Schneider. 2015. **Development and validation of a high-throughput analysis of glutathione in grapes, musts and wines by Stable Isotope Dilution Assay and LC-MS/MS**. Food Chemistry 177 : 152-157.
- [4] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2558. **นาโนเทคโนโลยี**. [Online]. Available: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=32&chap=8&page=t32-8-infodetail02.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 เม.ย. 2559
- [5] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. **นาโนเทคโนโลยี**. [Online]. Available: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/page/Unit1-5.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 4 เม.ย. 2559
- [6] Wikipedia. 2015. **นาโนเทคโนโลยี**. [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/นาโนเทคโนโลยี>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 4 เม.ย. 2559
- [7] Supading77. 2015. **นาโนเทคโนโลยี**. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/supading77/nano-thechnologi>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 4 เม.ย. 2559
- [8] Maria Davoren. 2015. **Nanotechnology**. [Online]. Available: <https://www.pacific-environment.com/news/nanotechnology-small-particles-big-risks>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 เม.ย. 2559
- [9] Rui Natario. 2011. **Nanotechnology**. [Online]. Available: <http://tremblinguterus.blogspot.com/2011/01/nanotechnology.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 เม.ย. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] ศูนย์จัดการข้อมูลข่าวสารและองค์ความรู้ (NICT). วัสดุนาโน. [Online]. Available: <http://nict.sc.chula.ac.th/site/index.php/technology/risk/nanomaterial>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 เม.ย. 2559
- [11] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2558. วัสดุนาโน. [Online]. Available: [http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book.php?book=32&chap=8&page=t\\_32-8-infodetail04.html](http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book.php?book=32&chap=8&page=t_32-8-infodetail04.html). เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 เม.ย. 2559
- [12] Sonp. 2006. นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ. [Online]. Available: <http://bio510.blogspot.com/2006/01/bionanotechnology-21-3-21.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 6 เม.ย. 2559
- [13] Wikipedia. 2015. การแพทย์นาโน. [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 6 เม.ย. 2559
- [14] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี. [Online]. <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit5-4.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 6 เม.ย. 2559
- [15] Kholoud M.M. Abou EL-Nour et al. 2010. Synthesis and applications of silver nanoparticles. Arabian Journal of Chemistry : 135–140.
- [16] Wikipedia. 2016. Silver nanoparticle [Online]. Available: [http://th.wikipedia.org/silver\\_nanoparticle](http://th.wikipedia.org/silver_nanoparticle). เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 เม.ย. 2559
- [17] Bahareh Khodashenas and Hamid Reza Ghorbani. 2015. Synthesis of silver nanoparticles with different shapes : A review. Arabian Journal of Chemistry.
- [18] M.A. Valverde-Alva et al. 2015. Synthesis of silver nanoparticles by laser ablation in ethanol: A pulsedphotoacoustic study. Applied Surface Science 335 : 341–349
- [19] M. Boutinguiza et al. 2014. Production of silver nanoparticles by laser ablation in open air. Applied Surface Science 336 : 108-111.
- [20] Takeshi Tsuji et al. 2008. Preparation of silver nanoparticles by laser ablation in polyvinylpyrrolidone solutions. Applied Surface Science 254 : 5224–5230.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] K J Sreeram et al. 2008. **Microwave assisted template synthesis of silver nanoparticles.** Bulletin of Materials Science Vol.31 No.7 : 937-942.
- [22] Xihui Zhao et al. 2014. **Microwave-assisted synthesis of silver nanoparticles using sodium alginate and their antibacterial activity.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 444 : 180– 188.
- [23] Ki Chang Song et al. 2009. **Preparation of colloidal Silver nanoparticles by chemical reduction method.** Korean Journal of Chemical Engineering Vol.26 Issue 1 : 153-155.
- [24] Anna Zielinska et al. 2009. **Preparation of silver nanoparticles with controlled particle size.** Procedia Chemistry 1 : 1560-1566.
- [25] Hongshui Wang et al. 2005. **Preparation of silver nanoparticles by chemical reduction method.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 256 : 111-115.
- [26] H. H. Huang et al. 1996. **Photochemical Formation of Silver Nanoparticles in Poly(N-vinylpyrrolidone).** Langmuir 12 : 909-912.
- [27] Stephan T. Dubas and Vimolvan Pimpan. 2008. **Green synthesis of silver nanoparticles for ammonia sensing.** Talanta 76 : 29–33.
- [28] Tewarak Parnklang et al. 2015. **Shape transformation of silver nanospheres to silver nanoplates induced by redox reaction of hydrogen peroxide.** Materials Chemistry and Physics 153 : 127-134.
- [29] Zhengbo Chen et al. 2015. **Application of triangular silver nanoplates for colorimetric detection of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.** Sensors and Actuators B 220 : 314-317.
- [30] Métraux, G. S. and Chad A. Mirkin. 2005. **Rapid thermal synthesis of silver nanoprism with chemically tailorable thickness.** Advanced Materials 17 No.4 : 412-415

