การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และคุณสมบัติการเป็นตัวรับรู้

SYNTHESIS OF SILVER TRIANGULAR NANOPLATES AND THEIR SENSING PROPERTIES

กัลยาศิริ คำหอม
KANRAYASIRI KAMHOM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-012-037

การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และคุณสมบัติการเป็นตัวรับรู้

SYNTHESIS OF SILVER TRIANGULAR NANOPLATES AND THEIR SENSING PROPERTIES

กัลยาศิริ คำหอม

KANRAYASIRI KAMHOM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-012-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF SILVER TRIANGULAR NANOPLATES AND THEIR SENSING PROPERTIES

KANRAYASIRI KAMHOM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-SC-M-012-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2017
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ "การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนและคุณสมบัติการเป็นตัวรับรู้"
"SYNTHESIS OF SILVER TRIANGULAR NANOPLATES AND THEIR SENSING PROPERTIES"

ชื่อนักศึกษา นางสาวกัลยาศิริ คำหอม
รหัสประจำตัว 57605029
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเคมี)
ภาควิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ เดชศรี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ	
ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง)	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวิตา สุวรรณชวลิต ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ เดชศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ พุธที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ.2560 เวลา 16.00-19.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมภาควิชาเคมี ชั้น 5 อาคารจุฬาภรณ์วลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุษณี ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
วันที่ 20 **เดือน** ก.ค. **พ.ศ.** 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนและคุณสมบัติการเป็นตัวรับรู้
นักศึกษา	นางสาวกัลยาศิริ คำหอม
รหัสประจำตัว	57605029
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ เดชศรี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

บทคัดย่อ

อุปกรณ์ตรวจวัดเชิงสีของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ถูกสร้างขึ้นให้มีความสามารถในการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว การตอบสนองที่ไว และมีความเลือกเพาะเจาะจงต่อการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนในอาหารเสริม โดยอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ถูกสร้างขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันทางเคมีของซิลเวอร์ไอออน โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ภายใต้การรักษาเสถียรภาพด้วยสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกใช้ในการกัดกร่อนเพื่อให้เกิดเป็นอนุภาคสามเหลี่ยม โดยสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้ม แดง ม่วง น้ำเงิน ฟ้า ตามลำดับ ซึ่งสีฟ้าแสดงให้เห็นถึงการเกิดเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 684 นาโนเมตร เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี, ศักย์ซีต้า, ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน, เอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ถูกนำมาใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน การใช้สารละลายคอลลอยด์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน สามารถที่จะใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงสีของกลูต้าไธโอน โดยให้ช่วงความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 0.1 ถึง 9.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9969) และมีขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด เท่ากับ 0.1225 ± 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ มีค่าเท่ากับ 0.4084 ± 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองโดยศึกษาผลสารรบกวนการวิเคราะห์ของโซเดียมไนเตรต, โพแทสเซียมไนเตรต, แคลเซียมซัลเฟต, แมกนีเซียมซัลเฟต, กลูโคส, กรดแอสคอร์บิก และกรดยูริก พบว่าสารรบกวนเหล่านี้ไม่ส่งผลต่อการตรวจวิเคราะห์ปริมาณกลูต้าไธโอน งานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีที่พัฒนาขึ้นมาไปประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณกลูต้าไธโอนในอาหารเสริมด้วยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสีโดยใช้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

คำสำคัญ : อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เทคนิคการตรวจวัดเชิงสี กลูต้าไธโอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Synthesis of Silver Triangular Nanoplates and their Sensing Properties
Student	Miss Kanrayasiri Kamhom
Student ID	57605029
Degree	Master of Science
Program	Chemistry
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr.Ekarat Detsri
Thesis Co-advisor	Dr.Chaval Sriwong

ABSTACT

Silver triangular nanoplates (AgTNPs) as a plasmonic sensing platform for colorimetric detection of Glutathione (GSH) was established and introduced to provide the rapid, sensitive and selective for determination GSH in dietary supplement. AgTNPs were synthesized by chemical reduction of silver ions with $NaBH_4$ by using sodium citrate as a stabilizing agent. H_2O_2 was used as the etchant for the triangular nanoplates formation. The color of the colloidal solution was changed from yellow to orange, red, purple, and blue, respectively, indicating the formation of AgTNPs. The extinction spectrum exhibited a surface plasmon resonance (SPR) at the wavelength 684 nm. The characteristics of the AgTNPs were investigated using Ultraviolet-visible spectroscopy, Zeta potential, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Transmission electron microscopy (TEM), X-ray photoelectron spectroscopy (XRD) and X-ray diffraction analysis (XRD). As these colloidal solutions can be used as a glutathione colorimetric sensor, the changes in optical properties of the solutions were evaluated for various glutathione concentrations. The proposed colorimetric sensor was exhibited a linear response in the range of 0.10-9.0 mg/L (R^2=0.9969), with low detection limit (LOD) of 0.1225 ± 0.001 mg/L (S/N=3) and quantitation (LOQ) of 0.4084 ± 0.001 mg/L (S/N=10). The sensitivity of AgTNPs for GSH can be clearly differentiated towards other coexisting substances (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, $C_6H_{12}O_6$, ascorbic acid and uric acid). The AgTNPs colorimetric method was successfully applied to the determination of GSH in dietary supplements.

Keywords : Silver triangular nanoplate, Colorimetric sensor, Glutathione

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ เดชศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานไพลิน สีหาราช ดร.กิติศักดิ์ ชูจันทร์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวิตา สุวรรณชวลิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำปรึกษาและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยติดต่อประสานงานและอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้กรุณาช่วยเหลือและแนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่งานบัณฑิตคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการตรวจสอบรูปแบบการทำเล่มวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องเป็นไปตามมาตรฐาน

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยให้ความช่วยเหลือ สนับสนุน และให้กำลังใจเสมอมา ตลอดจนขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำมาโดยตลอดจนการศึกษาครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่บุคลากรทางการศึกษาและผู้สนใจทั่วไป ตลอดจนจะเป็นประโยชน์ในการสร้างองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ต่อไป

นางสาวกัลยาศิริ คำหอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ข
กิตติกรรมประกาศ..... ค
สารบัญ..... ง
สารบัญตาราง..... ซ
สารบัญรูป..... ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์..... ฐ
บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4
2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)..... 4
2.1.1 ประเภทของนาโนเทคโนโลยี..... 5
2.1.1.1 วัสดุนาโน (Nanomaterial)..... 5
2.1.1.2 นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (Nanobiotechnology)..... 6
2.1.1.3 นาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์ (Nanomedicine)..... 7
2.2 อนุภาคเงินระดับนาโน (Silver nanoparticles)..... 8
2.2.1 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน..... 9
2.2.1.1 แบบ Top-down..... 9
2.2.1.2 แบบ Bottom-up..... 9
2.2.2 อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน
(Silver triangular nanoplates)..... 10
2.2.2.1 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน..... 10
2.3 เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance)..... 13
2.4 กลูต้าไธโอน..... 14
2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของกลูต้าไธโอน..... 15
2.4.2 หน้าที่หลักของกลูต้าไธโอน..... 16
2.4.2.1 Detoxification..... 16
2.4.2.2 Antioxidant..... 16
2.4.2.3 Immune Enhancer..... 17
2.4.3 ประโยชน์ของกลูต้าไธโอน..... 17
2.4.3.1 การรักษาโรค..... 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3.2 อาหารเสริมและเครื่องสำอาง 17
2.4.4 ค่ามาตรฐานความปลอดภัย 18
2.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ (Characterizations) 18
2.5.1 ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ 18
2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 19
2.5.3 ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ 19
2.5.4 ศักย์ซีต้า (Zeta potential) 20
2.5.5 เอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี 21
2.5.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 29
3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ 29
3.1.1 สารเคมี 29
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 30
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 31
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง 32
3.3.1 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี 32
3.3.2 การศึกษาอิทธิพลของความเสถียรภาพต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน 34
3.3.3 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้และศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน 35
3.3.4 การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ 38
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล 39
4.1 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี 39
4.1.1 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรต 39
4.1.1.1 ศึกษาสภาพความเป็นประจุบนพื้นผิวของอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้นต่าง ๆ 41
4.1.2 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 41
4.1.2.1 การศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.3 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 45
4.1.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน.... 47
4.1.4.1 การศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่าง สามเหลี่ยมระดับนาโน..... 47
4.1.4.2 การศึกษาสภาพความเป็นประจุของอนุภาคเงินรูปร่าง สามเหลี่ยมระดับนาโน..... 48
4.1.4.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยม ระดับนาโน..... 49
4.1.4.4 การศึกษาสถานะออกซิเดชันของอนุภาคเงินรูปร่าง สามเหลี่ยมระดับนาโน..... 51
4.1.4.5 การศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบาง ขนาดนาโน..... 52
4.2 อิทธิพลของความเสถียรภาพต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงิน รูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน..... 53
4.2.1 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์..... 53
4.2.1.1 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.001 M..... 53
4.2.1.2 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.01 M..... 54
4.2.1.3 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.05 M..... 54
4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของค่าความแรงของพันธะไอออนิก..... 56
4.2.3 การศึกษาเสถียรภาพของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่เวลาต่าง ๆ..... 57
4.3 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับ นาโนในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอน..... 59
4.3.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่าง สามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน..... 59
4.3.2 การศึกษาความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนที่มีผลต่ออนุภาคเงินรูปร่าง สามเหลี่ยมระดับนาโน..... 61
4.3.3 อิทธิพลของพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่ออนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยม ระดับนาโน..... 64
4.3.4 การศึกษาผลกระทบของสารรบกวนที่มีผลต่อการวิเคราะห์ หาปริมาณกลูต้าไธโอน..... 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.5 การศึกษาความเป็นเส้นตรง	67
4.3.6 ความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์	67
4.3.7 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)	68
4.3.8 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)	69
4.3.9 การศึกษาหาปริมาณกลูต้าไธโอนในอาหารเสริม	69
4.3.10 ความแม่นของวิธีวิเคราะห์	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลการวิจัย	72
5.2 ข้อเสนอแนะ	73
เอกสารอ้างอิง	74
ภาคผนวก	78
ภาคผนวก ก การเตรียมสารละลาย	79
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	82
ประวัติผู้วิจัย	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... 29
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 31
4.1 ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโน โดยใช้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 40
4.2 ค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีสารละลาย ไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้นแตกต่างกัน..... 41
4.3 ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโน โดยใช้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 42
4.4 จำนวนอนุภาคเงินระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์แตกต่างกัน... 44
4.5 ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโน โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 46
4.6 จำนวนอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน..... 48
4.7 ตารางแสดงค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน..... 49
4.8 หมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิเตรตและหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยม ระดับนาโน..... 50
4.9 แสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุด และค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ Blank ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีความเข้มข้น 0.001, 0.01 และ 0.05 M พีเอชต่าง ๆ..... 56
4.10 ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของการดูดกลืนแสงอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยม ระดับนาโนที่มีสารรักษาเสถียรภาพ ณ เวลาต่าง ๆ..... 58
4.11 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 62
4.12 แสดงค่าศักย์ซีต้าของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 63
4.13 แสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด และค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ Blank ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน ช่วงค่า pH ต่าง ๆ ที่สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.001 M..... 64
4.14 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่มีสารรบกวนชนิดต่าง ๆ..... 66
4.15 แสดงค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าการดูดกลืนแสงของ สารละลายแบลงค์..... 68
4.16 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ เชิงปริมาณ..... 69
4.17 ตารางการคำนวณหาปริมาณกลูต้าไธโอนในอาหารเสริม..... 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.18 การคำนวณค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณกลูต้าไธโอน..... 70

4.19 สรุปคุณลักษณะของวิธีการศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน..... 71

ก.1 การเตรียมความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน..... 80

ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Blank ที่นำมาคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด..... 84

ข.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Blank ที่นำมาคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการเคราะห์เชิงปริมาณ..... 85

ข.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่าง..... 86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ขนาดของนาโนเทคโนโลยี	4
2.2	ท่อนาโนคาร์บอน	5
2.3	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแบบ Top-down และแบบ Bottom-up	8
2.4	ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน	11
2.5	การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน ภายใต้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกัน (A) 0, (B) 2, (C) 4, (D) 6, (E) 20 และ (F) 48 ชั่วโมง	11
2.6	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่เวลาการฉายแสงแตกต่างกัน (a) 0, (b) 1, (c) 3 และ (d) 5 ชั่วโมง	12
2.7	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยเวลาการใช้ฉายแสงแตกต่างกัน (a) 1, (b) 2 และ (c) 8 ชั่วโมง	13
2.8	กระบวนการสั่นพ้องของพลาสมอน สำหรับอนุภาคทรงกรม	13
2.9	สูตรโครงสร้างทางเคมีของรีดิวซ์กลูต้าไธโอน	15
2.10	สูตรโครงสร้างทางเคมีของออกซิไดซ์กลูต้าไธโอน	15
2.11	เสถียรภาพการกระจายตัว	20
2.12	กระบวนการ XPS ลำรังสีที่ชนเป็นลำรังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดียว	21
2.13	การทำงานของ XPS	22
2.14	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	23
3.1	การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์	33
3.2	การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	33
4.1	สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน และ (b) สีของสารละลายที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	40
4.2	สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน และ (b) สีของสารละลายที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	42
4.3	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคเงินระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (a) 0.19 mM, (b) 0.21 mM, (c) 0.24 mM และ (d) 0.28 mM	43
4.4	กราฟแท่งแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (a) 0.19 mM, (b) 0.21 mM, (c) 0.24 mM และ (d) 0.28 mM	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน และ (b) สีของสารละลายที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	45
4.6	กลไกปฏิกิริยาการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน	47
4.7	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน	47
4.8	กราฟแท่งแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน	48
4.9	ภาพแสดงค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน	49
4.10	FT-IR สเปกตราของ (a) ไตรโซเดียมซิเตรต และ (b) อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนความเข้มข้นที่เหมาะสม	50
4.11	ภาพแสดงสเปกตรา XPS ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน	51
4.12	ภาพแสดงการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน	52
4.13	สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่พีเอชต่างๆ และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลายเมื่อทำปฏิกิริยากับพีเอชบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.001 M ที่พีเอชต่าง ๆ	53
4.14	สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่พีเอชต่างๆ และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลายเมื่อทำปฏิกิริยากับพีเอสบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.01 M ที่พีเอชต่าง ๆ	54
4.15	สเปกตราแสดง (a)ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่พีเอชต่างๆ และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลายเมื่อทำปฏิกิริยากับพีเอชบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.05 M ที่พีเอชต่าง ๆ	55
4.16	สเปกตราแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีความเข้มข้น 0.001, 0.01 และ 0.05 M ที่พีเอชต่าง ๆ	55
4.17	สูตรโครงสร้างของโซเดียมซิเตรตไตรเบสิกไดไฮเดรต	56
4.18	สเปกตราแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่พีเอชบัฟเฟอร์ความเข้มข้นต่างๆ	57
4.19	สเปกตราแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีสารรักษาเสถียรภาพ ณ เวลาต่าง ๆ	58
4.20	สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสง และ (b) ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในอัตราส่วนปริมาตรต่างๆ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนในปริมาตรคงที่	60
4.21	สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.22 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น (a) blank, (b) 0.5 ppm, (c) 1 ppm และ (d) 9 ppm..... 62

4.23 กลไกปฏิกิริยาของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไธโอน..... 63

4.24 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนช่วงค่า pH ต่างๆ ที่สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.001 M..... 64

4.25 ภาพสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีสารรบกวน Glutathione, $NaNO_3$, KNO_3, $CaSO_4$, $MgSO_4$, $FeSO_4$, Glucose, Sucrose, Ascorbic acid และ Uric acid โดยรูป (a) ความเข้มข้น 0.5 ppm, (b) ความเข้มข้น 1.0 ppm และ(c) ความเข้มข้น 5.0 ppm..... 65

4.26 กราฟแท่งแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารรบกวนกับชนิดของสารรบกวนที่ความเข้มข้นต่างกัน..... 66

4.27 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 67

ข.1 ภาพแสดงค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 1.0 ppm..... 82

ข.2 ภาพแสดงค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 5.0 ppm..... 83

ข.2 ภาพแสดงค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 9.0 ppm..... 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
AgTNPs	Silver Triangular Nanoplates
AgNPs	Silver Nanoplates
GSH	Glutathione
PDADMAC	Poly (diallyldimethyl ammonium chloride)
UV-vis spectrophotometry	Ultraviolet-visible spectrophotometry
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
TEM	Transmission Electron Microscope
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy
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 หนึ่งส่วนในล้านส่วน
% w/w	Percent weight by weight: เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก
ºC	Degree Celsius: หน่วยวัดอุณหภูมิ องศาเซลเซียส
ND	Not Detected: ตรวจวัดไม่พบ
λ_{max}	ค่าความยาวคลื่นสูงสุด
E^0	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กลูต้าไธโอน (Glutathione, GSH) เป็นสารที่เซลล์ในร่างกายเราสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้เอง มีคุณสมบัติเป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง ที่ช่วยสร้างภูมิคุ้มกัน ต้านอนุมูลอิสระ ขจัดสารพิษในร่างกาย และยังเป็นโคแฟกเตอร์ให้กับเอนไซม์ต่างๆ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว กลูต้าไธโอนจึงถูกนำมาใช้ในการรักษาโรคต่างๆ มากมาย ไม่ว่าจะเป็นโรคปอดเรื้อรัง โรคสมองเสื่อม โรคเบาหวาน เป็นต้น ซึ่งวิธีการรักษาทำได้โดย การฉีดกลูต้าไธโอนเข้าสู่ร่างกายทางหลอดเลือดดำหรือทางกล้ามเนื้อ ซึ่งผลข้างเคียงที่ได้จากการรักษาพบว่า ผู้ป่วยที่ได้รับการฉีดกลูต้าไธโอนจะมีสีผิวที่ขาวขึ้น ซึ่งกลไกการผลัดสีผิวขาวจากผลข้างเคียงของกลูต้าไธโอน คือกลูต้าไธโอนจะไปยังยังการสร้างเอมไซม์ไทโรซิเนส (Tyrosinase) ส่งผลให้เม็ดสีของผิวหนังเปลี่ยนจากสีน้ำตาลดำ กลายเป็นสีชมพูขาว ด้วยเหตุนี้จึงมีผู้นำผลข้างเคียงจากการใช้กลูตาไธโอน ที่ทำให้ผิวหนังเปลี่ยนจากสีน้ำตาลดำ กลายเป็นสีชมพูขาว มาเติมแต่งในผลิตภัณฑ์อาหารเสริม ซึ่งปัจจุบันจะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์เสริมอาหารกลูต้าไธโอนที่วางขายตามท้องตลาด มีทั้งผลิตภัณฑ์ในรูปผลิตภัณฑ์เสริมอาหารกลูต้าไธโอน แบบเม็ด และแบบสารละลาย ซึ่งแต่ละรูปแบบของผลิตภัณฑ์เสริมอาหารกลูต้าไธโอน ต่างมีปริมาณของกลูต้าไธโอนที่หลากหลาย ตามประกาศขององค์การอนามัยโรค (World Health Organization, WHO) ได้กำหนดปริมาณของกลูต้าไธโอนที่ผู้บริโภคควรได้รับต่อวัน คือ ไม่เกิน 250 มิลลิกรัมต่อวัน หากได้รับปริมาณมากกว่าที่กำหนดไว้อาจทำให้เกิดอาการแพ้ยาถึงขั้นช็อคและเสียชีวิตได้ หรือสะสมในร่างกายเป็นระยะเวลานานก็อาจทำให้เกิดผลข้างเคียงต่างๆ ได้ เช่น โรคมะเร็ง เป็นต้น [1,2]

ในหลายปีที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ให้ความสนใจในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอน ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) และการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวาวแสงและเรืองแสงของโมเลกุล (Molecular Fluorescence and Phosphorescence) เป็นต้น ถึงแม้ว่าเทคนิคเหล่านี้จะเป็นเทคนิคที่ให้ขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์ที่ต่ำ มีความแม่นยำ ตลอดจนความไวในการตรวจวัด แต่เนื่องจากขีดจำกัดในการเตรียมตัวอย่างที่ยาก อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์มีราคาแพง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่สูง ตลอดจนผู้วิเคราะห์ต้องมีความชำนาญ ดังนั้นการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณของกลูต้าไธโอน ที่ให้ความสะดวก ง่าย รวดเร็ว ราคาถูกและไวต่อการคัดเลือก จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง [3,4]

ในยุคที่มีความเจริญก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์ การประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านเคมีวิเคราะห์เข้ากับนาโนเทคโนโลยี จึงเป็นที่ได้รับความสนใจแก่นักวิเคราะห์ทางเคมีเป็นอย่างมาก ปัจจุบันนี้วัสดุนาโน (Nanomaterial) ประเภทอนุภาคนาโนโลหะ ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคนาโนโลหะของเงิน ทอง หรือแม้กระทั่งแพลตินัม ต่างได้ถูกนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์สำหรับเป็นตัวรับรู้ (Sensor) สำหรับวิเคราะห์ทางด้านเคมีวิเคราะห์เป็นอย่างมาก สืบเนื่องจากคุณสมบัติที่พิเศษที่แตกต่างจากวัสดุประเภทอื่นๆ กล่าวคือ คุณสมบัติทางแสง (Optical Properties) ที่มีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค (Size) รูปร่าง (Shape) และรูปทรงเรขาคณิต (Geometry) ซึ่งถูกควบคุมโดยปรากฏการณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซอร์เฟจพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance, SPR) ยกตัวอย่างเช่นอนุภาคนาโนโลหะของเงินที่มีรูปร่างเป็น ทรงกลม สามเหลี่ยม แท่ง หรือแม้กระทั่งสี่เหลี่ยม ต่างแสดงคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกัน กล่าวคือ อนุภาคนาโนโลหะของเงิน ที่มีรูปร่างดังกล่าว จะให้สารละลายสีเหลือง สีฟ้า สีแดง หรือแม้กระทั่งสีเขียว ตามลำดับ ด้วยคุณสมบัติทางแสงดังที่กล่าวมาของอนุภาคนาโนโลหะของเงิน จึงมีการประยุกต์ใช้สำหรับสร้างเป็นอุปกรณ์ตัวรับรู้เชิงแสง สำหรับวิเคราะห์อย่างมากมาย [5]

ด้วยเหตุดังที่กล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนโดยการใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการรีดักชันทางเคมี (Chemical Reduction Method) โดยใช้วิธีการตรวจวัดด้วยตัวรับรู้การเปรียบเทียบสี ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวก ง่าย มีความว่องไวและจำเพาะเจาะจงต่อการวิเคราะห์ และสามารถวิเคราะห์หาปริมาณของกลูต้าไธโอนในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยและอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี

1.2.2 เพื่อประเมิน และศึกษาประสิทธิภาพการนำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้มาใช้เป็นอุปกรณ์รับรู้ทางเคมี ในการวิเคราะห์ปริมาณกลูต้าไธโอนในผลิตภัณฑ์อาหารเสริม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาปัจจัยและอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี ได้แก่

1.3.1.1 ความเข้มข้นของสารรักษาเสถียรภาพ (Stabilizing agent)

1.3.1.2 ความเข้มข้นของสารที่ให้อิเล็กตรอน (Reducing agent)

1.3.1.3 ความเข้มข้นของสารกัดกร่อน (Etchant)

1.3.1.4 ความเสถียรภาพ (Stability)

1. การศึกษาผลของพีเอช (pH)
2. การศึกษาค่าความแรงของพันธะไอออนิก (Ionic strength)
3. การศึกษาผลของเวลา (Time)

1.3.2 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้และคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

1.3.2.1 ความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนที่วิเคราะห์ได้

1.3.2.2 อัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน

1.3.2.3 อิทธิพลของพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์

1.3.2.4 สารรบกวน (Interferences)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2.5 ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

1.3.2.6 ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

1.3.2.7 ความเป็นเส้นตรง (Linearity range)

1.3.2.8 การหาปริมาณกลูต้าไธโอนในตัวอย่าง

1.3.2.9 ความเที่ยง (Precision) ของวิธีวิเคราะห์

1.3.2.10 ความแม่น (Accuracy) ของวิธีวิเคราะห์

1.3.3 พิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยการใช้วิธีการทางเครื่องมือสมัยใหม่ ได้แก่

1.3.3.1 รูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

1.3.3.2 หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

1.3.3.3 สภาพความเป็นประจุรอบๆ อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

1.3.3.4 สถานะออกซิเดชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

1.3.3.5 การจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีความเสถียรได้

1.4.2 สามารถนำสารละลายอนุภาคอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน มาใช้ในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

1.4.3 สามารถสร้างต้นแบบการนำอนุภาคอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน มาใช้ในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน และประยุกต์ใช้วิเคราะห์ในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

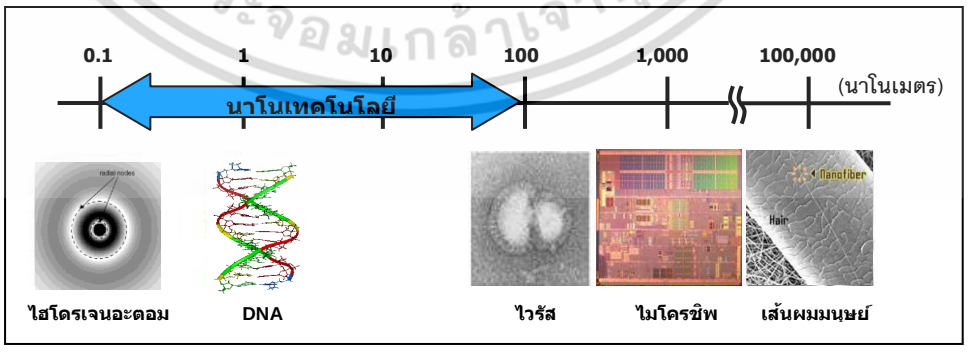
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)

ในปี ค.ศ.1959 ประวัติศาสตร์นาโนเทคโนโลยี ได้เริ่มต้นมาจากแนวความคิดของนักฟิสิกส์ชาวอเมริกัน ที่มีชื่อว่า ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Feynman) ผู้เป็นบิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี ได้กล่าวถึง การศึกษาทางด้านนาโนเทคโนโลยีเป็นครั้งแรกในหัวข้อเรื่อง “There’s Plenty of Room at the Bottom” ซึ่งเกี่ยวกับปัญหาการจัดการและควบคุมสิ่งที่มีขนาดเล็ก อธิบายถึงรายละเอียดการจัดเรียงอะตอมเพื่อสร้างวงจรเล็ก ๆ ที่สมบูรณ์โดยใช้อะตอม 7 ตัว หรือเพื่อสำเนาตัวเอง (Replicate) จากคำพูดของฟายน์แมนนำไปสู่การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการจัดการในระดับของอะตอมและโมเลกุลของสสารต่าง ๆ [6] และในปี ค.ศ.1974 ศาสตราจารย์โนริโอะ ทานิกุชิ (Norio Taniguchi) แห่งมหาวิทยาลัยวิทยาศาสตร์โตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ได้ริเริ่มใช้คำว่า นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) ขึ้น [7]

นาโนศาสตร์ (Nanoscience) คือ วิชาที่รวมเอาสาขาวิชาทางด้านวิทยาศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์เข้าไว้ด้วยกัน โดยการศึกษาปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของวัตถุที่มีโครงสร้างขนาดเล็กในช่วงนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) โดยคุณสมบัติวัสดุนาโนจะแตกต่างจากวัสดุขนาดใหญ่ (Bulk materials) ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ ล้วนแล้วแต่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว [8]

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) คือเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้าง การวิเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับนาโนเมตร เทียบเท่ากับระดับอนุภาคของโมเลกุลหรืออะตอม รวมถึงการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือ เพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมากๆ เช่น การจัดอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ [9]



รูปที่ 2.1 ขนาดของนาโนเทคโนโลยี [9]

ในปัจจุบันมีความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยีเป็นอย่างมาก ทำให้เกิดการประยุกต์ใช้ความรู้ในด้านวิทยาศาสตร์กับนาโนเทคโนโลยีในงานด้านต่างๆมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น ในงานทางด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุศาสตร์ (Nanomaterial) เทคโนโลยีชีวภาพ (Nanobiotechnology) และเทคโนโลยีทางการแพทย์ (Nanomedicine) เป็นต้น

2.1.1 ประเภทของนาโนเทคโนโลยี

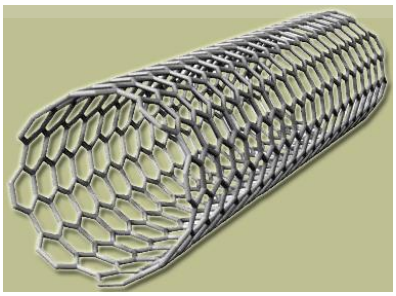
2.1.1.1 วัสดุนาโน (Nanomaterials)

หมายถึง วัสดุที่มีมิติภายนอกหรือโครงสร้างภายใน หรือโครงสร้างพื้นผิวที่มีขนาดในระดับ 1-100 นาโนเมตร ซึ่งวัสดุนาโนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ตามแหล่งกำเนิด คือ วัสดุนาโนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ อาจพบได้หลังเกิดไฟป่า หรือภูเขาไฟระเบิด และวัสดุนาโนที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ ได้จากการสังเคราะห์โดยตรง และเป็นสารปนเปื้อนออกมา เช่น จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เครื่องจักร ยานพาหนะ รวมทั้งจากกระบวนการผลิตทางเคมีและชีวภาพ

วัสดุนาโนที่สำคัญมีหลายชนิด ได้แก่

1.วัสดุที่มีธาตุคาร์บอนเป็นหลัก (Carbonbased materials)

คาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักของสิ่งมีชีวิต และเป็นธาตุที่รู้จักกันแพร่หลาย โดยอะตอมของคาร์บอนจะยึดกันเอง หรือยึดกับอะตอมของธาตุอื่นด้วยพันธะโคเวเลนซ์ (Covalent bond) ซึ่งเป็นการเกาะยึดที่แข็งแรง การยึดกันเองของอะตอมคาร์บอน ทำให้เกิดเป็นโมเลกุล หรือโครงสร้างใหญ่ขึ้นมาได้หลากหลาย เช่น โครงสร้างของเพชร และแกรไฟต์ ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็ง การหักเหแสง ที่แตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นผลจากรูปแบบการจัดเรียงอะตอมที่ต่างกัน นอกจากนี้เมื่ออะตอมของคาร์บอน ไปยึดกับอะตอมของธาตุอื่นๆ และมีการเรียงตัวในแบบต่างๆ โดยธรรมชาติมีวิธีควบคุม ดูแล หรือจัดการ ให้มีการจัดเรียงอะตอม ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างแบบต่างๆ อย่างหลากหลาย และมีรูปแบบที่เป็นผลึก (Crystal) และอสัณฐาน (Amorphous) ปัจจุบันค้นพบรูปแบบใหม่ของคาร์บอน ที่กำลังเป็นที่สนใจ คือ ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายท่อ มีลักษณะเหมือนแผ่นกราไฟต์ที่ม้วนตัวจนเกิดเป็นท่อ จึงมีแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) ที่สามารถนำอิเล็กตรอนได้ดี ท่อนาโนคาร์บอนจึงมีคุณสมบัติที่แข็งแรง เหนียวกว่าเหล็ก มีความยืดหยุ่นเป็นพิเศษ และสามารถนำไฟฟ้าหรือกลายเป็นฉนวน (ไม่นำไฟฟ้า) ก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบทิศทางการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอน ดังนั้นจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น นำมาทำเป็นสายไฟระดับโมเลกุลได้ ใช้ในการสร้างอากาศยาน ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ เช่น กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแบบกราด รวมทั้งการใช้เป็นส่วนผสมกับวัสดุอื่น เช่น พอลิเมอร์ เป็นต้น [10]



รูปที่ 2.2 ท่อนาโนคาร์บอน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วัสดุนาโนสารกึ่งตัวนำและโลหะ (Semiconductor and metal nanomaterial)

เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก จึงได้รับความสนใจเป็นพิเศษ ในอุตสาหกรรมสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวโดยตรง และยังนำไปใช้เป็นตัวตามรอย โดยเฉพาะในโครงสร้างที่เล็กมาก และยากต่อการติดตาม หากนำอนุภาคนาโนไปวางตามตำแหน่งที่เหมาะสม เช่น ผนังเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ หรือโครโมโซม จะทำให้เราสามารถติดตามการทำงานของระบบเหล่านั้นได้ดี เช่น ซิงก์ซัลไฟต์ (ZnS) และเงิน (Ag)

