

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

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

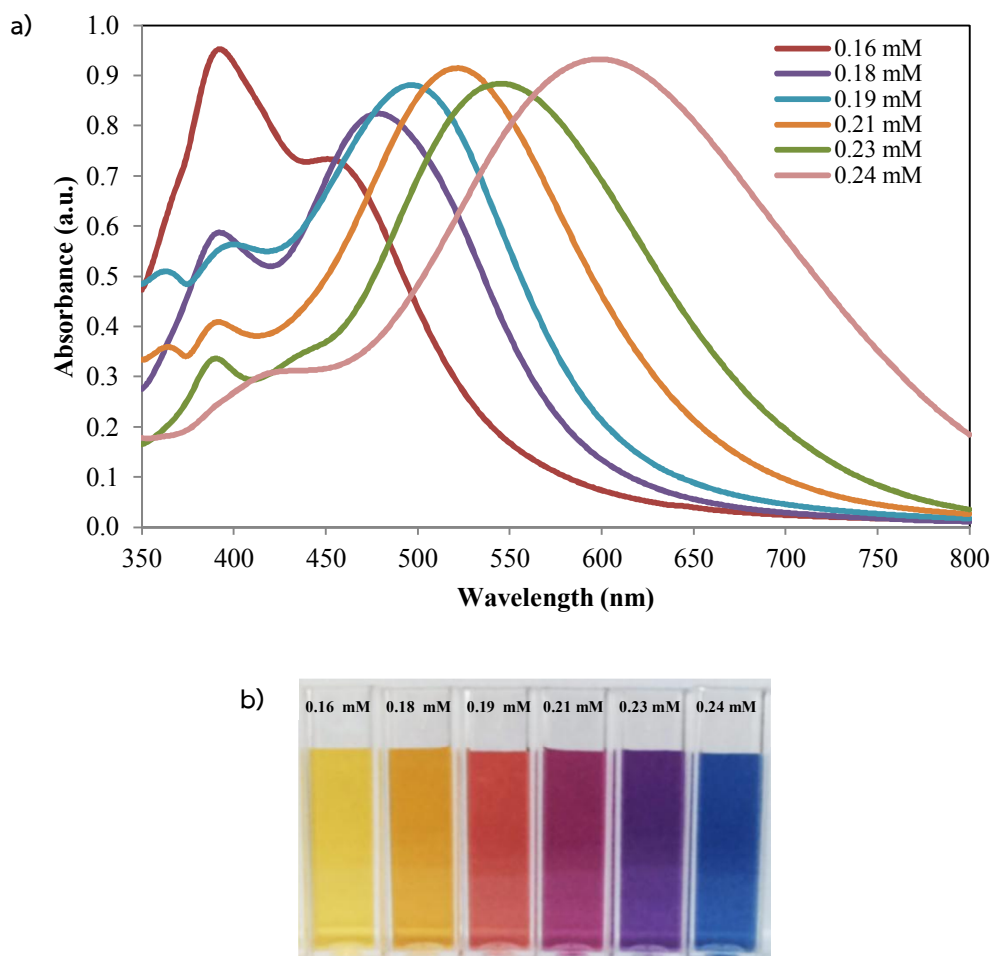
4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs)

งานวิจัยนี้ต้องการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยารีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) โดยใช้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตทำหน้าที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพ และใช้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ อีกทั้งใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวกัด (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 ผสมกับสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้น 20 mM และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30% w/w เข้าด้วยกัน แล้วเติมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ใช้ศึกษา

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 จากนั้นปั่นจนเป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ปฏิกิริยาการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมเกิดได้สมบูรณ์ แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-vis spectrophotometry โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 300-800 nm ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1



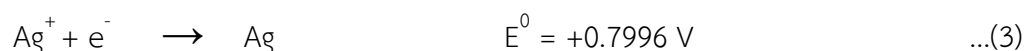
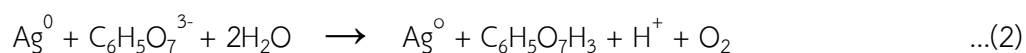
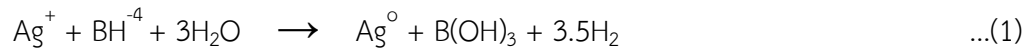
รูปที่ 4.1 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน และ (b) สีของสารละลายที่สังเคราะห์โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้นต่างๆ

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

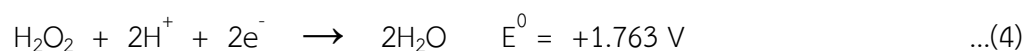
ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (mM)	ความยาวคลื่นสูงสุด ($\lambda_{\max}$)
0.16	451
0.18	479
0.19	497
0.21	522
0.23	546
0.24	602

จากรูปที่ 4.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและสีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ให้เป็นอนุภาคเงินระดับนาโน (Ag^0) ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น พฤติกรรมการปรากฏสีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนจะเปลี่ยนไป โดยเริ่มจากสารละลายใสไม่มีสีของซิลเวอร์ไนเตรด (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 จะทำให้เกิดการกักตุนขึ้น ซึ่งอันตรกิริยาที่แสงกระทำต่อโลหะจะเกิดได้สองแบบ คือ แสงจะตกกระทบและสะท้อนออกไปด้วยความยาวคลื่นเท่าเดิมทุกทิศทาง เรียกว่าการกระเจิง (Scattering) และในขณะเดียวกันบางโฟตอนก็จะถูกดูดกลืนและถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการสั่น ซึ่งเรียกว่าการดูดกลืนแสง (Absorption) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างระดับนาโนของอนุภาคเงินจะเกิดทั้งกระบวนการกระเจิงแสงและการดูดกลืนแสง ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน นั้นหมายความว่า สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นได้มีการแสดงสีที่แตกต่างกันนั้น เนื่องจากอนุภาคที่อยู่ในสารละลายมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกัน นั้นเป็นเพราะอิทธิพลจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน [62] เพื่อเป็นการยืนยันขนาดและรูปร่างของอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ขึ้น จึงทำการศึกษาด้วยเทคนิคการตรวจวัดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) ซึ่งแสดงผลในหัวข้อ 4.1.2.1 ต่อไป

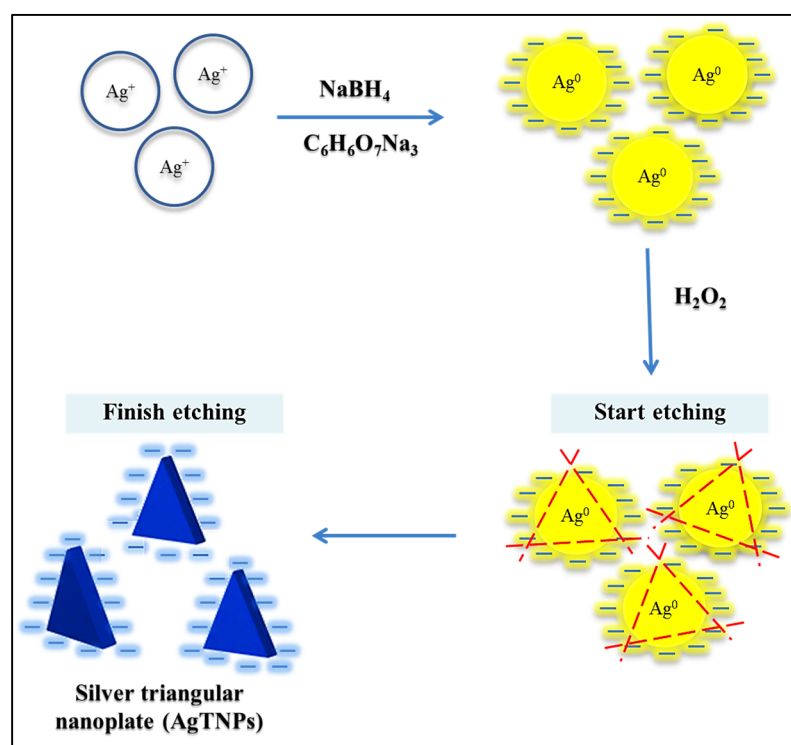
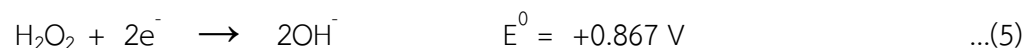
การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) สามารถแสดงการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.2 และสมการดังต่อไปนี้



In acidic solution:



In alkaline solution:



รูปที่ 4.2 กลไกปฏิกิริยาการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs)

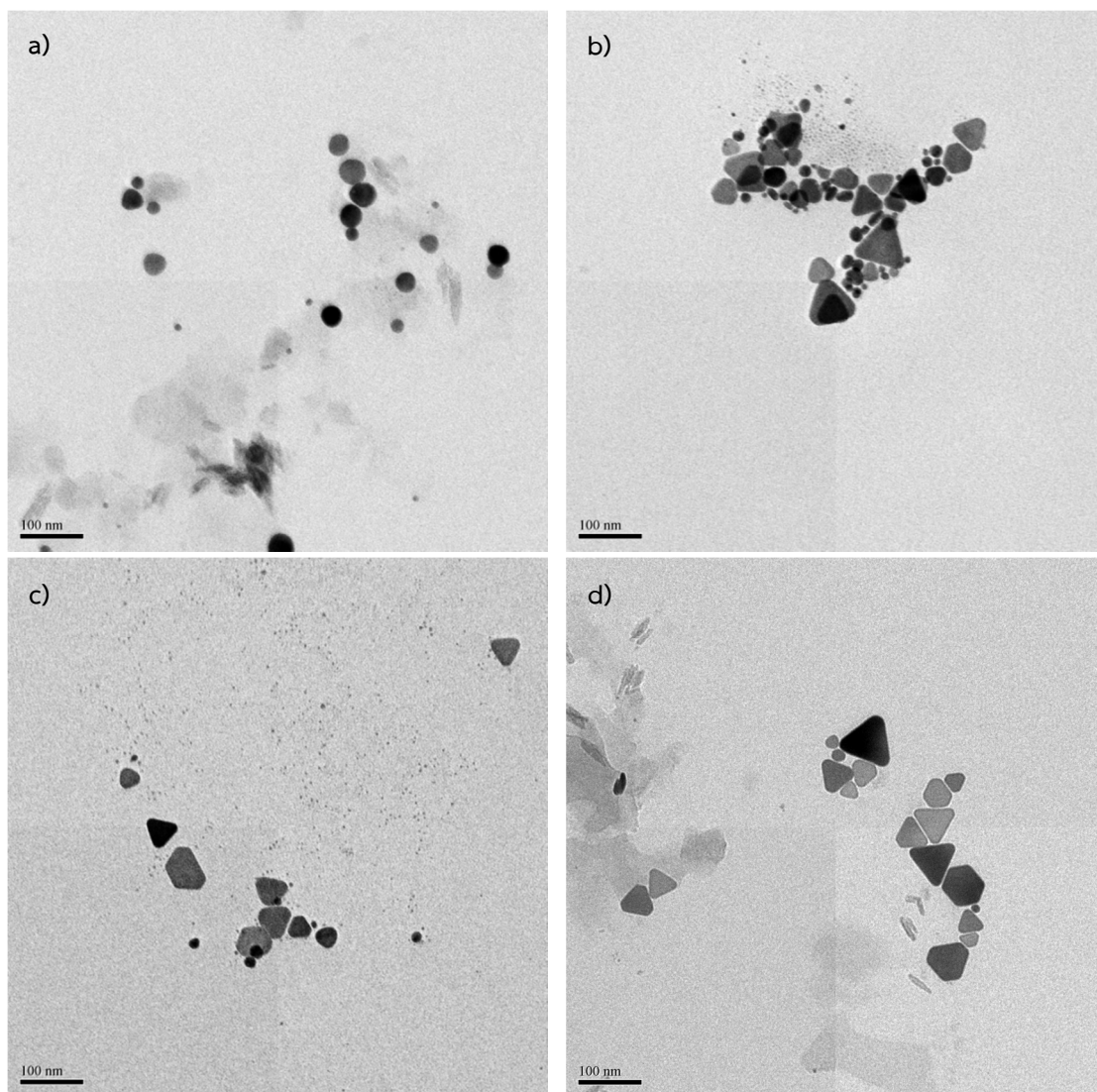
จากรูปที่ 4.2 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ปฏิกิริยาจะเริ่มหลังจากเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ลงในสารละลายโดย Ag^+ จะถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ให้กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างกลม (Ag^0) ดังสมการที่ (1) จากนั้นไตรโซเดียมซิเตรตจะเข้ารักษาเสถียรภาพของอนุภาคเงินรูปร่างกลม ดังสมการที่ (2) ส่งผลให้อนุภาคเงินมีประจุลบของหมู่คาร์บอกซิลิก (COO^-) จากโครงสร้างไตรโซเดียมซิเตรต จากนั้นอนุภาคเงินรูปร่างกลมถูกกัด (Etchant) โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs)