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [31] Tewarak Parnklang et al. 2013.  $H_2O_2$  - triggered shape transformation of silver nanospheres to nanoprisms with controllable longitudinal LSPR wavelength longitudinal LSPR wavelengths. RSC Advances 3 : 12886–12894
- [32] Huiying Jia et al. 2006. A simple method to synthesize triangular silver nanoparticles by light irradiation. Spectrochimica Acta Part A 64 : 956–960.
- [33] Greg Emmerich. 2012. Surface Plasmon Resonance. [Online]. Available: <https://gregemmerich.wordpress.com/2012/11/16/surface-plasmon-resonance-technology-overview-and-practical-applications>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 เม.ย. 2559
- [34] Jules L. Hammond et al. 2014. Localized Surface Plasmon Resonance as a Biosensing Platform for Developing Countries. Biosensors : 172-188.
- [35] ดร. ณัฐพันธ์ ศุภกา. 2015. ไชปริศนา...นาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available: [http://www.neutron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com\\_content&task=view&id=470](http://www.neutron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com_content&task=view&id=470). เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 เม.ย. 2559
- [36] Wikipedia. 2014. กลูต้าไรโอน. [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/กลูต้าไรโอน>
- [37] อริน วิกุล. 2015. Glutathione. วารสารเพื่อการวิจัยและพัฒนาองค์กรเภสัชกรรม.
- [38] ศศิธร คาดสนิท และคณะ. Adverse Effects Caused by Adaptive Imbalance to Genotoxic Stress after Infection and Inflammation. [Online]. Available: [http://www.smj.ejnal.com/e-journal/showdetail/?show\\_detail=T&art\\_id=1657](http://www.smj.ejnal.com/e-journal/showdetail/?show_detail=T&art_id=1657). เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 เม.ย. 2559
- [39] ศูนย์วิทยบริการ สำนักคณะกรรมการอาหารและยา. 2544. กลูต้าไรโอน. [Online]. Available: [http://elib.fda.moph.go.th/library/default.asp?page2=subdetail&id\\_L1=27&id\\_L2=31218&id\\_L3=3003](http://elib.fda.moph.go.th/library/default.asp?page2=subdetail&id_L1=27&id_L2=31218&id_L3=3003) เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 เม.ย. 2559
- [40] บริษัท สนุก ออนไลน์ จำกัด. 2556. อันตรายจากกลูต้าไรโอน. [Online]. Available: <http://guru.sanook.com/7240/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 เม.ย. 2559
- [41] สยามเคมี.คอม. กลูต้าไรโอน. [Online]. Available: <http://www.siamchemi.com/กลูต้าไรโอน>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 เม.ย. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [42] แพทย์หญิงชนิตร์วัฒน์ ตริวิทยาภูมิ. 2014. ผลข้างเคียงของกลูต้าไธโอน. [Online]. Available: <http://health.mthai.com/howto/3164.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 22 เม.ย. 2559
- [43] Melgardt M. de Villiers et al. 2011. **Introduction to nanocoatings produced by layer-by-layer (LbL) self-assembly.** *Advanced Drug Delivery Reviews* 63 : 701–715
- [44] Gero Decher and Joseph B. Schlenoff. 2012. **Layer-by-Layer Assembly (Putting Molecules to Work).** *Multilayer Thin Films: Sequential Assembly of Nanocomposite Materials Second Edition* : 2-6.
- [45] R.K. Iler. 1996. **Multilayers of colloidal particles.** *Journal of Colloid and Interface Science* Vol.21 : 569-594
- [46] **UV-vis spectrophotometer.** [Online]. Available: <http://glasswarechemical.com/scientific-instrument/uv-vis-spectrophotometer>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 24 เม.ย. 2559
- [47] **UV-vis spectrophotometer.** [Online]. Available: [http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4\\_2.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4_2.html). เข้าถึงเมื่อวันที่ 24 เม.ย. 2559
- [48] **UV-vis spectrophotometer.** [Online]. Available: [http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical\\_Chemistry/Kinetics/Reaction\\_Rates/Experimental\\_Determination\\_of\\_Kinetics/Spectrophotometry](http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical_Chemistry/Kinetics/Reaction_Rates/Experimental_Determination_of_Kinetics/Spectrophotometry). เข้าถึงเมื่อวันที่ 24 เม.ย. 2559
- [49] **Transmission electron microscopy.** [Online]. Available: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 25 เม.ย. 2559
- [50] **Transmission electron microscopy.** [Online]. Available: <http://www.microscopes.in.th/422/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 25 เม.ย. 2559
- [51] **Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).** [Online]. Available: [http://www.sc.chula.ac.th/department/Chemical\\_Technology/Analytical\\_unit/FTIR.html](http://www.sc.chula.ac.th/department/Chemical_Technology/Analytical_unit/FTIR.html). เข้าถึงเมื่อวันที่ 25 เม.ย. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [52] Thanyaporn Kiatkumjorn et al. 2014. Glutathione and L-cysteinemodified silvernanoplates-based colorimetric assay for a simple, fast, sensitive and selective determination of nickel. *Talanta* 128 : 215–220.
- [53] C.V. Durgadas et al. 2011. Sensing of lead ions using glutathione mediated end to end assembled gold nanorod chains. *Sensors and Actuators B : Chemical* 156 : 791– 797.
- [54] Ayesha Alam et al. 2015. Highly selective colorimetric detection and estimation of  $Hg^{2+}$  at nano-molar concentration by silver nanoparticles in the presence of glutathione. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 137 : 503–508.
- [55] Pengjuan Ni et al. 2015. Highly sensitive and selective colorimetric detection of glutathione based on Ag [I] ion–3,3',5,5'-tetramethylbenzidine(TMB). *Biosensors and Bioelectronics* 63 : 47-52.
- [56] Xiu-Hua Yang et al. 2013. A colorimetric method for highly sensitive and accurate detection of iodide by finding the critical color in a color change process using color in a color change process using silver triangular nanoplates. *Analytica Chimica Acta* 798 : 74– 81.
- [57] Masaharu Tsuji et al. 2012. Rapid Transformation from Spherical Nanoparticles, Nanorods, Cubes, or Bipyrramids to Triangular Prisms of Silver with PVP, Citrate, and  $H_2O_2$ . *Langmuir* : 8845–8861.
- [58] Hwa Kyung Sung et al. 2013. Colorimetric Detection of  $Co^{2+}$  Ion Using Silver Nanoparticles with Spherical, Plate, and Rod Shapes. *Langmuir* : 8978–8982.
- [59] I.V. Anambiga et al. 2013. Colorimetric Detection Of Lead Ions Using Glutathione Stabilized Silver Nanoparticles. *International Journal of Scientific & Engineering Research* Vol.4 Issue 5 : 710-715.
- [60] Haibing Li, Zhimin Cui and Cuiping Han. 2009. Glutathione-stabilized silver nanoparticles as colorimetric sensor for  $Ni^{2+}$  ion. *Sensors and Actuators B: Chemical* 143 : 87-92.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [61] R. Fu, J. Li and W. Yang. 2012. Aggregation of glutathione-functionalized Au nanoparticles induced by Ni<sup>2+</sup> ions. Journal of Nanoparticle Research : 1-8.
- [62] อภิวัฒน์ ชมภูสอ. 2013. Gold Nanostructures: Synthesis and Applications for Cancer Therapy. KU Science Journal Volume 41 Number 44 : 859-872.
- [63] Qiao Zhang et al. 2011. A Systematic Study of the Synthesis of Silver Nanoplates: Is Citrate a “Magic” Reagent? Journal of the American Chemical Society : 18931–18939.
- [64] กานต์รวี มุลสิน, จิราภรณ์ บุญมี และนิภาพร วงศ์วิทย์. 2557. การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมในระดับนาโนและการสร้างฟิล์มบางนาโนโพลีเอเล็กโทรไลต์โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นเพื่อเป็นตัวรับรู้สำหรับไอออนของปรอท. โครงการพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [65] Ekarat Detsri and Stephan Thierry Dubas. 2013. Interfacial Polymerization of Polyaniline and Its Layer-by-Layer Assembly into Polyelectrolytes Multilayer Thin-Films. Journal of Applied Polymer science : 558-565.
- [66] วรณภา อิ่มใจ. การควบคุมคุณภาพภายในห้องปฏิบัติการ (Quality Control). [Online]. Available: <http://www.reo3.go.th/newversion/images/stories/article55/4004.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 พ.ค. 2559
- [67] EUROPEAN PATENT SPECIFICATION. [Online]. Available: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/b1e9946afcc820211031/EP1838355B1.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 พ.ค. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การเตรียมสารละลาย

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

##### 1.1 การเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.10 mM

ชั่งน้ำหนักซิลเวอร์ไนเตรตมา 0.0699 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 ml จะได้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.10 mM ปริมาตร 1000 ml

##### 1.2 การเตรียมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ความเข้มข้น 20.00 mM

ชั่งน้ำหนักไตรโซเดียมซิเตรตมา 0.5881 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml จะได้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ความเข้มข้น 20 mM ปริมาตร 100 ml

##### 1.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้น 100.00 mM

ชั่งน้ำหนักโซเดียมโบโรไฮไดรด์มา 0.0945 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 ml จะได้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้น 20 mM ปริมาตร 25 ml

#### 2. การเตรียมแผ่นฟิล์มของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยอาศัยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) โดยใช้สารปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุรองรับกระจกสไลด์ เป็น PDADMAC และ PSS

##### 2.1 การเตรียมสารละลาย PDADMAC ความเข้มข้น 10 mM

ปีเปตสารละลาย PDADMAC ปริมาตร 7.48 ml ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 ml แล้วชั่งเกลือโซเดียมคลอไรด์ 58.50 กรัม เติมลงไปนในสารละลาย PDADMAC พร้อมทั้งปั่นกวนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันจะได้สารละลาย PDADMAC ความเข้มข้น 10 mM ปริมาตร 1000 ml

##### 2.2 การเตรียมสารละลาย PSS ความเข้มข้น 10 mM

ชั่งน้ำหนัก PSS 2.06 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 ml แล้วชั่งเกลือโซเดียมคลอไรด์ 58.50 กรัม เติมลงไปนในสารละลาย PSS พร้อมทั้งปั่นกวนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน จะได้สารละลาย PSS ความเข้มข้น 10 mM ปริมาตร 1000 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายและแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

#### 3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 1000 ppm

ชั่งน้ำหนักกลูต้าไธโอนมา 0.25 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตร 250 ml จะได้สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 1000 ppm