ซิงก์ซัลไฟต์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่เรืองแสง ที่ใช้ในการทำจอภาพเครื่องรับรู้ อุปกรณ์เกี่ยวกับเลเซอร์ เป็นต้น สำหรับอนุภาคระดับนาโนนั้นได้มีการใช้ประโยชน์จากสมบัติที่เกี่ยวกับการเรืองแสง เช่น การทำให้เกิดภาพของระบบขนาดเล็ก และใช้ติดตามการทำงานของกลไกต่างๆ โดยเฉพาะในระดับเล็กลงไปจากเซลล์ ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาด้านชีวภาพ และการแพทย์

เงิน มีสมบัติที่สำคัญคือ การนำความร้อน และการนำไฟฟ้า ใช้เป็นตัวทำลายหรือยับยั้งการเจริญของเชื้อโรคนั้น สำหรับอนุภาคนาโนของเงิน พบว่า จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งาน ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ปัจจุบันได้นำอนุภาคนาโนเงิน มาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องหนัง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีสมบัติในการต่อต้านเชื้อโรคที่มีความปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสูง ดังจะเห็นได้จากเสื้อนาโนที่มีจำหน่ายกันในปัจจุบัน [11]

2.1.1.2 นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (Nanobiotechnology)

เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ด้านชีวภาพ เช่น การพัฒนานาโนไบโอเซนเซอร์ หรือหัวตรวจวัดสารชีวภาพ และสารวินิจฉัยโรคโดยใช้ วัสดุชีวโมเลกุล การปรับโครงสร้างระดับโมเลกุลของยาที่สามารถหวังผลการมุ่งทำลายชีวโมเลกุลที่เป็นเป้าหมายเฉพาะเจาะจง เช่น เซลล์มะเร็ง การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางในการส่งผ่านสารบำรุงเข้าชั้นใต้ผิวหนังได้ดียิ่งขึ้น เป็นต้น อีกทั้งยังประยุกต์ใช้ในด้านการเกษตร เพื่อพัฒนาคิดค้นเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆขึ้น เพื่อนำมาใช้แก้ปัญหาและอำนวยความสะดวกด้านชีวภาพและการเกษตรของมนุษย์มากยิ่งขึ้น [12]

ตัวอย่างการพัฒนาไบโอเซนเซอร์มีความแตกต่างจากนาโนเซนเซอร์อื่นๆ ตรงที่ตัวรับสัญญาณของไบโอเซนเซอร์เป็นสารชีวโมเลกุลที่เรียกว่า ตัวรับสัญญาณชีวภาพ (Bioreceptor) เช่น แอนติบอดี ดีเอ็นเอ และเอนไซม์ เป็นต้น ตัวอย่างของไบโอเซนเซอร์ที่ใช้แอนติบอดีเป็นตัวรับสัญญาณ ได้แก่ ไบโอเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจหาสารเบนโซเอไพรีนเททรอล (Benzo[a] pyrene tetrol, BPT) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง และสามารถใช้ไบโอเซนเซอร์วัดปริมาณ BPT ภายในเซลล์ได้ ตัวเซนเซอร์ประกอบด้วยเส้นใยนาโน (Nanofiber) ที่มีขนาดเล็กกว่าเซลล์ประมาณ 100 เท่า ซึ่งส่วนหัวจะหุ้มด้วยเงินและมีที่เกาะของแอนติบอดีต่อสาร BPT ภายในเซลล์ได้โดยตรง แอนติบอดีเซนเซอร์นี้สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบสารอื่นๆ รวมทั้งติดตามการติดเชื้อได้ เช่น ตรวจสอบการติดเชื้อแอนแทรกซ์โดยใช้แอนติบอดีจำเพาะต่อเชื้อทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณ หรือในกรณีไบโอเซนเซอร์ที่ตัวรับสัญญาณเป็นเอนไซม์ สามารถนำมาใช้ในการวัดปริมาณสารตัวนำในสมอง (Glutamate) โดยใช้ gultamate-dehydrogenase sensor การทำงานของไบโอเซนเซอร์ชนิดนี้ก็คือ เมื่อ glutamate จับกับ glutamate-dehydrogenase บนเส้นใยนาโนจะเกิดการเปลี่ยน NAD ให้กลายเป็น NADH ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถวัดปริมาณ NADH ได้จากการเรืองแสง จากการที่บนผิวของเซลล์แต่ละชนิดมักมีแขนยื่นออกเพื่อจับกับสิ่งต่างๆ ที่เรียกว่า รีเซพเตอร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ทำให้กล่าวกันว่าการที่เซลล์มะเร็งเป็นเซลล์ที่สามารถแบ่งเซลล์ได้อย่างรวดเร็วนั้น เนื่องจากการที่บนผิวของเซลล์มะเร็งมีรีเซพเตอร์ที่สามารถจับกับสารที่ช่วยกระตุ้นการเจริญของเซลล์มะเร็งโดยการจับกันจะทำให้เกิดสัญญาณที่จะส่งต่อไปภายในเซลล์และกระตุ้นให้เซลล์แบ่งตัว ดังนั้นถ้าจะยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็ง หรืออีกนัยหนึ่งคือยาต้านมะเร็งนั่นเองมาแข่งกับสารเร่งการเจริญของมะเร็งในการจับกับรีเซพเตอร์บนเซลล์ ซึ่งถ้าสารสังเคราะห์หรือยาชนะ กล่าวคือ รีเซพเตอร์บนผิวของเซลล์มะเร็งที่จำเพาะต่อสารกระตุ้น การเจริญถูกยาจับได้หมดสารกระตุ้นการเจริญก็จะไม่มีที่จับ จึงทำให้ไม่มีสัญญาณส่งกลับไปในเซลล์ให้ทำการแบ่งตัว ทั้งนี้ประโยชน์ของรีเซพเตอร์ก็จะสามารถนำไบโอเซนเซอร์มาใช้ในการตรวจวินิจฉัยและรักษามะเร็งโดยการใช้ไบโอเซนเซอร์เป็นตัวติดตามการสร้างและการทำงานของสารที่อยู่ในกระบวนการเจริญของเซลล์มะเร็งและหายามายับยั้งการสร้างและการทำงานของสารดังกล่าว ดังนั้นไบโอเซนเซอร์คือเครื่องวัดชีวโมเลกุล ซึ่งสามารถเข้าไปทำการวัดความผิดปกติของการสร้างและการทำงานขององค์ประกอบภายในเซลล์ได้โดยตรง ทำให้การวินิจฉัยและการรักษาโรคเป็นไปอย่างแม่นยำ

2.1.1.3 นาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์ (Nanomedicine)

การนำนาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์มาใช้เป็นไปอย่างกว้างขวางและรวดเร็ว ได้เริ่มต้นศึกษาวิจัยมาตั้งแต่เมื่อสิบปีที่แล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศสหรัฐอเมริกา กลุ่มประเทศยุโรป กลุ่มประเทศเอเชีย เช่น จีน เกาหลี อินเดีย และสิงคโปร์ ความรู้ใหม่ๆ เหล่านี้ทำให้เกิดเป็นศาสตร์แขนงใหม่ที่มีชื่อเรียกว่า “Nanomedicine” [13] เป็นนาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์ที่มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก

จากการวิจัยแห่งมหาวิทยาลัยเท็กซัส ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้เริ่มพัฒนากระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนขนาดเล็กที่เรียกว่า “เปลือกนาโน” (Nanoshells) โดยเปลือกนาโนนี้ทำหน้าที่เป็นเสมือนเปลือกนอกของยาแคปซูล ภายในบรรจุตัวยาหรือแอนติบอดี โดยอนุภาคภายในประกอบด้วยแกนที่ทำจากซิลิกาและมีเปลือกทำจากทองคำ หลังจากนั้นเปลือกนาโนที่บรรจุตัวยาจะเข้าสู่กระแสโลหิตเพื่อเดินทางสู่เซลล์มะเร็งเป้าหมายด้วยตัวนำที่ติดอยู่เปลือกด้านนอก เมื่อถึงเป้าหมายแพทย์จะฉายรังสีอินฟาเรด เพื่อไปกระตุ้นเปลือกนาโนให้ดูดกลืนแสงและเปลี่ยนรูปเป็นความร้อนไปทำลายเซลล์มะเร็ง นอกจากนั้นตัวยาที่อยู่ภายในเปลือกนาโนจะถูกขับออกสู่เซลล์มะเร็งรอบ ๆ ได้ด้วย ปัจจุบันคณะผู้วิจัยได้ศึกษาในสัตว์ทดลอง พบว่าข้อดีของการใช้เปลือกนาโนที่เหนือกว่าเคมีบำบัดคือมีความจำเพาะเจาะจงต่อเซลล์มะเร็งมากกว่า และการใช้ทองคำมีข้อดีคือมีความเป็นพิษต่ำ และทำให้เปลือกนาโนนำความร้อนได้ดี ไวต่อการกระตุ้นด้วยแสงอินฟาเรด จึงใช้ในการรักษาโรคมะเร็งได้ดี [14]

ตัวอย่างการใช้นาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์ นักวิทยาศาสตร์ได้คิดค้นจักรกลไฟฟ้าชีวภาพขนาดเล็กหรือไมโครชิพขนาดจิ๋ว ทำการฝังลงในร่างกายมนุษย์เพื่อส่งถ่ายตัวยาหรือถ่ายเซลล์ต้นตอ (Stem cell) ไปยังเนื้อเยื่อที่มีความเสียหาย เพื่อให้การรักษาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและตรงตามเป้าหมาย ซึ่งปัจจุบันเครื่องมือแพทย์ขนาดจิ๋วที่ฝังเข้าไปในร่างกายใช้รักษาคนเป็นโรคเบาหวานได้ ทำให้ผู้ป่วยไม่จำเป็นต้องฉีดอินซูลินเป็นระยะๆ โดยได้ทำการทดลองฝังเครื่องมือดังกล่าวเข้าไปในหนูที่เป็นโรคเบาหวาน และพบว่าไม่ต้องฉีดอินซูลินให้หนูอีกต่อไป เครื่องมือจิ๋ว

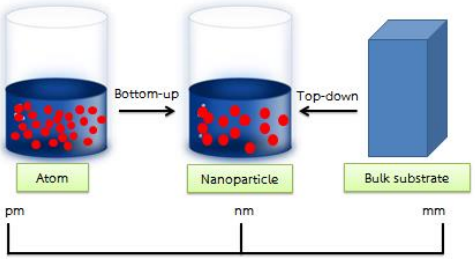
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวประกอบด้วยกล่องซิลิคอนที่มีขนาด 1 ใน 10 มิลลิเมตร ภายในกล่องบรรจุเนื้อเยื่อจากตับอ่อนของสัตว์ ซึ่งทำหน้าที่สร้างอินซูลิน จุดสำคัญของเครื่องมือก็คือ ตัวกล่องซิลิคอนที่เจาะเป็นรูเล็กๆ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 20 นาโนเมตร เพื่อทำหน้าที่ควบคุมสารที่ผ่านเข้าออกกล่องน้ำตาลกลูโคสในเลือดสามารถผ่านเข้าไปสัมผัสกับเซลล์ตับอ่อนที่อยู่ข้างใน ถ้าปริมาณกลูโคสสูงจะไปกระตุ้นเซลล์ตับอ่อนให้สร้างอินซูลิน โมเลกุลของอินซูลินซึ่งมีขนาดเล็กจะสามารถผ่านรูของกล่องนี้ออกไปในกระแสเลือดและทำให้ปริมาณกลูโคสในเลือดลดลง แม้เซลล์ตับอ่อนเป็นสิ่งแปลกปลอมและร่างกายสร้างแอนติบอดีหรือภูมิคุ้มกันออกมาต่อต้านได้ แต่เนื่องจากแอนติบดีเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่จะไม่สามารถที่จะผ่านรูบนกล่องเข้าไปทำลายเซลล์ตับอ่อนได้ เครื่องมือแพทย์ขนาดจิ๋วนี้จึงไม่ถูกทำลายด้วยระบบภูมิคุ้มกันของคนไข้ และทำให้สามารถฝังเครื่องมือดังกล่าวในร่างกายผู้ป่วยได้เป็นเวลานาน ประโยชน์ด้านอื่นที่อาจได้จากเทคโนโลยีไมโครชิพก็คือ การตรวจและป้องกันโรคมะเร็งโดยการตรวจสอบความผิดปกติของยีนหรือตรวจวัดระดับฮอร์โมนในร่างกายที่สูงขึ้น ซึ่งก็อาจจะใช้เป็นเครื่องบ่งชี้ให้เห็นถึงโอกาสที่จะเกิดเนื้อร้ายขึ้น การพัฒนาไมโครชิพยังอาจนำไปสู่การพัฒนาวัคซีนมะเร็ง ซึ่งบรรจุในไมโครชิพ ทำให้สามารถส่งตัวยาในปริมาณที่แน่นอนไปยังเฉพาะส่วนของร่างกายตามที่ต้องการ ทำให้แก้ปัญหาการแพ้ยาหรือผลข้างเคียงที่เกิดจากการใช้ยาเกินขนาดได้ [15]

2.2 อนุภาคเงินระดับนาโน (Silver nanoparticles)

อนุภาคเงินระดับนาโน มีขนาดเล็กมากประมาณ 0.1-100 นาโนเมตร มีลักษณะเหมือนกันกับเงินทั่วไป คือ เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ จะมีลักษณะรวมเป็นกลุ่มก้อน เมื่ออนุภาคเงินระดับนาโนปรากฏในน้ำจะแตกตัวเป็นซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) และเกิดการออกซิเดชันที่ผิว ซึ่งจะทำให้ได้ไอออนของโลหะที่ถูกออกซิไดซ์ในรูปซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ที่ล้อมรอบด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนที่ยังอยู่ในรูปของโลหะหรืออนุภาคนาโนอยู่ในน้ำ อนุภาคเงินระดับนาโนเมื่อปรากฏในน้ำจึงจะให้ไอออนของซิลเวอร์ด้วย ดังนั้นในการพิจารณาถึงเคมีของอนุภาคเงินระดับนาโน จึงต้องครอบคลุมถึงไอออนของซิลเวอร์ (Ag^+) ร่วมด้วย แต่อนุภาคเงินระดับนาโนมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคเงินทั่วไป จึงทำให้มีคุณสมบัติของพื้นผิวแตกต่างกันไป เช่น มีแนวโน้มที่จะระเบิดได้ เนื่องจากอนุภาคเงินระดับนาโนมีขนาดเล็กกว่าเงินทั่วไปอย่างมาก การสะสมหรือรวมตัวของอนุภาคเงินระดับนาโนจึงทำให้เกิดการระเบิดได้ นอกจากนี้อนุภาคเงินสามารถรวมเป็นก้อนแกรนูลได้ ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่อนุภาคเงินระดับนาโนขนาดเล็กมารวมกัน แต่ยังคงมีขนาดเล็กมาก ประมาณ 15-20 นาโนเมตร ส่งผลให้คุณสมบัติอื่นๆ เช่น พื้นที่ผิว ชนิดประจุบนพื้นผิว รวมทั้งลักษณะควอนตัมแตกต่างจากเงินทั่วไป

วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ Top-down และแบบ Bottom-up ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแบบ Top-down และแบบ Bottom-up [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน

2.2.1.1 แบบ Top-down

การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนแบบ Top-down เป็นการสร้างจากระดับบนลงล่างหรือจากขนาดใหญ่ให้เป็นขนาดเล็ก โดยการตัดแบ่งวัตถุขนาดใหญ่ให้เป็นขนาดเล็กลงจนถึงระดับนาโนเมตรด้วยแรงภายนอก โดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น Laser ablation หรือ Ion irradiation แต่พบว่าวิธีนี้มีข้อจำกัด คือควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคได้ยาก

จากงานวิจัยของ Nguyen The Binh และคณะ [17] ได้ทำการเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีการยิงด้วยเลเซอร์ในสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตไดไฮเดรต (SCD) เป็นสารลดแรงตึงผิว ในการสังเคราะห์จะนำแผ่นซิลเวอร์ใส่ในเซลล์ควอทซ์ที่มีสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตไดไฮเดรต ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน และทำการยิงเลเซอร์เข้าไปที่แผ่นซิลเวอร์ โดยอนุภาคเงินระดับนาโนจะตกลงไปในสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตไดไฮเดรต แหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่ใช้คือ Nd:YAG ซึ่งเลเซอร์ชนิดนี้มีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ความยาวโฟกัสของเลนส์ 150 มิลลิเมตร ระยะเวลาในการปล่อยเลเซอร์ที่ 8 นาที และเลเซอร์นี้ให้แสงแบบพัลส์ออกมาที่ 80 มิลลิจูล ผลที่ได้พบว่าอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดที่เล็กลงคือ 7 นาโนเมตร ประสิทธิภาพของการเกิดอนุภาคเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของมี (Mie's theory)

จากงานวิจัยของ Boutinguiza และคณะ [18] ได้ทำการเตรียมอนุภาคเงินรูปร่างกลมระดับนาโนด้วยวิธีการยิงด้วยเลเซอร์ในอากาศ ในขั้นตอนการสังเคราะห์จะต้องทำการเตรียมแผ่นซิลเวอร์ก่อน โดยนำไปทำความสะอาดด้วยเอทานอลและล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ และจากนั้นนำแผ่นซิลเวอร์ที่เตรียมไว้แล้วยึดให้อยู่กับที่และห่างจากซับสเตรทประมาณ 0.5-1.5 เซนติเมตรในการยิงลำแสงเลเซอร์จะยิงทำมุม 60 องศากับแนวระนาบและจะโฟกัสไปที่พื้นผิวของแผ่นซิลเวอร์เพื่อที่จะเก็บอนุภาคที่ออกมาไว้บนซับสเตรท แหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่ใช้คือ Nd:YVO_4 และใช้ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ 532 นาโนเมตร ระยะเวลาในการปล่อยเลเซอร์คือ 10 นาที ผลที่ได้พบว่าอนุภาคเงินระดับนาโนที่ได้มีรูปร่างโค้งมนและมีขนาดไม่ถึง 50 นาโนเมตรและมีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมตัวกันซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากระยะเวลาที่ปล่อยเลเซอร์น้อยเกินไป

2.2.1.2 แบบ Bottom-up

การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนแบบ Bottom-up เป็นการสังเคราะห์โดยเริ่มต้นจากการเรียงอะตอมแต่ละอะตอมประกอบขึ้นเป็นอนุภาคจนมีขนาดนาโนเมตร ด้วยวิธีการต่างๆ ทางเคมี เช่น อาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต โดยใช้ตัวรีดิวซ์ เช่น ไตรโซเดียมซิเตรต หรือ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ โดยการรีดิวซ์เกลือของเงินด้วยตัวรีดิวซ์ที่เป็นสารเคมี เพื่อให้ไอออนของเงิน (Ag^+) กลายเป็นอะตอมของเงิน (Ag^0) จากนั้นอะตอมเงินรวมตัวกันหลายๆ อะตอมจนกลายเป็นอนุภาคนาโนเงินที่มีขนาดระดับนาโนเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีของแข็งขนาดนาโนเมตรแขวนลอยอยู่ในสารละลาย

จากงานวิจัยของ Hongshui Wang และคณะ [19] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี โดยเริ่มจากซิลเวอร์ไนเตรตเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารละลายพอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ซึ่งมีกลูโคสเป็นตัวรีดิวซ์ และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขั้นตอนการสังเคราะห์คือ จะแบ่งสารละลายออกเป็นสองส่วนได้แก่ ส่วนที่หนึ่งจะเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตโดยละลายในน้ำปราศจากไอออน และส่วนที่สองจะเตรียมสารละลายพอลิไวนิลไพโรลิโดนโดยละลายพอลิไวนิลไพโรลิโดน กลูโคส และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำสารในส่วนที่สองไปให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึง 60 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำสารละลายที่สังเคราะห์ได้ลงไปทีละหยด หลังจากเติมลงไปหมดแล้วให้ปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที จะพบว่าขนาดของอนุภาคเงินระดับนาโนอยู่ในช่วง 20-80 นาโนเมตร และค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 420 นาโนเมตร และพบว่าพอลิไวนิลไพโรลิโดนเป็นสารที่ช่วยเพิ่มความคงตัวของคอลลอยด์ของอนุภาคเงินระดับนาโน และยังช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโนอีกด้วย

2.2.2 อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (Silver triangular nanoplates)

อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) มีรูปแบบของการดูดกลืนแสงเป็นแบบเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่เข้ม (Strong surface plasmon resonance absorbtion) แถบการดูดกลืนแสงจะถูกควบคุมโดยความยาว, ความหนาของขอบอนุภาค และจุดปลายของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างออกไปคือ ประกอบด้วย 3 มุมหรือจุดปลายที่แหลมคม ทำให้คุณสมบัติที่สำคัญของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน คือ คุณสมบัติทางแสง, อิเล็กทรอนิกส์ และคุณสมบัติทางเคมีมีความพิเศษขึ้น และอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน สามารถนำมาเป็นตัวตรวจวัดเชิงแสงที่ดี ซึ่งจะเหมาะสำหรับสร้างเป็นตัวรับรู้โดยวิธีเปรียบเทียบสีที่มีความเสถียรและว่องไว [20]

2.2.2.1 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน

วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโนมีหลายวิธี โดยส่วนมากจะเลือกใช้วิธีรีดักชันทางเคมี เพราะเป็นวิธีที่ง่าย และสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุเงินในระดับนาโนที่จะทำการสังเคราะห์ได้

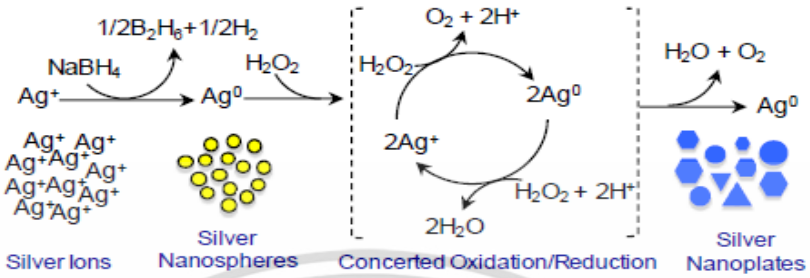
1. วิธีรีดักชันทางเคมี

เป็นวิธีที่ใช้ทั่วไป และเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ใช้สารเคมีน้อยและสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคระดับนาโนเงินได้ ตัวรีดิวซ์ที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมโบโรไฮไดรด์, กรดแอสคอร์บิก และเซลลูโลส เป็นต้น สารรักษาเสถียรภาพที่นิยมใช้ได้แก่ ไตรโซเดียมซิเตรต, พอลิไวนิลไพโรลิโดน และโซเดียมโดดิซิลซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งรูปร่างและขนาดที่เปลี่ยนไปของอนุภาคนาโนจะส่งผลทำให้สมบัติทางแสงเปลี่ยนไปด้วย

ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโนด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี ทำโดยเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตผสมกับสารละลายโซเดียมซิเตรตพร้อมกับปั่นกวน จากนั้นเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไป แล้วค่อย ๆ หยดสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ลงไป ปฏิกิริยาจะเริ่มเกิดขึ้นหลังจากเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ โดยซิลเวอร์ไนเตรต (Ag^{+}) จะถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ได้เป็นอนุภาคเงินระดับนาโน (Ag^{0}) ในขณะเดียวกันอนุภาคเงินระดับนาโนนี้จะถูกล้อมรอบด้วยไตรโซเดียมซิเตรต ทำหน้าที่เป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ไม่ให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคเงินระดับนาโน [21] ในขั้นตอนนี้จะได้อนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมระดับนาโน ซึ่งสารละลายที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

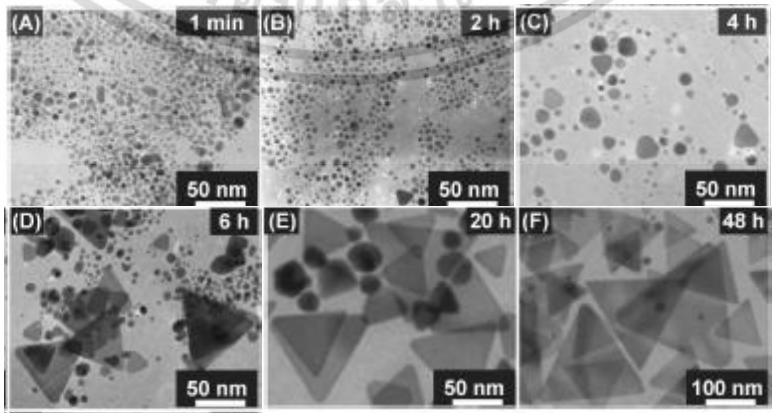
จะมีสีเหลือง และในขั้นต่อมาอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมระดับนาโนที่เกิดขึ้นจะค่อยๆ ถูกกัด (Etching) โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงจะได้สารละลายสีน้ำเงินเกิดขึ้น ซึ่งเมื่อนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน จะพบอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโนปรากฏอยู่



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน [21]

จากรูปที่ 2.4 กล่าวถึงขั้นตอนการเกิดเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดย Ag^{+} จะถูกรีดิวซ์โดยโซเดียมโบโรไฮไดรด์กลายเป็น Ag^{0} ซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกลม และสีของสารละลายที่ได้จะมีสีเหลือง จากนั้นปฏิกิริยาต่อมาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะเข้าไปกัดอนุภาคเงินที่มีรูปทรงกลมระดับนาโน ให้กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยสีของสารละลายจะมีสีน้ำเงิน

จากงานวิจัยของ Xinyi Dong และคณะ [22] ได้พัฒนาวิธีการรีดักชันเพื่อสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมปริซึมระดับนาโน ทำการเตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตผสมกับสารละลายโซเดียมซิเตรตพร้อมกับปั่นกวน จากนั้นเติมค่อยๆหยดสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ลงไปภายใต้การปั่นกวนที่รุนแรงเป็นเวลา 30 นาที จะได้อนุภาคเงินรูปทรงกลมระดับนาโน ซึ่งสารละลายที่ได้จะมีสีเหลือง หลังจากนั้นนำสารละลายมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 0-48 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนขนาดใหญ่ขึ้นและรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมมากที่สุดที่เวลา 48 ชั่วโมง แสดงว่าการนำสารละลายไปให้อุณหภูมิเป็นการกระตุ้นซิลเวอร์ไอออนที่เหลืออยู่จากการเกิดเป็นอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมให้กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมากขึ้น



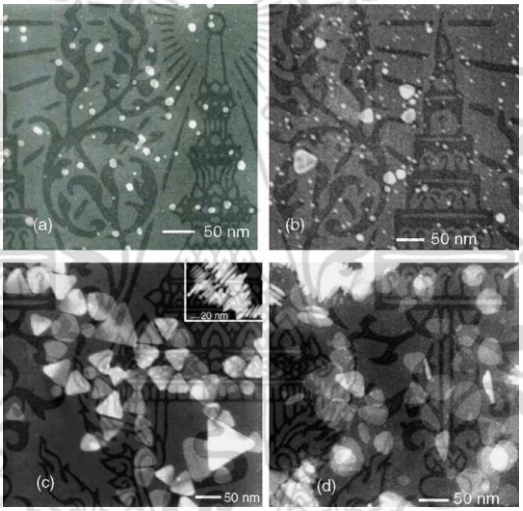
รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน ภายใต้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกัน (A) 0, (B) 2, (C) 4, (D) 6, (E) 20 และ (F) 48 ชั่วโมง [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการฉายแสง (Light irradiation method)

การเตรียมอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนด้วยวิธีการฉายแสงเป็นอีกกระบวนการที่ง่าย สะดวก ประหยัดพลังงาน และสามารถทำปฏิกิริยาได้ในอุณหภูมิห้อง แต่ยังไม่เป็นวิธีที่นิยมมากนัก

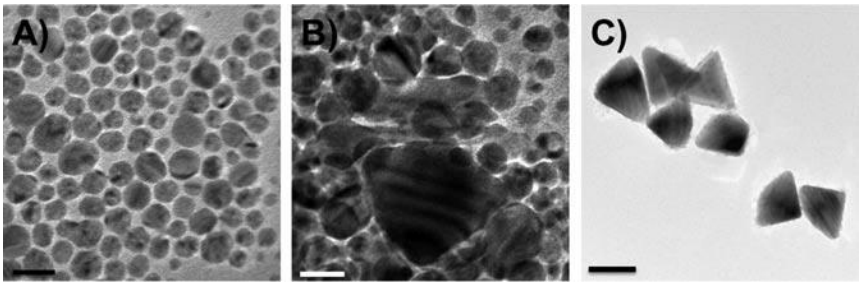
จากงานวิจัยของ Huiying Jia และคณะ [23] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนด้วยวิธีการฉายแสง โดยเตรียมสารละลายผสมของซิลเวอร์ไนเตรตกับสารละลายโซเดียมซิเตรตและทำการปั่นกวน จากนั้นค่อย ๆ หยดโซเดียมโบโรไฮไดรด์ลงไป สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทันที หลังจากปั่นกวนได้ 30 วินาที จึงนำสารละลายที่ได้มาฉายแสงโดยจะใช้หลอดโซเดียม (OSRAM NAV-T 70 Watt, Wavelength 589 nm) ในการฉายแสง ซึ่งใช้เวลา 1, 3 และ 5 ชั่วโมง พบว่า เวลาในการฉายแสงที่แตกต่างกัน รูปร่างและขนาดที่ได้ก็แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้สรุปผลว่า เวลาในการฉายแสงที่เหมาะสมคือ 3 ชั่วโมง เนื่องจากรูปร่างสามเหลี่ยมที่ได้มีความเป็นรูปร่างสามเหลี่ยมมากที่สุด และขนาดของอนุภาคที่ได้อยู่ระหว่าง 40 ถึง 100 นาโนเมตร



รูปที่ 2.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่เวลาการฉายแสงแตกต่างกัน (a) 0, (b) 1, (c) 3 และ (d) 5 ชั่วโมง [23]

จากงานวิจัยของ Jian Zhang และคณะ [24] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนด้วยวิธีการฉายแสง โดยเตรียมสารละลายผสมของซิลเวอร์ไนเตรต จากนั้นเติม bis(p-sulfonatophenyl) phenylphosphine dehydrate dipotassiumsalt (BSPP) และเติมโซเดียมซิเตรตลงไปในสารละลาย ต่อมาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปในสารละลายผสม จากนั้นจึงนำสารละลายที่ได้มาฉายแสงโดยจะใช้หลอดฮาโลเจน (150 Watt, Wavelength 600 ± 20 nm) ในการฉายแสงที่ใช้เวลา 1, 2 และ 8 ชั่วโมง หลังจากเวลาผ่านไป 30 นาที สารละลายจะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีเหลืองและฟ้าในที่สุด เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นรูปร่างและขนาดที่ได้ก็แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้สรุปผลว่า เวลาในการฉายแสงที่เหมาะสมคือ 8 ชั่วโมง เนื่องจากรูปร่างสามเหลี่ยมที่ได้มีความเป็นรูปร่างสามเหลี่ยมมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

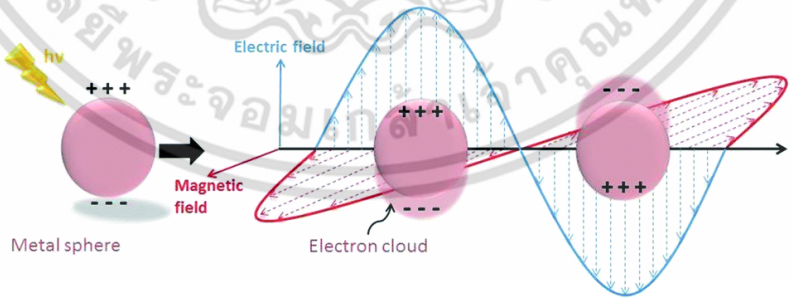


รูปที่ 2.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยเวลาการใช้ฉายแสงแตกต่างกัน (a) 1, (b) 2 และ (c) 8 ชั่วโมง [24]

2.3 เซอร์เฟจพลาสมอนเรโซแนนซ์ [25]

เซอร์เฟจพลาสมอนเรโซแนนซ์ จะอาศัยคลื่นผิวพลาสมอน ในการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของสารตัวกลางบนพื้นผิวเซนเซอร์ โดยคลื่นผิวพลาสมอนเป็นคลื่นที่สั่นอย่างพร้อมเพรียงกันของประจุที่บริเวณพื้นผิวโลหะ ลักษณะเฉพาะของคลื่นผิวพลาสมอนคือ แอมปลิจูดของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่ชั้นรอยต่อระหว่างผิวโลหะและชั้นไดอิเล็กทริก และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่ออยู่ห่างจากผิวโลหะ โดยมีระยะยังผล (Penetration depth) ประมาณ 200-300 นาโนเมตร ซึ่งจะเรียกสนามไฟฟ้านี้ว่า Evanescent field นอกจากนี้คลื่นผิวพลาสมอนสามารถเคลื่อนที่ไปตามพื้นผิวรอยต่อระหว่างชั้นไดอิเล็กทริกและชั้นโลหะ (Propagation length) ได้ในระยะประมาณ 10-20 ไมโครเมตร ก็จะสูญเสียพลังงานจนหมด [25]