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

4.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

4.1.2.1 การศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

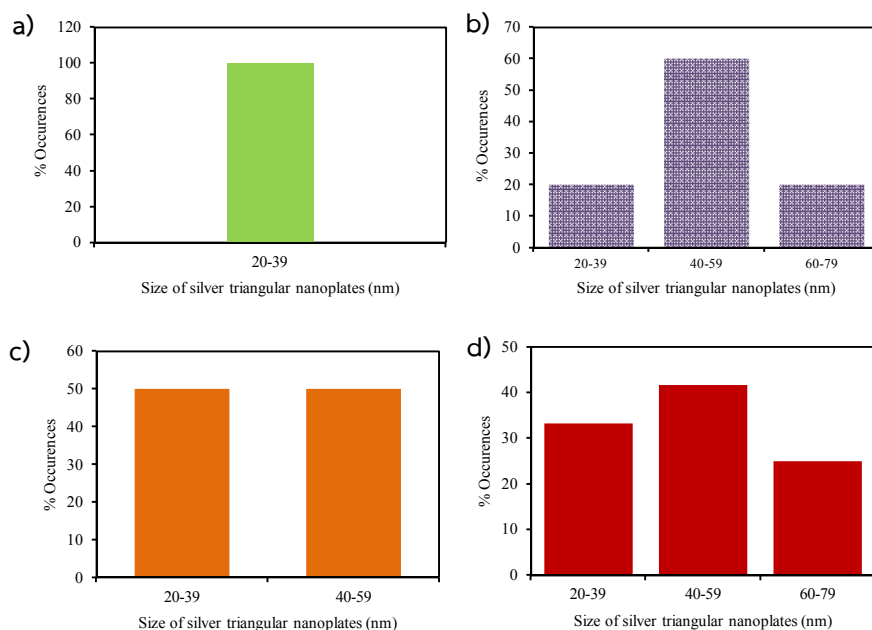
ในการทดลองนี้ ทำโดยการเตรียมสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ต่างกัน คือ 0.18, 0.19, 0.21 และ 0.24 mM ตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายทั้ง 4 หยดลงบนกริด แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมระดับนาโน 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 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์แตกต่างกัน 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



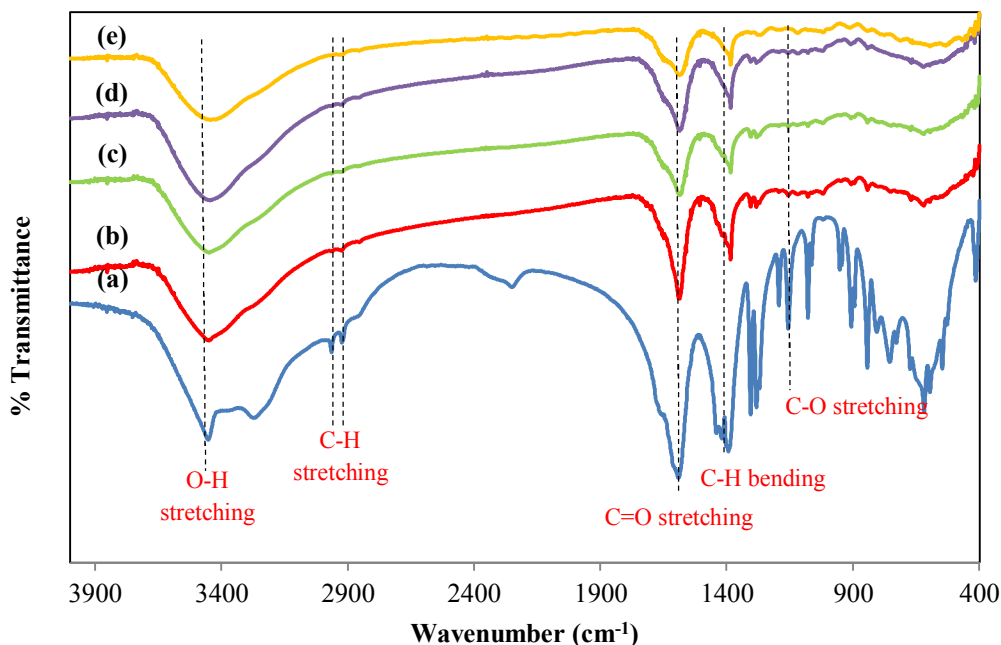
รูปที่ 4.4 กราฟแท่งแสดง size distribution ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโพรไฮโดรด์ (a) 0.18 mM, (b) 0.19 mM, (c) 0.21 mM และ (d) 0.24 mM

จากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมโพรไฮโดรด์เพิ่มขึ้น อนุภาคเงินระดับนาโนจะแสดงลักษณะรูปร่างสามเหลี่ยมมากขึ้น และการเกิดอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโนก็มีจำนวนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่ความเข้มข้นของโซเดียมโพรไฮโดรด์ที่มากที่สุดนั้นคือ 0.24 mM จะแสดงคุณลักษณะรูปร่างสามเหลี่ยมมากที่สุด และมีจำนวนอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมเกิดขึ้นในสารละลายมากที่สุด ซึ่งสามารถเห็นได้ดังตารางแสดงอัตราการเกิดรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน ตารางที่ 4.1

เมื่อทำการศึกษาขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า ขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมที่เกิดจากความเข้มข้นของโซเดียมโพรไฮโดรด์ต่าง ๆ กัน นั้น มีขนาดใกล้เคียงกันที่ประมาณ 40-59 nm แสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่มีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกันแต่รูปร่างเปลี่ยนไป ส่งผลต่อพฤติกรรมการดูดสีของสารนั้นๆ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance) ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น

4.1.2.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

ในการทดลองนี้ ทำโดยเตรียมสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโพรไฮโดรด์ 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 ⁻¹)	AgTNPs (b) Peaks (cm ⁻¹)	AgTNPs (c) Peaks (cm ⁻¹)	AgTNPs (d) Peaks (cm ⁻¹)	AgTNPs (e) Peaks (cm ⁻¹)
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⁻¹ ปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ C=O ที่เลขคลื่น 1587 cm⁻¹ ปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ C-O ที่เลขคลื่น 1073 cm⁻¹ และ ปรากฏลักษณะการสั่นแบบงอ (bending) ของพันธะ C-H ที่เลขคลื่น 1418 และ 1393 cm⁻¹

เมื่อนำค่า FT-IR สเปกตรัมของไตรโซเดียมซิเตรตที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ทั้งสิ้น พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่ขึ้นที่เดียวกับหมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิเตรตบริสุทธิ์ โดยใน

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

จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ในการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ จะเลือกที่ความเข้มข้น 0.24 mM เพื่อทำการศึกษปรากฏการณ์รับรู้กับสารละลายกลูต้าไธโอนต่อไป เนื่องจากสารที่เกิดจากการรีดิวซ์ที่ความเข้มข้นนี้ ให้สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้เกิดอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) มากที่สุด และมีจำนวนอนุภาคสามเหลี่ยมมากที่สุด และจากการศึกษางานวิจัยอื่นๆ พบว่าสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนสีน้ำเงินเป็นสารที่มีความเสถียรมากที่สุด [64]

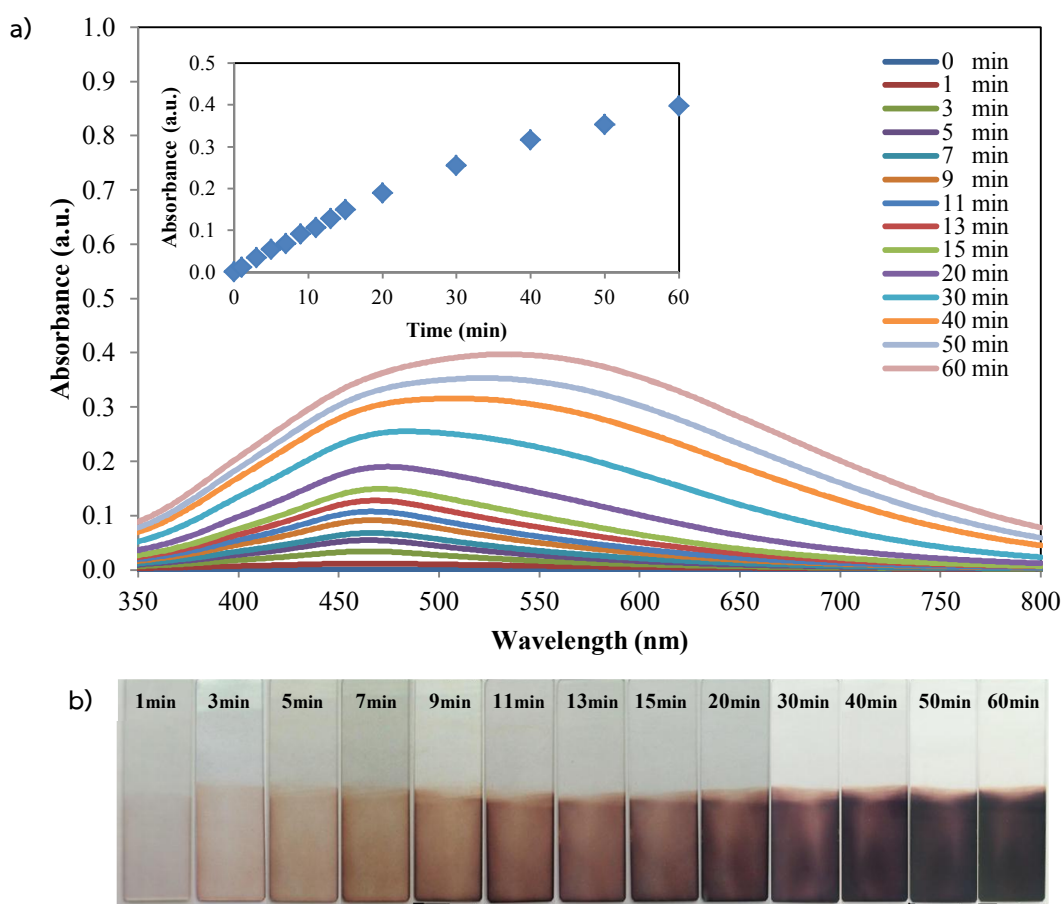
4.2 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