#### 3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้นต่างๆ

ปีเปตสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 1000 ppm มาตามตารางด้านล่าง จากนั้นละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตร 25 ml จะได้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนตามที่ต้องการ

ตารางที่ ก.1 แสดงการเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นที่ต้องการ (ppm)	ปริมาตรสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 1000 ppm (ml)
0.1	0.0025
0.3	0.0075
0.5	0.0125
0.7	0.0225
0.9	0.0250
1.0	0.1250
3.0	0.7500
5.0	0.1250
10.0	0.250
50.0	1.250
100.0	2.50
200.0	5.00
300.0	7.50
400.0	10.00
500.0	12.50
600.0	15.00
700.0	17.50
800.0	20.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนสำหรับการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

#### 3.3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 20 ppm

ชั่งน้ำหนักกลูต้าไธโอนมา 0.0020 g ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นและเลือดที่ถูกล้างเจือจาง 1000 เท่า ในขวดวัดปริมาตร 100 ml จะได้สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 20 ppm ที่เตรียมได้จากน้ำกลั่นและเลือดที่ถูกล้างเจือจาง 1000 เท่า

#### 3.3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 0.4 ppm

ปิเปตสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 100 ppm มา 2.0 ml ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นและเลือดที่เจือจาง 1000 เท่า ในขวดวัดปริมาตร 100 ml จะได้สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 0.4 ppm ที่เตรียมได้จากน้ำกลั่นและเลือดที่ถูกล้างเจือจาง 1000 เท่า

#### 3.3.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 0.7 ppm

ปิเปตสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 100 ppm มา 3.5 ml ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นและเลือดที่เจือจาง 1000 เท่า ในขวดวัดปริมาตร 100 ml จะได้สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 0.7 ppm ที่เตรียมได้จากน้ำกลั่นและเลือดที่ถูกล้างเจือจาง 1000 เท่า

#### 3.3.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 1.0 ppm

ปิเปตสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 100 ppm มา 5.0 ml ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นและเลือดที่เจือจาง 1000 เท่า ในขวดวัดปริมาตร 100 ml จะได้สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 1.0 ppm ที่เตรียมได้จากน้ำกลั่นและเลือดที่ถูกล้างเจือจาง 1000 เท่า

## ภาคผนวก ข

## ผลการทดลอง

## 1. การตรวจวัดกลูตาไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

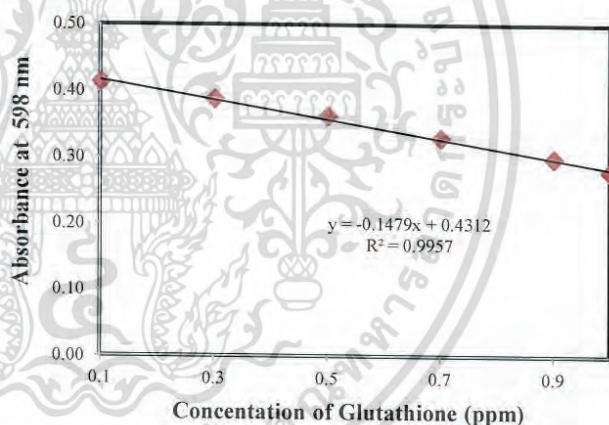
## 1.1 การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

สูตร

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

ตารางที่ ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Blank ที่นำมาคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด

No.	Abs.
1	0.4483
2	0.4596
3	0.4485
4	0.4451
5	0.4466
6	0.4461
7	0.4455
8	0.4441
9	0.4449
10	0.4565
Total	4.4852
SD	0.005
AVR	0.4485



## การคำนวณ

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

$$\text{แทนค่า LOD} = \frac{3 \times 0.0053}{0.1479}$$

$$= 0.1068 \text{ ppm}$$

ดังนั้นค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด เท่ากับ  $0.10 \pm 0.005$  ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

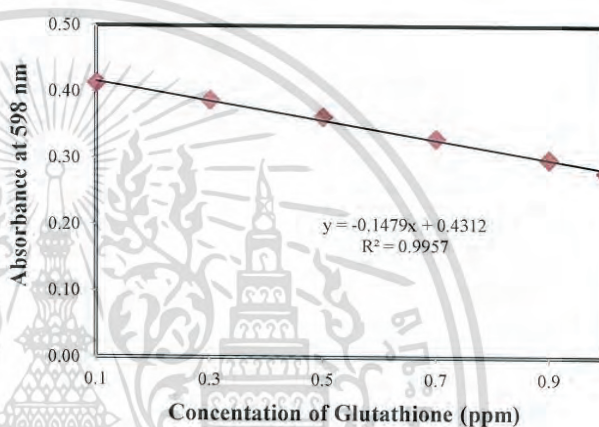
## 1.2 การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

สูตร

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

ตารางที่ ข.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Blank ที่นำมาคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์

No.	Abs.
1	0.4483
2	0.4596
3	0.4485
4	0.4451
5	0.4466
6	0.4461
7	0.4455
8	0.4441
9	0.4449
10	0.4565
Total	4.4852
SD	0.005
AVR	0.4485



การคำนวณ

$$\text{จากสูตร LOD} = \frac{10\text{SD of blank}}{\text{Slope of calibration}}$$

$$\text{แทนค่า LOD} = \frac{10 \times 0.0053}{0.1479}$$

$$= 0.3560 \text{ ppm}$$

ดังนั้นค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ เท่ากับ  $0.35 \pm 0.005$  ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สูตร

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

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

ตารางที่ ข.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Blank

Sample	Concentration of glutathione (ppm)	Absorbance (n = 3)		
		1	2	3
Distilled water	0.00	0	0	0
	0.40	0.3709	0.3712	0.3721
	0.70	0.3134	0.3257	0.3057
	1.00	0.2730	0.2242	0.1976
Plasma	0.00	0	0	0
	0.40	0.3655	0.3696	0.3627
	0.70	0.3307	0.3313	0.2956
	1.00	0.2794	0.2795	0.2754

การคำนวณ %Recovery และ RSD ของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน

ตัวอย่างการคำนวณสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 1.0 ppm (เลือด)

#### 1.3.1 การหาค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

จากสมการเส้นตรง  $y = -0.1479x + 0.4312$

แทนค่า Absorbance 1 ลงใน y

$$\text{จะได้ } 0.2794 = -0.1479x + 0.4312$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น } x = 1.0264 \text{ ppm}$$

จากนั้นเปลี่ยนค่า Absorbance จาก 1 เป็น 2 และ 3 จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ และ 1.0324 และ 1.0534 ppm ตามลำดับ แล้วนำไปคำนวณหาค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ ) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ซึ่งเท่ากับ 1.0374 ppm และ 0.0142 ตามลำดับ

### 1.3.2 การหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่นยำ (RSD)

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

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } \% \text{Recovery} &= \frac{(1.0374 - 0) \times 100}{1.00} \\ &= 103.74 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น %Recovery เท่ากับ 103.74 %