ปรากฏการณ์เซอร์เฟจพลาสมอนเรโซแนนซ์ สามารถอธิบายสมบัติทางแสงซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของโลหะ อาศัยคลื่นความหนาแน่นของประจุที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวของอนุภาคนาโนของโลหะ เช่น ระหว่างทองหรือเงินกับอากาศหรือสารละลาย โดยที่ขนาดยอดคลื่นและความกว้าง ของสเปกตรัมพลาสมอนเรโซแนนซ์ของวัสดุต่างๆ จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ประเภทของวัสดุ และสภาพแวดล้อมรอบๆ วัสดุนั้น



รูปที่ 2.8 กระบวนการสั่นพ้องของพลาสมอน สำหรับอนุภาคทรงกรม [26]

รูปที่ 2.8 แสดงการกระจัดของกลุ่มประจุอิเล็กตรอนสัมพัทธ์กับนิวเคลียสเมื่อได้รับแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนของโลหะเกิดจากการสั่น (Oscillation) ของอิเล็กตรอนที่ผิวของอนุภาคนาโน (Localizd surface plasmons) เป็นขบวนการควอนไทซ์ (Quantized) กล่าวคือ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบลงบนผิวของอนุภาคนาโน กลุ่มอิเล็กตรอนอิสระจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นพ้องก็ต่อเมื่อความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับความถี่ในการสั่นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอน (Plasmon frequency) เนื่องจากการแทรกสอดแบบเสริม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เซอร์เฟจพลาสมอนเรโซแนนซ์ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่ความถี่เฉพาะเจาะจงค่าหนึ่งๆ โดยความถี่ของการสั่นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron density) มวลสัมพัทธ์อิเล็กตรอน (Effective electron mass) ขนาดรูปร่างของการกระจายของประจุ (Charge distribution) โดยการสั่นของอิเล็กตรอน สำหรับอนุภาคขนาดเล็กจะแตกต่างจากพลาสมอนเอกซ์ไซเตชัน (Plasmon excitation) ของโลหะแบบก้อน

การเกิดอันตรกิริยาของแสงกับอนุภาคนาโนทรงกรมของโลหะจะทำให้แสงที่ตกกระทบเกิดการสูญเสีย (Extinction) ในแต่ละความถี่ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นกับขนาดรูปร่างชนิดของโลหะและชนิดของตัวกลางใช้จำแนกชนิดของอนุภาคนาโนของโลหะซึ่งการสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อแสงที่ตกกระทบกับอนุภาคทรงกลมของโลหะเกิดจากการกระเจิง (Scattering) และการดูดกลืน (Absorption) ของอนุภาค สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการประมาณทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatics approximation) ดังสมการ

$$Q_{ext} = Q_{abst} + Q_{scat}$$

โดยที่ Q_{ext} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Extinction efficiency)
Q_{scat} คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิง (Scattering efficiency)
Q_{abst} คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Absorption efficiency)

ในทฤษฎีของมี (Mie's theory) ได้เสนอว่าสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนเกิดจากอันตรกิริยาของกลุ่มประจุอิเล็กตรอนที่ผิวอนุภาคกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก Q_{scat} จะมีค่าน้อยกว่า Q_{ext} มากๆ จะได้ว่า $Q_{scat} << Q_{ext}$ ดังนั้นจะได้ดังสมการ

$$Q_{ext} = Q_{abst}$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูป Extinction cross-section และ Absorption cross-section ได้ว่า

$$C_{ext} = C_{abst}$$

จากสมการดังกล่าว สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนของโลหะเป็นผลลัพธ์จากอันตรกิริยาของกลุ่มประจุอิเล็กตรอนที่ผิวอนุภาคกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัว (Characteristic peak) ของแต่ละธาตุรวมทั้งขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างของอนุภาคนาโนของโลหะเหล่านั้น

2.4 กลูต้าไธโอน (Glutathione, GSH)

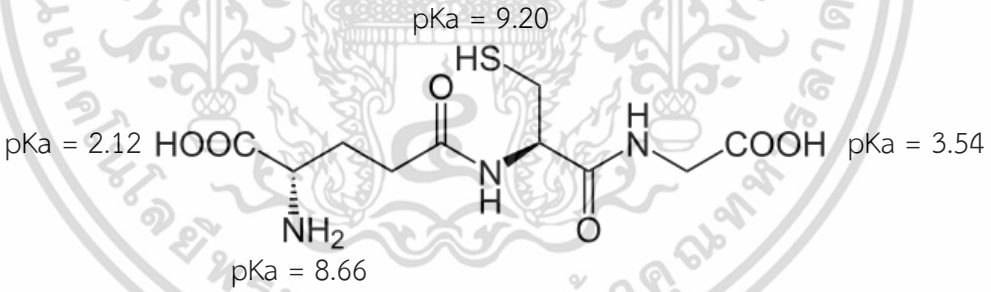
กลูต้าไธโอนเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่เซลล์ในร่างกายมนุษย์สามารถสังเคราะห์ได้เอง มีคุณสมบัติเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งทำหน้าที่ปกป้องเนื้อเยื่อไม่ให้ถูกทำลาย โดยสารอนุมูลอิสระที่สะสมอยู่ตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย โดยใช้หมู่ซัลฟ์ไฮดริล (-SH) ในการรีดิวซ์อนุมูลอิสระชนิดต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี อีกทั้ง ยังเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญในพืช สัตว์ เห็ดรา และแบคทีเรีย และอาร์เคียบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

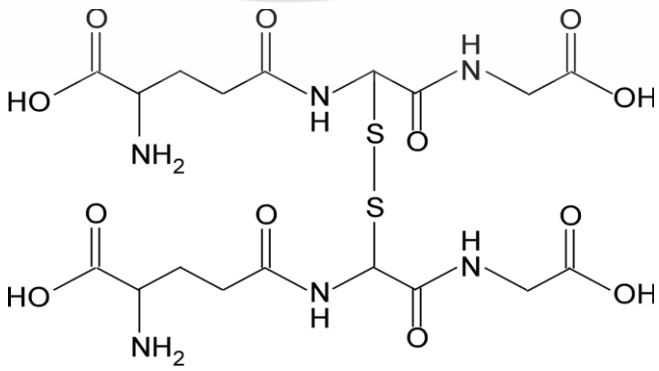
ชนิด ทำหน้าที่ป้องกันองค์ประกอบสำคัญของเซลล์ที่เกิดจากออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive oxygen species) เช่น อนุมูลอิสระหรือเปอร์ออกไซด์

2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของกลูต้าไธโอน

กลูต้าไธโอน เป็นสารในกลุ่มไตรเปปไทด์ (Tripeptide) ประกอบด้วยกรดอะมิโน 3 ชนิด ยึดเกาะกัน คือ กลูตามีน (Glutamine) ซีสเตอีน (Cysteine) และไกลซีน (Glycine) โดยกรดอะมิโน 3 ชนิดต่อกับกลุ่มไธออล จึงถูกเรียกว่ารีดิวซ์กลูต้าไธโอน (Reduced glutathione, GSH) มีคุณสมบัติสามารถแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระได้ ซึ่งกลุ่มไธออลยังช่วยในการรักษาสมดุลย์ของปฏิกิริยารีดอกซ์และเกี่ยวข้องกับการให้อิเล็กตรอน ทำให้กลูต้าไธโอนมีความสามารถในการเป็นสารรีดิวซ์ (Reducing power) ช่วยให้เซลล์ทำงานเป็นปกติ นอกจากนี้แล้วยังมีคุณสมบัติทางเคมีที่น่าสนใจ คือ มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 307.3 มีค่าคงที่การแตกตัว (pKa) ของแต่ละส่วนแตกต่างกันคือ ค่าคงที่การแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) เท่ากับ 2.12, ค่าคงที่การแตกตัวของหมู่ซัลฟ์ไฮดริล (-SH) เท่ากับ 9.20, ค่าคงที่การแตกตัวของหมู่ไพรมารีเอมีน ($-NH_2$) เท่ากับ 8.66 และค่าคงที่การแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลของไกลซีน (-COOH) เท่ากับ 3.54 ดังรูปที่ 2.9 ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวของกลูต้าไธโอนที่สามารถแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระได้ ดังนั้นเมื่อกลูต้าไธโอนเสียอิเล็กตรอนไป 1 ตัว หลังจากที่ได้รับอิเล็กตรอนเดี่ยวจากสารอนุมูลอิสระ ส่งผลทำให้โครงสร้างของกลูต้าไธโอนไม่มั่นคง กลูต้าไธโอนจึงต้องจัดโครงสร้างใหม่ เกิดเป็นโครงสร้างที่จับกัน 2 โมเลกุล (Dimerized glutathione) ด้วยไดซัลไฟต์จึงถูกเรียกว่าออกซิไดซ์กลูต้าไธโอน (Oxidized glutathione, GSSG) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของรีดิวซ์กลูต้าไธโอน [2]



รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างทางเคมีของออกซิไดซ์กลูต้าไธโอน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 หน้าที่หลักของกลูต้าไธโอน

2.4.2.1 Detoxification

กลูต้าไธโอนช่วยสร้างเอ็นไซม์ชนิดต่าง ๆ ในร่างกายโดยเฉพาะ Glutathione-S-transferase ที่ช่วยในการกำจัดพิษออกจากร่างกายโดยเปลี่ยนสารพิษชนิดไม่ละลายในน้ำ (ละลายในน้ำมัน) เช่น พวกโลหะหนัก สารระเหย ยาฆ่าแมลง แม้แต่ยาบางชนิด ให้เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดีขึ้น และง่ายต่อการกำจัดออกจากร่างกาย นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันตับ จากการถูกทำลายโดยแอลกอฮอล์ สารพิษจากบุหรี่ ยาพาราเซตามอลเกินขนาด เป็นต้น

จากงานวิจัยของอัจฉราภรณ์ วรารัตน์ธนาเวชะ [27] ได้ทำการศึกษาพบว่าเอนไซม์กลูต้าไธโอน ทรานสเฟอเรส (GST) มีหน้าที่หลักในการทำลายสารพิษต่างๆ และมีส่วนทำให้แมลงสามารถต้านทานต่อยาฆ่าแมลงมากขึ้น งานวิจัยนี้ศึกษาหน้าที่ของคุณลักษณะสามประการของเอนไซม์กลูตาไธโอน ทรานเฟอเรส GSTD4-4 ในยุงก้นปล่องที่ส่วนเร่งปฏิกิริยาและส่วนที่มีการเคลื่อนไหวสูง ในบริเวณโครงสร้างส่วนที่หนึ่ง ประกอบด้วย เครือข่ายของการจับกันแบบไฮโดรเจน, กลุ่มของกรดอะมิโนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ และกลุ่มของการเชื่อมประสานกันด้วยไอออนโดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงกรดอะมิโนเฉพาะที่จากเอนไซม์ต้นแบบ จำนวนทั้งหมด 14 ตำแหน่ง จากการศึกษาคุณสมบัติทางจลน์ศาสตร์ต่างๆ พบว่าเอนไซม์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของกรดอะมิโนในบริเวณส่วนไกลซีนของกลูต้าไธโอน และเครือข่ายของการจับกันแบบไฮโดรเจนที่ตำแหน่ง His38, Met39, Asn47, Glu49, His50 และ Cys51 แสดงคุณสมบัติที่แตกต่างไป คือ ลดความสามารถต่อการจับกับกลูต้าไธโอนและยังส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาระหว่างกลูต้าไธโอนกับ CDNB รวมถึงสารตั้งต้นตัวอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเอนไซม์ต้นแบบ นอกจากนี้ ยังพบว่า His50 เป็นกรดอะมิโนหลักที่สำคัญของเครือข่ายของการจับกันแบบไฮโดรเจนสำหรับการทำงานของเอนไซม์ในทุกๆ ขั้นตอนโดยที่ His50 อาศัยการค้ำจุนจากเครือข่ายของการจับกันแบบไฮโดรเจนนี้ด้วย เอนไซม์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของกรดอะมิโนที่อยู่บริเวณกลุ่มของกรดอะมิโนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Leu6, Leu33 และ Ile52) และกลุ่มของการเชื่อมประสานกันด้วยไอออน (Glu37, Lys40 และ Glu42) มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก นอกจากนี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างนี้ยังส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของเอนไซม์ด้วย แม้ว่าบางตำแหน่งของกรดอะมิโนที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะอยู่ในบริเวณเร่งปฏิกิริยาก็ตาม นอกจากนี้เอนไซม์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของกรดอะมิโนที่อยู่บริเวณกลุ่มของการเชื่อมประสานกันด้วยไอออนยังส่งผลต่อคุณสมบัติทางโครงสร้างและการเคลื่อนไหวของส่วนที่มีการเคลื่อนไหวสูงของเอนไซม์ทำให้เกิดผลกระทบต่อความสามารถของเอนไซม์ในการจับกับกลูต้าไธโอนและสารตั้งต้นตัวอื่นๆ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า คุณลักษณะทั้งสามประการที่พบในบริเวณโครงสร้างส่วนแรกของเอนไซม์มีความสำคัญต่อทั้งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเอนไซม์กับสารตั้งต้น รวมถึงการรักษาโครงรูปของเอนไซม์อีกด้วย

2.4.2.2 Antioxidant

กลูต้าไธโอนจะถูกเปลี่ยนเป็นเอนไซม์กลูต้าไธโอนเปอร์ออกซิเดส (Glutathione peroxidase) [2] มีคุณสมบัติเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ที่มีความสำคัญในร่างกาย ทำงานร่วมกับวิตามินซีและอี สามารถช่วยความเสื่อมของเซลล์ต่างๆ ในร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.3 Immune Enhancer

กลูต้าไธโอนช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดสิ่งแปลกปลอม และเชื้อโรคของเม็ดเลือดขาวชนิดนิวโตรฟิล (Neutrophils) และยังเพิ่มความสามารถในการทำงานของเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิต้านทานของร่างกายด้วย ทำให้ร่างกายมีภูมิคุ้มกันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด เพื่อให้ร่างกายต่อต้านสิ่งแปลกปลอม รวมถึงเชื้อแบคทีเรียและไวรัส นอกจากนี้กลูต้าไธโอนยังช่วยซ่อมแซมดีเอ็นเอ และสร้างโปรตีน [28]

2.4.3 ประโยชน์ของกลูต้าไธโอน

2.4.3.1 การรักษาโรค

โรคทางระบบประสาท เช่น โรคพาร์กินสัน เนื่องจากกลูต้าไธโอนมีคุณสมบัติในการช่วยซ่อมแซมเซลล์ที่สึกหรอ โดยเฉพาะเซลล์ประสาท และต้านการเสื่อมของเซลล์ได้

2.4.3.2 อาหารเสริมและเครื่องสำอาง

เนื่องจากกลูต้าไธโอนไปยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส (Tyrosinase) ที่เกี่ยวข้องกับเม็ดสีผิว ทำให้เม็ดสีผิวเปลี่ยนจากสีน้ำตาลดำเปลี่ยนรูปเป็นฟีโอเมลานิน (Pheomelanin) ซึ่งมีสีขาวชมพู ส่งผลให้ผู้ที่ได้รับสารดังกล่าวมีสีผิวที่ขาวขึ้น [29] ด้วยผลลัพธ์ดังกล่าว จึงได้เริ่มมีความนิยมนำสารกลูต้าไธโอนมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เสริมความงามขึ้น

จากงานวิจัยของเอกภพ มะลิทอง และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการรักษาฝ้าโดยวิธีใช้กลูต้าไธโอนฉีดเข้าใต้ผิวหนังควบคู่กับการทายารักษาฝ้า สูตรผสม เปรียบเทียบกับการทายารักษาฝ้าสูตรผสมในชาวเอเชีย พบว่า กลูต้าไธโอนเป็นสารที่เซลล์ในร่างกายเราสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้เอง มีคุณสมบัติเป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง มีหน้าที่ปกป้องเนื้อเยื่อของอวัยวะทุกส่วน โดยการต่อต้าน อนุมูลอิสระที่สะสมอยู่ตามส่วนต่างๆ และกระตุ้นภูมิคุ้มกันของร่างกาย นอกจากนี้ยังพบว่ากลูต้าไธโอนมีฤทธิ์ในการยับยั้งการสังเคราะห์เม็ดสีเมลานินอีกด้วย โดยผ่านกระบวนการต่างๆ ดังต่อไปนี้ เช่น การยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสโดยจับที่บริเวณเร่งที่มีคอปเปอร์เป็นองค์ประกอบ (Copper-containing active site) ของเอนไซม์เปลี่ยนจากเม็ดสีเมลานินสีน้ำตาลดำ (Eumelanin) เป็นเม็ดสีเมลานินสีเหลืองแดง (Pheomelanin) ส่งผลให้สีผิวอ่อนลง นอกจากนี้ยังทำหน้าที่กำจัดสารอนุมูลอิสระและเปอร์ออกไซด์ซึ่งอาจไปมีส่วนกระตุ้น เอนไซม์ไทโรซิเนสและการสังเคราะห์เม็ดสีเมลานินอีกด้วย จากการออกฤทธิ์ของกลูต้าไธโอนในการปรับเปลี่ยนประสิทธิผลของสารที่มีพิษต่อเซลล์สร้างเม็ดสีเมลานิน จึงอาจเป็นไปได้ว่าเมื่อนำกลูต้าไธโอนฉีดเข้าใต้ผิวหนังควบคู่กับการทายารักษาฝ้าสูตรผสม ฤทธิ์ของกลูต้าไธโอนอาจมีผลไปลดประสิทธิภาพการเกิดพิษต่อเซลล์สร้างเม็ดสีเมลานินซึ่งเป็นกลไกการออกฤทธิ์ของสารไฮโดรควิโนน ดังนั้นสารใดๆ ก็ตามที่มีฤทธิ์ลดระดับของกลูต้าไธโอนภายในเซลล์ จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นพิษต่อเซลล์สร้างเม็ดสี ส่งผลให้การลดลงของเม็ดสีเพิ่มขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 ค่ามาตรฐานความปลอดภัย

อาหารเสริมที่มีส่วนผสมของกลูต้าไธโอนจัดเป็นอาหารเสริมชนิดกรดอะมิโนถูกขึ้นทะเบียนในบัญชีรายชื่อส่วนประกอบที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารเสริมที่กำหนดตามประกาศของสำนักงานคณะกรรมการอาหาร และยา ฉบับราชกิจนุเบกษา 18 ตุลาคม 2549 ที่กำหนดให้มีส่วนประกอบของแอล-กลูต้าไธโอน (L-glutathione) ไม่เกิน 250 มิลลิกรัม และเป็นผลิตภัณฑ์ที่แนะนำให้รับประทานได้ไม่เกิน 250 มิลลิกรัม/วัน ดังนั้น ผลิตภัณฑ์อาหารเสริมที่มีส่วนประกอบของแอล-กลูต้าไธโอน มากกว่า 250 มิลลิกรัม จึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณส่วนประกอบเกินค่ากำหนด [1]

2.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ (Characterizations)

2.5.1 ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) [31]

ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในวิเคราะห์สาร โดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลต และวิสิเบิล ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวที่ดี และใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และค่าความยาวคลื่น ซึ่งเรียกว่า สเปกตรัม

จากความสัมพันธ์เชิงปริมาณในการดูดกลืนแสงของสารเป็นไปตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert's Law) ค่าการดูดกลืนแสงของสารจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสาร เขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \varepsilon bc = -\log T$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (Absorbance)

ε = ค่าคงที่การดูดกลืนคลื่นแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและชนิดของสาร เรียก molar absorptivity (L mol^{-1} cm^{-1})

c = ความเข้มข้นเป็น โมล/ลิตร (mol L^{-1}) หรือโมลาร์ (M)

b = ความกว้างของเซลล์ (cm)

I_0 = ความเข้มของแสงเริ่มต้น

I = ความเข้มของแสงที่ทะลุออกมา

T = ค่าการส่องผ่านของแสง (Transmittance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) [32]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษ เพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร)

หลักการทำงานของเครื่อง TEM จะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนโดยฟิลาเมนท์ (Filament) ที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagneticlens) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเลนส์รวมแสง (Condenser lens) ซึ่งจะสามารถปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กใหญ่ได้ตามต้องการ ลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง (Specimen) ที่บางมากๆ (60- 90 nm) สามารถที่จะให้อิเล็กตรอนทะลุผ่านไปได้อิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างจะวิ่งไปยังเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ซึ่งทำหน้าที่ปรับโฟกัสและสร้างภาพที่ภาพระดับกลาง (Intermediate image) ขึ้น และจะถูกขยายสัญญาณภาพด้วยเลนส์เครื่องฉายภาพ (Projector lens) ลงบนฉากเรืองแสง (Fluorescence screen) เกิดเป็นภาพ 2 มิติขึ้น โดยที่วัตถุที่มีค่าเลขอะตอม (Atomic number) มาก ภาพที่ได้จะมีสีดำส่วนวัตถุที่มีเลขอะตอมน้อย ภาพที่เห็นจะเป็นสีขาว ภาพที่ได้จะถูกบันทึกด้วยกล้องอุปกรณ์ถ่ายเทประจุ (Charge coupled device)

2.5.3 ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) [33]

ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบและศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยเป็นการทำเชิงคุณภาพวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น หาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ เป็นต้น

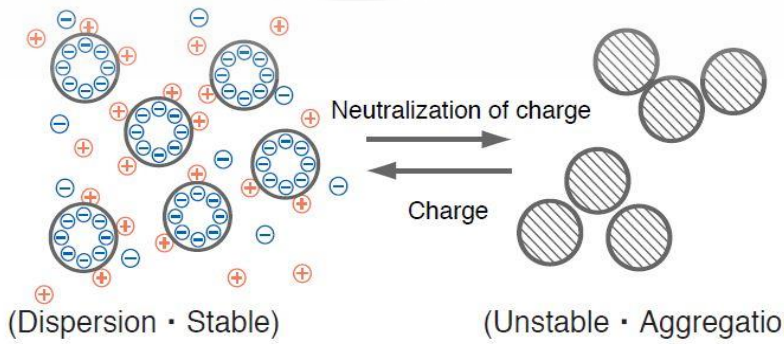
การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสาร ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการสั่นของโมเลกุลอินฟราเรดเป็นช่วงหนึ่งของสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีเลขคลื่น (Wave number) อยู่ในช่วงประมาณ 12800-10 cm^{-1} หรือช่วงความยาวคลื่น 0.78-1000 ไมโครเมตร ช่วงของอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงใกล้อินฟราเรด (Near IR region) เป็นช่วงที่อยู่ใกล้กับช่วงวิสิเบิล พบว่าแถบการดูดกลืน (Absorption band) ที่ได้ค่อนข้างต่ำ มีประโยชน์ในการวิเคราะห์สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compounds) ช่วงกลางอินฟราเรด (Middle IR region) ช่วงนี้แบ่งออกเป็นช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่าง 4000-1300 cm^{-1} ซึ่งสเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่ได้จากพวกหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) แต่ไม่ให้โครงสร้างโมเลกุลที่สมบูรณ์และช่วงรอยพิมพ์ (Finger print region) อยู่ระหว่าง 1300-200 cm^{-1} สเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์ ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จึงค่อนข้างยุ่งยากการวิเคราะห์จึงต้องใช้วิธีเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบโครงสร้างแล้ว ช่วงไกลอินฟราเรด (Far IR region) ช่วงนี้ไม่ค่อยได้ใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากสเปกตรัมช่วงนี้มักจะเกิดจากการสั่นของโครงสร้างหรือเกิดการหมุนของโมเลกุล ช่วงนี้อยู่ระหว่าง 200-10 cm^{-1} สำหรับช่วงเลขคลื่นที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์นั้นเป็นช่วงกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอินฟราเรดเป็นส่วนใหญ่ คือ 4000-400 cm^{-1} กระบวนการดูดกลืนแสงอินฟราเรดโมเลกุลของสารจะดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ต้องมีลักษณะและสภาวะที่เหมาะสม คือ รังสีหรือแสงนั้นจะต้องมีพลังงานพอเหมาะพอดีที่จะทำให้เกิดการทรานซิชันระดับสอง ซึ่งเกิดจากแรงคู่ควบ (Coupling) พอดีระหว่างสนามไฟฟ้าจากการแผ่รังสีกับสารนั้นๆ เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแล้วจะทำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุลนั้นเปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อแสงอินฟราเรดผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสารใดก็ตามจะเกิดปรากฏการณ์ทั้งสองอย่างเรียกสารนั้นว่า IR active ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่แสดงว่าสารนั้นเป็น IR inactive ถือว่าไม่มีการดูดกลืนแสงอินฟราเรด ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่มากจะได้พีคแถบดูดกลืนสูง ถ้าเปลี่ยนแปลงน้อยจะได้พีกแถบดูดกลืนต่ำ ข้อดีของการใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มที่เห็นได้ชัดๆ คือ ช่วยให้การวิเคราะห์หรือการวัดสเปกตรัมของสารตัวอย่างทำได้เร็วและวัดที่ความถี่ต่างๆ อย่างต่อเนื่องกว่าเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ธรรมดาหลายเท่า เพราะการวัดด้วยเครื่องธรรมดาจะเป็นแบบวัดทีละความถี่ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยให้การวิเคราะห์ง่ายและสะดวกขึ้นด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน ส่วนข้อเสียคือมีราคาแพงและต้องเสียค่าบำรุงรักษาสูง ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ ประกอบด้วย ต้นกำเนิดแสงอินฟราเรด (IR source) เซลล์ที่ใส่ตัวอย่าง (Sample cell) โมโนโครเมเตอร์ เครื่องวัดแสงอินฟราเรด (IR Detector) และเครื่องบันทึกสเปกตรัม (Recorder หรือ Readout devices)

2.5.4 ศักย์ซีต้า (Zeta potential)

หลักการทำงานของเครื่องวัดค่าความต่างศักย์ซีต้า คือ วัดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อทำให้อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า โดยใช้ Laser doppler velocimetry (LDV) โดยเครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า โดยค่าศักย์ซีต้า คือ ค่าความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวอนุภาคกับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้สามารถบอกค่าความเสถียรและสามารถทำนายความคงตัวของการกระจายตัวของอนุภาคได้ อนุภาคที่มีศักย์ซีต้าเป็นบวกหรือลบมากจะเกิดการหักล้างต่อกันเกิดเสถียรภาพการกระจายตัว แต่ถ้าอนุภาคมีค่าศักย์ซีต้าเป็นบวกหรือลบน้อยทำให้ไม่มีแรงป้องกันอนุภาคอื่นที่เข้ามา ดังนั้นจึงไม่เกิดเสถียรภาพการกระจายตัวหรือเกิดการรวมกัน ค่าศักย์ซีต้าขึ้นกับค่า pH ซึ่งอนุภาคคอลลอยด์จะเสถียรเมื่อศักย์ซีต้ามีค่ามากกว่า +30 มิลลิโวลต์ หรือน้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ สภาวะที่ค่า pH ต่ำ (กรด) จะให้ค่าศักย์ซีต้าสูงกว่าสภาะที่ค่า pH สูง (เบส) ถ้าศักย์ซีต้ามีค่าอยู่ในช่วง -30 ถึง 30 มิลลิโวลต์ สารคอลลอยด์จะไม่เสถียร จะมีการเกาะตัวกันเป็นก้อนและตกตะกอน [34]



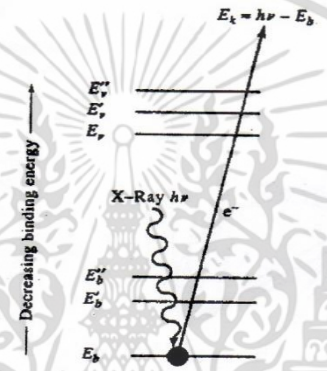
รูปที่ 2.11 เสถียรภาพการกระจายตัว [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 เอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) [35]

เทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี ใช้หลักการวิเคราะห์ลำอิเล็กตรอนที่เปล่งออกจากผิวสารตัวอย่าง หลังจากที่ลำรังสีชุดแรกชนผิว เครื่องสเปกโทรจะวัดกำลังของลำอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันกับพลังงาน หรือความถี่ หรือความยาวคลื่นของลำอิเล็กตรอน วัดความเข้มลำอิเล็กตรอนที่พลังงานต่างๆ สเปกโทรสโกปีแบบนี้เรียกว่าอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี

หลักการเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี นักฟิสิกส์ชาวสวีเดน K Siegbahn ได้รับรางวัลโนเบิล ค.ศ.1981 ได้พัฒนาวิธีการนี้มาใช้งานหาองค์ประกอบของอะตอมที่ผิวโครงสร้างเลขออกซิเดชันของสารประกอบ ดังรูปที่ (2.12)



รูปที่ 2.12 กระบวนการ XPS ลำรังสีที่ชนเป็นลำรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียว ลำรังสีที่ออกเป็นลำอิเล็กตรอน [36]

จากรูปที่ 2.12 เป็นกระบวนการ XPS โดยเส้นสามเส้น แทนพลังงานอิเล็กตรอนวงในสุด K (1s) และวง L (2s, 2p) เส้นบนสามเส้นแทนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอก หรือเวเลนซ์อิเล็กตรอน เมื่อลำโฟตอนรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียวและมีค่าแน่นอน hv ชนอิเล็กตรอนวงในสุด ซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยว E_b ทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดหลุดออกมา และมีพลังงานจลน์ $E_k = hv - E_b$ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเขียนแทนด้วยสมการ

$$A + hv \rightarrow A^{+*} + e$$

A แทนอะตอม โมเลกุล หรือไอออน A^{+*} ไอออนในสถานะกระตุ้น โดยไอออนในสถานะกระตุ้นมีประจุบวกมากกว่าอะตอม A อยู่หนึ่ง

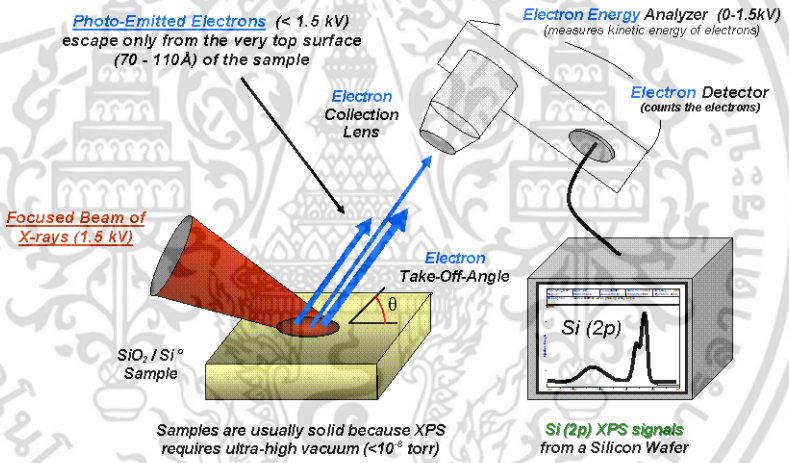
พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา E_k วัดได้ด้วยอิเล็กตรอนสเปกโทรมิเตอร์ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน E_b คำนวณจากสมการ

$$E_b = hv - E_k - w$$

W คือ ฟังก์ชันงานของสเปกโทรมิเตอร์ แฟคเตอร์นี้แก้สภาพแวดล้อมไฟฟ้าสถิตที่อิเล็กตรอนเกิดและถูกวัด การหาค่า w ทำได้หลายวิธี พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนขึ้นกับอะตอมและชนิดของวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเทคนิคXPS เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของโฟโตอิเล็กตรอนของธาตุ เช่น องค์ประกอบทางเคมี พลังงาน และทิศทางการเคลื่อนที่ของโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากวัสดุหลังการเกิดอันตรกิริยากับโฟตอนหรือแสงที่ฉายเข้าไป เรียกการเกิดลักษณะนี้ว่าเป็นปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ซึ่งก็คือการที่แหล่งกำเนิดของแสงที่ฉายหรือโฟตอนมีอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในวัสดุที่ถูกฉายแสงและถ้าโฟตอนมีพลังงานมากพอและคงที่ก็สามารถชน (Knock) หรือปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากวัสดุที่ต้องการวิเคราะห์ได้ ทั้งนี้ทำให้สามารถบ่งบอกถึงชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างได้ เนื่องจากพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน (Electron binding energy) ของธาตุแต่ละชนิดนั้นก็มีค่าเฉพาะตัวที่ไม่เท่ากันกลไกพื้นฐานของ XPS ดังรูปที่ 2.13 เมื่อพลังงานแสงหรือโฟตอน (Photon energy) ในช่วง 40-160 และ 220-1040 อิเล็กตรอนโวลต์ ถูกใช้เพื่อกระตุ้นสภาวะอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมใต้พื้นผิวของวัสดุให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากพื้นผิวที่ระดับความลึกประมาณ 10 นาโนเมตร พลังงานของอิเล็กตรอนจะถูกวิเคราะห์ด้วย hemispherical electron energy analyzer (HSA) ก่อนที่ความเข้มระดับพลังงาน (Intensity) จะถูกบันทึกโดยเครื่องตรวจจับอิเล็กตรอน (Electron detector) ซึ่งผลที่ได้จะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มระดับพลังงานและพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน



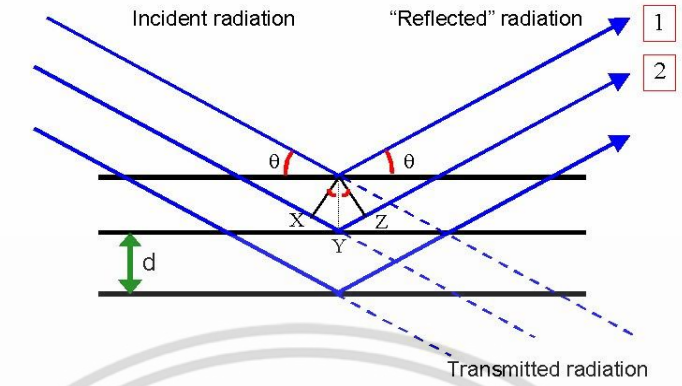
รูปที่ 2.13 การทำงานของ XPS [36]

2.5.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) [37]

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน เป็นเครื่องมือวิเคราะห์พื้นฐานชนิดการวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย (Non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (Crystal structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์รวมถึงความรู้เกี่ยวกับระบบผลึก เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบผิวหน้าของผลึกโดยทำมุม θ รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า และอีกส่วนหนึ่งจะผ่านไปยังชั้นถัดไป ของอะตอมซึ่งบางส่วนก็จะเกิดการกระเจิง เมื่ออะตอมในผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจะมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่าๆกัน รังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นลำขนานกัน ซึ่งสิ่งสำคัญในการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นอยู่กับภาวะ 2 ประการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบน และ เส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรจะมีระยะใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.14 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [37]

จากรูปที่ 2.14 เมื่อรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นแน่นอน λ ตกกระทบผลึกทำมุม θ กับระนาบอะตอม จะมีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ถ้าคลื่นเลี้ยวเบนของรังสีมีเฟสเสริมกันจะได้ระยะที่ลำของรังสีเส้นที่ 2 เคลื่อนไปมากกว่าลำของรังสีเส้นที่ 1 เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสี ซึ่งจะสอดคล้องกับกฎการเลี้ยวเบนของแบรก (Bragg's law)

$$2d\sin = n\lambda$$

เมื่อ n คือ มีค่าเป็นเป็นจำนวนเต็ม
λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม
θ คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบและระนาบของผลึก

สำหรับการสะท้อนของรังสีอื่นๆที่ไม่สอดคล้องกับกฎการเลี้ยวเบนของแบรกจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ayesha Alam และคณะ [38] ศึกษาการตรวจวัดเชิงสีของปรอทโดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนที่ดัดแปรงด้วยกลูต้าไธโอน โดยทำการสังเคราะห์สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ใช้สารทางชีวภาพ โดยใช้สารสกัดจากใบอโศกอินเดีย (Polyalthia longifolia) และใช้สารละลายกลูต้าไธโอนเข้ามามีส่วนร่วมในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน เพื่อให้มีความจำเพาะต่อการตรวจวัดปรอทที่ความเข้มข้นระดับนาโนโมลาร์ โดยในขั้นการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนทำได้โดยการผสมสารละลายที่ได้จากการสกัดจากใบไม้ 5 มิลลิลิตร กับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 45 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อน 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีสีเหลืองน้ำตาลเกิดขึ้น

จากการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล แอบซอร์พชัน สเปกโทรสโกปี ของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ได้ซึ่งเป็นสารละลายสีเหลืองน้ำตาล พบว่ามี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 432 นาโนเมตร และเมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าอนุภาคเงินมีลักษณะทรงกลม ขนาดประมาน 5 นาโนเมตร จากนั้นนำสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนไปตรวจวัดปรอทโดยการเติมสารละลายกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 1 โมลาร์ลงในสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 แล้วเติมสารละลายปรอทลงไปที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 10 จนถึง 100 นาโนโมลาร์ พบว่ายิ่งความเข้มข้นของสารละลายปรอทสูงขึ้นจะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ดัดแปรงด้วยกลูต้าไธโอนมีค่าการดูดกลืนแสงลดลง จากการทดลองคณะผู้วิจัยจึงสรุปได้ว่า วิธีในการวิเคราะห์นี้สามารถตรวจวัดปริมาณปรอทได้ตั้งแต่ช่วงความเข้มข้น 10 จนถึง 100 นาโนโมลาร์ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9741 และโดยวิธีการวิเคราะห์นี้มีความสะดวก รวดเร็ว ประหยัด และมีความจำเพาะต่อการการตรวจวัดปรอทสูง

Masaharu Tsuji และคณะ[39] ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนรูปทรงสามเหลี่ยมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอนุภาคเงินระดับนาโนรูปทรงแท่ง รูปทรงสี่เหลี่ยม และรูปทรงพีระมิดคู่ โดยอาศัยสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน ไตรโซเดียมซิเตรต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารที่ช่วยควบคุมให้เกิดอนุภาครูปทรงต่างๆ งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี โดยแบ่งขั้นตอนการศึกษาดังนี้ ขั้นตอนที่หนึ่งศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปทรงต่างๆ ได้แก่ อนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยม (วิธีพื้นฐาน) รูปทรงแท่ง และรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือรูปทรงพีระมิดคู่ ขั้นตอนที่สองศึกษาอิทธิพลของโพลีไวนิลไพโรลิโดน ไตรโซเดียมซิเตรต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ทำให้เกิดอนุภาครูปทรงสามเหลี่ยม โดยศึกษาจากสารละลายอนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีพื้นฐาน โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีการเติมโพลีไวนิลไพโรลิโดน ไตรโซเดียมซิเตรต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แล้วนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ขั้นตอนที่สามศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนรูปทรงแท่ง รูปทรงสี่เหลี่ยมและรูปทรงพีระมิดคู่เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสารตั้งต้นจากการเติมและไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมระดับนาโน

จากการศึกษาอิทธิพลของโพลีไวนิลไพโรลิโดน ไตรโซเดียมซิเตรต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ทำให้เกิดอนุภาครูปทรงสามเหลี่ยมในขั้นตอนที่สอง โดยนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าอนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมมีขนาดเฉลี่ย 45 นาโนเมตร แต่เมื่อทำการสังเคราะห์โดยไม่เติมโพลีไวนิลไพโรลิโดน พบว่าอนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมมีขนาดเฉลี่ย 20 ถึง 120 นาโนเมตร ต่อมาสังเคราะห์โดยไม่เติมไตรโซเดียมซิเตรตพบว่าอนุภาคเงินรูปทรงกลมที่มีขนาดเฉลี่ย 14±4 นาโนเมตรและทำการสังเคราะห์โดยไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ลงไปพบว่า อนุภาคเงินรูปทรงกลมที่มีขนาดเฉลี่ย 23 ± 7 และ 3 ± 1 นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งไตรโซเดียมซิเตรตและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดอนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมระดับนาโนขึ้น แต่โพลีไวนิลไพโรลิโดน ไม่ได้ทำหน้าเป็นสารที่ช่วยให้เกิดอนุภาคสามเหลี่ยมแต่จะช่วยให้อนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมเกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น และจากการศึกษาในขั้นตอนที่สามโดยนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่า เมื่อยังไม่ได้เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารตั้งต้นยังคงเป็นรูปทรงเดิม แต่เมื่อมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ลงไปในสารตั้งต้น พบว่าอนุภาคของสารตั้งต้นมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมได้จริง จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไตรโซเดียมซิเตรต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดอนุภาคเงินรูปทรงสามเหลี่ยมระดับนาโนขึ้นโดยไตรโซเดียมซิเตรตเป็นตัวช่วยควบคุมอนุภาคให้มีความเสถียรภาพ เพื่อให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กัดกร่อนอนุภาคเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมได้ง่ายขึ้น

Xiu-Hua Yang และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาการตรวจวัดไอโอไดด์ที่มีความแม่นยำและมีความว่องไวสูง โดยใช้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมาศึกษากระบวนการเปลี่ยนแปลงสี โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนด้วยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี ซึ่งจะใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นสารรีดิวซ์และไตรโซเดียมซิเตรตเป็นสารรักษาเสถียรภาพ ในขั้นตอนการสังเคราะห์เริ่มจากผสมซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้น 30 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 3 มิลลิลตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30 wt% ปริมาตร 120 ไมโครลิตร ผสมกันพร้อมปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เย็นความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 250 ไมโครลิตร จะได้สารละลายสีน้ำเงินสำหรับนำไปตรวจวัดไอโอไดด์

การศึกษาด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล แอบซอร์พชัน สเปกโทรสโกปี และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน พบว่าสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมสามารถตรวจวัดไอโอไดด์ที่ความเข้มข้นต่ำๆได้ โดยเมื่อนำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนไปตรวจวัดไอโอไดด์ สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปเป็นสีเหลือง ทั้งนี้เกิดจากไอโอไดด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนแล้วทำให้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเป็นทรงกลมจึงเกิดเป็นสารละลายสีเหลืองเกิดขึ้น และจากการการตรวจวัดไอโอไดด์พบว่าที่ความเข้มข้น 0.1 ไมโครโมลาร์ ซึ่งสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีได้ด้วยตาเปล่า แต่ที่ความเข้มข้นต่ำกว่านี้จนถึง 8.8 นาโนโมลาร์ สามารถตรวจวัดได้โดยการใช้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ วิธีการวิเคราะห์นี้มีความแม่น ความไว มีเสถียรภาพสูงและความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) ที่ดี เมื่อเทียบกับวิธีการตรวจวัดเชิงสีตามปกติ นอกจากนี้แล้วเชื่อว่า วิธีการตรวจวัดเชิงสีนี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดเชิงสีอีกมากมายในอนาคต

ธัญญาภรณ์ เกียรติกำจร และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาการตรวจวัดเชิงสีของนิกเกิลโดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ดัดแปรงด้วยกลูต้าไธโอนและแอล-ซิสเตอีน โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์สารสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่หนึ่งทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นสารรีดิวซ์และใช้เมทิลเซลลูโลสเป็นสารรักษาเสถียรภาพ และขั้นตอนที่สองคือ การดัดแปลงอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรด้วยด้วยกลูต้าไธโอนและแอล-ซิสเตอีน โดยนำสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่มีความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 44 มิลลิลิตร ได้จากขั้นตอนที่หนึ่งมาเติมสารละลายกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 50 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเติมแอล-ซิสเตอีนที่ความเข้มข้น 50 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จะได้คอลลอยด์สีชมพูที่มีการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรกับกลูต้าไธโอนและแอล-ซิสเตอีน

จากการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค ยูวี-วิสิเบิล แอบซอร์พชัน สเปกโทรสโกปี ของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ยังไม่ได้ดัดแปรงพบว่า มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 487 นาโนเมตร แต่เมื่อนำมาดัดแปรงด้วยกลูต้าไธโอนและแอล-ซิสเตอีนพบว่า มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 501 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันระหว่างหมู่ไธออลของกลูต้าไธโอนและแอลซิสเตอีนกับอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร และเมื่อนำสารละลายนี้ไปทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับสารละลายนิกเกิลที่ความเข้มข้นต่างๆพบว่า สีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ดัดแปรงด้วยกลูต้าไธโอนและแอลซิสเตอีนมีการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายสีชมพูเป็นสารละลายสีม่วงที่มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร ซึ่งสีที่เปลี่ยนไปเกิดจากนิกเกิลเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนและหมู่คาร์บอกซิลิก โดยมีภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดแบบส่องผ่าน ช่วยยืนยันว่า เมื่อยังไม่ได้ทดสอบกับสารละลายนิกเกิลอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรจะมีการกระจายตัว แต่เมื่อนำนิกเกิลมาทดสอบพบว่าจะมีการรวมตัวของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรเกิดขึ้น จากการทดลองสามารถวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิลในช่วงความเข้มข้น 10 ถึง 150 ppb ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9971 และพบว่า ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้ (LOD) เท่ากับ 7.02 ppb และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ (LOQ) เท่ากับ 23.01 ppb โดยคณะผู้วิจัยได้สรุปว่าการวิเคราะห์นิกเกิลโดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ดัดแปรงด้วยกลูต้าไธโอนและแอล-ซิสเตอีนนี้มีความจำเพาะเจาะจงและมีความไวในการวิเคราะห์นิกเกิลไอออน โดยวิธีสามารถตรวจวัดได้ง่ายและรวดเร็ว

Anambiga, I.V. และคณะ [42] ได้ทำการศึกษาการตรวจวัดไอออนของตะกั่วจากอนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีกลูต้าไธโอนช่วยรักษาเสถียรภาพอยู่ด้วยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ซิลเวอร์ไนเตรต และใช้กลูต้าไธโอนเป็นสารรักษาเสถียรภาพ ขั้นตอนในการสังเคราะห์ทำโดยนำสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์มาผสมกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตด้วยการปั่นกวนในอุณหภูมิห้องจะได้สารละลายมีสีเหลือง หลังจากปั่นกวนได้ประมาณ 5 นาที จึงเติมสารละลายกลูต้าไธโอนลงไป 2 มิลลิลิตร ค่อย ๆ หยดลง จากนั้นปั่นกวนในที่มืดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์ จากนั้นนำไปตรวจวัดกับไอออนของตะกั่วที่ความเข้มข้น 10^{-3} ถึง 10^{-9} โมลาร์ และศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของอนุภาคเงินระดับโนที่มีกลูต้าไธโอนรักษาเสถียรภาพอยู่นั้นในช่วงความเป็นกรด-เบสที่พีเอชต่างๆ

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลแอบซอร์พชัน สเปกโทรสโกปีและการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่า ความเข้มข้นของไอออนของตะกั่วที่ต่ำที่สุดที่อนุภาคเงินในระดับนาโนที่มีกลูต้าไธโอนรักษาเสถียรภาพอยู่สามารถตรวจวัดได้ เท่ากับ 10^{-9} โมลาร์ และในสภาวะในช่วงความเป็นกรด-เบสที่พีเอช 3 ถึง 7 โดยสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้ม ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันระหว่างไอออนของตะกั่ว (Pb^{2+}) กับหมู่เอมีนและหมู่คาร์บอกซิลิก จึงทำให้วิธีนี้มีไวในการวิเคราะห์และมีความจำเพาะกับไอออนของตะกั่ว (Pb^{2+}) ซึ่งในอนาคตต่อไปงานวิจัยนี้จะถูกนำไปพัฒนาวิธีเป็นตัวรับรู้บนแผ่นชิป โดยอาศัยเทคนิค MEMS ต่อไป

Guoli Si และคณะ [43] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยใช้โพลีสไตรีน (PSS) เป็นสารช่วยปกคลุมพื้นผิว โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ซึ่งใช้ซิลเวอร์ไนเตรต 0.1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 70 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 300 ไมโครลิตร ไตรโซเดียมซิเตรต 30 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 %wt ปริมาตร 60 ไมโครลิตร และโพลีสไตรีน 3 มิลลิลิตร ภายใต้การปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง

ผลที่ได้คือ เมื่อความเข้มข้นของโพลีสไตรีนเพิ่มขึ้น จาก 0.5-4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนลดลงอย่างต่อเนื่อง และความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวคลื่นเปลี่ยนจากช่วงความยาวคลื่นยาวเป็นช่วงความยาวคลื่นสั้น เนื่องจากอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโพลีสไตรีนมีคุณลักษณะเฉพาะทางเซอร์เฟจพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่สามารถเป็นแนวทางการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการตรวจวัดทางชีวภาพได้อีกด้วย

Ki Chang Song และคณะ [20] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี เกิดการรีดักชันของซิลเวอร์ไนเตรตในน้ำด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ โดยมีโซเดียมโดดิซิลซัลเฟตเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ขั้นตอนการสังเคราะห์คือ ใส่สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์พร้อมกับโซเดียมโดดิซิลซัลเฟต ซึ่งไอออนของเงินจะถูกรีดิวซ์ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ไปเป็นธาตุเงิน เกิดคอลลอยด์ของอนุภาคเงินในระดับนาโน

ผลจากการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนโดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงยูวีและภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ผลที่ได้คือ สีของสารละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตที่เติม เมื่อความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรตเพิ่มขึ้นสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นสีน้ำตาล สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอยู่ที่ประมาณ 400 nm โซเดียมโบโรไฮไดรด์ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์จะป้องกันการรวมตัวของอนุภาคเงินในระดับนาโน เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้นอนุภาคเกิดการกระจายตัวได้ดี และเมื่อใช้โซเดียมโดดิซิลซัลเฟตในปริมาณที่เหมาะสม โซเดียมโดดิซิลซัลเฟตจะถูกดูดกลืนบนพื้นผิวของอนุภาคเงินในระดับนาโนและป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคเงินในระดับนาโนซึ่งเป็นผลมาจากสเตียริคเอฟเฟกซ์ นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นโซเดียมโดดิซิลซัลเฟตเพิ่มขึ้น สีของสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลไปเป็นสีเหลือง

Shuang Chen และคณะ [44] ได้ทำการเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีความเสถียรสูงโดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบ เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคเงินระดับนาโนกับซิสเตอีน แต่ไม่เกิดกับกรดอะมิโนและสารชีวโมเลกุลอื่นๆ ขั้นตอนการสังเคราะห์คือ นำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 50 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต 50 ไมโครลิตร ที่มีน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร พร้อมกับปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นค่อยๆหยดสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 1.2 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที จะได้สารละลายที่มีสีเหลืองอ่อนแสดงว่าสิ้นสุดปฏิกิริยาแล้ว หลังจากนั้นจึงเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบ 172 ไมโครลิตร ภายใต้การปั่นกวน 24 ชั่วโมง นำไปตรวจวัดซิสเตอีนในปัสสาวะและตัวอย่างเลือดต่อไป

ผลที่ได้พบว่าจากการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน โดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบ มีความจำเพาะเจาะจงสูงกับซิสเตอีน เนื่องจากลิแกนด์ของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบ เกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไธออลกับซิลเวอร์ ขณะที่มีการยับยั้งการยึดเหนี่ยวของหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ บนพื้นผิวของอนุภาคเงินระดับนาโน จึงนำไปตรวจวัดซิสเตอีนภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่าสามารถตรวจวัดหาปริมาณของซิสเตอีนในช่วงความเข้มข้น 1.5-6.0 ไมโครโมลาร์ ขีดจำกัดการตรวจวัดของการวิเคราะห์ 0.05 ไมโครโมลาร์ ประยุกต์ใช้การตรวจวัดซิสเตอีนในตัวอย่างปัสสาวะและตัวอย่างเลือดให้ค่าร้อยละการนำกลับอยู่ในช่วง 94.8-111.3%

Haibing Li และคณะ [45] ได้ทำการศึกษาการตรวจวัดเชิงสีของไอออนนิกเกิล (Ni^{2+}) โดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโน โดยมีกลูต้าไธโอนเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ซึ่งทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ วิธีการสังเคราะห์คือ ชั่งโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.012 กรัม แล้วใส่ลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตพร้อมทำการปั่นกวนจะได้สารละลายสีเหลือง หลังจากปั่นกวนผ่านไป 5 นาที จึงเติมสารละลายกลูต้าไธโอนเข้มข้น 10^{-3} โมลต่อลิตร ปริมาตร 2 มิลลิลิตร โดยค่อยๆเติมลงไปจากนั้นปั่นกวนทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมงในที่มืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาพบว่า เมื่อนำสารละลายนี้ไปทดสอบกับไอออนนิกเกิล ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า สีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ใช้กลูต้าไธโอนเป็นตัวรักษาเสถียรภาพมีการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายสีเหลืองเป็นสารละลายสีส้ม ซึ่งเกิดจากไอออนนิกเกิลเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนและหมู่คาร์บอกซิล โดยมีภาพถ่ายจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านช่วยยืนยันว่า เมื่อยังไม่ได้ทดสอบกับไอออนนิกเกิลอนุภาคจะมีการกระจายตัว แต่เมื่อนำมาทดสอบกับไอออนนิกเกิล พบว่าจะมีการรวมตัวของอนุภาคเกิดขึ้น จากการทดลองสามารถวิเคราะห์ไอออนนิกเกิลในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} ถึง 10^{-4} โมลาร์ และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้ เท่ากับ $7.5x10^{-5}$ โมลาร์

Filippo, E. และคณะ [46] ได้ทำการศึกษาตัวรับรู้เชิงสีสำหรับตรวจวัดไตรเอทิลเอมีนด้วยคุณลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินระดับนาโนเป็นแบบเซอร์เฟจพลาสมอนเรโซแนนซ์ ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมีโดยใช้ไมโครเวฟในการสังเคราะห์ ซึ่งใช้กลูโคสเป็นตัวรีดิวซ์และใช้ซูคราโลสเป็นตัวรักษาเสถียรภาพ ขั้นตอนการสังเคราะห์คือ กลูโคส 2 กรัม ผสมกับซูคราโลส 2 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 2.5 มิลลิลิตร ผสมสารละลายให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที ภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟ สารละลายจะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีเหลืองอ่อนเกิดขึ้น

จากการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนที่มีซูคราโลสเป็นตัวรักษาเสถียรภาพทำให้มีความเสถียรสูง ทำการฉีดไตรเอทิลเอมีนเข้าไปในสารแขวนลอยเหนี่ยวนำทำให้สเปกตรัมเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนและการรวมตัวกันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไตรเอทิลเอมีนและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา สามารถสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงสีได้ด้วยตา โดยเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีเหลืองเข้ม, สีส้ม, สีส้มอมเขียว และสีเทา ตามลำดับ ซึ่งความเข้มข้นของไตรเอทิลเอมีนที่ตรวจวัดได้อยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.5-50 ไมโครโมลาร์ ดังนั้นวิธีการเปรียบเทียบสีที่มีความไวและความจำเพาะเจาะจงนี้จึงเป็นการพัฒนาวิธีใหม่และเป็นวิธีที่มีความเร็วในการตรวจวัด ง่าย และราคาถูก สำหรับการประยุกต์เพื่อตรวจวัดไตรเอทิลเอมีนในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมและตัวอย่างทางชีวภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้ ขั้นตอนที่หนึ่ง คือ การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี ขั้นตอนที่สอง คือการศึกษาอิทธิพลของความเสถียรภาพต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ขั้นตอนที่สาม คือการศึกษาปรากฏการณ์รับรู้และคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์ หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และในขั้นตอนสุดท้าย การพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ โดยการใช้วิธีการทางเครื่องมือสมัยใหม่ ซึ่งมีการใช้สารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือและขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.1.1 สารเคมี

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	สูตรโครงสร้าง/ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต,ประเทศ
ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate)	$AgNO_3$	Carlo Erba, France
โซเดียมซิเตรตไตรเบสิกไดไฮเดรต (Sodium citrate tribasic dihydrate)	$C_6H_5Na_3O_7{\cdot}2H_2O$	Sigma–Aldrich, Belgium
โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride)	$NaBH_4$	Sigma–Aldrich, USA
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)	H_2O_2	Carlo Erba, France
โมโนเบสิกโซเดียมฟอสเฟต (Monobasic sodium phosphate)	$NaH_2PO_4{\cdot}2H_2O$	Carlo Erba, France
ไดเบสิกโซเดียมฟอสเฟต (Dibasic sodium phosphate)	$Na_2HPO_4{\cdot}2H_2O$	Carlo Erba, France
กรดอะซิติก (Acetic acid)	CH_3COOH	Carlo Erba, France
โซเดียมอะซิเตรต (Sodium acetate)	CH_3COONa	Sigma–Aldrich, USA
โซเดียมไนเตรต (Sodium nitrate)	$NaNO_3$	Sigma–Aldrich, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

สารเคมี	สูตรโครงสร้าง/ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต,ประเทศ
โพแทสเซียมไนเตรต (Potassium nitrate)	KNO_3	Sigma–Aldrich, USA
แคลเซียมซัลเฟต (Calcium sulfate)	$CaSO_4$	Carlo Erba, France
แมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium sulfate)	$MgSO_4$	Carlo Erba, France
กรดยูริก (Uric acid)	$C_5H_4N_4O_3$	Sigma-Aldrich, Japan
กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid)	$C_6H_8O_6$	Sigma-Aldrich, USA
ไอออน(II) ซัลเฟต (Iron(II) Sulfate)	$FeSO_4$	Sigma-Aldrich, Japan
กลูโคส (Glucose)	$C_6H_{12}O_6$	Carlo Erba, France
ซูโคส (Sucrose)	$C_{12}H_{22}O_{11}$	Sigma-Aldrich, Japan
กลูต้าไธโอน (Glutathione)	$C_{10}H_{17}N_3O_6S$	Sigma-Aldrich, Japan
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	DI water	RHK Group, Thailand

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์/เครื่องมือ	รุ่น	บริษัทที่ผลิต
UV-vis spectrophotometry	Shimadzu UV-2100	Shimadzu, USA
Transmission Electron Microscope (TEM)	HF-3000	Hitachi, USA
Fourier transform infrared spectrophotometer (FT-IR)	Becthai spectrum Gx	Perkin Elmer, Italy
Zeta potential	NanoPlus™ 3	Micromeritics Instrument, USA
X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)	K-Alpha™	Thermo Scientific, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

อุปกรณ์/เครื่องมือ	รุ่น	บริษัทที่ผลิต
X-ray diffraction (XRD)	XRD-6100	Shimadzu, Japan
pH meter	827pH Lab Meter	Metrohm, USA
Magnetic stirrer	728 stirrer	Metrohm, Netherlands

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี ได้แก่

1.3.1.1 ความเข้มข้นของสารรักษาเสถียรภาพ (Stabilizing agent)

1.3.1.2 ความเข้มข้นของสารที่ให้อิเล็กตรอน (Reducing agent)

1.3.1.3 ความเข้มข้นของสารกัดกร่อน (Etchant)

1.3.2 การศึกษาอิทธิพลของความเสถียรภาพต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ได้แก่

1.3.2.1 การศึกษาผลของพีเอช (pH)

1.3.2.2 การศึกษาค่าความแรงของพันธะไอออนิก (Ionic strength)

1.3.2.3 การศึกษาผลของเวลา (Time)

1.3.3 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้และคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

1.3.3.1 อัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน

1.3.3.2 ความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนที่วิเคราะห์ได้ต่ออนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

1.3.3.3 อิทธิพลของพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์

1.3.3.4 สารรบกวน (Interferences)

1.3.3.5 ความเป็นเส้นตรง (Linearity range)

1.3.3.6 ความเที่ยง (Precision) ของวิธีวิเคราะห์

1.3.3.7 ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

1.3.3.8 ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

1.3.3.9 การหาปริมาณกลูต้าไธโอนในตัวอย่าง

1.3.3.10 ความแม่น (Accuracy) ของวิธีวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.4 พิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยใช้วิธีการทางเครื่องมือสมัยใหม่ ได้แก่

1.3.4.1 รูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

1.3.4.2 หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

1.3.4.3 สภาพความเป็นประจุรอบๆ อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

1.3.4.4 สถานะออกซิเดชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

1.3.4.5 การจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี

3.3.1.1 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรต

ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรต 0.50, 0.75, 1.00, 1.13, 1.50 และ 2.00 mM ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

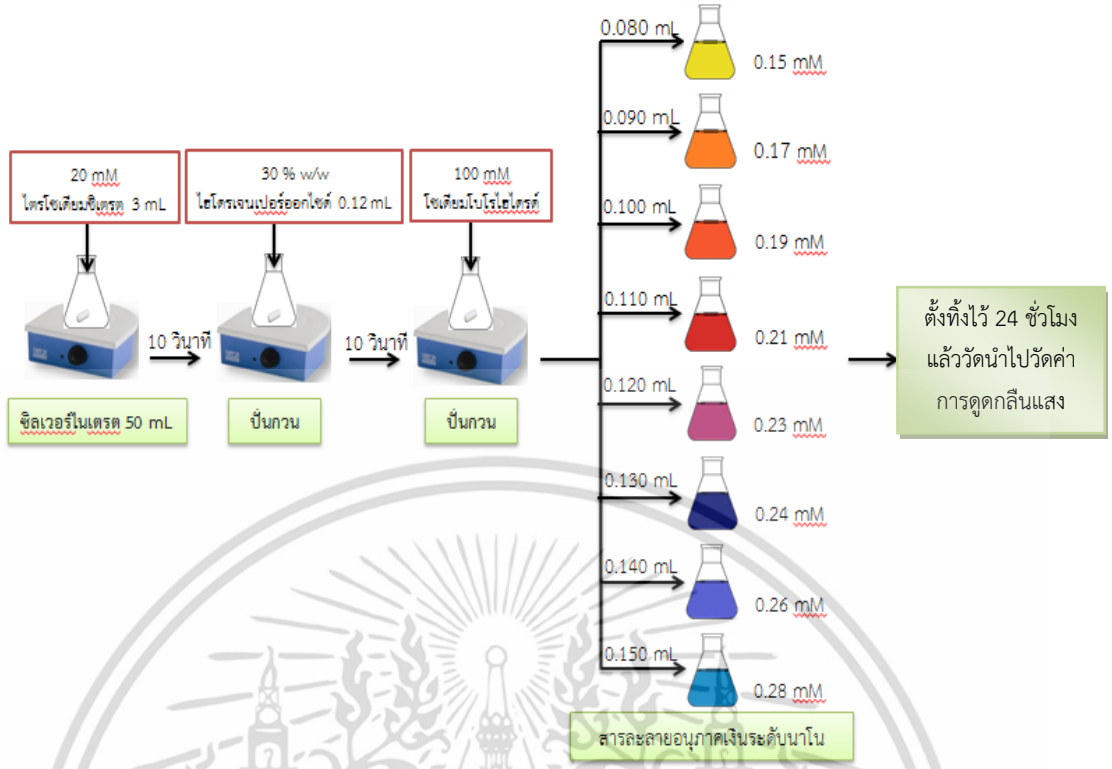
ปิเปตสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 50 mL ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 mL เติมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้น 20 mM ปริมาตร 1.13 mL พร้อมกับปั่นกวน 10 วินาที แล้วเติมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้น 30% (w/w) ปริมาตร 0.12 mL พร้อมกับปั่นกวน 10 วินาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่อุณหภูมิไม่เกิน 20 °C ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 0.15 mL จากนั้นปั่นกวนต่ออีกเป็นเวลา 10 นาที และทำซ้ำโดยการเปลี่ยนปริมาตรของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตเป็น 1.99, 2.65, 3.00, 1.59 และ 2.12 mL ตามลำดับ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง โดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 350-800 nm

3.3.1.2 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์

ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.15, 0.17, 0.19, 0.21, 0.23, 0.24, 0.26 และ 0.28 mM ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ปิเปตสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 50.00 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 ไม่เกิน 20 °C ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 0.080 mL จากนั้นปั่นกวนต่ออีกเป็นเวลา 10 นาที และทำซ้ำโดยการเปลี่ยนปริมาตรของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็น 0.090, 0.100, 0.110, 0.120, 0.130, 0.140 และ 0.150 mL ตามลำดับ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง โดยการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



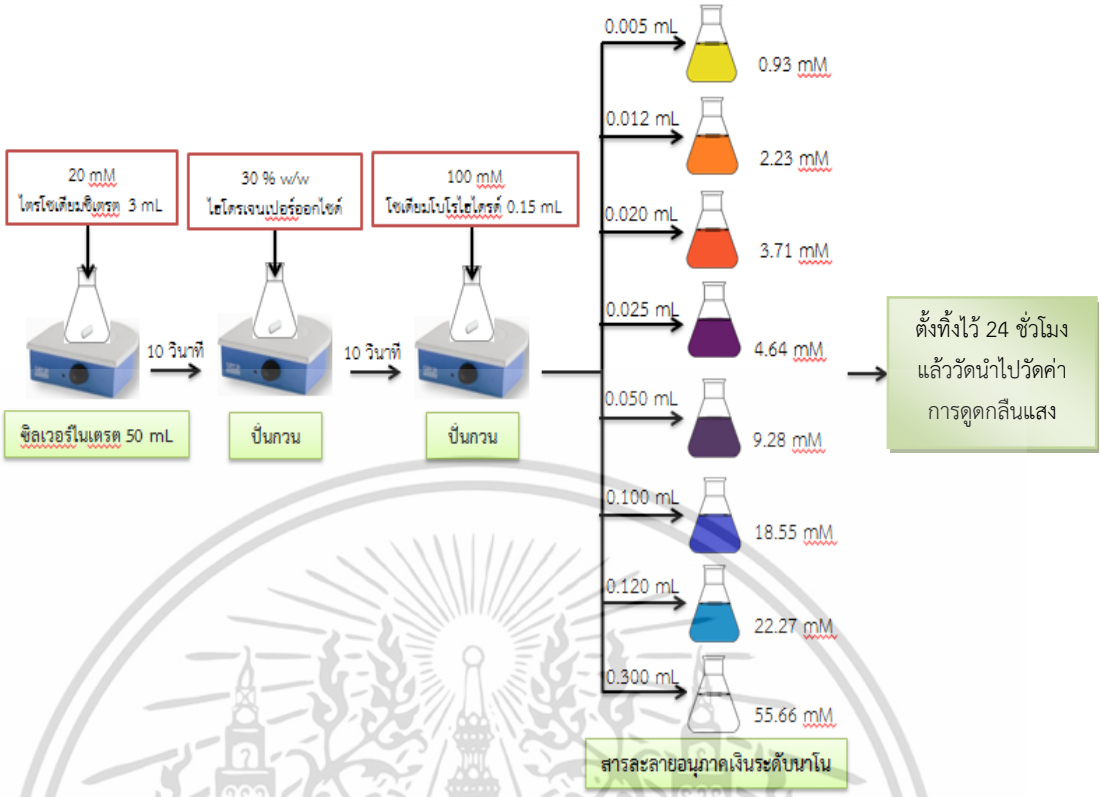
รูปที่ 3.1 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์

