



การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยใช้หางน้ำยาง  
และการใช้ซ้ำสารตั้งต้นที่เหลือ

โดย

นางสาวปาลิดา พงศานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยใช้หางน้ำยาง  
และการใช้ซ้ำสารตั้งต้นที่เหลือ

โดย

นางสาวปาลิดา พงศานนท์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

THE SYNTHESIS OF GOLD NANOPARTICLES BY USING  
SKIM NATURAL RUBBER LATEX AND THE RECYCLING  
OF REMAINING REACTANTS

BY

MISS PALIDA PONGSANON



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING (CHEMICAL ENGINEERING)  
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
THAMMASAT UNIVERSITY  
ACADEMIC YEAR 2018  
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวปาลิดา พงศานนท์

เรื่อง


การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยใช้หางน้ำยางและการใช้ซ้ำสารตั้งต้นที่เหลือ

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 7 มกราคม พ.ศ. 2562

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
\_\_\_\_\_  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพบุษย์ เอกแสงศรี)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

  
\_\_\_\_\_  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ตำนวานิชกุล)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
\_\_\_\_\_  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภณิดา ชัยขวัญ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
\_\_\_\_\_  
(อาจารย์ ดร.ณัฐพล กู้ตระกูลโชติ)

คณบดี

  
\_\_\_\_\_  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีร เจียศิริพงษ์กุล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยใช้หางน้ำยางและการใช้ซัสสารตั้งต้นที่เหลือ
ชื่อผู้เขียน	นางสาวปาไลดา พงศานนท์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ตำนานวิชกุล
ปีการศึกษา	2561

### บทคัดย่อ

การสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยการใช้น้ำยางจากธรรมชาติเป็นแนวทางที่น่าสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากการช่วยลดการใช้สารเคมีที่อาจมีความอันตรายและราคาแพง รวมถึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสารธรรมชาติที่เลือกนำมาใช้ ดังการเลือกใช้น้ำยางซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางชั้นให้คัมค่าแทนการปล่อยทิ้ง งานวิจัยนี้ใช้เซรัมที่เตรียมได้จากหางน้ำยางเป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน เช่น ในทางการแพทย์เพื่อการวินิจฉัยและการรักษา หรือในอุตสาหกรรมด้วยการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนทองคำเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน (Cysteine) และกลูต้าไธโอน (Glutathione) การศึกษาเริ่มจากการใช้สารจับก้อนยาง (coagulant) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ สารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายกรดอะซิติก และสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก เพื่อแยกอนุภาคออกจากของเหลวหรือที่เรียกว่าเซรัม พบว่าเซรัมที่เตรียมได้จากพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกสามารถสังเคราะห์อนุภาคทองคำที่มีความเสถียร เนื่องจาก พอลิเมอร์ที่หลงเหลืออยู่ในเซรัมนั้นสามารถช่วยควบคุมการโตของอนุภาค และยังพบว่าความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันในขั้นตอนการจับก้อนยางไม่ส่งผลต่อการควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนทองคำ ดังนั้นจึงเลือกใช้น้ำยางพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่มีความเข้มข้น 0.5 %w/v ในการเตรียมเซรัม จากนั้นจึงศึกษาผลของสัดส่วนการเจือจางเซรัมและความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต (HAuCl<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O) ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ พบว่าที่สัดส่วนการเจือจางเซรัม 8 เท่าและความเข้มข้นโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต 1.4 mM ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C พร้อมด้วยการสั่นด้วยเสียง เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จะได้คอลลอยด์ของอนุภาคนาโนทองคำที่มีสีไวน์แดงที่

สามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 536 nm เงื่อนไขนี้เหมาะสำหรับเซรัมที่เตรียมได้จากหางน้ำย่าง ที่มีคุณสมบัติ %TSC 8.35%, %DRC 4.83%, %Alkalinity 0.3756% และ %Brix 4.1% เท่านั้น ใน การศึกษาการใช้ซ้ำสารตั้งต้นนั้นทำโดยการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกอนุภาคนาโนทองคำออกก่อน พบว่า สามารถนำสารละลายส่วนเหนือตะกอนมาใช้ซ้ำโดยการผสมด้วยสารละลายตัวเดิมที่มีความเข้มข้น ของ โกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต 3.8 mM และใช้เซรัมที่สกัดส่วนการเจือจาง 2 เท่า และสังเคราะห์ด้วย สภาวะเช่นเดิม ซึ่งจะให้คอลลอยด์ของอนุภาคนาโนทองคำที่มีค่าการดูดกลืนแสง และตำแหน่งของ ความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน ที่ตำแหน่ง 529.5 nm ในส่วนของศึกษาการแยกขนาดของอนุภาคนาโน ทองคำโดยอาศัยความเร็วรอบของการปั่นเหวี่ยงที่แตกต่างกัน พบว่าคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่ เตรียมในน้ำจาก เมื่อถูกปั่นเหวี่ยงที่ 4,000 rpm เพื่อแยกนำสารละลายส่วนเหนือตะกอนมาปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบ 8,000 rpm อีกครั้ง เพื่อแยกตะกอนขนาดเล็กที่เหลือในส่วนสารละลายเหนือตะกอน ออกมา จะได้อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm และมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาว คลื่น 523-526 nm สีของคอลลอยด์เป็นสีแดง และอนุภาคนาโนทองคำที่เตรียมในน้ำ เมื่อถูกปั่น เหวี่ยงที่ 8,000 rpm เท่านั้น จะได้อนุภาคที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 529-531 nm สีของคอลลอยด์เป็นสีม่วงแดง เมื่อทดสอบความเสถียรของคอลลอยด์อนุภาคนาโน ทองคำในน้ำต่อสภาวะความเป็นกรด พบว่าคอลลอยด์จะเกิดการเสียสภาพและตกตะกอน เมื่อนำ อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 2 ขนาดมาทดสอบประสิทธิภาพความเป็นเซนเซอร์ พบว่า สามารถใช้สร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการประมาณความเข้มข้นของ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์และ ซีสทีนด้วยสมการเส้นตรง และของกลูตาไรโอนด้วยสมการพหุนามกำลังสอง หลังจากทดสอบด้วย สารละลายที่ไม่ทราบค่าความเข้มข้น พบว่าโดยตัวอย่างส่วนใหญ่มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่น้อย อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ในระบบนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ได้ แต่เมื่อทดสอบ ความสามารถในการเป็นสารต้านเชื้อ *Staphylococcus aureus* และเชื้อ *Escherichia coli* พบว่าไม่มี ความสามารถในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิด

**คำสำคัญ:** อนุภาคนาโนทองคำ, การสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม, หางน้ำย่างธรรมชาติ, เซนเซอร์, กระบวนการใช้ซ้ำ

Thesis Title	THE SYNTHESIS OF GOLD NANOPARTICLES BY USING SKIM NATURAL RUBBER LATEX AND THE RECYCLING OF REMAINING REACTANTS
Author	Miss Palida Pongsanon
Degree	Master of Engineering
Major Field/Faculty/University	Chemical Engineering Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Associate Professor Panu Danwanichakul, Ph.D
Academic Years	2018

## ABSTRACT

Nowadays, green synthesis by using natural substances has attracted more attention since it could reduce the usage of dangerous chemicals, reducing the production cost and adding more values to natural substances. Skim natural rubber latex, a by-product from concentrated latex industry, was used in this work as a source of reducing agents and stabilizing agents in the synthesis of gold nanoparticles (AuNPs). AuNPs could be applied in the medical field for diagnosis and therapy and in the industries as catalysts. This research, however, investigated the sensing properties of AuNPs for ammonium hydroxide ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), cysteine (Cys) and glutathione (GSH) as well as their antibacterial activity. Firstly, different coagulants, including sulfuric acid, acetic acid, and cationic polyacrylamide ( $\text{PAM}^+$ ), were added to remove rubber particles in SNRL and obtain the serums with some remaining coagulants, which were preliminarily used in the synthesis. The results showed that the most stable colloidal systems were from the serum with remaining  $\text{PAM}^+$  because it could control the size of AuNPs during synthesis. In addition, the concentration of  $\text{PAM}^+$  solution used in rubber coagulation did not affect the size of AuNPs so 0.5% w/v  $\text{PAM}^+$  was chosen to prepare the serum in this research. Next, various dilution factors of the serum and various  $\text{HAuCl}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  concentrations were studied for AuNPs synthesis. It was found that the optimum

condition was adjusting the dilution factor of the serum to be 8 before mixing with 1.4 mM  $\text{HAuCl}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  solution at 80 °C in a sonicator and allowing the reaction to occur for 3 hours. AuNPs colloid with red wine color was observed corresponding to the absorption peak at 539 nm. However, this condition was suitable for the SNRL with %TSC of 8.35%, %DRC of 4.83%, %Alkalinity of 0.3756% and %Brix 4.1%. Later, the recycling of the remaining reactants by was studied. AuNPs were separated via centrifugation and the supernatant was used in the recycling process. It was mixed with additional solutions, which were the serum with the dilution factor of 3 and 3.8 mM  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  solution, at the same condition previously mentioned. The absorbance and absorbance peak of the product was seen at 529.5 nm, which was similar to those of the optimum condition. Besides, centrifugation could be applied to separate AuNPs with different sizes depending on the centrifugal speed. Applying 4000 rpm to separate supernatant and separate small size of AuNPs in the supernatant again by applying 8,000 rpm, AuNPs with the average size of  $20.5 \pm 4.5$  nm were obtained and when forming a colloid in water it showed red color corresponding to the absorbance at 523-526 nm, while applying only 8000 rpm, AuNPs with the average size of  $23 \pm 7$  nm were obtained and formed a colloid in water with purple-red color corresponding to the absorbance at 529-531 nm. Furthermore, the stability of AuNPs colloid in acidic solution was lost. The samples of AuNPs with 2 different sizes were then tested with  $\text{NH}_4\text{OH}$ , Cys and GSH solutions at various concentrations to construct the calibration curves and the equations from the regressions were reported. For  $\text{NH}_3$  and Cys, the concentration was found to correlate linearly with the absorbance, while for GSH, a polynomial relation was seen. All of the equations were tested by using the solutions with unknown concentration and the errors were estimated. These tests showed that sensors from AuNPs could be used because few error percentages were observed. Finally, It was found that the synthesized AuNPs with different sizes did not possess antibacterial activity.

**Keywords:** Gold nanoparticles, Green synthesis, Skim natural rubber latex, Sensor, Recycling process



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถประสบความสำเร็จอย่างลุล่วงมาได้ด้วยดีจากการได้รับ คำแนะนำ และความช่วยเหลือที่ดีจากบุคคลหลายท่านที่ให้การสนับสนุนตลอดการดำเนินงานซึ่ง ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ด่านวานิชกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยนี้ บุคคลสำคัญยิ่งต่อการ ดำเนินงานวิจัยตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จลุล่วงมาได้ ซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการศึกษา ค้นคว้า ดำเนินงานวิจัย และผู้แนะนำแนวทางแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงาน อีกทั้ง เป็นผู้ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์และสารเคมีและสถานที่ในการดำเนินงานตลอดจนการทำวิจัยใน ครั้งนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. ทิพบุษย์ เอกแสงศรี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ผู้แนะนำแนวทางในการปฏิบัติการ และตรวจสอบ งานวิจัยเพื่อให้แก้ไขและเติมเต็มให้สมบูรณ์ขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร.ภณิดา ช้ายขวัญ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ผู้ที่ให้คำแนะนำในการปฏิบัติการ และแนวทางแก้ไข ปัญหาต่าง ๆ เพื่อให้ดำเนินการได้อย่างราบรื่น

อาจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ให้คำแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัย และ เสนอแนะ เพื่อให้งานวิจัยสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (National Research Council of Thailand (NRCT)) ประจำปี 2560 สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณทุนการศึกษาตามสัญญาฉบับที่ ท.02/2560 จากคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนต่อการศึกษาและสร้างผลงานวิจัย ฉบับนี้ให้เกิดขึ้นได้

นางสาวปาลิตา พงศานนท์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(12)
สารบัญภาพ	(16)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(22)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำยางธรรมชาติ	5
2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ	5
2.1.1.1 อนุภาคยาง	5
2.1.1.2 อนุภาคคลุทอยด์ และฟรีวิสลิง (Lutoids and Frey-Wyssling particles)	7

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอนุภาคนาโนของทองคำ	8
2.2.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนทองคำ	8
2.2.2 การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม	9
2.2.2.1 อุตสาหกรรมทางการแพทย์	9
2.2.2.2 อุตสาหกรรมเคมี	10
2.3 การสังเคราะห์และการตรวจสอบคุณลักษณะของอนุภาคนาโนทองคำ	10
2.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ	10
2.3.2 การตรวจสอบคุณลักษณะของอนุภาคนาโนทองคำ	10
2.4 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง	12
2.5 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล	13
2.5.1 แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole – dipole force)	13
2.5.2 พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding, H – bond)	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	23
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้	23
3.1.1 วัสดุ และอุปกรณ์	23
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	24
3.2 วิธีการ	24
3.2.1 การหาปริมาณของแข็งทั้งหมดในทางน้ำยาง (%TSC)	24
3.2.2 การหาปริมาณเนื้อยางแห้งในทางน้ำยาง (%DRC)	25
3.2.3 การหาปริมาณร้อยละของแอมโมเนีย (Alkalinity)	25
3.2.4 การวัดปริมาณก ลูโคสในเซรัม	25
3.2.5 การเตรียมเซรัมและการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ	26
3.2.5.1 เซรัมที่เตรียมจากการจับก้อนเนื้อยางด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก	26
3.2.5.2 เซรัมที่เตรียมจากการจับก้อนเนื้อยางด้วยสารละลายกรดอะซิติก	26
3.2.5.3 เซรัมที่เตรียมจากการจับก้อนเนื้อยางด้วยสารละลาย	26
พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก	