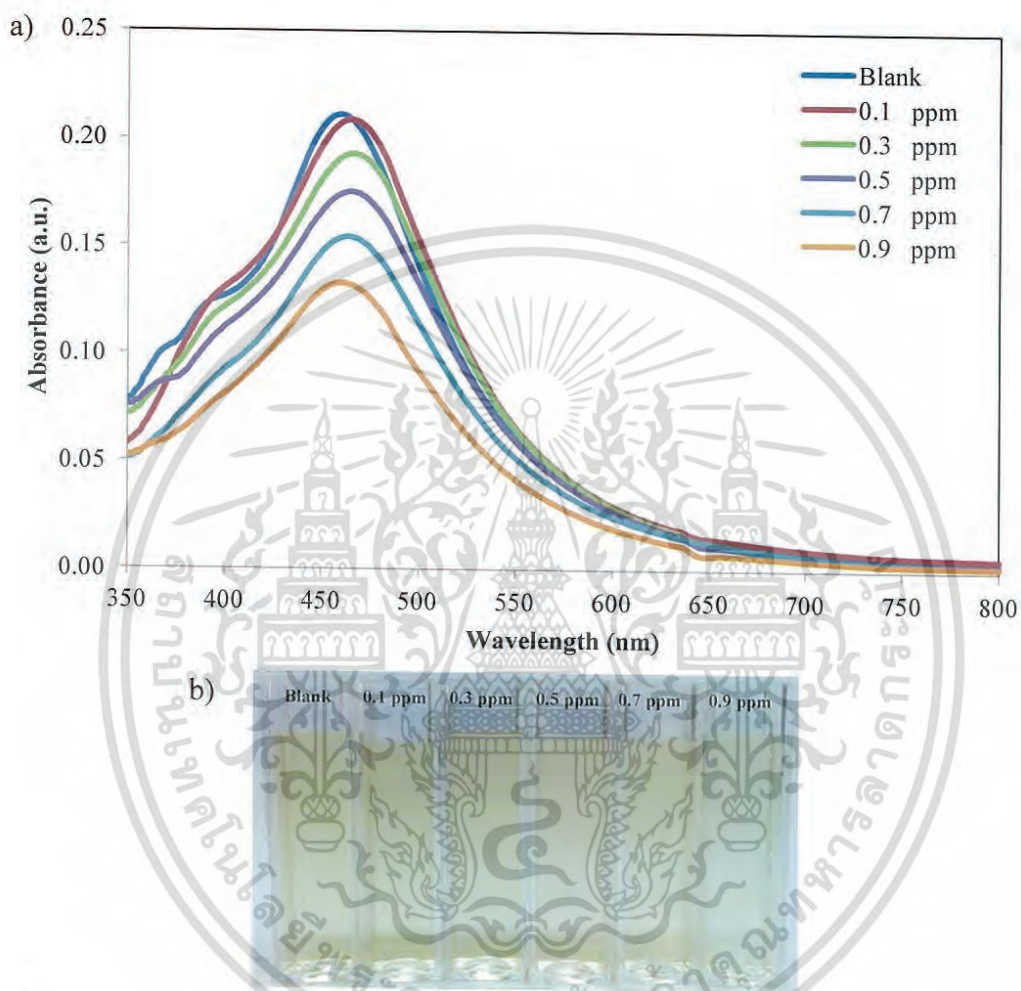
$$\text{จากสูตร } \text{RSD} = \frac{\text{SD}}{\bar{x}} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } \text{RSD} &= \frac{0.0142 \times 100}{1.0374} \\ &= 1.3688 \end{aligned}$$

ดังนั้น RSD เท่ากับ 1.3688 %

## 2. การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กอลลูต้าไธโอน

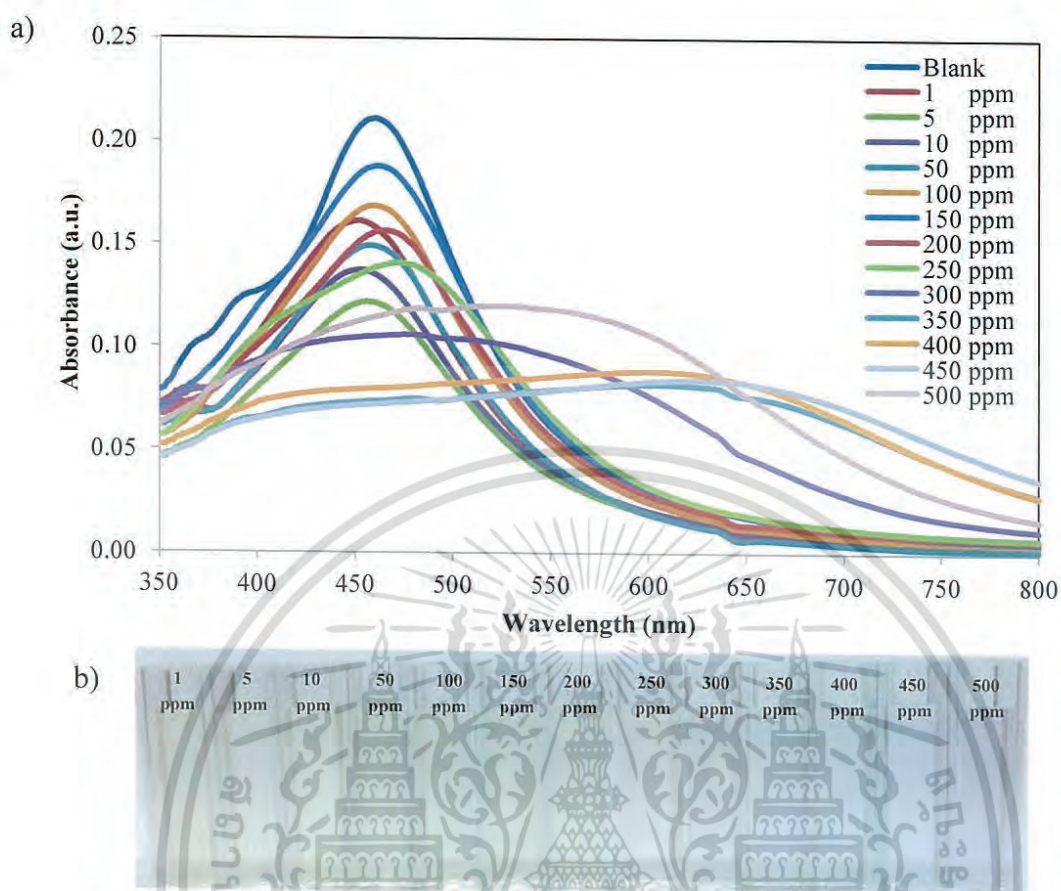
### 2.1 การตรวจวัดกอลลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM



รูปที่ ข.1 สเปกตร้าแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกอลลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.1 – 0.9 ppm

จากรูปที่ ข.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกอลลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 0.1 – 0.9 ppm จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกอลลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกอลลูต้าไธโอนมีค่าลดลง และภาพแสดงสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสารละลายสีส้มอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