3.3.1.3 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.93, 2.23, 3.71, 4.64, 9.28, 18.55, 22.27 และ 55.66 mM ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ปิเปตสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 50.00 mL ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 mL เติมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้น 20 mM ปริมาตร 3 mL พร้อมกับปั่นกวน 10 วินาที แล้วเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30% (w/w) ปริมาตร 0.005 mL พร้อมกับปั่นกวน 10 วินาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่อุณหภูมิไม่เกิน 20 °C ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 0.15 mL จากนั้นปั่นกวนต่ออีกเป็นเวลา 10 นาที และทำซ้ำโดยการปรับเปลี่ยนปริมาตรของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.012, 0.020, 0.025, 0.050, 0.100, 0.120 และ 0.300 mL ตามลำดับ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-800 nm ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน โดยการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.3.2 การศึกษาอิทธิพลของความเสถียรภาพต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

3.3.2.1 การศึกษาผลของพีเอช

เตรียมสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สภาวะเหมาะสมนำไปผสมกับสารละลายบัฟเฟอร์ที่พีเอชเท่ากับ 2, 4, 6, 7, 8 และ 10 ตามลำดับ ในอัตราส่วนเท่ากับ 3.0:3.0 mL จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm

3.3.2.2 การศึกษาค่าความแรงของพันธะไอออนิก

ศึกษาความเสถียรภาพของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีผลต่อความเข้มข้นของพีเอช โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

นำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สภาวะเหมาะสมผสมกับสารละลายบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.001, 0.01 และ 0.05 M ในอัตราส่วนเท่ากับ 3.0:3.0 mL ตามลำดับ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.3 การศึกษาผลของเวลา

เตรียมสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สภาวะเหมาะสม นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm เป็นเวลา 1, 2, 5, 8, 10, 20 และ 30 วัน ตามลำดับ

3.3.3 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้และศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

3.3.3.1 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน

เตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นนำสารละลายกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นดังกล่าวผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน เท่ากับ 1.0:3.0, 1.5:3.0, 2.0:3.0, 2.5:3.0, 3.0:3.0, 3.5:3.0 และ 4.0:3.0 mL จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm

3.3.3.2 ความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนที่วิเคราะห์ได้ต่ออนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

เตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 1, 2.5, 5, 7 และ 9 ppm ผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm

3.3.3.3 การศึกษาอิทธิพลของพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์

เตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 1.0 ppm โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่พีเอชเท่ากับ 2, 4, 6, 7, 8 และ 10 เป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สภาวะเหมาะสมในอัตราส่วน 3.0:3.0 mL ของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนต่อสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm

3.3.3.4 การศึกษาสารรบกวน (Interferences) ที่มีผลต่อสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์

เตรียมสารละลายโซเดียมไนเตรต, โพแทสเซียมไนเตรต, แคลเซียมซัลเฟต, แมกนีเซียมซัลเฟต, ไอออน(II) ซัลเฟต, กลูโคส, ซูโครส, กรดแอสคอบิก และกรดยูริก ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 5.0 ppm โดยใช้สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 1.0 ppm เป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สภาวะเหมาะสมใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนเท่ากับ 3.0:3.0 mL ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายของสารรบกวน สังเกตสีของสารละลายผสมเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm

3.3.3.5 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection) และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Limit of quantitation)

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด เป็นการศึกษาปริมาณที่ต่ำที่สุดของกลูต้าไธโอนที่ตรวจวัดได้ และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เป็นการศึกษาปริมาณที่ต่ำสุดของกลูต้าไธโอนที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยข้อมูลจากการสร้างกราฟมาตรฐาน

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สภาวะที่เหมาะสม จากนั้นปิเปตสารละลายดังกล่าวผสมกับน้ำ DI ในอัตราส่วน 3.0:3.0 mL จะได้สารละลายแบลงค์ (Blank) อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน นำสารละลายแบลงค์ที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืน ทำซ้ำ 10 ครั้ง และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน นำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าความชันของข้อมูลจากการสร้างกราฟมาตรฐาน ไปคำนวณค่า LOD และ LOQ โดยใช้สูตร

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

เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของแบลงค์

Slope of calibration คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

3.3.3.6 การศึกษาความเป็นเส้นตรง

ศึกษาโดยการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนภายใต้ความเข้มข้น 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 1, 2.5, 5, 7, 9, 10, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 ppm ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ปิเปตสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนจากความเข้มข้น 1000 ppm มา 0.0025, 0.0062, 0.0125, 0.0187, 0.025, 0.0625, 0.125, 0.175, และ 0.225 mL ตามลำดับ ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 mL จากนั้นนำสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในอัตราส่วนปริมาตรเท่ากับ 3.0:3.0 mL สังเกตสีของสารละลายผสมและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.7 การหาปริมาณกลูต้าไธโอนในตัวอย่าง

นำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนสภาวะที่เหมาะสมผสมกับตัวอย่างน้ำกลั่น และตัวอย่างยาเม็ด ด้วยอัตราส่วนเท่ากับ 3.0:3.0 mL โดยทำการผสมทีละตัวอย่างเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงไปแทนค่าในสมการกราฟเส้นตรง จะได้ความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนที่มีอยู่ในตัวอย่าง

3.3.3.8 การศึกษาความเที่ยง (Precision) ของวิธีวิเคราะห์

ทำโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายผสมระหว่างอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนสภาวะที่เหมาะสมและสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 1.0 ppm ด้วยอัตราส่วนเท่ากับ 3.0:3.0 mL ทำซ้ำ 10 ครั้ง โดยนำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ไปหาความเข้มข้น จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า SD และ % RSD

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

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{\sum(\text{X}_\text{i} - \bar{\text{X}})^2}{\text{N}-1}}$$

เมื่อ % RSD = ร้อยละค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard diviation)

$\bar{\text{X}}$ = ค่าเฉลี่ยของการวิเคราะห์

X_i = ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในแต่ละครั้ง

N = จำนวนครั้งของการวิเคราะห์

3.3.3.9 ศึกษาความแม่น (Accuracy) ของวิธีวิเคราะห์

ตัวอย่าง : น้ำกลั่น (Distilled water) และตัวอย่างยาเม็ด ที่เจือจางด้วยน้ำ DI 1000 เท่า

ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่เติมลงไป 0.5, 1.0 และ 5.0 ppm

เตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 5.0 ppm ด้วยตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด จากนั้นนำสารละลายผสมระหว่างสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนแต่ละความเข้มข้นกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สภาวะเหมาะสมในอัตราส่วนเท่ากับ 3.0:3.0 mL และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm โดยทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายกลูต้าไธโอนและคำนวณหาร้อยละการคืนกลับโดยใช้สูตร

$$\% \text{ recovery} = \frac{\text{C}_1 - \text{C}_2}{\text{C}_3} \times 100$$

เมื่อ % recovery = ร้อยละการนำกลับ

C_1 = ความเข้มข้นของตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_2 = ความเข้มข้นของตัวอย่าง

C_3 = ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงไป

3.3.4 การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์
ศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน	Transmission Electron Microscope (TEM)
ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน	Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
ศึกษาสภาพความเป็นประจุของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน	Zeta potential
ศึกษาสถานะออกซิเดชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน	X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)
ศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน	X-ray diffraction (XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การสังเคราะห์และคุณสมบัติการเป็นตัวรับรู้ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี สำหรับการตรวจวัดเชิงสีในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนในอาหารเสริม สามารถแบ่งผลการวิจัยและอภิปรายผลออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่หนึ่งเป็นผลการวิจัยและอภิปรายผลจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี ขั้นตอนที่สองเป็นผลการวิจัยและอภิปรายผลจากการศึกษาอิทธิพลของความเสถียรภาพต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และขั้นตอนสุดท้ายเป็นผลการวิจัยและอภิปรายผลจากการนำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนศึกษาปรากฏการณ์รับรู้และคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณกลูต้าไธโอนในอาหารเสริม

4.1 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ด้วยวิธีรีดักชันทางเคมี ในการสังเคราะห์จะทำการปรับเปลี่ยนอนุภาคเงินรูปร่างกลมให้กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในระดับนาโน 4 องค์ประกอบหลัก และหน้าที่ของสารเคมีในการสังเคราะห์ประกอบด้วย

- สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นซิลเวอร์ไอออน (Ag^+ precursor)
- สารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ทำหน้าที่เป็นสารรักษาเสถียรภาพ (Stabilizing agent)
- สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ทำหน้าที่เป็นสารที่ให้อิเล็กตรอน (Reducing agent)
- สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นสารกัดกร่อน (Oxidizing agent) อนุภาคเงินรูปร่างกลมให้กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs)

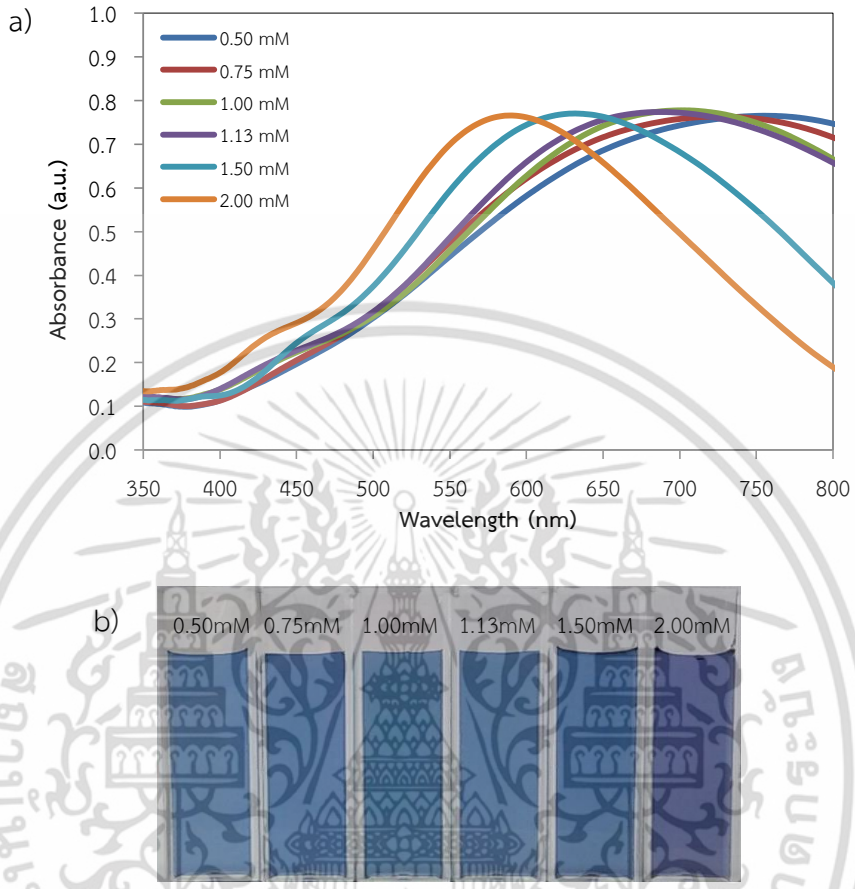
และเพื่อเป็นการยืนยันผลการสังเคราะห์สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เทคนิค ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตโฟโตเมทรี เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เทคนิคการศึกษาสภาพความเป็นประจุบนพื้นผิวด้วยการตรวจวัดค่าศักย์ซีต้า และเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ ถูกนำมาใช้ในการยืนยันผลการสังเคราะห์

4.1.1 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไตรโซเดียมซิเตรต

สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 50 mL ถูกนำมาผสมภายใต้การปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ที่ความเข้มข้น 0.50, 0.75, 1.00, 1.13, 1.50 และ 2.00 mM สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.28 mM ปริมาตร 0.15 mL และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 22.27 mM ปริมาตร 0.12 mL ซึ่งค่าการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน ภายใต้สภาวะการทดลองดังกล่าว สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน และ (b) สีของสารละลายที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1 ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนโดยใช้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นไตรโซเดียมซิเตรต (mM)	AgTNPs : Na_3CT (mol : mol)	ความยาวคลื่นสูงสุด, λ_{max} (nm)
0.50	0.0053 : 0.0265	755
0.75	0.0053 : 0.0397	726
1.00	0.0053 : 0.0530	703
1.13	0.0053 : 0.0598	688
1.50	0.0053 : 0.0795	632
2.00	0.0053 : 0.1060	590

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต สีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน จะเปลี่ยนจากสีฟ้า เป็นสีน้ำเงิน และสีม่วงในที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบการสั่นของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวอนุภาค (Surface Plasmon Resonance, SPR) ดังตารางที่ 4.1 พบว่า แถบพลาสมอนของการสั่นของอิเล็กตรอน (Plasmon band) จะมีการเคลื่อนที่ของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นลดลง (hypsochromic shift) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมลักษณะนี้สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารรักษาเสถียรภาพเพิ่มขึ้น มีผลทำให้อนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้เกิดแรงผลักกันมาก (Repulsive force) ส่งผลให้อนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้น่าจะมีแนวโน้มที่มีขนาดเล็กลง และเกิดการรวมตัว (Aggregation) กันน้อยลง โดยสีฟ้าของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ จะแสดงพฤติกรรมของรูปร่างเป็นแบบสามเหลี่ยม

เพื่อเป็นการยืนยันสภาพความเป็นประจุบนพื้นผิวของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเทคนิคการตรวจวัดค่าศักย์ซีต้า ซึ่งแสดงผลในหัวข้อ 4.1.1.1 ต่อไป

4.1.1.1 ศึกษาสภาพความเป็นประจุบนพื้นผิวของอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้นต่าง ๆ

สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต นำไปวัดค่าศักย์ซีต้า สามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าศักย์ซีต้าของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้นแตกต่างกัน

ความเข้มข้นไตรโซเดียมซิเตรต (mM)	**ค่าศักย์ซีต้า (mV)**			
	ครั้งที่1	**ครั้งที่2**	**ครั้งที่3**	**ค่าเฉลี่ย**
0.50	-2.94	-1.93	-2.14	-2.34 ± 0.53
1.13	-32.20	-29.41	-34.32	-31.98 ± 2.46
1.50	-37.00	-37.52	-38.90	-37.81 ± 0.98

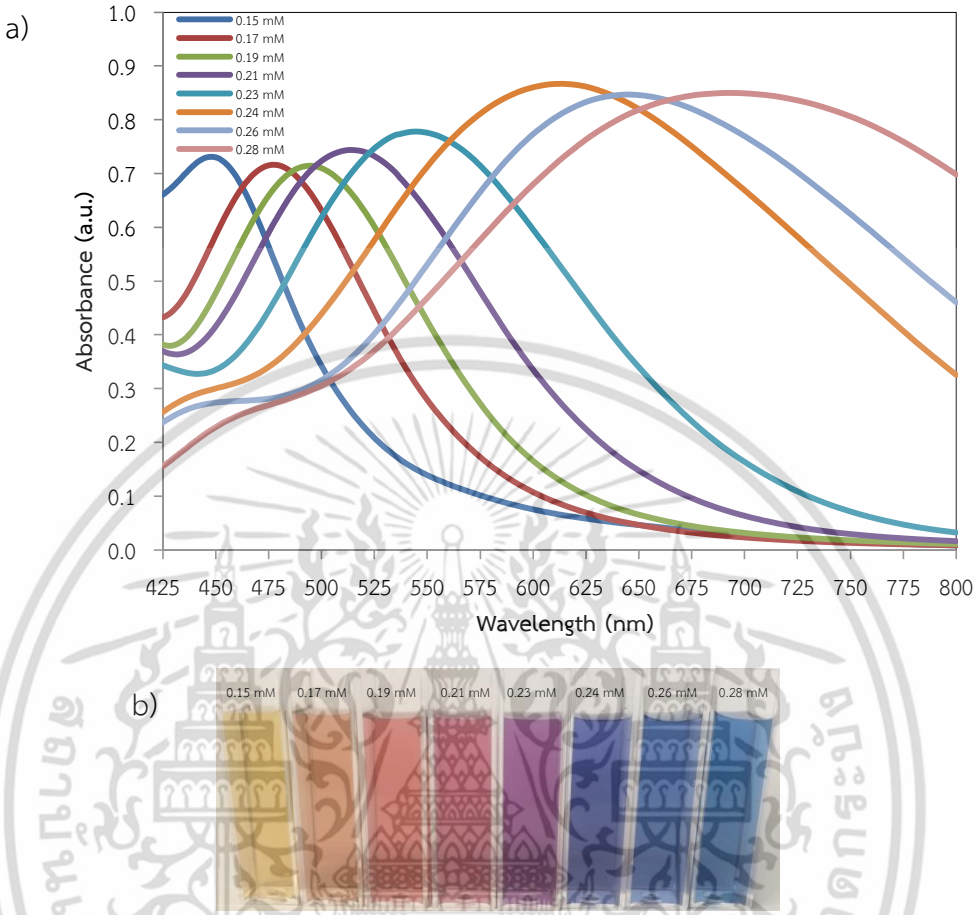
จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะมีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าอนุภาคเงินระดับนาโนที่ทำการสังเคราะห์มีสภาพพื้นผิวของอนุภาคเงินระดับนาโนเป็นลบ ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการที่ AgTNPs มีหมู่ –OH หรือ COOH แล้วเกิดการแตกตัวเป็น $–O^-$ หรือ COO^- ภายใต้สารละลายเบส

4.1.2 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโบโรไฮไดรด์

เตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 50 mL ผสมกับสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต 1.13 mM ปริมาตร 3 mL และทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 0.15, 0.17, 0.19, 0.21, 0.23, 0.24, 0.26 และ 0.28 mM และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 22.27 mM ปริมาตร 0.12 mL ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคเงินระดับนาโน ภายใต้สภาวะการทดลองดังกล่าว สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.2 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน และ (b) สีของสารละลายที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนโดยใช้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

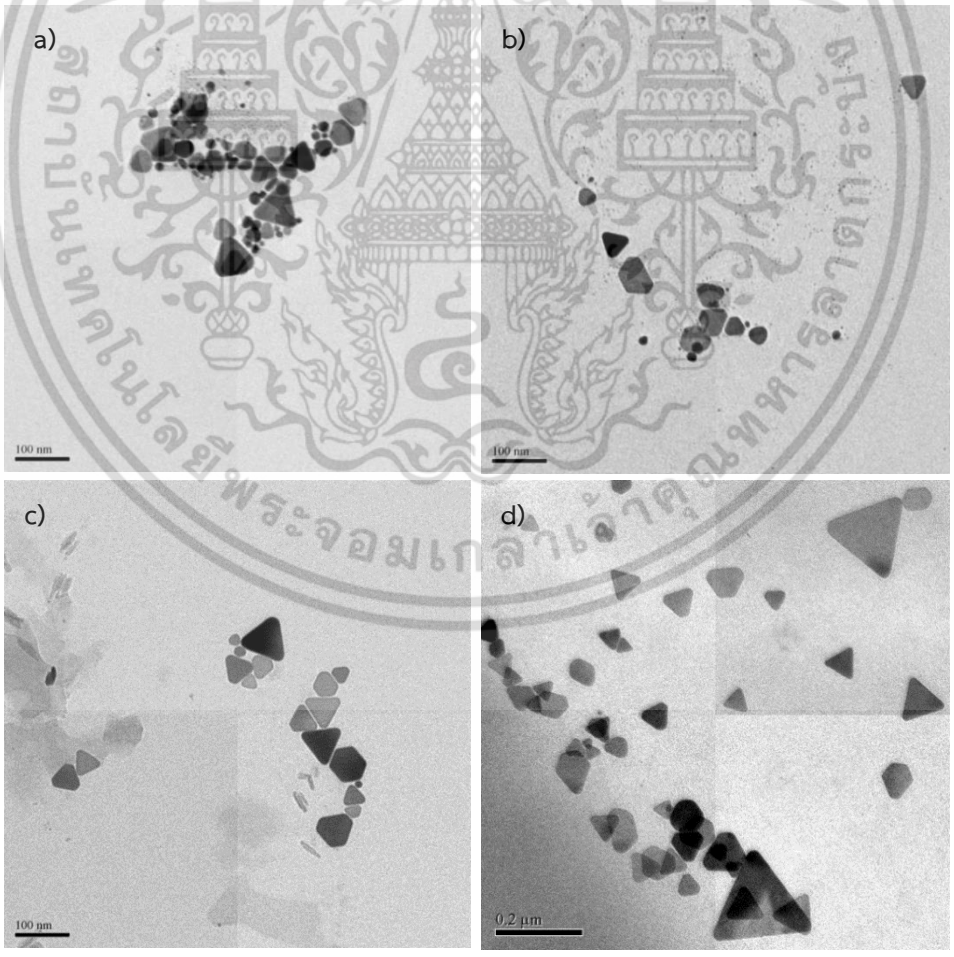
ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (mM)	AgTNPs : $NaBH_4$ (mol : mol)	ความยาวคลื่นสูงสุด, λmax (nm)
0.15	0.0053 : 0.0079	448
0.17	0.0053 : 0.0090	477
0.19	0.0053 : 0.0100	495
0.21	0.0053 : 0.0111	514
0.23	0.0053 : 0.0121	544
0.24	0.0053 : 0.0127	613
0.26	0.0053 : 0.0137	651
0.28	0.0053 : 0.0148	693

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ สีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน จะเปลี่ยนแปลงจากสารละลายสีเหลือง เป็นสีส้ม สีแดง สีม่วง สีน้ำเงิน และสีฟ้าในที่สุด โดยจากการทดลองเมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นแถบพฤติกรรมการสั่นของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของอนุภาคจะมีการเคลื่อนที่ของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น (bathochromic shift) นั่นหมายความว่าถ้าใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ต่ำ จะไม่สามารถสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมได้เพียงพอ ที่จะทำให้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการกัดกร่อนได้ ซึ่งในการทดลองภายใต้สภาวะนี้อัตราส่วนต่อโมลที่พอดีเป็น 0.0053 : 0.0148 และเพื่อเป็นการยืนยันรูปร่างและขนาดของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้นต่าง ๆ เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านได้ถูกนำมาศึกษา ซึ่งแสดงการทดลองแสดงในหัวข้อ 4.1.2.1

4.1.2.1 การศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินระดับนาโน

สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ขึ้น ภายใต้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่าง ๆ ถูกนำไปหยดลงบนกริด สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.3

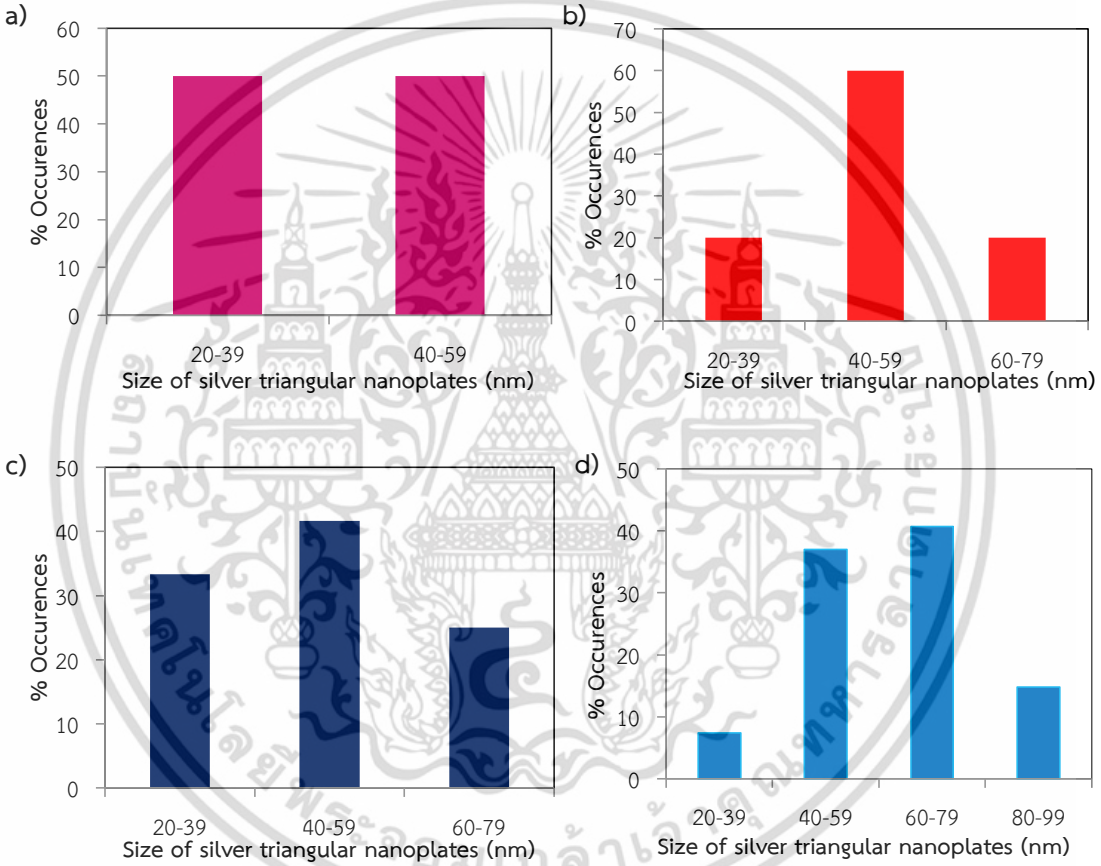


รูปที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคเงินระดับนาโนที่ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (a) 0.19 mM, (b) 0.21 mM, (c) 0.24 mM และ (d) 0.28 mM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 จำนวนอนุภาคเงินระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์แตกต่างกัน

ความเข้มข้นโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (mM)	จำนวนอนุภาครูปร่างสามเหลี่ยม (อนุภาค)	จำนวนอนุภาครูปร่างอื่นๆ (อนุภาค)	จำนวนอนุภาครูปร่างสามเหลี่ยม (%)
0.19	10	41	19.61
0.21	6	7	46.15
0.24	12	6	66.67
0.28	20	7	74.07



รูปที่ 4.4 กราฟแท่งแสดงการกระจายตัวของขนาด (Size distribution) ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (a) 0.19 mM, (b) 0.21 mM, (c) 0.24 mM และ (d) 0.28 mM

จากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ทำให้สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนแสดงคุณลักษณะรูปร่างสามเหลี่ยมมากขึ้น จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น 0.28 mM มีจำนวนอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมในสารละลายเกิดขึ้นมากที่สุด

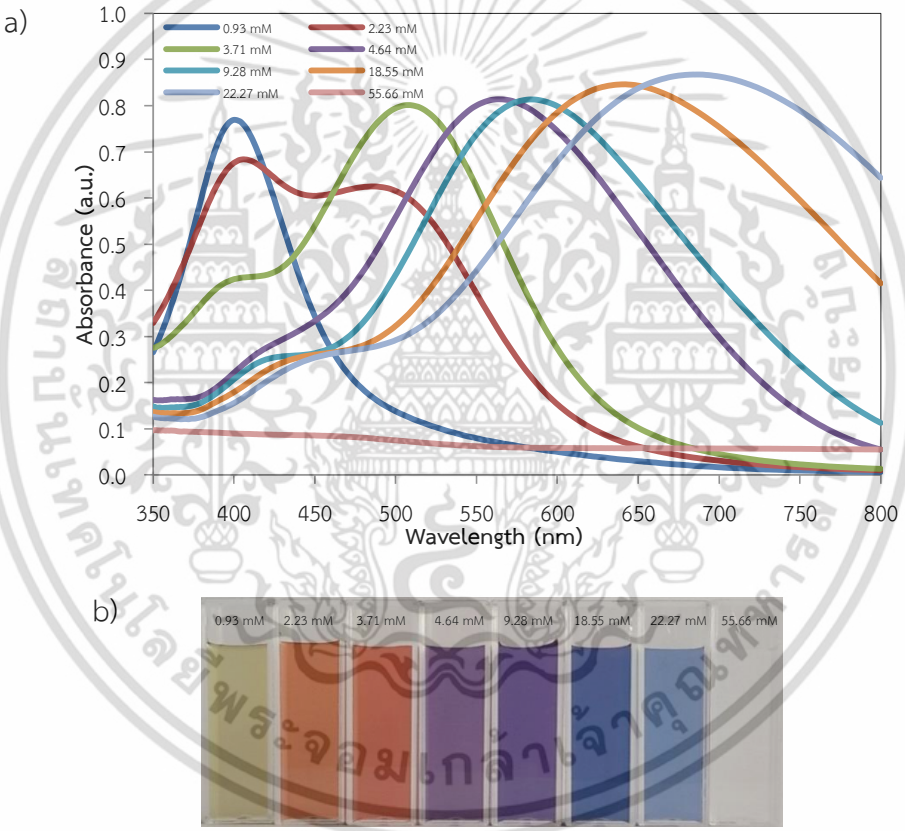
เมื่อทำการศึกษาขนาดของอนุภาค ดังรูปที่ 4.4 พบว่าขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมที่เกิดจากความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างกัน มีขนาดใกล้เคียงกันที่ประมาณ 40-59 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่มีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกันแต่รูปร่างเปลี่ยนไป ส่งผลต่อพฤติกรรมการแสดงสีของสารนั้น ๆ

4.1.3 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 50 mL ผสมกับสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต 1.13 mM ปริมาตร 3 mL และสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.28 mM ปริมาตร 0.15 mL และทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.93, 2.23, 3.71, 4.64, 9.28, 18.55, 22.27 และ 55.66 mM ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน ภายใต้สภาวะการทดลองดังกล่าว สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.5 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน และ (b) สีของสารละลายที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนโดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mM)	AgTNPs : H_2O_2 (mol : mol)	ความยาวคลื่นสูงสุด, λ_{max} (nm)
0.93	0.0053 : 0.0492	400
2.23	0.0053 : 0.1181	406
3.71	0.0053 : 0.1966	507
4.64	0.0053 : 0.2459	564
9.28	0.0053 : 0.4918	583
18.55	0.0053 : 0.9831	642
22.27	0.0053 : 1.1803	688
55.66	0.0053 : 2.9499	-

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนจะเปลี่ยนแปลงจากสารละลายสีเหลือง เป็นสีส้ม สีแดง สีม่วง สีน้ำเงิน สีฟ้า และใสไม่มีสีในที่สุด โดยจากการทดลองเมื่อใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นแถบพฤติกรรมการสั่นของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของอนุภาคจะมีการเคลื่อนที่ของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของอนุภาคเงินระดับนาโนโดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปทำให้พื้นผิวของอนุภาคเงินระดับนาโนเกิดการกัดกร่อนได้ ภายใต้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมส่งผลให้มีซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) หลุดออกมาอยู่ในสารละลาย แต่ในขณะเดียวกันเมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สูงมากเกินไป จะทำให้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนถูกออกซิไดซ์หมด ดังนั้นจึงเห็นสารละลายเป็นใสไม่มีสี ซึ่งสมการแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้ [47]

$$Ag^+ + e^- \longrightarrow Ag \qquad E^0 = +0.7996\ V$$

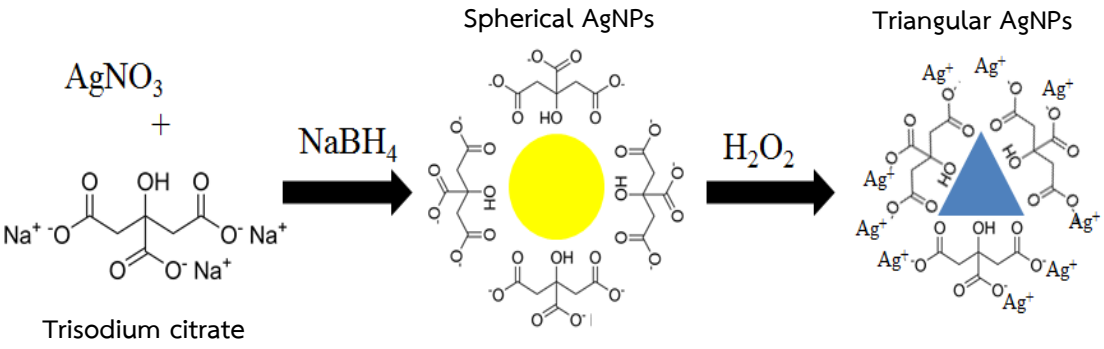
$$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow 2H_2O \qquad E^0 = +1.763\ V$$

$$H_2O_2 \longrightarrow O_2 + 2H^+ + 2e^- \qquad E^0 = -0.695\ V$$

$$2Ag + H_2O_2 + 2H^+ \longrightarrow 2Ag^+ + 2H_2O \qquad \Delta E^0 = +0.964\ V$$