3.2.6 การแยกอนุภาคนาโนทองคำด้วยการใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง	27
3.2.6.1 การศึกษาความเร็วรอบในการปั่นเหวี่ยงต่อการแยกอนุภาคนาโนทองคำ	27
3.2.6.2 การเตรียมอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกัน	28
3.2.7 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยใช้ซัสสารตั้งต้นที่เหลื่อ	28
3.2.8 การเตรียมคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำ	29
3.2.9 การศึกษาผลของ pH ต่อความเสถียรของอนุภาคนาโนทองคำ	30
3.2.10 การทดสอบผลของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่มี ความเข้มข้นแตกต่างกันต่ออนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกัน	30
3.2.11 การทดสอบผลของสารละลายซิสทีนและกลูต้าไธโอน ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันต่ออนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกัน	31
3.2.12 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยเครื่อง TEM	32
3.2.13 การทดสอบผลของขนาดที่ต่างกันของอนุภาคนาโนทองคำต่อ ความสามารถในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย	32
 บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	 33
 4.1 ผลของสารจับก้อนยางที่แตกต่างกันต่อการเตรียมเซรัมสำหรับ ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ	 33
4.1.1 ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) และลักษณะ ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ	33
4.1.2 ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ	35
4.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่ใช้ใน การจับก้อนยาง	37
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่ใช้ใน การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ	38
4.3 ผลของการแยกขนาดของอนุภาคนาโนทองคำด้วยการปั่นเหวี่ยงแยก (centrifugation)	41
4.4 ผลของการใช้ซัสสารตั้งต้นที่เหลื่อเพื่อสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ	43

4.5 ผลของการแยกขนาดอนุภาคนาโนทองคำด้วยการปั่นเหวี่ยงและผลของ pH ต่อความเสถียรของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ	53
4.6 ผลของความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ กลูต้าไรโอน และซิสทีนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ	60
4.6.1 ผลของความเข้มข้นที่ของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกันที่มีขนาดแตกต่าง	60
4.6.2 ผลของความเข้มข้นที่ของซิสทีนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกันที่มีขนาดแตกต่าง	65
4.6.3 ผลของความเข้มข้นที่ของกลูต้าไรโอนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกันที่มีขนาดแตกต่าง	71
4.7 ผลความสามารถในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial activity)	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปผลการวิจัย	79
5.1.1 ผลของสารก่อการจับก้อนยวที่เหลือต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ และการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ	79
5.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนทองคำและการแยกขนาดของอนุภาคนาโนทองคำ	80
5.1.3 ผลของการใช้ซัสสารตั้งต้นที่เหลือ	81
5.1.4 ผลของการแยกขนาดอนุภาคนาโนทองคำและความเสถียรของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำจากการปรับค่า pH	82
5.1.5 ผลของความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไรโอนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่แตกต่างกัน	83
5.1.5.1 ผลของขนาดที่แตกต่างกันต่อความสามารถในการเป็นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไรโอนเซนเซอร์	84
5.1.6 ผลของการทดสอบความสามารถในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่แตกต่างกัน	86
5.2 ข้อเสนอแนะ	86

รายการอ้างอิง	87
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณในงานวิจัย	91
ก.1 การคำนวณเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของหางน้ำยาง	91
ก.1.1 การคำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมดในหางน้ำยาง (TSC)	91
ก.1.2 การคำนวณหาปริมาณเนื้อยางแห้งในหางน้ำยาง (DRC)	91
ก.1.3 การคำนวณหาปริมาณร้อยละของแอมโมเนีย (%Alkalinity)	91
ก.2 การคำนวณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ	93
ก.2.1 การคำนวณความเข้มข้นของพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก (PAM <sup>+</sup> )	93
ก.2.2 การคำนวณหาปริมาณของสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต HAuCl <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	94
ก.2.3 การคำนวณหาปริมาณสารเซรัมและน้ำกลั่นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	94
ก.3 การคำนวณปริมาณของทองคำที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการใช้ซ้ สารตั้งต้นที่เหลือ	94
ก.4 การคำนวณการเตรียมความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอน	96
ก.4.1 การคำนวณการเตรียมความเข้มข้นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH <sub>4</sub> OH) เพื่อใช้ในการทดสอบความเป็นแอมโมเนียเซ็นเซอร์	96
ก.4.2 การคำนวณการเตรียมความเข้มข้นซิสทีน (Cysteine, Cys) เพื่อใช้ในการทดสอบความเป็นซิสทีนเซ็นเซอร์	98
ก.4.3 การคำนวณการเตรียมความเข้มข้นกลูต้าไธโอน (Glutathione, GSH) เพื่อใช้ในการทดสอบความเป็นกลูต้าไธโอน เซ็นเซอร์	99
ก.5 การคำนวณความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และ กลูต้าไธโอน และการหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการใช้สมการ มาตรฐานทำนายความเข้มข้น	101

ก.5.1 การคำนวณความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์และ การหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการใช้สมการมาตรฐานทำนาย ความเข้มข้น	101
ก.5.2 การคำนวณความเข้มข้นของซีสทีนและการหาเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดจากการใช้สมการมาตรฐานทำนายความเข้มข้น	107
ก.5.3 การคำนวณความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนและการหาเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดจากการใช้สมการมาตรฐานทำนายความเข้มข้น	113
ภาคผนวก ข คุณสมบัติ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบส และ ตำแหน่งความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสง	120
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพด้วย Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDX)	123
ประวัติผู้เขียน	125

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างองค์ประกอบของส่วนอนุภาคยางในน้ำยางสด	6
4.1 ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้า ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วย เซอร์มิที่เตรียมจากสารจับก้อนยางด้วยสารละลาย PAM+ สัดส่วนการเจือจางเซอร์มิ 8 เท่า ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ที่ความเข้มข้น แตกต่างกัน	39
4.2 ค่า pH, ค่าการนำไฟฟ้า และตำแหน่งของความยาวคลื่นสูงสุดที่ดูดกลืนแสง ได้ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนหลังจากการปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 3,000, 5,000 และ 8,000 rpm	43
4.3 ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ ด้วยสัดส่วนการเจือจางเซอร์มิ 3 เท่า ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน เป็นสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์ อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน	45
4.4 ค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า และตำแหน่งของความยาวคลื่นสูงสุด ของคอลลอยด์อนุภาค นาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วนการเจือจางเซอร์มิแตกต่างกัน ทำปฏิกิริยากับความ เข้มข้นของสารละลาย $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ที่ความเข้มข้น 3.6 mM เป็นสารละลายตัวเติม ลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน	48
4.5 ค่า pH, ค่าการนำไฟฟ้า และตำแหน่งของความยาวคลื่นสูงสุด ที่ดูดกลืนแสงได้ของ คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วนการเจือจางเซอร์มิแตกต่างกัน ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ที่ความเข้มข้น 3.8 mM เป็นสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน	48
4.6 ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วย สัดส่วนการเจือจางเซอร์มิ 3 เท่า ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 3.6 mM เป็นสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์ อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนรอบที่ 1 และจากสังเคราะห์โดยการ เติมสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน ที่ได้จากการสังเคราะห์ก่อนหน้านี้ เป็นการสังเคราะห์รอบที่ 2 และคอลลอยด์ อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน	51



4.7	ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัสด่วนการเจือจางเซรัม 2 เท่า ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ที่ความเข้มข้น 3.8 mM เป็นสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนรอบที่ 1 และจากการสังเคราะห์โดยการเติมสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนที่ได้จากการสังเคราะห์ก่อนหน้านี้ โดยทดสอบใช้ซ้คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนเป็นจำนวน 4 รอบ และคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน	52
5.1	ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์โดยใช้เซรัมที่เตรียมจากหางน้ำยาง	80
5.2	มวลของทองคำที่คำนวณได้แต่ละส่วนของสารละลายในการใช้ซ้สารตั้งต้นที่เหลือ	82
5.3	คุณลักษณะของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่แยกจากการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบต่างกัน และความเสถียรในสภาวะที่เป็นกรด	83
5.4	ผลของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำ	84
5.5	ลักษณะของการพิจารณาความเป็นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอนเซนเซอร์	85
ก.1	ปริมาตรของกรดไฮดรอกคลอริกที่ใช้ในการไตเตรท (V), น้ำหนักตัวอย่างของเซรัม (m) และ % Alkalinity ต่อน้ำหนักของเซรัมเฉลี่ย	92
ก.2	ปริมาตรของ $\text{PAM}^+$ 1.5 % w/v และน้ำกลั่น สำหรับเตรียมความเข้มข้นของ $\text{PAM}^+$ เป็นความเข้มข้นที่ 0.25, 0.50, 0.75, 1.0 และ 1.25 % w/v	93
ก.3	ปริมาตรของ $\text{NH}_4\text{OH}$ 1,000 $\mu\text{M}$ และน้ำกลั่น สำหรับเตรียมความเข้มข้นของ $\text{NH}_4\text{OH}$ เป็นความเข้มข้นที่ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 $\mu\text{M}$	97
ก.4	ปริมาตรของสารละลาย Cys 1,000 $\mu\text{M}$ และน้ำกลั่น สำหรับเตรียมความเข้มข้นของ Cys เป็นความเข้มข้นที่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000 $\mu\text{M}$	99
ก.5	ปริมาตรของสารละลาย GSH 1,000 $\mu\text{M}$ และน้ำกลั่น สำหรับเตรียมความเข้มข้นของ GSH เป็นความเข้มข้นที่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000 $\mu\text{M}$	100
ก.6	ผลการทดสอบสมการมาตรฐานจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย 20.5 $\pm$ 4.5 nm ด้วยสารละลาย $\text{NH}_4\text{OH}$ ที่ความเข้มข้น 125, 250, 325, 475 $\mu\text{M}$	103

- ก.7 ผลการทดสอบสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยจากอนุภาคนาโนทองคำที่มี  
ขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ด้วยสารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่ความเข้มข้น 125, 250,  
325, 475  $\mu\text{M}$  104
- ก.8 ผลการทดสอบสมการมาตรฐานจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  
 $23 \pm 7$  nm ด้วยสารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่ความเข้มข้น 125, 250, 325, 475  $\mu\text{M}$  106
- ก.9 ผลการทดสอบสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยจากอนุภาคนาโนทองคำที่มี  
ขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ด้วยสารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่ความเข้มข้น 125, 250,  
325, 475  $\mu\text{M}$  107
- ก.10 ผลการทดสอบสมการมาตรฐานจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  
 $20.5 \pm 4.5$  nm ด้วยสารละลาย Cys ที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$  109
- ก.11 ผลการทดสอบสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยจากอนุภาคนาโนทองคำ  
ที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ด้วยสารละลาย Cys ที่ความเข้มข้น 250, 550  
และ 850  $\mu\text{M}$  110
- ก.12 ผลการทดสอบสมการมาตรฐานจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  
 $23 \pm 7$  nm ด้วยสารละลาย Cys ที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$  112
- ก.13 ผลการทดสอบสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยจากอนุภาคนาโนทองคำ  
ที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ด้วยสารละลาย Cys ที่ความเข้มข้น 250, 550  
และ 850  $\mu\text{M}$  113
- ก.14 ผลการทดสอบสมการมาตรฐานจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  
 $20.5 \pm 4.5$  nm ด้วยสารละลาย GSH ที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$  115
- ก.15 ผลการทดสอบสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยจากอนุภาคนาโนทองคำ  
ที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ด้วยสารละลาย GSH ที่ความเข้มข้น 250, 550  
และ 850  $\mu\text{M}$  116
- ก.16 ผลการทดสอบสมการมาตรฐานจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาด  
เฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ด้วยสารละลาย GSH ที่ความเข้มข้น 250, 550  
และ 850  $\mu\text{M}$  118
- ก.19 ผลการทดสอบสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยจากอนุภาคนาโนทองคำ  
ที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ด้วยสารละลาย GSH ที่ความเข้มข้น 250, 550  
และ 850  $\mu\text{M}$  119