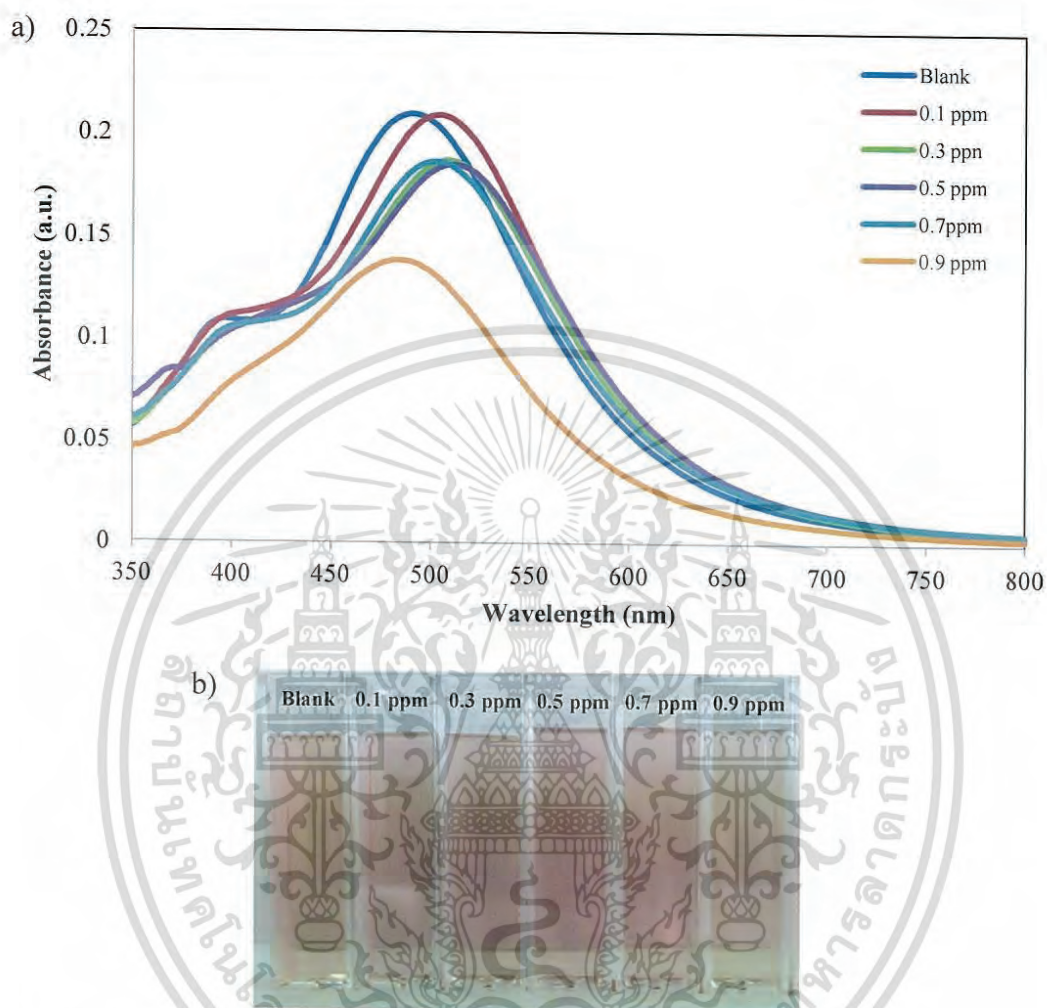


รูปที่ ข.2 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับคลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 1 – 500 ppm

จากรูปที่ ข.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานคลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 1 – 500 ppm จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานคลูต้าไธโอนมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและจะมีค่าลดลงในช่วงหลัง และภาพแสดงสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสารละลายสีส้มอ่อนสลับกันไปมา จนกลายเป็นสารละลายใสไม่มีสี แสดงถึงความไม่เสถียรของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM ในการทำปฏิกิริยากับคลูต้าไธโอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

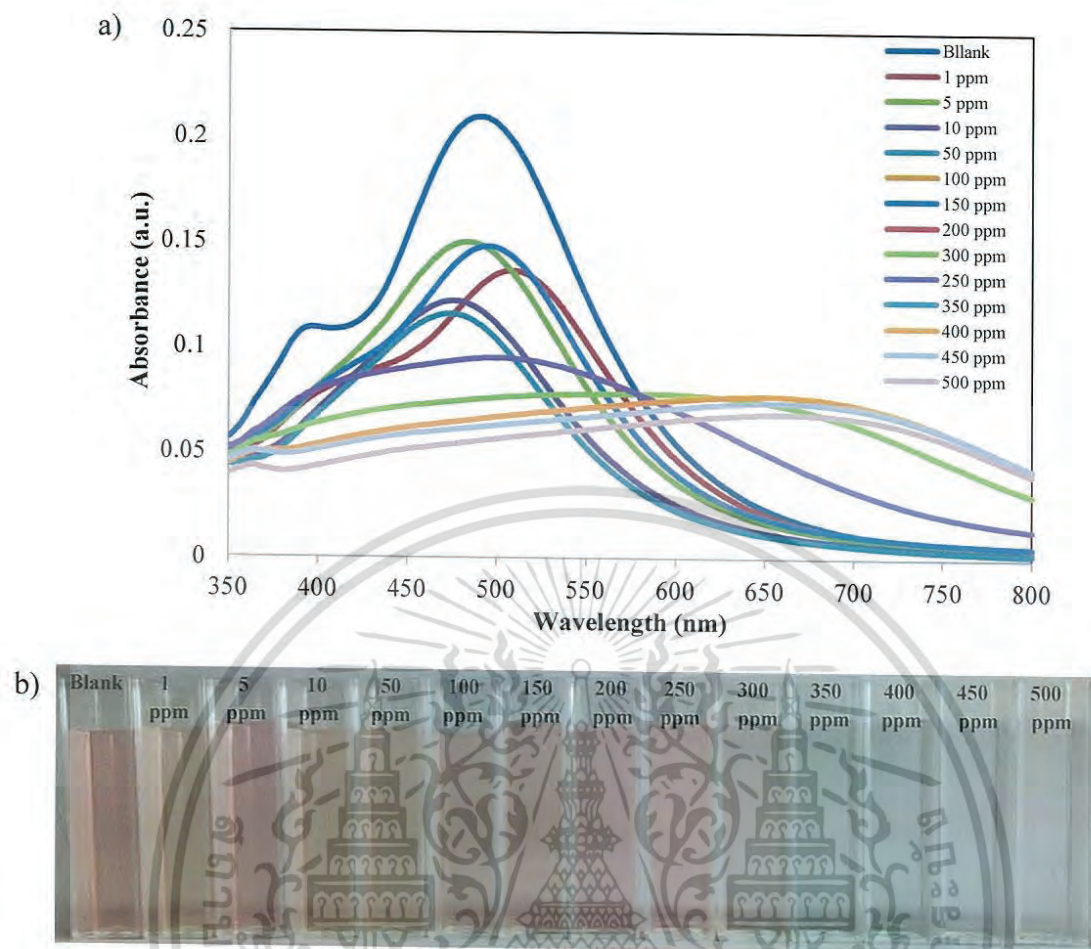
## 2.2 การตรวจวัดกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM



รูปที่ ข.3 สเปกตร้าแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.1 – 0.9 ppm

จากรูปที่ ข.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 0.1 – 0.9 ppm จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนมีค่าลดลง และภาพแสดงสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสารละลายสีแดงอ่อน

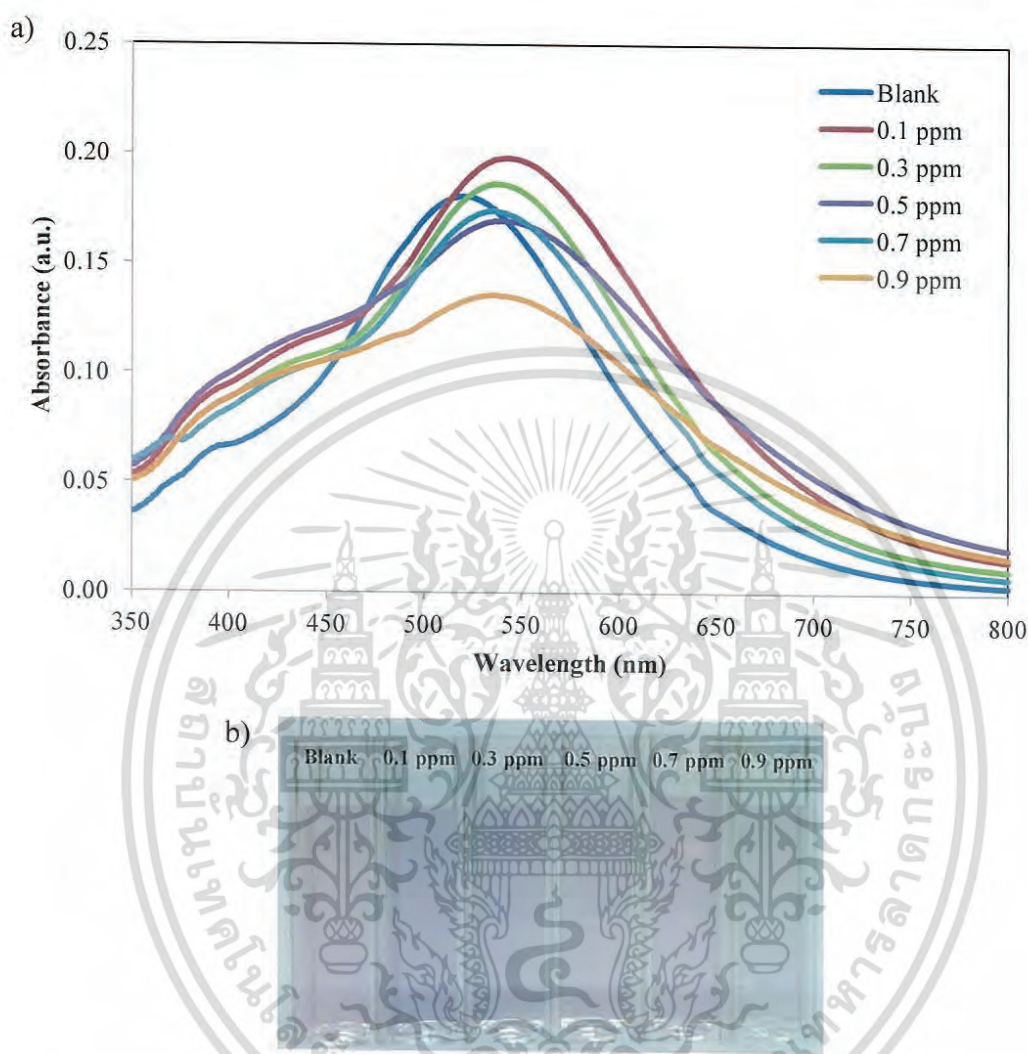
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นไซโตเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 1 – 500 ppm