จากหัวข้อที่ 4.1.1-4.1.3 สามารถแสดงกลไกปฏิกิริยาการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



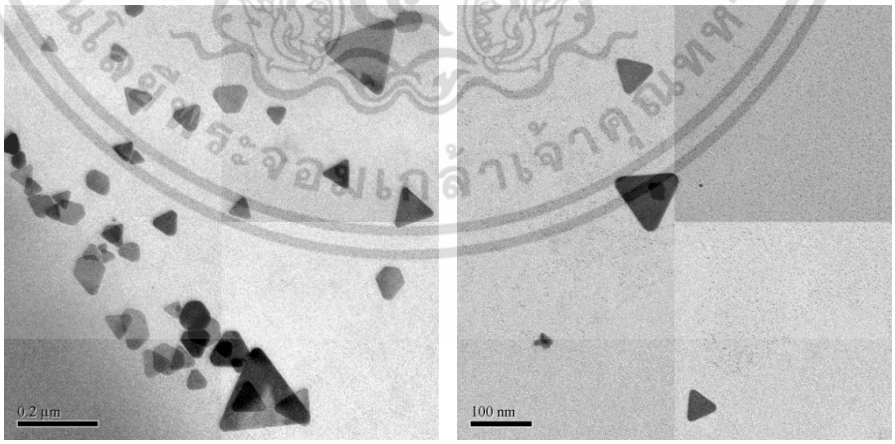
รูปที่ 4.6 กลไกปฏิกิริยาการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs)

กลไกการสังเคราะห์เริ่มต้นจากซิลเวอร์ไอออนทำปฏิกิริยากับสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ทำให้อนุภาคเงินถูกล้อมรอบด้วยหมู่คาร์บอกซิเลต (COO^-) จากนั้นซิลเวอร์ไอออนรับอิเล็กตรอนจากโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมระดับนาโนที่มีหมู่คาร์บอกซิเลตช่วยรักษาเสถียรภาพอยู่ และเมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปในสารละลายจึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้พื้นผิวของอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมถูกกัดกร่อนไป ขณะเดียวกันก็ยังคงมีซิลเวอร์ไอออนแขวนลอยอยู่ในสารละลาย และเมื่อปฏิกิริยาสมบูรณ์จึงกลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเกิดขึ้น

4.1.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

4.1.4.1 การศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

จากการทดลองนี้ ใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนภายใต้สภาวะ $AgNO_3$: $NaBH_4$: H_2O_2 : Na_3CT = 0.0053 : 0.0148 : 1.1803 : 0.0598 นำไปหยดลงบนกริด แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7

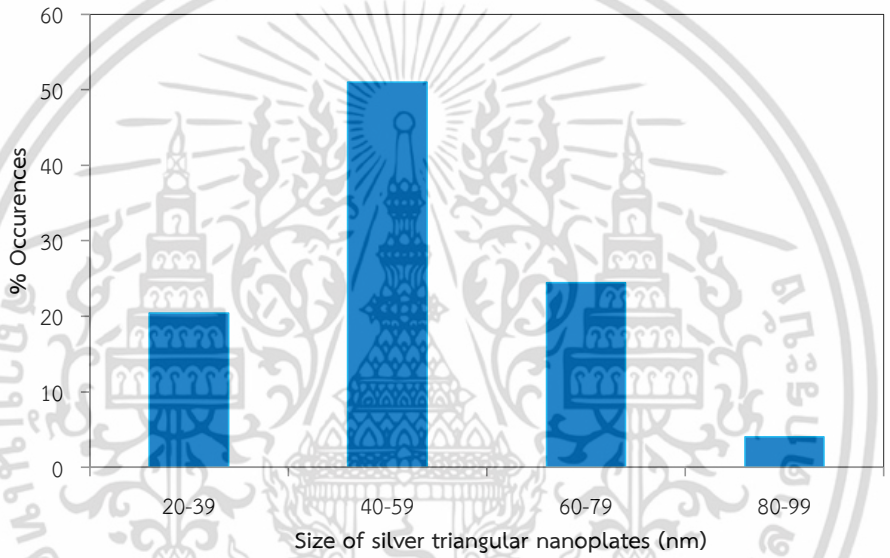


รูปที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนได้มาจากภายใต้สภาวะ $AgNO_3$: $NaBH_4$: H_2O_2 : Na_3CT = 0.0053 : 0.0148 : 1.1803 : 0.0598

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 จำนวนอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ภายใต้สภาวะ $AgNO_3$: $NaBH_4$: H_2O_2 : Na_3CT = 0.0053 : 0.0148 : 1.1803 : 0.0598

ขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (nm)	จำนวนอนุภาครูปร่างสามเหลี่ยม (อนุภาค)	จำนวนอนุภาครูปร่างสามเหลี่ยม (%)
20-39	10	20.40
40-59	25	51.02
60-79	12	24.48
80-99	2	4.08



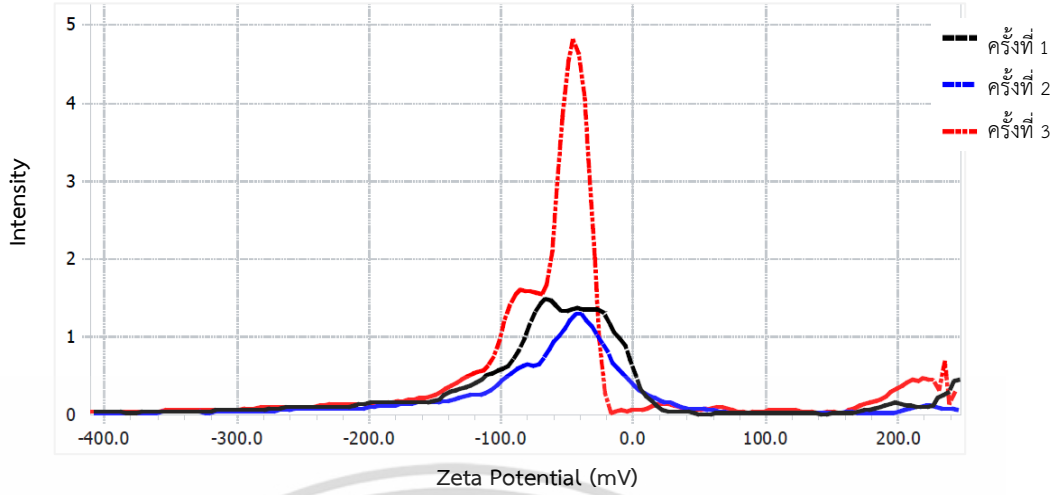
รูปที่ 4.8 กราฟแท่งแสดงการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

จากรูปที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน โดยใช้อัตราส่วนโมล $AgNO_3$: $NaBH_4$: H_2O_2 : Na_3CT = 0.0053 : 0.0148 : 1.1803 : 0.0598 จะแสดงลักษณะรูปร่างเป็นแบบสามเหลี่ยม และเมื่อทำการศึกษาขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์ขึ้น พบว่าช่วงขนาดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 40-59 nm

4.1.4.2 การศึกษาสภาพความเป็นประจุบนพื้นผิวของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

ในการทดลองนี้ นำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนภายใต้สภาวะ $AgNO_3$: $NaBH_4$: H_2O_2 : Na_3CT = 0.0053 : 0.0148 : 1.1803 : 0.0598 นำไปวัดค่าศักย์ซีต้า เพื่อดูสภาพความเป็นประจุบนพื้นผิวของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ซึ่งมีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ภาพแสดงค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

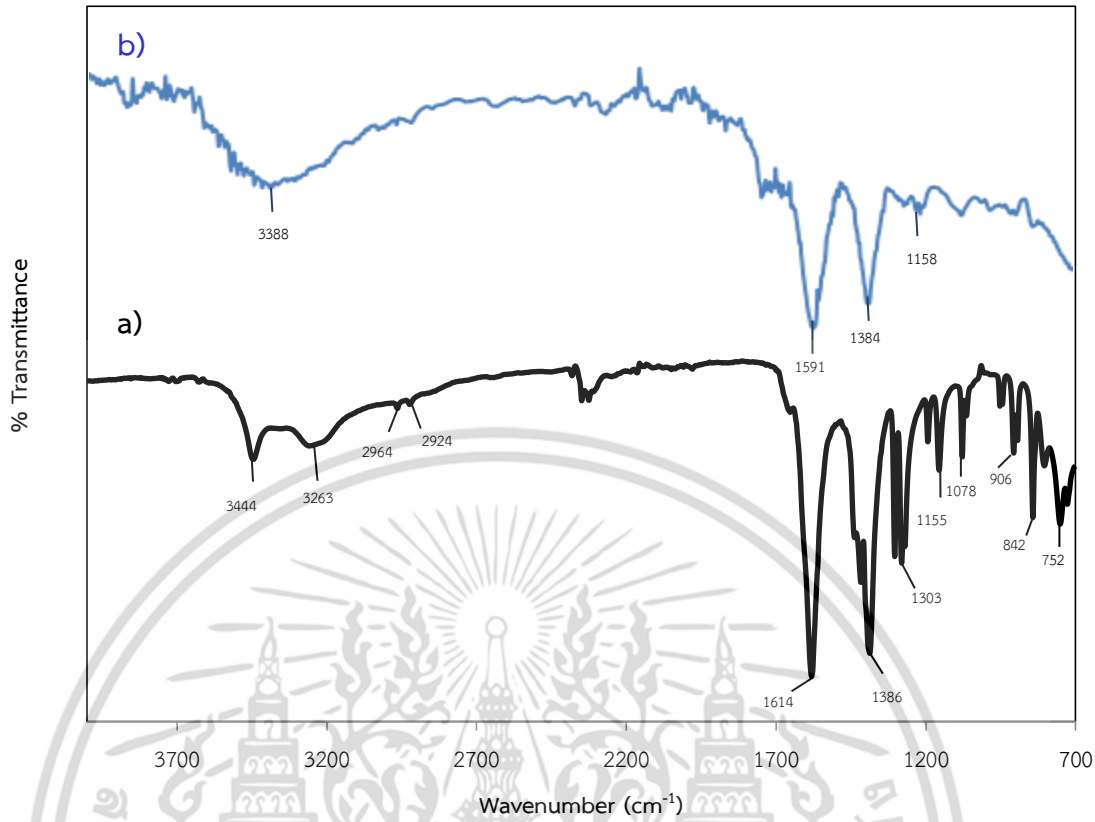
ครั้งที่	ค่าศักย์ซีต้า (mV)
1	-51.38
2	-45.11
3	-46.91
ค่าเฉลี่ย	-47.80 ± 3.22

จากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นมีสภาพพื้นผิวของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเป็นลบ ภายใต้สภาวะสารละลาย pH 7.87

4.1.4.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตภายใต้ความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 50 mL ถูกนำมาผสมกับสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้น 1.13 mM ปริมาตร 3 mL สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ความเข้มข้น 0.28 mM ปริมาตร 0.15 mL และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 22.77 mM ปริมาตร 0.12 mL นำสารละลายที่เตรียมได้ รวมถึงไตรโซเดียมซิเตรตบริสุทธิ์ไปอบแห้งในตู้อบความร้อน ที่อุณหภูมิ 80-90 °C เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 FT-IR สเปกตราของ (a) ไตรโซเดียมซิเตรต และ (b) อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

ตารางที่ 4.8 หมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิเตรตและหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่สังเคราะห์ภายใต้สภาวะ $AgNO_3$: $NaBH_4$: H_2O_2 : Na_3CT = 0.0053 : 0.0148 : 1.1803 : 0.0598

Peak assignment	Trisodium citrate (a) Peaks (cm^{-1})	AgTNPs (b) Peaks (cm^{-1})
O-H stretching	3444	3388
O-H stretching	3263	-
C-H bending	2964	-
C-H bending	2924	-
C=O stretching	1614	1591
C-H bending	1386	1384
C-O stretching	1303	1158
C-O stretching	1155	-
C-O stretching	1078	-
C-H bending	906	-
C-H bending	842	-
C-H bending	752	-

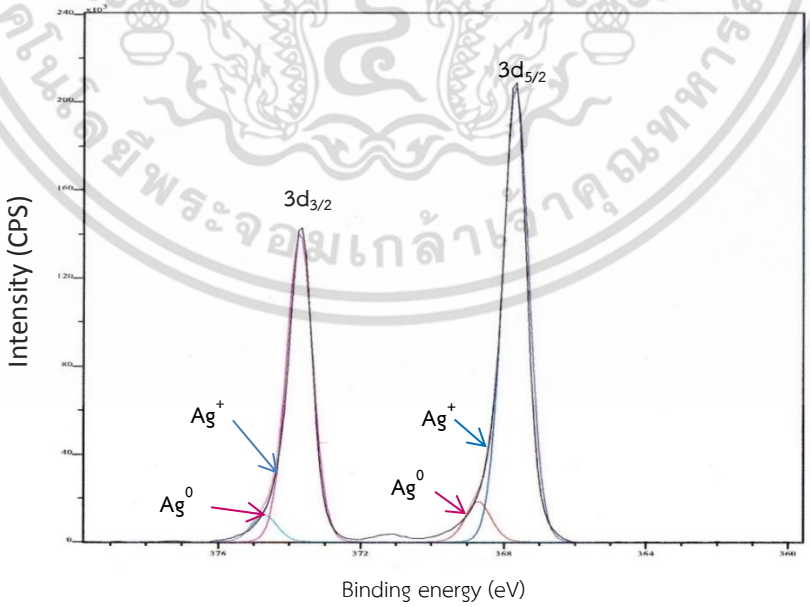
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 แสดงถึงค่า FT-IR สเปกตราของไตรโซเดียมซิเตรตและอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และตารางที่ 4.8 (a) แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิเตรต โดยปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ O-H ที่เลขคลื่น 3453 cm^{-1} ปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ C=O ที่เลขคลื่น 1614 cm^{-1} ปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ C-O ที่เลขคลื่น 1073 cm^{-1} และปรากฏลักษณะการสั่นแบบงอ (bending) ของพันธะ C-H ที่เลขคลื่น 1418 และ 1393 cm^{-1} [48]

เมื่อนำค่า FT-IR สเปกตราของไตรโซเดียมซิเตรตที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า FT-IR สเปกตราของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่ขึ้นที่เดียวกับหมู่ฟังก์ชันของไตรโซเดียมซิเตรตบริสุทธิ์ โดยในสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (b) ปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ O-H ที่เลขคลื่น 3388 cm^{-1} ปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ C=O ที่เลขคลื่น 1591 cm^{-1} ปรากฏลักษณะการสั่นแบบงอ (bending) ของพันธะ C-H ที่เลขคลื่น 1384 cm^{-1} และปรากฏลักษณะการสั่นแบบยืดและหด (stretching) ของพันธะ C-O ที่เลขคลื่น 1158 cm^{-1} จากแถบการสั่นของ C=O ที่มีค่าการสั่นลดลงจาก 1614 cm^{-1} เป็น 1591 cm^{-1} แสดงให้เห็นการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ $-COO^-$ ของซิเตรตกับ Ag ซึ่งส่งผลให้ AgTNPs มีไตรโซเดียมซิเตรตช่วยรักษาเสถียรภาพ

4.1.4.4 การศึกษาสถานะออกซิเดชันของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

จากการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน มีความเป็นไปได้ว่ามีซิลเวอร์ไอออนแขวนลอยอยู่ในสารละลาย และเพื่อเป็นการยืนยันจึงทำการศึกษาสถานะออกซิเดชันของสารละลายที่สังเคราะห์ขึ้น ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์โฟตอนสเปกโทรสโคปี สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ภาพแสดงสเปกตรา XPS ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

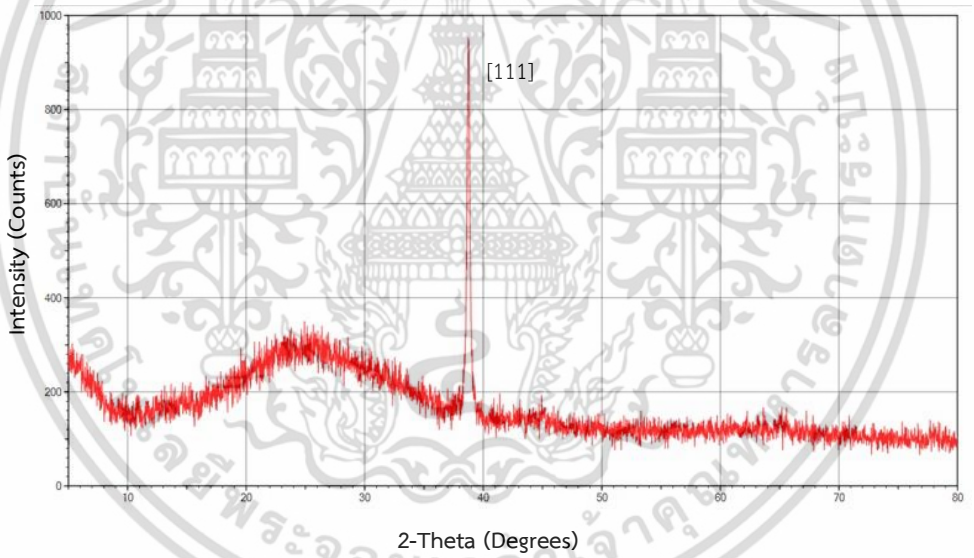
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรา XPS ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน จาก XPS spectra พบพีคคู่ (Double peaks) ของทั้งอนุภาคเงินระดับนาโน (Ag^0) และซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) โดยพีคเอกลักษณ์ของอนุภาคเงินระดับนาโนจะแสดงระดับพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energies) ที่ 374.7 และ 368.7 eV และในขณะเดียวกันซิลเวอร์ไอออนจะแสดงระดับพลังงานยึดเหนี่ยวที่ 373.7 และ 367.6 eV ซึ่งการปรากฏของพีคคู่ของทั้ง Ag^0 และ Ag^+ จะตรงกับระดับพลังงานยึดเหนี่ยวที่ Ag $3d_{5/2}$ และ Ag $3d_{3/2}$ ตามลำดับ

ซึ่งหมายความว่า AgTNPs ที่ยังมี Ag^0 และ Ag^+ ซึ่ง Ag^+ อาจเกิดการรวมตัวเป็น Ag^+OOC- ของซิเตรต เพราะเห็นได้ใน FTIR

4.1.4.5 การศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

จากการทดลองนี้ ทำโดยนำแผ่นกระจกที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้ว (Primer) จุ่มลงในสารสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนสลับกับสารละลาย PDADMAC ซึ่งตรวจวัดการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ภาพแสดงการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

เมื่อทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน พบพีคเอกลักษณ์ระนาบเดียวในผลึก [111] ที่ค่า 2-Theta เท่ากับ 38.75 องศา ของโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered cubic (FCC) ซึ่งการปรากฏพีคเอกลักษณ์ระนาบเดียวในผลึก [111] เพียงระนาบเดียวเกิดจากการกัดกร่อนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ของซิลเวอร์ อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kumari, J. และคณะ [49] ที่ทำการศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลม จะพบพีคเอกลักษณ์ 4 พีค ที่ค่า 2-Theta เท่ากับ 38.45, 46.35, 64.75 และ 78.05 ที่มีระนาบในผลึกเป็น [111], [200], [220] และ [311] ของโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered cubic (FCC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นผลของ XRD สอดคล้องกับ TEM ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารกัดกร่อนสามารถที่จะทำลายระนาบที่สมบูรณ์ของอนุภาคเงินระดับนาโนรูปร่างทรงกลมให้กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

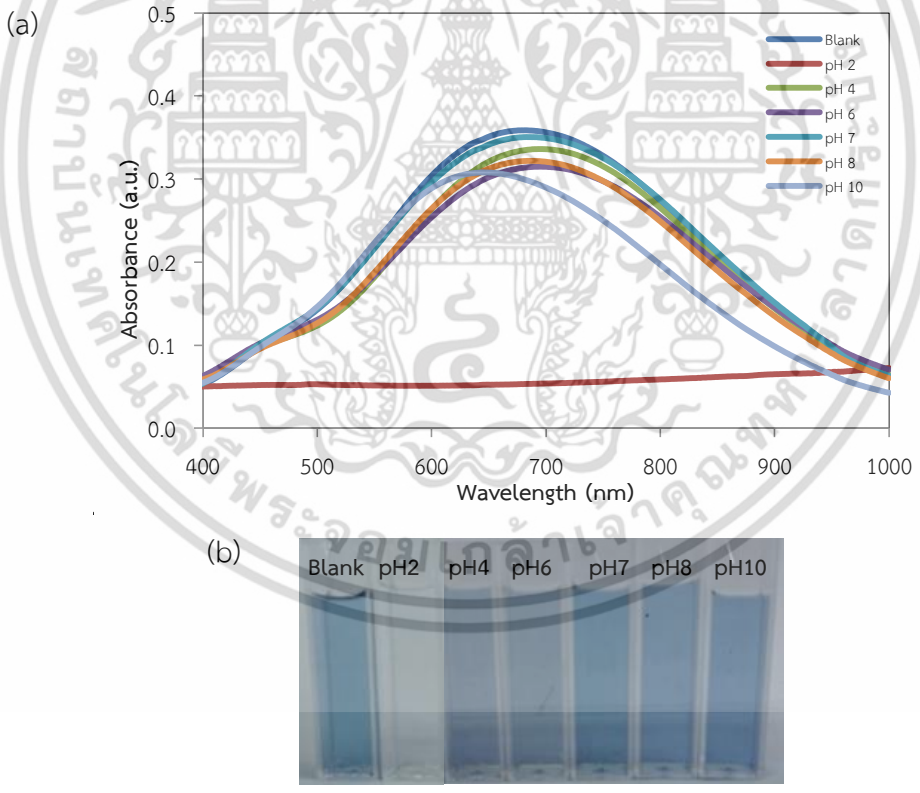
4.2 อิทธิพลของความเสถียรภาพต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

4.2.1 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์

สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ถูกนำมาผสมกับสารละลายบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 0.001, 0.01 และ 0.05 M ที่พีเอชเท่ากับ 2, 4, 6, 7, 8 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งแสดงค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 nm สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.13-4.15

4.2.1.1 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.001 M

สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนภายใต้สภาวะ $AgNO_3$: $NaBH_4$: H_2O_2 : Na_3CT = 0.0053 : 0.0148 : 1.1803 : 0.0598 ผสมกับสารละลายบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 0.001 M ที่พีเอชเท่ากับ 2, 4, 6, 7, 8 และ 10 สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.13

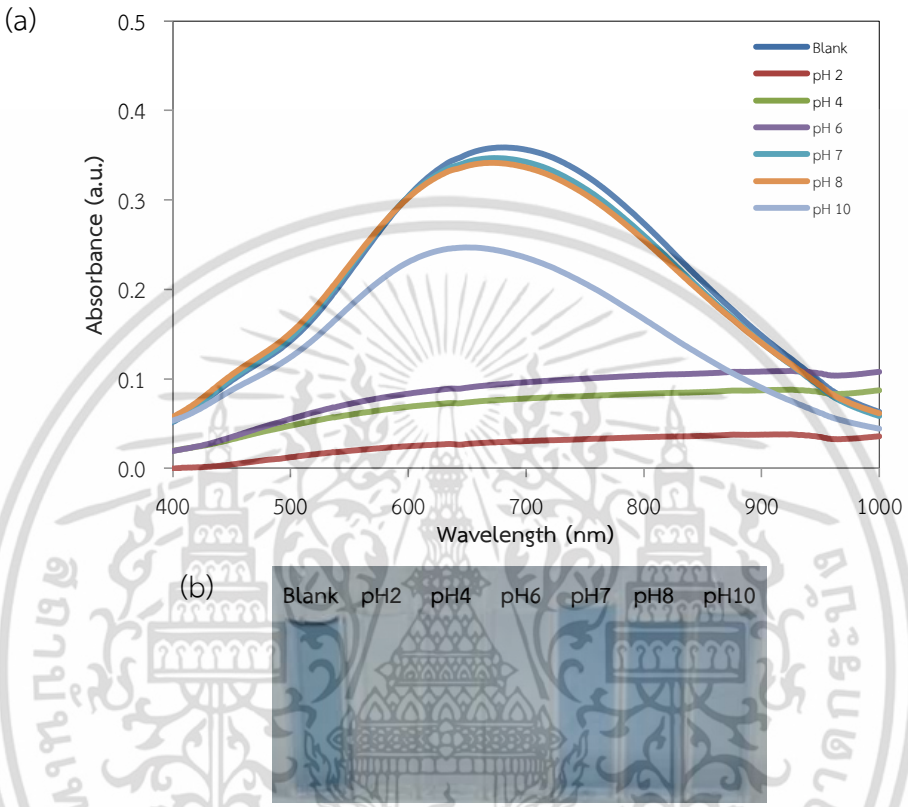


รูปที่ 4.13 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่พีเอชต่างๆ และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับพีเอชบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.001 M ที่พีเอชต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.01 M

สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนภายใต้สภาวะ $AgNO_3$: $NaBH_4$: H_2O_2 : Na_3CT = 0.0053 : 0.0148 : 1.1803 : 0.0598 ผสมกับสารละลายบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 0.01 M ที่พีเอชเท่ากับ 2, 4, 6, 7, 8 และ 10 ซึ่งสามารถแสดงผลการสแกนสเปกตรัมดังรูปที่ 4.14

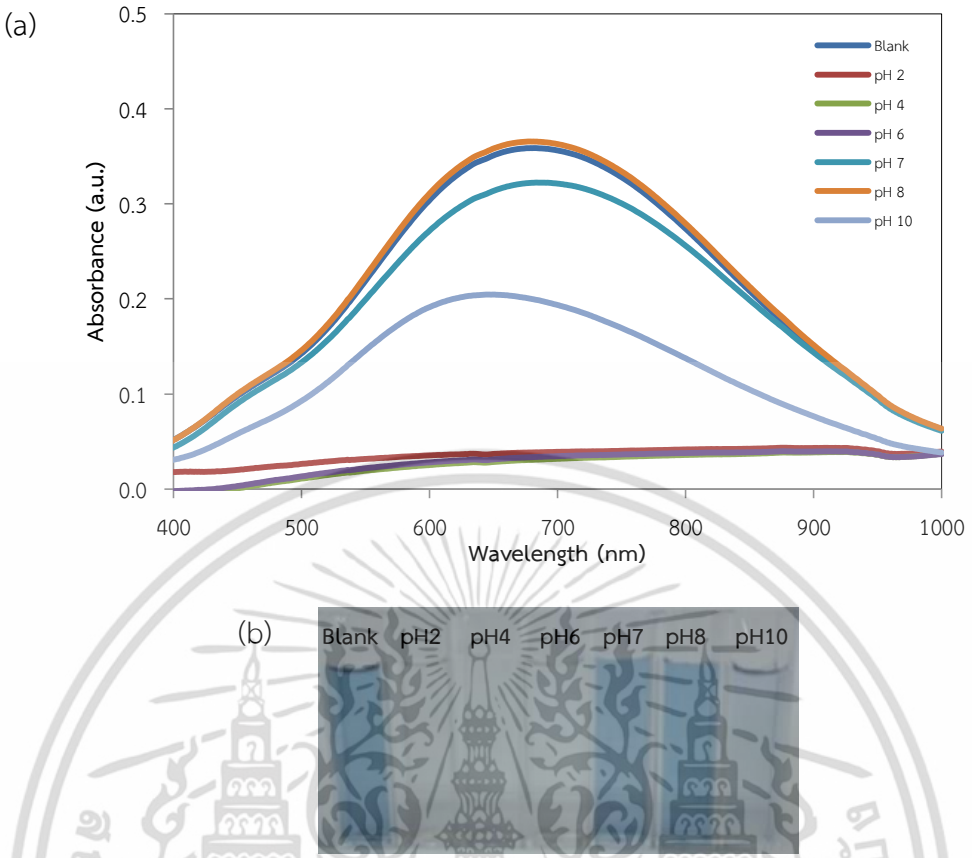


รูปที่ 4.14 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่าสามเหลี่ยมระดับนาโนที่พีเอชต่างๆ และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับพีเอชบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.01 M ที่พีเอชต่าง ๆ

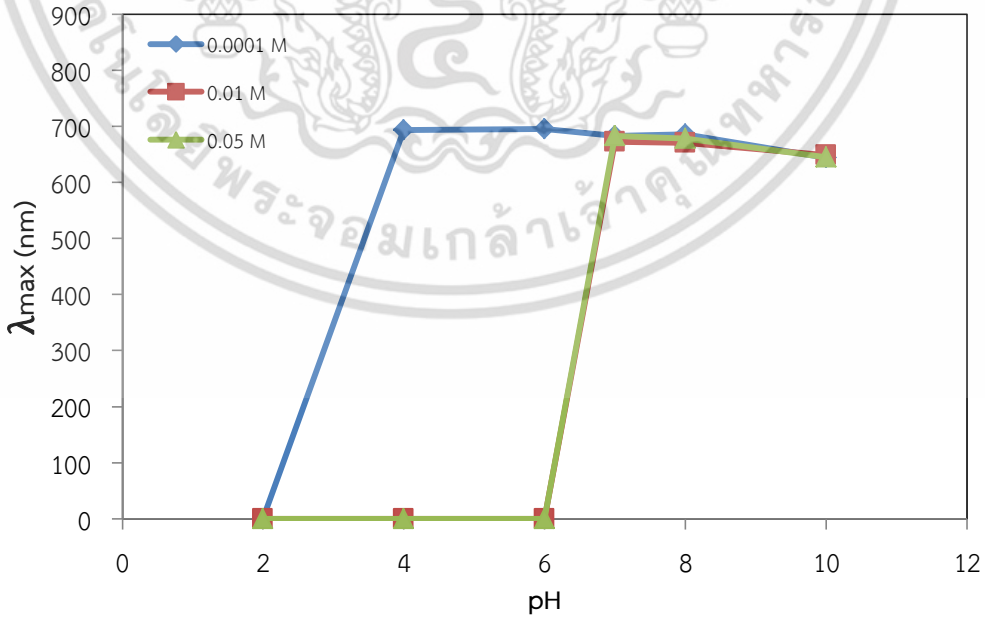
4.2.1.3 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.05 M

สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนภายใต้สภาวะ $AgNO_3$: $NaBH_4$: H_2O_2 : Na_3CT = 0.0053 : 0.0148 : 1.1803 : 0.0598 ผสมกับสารละลายบัฟเฟอร์ที่ความเข้มข้น 0.05 M ที่พีเอชเท่ากับ 2, 4, 6, 7, 8 และ 10 ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 สเปกตราแสดง (a)ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่พีเอชต่าง ๆ และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลาย เมื่อทำปฏิกิริยากับพีเอชบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.05 M ที่พีเอชต่าง ๆ



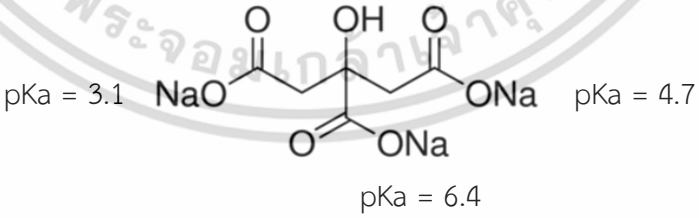
รูปที่ 4.16 สเปกตราแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุดของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีความเข้มข้น 0.001, 0.01 และ 0.05 M ที่พีเอชต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุด และค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ Blank ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีความเข้มข้น 0.001, 0.01 และ 0.05 M ที่พีเอชต่าง ๆ

[บัฟเฟอร์] / pH	0.001 M		0.01 M		0.05 M	
	λ_{max} (nm)	% error เมื่อเทียบกับ Blank	λ_{max} (nm)	% error เมื่อเทียบกับ Blank	λ_{max} (nm)	% error เมื่อเทียบกับ Blank
Blank	679	-	679	-	679	-
2	0	-	0	-	0	-
4	694	2.21	0	-	0	-
6	695	2.36	0	-	0	-
7	683	0.59	673	0.88	683	0.59
8	686	1.03	671	1.18	678	0.15
10	644	5.15	649	4.42	645	5.01