- ข.1 ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่  
สังเคราะห์ในเซรัมที่ได้จากการจับก้อนยางด้วยสารละลาย  $H_2SO_4$   
ความเข้มข้น 3% (เซรัมมีค่า pH เท่ากับ 5.76 ) ด้วยสัดส่วนการเจือจาง  
ที่แตกต่างกัน ณ เวลาเริ่มต้นและเวลาหลังจากเกิดปฏิกิริยาที่ 15 นาที 120
- ข.2 ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่  
สังเคราะห์ในเซรัมที่ได้จากการจับก้อนยางด้วยสารละลาย  $CH_3COOH$   
ความเข้มข้น 3% (เซรัมมีค่า pH เท่ากับ 5.66 ) ด้วยสัดส่วนการเจือจาง  
ที่แตกต่างกัน ณ เวลาเริ่มต้นและเวลาหลังจากเกิดปฏิกิริยาที่ 30 นาที 120
- ข.3 ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่  
สังเคราะห์ในเซรัมที่ได้จากการจับก้อนยางด้วยสารละลาย PAM  
ความเข้มข้น 0.5% ด้วยสัดส่วนการเจือจางที่แตกต่างกัน ณ เวลาเริ่มต้น  
และเวลาหลังจากเกิดปฏิกิริยาที่ 3 ชั่วโมง 121
- ข.4 ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่  
สังเคราะห์ในเซรัมจากหางน้ำยาง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย  
พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกในการจับก้อนยางแตกต่างกัน  
ได้แก่ 1.5, 1.25, 1.0, 0.75, 0.50 และ 0.25 %w/v ณ เวลาเริ่มต้น  
และเวลาหลังจากเกิดปฏิกิริยาที่ 3 ชั่วโมง 122
- ข.5 ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ  
ที่มีขนาด  $20.5 \pm 4.5$  nm และ  $23 \pm 7$  nm เมื่อถูกปรับสภาวะความเป็น  
กรดด้วยสารละลายไฮดรอกลอริกเข้มข้น 122
- ค.1 ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของธาตุที่วัดได้จาก EDS  
ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่สังเคราะห์ได้จากสารละลาย  
โกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต 1.4 mM และสัดส่วนการเจือจางเซรัม 8 เท่า  
ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 124

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างองค์ประกอบของส่วนอนุภาคยางในน้ำยางสด	6
2.2 อนุภาคในน้ำยางสด (แบบจำลองอนุภาคแบบใหม่)	6
2.3 ส่วนต่าง ๆ ของน้ำยางสดที่ปั่นด้วยความเร็วรอบสูง	7
2.4 การเปล่งแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่มีลักษณะรูปร่างต่าง ๆ ตามความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน	8
2.6 สมการและการเกิดอนุภาคนาโนของทองคำ	10
2.7 ภาพถ่าย TEM และการเฉลี่ยขนาดของอนุภาคนาโนของทองคำเมื่อสังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของ citrate ต่าง ๆ	11
2.8 ผลของขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่มีต่อการดูดกลืนแสง	11
2.9 ช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็น	12
2.10 การเปรียบเทียบระหว่างแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole - dipole forces) กับแรงลอนดอน (London dispersion forces)	13
2.11 ตัวอย่างของการเกิดพันธะไฮโดรเจน	14
4.1 (a) ค่า pH (b) ค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ในเซรัมที่ได้จากการจับก้อนยางแตกต่างกัน ณ เวลาเริ่มต้นและเวลาหลังจากเกิดปฏิกิริยา	33
4.2 สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์จากเซรัมที่เตรียมจากสารจับก้อนยางต่างกันคือ (a) สารละลายกรดซัลฟิวริก (b) สารละลายกรดอะซิติก และ (c) สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก	34
4.3 ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำจากการสังเคราะห์โดยใช้เซรัมจากทางน้ำยาง และใช้สัดส่วนในการเจือจางเซรัมที่แตกต่างกัน โดยเซรัมนั้นได้จากการจับก้อนยางด้วยสารจับก้อนต่างกัน ได้แก่ (a) กรดซัลฟิวริก (b) กรดอะซิติก และ (c) พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก	35
4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ในเซรัมจากทางน้ำยาง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกในการจับก้อนยางแตกต่างกัน ได้แก่ (a) 1.5 (b) 1.25 (c) 1.0 (d), 0.75 (e) 0.50 และ (f) 0.25 %w/v	38

- 4.5 สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ และ (b) ค่าการดูดกลืนแสงของ คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ ที่สังเคราะห์ด้วยเซรัมที่เตรียมจาก สารจับก้อนยางด้วยสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกสัดส่วน การเจือจางเซรัม 8 ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 40
- 4.6 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำและ (b) ค่าการดูดกลืนแสงของ คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน หลังจากการปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 3,000, 5,000 และ 8,000 รอบต่อนาที (rpm) 42
- 4.7 ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วน การเจือจางเซรัม 3 ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 2.8, 3.0, 3.2 และ 3.4 เป็นสารละลายตัวเติมลงใน คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน 44
- 4.8 ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วน การเจือจางเซรัมแตกต่างกัน ได้แก่ 2, 3, 4, 5 และ 6 เท่า ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้น ของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้น (a) 3.6 mM และ (b) 3.8 mM เป็น สารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน 46
- 4.9 ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วน การเจือจางเซรัม 3 เท่า ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้น 3.6 mM เป็นสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ ในส่วนเหนือตะกอนรอบที่ 1 และจากการสังเคราะห์โดยการเติมสารละลายตัวเติมลงใน คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนที่ได้จากการสังเคราะห์ก่อนหน้านี้ เป็นการสังเคราะห์รอบที่ 2 49
- 4.10 ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วย สัดส่วนการเจือจางเซรัม 2 เท่า ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้น 3.8 mM เป็นสารละลายตัวเติมลงใน คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือรอบที่ 1 และจากการสังเคราะห์โดย การเติมสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน ที่ได้จากการสังเคราะห์ก่อนหน้านี้ โดยทดสอบการใช้ซ้ำจำนวน 4 รอบ 51

- 4.11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (a) กำลังขยาย 50,000x และ (b) กำลังขยาย 150,000x และแผนภาพการกระจายขนาดของคอลลอยด์อนุภาคนาโนคอลลอยด์ ส่วนเหนือตะกอนที่แยกจากการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 rpm และเตรียมในสารละลาย SDS ซึ่งมีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm 55
- 4.12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (a) กำลังขยาย 50,000x และ (b) กำลังขยาย 150,000x และแผนภาพการกระจายขนาดของคอลลอยด์อนุภาคนาโนคอลลอยด์ ที่แยกจากการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8,000 rpm และเตรียมในสารละลาย SDS ซึ่งมีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm 55
- 4.13 (a1) ลักษณะของคอลลอยด์และ (a2) ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำ ที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm หลังการปรับค่า pH ให้มีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 1.3, 2.3, และ 3.6 ด้วยกรดไฮดรอกลอริกเข้มข้น เปรียบเทียบกับค่า pH เริ่มต้นของ คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่ค่า 6.3 ณ เวลาเริ่มต้นที่ปรับ pH 56
- 4.14 (b1) ลักษณะของคอลลอยด์และ (b2) ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำ ที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm หลังการปรับค่า pH ให้มีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 1.3, 2.3, และ 3.6 ด้วยกรดไฮดรอกลอริกเข้มข้น เปรียบเทียบกับค่า pH เริ่มต้นของคอลลอยด์ อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่ค่า 6.3 ณ เวลาหลังจากปรับค่า pH 18 ชั่วโมง 57
- 4.15 (a1) ลักษณะของคอลลอยด์และ (a2) ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำ ที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm หลังการปรับค่า pH ให้มีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 1.3, 2.5, และ 4.5 ด้วยกรดไฮดรอกลอริกเข้มข้น เปรียบเทียบกับค่า pH เริ่มต้นของคอลลอยด์ อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่ค่า 6.2 ณ เวลาเริ่มต้นที่ปรับ pH 68
- 4.16 (b1) ลักษณะของคอลลอยด์และ (b2) ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโน ทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm หลังการปรับค่า pH ให้มีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 1.3, 2.5, และ 4.5 ด้วยกรดไฮดรอกลอริกเข้มข้น เปรียบเทียบกับค่า pH เริ่มต้น ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่ค่า 6.2 ณ เวลาหลังจากปรับค่า pH 18 ชั่วโมง 59
- 4.17 แสดงลักษณะจำลองของอนุภาคนาโนทองคำก่อนถูกแยกออกจากสาร คอลลอยด์และอนุภาคนาโนทองคำที่ล้างไอออนคงเหลือและเตรียมเป็นคอลลอยด์ อนุภาคนาโนทองคำในน้ำ 60

- 4.18 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ต่อ 61  
ความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ได้แก่  
0, 100, 200, 300, 400 และ 500  $\mu\text{M}$  (b) ค่าการดูดกลืนแสงและ  
(c) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 523 nm
- 4.19 กราฟมาตรฐานของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น และค่าการดูดกลืน 62  
แสงที่เปลี่ยนแปลงไป ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 523 nm เทียบกับความเข้มข้น  
ของแอมโมเนียในช่วงความเข้มข้น 0 - 400  $\mu\text{M}$
- 4.20 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ต่อความเข้มข้น 63  
ที่แตกต่างกันของสารละลายแอมโมเนีย ได้แก่ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500  $\mu\text{M}$   
(b) ค่าการดูดกลืนแสงและ (c) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm
- 4.21 กราฟมาตรฐานของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและค่าการดูด 64  
กลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm เทียบกับ  
ความเข้มข้นของแอมโมเนียในช่วงความเข้มข้น 0 - 500  $\mu\text{M}$
- 4.22 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ต่อซิสทีนที่ 66  
ความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800,  
900 และ 1,000  $\mu\text{M}$  (b) ค่าการดูดกลืนแสงและ (c) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง  
ความยาวคลื่น 526 และ 531 nm
- 4.23 กราฟมาตรฐานของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 66  
526 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 530 nm  
เทียบกับความเข้มข้นของซิสทีนในช่วงความเข้มข้น 0 - 1000  $\mu\text{M}$
- 4.24 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ต่อซิสทีน 67  
ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800,  
900 และ 1,000  $\mu\text{M}$  (b) ค่าการดูดกลืนแสงและ (c) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง  
ความยาวคลื่น 530 และ 550 nm
- 4.25 กราฟมาตรฐานของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 68  
531 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 550 nm  
เทียบกับความเข้มข้นของซิสทีนในช่วงความเข้มข้น (a) 0 - 600  $\mu\text{M}$   
(b) 600 - 800  $\mu\text{M}$  และ (c) 800 - 1000  $\mu\text{M}$

- 4.26 ลักษณะของการยึดเกาะของซิสทีนบนผิวของอนุภาคนาโนทองคำและลักษณะการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างโมเลกุลของซิสทีน 69
- 4.27 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (a) กำลังขยาย 50,000x และ (b) กำลังขยาย 150,000x ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำเมื่อทำปฏิกิริยากับ 1 mM ของซิสทีน โดยใช้ความร้อนที่ 80°C ร่วมกับการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 20 นาที 70
- 4.28 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ต่อกลูต้าไธโอน ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000  $\mu$ M (b) ค่าการดูดกลืนแสงและ (c) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 และ 531 nm 71
- 4.29 กราฟมาตรฐานของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 531 nm เทียบกับความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนในช่วงความเข้มข้น (a) 0 – 400  $\mu$ M และ (b) 400 – 1000  $\mu$ M 72
- 4.30 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ต่อความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสารละลายกลูต้าไธโอน ได้แก่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000  $\mu$ M (b) ค่าการดูดกลืนแสงและ (c) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 และ 550 nm 73
- 4.31 กราฟมาตรฐานของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 550 nm เทียบกับความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนในช่วงความเข้มข้น (a) 0 – 600  $\mu$ M และ (b) 600 – 1000  $\mu$ M 74
- 4.32 ลักษณะของการยึดติดของกลูต้าไธโอนบนผิวของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ และลักษณะการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของกลูต้าไธโอน 75
- 4.33 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (a) กำลังขยาย 50,000x และ (b) กำลังขยาย 150,000x ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำเมื่อทำปฏิกิริยากับ 1 mM ของกลูต้าไธโอนโดยใช้ความร้อนที่ 80°C ร่วมกับการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 20 นาที 76