จากรูปที่ ข.4 แสดงการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นของไซโตเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 1 – 500 ppm จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและจะมีค่าลดลงในช่วงหลัง และภาพแสดงสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสารละลายสีแดงอ่อนสลับกับไปมาจนกลายเป็นสารละลายใสไม่มีสี แสดงถึงความไม่เสถียรของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ความเข้มข้นของไซโตเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM ในการทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน

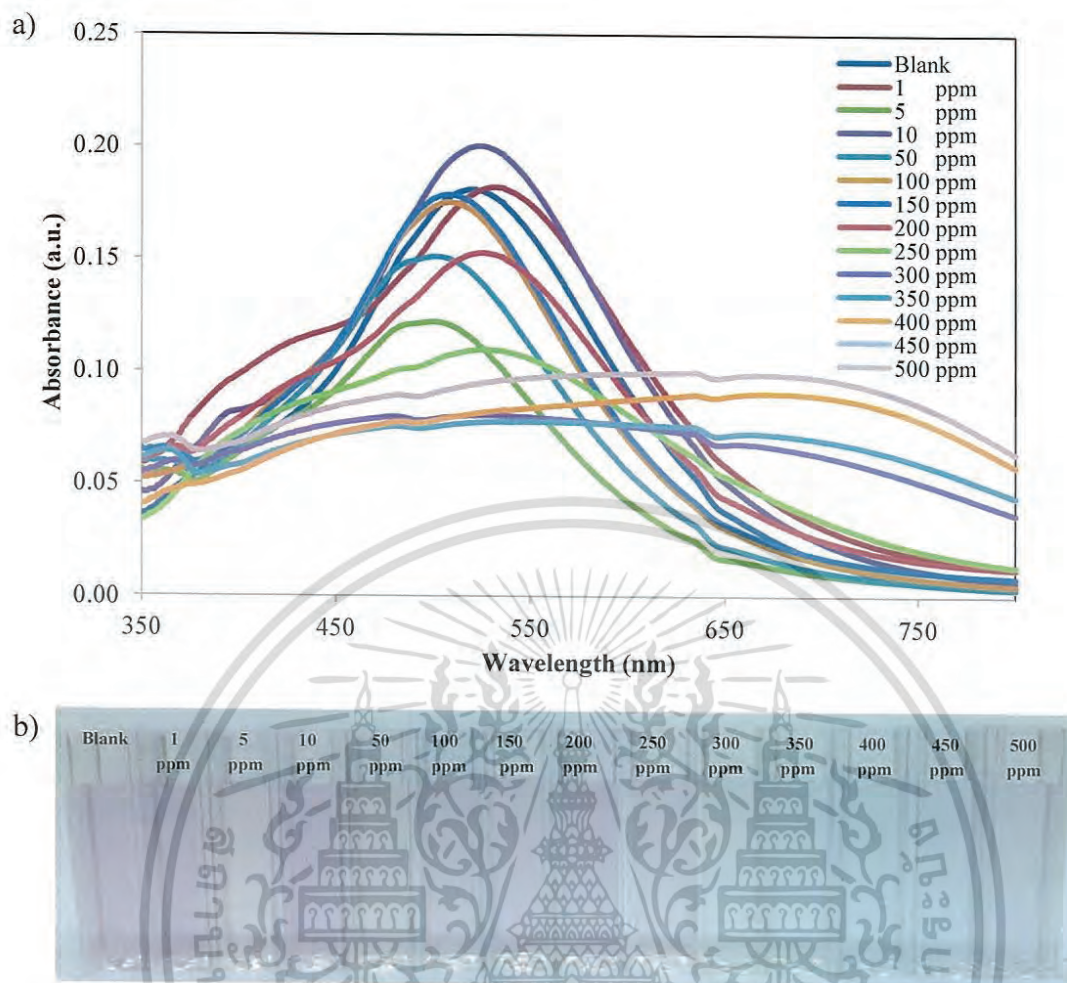
### 2.3 การตรวจวัดกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM



รูปที่ ข.5 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.1 – 0.9 ppm

จากรูปที่ ข.5 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 0.1 – 0.9 ppm จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNPs เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนมีค่าลดลง และภาพแสดงสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสารละลายใสไม่มีสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