จากรูปที่ 4.13-4.16 และตารางที่ 4.9 เมื่อพิจารณาด้วยค่าคงที่การแตกตัว (pKa) ของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรตที่รักษาเสถียรภาพบนอนุภาคเงินระดับนาโน พบว่าสารละลายไตรโซเดียมซิเตรต มีค่า pKa เท่ากับ 3.1, 4.7 และ 6.4 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 [50] พบว่าที่พีเอชต่ำกว่าค่า pKa ในสภาวะที่เป็นกรด pH 2, pH 4 และ 6 ส่งผลให้ AgTNPs เกิดการสูญเสียสภาพ เนื่องจากสารซิเตรตเปลี่ยนเป็นกรดซิตริก ทำให้ปกป้อง AgTNPs น้อยลง และเกิดการตกตะกอนของ AgTNPs ด้วย และในสภาวะที่เป็นกลาง pH 7 และ pH 8 พบว่าค่าความยาวคลื่นสูงสุดไม่ shift ไป และค่าการดูดกลืนแสงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง นั่นคือสารละลายบัฟเฟอร์ที่พีเอชดังกล่าวไม่มีผลต่อ AgTNPs และในสภาวะที่เป็นเบสแก่ (pH 10) ส่งผลให้สารละลายบัฟเฟอร์แตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์ (-OH) สามารถทำปฏิกิริยากับซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ได้จึงทำให้สารละลายเปลี่ยนสีและมีค่าความยาวคลื่นสูงสุดลดลง เพราะเกิดเป็นตะกอนซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O)

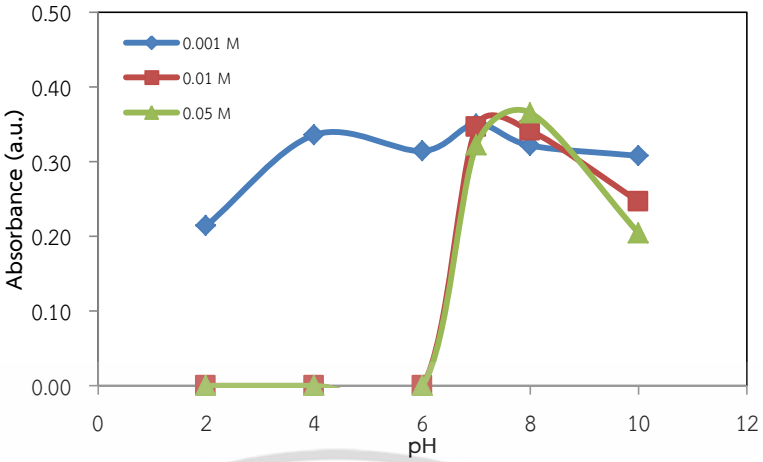


รูปที่ 4.17 สูตรโครงสร้างของโซเดียมซิเตรตไตรเบสิกไดไฮเดรต

4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของค่าความแรงของพันธะไอออนิก

จากการทดลองนี้ เตรียมโดยนำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนภายใต้สภาวะ $AgNO_3$: $NaBH_4$: H_2O_2 : Na_3CT = 0.0053 : 0.0148 : 1.1803 : 0.0598 ผสมกับสารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมความเข้มข้นเท่ากับ 0.001, 0.01 และ 0.05 M อัตราส่วนเท่ากับ 3.0 : 3.0 mL ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



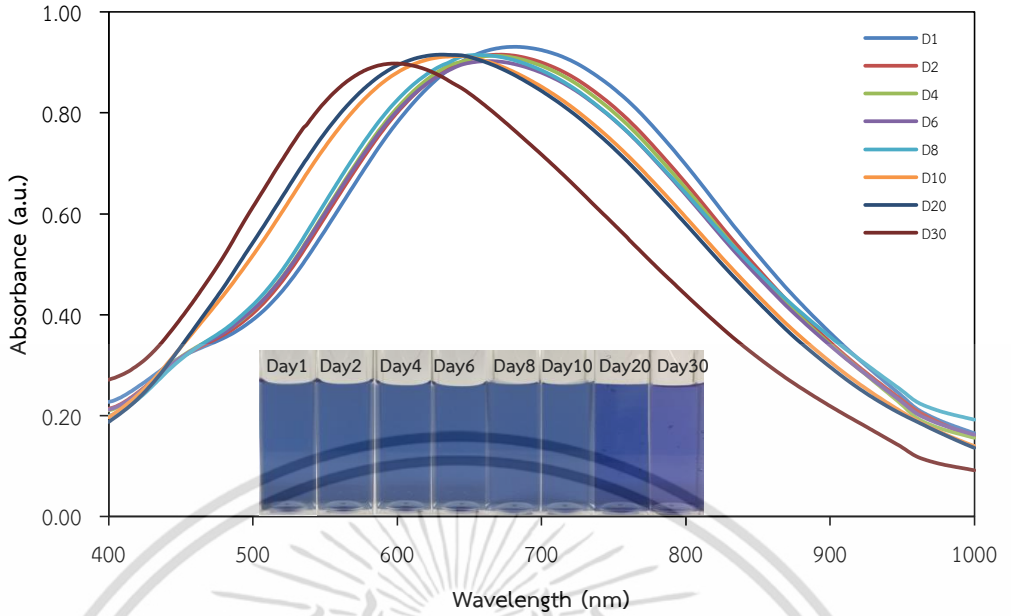
รูปที่ 4.18 สเปกตราแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่พีเอชบัฟเฟอร์ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.18 เมื่อพิจารณาสารละลายบัฟเฟอร์ในช่วงความเป็นกรดที่เตรียมจากสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ และช่วงความเป็นเบสที่เตรียมจากสารละลายฟอตเฟสบัฟเฟอร์ความเข้มข้นที่ 0.01 และ 0.05 M พบว่าสามารถเกิดแรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) กับซิลเวอร์ไอออน (Ag^{+}) ที่อยู่ในสารละลายได้ เกิดการสลายตัวในสภาวะที่มีความแรงของไอออนิกสูง จึงทำให้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเกิดการสลายตัว เนื่องจากเกลือของกรดและเบสในสารละลายบัฟเฟอร์และความเข้มข้น 0.001 M ก็สามารถเกิดแรงทางไฟฟ้าสถิตได้เช่นกัน แต่เนื่องจากสภาวะที่มีความแรงของไอออนิกต่ำกว่า ดังนั้นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนสามารถเกิดการสลายตัวเมื่อความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์มากกว่า 0.001 M นั่นคือความเข้มข้น 0.001 M ของสารละลายบัฟเฟอร์ถูกนำไปใช้เพื่อศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ต่อไป

4.2.3 การศึกษาเสถียรภาพของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ที่เวลาต่าง ๆ

สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 nm โดยทำการวัดซ้ำที่เวลา 1, 2, 5, 8, 20 และ 30 วัน สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 สเปกตราแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีสารรักษาเสถียรภาพที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.10 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของการดูดกลืนแสงอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีสารรักษาเสถียรภาพ ณ เวลาต่างๆ

วันที่	ความยาวคลื่นสูงสุด, λ_{max} (nm)	% error เมื่อเทียบกับ pH 7.87
0	683	0
1	683	0
2	672	1.61
4	667	2.34
6	662	3.07
8	657	3.80
10	644	5.71
20	630	7.75
30	597	12.44

จากรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.10 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มสูงขึ้น แถบพลาสมอนลดลง จึงเห็นสีของสารละลายเปลี่ยนแปลงไป แสดงให้เห็นว่าสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมีความเสถียรต่ำ ดังเกิดจากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2\,Ag^{+}_{(aq)} + 2\,OH^{-} \longrightarrow Ag_2O_{(s)} + H_2O \quad .. (1)$$

$$4\,Ag^{+}_{(aq)} + O_{2\,(g)} \longrightarrow 2Ag_2O_{(s)} + H_2O \quad ... (2)$$

พบว่าเมื่อระยะเวลามากขึ้น ในสารละลายยังมีปริมาณของซิลเวอร์ไอออน (Ag^{+}) ที่หลุดจากการออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ในน้ำ จึงทำให้เกิดเป็นตะกอนซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) ดังสมการที่ (1) และอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นตะกอนซิลเวอร์ออกไซด์ ดังสมการที่ (2) ส่งผลทำให้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมีการเปลี่ยนรูปร่างกลายเป็นรูปร่างแบบอื่น และมีความเสถียรภาพต่ำ ดังนั้นในการทดลองควรสังเคราะห์สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมาใช้ไม่ควรเกิน 10 วัน เพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

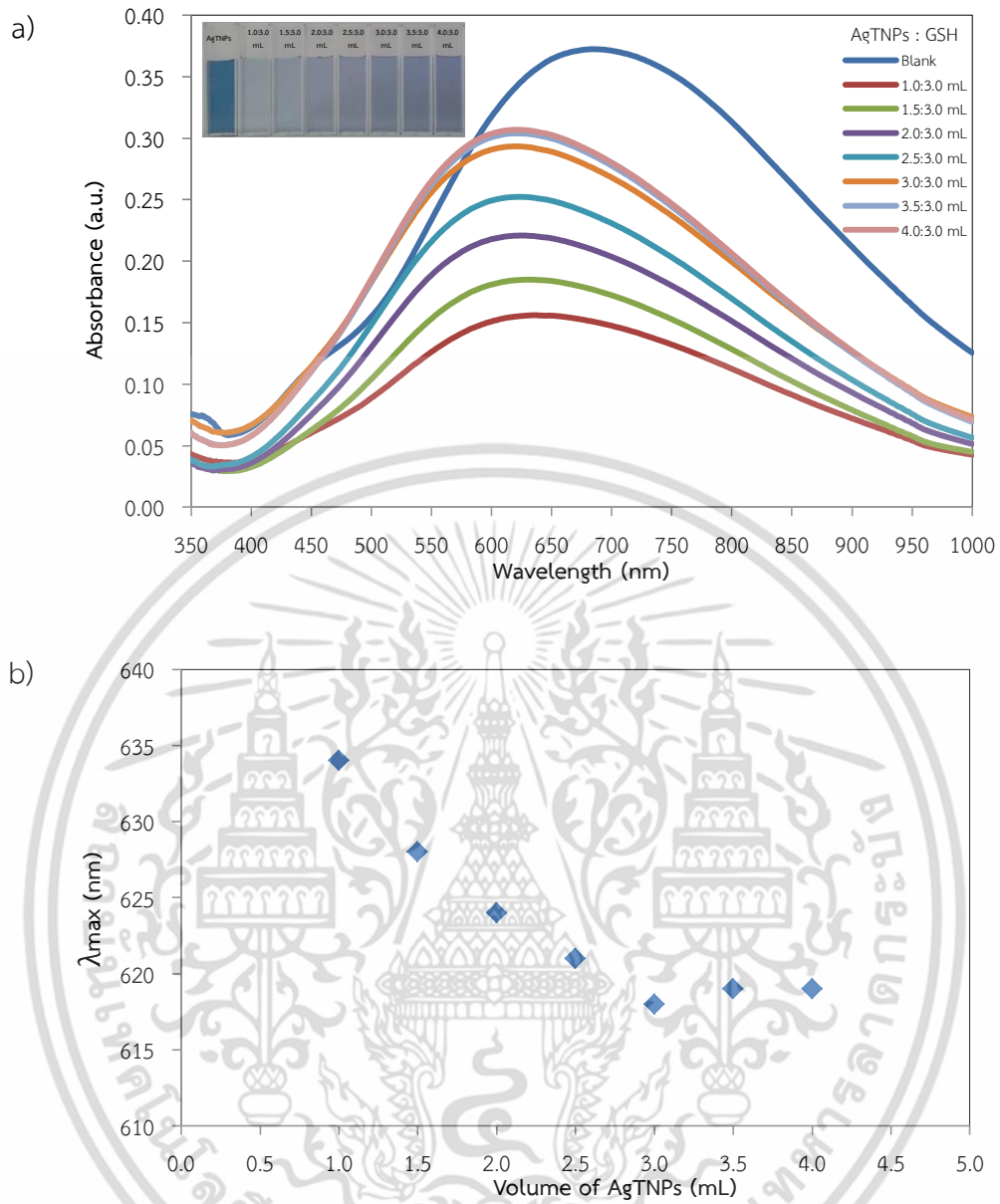
4.3 การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอน

งานวิจัยนี้ได้นำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมาทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูต้าไธโอน เพื่อศึกษาคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์ต่างๆ เช่น ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน ศึกษาความเป็นเส้นตรง ศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่อการวิเคราะห์หากลูต้าไธโอน ศึกษาผลกระทบของตัวรบกวนที่มีผลต่อการวิเคราะห์ ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ และศึกษาหาปริมาณกลูต้าไธโอนในตัวอย่าง เป็นต้น โดยตรวจวัดผลการเกิดปฏิกิริยาด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตโฟโตเมทรี

4.3.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายกลูต้าไธโอน

สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 3 mL นำมาผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ภายใต้การปรับเปลี่ยนปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ปริมาตร 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 mL ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสง และ (b) แสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในอัตราส่วนปริมาตรต่าง ๆ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนในปริมาตรคงที่

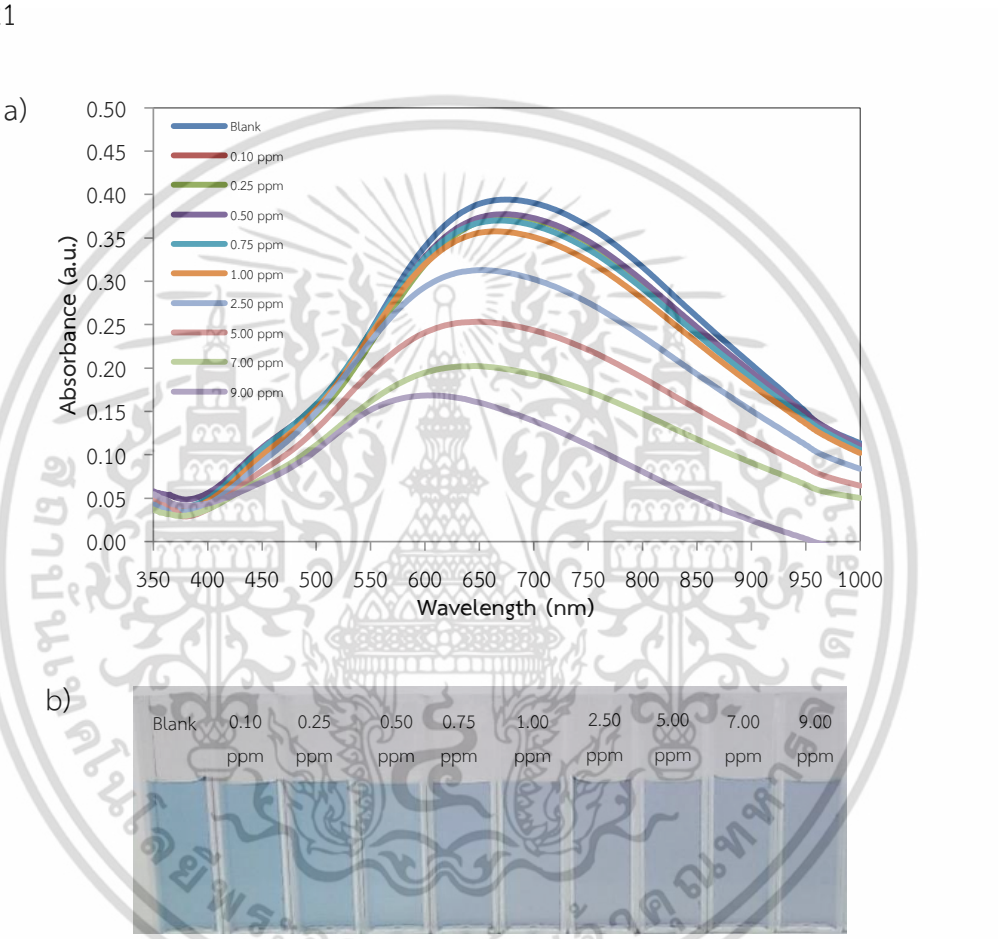
จากรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อปริมาณที่คงที่ของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน พบว่าเมื่อปริมาณของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเพิ่มขึ้น ความยาวคลื่นสูงสุดลดลง แล้วคงที่เมื่อปริมาณ 3.0 mL เป็นต้นไป ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนปริมาณสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนต่อสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน (AgTNPs : GSH) ที่ปริมาณ 3.0 : 3.0 mL เพื่อนำไปศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายกลูต้าไธโอนต่อไป เนื่องจากในอัตราส่วนนี้สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายได้ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีความจำเป็นต้องเลือกใช้ปริมาตรของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สูงกว่านี้ เนื่องจากจะเป็นการสิ้นเปลืองสารในการทดลอง

4.3.2 การศึกษาความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนที่มีผลต่ออนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

จากการทดลองนี้ ทำการศึกษาโดยนำสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 1, 2.5, 5, 7 และ 9 ppm ผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 สเปกตราแสดง (a) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

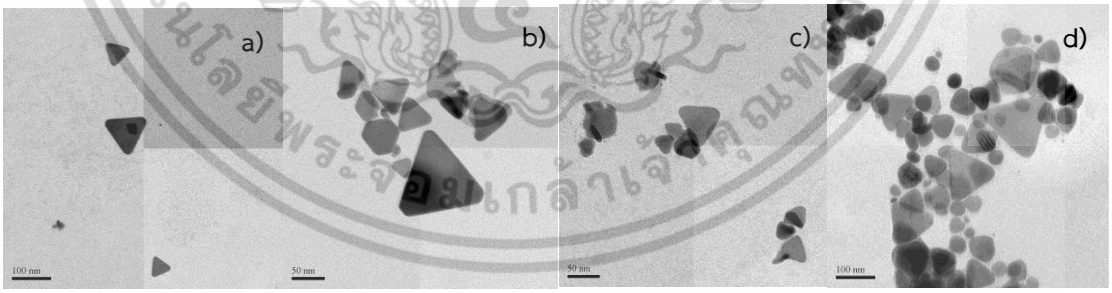
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นสารละลายกลูต้าไธโอน (ppm)	**ความยาวคลื่นสูงสุด, λ_{max} (nm)**
0.10	670
0.25	675
0.50	673
0.75	667
1.00	664
2.50	652
5.00	651
7.00	645
9.00	607

จากรูปที่ 4.21 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.1–9.0 ppm จะเห็นได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน

เพื่อเป็นการยืนยันพฤติกรรมการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนและกลูต้าไธโอน การศึกษาลักษณะรูปร่างของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และการศึกษาสภาพความเป็นประจุด้วยเทคนิคการวัดศักย์ซีต้าถูกนำมาใช้ในการพิสูจน์ ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงดังรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.22 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น (a) blank, (b) 0.5 ppm, (c) 1 ppm และ (d) 9 ppm

จากรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น อนุภาคเงินระดับนาโนรูปร่างทรงกลมจะถูกสร้างมากขึ้น ทำให้ความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายเปลี่ยนไป เนื่องจากมีอัตราส่วนของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมน้อยลง เพราะซิลเวอร์ไอออนที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายกลูต้าไธโอนโดยกลูต้าไธโอนมีความสามารถเป็นทั้งสารรักษาเสถียรภาพ (Stabilizing agent) และสารที่ให้อิเล็กตรอน (Reducing agent) ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของสารละลายกลูต้าไธโอนและสารละลายอนุภาคเงิน สามารถแสดงดังสมการ

$$GSSG + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow 2GSH \quad ; E_0 = -0.24\ V$$
$$Ag^+ + e^- \longrightarrow Ag \quad ; E_0 = +0.80\ V$$

เมื่อ GSSG = oxidizing form of glutathione
GSH = reduced glutathione

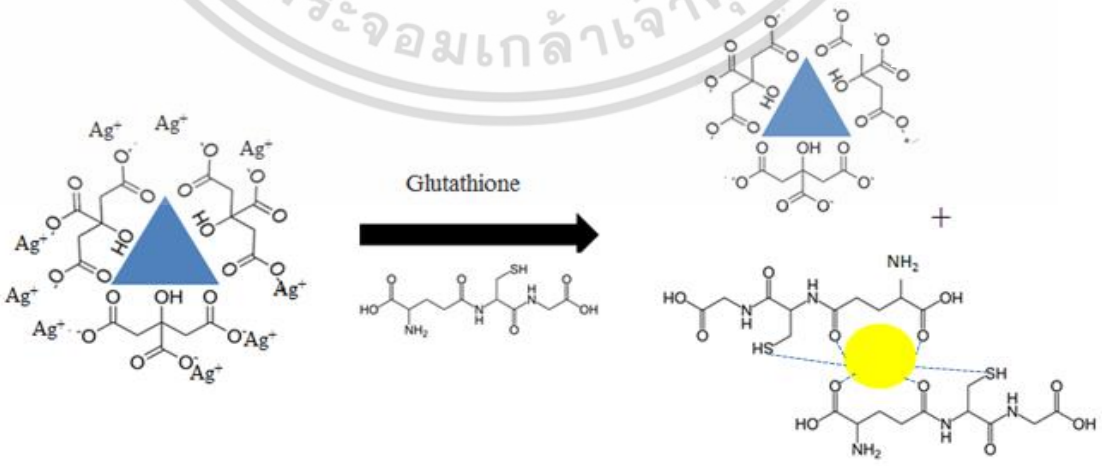
เพื่อยืนยันสภาพความเป็นประจุของสารละลายอนุภาคเงินผสมระหว่างอนุภาคเงินระดับนาโนรูปร่างสามเหลี่ยมและทรงกลม เทคนิคการวัดศักย์ซีต้า ถูกนำมาพิสูจน์ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าศักย์ซีต้าของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 5.0 ppm

ความเข้มข้นกลูต้าไธโอน (ppm)	**ค่าศักย์ซีต้า (mV)**
0	-47.80
0.5	-35.98
1.0	-34.52
5.0	-23.90

จากตารางที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าค่าศักย์ซีต้าของสารละลายผสมของอนุภาคเงินระดับนาโนรูปร่างสามเหลี่ยมและทรงกลม มีสภาพความเป็นประจุลบลดลง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายกลูต้าไธโอนเพิ่มขึ้น

จากปรากฏการณ์รับรู้ระหว่างสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไธโอน สามารถแสดงกลไกได้ดังนี้



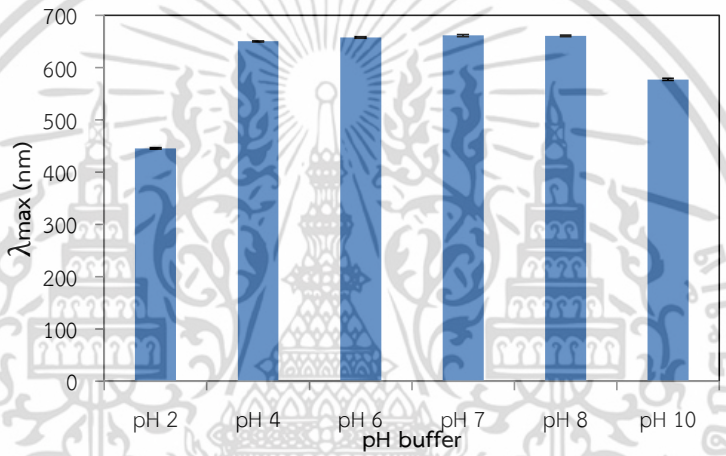
รูปที่ 4.23 กลไกปฏิกิริยาของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนกับสารละลายกลูต้าไธโอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.23 เมื่อสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พบว่าซิลเวอร์ไอออนที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายที่เกิดจากการออกซิไดซ์ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะถูกรีดิวซ์และรักษาเสถียรภาพด้วยสารละลายกลูต้าไธโอน ทำให้เกิดอนุภาคเงินรูปร่างทรงกลมที่ถูกล้อมรอบด้วยกลูต้าไธโอน จึงทำให้สีของสารละลายเปลี่ยนแปลงไป

4.3.3 อิทธิพลของพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีผลต่ออนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

จากการทดลองนี้ เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.001 M ที่มีพีเอชเท่ากับ 2, 4, 6, 7, 8 และ 10 เป็นตัวทำละลายสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 1.0 ppm ผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนอัตราส่วนปริมาตร 3.0:3.0 mL นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 สเปกตราแสดง (a) ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน และ (b) ภาพแสดงสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนช่วงค่า pH ต่าง ๆ ที่สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.001 M

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) และค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ Blank ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอนช่วงค่า pH ต่าง ๆ ที่สารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.001 M

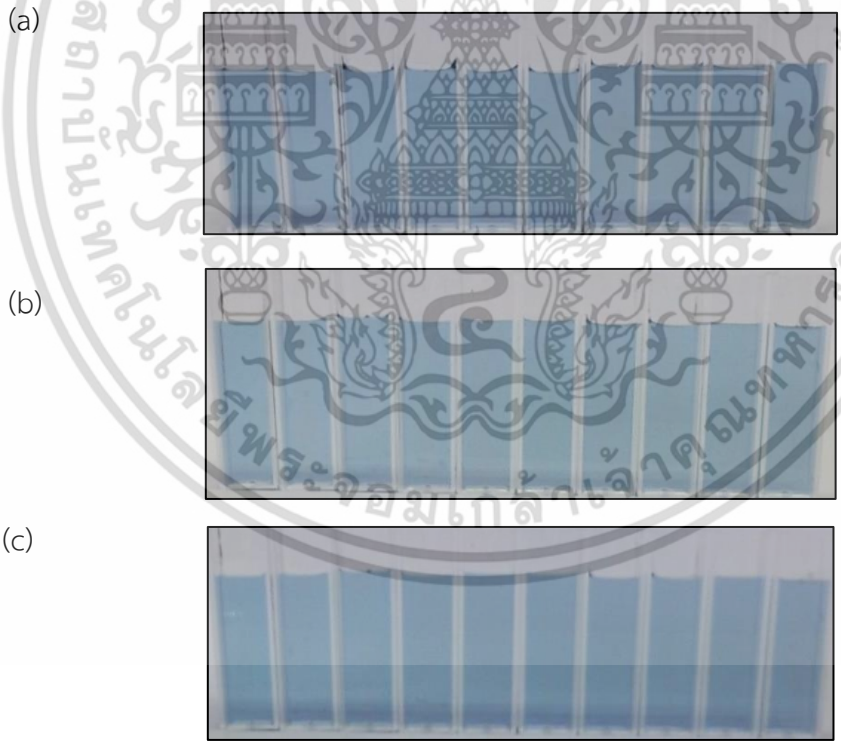
สารละลายบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.001 M	ความยาวคลื่นสูงสุด, λmax (nm)	% error เมื่อเทียบจาก Blank
Blank	661	-
2	434	34.34
4	650	1.66
6	657	0.61
7	661	0.00
8	660	0.15
10	577	12.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลอง พิจารณาที่ความเข้มข้น 0.001 M ของสารละลายบัฟเฟอร์ พบว่า pH 2-10 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแถบพลาสมอนมากที่สุด ณ pH 2 และ pH 10 เนื่องจากที่ pH 2 เตรียมจากกรดไฮโดรคลอริกที่สามารถแตกตัวเป็นโปรตอน (H^+) ที่สามารถทำให้อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนเกิดการสลายตัวได้ และที่ pH 10 สารละลายบัฟเฟอร์สามารถแตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์ (OH^-) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับซิลเวอร์ไอออน ทำให้เกิดตะกอนของซิลเวอร์ไฮดรอกไซด์เกิดขึ้น จึงเห็นการเปลี่ยนสีของสารละลายที่พีเอชดังกล่าว แต่ในขณะเดียวกัน pH 4-8 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นกลูต้าไธโอนสามารถวัดได้ในช่วง pH 4-8 ซึ่งผลสอดคล้องกับการเปลี่ยน pH ของ buffer ที่พบว่าเมื่อ pH 2 สารมีการเสียสภาพ แต่เมื่อมี GSH มีการเสียสภาพน้อยลง แสดงให้เห็นว่า GSH ช่วยรีดิวซ์ Ag^+ กลายเป็น AgNPs เพิ่มขึ้น

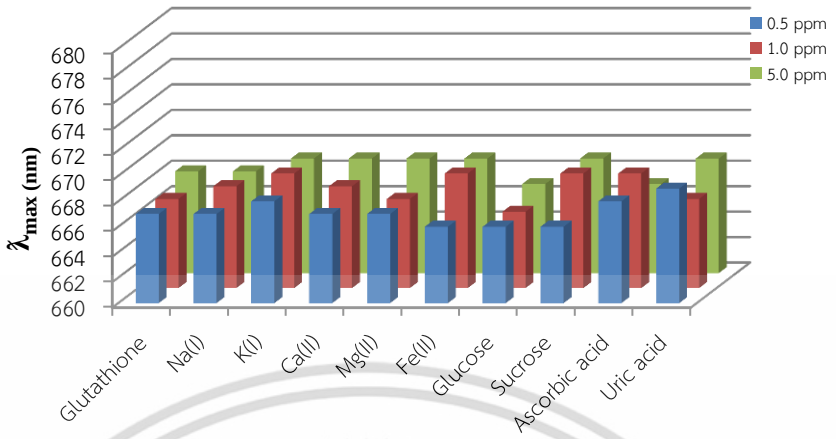
4.3.4 การศึกษาผลกระทบของสารรบกวนที่มีผลต่อการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอน

จากการทดลองนี้ เตรียมสารละลายสารรบกวนแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 5.0 ppm โดยผสมลงไปในสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนอยู่ จากนั้นทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดและสร้างกราฟ เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของสารรบกวนแต่ละชนิดและแต่ละความเข้มข้นดังแสดงในรูปที่ 4.25-4.26 และตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.25 ภาพสีของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีสารรบกวน Glutathione, $NaNO_3$, KNO_3, $CaSO_4$, $MgSO_4$, $FeSO_4$, Glucose, Sucrose, Ascorbic acid และ Uric acid โดยรูป (a) ความเข้มข้น 0.5 ppm, (b) ความเข้มข้น 1.0 ppm และ (c) ความเข้มข้น 5.0 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กราฟแท่งแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารรบกวนกับชนิดของสารรบกวนที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตารางที่ 4.14 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีสารรบกวนชนิดต่าง ๆ

ความเข้มข้น / สารรบกวน	0.5 ppm		1.0 ppm		5.0 ppm	
	λ_{max} (nm)	% error เมื่อเทียบกับ Glutathione	λ_{max} (nm)	% error เมื่อเทียบกับ Glutathione	λ_{max} (nm)	% error เมื่อเทียบกับ Glutathione
Glutathione	667	-	667	-	668	-
$NaNO_3$	667	0	668	0.15	668	0
KNO_3	668	0.15	669	0.30	669	0.15
$CaSO_4$	667	0	668	0.15	669	0.15
$MgSO_4$	667	0	667	0	669	0.15
$FeSO_4$	666	0.15	669	0.30	669	0.15
Glucose	666	0.15	666	0.15	667	0.15
Sucrose	666	0.15	669	0.30	669	0.15
Ascorbic acid	668	0.15	669	0.30	667	0.15
Uric acid	669	0.30	667	0	669	0.15

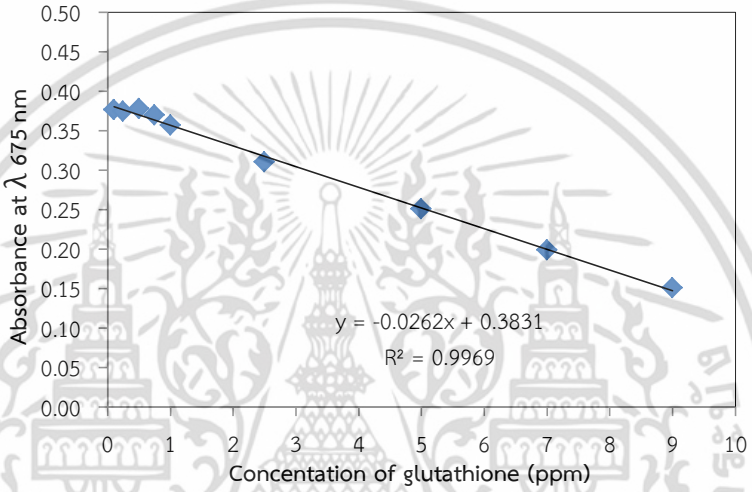
จากกราฟรูปที่ 4.25-4.26 และตารางที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่ไม่มีตัวรบกวนและสารละลายที่มีตัวรบกวนนั้น ๆ อยู่ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ตรวจวัดได้ มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อสังเกตสีที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นเดียวกันของตัวรบกวนต่าง ๆ พบว่าการตรวจวัดกลูต้าไธโอนมีความจำเพาะเจาะจงสูงมาก เนื่องจากสีของสารละลายที่มีสารรบกวนไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างอย่างชัดเจนจากสีของสารละลายที่ไม่มีสารรบกวน จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวรบกวนนั้น ๆ ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์

4.3.5 การศึกษาความเป็นเส้นตรง

จากการทดลองนี้ ทำการศึกษาโดยการสร้างกราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 1, 2.5, 5, 7 และ 9 ppm จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 กราฟมาตรฐานแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.27 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายกลูต้าไธโอนกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนช่วงความเข้มข้น 0.1-9.0 ppm พบว่าได้สมการถดถอยเชิงเส้นตรง เท่ากับ y = -0.0262x + 0.3831 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9969

4.3.6 ความเที่ยง (Precision) ของวิธีวิเคราะห์

การศึกษาความเที่ยงของวิธีสามารถพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 675 nm ของสารละลายแบลงค์ ทำซ้ำ 10 ครั้ง ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแบลงค์

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 675 nm
1	0.4077
2	0.4108
3	0.4111
4	0.4100
5	0.4093
6	0.4106
7	0.4086
8	0.4091
9	0.4094
10	0.4089
ผลรวม	4.0955
ค่าเฉลี่ย	0.4096
SD	0.0011