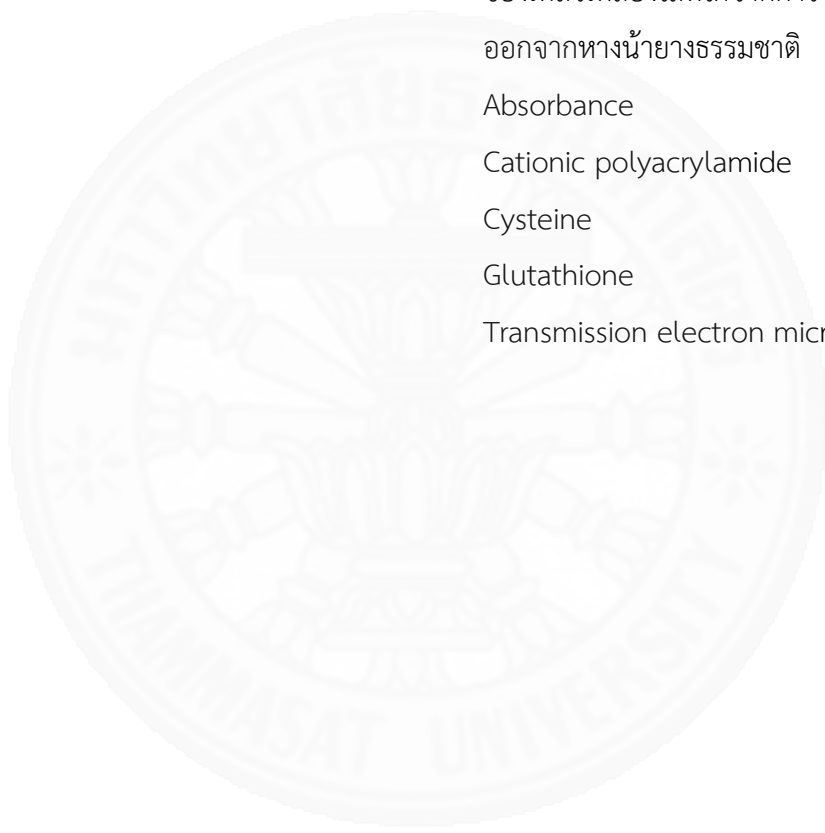
- 4.34 ลักษณะของการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำและการเปลี่ยนคุณลักษณะเชิงแสงของอนุภาคนาโนทองคำเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้นจากผลของการเพิ่มความเข้มข้นของกลูต้าไธโอน 76
- 4.35 (a) สารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีค่าขนาดแตกต่างกัน โดยพิจารณาจาก (b) ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ 77
- 4.36 ผลการตรวจความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนทองคำที่ดูดกลืนแสงในตำแหน่ง 526 nm ต่อเชื้อ (a1) *Escherichia coli* และเชื้อ (a2) *Staphylococcus aureus*, อนุภาคนาโนทองคำที่ดูดกลืนแสงในตำแหน่ง 529 nm ต่อเชื้อ (b1) *Escherichia coli* และเชื้อ (b2) *Staphylococcus aureus* และอนุภาคนาโนทองคำที่ดูดกลืนแสงในตำแหน่ง 539 nm ต่อเชื้อ (c1) *Escherichia coli* และเชื้อ (c2) *Staphylococcus aureus* 78
- ก.1 กราฟมาตรฐานจากการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 523 nm เทียบกับความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในช่วงความเข้มข้น 0 - 500  $\mu\text{M}$  103
- ก.2 กราฟมาตรฐานจากการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm เทียบกับความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในช่วงความเข้มข้น 0 - 500  $\mu\text{M}$  106
- ก.3 กราฟมาตรฐานจากการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 531 nm เทียบกับความเข้มข้นของซีสทีนในช่วงความเข้มข้น 0 - 1000  $\mu\text{M}$  109
- ก.4 กราฟมาตรฐานจากการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 550 nm เทียบกับความเข้มข้นของซีสทีนในช่วงความเข้มข้น 0 - 1000  $\mu\text{M}$  112
- ก.5 กราฟมาตรฐานจากการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 531 nm เทียบกับความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนในช่วงความเข้มข้น 0 - 1000  $\mu\text{M}$  115

- ก.6 กราฟมาตรฐานจากการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง 118  
ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาว  
คลื่นที่ 550 nm เทียบกับความเข้มข้นของซิสทีนในช่วงความเข้มข้น  
0 - 1000  $\mu$ M
- ค.1 ลักษณะสัญญาณวิทยาของคอลลอยด์ที่นำไปตรวจ EDS ของอนุภาคนาโนทองคำ 123  
ในน้ำที่สังเคราะห์ได้จากสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต 1.4 mM  
และสัดส่วนการเจือจางเซรัม 8 เท่าที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- ค.2 ผลการตรวจ EDS ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ 123  
ในน้ำที่สังเคราะห์ได้จากสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต  
1.4 mM และสัดส่วนการเจือจางเซรัม 8 เท่า ที่อุณหภูมิ 80 °C  
เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



## รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ	คำเต็ม/คำจำกัดความ
AuNPs	Gold nanoparticles
SNRL	Skim natural rubber latex
เซรัม	ของเหลวเหลืองใสที่ได้จากการจับก้อนเนื้อมีเยื่อ ออกจากหางน้ำยางธรรมชาติ
ABS	Absorbance
PAM <sup>+</sup>	Cationic polyacrylamide
Cys	Cysteine
GSH	Glutathione
TEM	Transmission electron microscopy



## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยประสบปัญหาทางด้านเศรษฐกิจ โดยเฉพาะธุรกิจยางพาราซึ่งเป็นปัญหาที่ยืดเยื้อยาวนาน ซึ่งสาเหตุที่แท้จริงในเรื่องของราคานั้นมาจากปริมาณผลผลิตและความต้องการใช้ที่ไม่สมดุลกัน การกระตุ้นราคาอย่างให้สูงขึ้นนั้นมีด้วยกันหลายทาง เช่น การรับซื้อออกไปใช้ในส่วนภูมิภาค รัฐ และการส่งเสริมพัฒนาสินค้า และผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น (news.mthai, 2561) ปัจจุบันประเทศไทยมีการแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางเพื่อส่งทั้งในและนอกประเทศ เช่น หมอนยางพารา ยางสำหรับยานพาหนะ ยางแผ่นถุงมือ ยาง ลูกยางอนามัย เป็นต้น (km.rubber, 2554) จากที่กล่าวไปข้างต้นนั้น ทำให้เล็งเห็นความสำคัญของการคิดค้นและพัฒนายางพาราไปใช้ประโยชน์ เพื่อเพิ่มมูลค่าและเป็นการหาช่องทางที่จะช่วยลดปัญหาเศรษฐกิจประเทศได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำหรือน้ำยาง (skim natural rubber and latex หรือ SNRL) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางขึ้นมาใช้ประโยชน์ และเพิ่มมูลค่าทดแทนการนำไปปล่อยทิ้งให้ส่งกลิ่นเหม็นเน่าเสีย เพราะแบคทีเรียที่มากินสารอินทรีย์ในหรือน้ำยางได้แก่ โปรตีน และน้ำตาล

ทองคำ (Au) เป็นธาตุหนึ่งที่มีคุณสมบัติพิเศษที่น่าสนใจนอกเหนือไปจากมุมมองของการประยุกต์ใช้เป็นเครื่องประดับ ทองยังมีประโยชน์ในหลายอุตสาหกรรมอีกด้วย เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ การเคลือบผิวเสาอากาศด้วยทองคำเพื่อการสื่อสารระยะไกล การใช้ทาขายทองคำเพื่อป้องกันการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบการสื่อสารการบินพาณิชย์ ส่วนในวงการแพทย์และทันตกรรม เช่น การรักษาและวินิจฉัยโรค ทำฟันปลอม อุดฟัน เป็นต้น (goldtrader.com, 2561) และหากทองคำในขนาดที่เป็นอนุภาคนาโน จะทำให้คุณสมบัติมีความโดดเด่นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้แก่ คุณสมบัติเชิงแสงและอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะมองเห็นสีที่ต่างออกไปเมื่อขนาดของอนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs) มีขนาดที่ต่างกันไป สอดคล้องกับการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแตกต่างกัน โดยคุณสมบัตินี้มักจะไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ที่ใช้การเปลี่ยนสี ที่มีประสิทธิภาพและความไวสูง เช่น โปรตีนเซนเซอร์ (Wei และคณะ, 2560) หรือปรอทเซนเซอร์ (Rad และคณะ, 2554) นอกจากนี้ขนาดที่เล็กแต่มีพื้นที่ผิวสูง ส่งผลให้นำไปประยุกต์ใช้ในด้านกรเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis) เช่น เร่งปฏิกิริยาการย่อยสลาย 4-nitrophenol (4-NP) ไปเป็น 4-aminophenol โดยใช้  $\text{NaBH}_4$  (Yuan และคณะ, 2560) เป็นต้น ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ทำให้

การสังเคราะห์ AuNPs เป็นเรื่องที่น่าสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้วยวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ใช้สารเคมีน้อย และเป็นการสังเคราะห์อย่างง่าย โดยงานวิจัยนี้สนใจที่จะใช้ทางน้ำยาง ซึ่งมีสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่สามารถเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) และสารช่วยให้คงตัว (stabilizing agent) มาใช้ในการสังเคราะห์ AuNPs

งานวิจัยนี้สนใจการออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ให้สามารถใช้สารเคมีได้อย่างคุ้มค่ามากขึ้น เนื่องจากสารตั้งต้นที่ให้โอออนของทองคำนั้นเป็นสารที่มีมูลค่าสูง อีกทั้งในกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำยังคงเหลือสารตั้งต้นอยู่ และสามารถนำมาใช้ซ้ำได้ นอกจากนี้จะได้ศึกษาการนำอนุภาคนาโนทองคำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ ตรวจวัดความเข้มข้นของสารเคมี ได้แก่ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอน เพื่อศึกษาว่าอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ด้วยเซรัมจากทางน้ำยางนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Pandey และคณะ (2556) และ Hormozi-Nezhad และคณะ (2555) โดยงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาผลของขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่แตกต่างกันต่อการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ และคุณสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองคำโดยการใช้เซรัมที่เตรียมได้จากทางน้ำยางธรรมชาติ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาด และการแยกอนุภาคนาโนของทองคำ
- 1.2.3 เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองคำ โดยใช้สารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการสังเคราะห์
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคนาโนของทองคำที่แตกต่างกันต่อการประยุกต์ใช้ทางด้านเซนเซอร์ของสารต่าง ๆ ได้แก่ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอน เพื่อประเมินความเข้มข้นในรูปของสารละลาย

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 สำหรับทางน้ำย้างที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1.3.1.1 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในทางน้ำย้าง (%TRC) เท่ากับ 8.3532%

1.3.1.2 ปริมาณเนื้อยางแห้งในทางน้ำย้าง (%DRC) เท่ากับ 4.8338%

1.3.1.3 ปริมาณร้อยละของแอมโมเนียในทางน้ำย้าง (%Alkalinity) เท่ากับ 0.3756%

1.3.1.4 ปริมาณกลูโคสในทางน้ำย้าง (%Brix) เท่ากับ 4.1%

1.3.2 ในงานวิจัยนี้ใช้เซรามิกที่ถูกเตรียมจากสารก่อการจับก้อนที่แตกต่างกัน ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดอะซิติก และพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก เพื่อศึกษาผลของสารก่อการจับก้อนที่หลงเหลืออยู่ในเซรามิกต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

1.3.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำเท่ากับ 80°C

1.3.4 ตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำถูกตรวจสอบคุณลักษณะ ได้แก่ ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้า (conductivity)

1.3.5 ปัจจัยที่ถูกศึกษาว่าส่งผลกระทบต่อผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้แก่

1.3.5.1 สัดส่วนการเจือจางเซรามิกที่ 1, 3, 5, 7, 8, 9 และ 10 เท่า

1.3.5.2 ความเข้มข้นของของโกลด์ (III) คลอไรด์ ไตรไฮเดรตที่ 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 และ

1.6 mM

1.3.6 การแยกขนาดของอนุภาคนาโนที่แตกต่างกันใช้ความเร็วรอบของการปั่นเหวี่ยงที่ 4,000 rpm และ 8,000 rpm เพื่อแยกอนุภาคนาโนทองคำ

1.3.7 การทดสอบผลของปริมาณแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ต่ออนุภาคนาโนของทองคำที่สังเคราะห์ได้ เพื่อดูแนวโน้มความเป็นไปได้ต่อการเป็นแอมโมเนียเซนเซอร์จะทดสอบโดยการปรับความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500  $\mu\text{M}$

1.3.8 การทดสอบผลของปริมาณซิสทีนต่ออนุภาคนาโนของทองคำที่สังเคราะห์ได้ เพื่อดูแนวโน้มความเป็นไปได้ต่อการเป็นซิสทีนเซนเซอร์จะทดสอบโดยการปรับความเข้มข้นของซิสทีนที่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000  $\mu\text{M}$

1.3.9 การทดสอบผลของปริมาณกลูต้าไธโอนต่ออนุภาคนาโนของทองคำที่สังเคราะห์ได้ เพื่อดูแนวโน้มความเป็นไปได้ต่อการเป็นกลูต้าไธโอนเซนเซอร์จะทดสอบโดยการปรับความเข้มข้นของซิสทีนที่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000  $\mu\text{M}$

1.3.10 ทดสอบอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกันต่อความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ เชื้อสแตฟีโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ ได้แก่ เชื้ออีโคไล (*Escherichia coli*) ด้วยวิธีการทดสอบเชิงคุณภาพ Performance standards for antimicrobial disk susceptibility test (Clear zone test)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ช่วยลดปริมาณการปล่อยทิ้งของทางน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งทำให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม

1.4.2 ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติในภาพรวม ซึ่งสอดคล้องกับแผนพัฒนาและเศรษฐกิจของประเทศ

1.4.3 ทราบผลของขนาดที่ต่างกันต่อคุณสมบัติของอนุภาคนาโนทองคำ และสามารถประมาณขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นเซนเซอร์

1.4.4 ได้แนวทางในการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำให้สามารถใช้สารตั้งต้นได้อย่างคุ้มค่าที่สุดและสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้อย่างต่อเนื่อง