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)

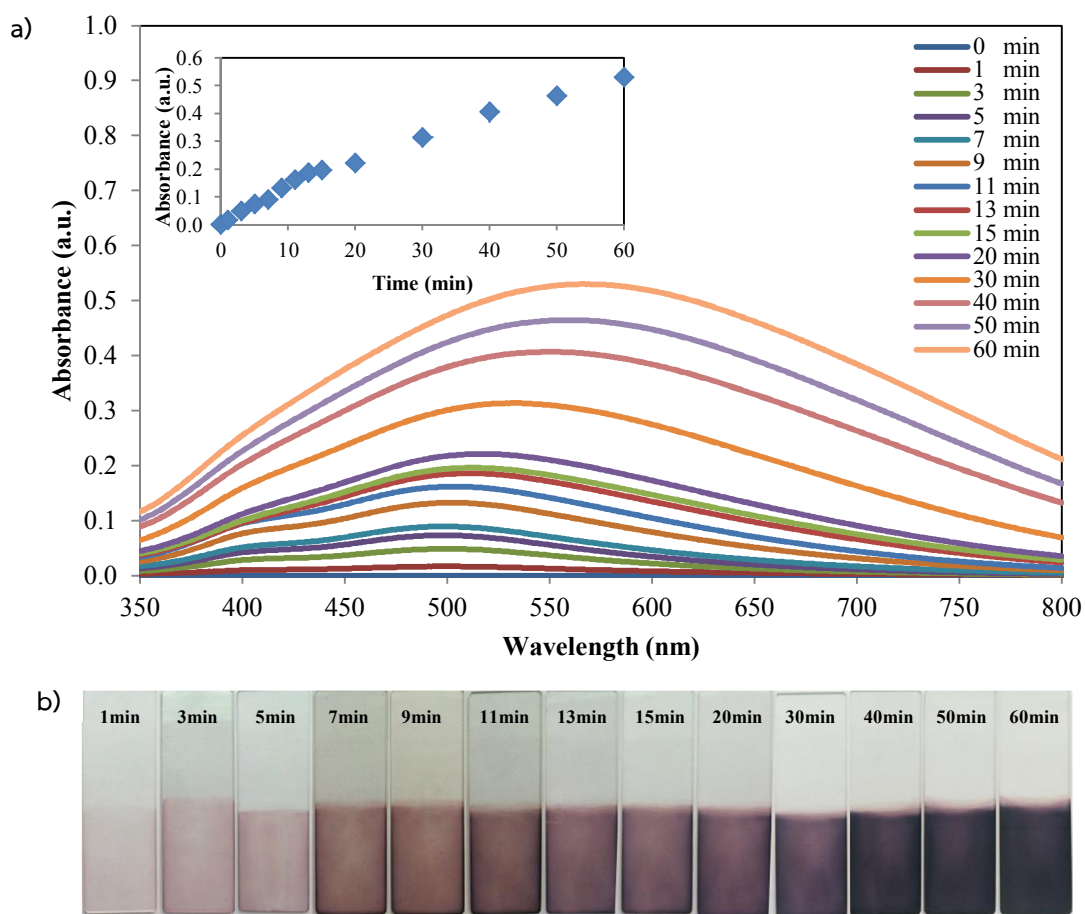
ในการทดลองนี้ ทำโดยการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายไซเตียมโบโรไฮไดรด์เท่ากับ 0.18 mM, 0.19 mM, 0.21 mM และ 0.24 mM จากนั้นนำแผ่นกระจกที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวแล้ว จุ่มลงในสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ เป็นเวลา 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 นาที ทิ้งไว้ให้แห้ง 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



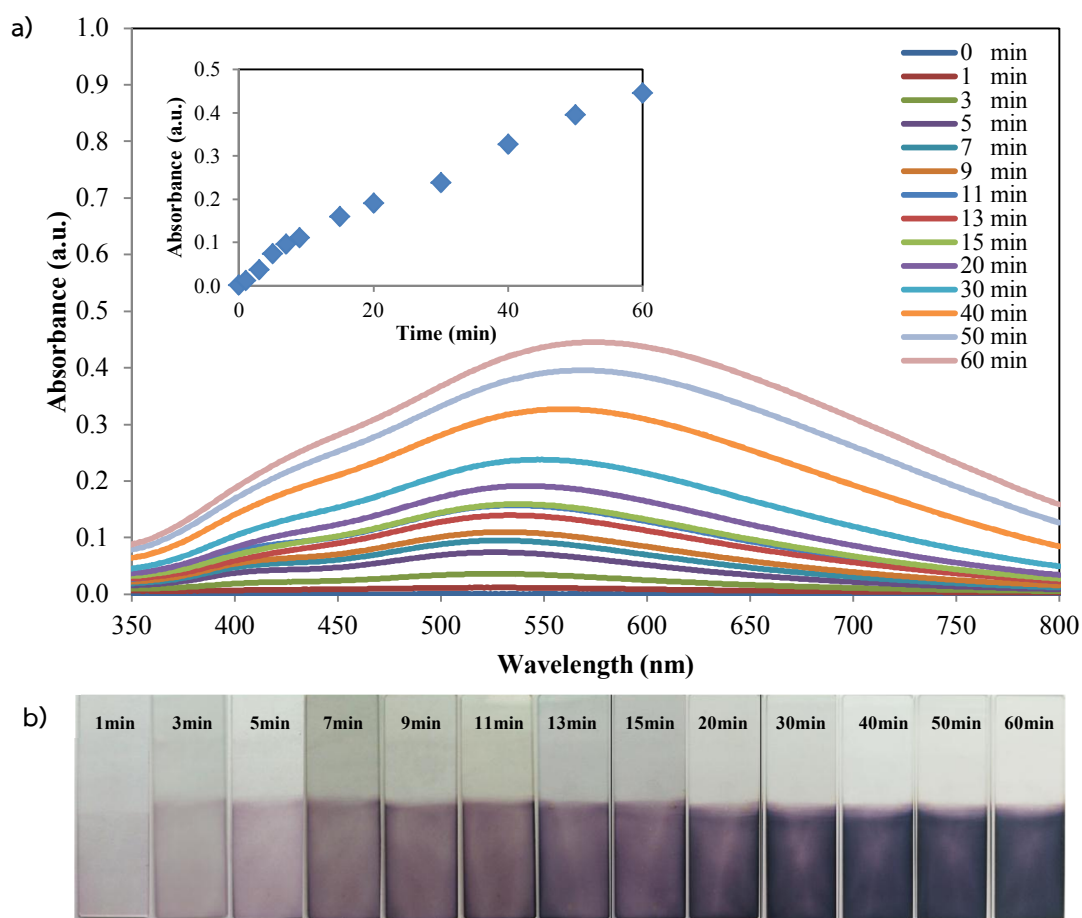
รูปที่ 4.6 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบางที่ความเข้มข้นของสารละลายไซเตียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM

4.2.1.2 สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มบาง ที่ ความเข้มข้นไซโตไคน์ 0.19 mM



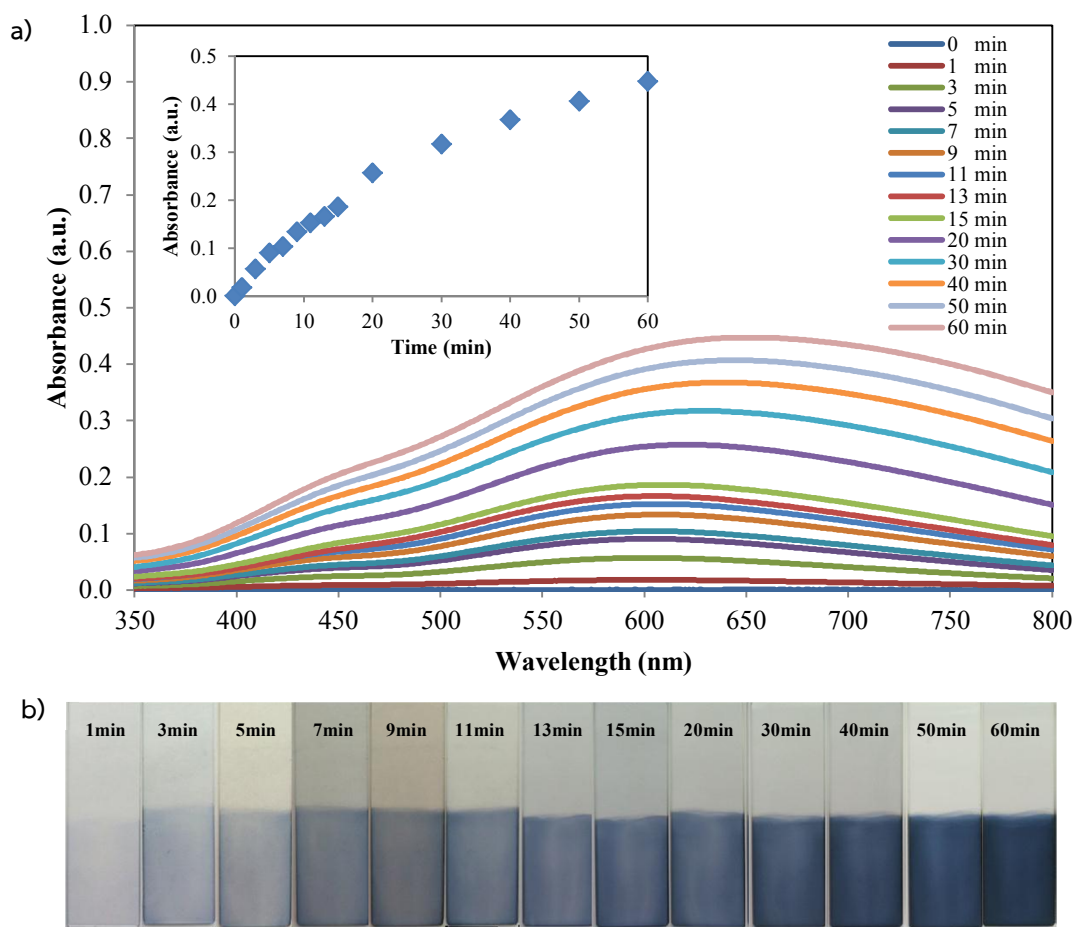
รูปที่ 4.7 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของแผ่นฟิล์มบางที่ความเข้มข้นของสารละลายไซโตไคน์ 0.19 mM