จากตาราง เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแบลงค์แทนค่าในสมการเพื่อคำนวณค่า %RSD สามารถแสดงผลการคำนวณได้ดังนี้

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

$$\%\ RSD = \frac{0.0011}{0.4096} \times 100$$

$$\%\ RSD = 0.2685$$

จากตารางที่ 4.15 พบว่าค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 0.2685 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 5 ดังนั้นจึงถือได้ว่าวิธีนี้มีความเที่ยงที่ดี

4.3.7 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

จากการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงของสารของสารที่ความยาวคลื่น 675 nm และการวัดสารละลายแบลงค์ ทำซ้ำจำนวน 10 ครั้ง หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร 3SD of blank/Slope of calibration เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Blank และ Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน สามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.8 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

จากการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ โดยการใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงของสารที่ความยาวคลื่น 675 nm และการวัดสารละลายแบลงค์ ทำซ้ำ 10 ครั้ง หลังจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตร 10SD of blank/Slope of calibration เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Blank และ Slope คือ ค่าความชันที่ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน สามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของวิธี	ความเข้มข้น (ppm)
ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)	0.1225 ± 0.001
ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (LOQ)	0.4084 ± 0.001

จากตารางที่ 4.12 พบว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด มีค่าเท่ากับ 0.1225 ± 0.001 ppm และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เท่ากับ 0.4084 ± 0.001 ppm ดังนั้นวิธีวิเคราะห์นี้สามารถหาปริมาณกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นต่ำได้

4.3.9 การศึกษาหาปริมาณกลูต้าไธโอนในอาหารเสริม

จากการทดลองนี้ ทำโดยเตรียมสารละลายตัวอย่างอาหารเสริมผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ด้วยอัตราส่วน 3.0:3.0 mL จากนั้นตั้งทิ้งไว้ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 675 nm สามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ตารางการคำนวณหาปริมาณกลูต้าไธโอนในอาหารเสริม

ตัวอย่าง	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 675 นาโนเมตร				ปริมาณกลูต้าไธโอน ใน 1 เม็ด (ppm)	%error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	$\bar{X}$		
อาหารเสริม	0.2625	0.2621	0.2628	0.2625	230.08	7.97

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.17 พบว่าในอาหารเสริม 1 เม็ด มีปริมาณกลูต้าไธโอนอยู่ 250 ppm พบว่าวิธีวิเคราะห์นี้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนได้ 230.08 ppm ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์เกิดความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ระบุไว้ 7.97 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.10 ความแม่น (Accuracy) ของวิธีวิเคราะห์

จากการทดลองนี้ ทำโดยเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 5.0 ppm ด้วยสารตัวอย่าง ผสมกับสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนต่อสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน เท่ากับ 3.0:3.0 mL ซึ่งนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 675 nm สามารถแสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 การคำนวณค่าร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณกลูต้าไธโอน

ประเภทของตัวอย่าง	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละของการวิเคราะห์คืนกลับ
	ที่เติมลงไป	ที่ตรวจพบ**	
น้ำกลั่น	0	n.d.	-
	0.5	0.5190 ± 0.0018	103.80
	1.0	1.0496 ± 0.0053	104.96
	5.0	5.3969 ± 0.0901	107.93
อาหารเสริม	0	4.6016 ± 0.0133	-
	0.5	5.1030 ± 0.0209	100.28
	1.0	5.6068 ± 0.0259	100.52
	5.0	9.4503 ± 0.2105	96.97

*n.d. คือ ตรวจไม่พบ (non detectable)

**mean + SD (n = 3)

จากผลการทดลองพบว่า จากตารางที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ปริมาณกลูต้าไธโอนมีร้อยละการคืนกลับอยู่ในช่วงร้อยละ 103.80–107.93 % และอยู่ในช่วง 96.97–100.28 % สำหรับตัวอย่างน้ำกลั่นและอาหารเสริม ตามลำดับ นั่นคือ วิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นนี้ไม่ถูกรบกวนจากองค์ประกอบภายในตัวอย่าง จึงถือได้ว่าวิธีวิเคราะห์นี้มีความแม่นสูง

จากการศึกษาปรากฏการณ์รับรู้และคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังตารางที่ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 สรุปคุณลักษณะของวิธีการศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

คุณลักษณะของวิธี	ค่าที่ได้
ช่วงความเป็นเส้นตรง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.1 - 9.0
สมการเชิงเส้นตรง	-0.0262x + 0.3831
สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)	0.9969
% recovery	103.80–107.93 (น้ำกลั่น)
	96.97–100.28 (อาหารเสริม)
% RSD (n=10)	0.2685
LOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.1225
LOQ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.4084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้ในการวิเคราะห์หาปริมาณกลูต้าไธโอน โดยอาศัยเทคนิคการตรวจวัดเชิงสี (Colorimetric method) การศึกษาในครั้งนี้ ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้ ขั้นตอนที่หนึ่งคือ การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) โดยวิธีการเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical reduction method) โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ ใช้ไตรโซเดียมซิเตรตเป็นสารรักษาเสถียรภาพและใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวกัด (Etchant) อนุภาคเงินรูปร่างกลมให้กลายเป็นอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ขั้นตอนที่สองคือ การสังเคราะห์อนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) ที่มีการเพิ่มสารรักษาเสถียรภาพ และในขั้นตอนสุดท้ายคือ การนำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

ขั้นตอนแรก ศึกษาปัจจัยและอิทธิพลต่างๆ ของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนโดยทำการศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ที่ความเข้มข้น 0.15, 0.17, 0.19, 0.21, 0.23, 0.24, 0.26 และ 0.28 mM พบว่า เกิดสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่มีสีส้มแดง ม่วง น้ำเงิน และฟ้า ตามลำดับ และความเข้มข้นของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เหมาะสม คือ 0.28 mM ให้สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนเป็นฟ้า ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้เกิดอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน (AgTNPs) มากที่สุดและมีจำนวนอนุภาคสามเหลี่ยมมากที่สุด ต่อมาทำการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.93, 2.23, 3.71, 4.64, 9.28, 18.55, 22.27 และ 55.66 mM ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 22.27 mM เพราะเป็นความเข้มข้นที่สามารถให้รูปร่างสามเหลี่ยมของอนุภาคเงินระดับนาโนได้ อีกทั้งสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนสีน้ำเงินเป็นคุณลักษณะเฉพาะของการเกิดรูปร่างสามเหลี่ยมของอนุภาคเงินระดับนาโน และสุดท้ายทำการศึกษาความเข้มข้นของไตรโซเดียมซิเตรตที่ความเข้มข้น 0.50, 0.75, 1.00, 1.13, 1.50 และ 2.00 mM ตามลำดับ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไตรโซเดียมซิเตรตที่ความเข้มข้น 1.13 mM เนื่องจากถ้าใช้ความเข้มข้นสูงมากไปส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เร็วและสมบูรณ์ จึงได้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก และรูปร่างสามเหลี่ยมน้อยไป

ขั้นตอนสุดท้าย คือ การนำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนมาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณกลูต้าไธโอน จากผลการศึกษาการวิเคราะห์กลูต้าไธโอนโดยใช้สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน พบว่า กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนกับค่าการดูดกลืนแสง ในช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ระหว่าง 0.1-9.0 ppm มีสมการถดถอยเชิงเส้นตรง คือ $y = -0.0262x + 0.3831$ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9969 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 0.12 ± 0.001 ppm ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ) เท่ากับ 0.40 ± 0.001 ppm ค่าร้อยละของการคืนกลับได้เท่ากับ 103.80–107.93% และ 96.97–100.28% ในสารตัวอย่างน้ำกลั่นและยาเม็ด ตามลำดับ ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบของตัวรบกวน พบว่าตัวรบกวนไม่มีผลต่อการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจวัดนี้มีความจำเพาะต่อการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การสังเคราะห์สารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนให้ได้สีสารของสารละลายที่เหมือนกันทุกครั้งค่อนข้างยาก ควรเพิ่มการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการวิเคราะห์ เช่น การควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. ควรนำสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูต้าไธโอน ไปการศึกษาด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์โฟตอนสเปกโทรสโกปี เพื่อยืนยันชนิดและจำนวนธาตุองค์ประกอบ ชนิดพันธะทางเคมี และสถานะออกซิเดชันของอะตอมที่มีในสารละลาย

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนควรป้องกันให้ออกซิเจนเข้าไปในขวดสารตั้งต้น ขณะทำการชั่งสารให้น้อยที่สุด เพราะออกซิเจนจะให้ประสิทธิภาพของกลูต้าไธโอนลดลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] World Health Organization (WHO). 1985. “Technical Report Series 724 Energy and Protein Requirement,” *Report of a joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation*. 64-6.

[2] ประสงค์ เทียนบุญ และณัฏฐกาล ลีลารุ่งระยับ. 2550. “กลูต้าไธโอนและผลต่อสุขภาพ.” *วารสารคลีนิคอาหารและโภชนาการ*. 1(1) : 20-29.

[3] Yusuke, I. el at. 2009. “Chromatographic and mass spectrometric analysis of glutathione in biological samples.” *Journal of Chromatography B*. 877 : 3309–3317.

[4] Afsaneh, S. el at. 2009. **“**Simultaneous Electrochemical Determination of Glutathione and Glutathione Disulfide at a Nanoscale Copper Hydroxide Composite Carbon Ionic Liquid Electrode.” *Analytical Chemistry*. 18(81) : 7538-7543.

[5] Ling, C. Xiuli, F. Wenhui, L. and Lingxin, C. 2013. “Highly Sensitive and Selective Colorimetric Sensing of Hg^{2+} Based on the Morphology Transition of Silver Nanoprisms.” *ACS Applied Materials & Interfaces*. 5 : 284–290.

[6] Wikipedia. 2015. **นาโนเทคโนโลยี.** [Online]. Available: http://th.wikipedia.org/wiki/ นาโนเทคโนโลยี.

[7] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2558. **นาโนเทคโนโลยี.** [Online]. Available : http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=32&chap=8&page=t32-8-infodetail02.html.

[8] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. **นาโนเทคโนโลยี.** [Online]. Available : http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/page/Unit1-5.html.

[9] Supading77. 2015. **นาโนเทคโนโลยี.** [Online]. Available : https://sites.google.com/site/supading77/nano-thekhnologi.

[10] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2558. **วัสดุนาโน.** [Online]. Available : http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=32&chap=8&page=t32-8- infodetail04.html.

[11] Maria, D. 2015. **Nanotechnology.** [Online]. Available : https://www.pacific-environment.com/news/nanotechnology-small-particles-big-risks.

[12] วิศิษฎา บารมี และสหัสริน พวรรณา. 2016. **นาโนเทคโนโลยีชีวภาพกับการเกษตรไทย**. [Online]. Available : https://nanotechnoblog.wordpress.com.

[13] Robert, A. Freitas, Jr. 2010. **The Future of Nanomedicine**. [Online]. Available : http://www.wfs.org/Dec09-Jan10/freitas.html.

[14] Wikipedia. 2015. **การแพทย์นาโน.** [Online]. Available: http://th.wikipedia.org/wiki/.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[15] Nakarin, C. 2555. **นาโนเทคโนโลยีทางการแพทย์**. [Online]. Available : http://nanotech education.blogspot.com.

[16] Siriwan, T. 2012. "Gold Nanoparticles: Synthesis and Applications for Chemical Analysis." *J. Sci. Technol MSU*. 32(2) : 237–245.

[17] Nguyen, T.B. Do, T.L. Nguyen, T.H. and Le, T.Q. 2008. "Silver nanoparticles prepared by laser ablation and their optical characteristics." *VNU Journal of Science, Mathematics – Physics.* 24 : 1-5.

[18] Boutinguiza, M. et al. 2014. "Production of silver nanoparticles by laser ablation in open air." *Applied Surface Science*. 336 : 108-111.

[19] Hongshui, W. et al. 2005. "Preparation of silver nanoparticles by chemical reduction method." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 256 : 111-115.

[20] Ki, C.S. et al. 2009. Preparation of colloidal Silver nanoparticles by chemical reduction method**.** *Korean Journal of Chemical Engineering*. 26(1) : 153-155.

[21] Tewarak, P. 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**.**

[22] Xinyi, D. et al. 2010. "Synthesis of Triangular Silver Nanoprisms by Stepwise Reduction of Sodium Borohydride and Trisodium Citrate." *J. Phys. Chem. C*. 114 : 2070–2074.

[23] Huiying, J. et al. 2006. "A simple method to synthesize triangular silver nanoparticles by light irradiation." *Spectrochimica Acta Part A*. 64 : 956–960.

[24] Jian, Z. et al. 2009. "Plasmon-Mediated Synthesis of Silver Triangular Bipyramids." *Angew. Chem Int. Ed*. 48 : 7787–7791.

[25] โชคชัย พุทธรักษา. 2557. "การประยุกต์ใช้เทคนิคคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ในไบโอเซนเซอร์**.**" *วารสารวิทยาศาสตร์*. 30(2) : 167-186.

[26] Greg, E. 2012. **Surface Plasmon Resonance.** [Online]. Available : https://gregemmerich. wordpress.com/2012/11/16/surface-plasmon-resonance-technology-overview-and-practical-applications.

[27] อัจฉราภรณ์ วรารัตน์ธนาเวช. 2548. **การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและการทำงานของกรดอะมิโนบริเวณส่วนเร่งปฏิกริยาของเอนไซม์ กลูตาไธโอน ทรานเฟอเรส.** [Online]. Available : http://www.thaithesis.org/detail.php?id=1202548000370.

[28] ศูนย์วิทยบริการ สำนักคณะกรรมการอาหารและยา. 2544. **กลูต้าไธโอน.** [Online]. Available : http://elib.fda.moph.go.th/library/default.asp?page2=subdetail&id_L1=27&id_L2=31218&id_L3=3003.

[29] บริษัท สนุก ออนไลน์ จำกัด. 2556. **อันตรายจากกลูต้าไธโอน.** [Online]. Available : http://guru.sanook.com/7240/.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[30] เอกภพ มะลิทอง. 2556. **การศึกษาประสิทธิภาพการรักษาฝ้าโดยวิธีใช้กลูต้าไธโอนฉีดเข้าใต้ผิวหนังควบคู่กับการทายารักษาฝ้าสูตรผสม เปรียบเทียบกับการทายารักษาฝ้าสูตรผสมในชาวเอเชีย:การศึกษานำร่อง.** [Online]. Available : http://www.mfu.ac.th/school/antiaging/File_PDF/research56/Proceeding56_34.pdf.

[31] แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. 2552. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[32] **Transmission electron microscopy.** [Online]. Available : http://www.il.mahidol.ac.th.

[33] **Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).** [Online]. Available: http://www.sc.chula.ac.th/department/Chemical_Technology/Analytical_unit/FTIR.html.

[34] จิระพงศ์ อารินทร์ และคณะ. 2015. **Zeta potential.** [Online]. Available : www.chem.science.cmu.ac.th/userfiles/file/**zeta_potential**.ppt.

[35] Wikipedia. 2016. **X-ray photoelectron spectroscopy**. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_photoelectron_spectroscopy

[36] ณรงค์ ไชยสุต. 2552. **เครื่องมือวิเคราะห์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

[37] เกียรติพงษ์ ได้การ. 2012. **X-ray Diffactometer XRD**. [Online]. Available : http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument-menu -xrd. Html.

[38] Ayesha, A. Aswathy, R. Preethy, C. and Sudheer, K. 2015. "Highly selective colorimetric detection and estimation of Hg^{2+} at nano-molar concentration by silver nanoparticles in the presence of glutathione." *Spectrochimica Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 137 : 503–508.

[39] Masaharu, T. et al. 2012. "Rapid Transformation from Spherical Nanoparticles, Nanorods, Cubes, or Bipyramids to Triangular Prisms of Silver with PVP, Citrate, and H_2O_2." *Langmuir*. 8845–8861.

[40] Yang, X.H. 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." *Analytical Chimica Acta*. 798 : 74– 81.

[41] Thanyaporn, K. et al. 2014. "Glutathione and L-cysteine modified silver nanoplates-based colorimetric assay for a simple, fast, sensitive and selective determination of nickel." *Talanta*. 128 : 215–220.

[42] Anambiga, I.V. et al. 2013. "Colorimetric Detection of Lead Ions Using Glutathione Stabilized Silver Nanoparticles." International Journal of Scientific & Engineering Research. 4(5) : 710-715.

[43] Guoli, S. Wentao, S. Kai, L. Zhanfang, M. 2011. "Synthesis of PSS-capped triangular silver nanoplates with tunable SPR." *Colloids and Surfaces A : Physicochemical Physicochemical and Engineering Aspects*. 380 : 257-260.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[44] Shuang, C. Huiling, G. Weiwei, S. Chao, L. and Qipeng, Y. 2014. "Colorimetric detection of cysteine using noncrosslinking aggregation of fluorosurfactant-capped silver nanoparticles." *Sensors and Actuators B: Chemical*. 190 : 673– 678.

[45] Haibing, L. Zhimin, C. and Cuiping, H. 2009. "Glutathione-stabilized silver nanoparticles as colorimetric sensor for Ni^{2+} ion." *Sensors and Actuators B: Chemical*. 143 : 87-92.

[46] Filippoa, E. Mannob, D. Buccolierib, A. and Serra, A. 2013. "Green synthesis of sucralose-capped silver nanoparticles for fast colorimetric triethylamine detection." *Sensors and Actuators B: Chemical*. 178 : 1-9.

[47] Tewarak, P. et al. 2013. "H_2O_2-triggered shape transformation of silver nanospheres to nanoprisms with controllable longitudinal LSPR wavelengths." *RSC Advances*. 3 : 12886–12894.

[48] Prokopec, V. et al. 2012. "Use of Vibrational Spectroscopic Techniques for the Characterization of Structured Particles for Chemical Robots." *Proceedings of the international conference nanomaterials: applications and properties.* 1(3) : 1–4.

[49] Kumari, J. Mamta, B. Ajeet, S. 2016. "Characterization of silver nanoparticles synthesized using Urtica dioica Linn. leaves and their synergistic effects with antibiotics." *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 9 : 217-227.

[50] Amornrassamee, L. and Saowapak, T. 2016. "A novel colorimetric method for detection of gamma-aminobutyric acid based on silver nanoparticles." *Sensors and Actuators B*. 229 : 315-320.

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 0.5882 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml จะได้สารละลายไตรโซเดียมซิเตรต ความเข้มข้น 20 mM ปริมาตร 100 ml

1.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้น 100.00 mM

ชั่งน้ำหนักโซเดียมโบโรไฮไดรด์มา 0.0946 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 ml จะได้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้น 20 mM ปริมาตร 25 ml

2. การศึกษาปรากฏการณ์รับรู้ของสารละลายและแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน

2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 1000 ppm

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

2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้นต่างๆ

ปิเปตสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 1000 ppm มาตามตารางด้านล่าง จากนั้นละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ในขวดวัดปริมาตร 25 ml จะได้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงการเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นที่ต้องการ (ppm)	ปริมาตรสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 1000 ppm (ml)
0.1	0.0025
0.25	0.0062
0.5	0.0125
0.75	0.0187
1	0.0250
2.5	0.0625
5	0.1250
7	0.1750
9	0.2250

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนสำหรับการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่น (Accuracy)

3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 20 ppm

ชั่งน้ำหนักกลูต้าไธโอนมา 0.0020 g ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นและอาหารเสริมที่ถูกเจือจาง 1000 เท่า ในขวดวัดปริมาตร 100 ml จะได้สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 20 ppm ที่เตรียมได้จากน้ำกลั่นและอาหารเสริมที่ถูกเจือจาง 1000 เท่า

3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 0.5 ppm

ปิเปตสารละลายมาตราฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 100 ppm มา 2.0 ml ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นและอาหารเสริมที่เจือจาง 1000 เท่า ในขวดวัดปริมาตร 100 ml จะได้สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 0.4 ppm ที่เตรียมได้จากน้ำกลั่นและอาหารเสริมที่ถูกเจือจาง 1000 เท่า

3.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 1.0 ppm

ปิเปตสารละลายมาตราฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 100 ppm มา 3.5 ml ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นและอาหารเสริมที่เจือจาง 1000 เท่า ในขวดวัดปริมาตร 100 ml จะได้สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 0.7 ppm ที่เตรียมได้จากน้ำกลั่นและอาหารเสริมที่ถูกเจือจาง 1000 เท่า

3.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 5.0 ppm

ปิเปตสารละลายมาตราฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 100 ppm มา 5.0 ml ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นและอาหารเสริมที่เจือจาง 1000 เท่า ในขวดวัดปริมาตร 100 ml จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน ความเข้มข้น 1.0 ppm ที่เตรียมได้จากน้ำกลั่นและอาหารเสริมที่ถูกเจือจาง 1000 เท่า

4. การคำนวณหาความเข้มข้น

4.1 **การคำนวณหาความเข้มข้นของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน** (AgTNPs)

สูตร

จากสมการของ Beer's law

$$A = \varepsilon bc$$

หาค่าคงที่ของการดูดกลืนแสงของสารละลายเข้มข้น ($mol.L^{-1}$)

$$\ln\varepsilon = 1.4418 \ln D + 18.9555$$

แทนค่า $\ln\varepsilon = 1.4418 \ln(47.4004) + 18.9555$

จะได้ $\varepsilon = 4.4502 \times 1010$

แทนค่า ε ในสมการของ Beer's law

$$0.931 = 4.4502 \times 1010 \times 1 \times c$$

ดังนั้นความเข้มข้นของ AgTNPs เท่ากับ 2.0920×10^{-11}

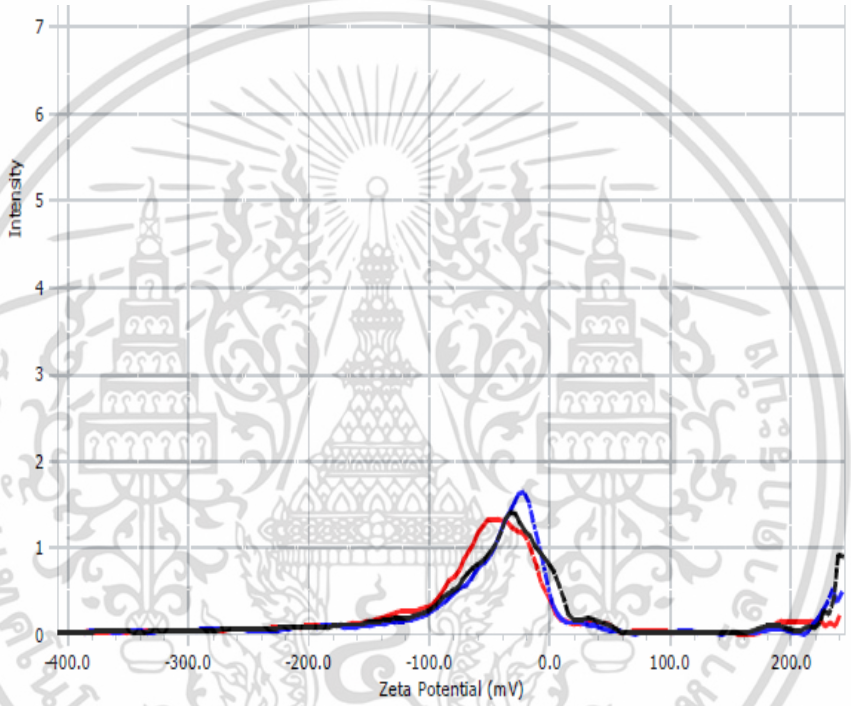
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

1. การศึกษาสภาพความเป็นประจุบนพื้นผิวของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนในการวิเคราะห์กลูต้าไธโอน ด้วยเทคนิคการตรวจวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potentials)

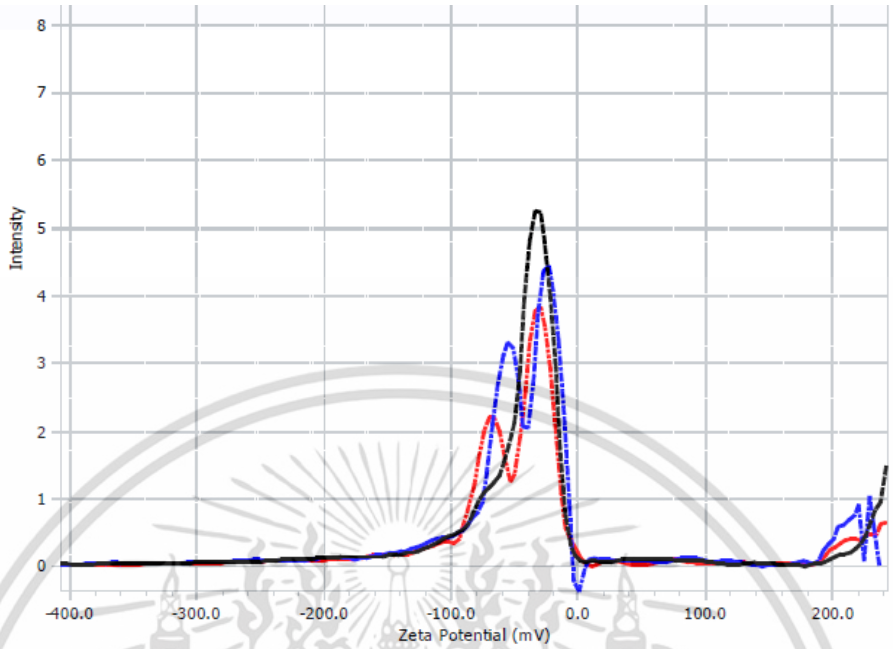
1.1 AgTNPs : กลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 1.0 ppm



รูปที่ ข.1 ภาพแสดงค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 1.0 ppm

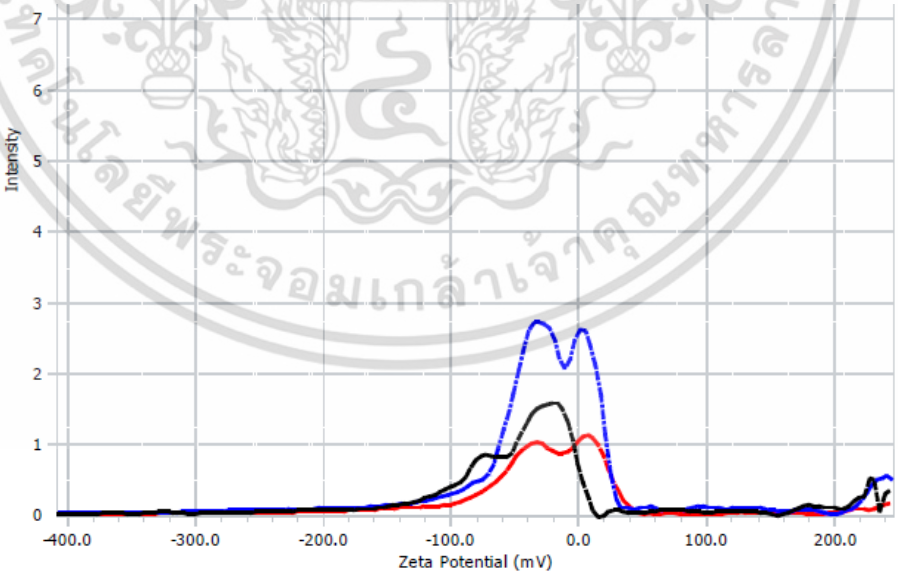
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 AgTNPs : กลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 5.0 ppm



รูปที่ ข.2 ภาพแสดงค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 5.0 ppm

1.3 AgTNPs : กลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 9.0 ppm



รูปที่ ข.3 ภาพแสดงค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโนทำปฏิกิริยากับกลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้น 9.0 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การตรวจวัดกลูต้าไธโอนด้วยสารละลายอนุภาคเงินรูปร่างสามเหลี่ยมระดับนาโน

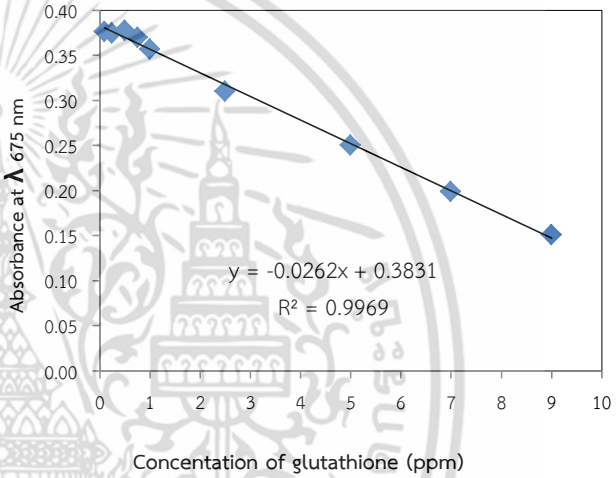
2.1 การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

สูตร

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

ตารางที่ ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Blank ที่นำมาคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด

No.	Abs.
1	0.4077
2	0.4108
3	0.4111
4	0.4100
5	0.4093
6	0.4106
7	0.408u
8	0.4091
9	0.4094
10	0.4089
Total	4.0955
SD	0.0010
AVR	0.4096



การคำนวณ

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

แทนค่า $LOD = \frac{3 \times 0.0010}{0.0262}$

$= 0.1225$ ppm

ดังนั้นค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด เท่ากับ 0.12±0.001 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

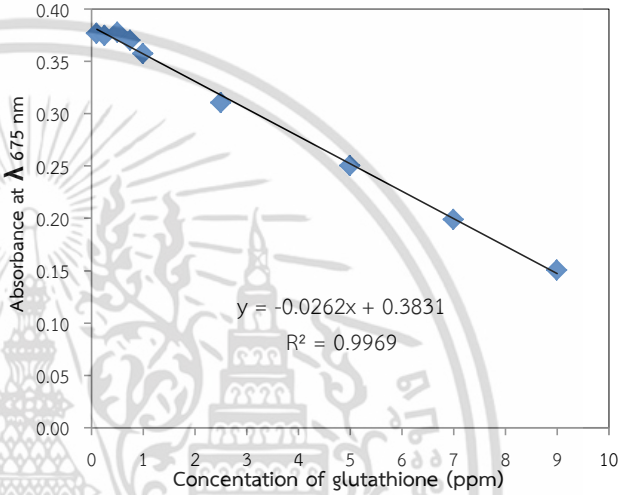
2.2 การคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

สูตร

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

ตารางที่ ข.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Blank ที่นำมาคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์**เชิงปริมาณ**

No.	Abs.
1	0.4077
2	0.4108
3	0.4111
4	0.4100
5	0.4093
6	0.4106
7	0.408u
8	0.4091
9	0.4094
10	0.4089
Total	4.0955
SD	0.0010
AVR	0.4096



การคำนวณ

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

แทนค่า $LOQ = \frac{10 \times 0.010}{0.225}$

$= 0.4084$ ppm

ดังนั้นค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการการวิเคราะห์ เท่ากับ 0.40±0.005 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 การคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่น (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 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่าง

Sample	Concentration of glutathione (ppm)	Absorbance (n = 3)		
		1	2	3
Distilled water	0	0	0	0
	0.5	0.3711	0.3693	0.3682
	1.0	0.3542	0.3559	0.3569
	5.0	0.2480	0.2392	0.2371
Tablet	5.0	0.2625	0.2621	0.2628
	0.5	0.2499	0.2495	0.2488
	1.0	0.2366	0.2355	0.2367
	5.0	0.1378	0.1368	0.1321

การคำนวณ %Recovery และ RSD ของสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอน

ตัวอย่างการคำนวณสารละลายมาตรฐานกลูต้าไธโอนความเข้มข้น 1.0 ppm (น้ำกลั่น)

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

จากสมการเส้นตรง $y = -0.0262x + 0.3831$

แทนค่า Absorbance 1 ลงใน y

จะได้ $0.3542 = -0.0262x + 0.3831$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น x = 1.1030 ppm

จากนั้นเปลี่ยนค่า Absorbance จาก 1 เป็น 2 และ 3 จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ และ 1.0381 และ 1.0000 ppm ตามลำดับ แล้วนำไปคำนวณหาค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ซึ่งเท่ากับ 1.0496 ppm และ 0.0053 ตามลำดับ

1.3.2 การหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และค่าความแม่น (RSD)

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

จะได้ $\%Recovery = \frac{(1.0496 - 0)}{10.00} \times 100$

$= 104.96\ \%$

ดังนั้น %Recovery เท่ากับ 97.70 %

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

จะได้ $RSD = \frac{0.0053}{1.0496} \times 100$

$= 0.5049$

ดังนั้น RSD เท่ากับ 0.5049 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – นามสกุล	นาวสาวกัลยาศิริ คำหอม
เดือน ปีเกิด	27 เมษายน 2535
ที่อยู่	76/1 หมู่ 1 ตำบลบางมัญ อำเภอเมือง จังหวัดสิงห์บุรี 16000 โทร 090-4277361
ประวัติการศึกษา 2556	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผลงานวิจัย	นำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการ paccon 2017
2559	“A plasmonic colorimetric Mercury (II) sensor based on silver triangular nanoplates”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้