## บทที่ 2

### วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำยางธรรมชาติ

##### 2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ

ต้นไม้ที่ให้น้ำยางที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากยางคือ “ต้นยางพารา” ซึ่งเป็นพืชในสปีชีส์ *Hevea brasiliensis* และ วงศ์ *Euphorbiaceae* องค์ประกอบต่าง ๆ ในน้ำยางสด แตกต่างจากองค์ประกอบในน้ำยางที่ผ่านการรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย น้ำยางสดคือของเหลว (sap) ที่อยู่ภายในท่อน้ำยางของต้นยางพารา จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทันทีที่ไหลออกจากต้น และทันทีที่มีการเติมแอมโมเนีย ผลทางด้านเคมีที่สำคัญเมื่อเติมแอมโมเนียลงในน้ำยาง คือ การเสริมความเป็นด่างให้กับน้ำยาง เมื่อน้ำยางสดถูกผ่านกรรมวิธีทำให้เข้มข้นโดยวิธีใด ๆ ก็ตาม ก็จะมีผลต่อการกระจายขนาดของอนุภาคยาง และมีผลต่อสัดส่วนระหว่างสารที่ไม่ใช่ยางกับส่วนของน้ำยาง

สารต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำยางสดกระจายอยู่ในส่วนหรือเฟส (phase) ต่าง ๆ 3 ส่วนหลัก คืออนุภาคยาง (rubber particles) ประมาณ 35 % w.t ของน้ำยาง ส่วนที่เป็น (aqueous phase) ประมาณ 55%wt ของน้ำยาง และส่วนของลูทอยด์ (lutoid phase) ประมาณ 10 % wt. ของน้ำยาง

##### 2.1.1.1 อนุภาคยาง

ยางสดมีส่วนของอนุภาคยางไม่แน่นอน คือประมาณ 20 - 45% โดยน้ำหนักน้ำยาง ความแปรปรวนของปริมาณเนื้อยางนั้นขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ พันธุ์ยาง อายุต้นยาง วิธีการตัดและฤดูกาล เป็นต้น อนุภาคยางส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นทรงกลม และอาจเป็นรูปลูกแพร์บ้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอายุและพันธุ์ยาง โดยอาจมีขนาดตั้งแต่ 20 - 5000 nm ในส่วนที่เป็นอนุภาคยางประกอบด้วยสารต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 เนื้อยางคือไฮโดรคาร์บอนเป็น 1, 4 พอลิไอโซพรีนสายตรง (linear cis - 1,4 - polyisoprene) แสดงดังภาพที่ 2.1

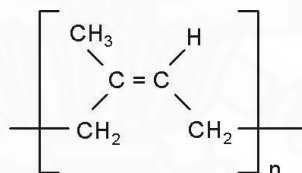


## ตารางที่ 2.1

ตัวอย่างองค์ประกอบของส่วนอนุภาคยางในน้ำยางสด

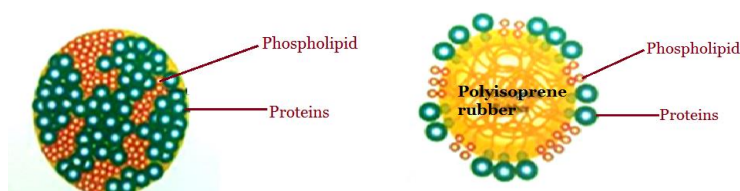
องค์ประกอบ	ส่วน (%wt) ของน้ำยาง
ยางไฮโดรคาร์บอน	36
โปรตีน	1.4
คาร์โบไฮเดรต	1.6
นิวทรอลไลปิด	1.0
ไกลโคไลปิด + ฟอสโฟไลปิด	0.6
อนินทรีย์สาร	0.5
อื่น ๆ	0.4
น้ำ	58.5

หมายเหตุ. จาก ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน (Natural Rubber : Production and Applications) (น.17), โดย วราภรณ์ ขจรไชยกุล, 2549, กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)



ภาพที่ 2.1 ภาพโครงสร้างของ Cis - 1,4 - polyisoprene. จาก ยางธรรมชาติ (Natural Rubber). บทความวิทยาศาสตร์. สืบค้นจาก [http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com\\_content&task=view&id=141&Itemid=0](http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=141&Itemid=0)

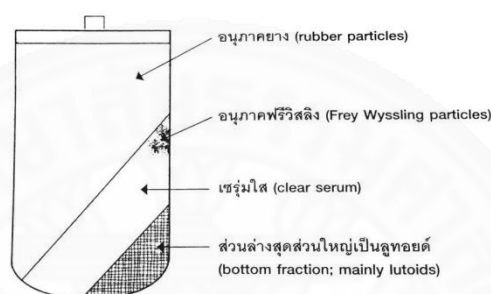
แบบจำลองแบบใหม่ของอนุภาคยางจะมีฟอสโฟลิพิด (phospholipids) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นชนิดเลคติน กับโปรตีน (protein) เคลือบผิวอย่างสลับกัน โดยข้างในจะเป็นส่วนของพอลิไอโซพรีน ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 อนุภาคในน้ำยางสด (แบบจำลองอนุภาคแบบใหม่) จาก Surface nanostructure of Hevea brasiliensis natural rubber latex particles, Kanjaneer Nawamawat และคณะ, 2554.

### 2.2.1.2 อนุภาคลูทอยด์ และฟรีวิสลิง (Lutoids and Frey-Wyssling particles)

การปั่นน้ำยางสดด้วยความเร็วสูง (ความเร่งประมาณ  $6 \times 10^4$  g) สามารถแยกน้ำยางเป็น 4 ส่วน ส่วนบนสุดมีสีขาว คือส่วนที่เป็นครีมยางประมาณ 60 % v/v ของทั้งหมด ส่วนรองลงมาสีเหลืองเป็นส่วนที่เรียกว่าฟรีวิสลิงซึ่งมีปริมาณเพียงเล็กน้อย จากนั้นเป็นส่วนเซรัมใสประมาณ 25 % v/v ของทั้งหมด ในส่วนล่างสุดซึ่งมีประมาณ 15 % v/v ส่วนใหญ่เป็นลูทอยด์ และแมกนีเซียมในน้ำยางสด ภาพที่ 2.3 แสดงส่วนหลักทั้ง 4 ส่วนของน้ำยางสดที่ปั่นด้วยความเร็วรอบสูง



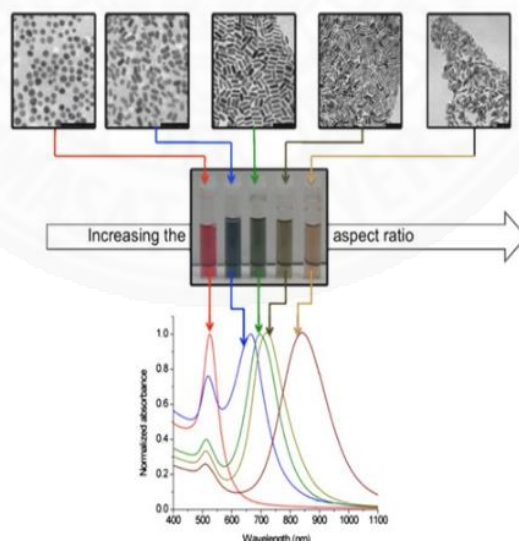
ภาพที่ 2.3 ส่วนต่าง ๆ ของน้ำยางสดที่ปั่นด้วยความเร็วรอบสูง จาก *ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน*, วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2555.

ลูทอยด์ หรือ วิสคอยด์ส (viscoids) เป็นอนุภาคที่ไม่ใช่ยาง รูปร่างเป็นทรงกลมที่มีเยื่อหุ้มเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคลูทอยด์ 2 - 10  $\mu\text{m}$  มีปริมาณ 10 - 20 % ของน้ำยางในทางเคมี ลูทอยด์ประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ มีโปรตีนละลายน้ำได้ประมาณ 3 %wt. โปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ ประมาณ 2 %wt. และฟอสโฟไลปิดประมาณ 0.5 %wt. ภายในลูทอยด์มีสารละลายที่ประกอบด้วยสารละลายของกรด เกลือแร่ โปรตีน น้ำตาล และโพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase) มีความเป็นกรด - ต่าง (pH) ประมาณ 5.5 ในขณะที่เซรัมส่วนบนมีความเป็นกรด - ต่างประมาณ 6.9 ในลูทอยด์มีโปรตีนหลาย ลูทอยด์ที่อยู่ในน้ำยางสดมีปริมาณเพียงพอที่จะส่งผลต่อความหนืดและสมบัติคอลลอยด์ของน้ำยางสด

## 2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอนุภาคนาโนของทองคำ (Gold nanoparticles, AuNPs)

### 2.2.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะของอนุภาคนาโนทองคำ

ทองคำที่เป็นธาตุเฉื่อย มักไม่ทำปฏิกิริยา และได้นำมาใช้ในทางการแพทย์เพื่อป้องกันการอักเสบของเนื้อเยื่อในการรักษาโรค เช่น rheumatoid arthritis และมีการนำมาใช้ในการรักษาโรคมะเร็งโดยใช้เป็นสารในกลุ่มของ radioisotope อีกด้วย เมื่อทองคำมีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับนาโนตั้งแต่ 5 nm ขึ้นไป จะยังคงมีลักษณะสมบัติเหมือนกันกับทองคำทั่วไป แต่เมื่อมีขนาดต่ำกว่า 500 nm จะมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างจากทองคำ ได้แก่ สีของ AuNPs จะมีหลากหลายสี เช่น แดง ฟ้า เขียว หรือน้ำตาล ซึ่งไม่ได้ปรากฏเป็นสีทองเหมือนทองคำทั่วไป สีที่ต่างนี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนในแถบของการนำไฟฟ้า ในอนุภาคนาโนโลหะกับสนามไฟฟ้าที่มาจากแสงที่ตกกระทบ ซึ่งทำให้เกิดการแทรกสอดของอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งการแทรกสอดนี้เรียกว่า localized surface plasmon resonance (LSPR) ซึ่งเกิดภายใต้สเปกตรัมของแสงวิซิเบิล และแสงใกล้อินฟราเรด โดยการเปล่งแสงสีต่าง ๆ นี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของ AuNPs เช่น ทองคำในรูปของแท่งนาโนจะสามารถดูดซับแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 800 – 1200 nm เป็นต้น การเปล่งแสงของ AuNPs ที่มีรูปร่างแตกต่างกันแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การเปล่งแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่มีลักษณะรูปร่างต่าง ๆ ตามความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน จาก *ลักษณะสมบัติเฉพาะ {อนุภาคนาโนทองคำ (Nano-Au)}*. Nanosafety Database ฐานข้อมูลความปลอดภัยวัสดุนาโน. สืบค้นจาก [http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceri/nanodatabase/info2.php?cat\\_id=9&p\\_id=258](http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceri/nanodatabase/info2.php?cat_id=9&p_id=258)

ในช่วงความยาวคลื่น 800 – 1,200 nm นี้ วัสดุหลายชนิดรวมถึงน้ำไม่สามารถดูดซับแสงได้ หากร่างกายได้รับความยาวคลื่นนี้ แสงจะสามารถส่องทะลุมายังเนื้อเยื่อภายในได้ แต่ AuNPs จะสามารถดูดซับแสงเหล่านี้ได้ ด้วยสมบัตินี้จึงได้นำ AuNPs ไปใช้งานทางการแพทย์ทั้งในการรักษาพยาบาล และการนำไปใช้เป็น imaging agent เพื่อสร้างภาพอวัยวะได้ เช่น การใช้แท่งนาโนทองคำในการรับแสงที่ความยาวคลื่น 757 nm ในการสร้างภาพของเนื้อเยื่อของหนูที่มีความลึกถึงไปได้ถึง 4 cm เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีการนำ AuNPs ไปใช้ในการตรวจวัดด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy เพื่อใช้ในการตรวจสอบภาคตัดขวางของโมเลกุลได้อีกด้วย จึงมีการพัฒนาเครื่องมือเรียกว่า Surface – enhanced Raman Spectroscopy (SERS) ซึ่งนำไปใช้ในการตรวจสอบการเกิดก้อนเนื้อในหนูที่ยังมีชีวิตอยู่ได้ และมีการพัฒนาเทคนิคในการใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดระดับน้ำตาลกลูโคสในหนูอีกด้วย

## 2.2.2 การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

### 2.2.2.1 อุตสาหกรรมทางการแพทย์

มีการนำ AuNPs มาใช้ทางการแพทย์อย่างแพร่หลายได้แก่ การตรวจวัดและกำจัดเซลล์ก้อนเนื้อ โดยมีการนำอนุภาคนาโนทองคำที่มีรูปร่างแท่ง และทรงกลมมาใช้ในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย และการกำจัดก้อนเนื้อที่เป็นส่วนของเซลล์มะเร็งได้ ยังมีการนำ AuNPs ไปใช้ในระบบนำส่งยา (drug delivery) ที่มุ่งเป้าในการรักษาเซลล์มะเร็งร่วมกับการฉายแสง ซึ่งจะทำให้อนุภาคนาโนร้อนขึ้นและสามารถกำจัดเซลล์มะเร็งไปพร้อมกัน มีงานวิจัยศึกษาพบว่า AuNPs ทำให้เซลล์ชนิด Carcinoma lung cell line A549 ตายได้ นอกจากนี้ยังได้นำ AuNPs ไปผลิตเซนเซอร์เพื่อตรวจจับเนื้อร้ายที่เกิดขึ้น และนำไปใช้ในการตรวจวัดสารพันธุกรรมและ DNA จากนั้นจึงได้พัฒนาเครื่องตรวจวัด DNA โดยใช้ AuNPs ซึ่งสามารถวัดได้อย่างแม่นยำ และวัดความเข้มข้นของ DNA 500 femtomolar โดยมี point mutation selectivity factor เป็น 100,000 : 1 ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคนี้ไปใช้การวัด DNA แทนเทคนิคที่เคยใช้มา และนำมาใช้ในการตรวจวัดเชื้อโรคหลากหลายชนิดอีกด้วย ในด้านการสร้างภาพทางชีวภาพหรือภาพอวัยวะ เนื้อเยื่อต่าง ๆ ที่อยู่ในร่างกายที่เรียกว่า bioimaging เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่มีการนำ AuNPs ไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยอาศัยลักษณะสมบัติในการแทรกสอดแสง (plasmon resonance) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง โครงสร้าง และดัชนีการหักเหของตัวกลางไปใช้งานในการสร้างภาพอวัยวะต่าง ๆ (Murphy และคณะ, 2551)