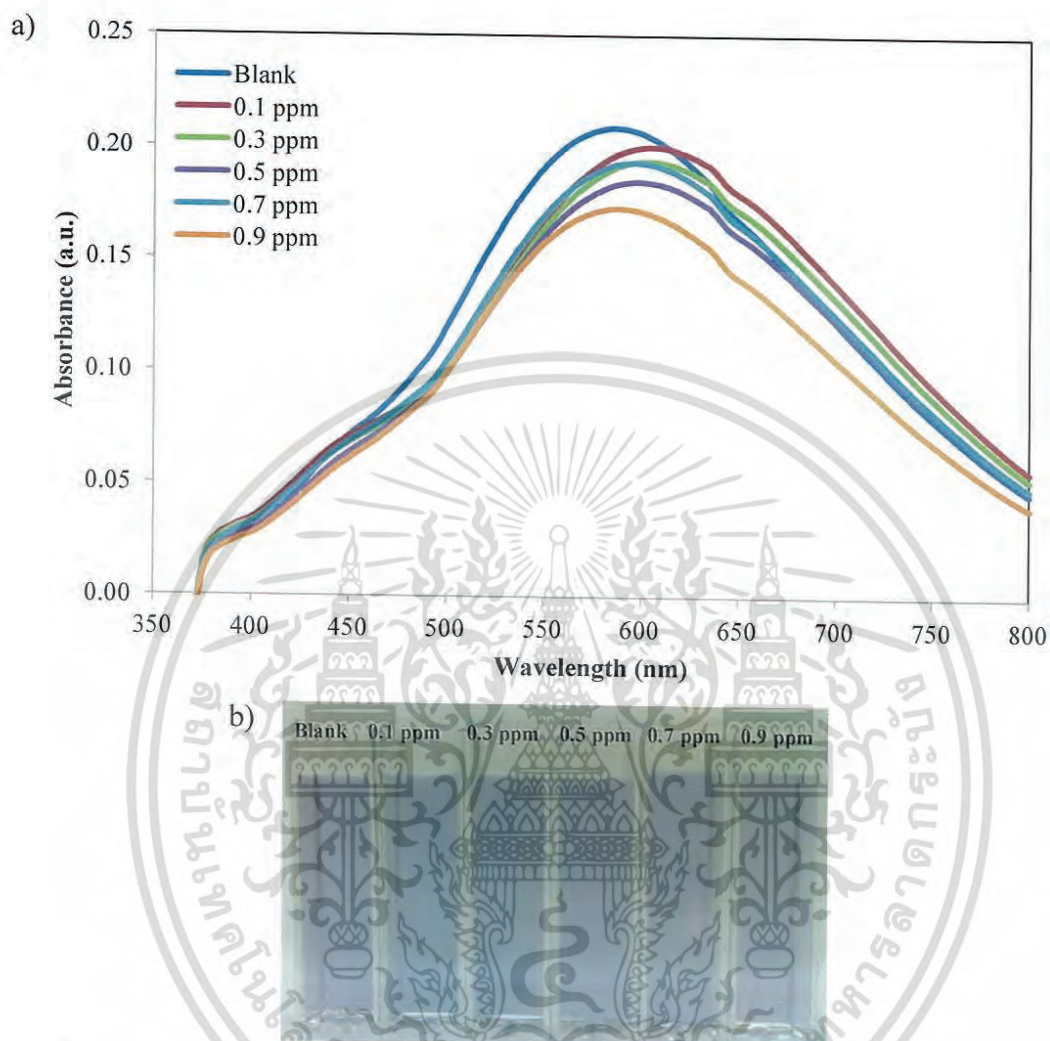


รูปที่ ข.6 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นไซโตเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 1 – 500 ppm

จากรูปที่ ข.6 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของไซโตเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 1 – 500 ppm จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย AgTNPs ปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง แรกและจะมีค่าลดลงในช่วงหลัง และภาพแสดงสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสารละลายสีชมพูอ่อนสลับกันไปมา จนกลายเป็นสารละลายใสไม่มีสี แสดงถึงความไม่เสถียรของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ความเข้มข้นของไซโตเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM ในการทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

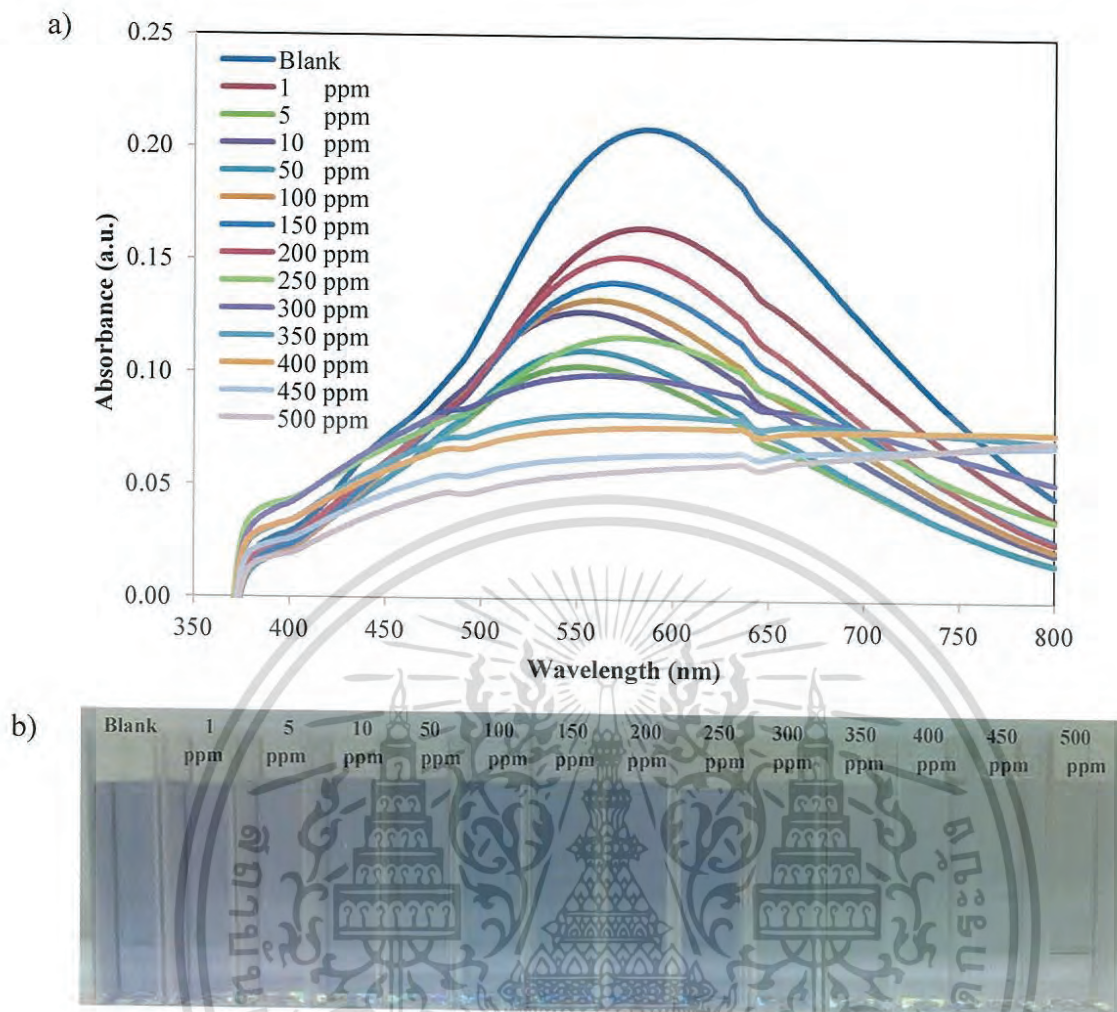
## 2.4 การตรวจวัดคลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM



รูปที่ ข.7 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับคลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.1 – 0.9 ppm

จากรูปที่ ข.7 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานคลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 0.1 – 0.9 ppm จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานคลูต้าไธโอนมีค่าลดลง และภาพแสดงสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสารละลายใสไม่มีสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