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

ความเข้มข้น สารละลายโซเดียม โบโรไฮไดรด์ (mM)	สี สารละลาย	เวลาการดูดซับ อนุภาคเงินบน แผ่นฟิล์มบาง (min)	ความยาวคลื่น สูงสุด, $\lambda_{\max}$ (nm)	สีแผ่นฟิล์ม
0.18	ส้ม	20	474	ส้มอิฐ
		60	536	ด้ามส้ม
0.19	แดง	20	518	ส้มอมม่วง
		60	566	ด้ามส้ม
0.21	ม่วง	20	536	ม่วง
		60	573	ด้ามม่วง
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 (COO^-) ของไตรโซเดียมซิเตรตที่รักษาเสถียรภาพของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และประจุบวกของ PDADMAC ที่อยู่บนพื้นผิวของแผ่นฟิล์ม เมื่อนำสารละลายอนุภาคเงินมาสร้างแผ่นฟิล์มบาง ผลที่ได้แผ่นฟิล์มบางมีแนวโน้มสีเข้มขึ้น เนื่องจากเกิดการรวมตัวของอนุภาคเงินระดับนาโนบนแผ่นฟิล์มบาง จึงแสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางเพิ่มมากขึ้น เมื่อเวลาการจุ่มแผ่นฟิล์มบางในสารละลายอนุภาคเงินเพิ่มขึ้น และค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หากยังคงเพิ่มเวลาในการจุ่มมากขึ้น แสดงถึงความไม่อิ่มตัวในการดูดซับอนุภาคเงินระดับนาโนของสารละลาย PDADMAC ที่อยู่บนผิวหน้าของแผ่นฟิล์ม [65]

ในการเลือกเวลาการดูดซับของอนุภาคเงินบนแผ่นฟิล์มบางที่เหมาะสมเพื่อนำไปศึกษาปรากฏการณ์รับรู้กับสารละลายกลูต้าไธโอนั้น จะเลือกเวลาที่แผ่นฟิล์มบางมีค่าการดูดกลืนแสงคงที่ เนื่องจาก PDADMAC ที่อยู่บนผิวหน้าของแผ่นฟิล์มดูดซับอนุภาคเงินระดับนาโนได้อิ่มตัวยังยวด ไม่ดูดซับอนุภาคเงินระดับนาโนได้อีก แต่จากผลการศึกษาเมื่อทำการจุ่มแผ่นฟิล์มบางจนครบ 60 นาที ค่าการดูดกลืนแสงยังคงมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาในการดูดซับของอนุภาคเงินบนแผ่นฟิล์มบางที่เวลา 20 นาทีและ 60 นาที เนื่องจากช่วงเวลาที่ 20 นาทีเป็นเวลาที่ค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเลือกเวลา 60 นาที

เนื่องจากเป็นเวลาสูงสุดในการศึกษาและมีความหนาแน่นอนุภาคเงินบนแผ่นฟิล์มบางมากที่สุด เพื่อนำไปศึกษาปรากฏการณ์รับรู้กับสารละลายกลูต้าไธโอนต่อไป

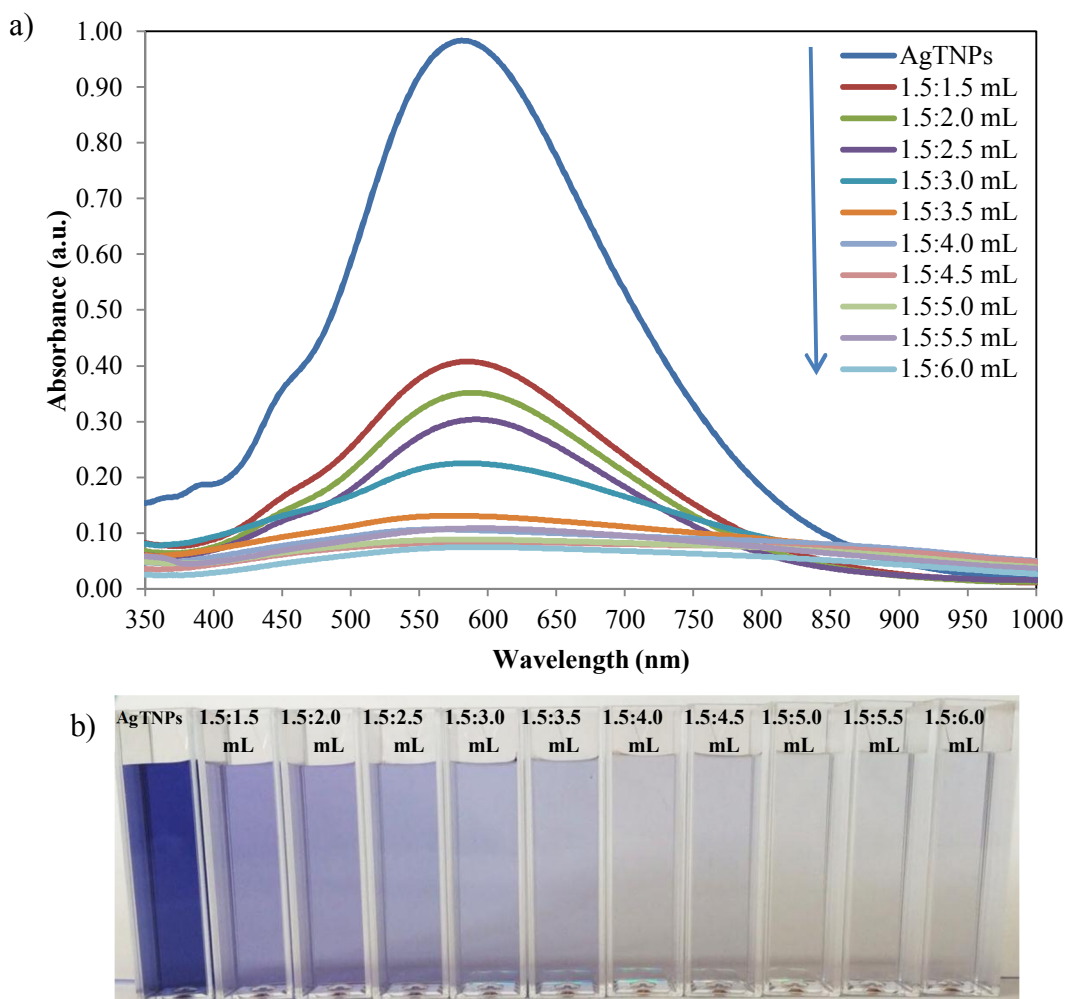
4.3 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายและแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

ในงานวิจัยนี้ต้องการนำสารละลายและแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) มาทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูต้าไธโอนเพื่อศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์ต่างๆ เช่น ศึกษาอัตราส่วนของสารละลายกลูต้าไธโอนต่อสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่เหมาะสม ศึกษาความเป็นเส้นตรงของสารละลายกลูต้าไธโอน ศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อการวิเคราะห์หากลูต้าไธโอน 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 การศึกษาอัตราส่วนของปริมาณสารละลายอนุภาครูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอนที่เหมาะสม

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



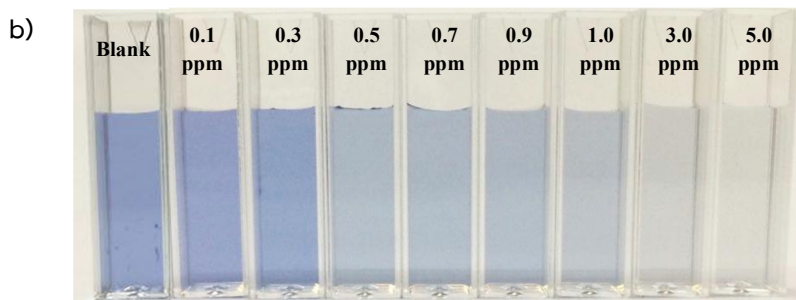
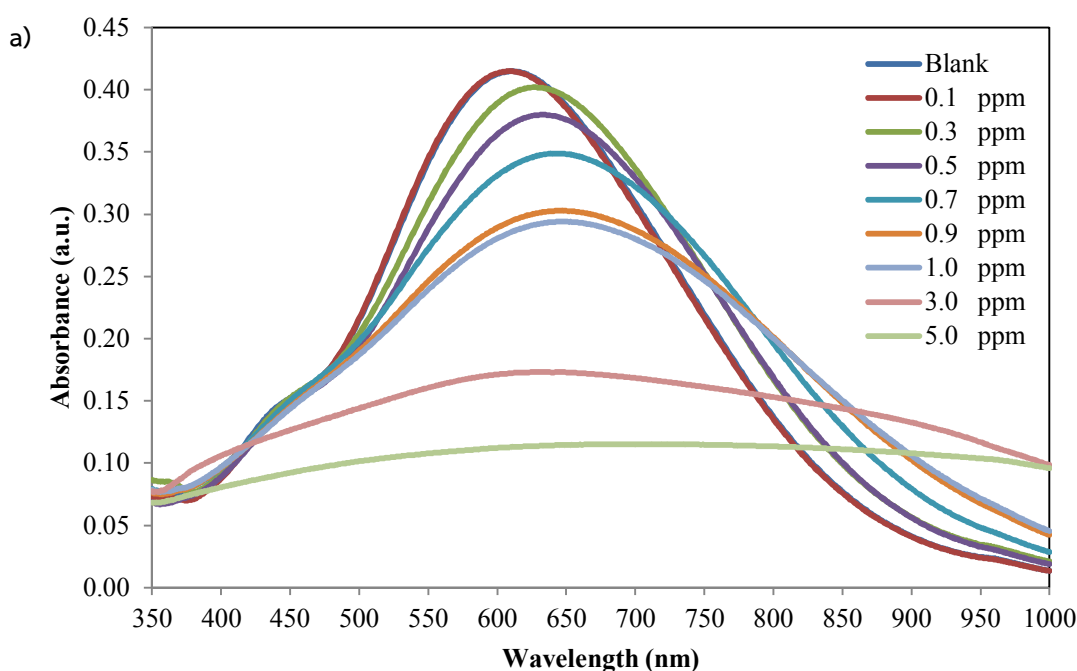
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนในอัตราส่วนปริมาตรต่างๆ

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) ที่ปริมาตร

1.5:1.5 ml เพื่อนำไปศึกษาความเป็นเส้นตรงของสารละลายกลูต้าไธโอนต่อไป เนื่องจากในอัตราส่วนนี้สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของสีของสารละลายได้ชัดเจน ไม่มีความจำเป็นต้องเลือกใช้อัตราส่วนที่ใช้ปริมาณกลูต้าไธโอนสูงกว่านี้ เนื่องจากจะเป็นการสิ้นเปลืองสารในการทดลอง

4.3.1.2 การศึกษาความเป็นเส้นตรงของสารละลายกลูต้าไธโอน

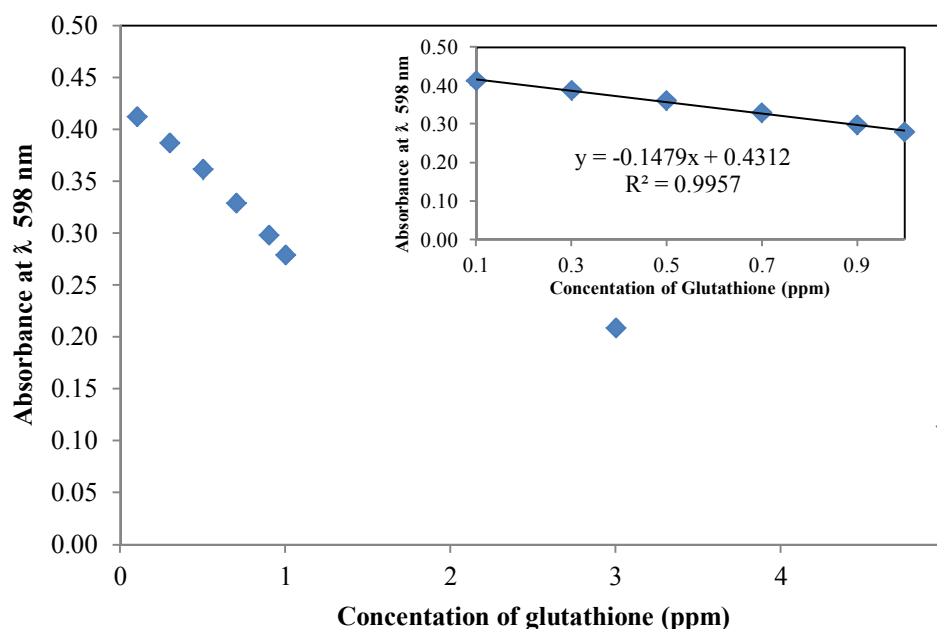
ในการทดลองนี้ ทำโดยการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0 และ 5.0 ppm จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM เมื่อทำ

ปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.1 – 5.0 ppm จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนมีค่าลดลง และภาพแสดงสีของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสารละลายใสไม่มีสี



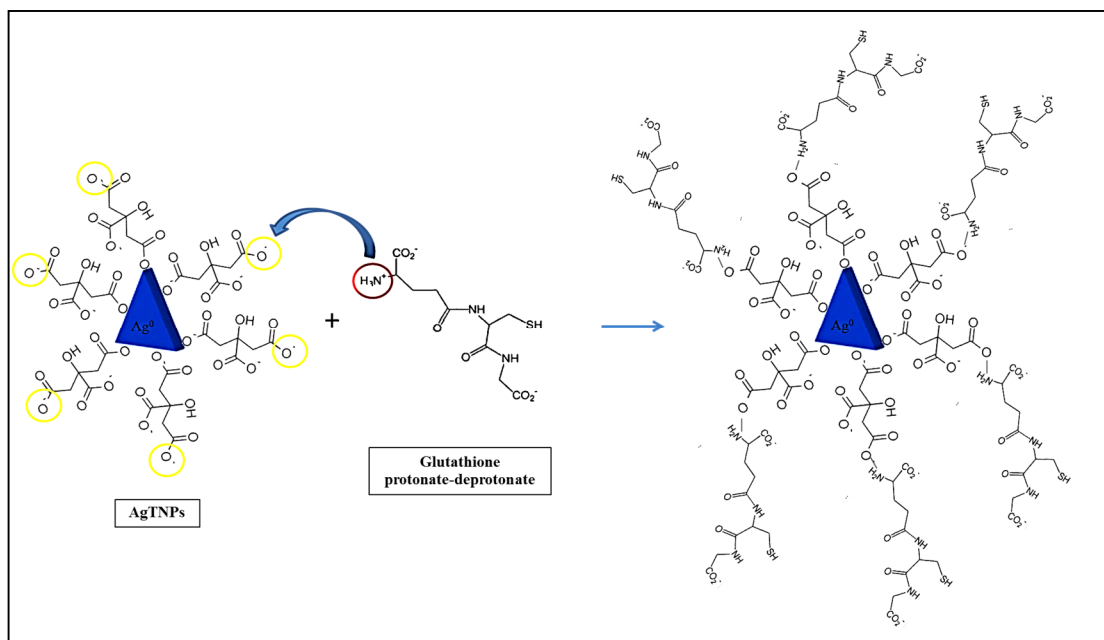
รูปที่ 4.12 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่างๆ

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 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายกลูต้าไธโอนกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงิน

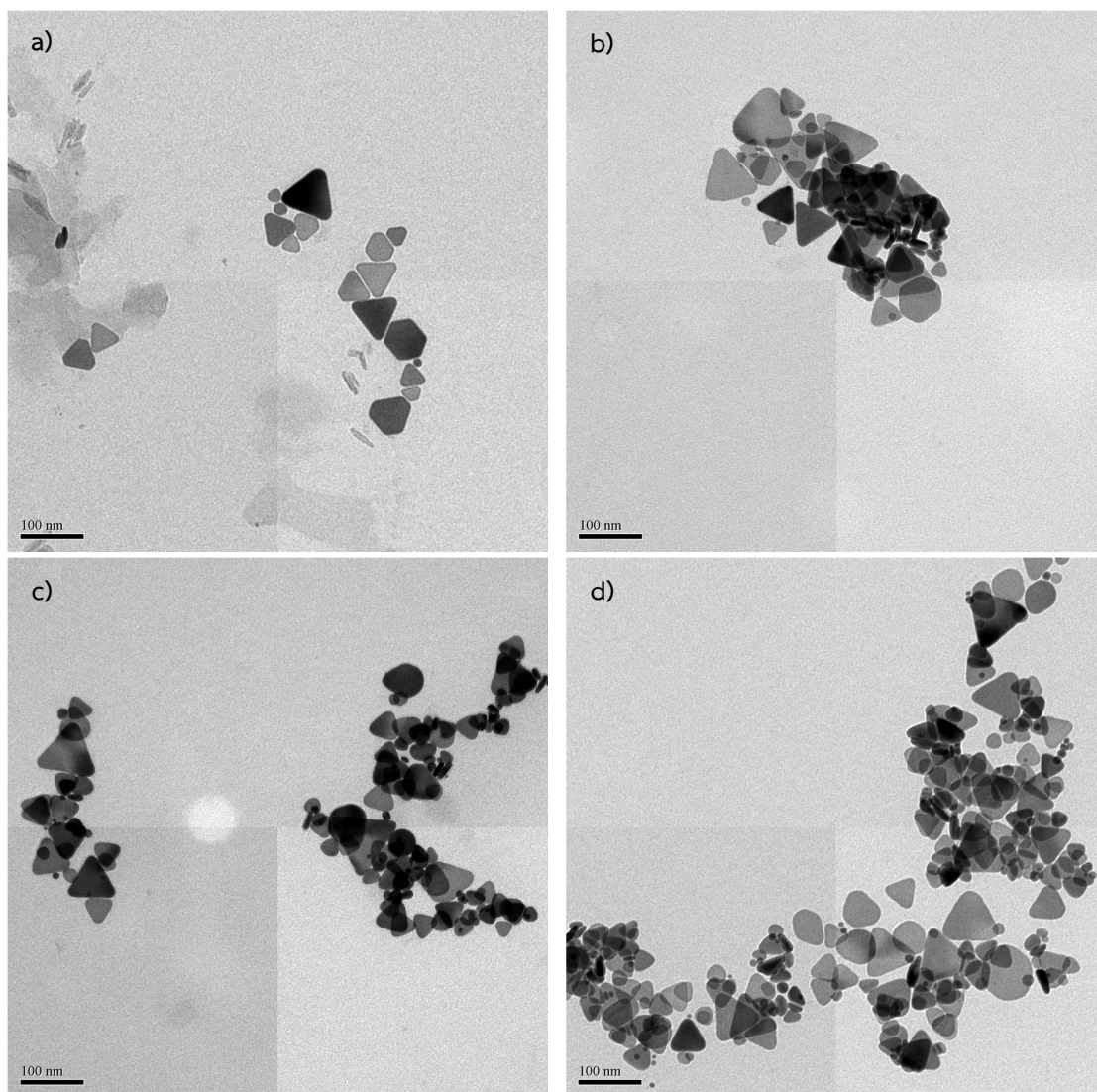
รูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนช่วงความเข้มข้น 0.1-1.0 ppm พบว่าได้ผลการถดถอยเชิงเส้นตรง เท่ากับ $y = -0.1479x + 0.4312$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9957 และค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเคลื่อนจากความยาวคลื่นสั้นไปยังความยาวคลื่นยาว (Red shift) ซึ่งสามารถแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้ดังรูปที่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



รูปที่ 4.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไธโอน

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

เพื่อเป็นการยืนยันการรวมตัวของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และสารละลายกลูต้าไธโอน 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 และการวัดสารละลายแบลงค์ (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 และการวัดสารละลายแบลงค์ (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 ± 0.005
ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)	0.3560 ± 0.005

จากตารางที่ 4.6 พบว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด มีค่าเท่ากับ 0.1068 ± 0.005 ppm และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ เท่ากับ 0.3560 ± 0.005 ppm

4.3.1.5 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery)

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

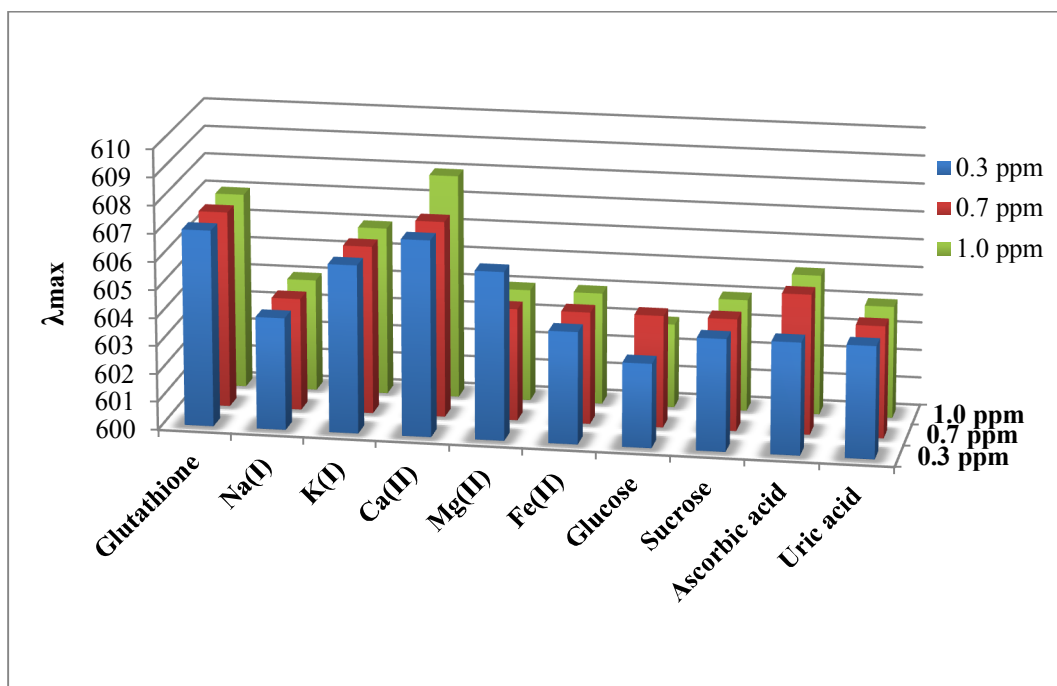
ตารางที่ 4.7 ค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ในตัวอย่างน้ำกลั่นและเลือด