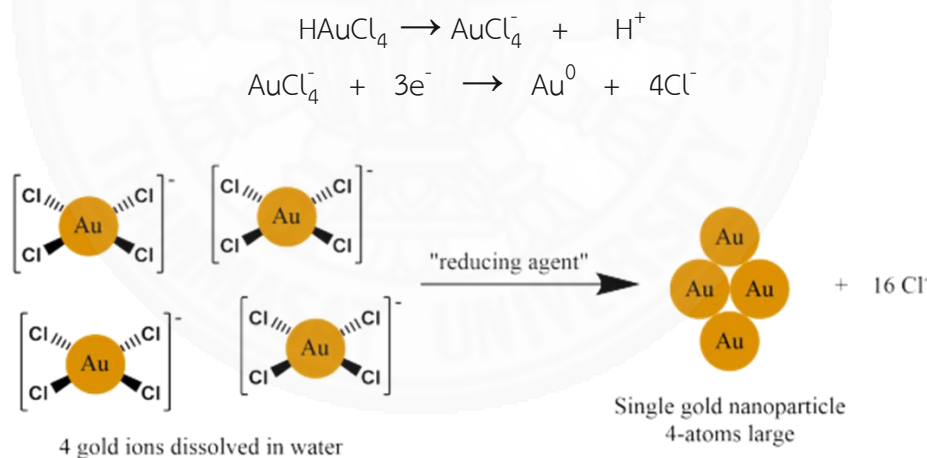
### 2.2.2.2 อุตสาหกรรมเคมี

มีการนำ AuNPs มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมเคมี โดยใช้สมบัติของ AuNPs ที่เป็นโลหะ จากการแทรกสอดของอิเล็กตรอนจากแถบการนำไฟฟ้าของทองคำ เมื่อได้รับแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ทำให้ AuNPs มีสมบัติที่ดีต่อการประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

## 2.3 การสังเคราะห์และการตรวจสอบคุณลักษณะของอนุภาคนาโนทองคำ

### 2.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

การสังเคราะห์เริ่มต้นจากการเรียงอะตอมแต่ละอะตอมประกอบขึ้นเป็นอนุภาคจนมีขนาดนาโนเมตร ด้วยวิธีต่าง ๆ ทางเคมี เช่น อาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายโกลด์ (III) คลอไรด์ ( $\text{HAuCl}_4$ ) เป็นตัวให้อิออนทองคำ ( $\text{Au}^{3+}$ ) โดยใช้ตัวรีดิวซ์ เช่น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ หรือ โซเดียม ซิเตรท () เพื่อเปลี่ยนอิออนของทอง ( $\text{Au}^{3+}$ ) เป็นอะตอมของทอง ( $\text{Au}^0$ ) จากนั้นอะตอมทองรวมตัวหลายๆ อะตอมจนกลายเป็นอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดระดับนาโนเมตรซึ่งมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีของแข็งขนาดนาโนเมตรแขวนลอยอยู่ในสารละลาย



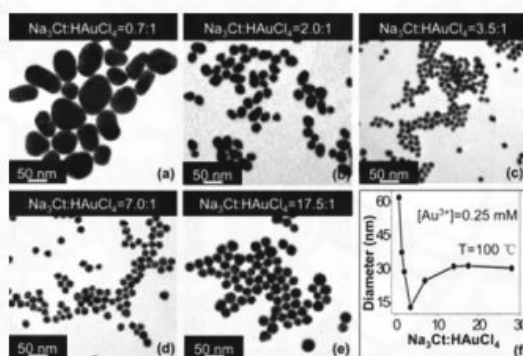
ภาพที่ 2.6 สมการและการเกิดอนุภาคนาโนทองคำ จาก *Sustainable Nano: Two way to make nanoparticles*, CATHY MURPHY, 2557. สืบค้นจาก <http://sustainable-nano.com/2557/06/10/two-ways-to-make-nanoparticles/>

### 2.3.2 การตรวจสอบคุณลักษณะของอนุภาคนาโนทองคำ

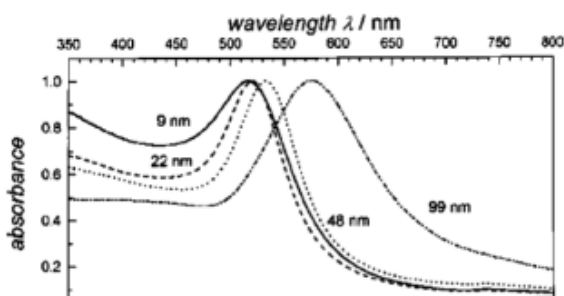
เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดระดับนาโนเมตรไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscopes) ที่มีกำลังขยายสูง เช่น

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM) ภาพที่ 2.7 แสดง AuNPs ขนาดเฉลี่ย 6 นาโนเมตร ที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านกำลังขยาย 200 kV

ในการสังเคราะห์ AuNPs โดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชันพบว่าสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคได้โดยปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นของสารละลายโกลด์ (III) คลอไรด์ และความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ อุณหภูมิ และสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น ตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์ AuNPs ให้มีขนาดต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ คือ ไตรโซเดียมซิเตรท โดยใช้สารละลายโกลด์ (III) คลอไรด์ที่มีความเข้มข้นคงที่ ผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของไตรโซเดียมซิเตรทเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของ AuNPs เล็กลง เพราะเมื่อความเข้มข้นของไตรโซเดียมซิเตรทเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เร็วและสมบูรณ์ จึงได้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก ในทางตรงกันข้าม เมื่อความเข้มข้นของไตรโซเดียมซิเตรทลดลงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน อะตอมที่เกิดขึ้นรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น ขนาดของ AuNPs ที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ภาพถ่าย TEM และการเฉลี่ยขนาดของอนุภาคนาโนของทองคำเมื่อสังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของ citrate ต่าง ๆ จาก *Nanoparticles: Synthesis and Applications for Chemical Analysis*, Teepoo และคณะ, 2012.



ภาพที่ 2.8 ผลของขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่มีต่อการดูดกลืนแสง จาก *Nanoparticles: Synthesis and Applications for Chemical Analysis*, Teepoo และคณะ, 2012.

การตรวจสอบลักษณะของ AuNPs นอกจากจะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านแล้ว ยังสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ทองคำเมื่ออยู่ในรูปก้อนขนาดใหญ่จะมีสีเหลือง เนื่องมาจากทองคำดูดกลืนแสงสีน้ำเงิน ทำให้เห็นทองคำเป็นสีเหลือง แต่ถ้าทองคำถูกทำให้มีขนาดเล็กลงไปเรื่อย ๆ จนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มากกระทบมาก ๆ ทำให้ AuNPs เปลี่ยนความยาวคลื่นที่ดูดกลืนไปเป็นดูดกลืนแสงสีเขียวที่ความยาวคลื่นประมาณ 500 นาโนเมตร ทำให้เห็น AuNPs เป็นสีแดง ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงขึ้นกับขนาดของ AuNPs ทั้งนี้เพราะ AuNPs ขนาดต่างกันจะให้สีที่ต่างกัน AuNPs ขนาดเล็กจะดูดกลืนความยาวคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้น ทำให้เห็น AuNPs เป็นสีแดงเข้ม แต่เมื่ออนุภาคนาโนทองคำมีขนาดใหญ่ขึ้น AuNPs จะดูดกลืนความยาวคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นยาวขึ้น สีที่เห็นจึงเปลี่ยนเป็นสีม่วงและน้ำเงินตามขนาดของ AuNPs ที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังภาพที่ 2.8

## 2.4 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง

แสงที่มองเห็น (visible light) เป็นแสงสีขาวที่เกิดจากการรวมกันของแสงสีต่าง ๆ มีสีหลักอยู่ 7 สี คือ สีม่วง สีคราม สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแสด และสีแดง เมื่อแสงสีขาวตกกระทบวัตถุแล้วทำให้มองเห็นวัตถุเป็นสีใด แสดงว่าวัตถุดูดกลืนแสงสีอื่น ๆ หมด แต่สะท้อนแสงที่ตามองเห็นออกมา แต่ถ้าวัตถุนั้น ๆ ดูดกลืนแสงทุกสีไว้ได้หมดจะมองเห็นวัตถุเป็นสีดำดังแสดงในภาพที่ 2.9

$\lambda$ (nm) ที่ถูกดูดกลืน	สีของแสงที่ถูกดูดกลืน	สีเดิมเดิมที่ถูกส่งผ่าน
400 – 435	ม่วง	เหลือง – เขียว
435 – 480	น้ำเงิน	เหลือง
480 – 490	น้ำเงิน – เขียว	ส้ม
490 – 500	เขียว – น้ำเงิน	แดง
500 – 560	เขียว	ม่วงแดง
560 – 580	เหลือง – เขียว	ม่วงน้ำเงิน
580 – 595	เหลือง	น้ำเงิน
595 – 650	ส้ม	น้ำเงิน – เขียว
650 – 750	แดง	เขียว – น้ำเงิน

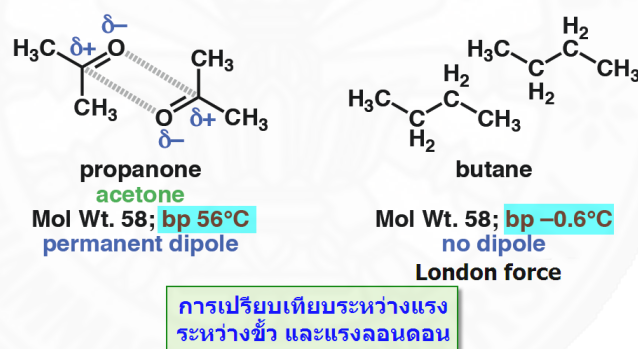


ภาพที่ 2.9 ช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็น จาก *Basic of Spectroscopy หลักพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงสเปกโทรสโกปี*, Woravith Chansuwan, 2558.

## 2.5 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

### 2.5.1 แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole - dipole force)

เป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอันเนื่องมาจากแรงกระทำระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบของโมเลกุลที่มีขั้วจัดเป็นแรงที่เกิดจากขั้วถาวรดึงดูดกันเองระหว่างขั้วบวกและขั้วลบซึ่งดึงดูดได้สองแบบ ดังตัวอย่างของอะซิโตน แรงไดโพลมีบทบาทสำคัญในการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของโมเลกุลในผลึก สำหรับโมเลกุลในสถานะแก๊สและของเหลว โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เพราะมีการเคลื่อนไหวมากจึงเป็นผลให้แรงไดโพลมีทั้งแบบผลึกและดึงดูด ซึ่งทำให้แรงลัพธ์ออกมา เป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole - dipole forces) กับแรงลอนดอน (London dispersion forces) โดยที่โมเลกุลมีขนาดพอๆกัน พบว่าแรงดึงดูดระหว่างขั้วมีความแข็งแรงมากกว่าดังตัวอย่างของอะซิโตน มีจุดเดือดเท่ากับ  $56^{\circ}\text{C}$  กับบิวเทน มีจุดเดือดเท่ากับ  $-0.6^{\circ}\text{C}$  (พิจารณาจากสารประกอบที่มีจุดเดือดสูงกว่าต้องมีแรงระหว่างโมเลกุลมากกว่า) ในภาพที่ 2.10

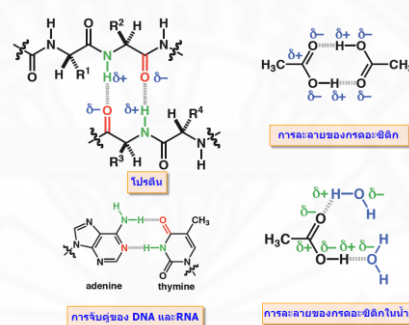


ภาพที่ 2.10 การเปรียบเทียบระหว่างแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole - dipole forces) กับแรงลอนดอน (London dispersion forces) จาก *คลังความรู้ SciMath: แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล*, ฌปภัช พิมพ์ดี, 2560. สืบค้นจาก <http://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7164-2017-06-04-15-16-29>