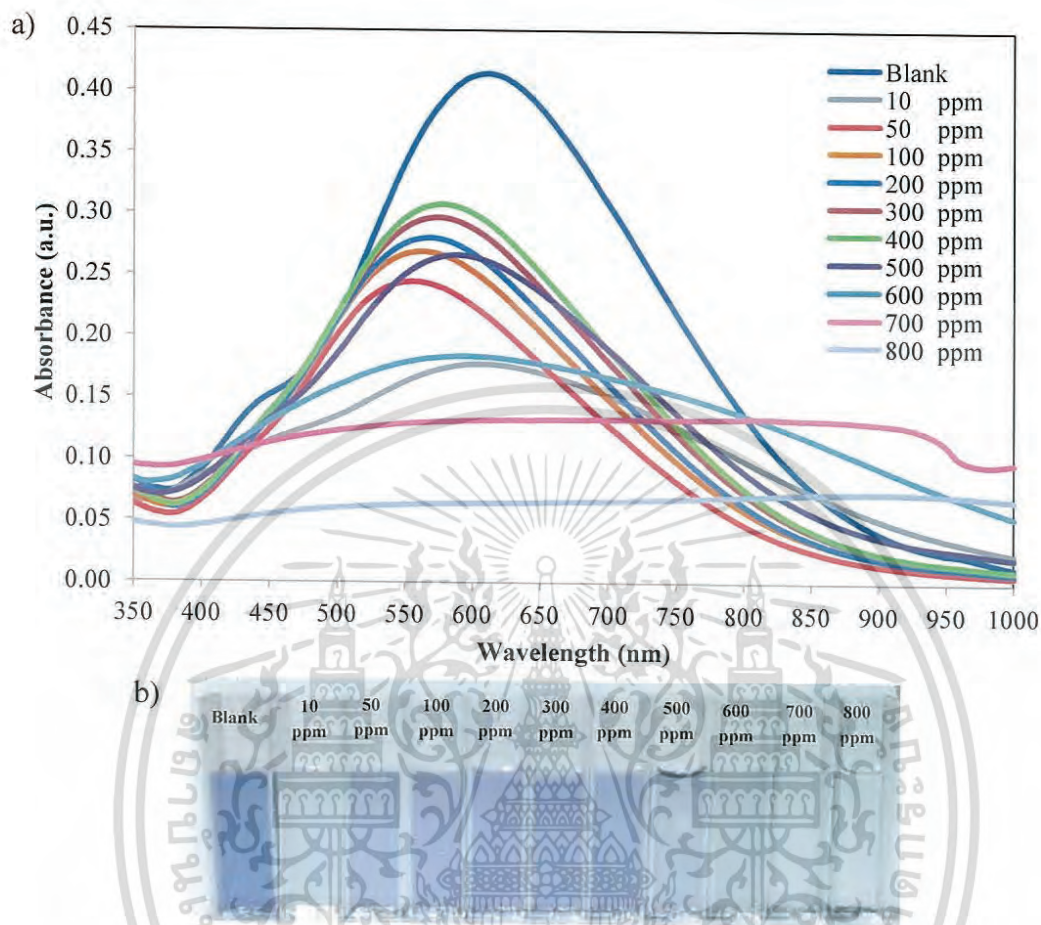


รูปที่ ข.8 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับคลูต้าไอออนที่มีความเข้มข้น 1 – 500 ppm

จากรูปที่ ข.8 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานคลูต้าไอออนที่มีความเข้มข้น 1 – 500 ppm จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานคลูต้าไอออนเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานคลูต้าไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและจะมีค่าลดลงในช่วงหลัง และภาพแสดงสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสารละลายสีฟ้าอ่อนสลับกันไปมาจนกลายเป็นสารละลายใสไม่มีสี

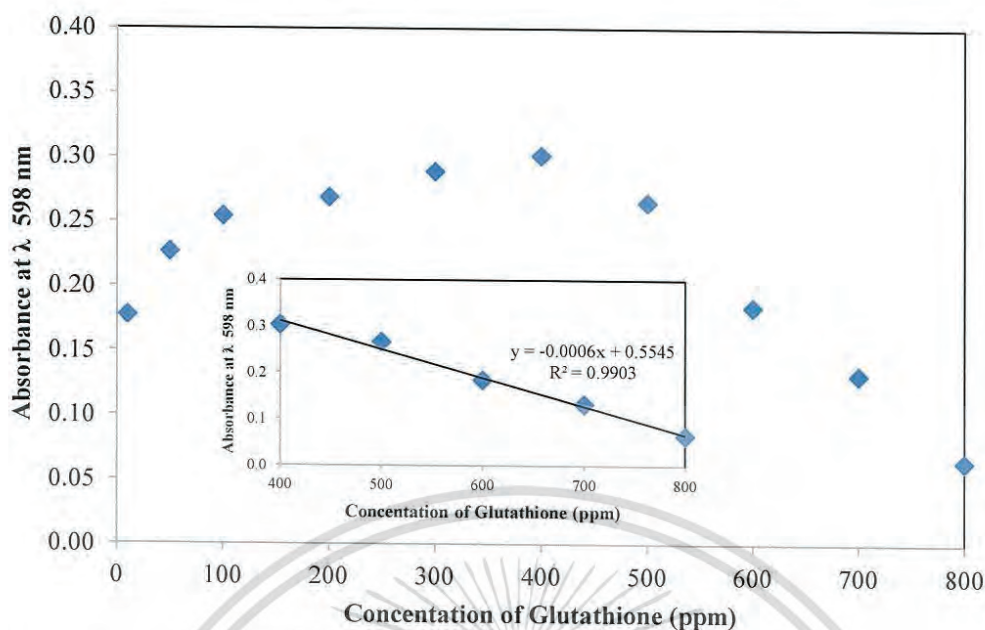
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ผลการศึกษาความเป็นเส้นตรงของสารละลายกลูต้าไรโอนช่วงความเข้มข้น 10-800 ppm



รูปที่ ข.9 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไรโอนที่ความเข้มข้น 10 – 800 ppm

จากรูปที่ ข.9 แสดงสเปกตราค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไรโอนมาตรฐานที่ความเข้มข้น 10 – 800 ppm จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไรโอนเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไรโอนมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและจะมีค่าลดลงในช่วงหลัง และภาพแสดงสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสารละลายสีฟ้าอ่อนสลับกันไปมาจนกลายเป็นสารละลายใสไม่มีสี



รูปที่ ข.10 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน

ตารางที่ ข.4 ความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 10-800 ppm

ความเข้มข้นสารละลายกลูต้าไธโอน (ppm)	ความยาวคลื่นสูงสุด, $\lambda_{\max}$ (nm)
10	608
50	555
100	562
200	567
300	574
400	578
500	587
600	595
700	816
800	901

จากรูปที่ ข.10 และตารางที่ ข.4 เป็นกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายกลูต้าไธโอนกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ช่วงความเข้มข้น 400-800 ppm ซึ่งมีสมการถดถอยเชิงเส้นตรง คือ  $y = -0.0006x + 0.5545$  มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.9903 และค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดจะย้ายจากความยาวคลื่นยาวไปยังความยาวคลื่นสั้น (Blue shift) ที่ความเข้มข้นของสารมาตรฐานกลูต้าไธโอน 10-50 ppm และค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดจะย้ายจากความยาวคลื่นสั้นไปยังความยาวคลื่นยาว (Red shift) ที่ความเข้มข้นของสารมาตรฐานกลูต้าไธโอน 100-800 ppm จากผลการทดลองยังไม่สามารถยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับกลูต้าไธโอนในช่วงความเข้มข้นของสารมาตรฐานกลูต้าไธโอน 100-800 ppm จึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาเชิงลึกเพิ่มเติม เช่น การตรวจสอบสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค XPS และ Zeta potentials เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ - นามสกุล นางสาวมัลลิกา ทองชาติ  
(Miss Manlika Thongchat)  
วัน เดือน ปีเกิด 12 กันยายน 2536  
ประวัติการศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ปีการศึกษา 2554  
จากโรงเรียนพิบูลวิทยาลัย จังหวัดลพบุรี  
ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง  
อีเมลล์ manlika.1209@hotmail.com  
โทร 083-0402068



ชื่อ - นามสกุล นางสาวมูธิตา อุดมชรา  
(Miss Mutita Udomchara)  
วัน เดือน ปีเกิด 22 กุมภาพันธ์ 2537  
ประวัติการศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ปีการศึกษา 2554  
จากโรงเรียนเบญจมมหาราช  
จังหวัดอุบลราชธานี  
ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง  
อีเมลล์ mutita.chen@gmail.com  
โทร 098-1801013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ - นามสกุล

นางสาวศิริพรรณ เหลืองตรงกิจ  
(Miss Siriphan Leungtrongkit)

วัน เดือน ปีเกิด

15 กรกฎาคม 2535

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ปีการศึกษา 2553  
จากโรงเรียนสตรีนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์

ระดับปริญญาตรี

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

อีเมลล์

siriphan.L@hotmail.com

โทร

091-8425125



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Name (Thai):** เอกรรัฐ เดชศรี

**Name (Eng):** EKARAT DETSRI

**Branch:** Analytical Chemistry /เคมีวิเคราะห์

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

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

**Fax:** 02-3298428

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



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

**Education:**

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

**Current research activities:**

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

**International publications:**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้