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

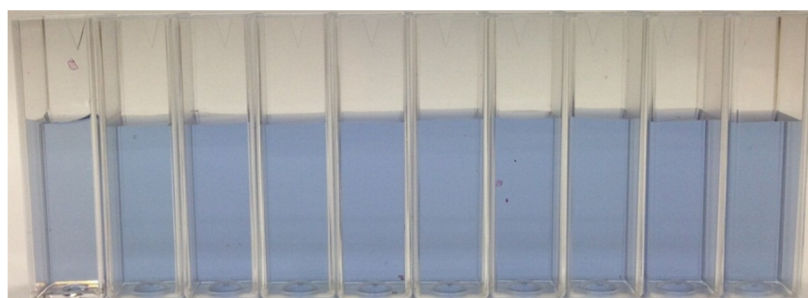
จากตารางที่ 4.7 แสดงค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ในตัวอย่างน้ำกลั่นและเลือด พบว่าในตัวอย่างน้ำกลั่น สามารถหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ได้เท่ากับ 101.1–112.3% และในตัวอย่างเลือด สามารถหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ได้เท่ากับ 103.7–110.3% จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละของการคืนกลับของการตรวจวัดสารทั้งสองนี้มีค่ามากกว่า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

4.3.1.6 การศึกษาผลกระทบของตัวรบกวน (Interference) ที่มีผลต่อการวิเคราะห์

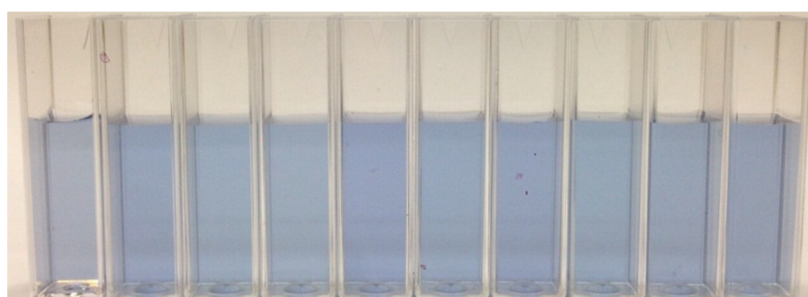
การทดลองนี้ ทำโดยเตรียมสารละลายตัวรบกวนแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 0.3, 0.7 และ 1.0 ppm โดยใช้สารละลายมาตรฐานกลูตาไธโอนความเข้มข้น 0.7 ppm เป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วย UV-vis spectrophotometry และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของตัวรบกวน (λ_{max}) กับชนิดของตัวรบกวน เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของตัวรบกวนแต่ละชนิดและแต่ละความเข้มข้นดังแสดงใ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



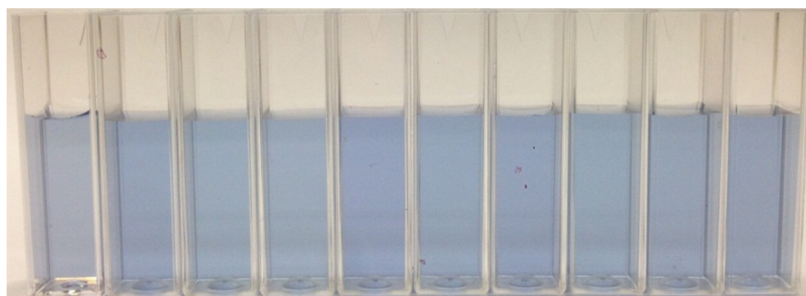
รูปที่ 4.15 กราฟแท่งแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุดของตัวรบกวน ($\lambda_{\max}$) กับชนิดของตัวรบกวนที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.16 ภาพสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีตัวรบกวน Glutathione, CaSO_4 , KNO_3 , NaNO_3 , Uric acid, Glucose, Sucrose, Ascorbic acid, MgSO_4 และ FeSO_4 ความเข้มข้น 0.3 ppm



รูปที่ 4.17 ภาพสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีตัวรบกวน Glutathione, CaSO_4 , KNO_3 , NaNO_3 , Uric acid, Glucose, Sucrose, Ascorbic acid, MgSO_4 และ FeSO_4 ความเข้มข้น 0.7 ppm



รูปที่ 4.18 ภาพสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีตัวรบกวน Glutathione, CaSO_4 , KNO_3 , NaNO_3 , Uric acid, Glucose, Sucrose, Ascorbic acid, MgSO_4 และ FeSO_4 ความเข้มข้น 1.0 ppm

ตารางที่ 4.8 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีตัวรบกวนชนิดต่างๆ

Interference	λ_{max} at 0.3 ppm	λ_{max} at 0.7 ppm	λ_{max} at 1.0 ppm
Glutathione	607	607	607
NaNO_3	604	604	604
KNO_3	606	606	606
CaSO_4	607	607	608
MgSO_4	606	604	604
FeSO_4	604	604	604
Glucose	603	604	603
Sucrose	604	604	604
Ascorbic acid	604	605	605
Uric acid	604	604	604

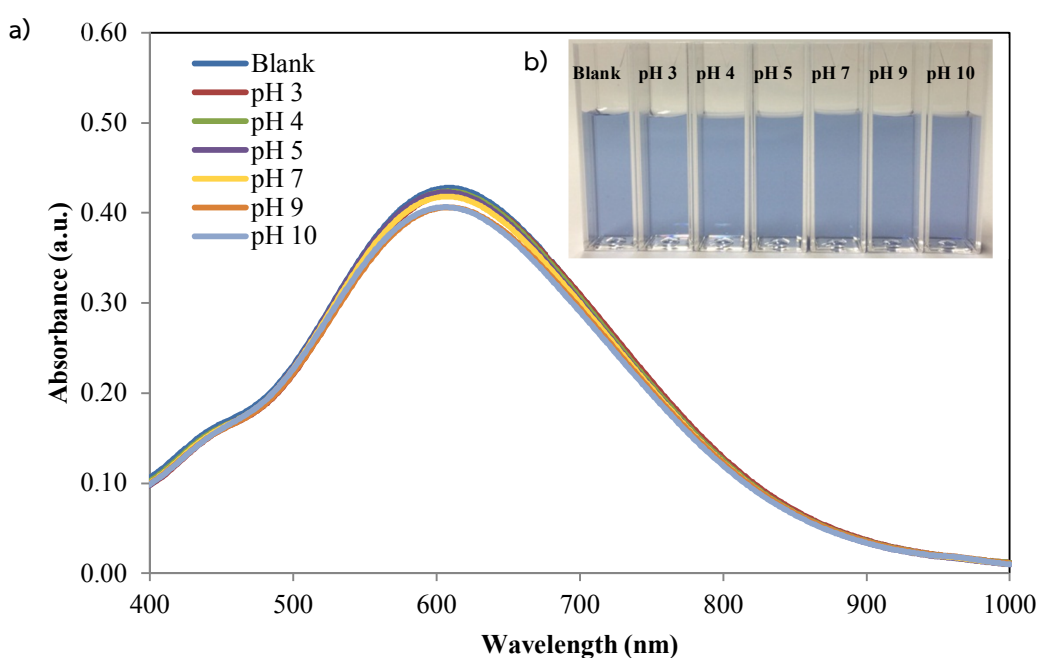
จากกราฟรูปที่ 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 และตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ไม่มีตัวรบกวนและสารละลายที่มีตัวรบกวนนั้นๆ อยู่ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ตรวจวัดได้ มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อสังเกตสีที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นเดียวกันของตัวรบกวนต่างๆ พบว่าการตรวจวัดกลูต้าไธโอนมีความจำเพาะเจาะจงสูงมากเมื่อเทียบกับไอออนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์อื่นๆ เนื่องจากสีของสารละลายที่มีตัวรบกวนไม่แตกต่างอย่างชัดเจนจากสีของสารละลายที่ไม่มีตัวรบกวน จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวรบกวนนั้นๆ ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์

4.3.1.7 การศึกษาอิทธิพลค่าพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

ในการทดลองนี้ ทำได้โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 0.7 ppm โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่ พีเอชเท่ากับ 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 เป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน (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

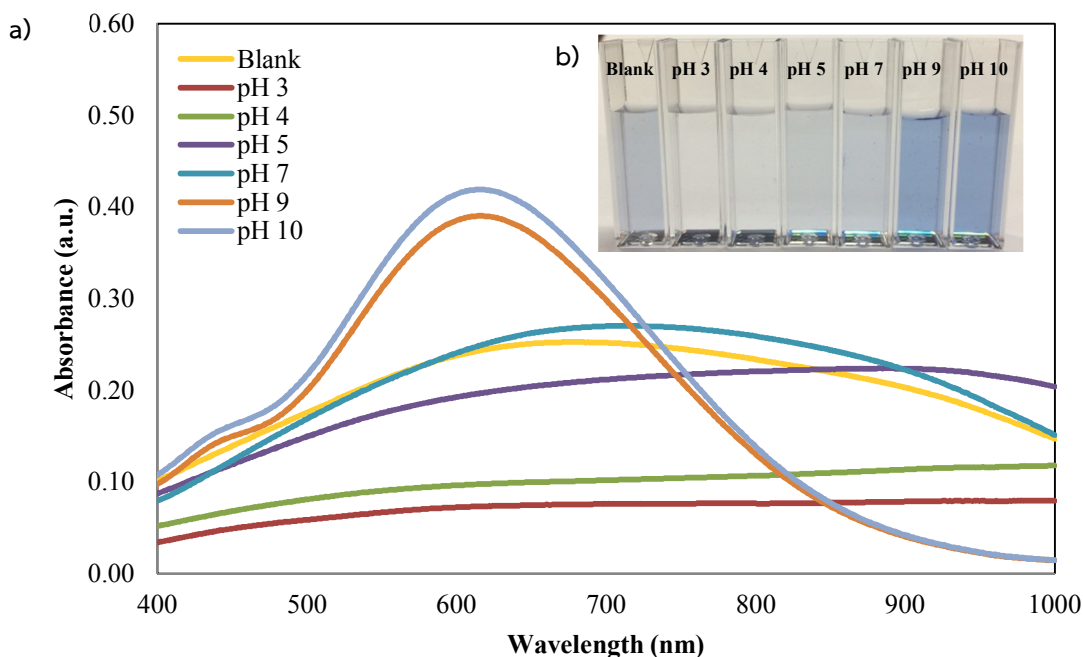
ในการทดลองนี้ ทำได้โดยเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.001 M ที่มีพีเอชเท่ากับ 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 เป็นตัวทำละลายสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 0.7 ppm จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน (AgTNPs:GSH) เท่ากับ 1.5:1.5 ml



รูปที่ 4.19 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนช่วงค่า pH ต่างๆ ที่สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.001 M

2. การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.01 M

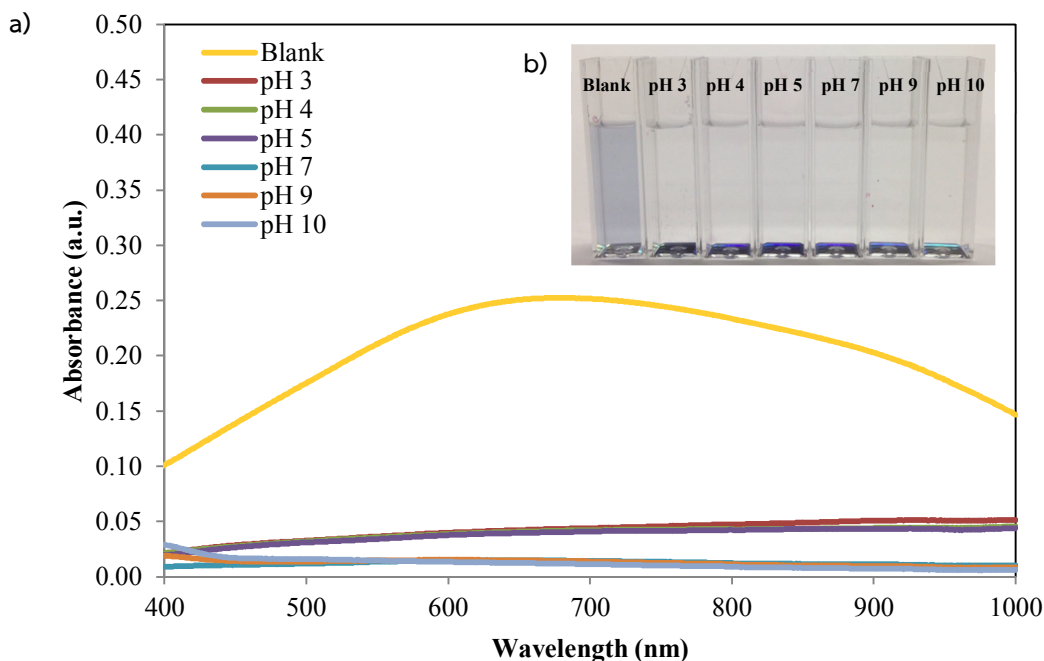
ในการทดลองนี้ ทำโดยเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.01 M ที่มีพีเอชเท่ากับ 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 เป็นตัวทำละลายสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 0.7 ppm จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน (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

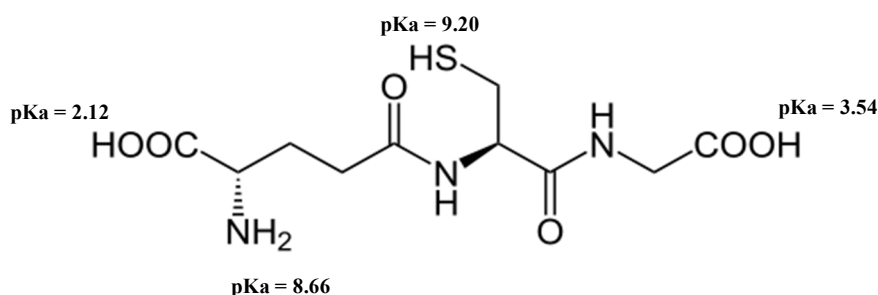


รูปที่ 4.21 สเปกตรัมแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนช่วงค่า pH ต่างๆ ที่สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M

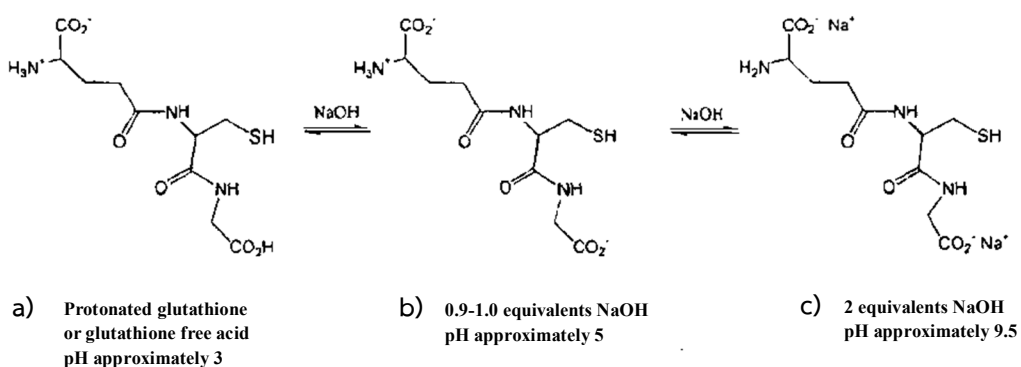
จากรูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.21 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูต้าไธโอนในช่วงค่า pH ต่างๆ เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ที่ต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์มากขึ้น จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไธโอน 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 สีของสารละลาย

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_2 เกิดเป็น NH_3^+ แสดงดังรูป 4.23(b) ซึ่ง NH_3^+ สามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปว่างสามเหลี่ยมระดับนาโนได้ จึงทำให้ได้สารละลายสีฟ้าอ่อน และในสภาวะ pH เท่ากับ 3 และ 4 โครงสร้างกลูต้าไธโอนจะเกิด Deprotonated ของหมู่ COOH ทั้งสองตำแหน่ง และเกิด Protonated ของหมู่ NH_2 เกิดเป็น NH_3^+ แสดงดังรูป 4.23(a) เมื่อพิจารณาโครงสร้างกลูต้าไธโอน NH_3^+ สามารถเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปว่างสามเหลี่ยมระดับนาโนได้ แต่เนื่องด้วยในสภาวะที่เป็นกรดแก่ ส่งผลทำให้อะซิเตทไอออน (COO^-) ที่รักษาเสถียรภาพอนุภาคเงินรูปว่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเปลี่ยนมาอยู่ในรูปกรดซิดิก (COOH) ทำให้อนุภาคเงินรูปว่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเกิดการตกตะกอน และส่งผลให้กลูต้าไธโอนไม่สามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปว่างสามเหลี่ยมระดับนาโนได้ สารละลายจึงเปลี่ยนเป็นสารละลายใสไม่มีสี



รูปที่ 4.22 ค่าคงที่การแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันต่างของกลูต้าไธโอน [1]



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

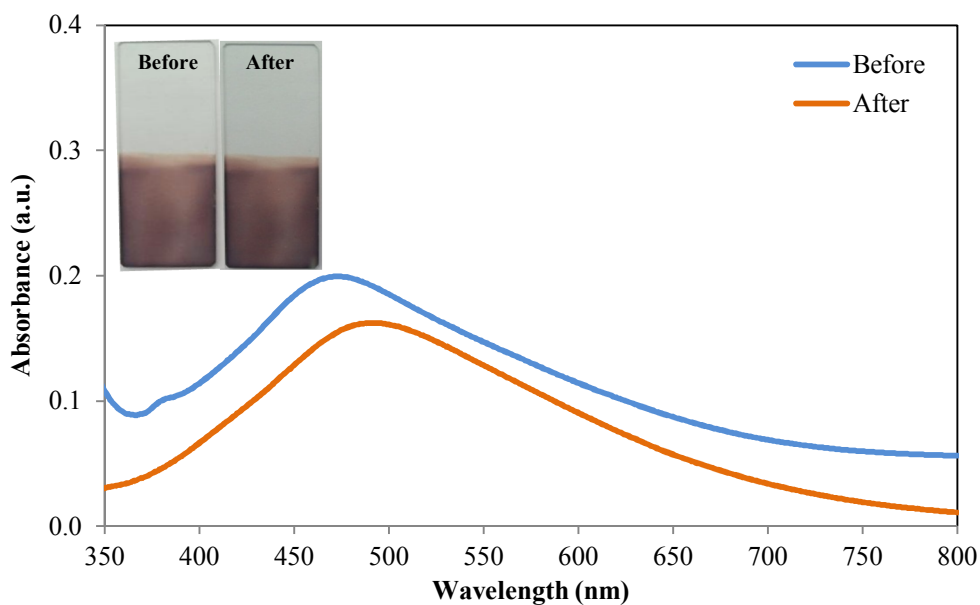
ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์ สามารถอธิบายและสนับสนุนกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไรโอนในข้อ 4.3.1.2 ได้ โดยการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไรโอนในงานวิจัยนี้ เกิดขึ้นในสภาวะ pH ประมาณ 7.6-8.2 เมื่อพิจารณาค่าคงที่การแตกตัวที่หมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของกลูต้าไรโอน พบว่ากลูต้าไรโอนในสภาวะ pH 7.6-8.2 จะเกิดการแตกตัว ดังรูปที่ 4.23(b) ซึ่ง NH_3^+ ในโครงสร้างกลูต้าไรโอนสามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนได้ ทำให้เกิดการรวมตัวกันของโครงสร้าง ซึ่งได้แสดงกลไกดังรูป 4.13

4.3.2 การศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไรโอนด้วยแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

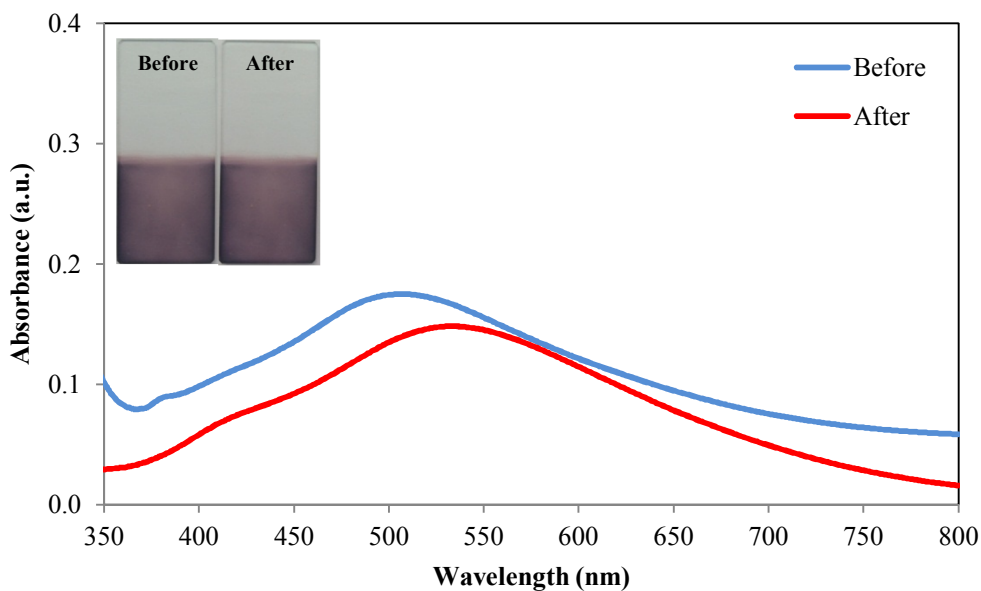
4.3.2.1 การศึกษาคุณลักษณะของการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไรโอนด้วยแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

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

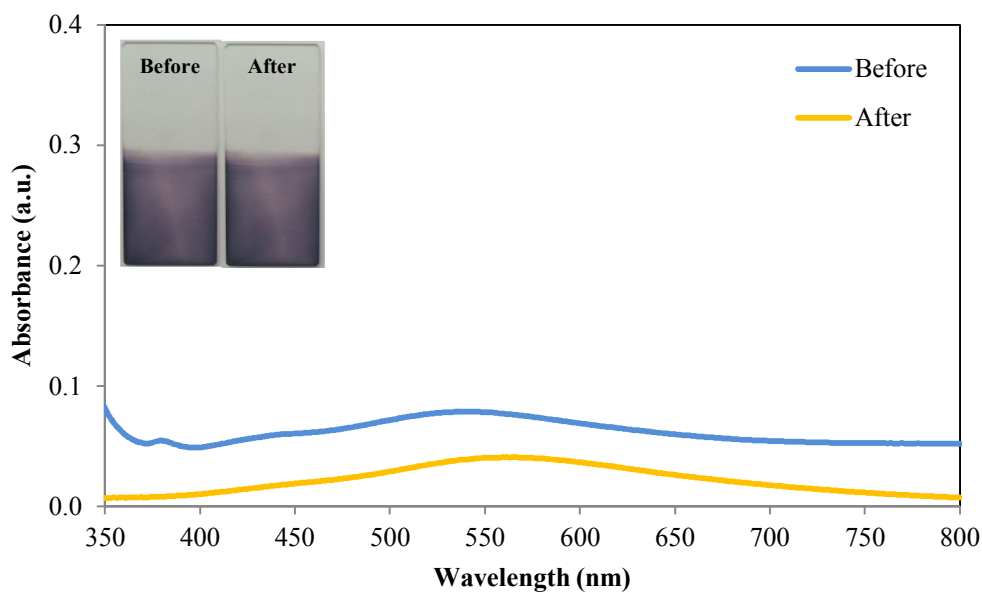
1. แผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs-PDADMAC) ที่เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที



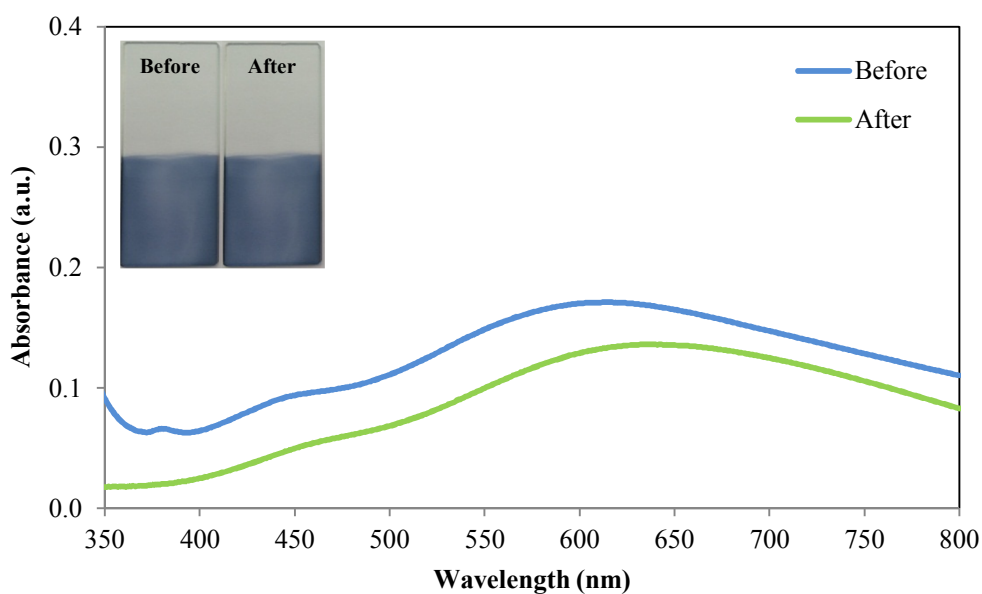
รูปที่ 4.24 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นไซโตไคน์ 0.18 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน



รูปที่ 4.25 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นไซโตไคน์ 0.19 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน



รูปที่ 4.26 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน

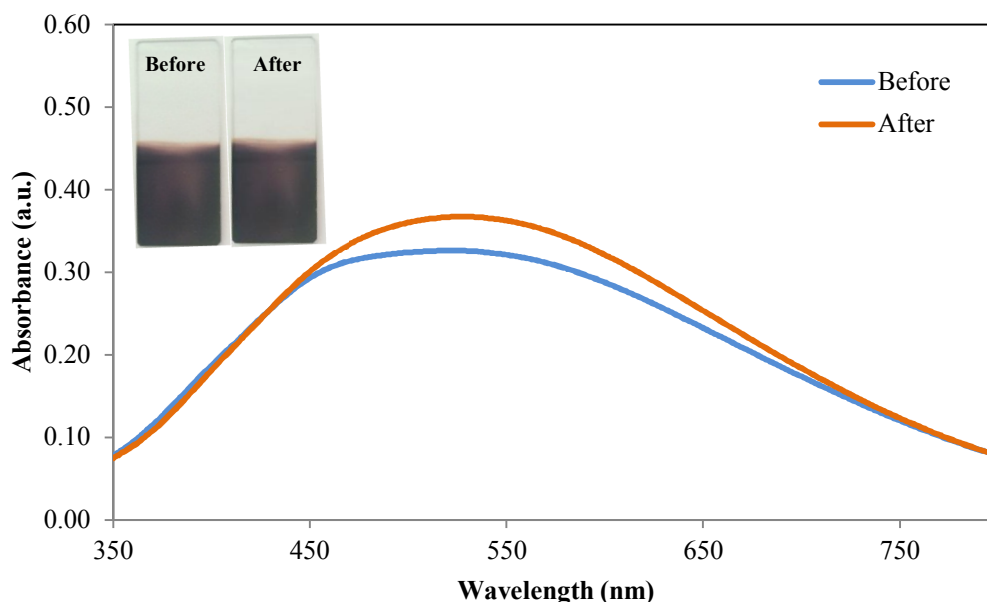


รูปที่ 4.27 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.24 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 20 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน

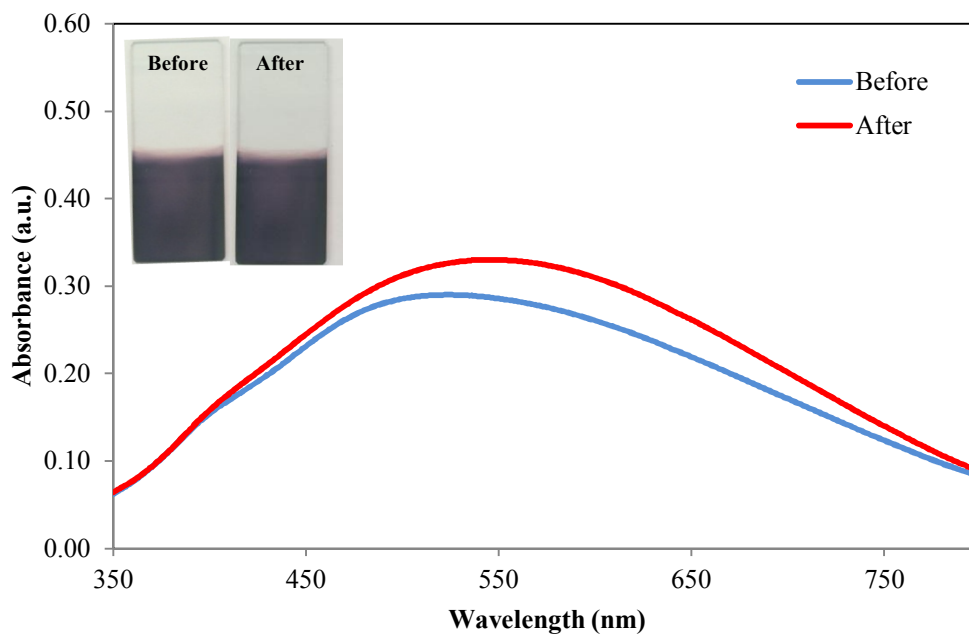
จากรูปที่ 4.24, 4.25, 4.26 และ 4.27 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs-PPADMAC) ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบ

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

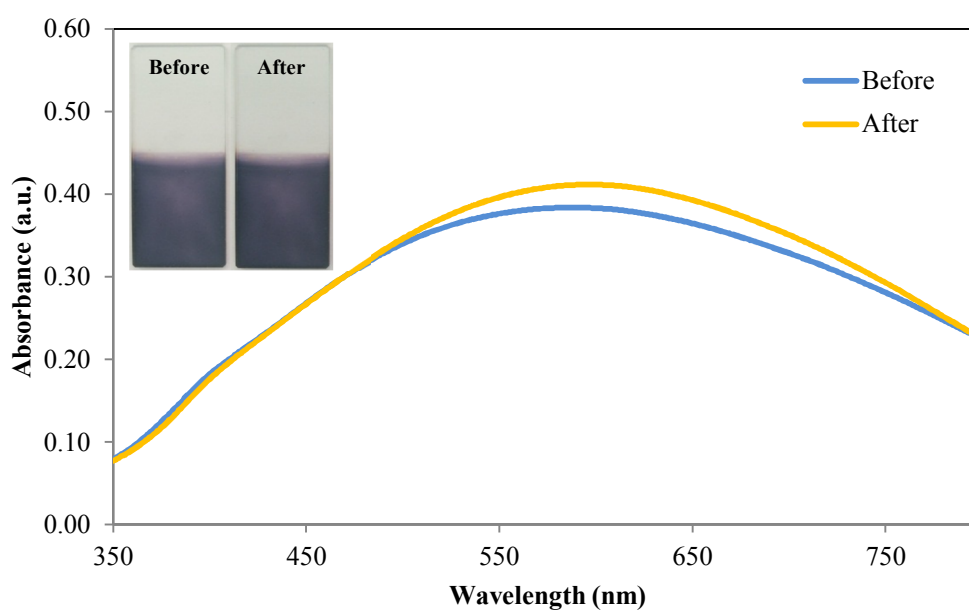
2. แผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs-PDADMAC) ที่เวลาการสร้างแผ่นฟิล์มบาง 60 นาที



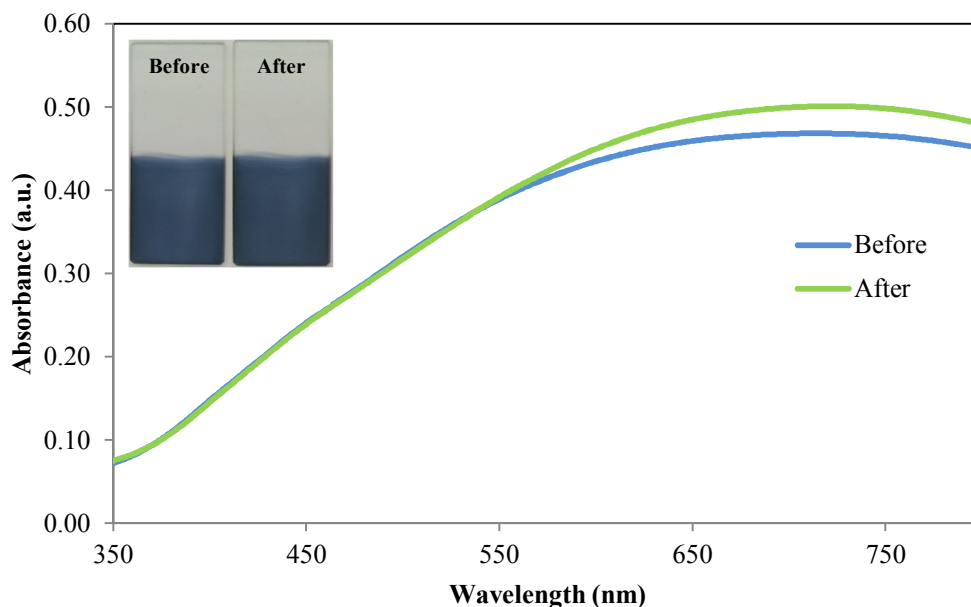
รูปที่ 4.28 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.18 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 60 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน



รูปที่ 4.29 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.19 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 60 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน



รูปที่ 4.30 ค่าการดูดกลืนแสงและสีของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.21 mM เวลาการสร้างแผ่นฟิล์ม 60 นาที ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน



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 มีสีที่เข้มข้นมากกว่าสีเดิมของสารละลาย ซึ่งแสดงถึงการรวมตัวกันของอนุภาคที่ยึดเกาะกันบนแผ่นฟิล์ม ทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อทำการตรวจวัดกลูต้าไธโอนจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น