## 2.5.2 พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding, H – bond)

คือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เกิดจากไฮโดรเจนอะตอมสร้างพันธะโคเวเลนต์กับอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ๆ และมีขนาดเล็ก ได้แก่ F , O และ N แล้วเกิดพันธะโคเวเลนต์มีขั้วชนิดมีสภาพขั้วแรงมาก ทั้งนี้เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นนี้อิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะจะถูกดึงเข้ามาใกล้อะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง มากกว่าทางด้านอะตอมของไฮโดรเจนมาก และอะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ยังมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว จึงเกิดดึงดูดกันระหว่างอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวกับอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งมีอำนาจไฟฟ้าบวกสูงของอีกโมเลกุลหนึ่ง ทำให้เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนมีบทบาทสำคัญกับกระบวนการที่สำคัญของสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นการจับกันระหว่างโมเลกุลของโปรตีน และการจับเข้าคู่กับของ DNA และ RNA



ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างของการเกิดพันธะไฮโดรเจน จาก *คลังความรู้ SciMath: แรงแยัดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล*, ฌปภัช พิมพิดี, 2560. สืบค้นจาก <http://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7164-2017-06-04-15-16-29>

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อนุภาคนาโนทองคำ (Gold nanoparticle, AuNPs) มีคุณสมบัติที่เฉพาะตัวและสามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ความเสถียรของอนุภาคนั้นขึ้นอยู่กับ ขนาดและรูปร่างของอนุภาค ระยะห่างระหว่างอนุภาคเอง และธรรมชาติของสารออกแกนิกที่ล้อมรอบเป็น shell คุณสมบัติเฉพาะตัวของ AuNPs นั้นแบ่งออกเป็นหลายด้านด้วยกัน ที่โดดเด่นและเห็นอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ การใช้ทางการแพทย์และทางชีวภาพ เนื่องจาก AuNPs ไม่เป็นพิษและสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพ อีกทั้งขนาดของมัน (1-500 nm) ยังเล็กกว่าเซลล์มนุษย์ทำให้เกิดการพัฒนาในการทำอุปกรณ์นาโน และนาโนเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดโปรตีน หรือ DNA และใช้สมบัติของความเป็นอิเล็กทรอนิกส์ในการส่งสัญญาณ นอกจากนี้ยังใช้ในการวินิจฉัยโรคมะเร็งได้ โดยใช้คุณสมบัติเชิงแสงและอิเล็กทรอนิกส์สามารถใช้นำส่งยา และคุณสมบัติการนำความร้อนและถ่ายเทความร้อนที่ดีนั้น

สามารถใช้รักษามะเร็งได้อย่างตรงจุดมากกว่าการทำเคมีบำบัดหรือการฉายแสง ซึ่งเป็นการรักษาที่ยังคงใช้อยู่ในปัจจุบัน

ในด้านสิ่งแวดล้อมนั้นเนื่องจากทองคำเองเป็นโลหะที่มีความเสถียรและมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน จึงมีความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของสารที่ไม่อิ่มตัว เป็นต้น หรือใช้ในกระบวนการพัฒนาน้ำและอากาศ เช่น กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เพื่อลดความอันตรายของ CO ที่กระจายสู่อากาศ และใช้เป็นตัวดูดซับปรอทที่ปนเปื้อนในน้ำออกไปได้ และนอกจากนี้ยังมีการใช้ในการทำเซ็นเซอร์การตรวจจับหรือวิเคราะห์สารในปริมาณที่น้อยมากในระดับ ppm หรืออาจจะนำอนุภาคมาทำแห้งและบดเป็นผงที่มีคุณสมบัติเรืองสี (pigment) ใช้เคลือบแก้ว เสริมคุณสมบัติ หรือความว่องไวให้เป็นไปตามต้องการ หรือแม้แต่การใช้เก็บข้อมูลประสิทธิภาพสูง หรือนำสมบัติการนำและถ่ายเทความร้อนมาใช้ด้านพลังงานสะอาด (clean energy) หรือใช้กับวัสดุสำหรับทำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย (Rad และคณะ, 2554)

โดยในการสังเคราะห์ AuNPs ในปัจจุบันมีหลายวิธี งานวิจัยนี้สนใจการสังเคราะห์ด้วยวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Green synthesis) เพราะช่วยลดการใช้สารเคมีที่อันตราย และเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก มีงานวิจัยหนึ่งศึกษาการสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากใบแปะก๊วยเป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งเป็นการสังเคราะห์แบบเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเปรียบเทียบการสังเคราะห์แบบใช้สารเคมี โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (KBH<sub>4</sub>) เป็นตัวรีดิวซ์ และยังเปรียบเทียบกับการสังเคราะห์แบบผสม (Velmurugan และคณะ, 2559) และจากนั้นจึงนำไปทดสอบความสามารถด้านแบคทีเรียบนตัวอย่าง นั่นคือ หนัและเส้นใย ได้แก่ เส้นใยไหม และเส้นใยฝ้าย เมื่อจุ่มด้วย AuNPs ที่สังเคราะห์ได้ในสภาวะที่แตกต่างกัน พบว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีที่ใช้สารสกัดจากใบแปะก๊วย ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของตัวอย่าง อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียสูงที่สุดอีกด้วย ซึ่งเป็นผลจากความสามารถในการฆ่าเชื้อของสารสกัดใบแปะก๊วยเองรวมกับประสิทธิภาพของ AuNPs งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ยืนยันว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีใช้สารสกัดจากใบแปะก๊วยนั้นเป็นวิธีที่สังเคราะห์อย่างง่าย (เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม) ยังให้ประสิทธิภาพที่ดีเมื่อนำไปประยุกต์ใช้อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นที่สังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ เช่น งานวิจัยของ Hoshyar และคณะ (2559) การสังเคราะห์ AuNPs โดยใช้ สารสกัดโครซินเป็นสารรีดิวซ์ และช่วยควบคุมขนาดอนุภาคด้วย อนุภาคที่ได้มีรูปร่างทรงกลม ขนาดเฉลี่ยประมาณ 4 – 10 nm ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 nm เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเซลล์มะเร็งเต้านม พบว่าจำนวนเซลล์ลดลงหลังเวลาผ่านไป 24 – 28 ชั่วโมง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ได้ งานวิจัยของ Yan และคณะ (2559) ได้นำไปประยุกต์ใช้ในเรื่องของตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลาย 4-nitrophenol (4-NP) ให้กลายเป็น 4-amiphenol (4-AP) โดย

การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ( $\text{NaBH}_4$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่ง AuNPs ถูกสังเคราะห์ขึ้นนาโนเซลลูโลส (CNC) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ในระบบนี้ งานวิจัยได้ระบุว่า 90% ของ AuNPs มีขนาดขนาดเล็กกว่า 10 nm และเกือบ 60 % มีขนาดต่ำกว่า 5 nm และวิเคราะห์ว่าประสิทธิภาพสูงของการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดจากขนาด AuNPs ที่เล็กที่สามารถสังเคราะห์ได้ในระบบนี้ งานวิจัยส่วนใหญ่ที่สังเคราะห์ AuNPs ด้วยวิธีสังเคราะห์สีเขียว มักจะมีการใช้สารที่ให้ไอออนของทองคำเป็นตัวเดียวกันคือโกลด์ (III)คลอไรด์ ( $\text{HAuCl}_4$ ) แต่จะมีการใช้สารสกัดจากธรรมชาติหรือสารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไปในการเป็นตัวรีดิวซ์นั่นเอง

งานวิจัยนี้สนใจที่จะเพิ่มมูลค่าของน้ำยางโดยนำส่วนของหางน้ำยาง (Skim natural rubber latex, SNRL) ที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำยางข้น จะนำหางน้ำยางมาใช้เป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน Suwatthanarak และ คณะ (2559) ได้นำหางน้ำยางมาสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน (AgNPs) โดยเตรียมให้สารละลายมีความเข้มข้นของไอออนเงิน ( $\text{Ag}^+$ ) 1.2 mM ในสารละลาย SNRL ที่ 0.05% DRC หรือ เปอร์เซนต์เนื้อยางแห้งใน SNRL ที่อุณหภูมิห้อง กวนด้วยความเร็ว 100 rpm เป็นเวลา 45 นาที นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของแอมโมเนีย กลูโคส และโบวินเซรัมอัลบูมินโปรตีนต่อการสังเคราะห์นาโนเงินด้วย อนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้ดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 375 - 390 nm อยู่ในช่วง 350 - 460 nm และอนุภาคนาโนเงินจะดูดกลืนได้ และอนุภาคที่สังเคราะห์ในสภาวะปกติ จะมีขนาดประมาณ 6 - 26 nm หรือขนาดเฉลี่ยประมาณ 12 nm โดยขนาดเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกลูโคส และแอมโมเนีย เป็นขนาดเฉลี่ยที่ 62 และ 150 nm ตามลำดับ และจะลดลงเป็นขนาดเฉลี่ยที่ 6 nm เมื่อเติมโบวินเซรัมอัลบูมินโปรตีน โบวินเซรัมอัลบูมินโปรตีนยังมีส่วนช่วยในการควบคุมการเติบโต หรือขนาดของอนุภาค งานวิจัยนี้ได้นำ AgNPs ไปทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยแยกอนุภาคปริมาณ 40  $\mu\text{g}$  ลงไปอยู่ในตัวอย่างที่มี *E.coli* and *S. aureus* bacteria ซึ่งผลคือจำนวนแบคทีเรียรอบ ๆ AgNPs ไม่มีการเติบโต งานวิจัยนี้เป็นแนวทางที่ในการศึกษาการใช้หางน้ำยางในการสังเคราะห์ AuNPs

งานวิจัยของ Konglek และคณะ (2560) เล็งเห็นว่าการจับอนุภาคยางออกไปก่อน จะสามารถนำ AuNPs ที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ได้หลากหลายมากขึ้น เมื่อเทียบกับ AuNPs ที่สังเคราะห์ได้ใน SNRL เลย ซึ่งอาจจะเหมาะสมกับการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ยางมากกว่า Konglek และคณะ (2560) จึงสนใจเฉพาะส่วนเซรัมที่เตรียมได้จากการจับก้อนเนื้อยางออกโดยการใช้ พอลิอะคริลามด์ (PAM) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ในการสังเคราะห์นี้จะใช้โกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต ( $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นตัวให้ไอออนของทองคำ ( $\text{Au}^{3+}$ ) และศึกษาผลความเข้มข้นของ  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  สัดส่วนการเจือจางของเซรัม และระยะเวลาในการสังเคราะห์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อการสังเคราะห์ AuNPs ในระบบเซรัมนี้ พบว่าที่สัดส่วนการเจือจางเซรัม 7 เท่า กับสารละลาย

HAuCl<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O 1.2 mM ซึ่งสังเคราะห์โดยการสั่นด้วยเสียง (sonicate) ที่อุณหภูมิ 80 °C ให้ผลที่ดีที่สุด มีการทดสอบคุณลักษณะด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสง การนำไฟฟ้า ค่า pH และลักษณะทางสัณฐานวิทยา และเมื่อพิจารณาอนุภาคที่สังเคราะห์ในระยะเวลา 3 ชั่วโมงพบว่าอนุภาคเป็นทรงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 – 60 nm และนอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบการใช้เป็นแอมโมเนียเซนเซอร์ โดยการแยก AuNPs ที่สังเคราะห์ได้ไปเตรียมเป็นสารละลายในน้ำ และทดสอบด้วยการเติมสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) ความเข้มข้นต่ำ ๆ ลงไป (0 – 2000 ppb) พบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนแตกต่างจากงานวิจัยของ Pandey และคณะ (2558) ที่ได้ผลว่า เมื่อเติมสารละลาย NH<sub>4</sub>OH ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไปใน AuNPs ที่มีขนาดเฉลี่ย 6.5 nm ซึ่งสังเคราะห์ได้จากสารสกัด Guar gum (GG) ซึ่งเป็นสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์พบว่าจะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลงเรื่อย ๆ โดยอธิบายไว้ว่าสารละลาย NH<sub>4</sub>OH ที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้ไปเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของทองคำ และทำให้ปริมาณของ AuNPs ลดลงหรือส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งของ AuNPs นั้นลดลงด้วย เมื่อวิเคราะห์ผลที่ต่างกัันของสองงานวิจัยพบว่า สาเหตุที่ทำให้ AuNPs ที่สังเคราะห์ได้จาก SNRL ไม่ประสบความสำเร็จ อาจเกิดจากขนาดของ AuNPs ที่ไม่เหมาะสม หรือมีขนาดที่ใหญ่กว่าที่สังเคราะห์ได้จาก GG และนอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์อีกว่าสภาวะสารละลาย AuNPs อาจจะไม่เหมาะสม

งานวิจัยของ Nezhad และคณะ (2557) ได้สังเคราะห์ AuNPs และใช้วัดความเข้มข้นของซิสทีน (Cys) และกลูตาไธโอน (GSH) โดยเกิดการรวมกลุ่มกันของ AuNPs ในระบบนี้สังเคราะห์ AuNPs โดยใช้ไตรโซเดียมซิเตรตเป็นตัวรีดิวซ์ และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ได้แก่ ความเข้มข้นของ AuNPs ความแข็งแรงของไอออน (ionic strength) และ pH จากนั้นจึงพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมที่จะสามารถวัด GSH และ Cys ได้อย่างเฉพาะเจาะจงและถูกต้อง โดยผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ของหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ด้วยหมู่ไทโธล (-SH) ที่มีกรดอะมิโนอยู่ ได้แก่ Cys และ GSH จะทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาค ซึ่งผลการรวมกลุ่มนั้น ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 521 nm ลดลง และเกิดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นใหม่ที่ 640 nm สำหรับ Cys และ 650 nm สำหรับ GSH ผลของความแข็งแรงไอออนหรือสารละลายสื่อไฟฟ้าที่แข็งแรง จะส่งผลให้เกิดการลดลงของชั้นประจุสองชั้น (electrical double layer) ที่ไปล้อมอนุภาค จึงส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคได้ การทดลองนี้แสดงผลให้เห็นว่าในกรณีที่มีการเติม โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ลงไปร่วมการเติม Cys ทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันที่ชัดเจนขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปทุก 3 นาที ส่วนผลของ pH เป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic interactions) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาค เนื่องจาก Cys มีโครงสร้างแบบสวิตเทอร์ไอออน (ทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ในโครงสร้าง) เมื่อทำให้ pH มีค่าอยู่ในช่วง 3 – 7 Cys จะทำให้เกิดการ

รวมกลุ่มด้วยวิธีนี้มากขึ้น กระบวนการรวมตัวของ AuNPs สำหรับ GSH นั้นเกิดในรูปของพันธะไฮโดรเจน การปรับ pH ให้มีสภาพเป็นกรด จะทำให้หมู่คาร์บอกซิลอยู่ในรูปของการเติมโปรตอน ( $H^+$ ) และทำให้การรวมกันของอนุภาคเกิดขึ้นได้ สำหรับผลของความเข้มข้นของ AuNPs นั้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ AuNPs จะทำให้การรวมกลุ่มของอนุภาคเพิ่มขึ้นในกรณีของการเติม Cys ที่ความเข้มข้น 10  $\mu M$  และแต่จะทำให้การรวมกลุ่มของอนุภาคลดลงในกรณีของการเติม GSH ที่ความเข้มข้น 20  $\mu M$  และสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งของ AuNPs เริ่มต้น และที่ตำแหน่งการดูดกลืนแสงหลังจากอนุภาคเกิดการรวมตัว แสดงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงจึงสามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบ เพื่อพิจารณาความเข้มข้นของ Cys และ GSH เมื่อทำการทดลองวัดโดยใช้ตัวอย่างจริง ที่กำหนดความเข้มข้นของ Cys และ GSH ที่แตกต่างกัน พบว่าสามารถวัดความเข้มข้นได้ค่อนข้างใกล้เคียงมาก จึงเป็นการยืนยันให้ประสิทธิภาพของ AuNPs ที่นำมาใช้ตรวจวัดความเข้มข้นของ Cys และ GSH ด้วยการดูดกลืนแสงนั้นให้ประสิทธิภาพที่ดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์ทางชีววิทยาได้จริง ดังนั้นปัจจัยต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นค่า pH ความแข็งแรงของไอออน และความเข้มข้นของ AuNPs มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความเหมาะสมในการเป็นเซนเซอร์ของสารแต่ละชนิด

ในงานวิจัยของ Li และคณะ (2560) ได้มีการอธิบายผลของการปรับค่า pH ที่ส่งผลต่อความสามารถในการเลือกและความไวสูง (Highly selectivity and sensitive) ในการตรวจวัดความเข้มข้นของ GSH จากการต้านการรวมกลุ่มของ AuNPs งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยอ้างอิงของงานวิจัยข้างต้น ในงานวิจัยนี้ได้มีศึกษาผลของ GSH ต่อการต้านการรวมกลุ่มของ AuNPs เมื่อมีการใช้สาร 2 - Mercapto - 1 - methylimidazole (MMI) ซึ่งมีหมู่ไทออลอยู่ที่ปลายด้านหนึ่ง โดยแรงโควาเลนต์ที่แข็งแรงนี้เกิดขึ้นระหว่างผิวของ Au และหมู่ -SH ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนสะพานเชื่อมระหว่าง AuNPs ให้เข้ามารวมกลุ่มกัน AuNPs ในระบบนี้สังเคราะห์โดยการใส่สารละลายไตรโซเดียมซิติเตทเป็นตัวรีดิวซ์ ผลของการทดลองพบว่า AuNPs เกิดการรวมกลุ่มกัน จะลดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 nm และเพิ่มค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 650 nm พร้อมกับทำให้สีของอนุภาคนาโนทองคำเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีฟ้า พร้อมกันนี้ยังได้ทดสอบกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ MMI และ GSH และพบว่า GSH จะเข้าทำปฏิกิริยาก่อน MMI และการที่ MMI ส่งผลได้ช้ากว่านั้นเป็นเพราะโครงสร้างของโมเลกุลที่มีความเกะกะ (steric hindrance) ผลของค่า pH ในกรณีของ GSH แสดงให้เห็นว่าที่  $pH < 4.5$  จะส่งผลให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง AuNPs ได้ จึงเป็นการได้อธิบายผลของ Cys ต่อการรวมกลุ่มของ AuNPs ที่  $pH = 5.7 - 5.9$

นอกจากศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้แล้วนั้น อีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญเช่นเดียวกันนั้นคือเรื่องของการควบคุม

ขนาดของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ เนื่องจากขนาดที่เหมาะสมก็จะส่งผลถึงประสิทธิภาพที่ดีที่สุดด้วย เช่นเดียวกัน ซึ่งมีงานวิจัยที่เสนอแนวทางหรือวิธีการในการควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนหลายงานด้วยกัน งานวิจัยของ Maddinedi และคณะ (2560) ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเงิน (AgNPs) โดยการใช้เอนไซม์ไดแอสเตส (diastase) ซึ่งเป็น enzyme  $\alpha$ -amylase ที่สังเคราะห์ได้จากผงแป้งข้าวโมลต์มาเตรียมเป็นสารละลายตัวรีดิวส์ ในการสังเคราะห์นี้มีการศึกษาการควบคุมขนาดของ AgNPs ด้วยการปรับค่า pH ของสารละลายเอนไซม์ไดแอสเตส หรือสารละลายตัวรีดิวซ์ โดยเริ่มแรกได้มีการปรับให้ pH มีค่าต่ำกว่าจนถึง 10 พบว่าเกิดการตกตะกอน และเมื่อปรับ pH มาที่ 11 12 และ 13 สารละลายไม่เกิดการตกตะกอนและเริ่มสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีสารละลาย การจับกลุ่มกันของอนุภาคนาโนเป็นขนาดใหญ่ขึ้นเกิดจากสารละลายที่เป็นกรด เสถียรภาพของหมู่คาร์บอกซิลจะน้อยต่อการเป็นสารห่อหุ้ม AgNPs (capping agent) ของ AgNPs จึงนำไปสู่การจับก้อนของ AgNPs นั่นเอง ที่ pH เฉลี่ย 11, 12 และ 13 ได้ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 22.4, 12.2 และ 5 nm ตามลำดับและพบการดูดกลืนแสงในตำแหน่ง 430 414 และ 400 nm ตามลำดับ ที่ pH 11 สามารถสังเคราะห์ AgNPs รูปร่างอื่น ๆ เพิ่มเติมจากทรงกลม เพราะมีการรวมกลุ่มกันของอนุภาคมากที่สุด นอกจากนี้ได้มีการนำไปทดสอบผลต่อความเป็นพิษต่อเซลล์เชื้อสายที่พัฒนามาจากไฟโบรบลาสต์ของตัวอ่อนหนู (3T3) พบว่าเมื่อเติมสารละลาย AgNPs ที่ความเข้มข้นสูง เพอร์เซ็นต์การรอดของเซลล์ยิ่งลดลงมากที่สุด และพบว่า ที่ความเข้มข้นนั้นขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กจากการสังเคราะห์ได้ที่ pH 13 ทำให้เพอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของเซลล์นั้นต่ำสุดเมื่อเทียบกับขนาดอื่น ดังนั้นจะเห็นได้ชัดเจนว่า ขนาดของอนุภาคส่งผลต่อคุณสมบัติความเป็นพิษต่อเซลล์ และเช่นเดียวกันหากพิจารณา มาในระบบที่สังเคราะห์ AuNPs ค่า pH ที่เหมาะสม น่าจะส่งผลให้สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคได้

เมื่อศึกษาแนวทางของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของธาตุอื่นแล้ว จึงมีการค้นคว้าแนวทางการควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนของทองคำที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่างานวิจัยของกลุ่มเดิม ได้แก่ งานวิจัยของ Maddined และคณะ (2558) ได้ศึกษาการควบคุมขนาดของ AuNPs โดยการใช้สารสกัดเอนไซม์เอนไซม์ไดแอสเตสจากข้าวโมลต์ ในการทดลองนี้พบว่า การที่จะเตรียมขนาด AuNPs ให้มีขนาดที่แตกต่างกันนั้น จะขึ้นอยู่กับวิธีการการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน และสารห่อหุ้มของ AuNPs อัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันนั้น ขึ้นอยู่กับสารละลายเซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายเบสแก่ ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้อย่างรวดเร็วและเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วย ในส่วนของกรดอะมิโนของโปรตีนที่เหลืออยู่แตกต่างกันนั้น จะส่งผลต่อความสามารถในการรีดิวซ์ไอออนของทองคำ ให้เป็นอนุภาคนาโนได้อย่างช้าลง และหมู่ไทออลในเอนไซม์ไดแอสเตสนั้นจะส่งผลให้เกิดความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ AuNPs อีกด้วย ในการทดลองนี้ได้มีการศึกษาผลของ

ปริมาณเอนไซม์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเอนไซม์หรือมีหมู่ไทออลมากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดของอนุภาคนาโนมีขนาดที่เล็กลงคือค่าการดูดกลืนแสงมีการเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่น้อยลง (blue shift) โดยมีขนาด 148 nm 23.2 nm และ 9.7 nm สอดคล้องกับความยาวคลื่น 570 nm 540 nm และ 530 nm ตามลำดับอาจเกิดเนื่องจากการรบกวนกันของไอออน ในระบบที่ช่วยชะลอการสังเคราะห์ AuNPs ได้และมีส่วนช่วยในการควบคุมขนาดของ AuNPs ไม่ให้โตอย่างรวดเร็วได้นั้นเอง ต่อมาได้มีการศึกษาผลของ pH พบว่า เมื่อลด pH จาก 12 – 2 ขนาดของ AuNPs จะเพิ่มขึ้น และจาก pH ตั้งแต่ 10 – 4 จะส่งผลให้เกิดขนาดและรูปร่าง AuNPs ที่มีแตกต่างไปจากทรงกลม และส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้นนั่นคือ ระหว่างความยาวคลื่นที่ 650 และ 800 นอกจากนี้การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมขนาด AuNPs นั้นพบว่า มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของสารหมู่คาร์บอนิลในหมู่คีโตน (C=O) แตกต่างกันต่อการควบคุมขนาด AuNPs (Bhosale และคณะ, 2559) โดยการสังเคราะห์นี้ใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นพลังงานในการสังเคราะห์ AuNPs โดยสารหมู่คีโตนที่ใช้ได้แก่ไซโคลเฮกซานอน, 2,4-เพนเทนไดโอน, 2,5-เฮกเซนไดโอน, 1,4-ไซโคลเฮกเซนไดโอน, 1,3-ไซโคลเพนเทนไดโอน, ไซโคลเพนทาโนน, 2,3-บิวเทนไดโอน และ 2-บิวทาไดโอน ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ และสารห่อล้อมในการสังเคราะห์ และพบว่าขนาดที่สังเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 20-80 nm และสำหรับระบบที่ใช้ 2-บิวทาโนน ที่สังเคราะห์อนุภาคมีลักษณะไม่กลม และมีขนาดใหญ่ถึง 200-500 nm โดยได้นำ AuNPs ที่สังเคราะห์ได้จากหมู่คีโตนที่แตกต่างกันนี้ไปทำการทดสอบความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีดักชัน ในการเปลี่ยนพารา-ไนโตรฟินอลเป็นพารา-อะมิโนฟินอล พบว่า AuNPs ที่ได้จากการใช้ 2,3 - บิวทาไดโอนมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กที่สุด ที่ 20 nm และเมื่อทำปฏิกิริยารีดักชัน แล้วใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุด ก็จะสามารถเปลี่ยน พารา-ไนโตรฟินอลเป็นพารา-อะมิโนฟินอลได้ 100 % ในขณะที่เมื่อใช้ขนาดของ AuNPs ที่ใหญ่ขึ้นก็จะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นตามลำดับระดับการลดหมู่อะซิทีล ซึ่งขนาดจึงสำคัญต่อคุณสมบัติความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่มาก

อีกงานวิจัยหนึ่งที่มีความน่าสนใจนั้นใช้โคโตซาน (CTS) ที่เป็นพอลิแซคคาไรด์ มาใช้เป็นสารละลายตัวรีดิวซ์ โดยได้ศึกษาการสังเคราะห์ AuNPs จากการใช้โคโตซานที่มีตัวบ่งชี้ความเป็นโคโตซาน (%DD) และมวลโมเลกุลที่แตกต่างกัน (Sun และคณะ, 2560) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาผลของอุณหภูมิ ระยะเวลาของปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (สารละลายโกลด์ (III) คลอไรด์) โดยผลของของการลด %DD จะทำให้ขนาดและรูปร่างของ AuNPs มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลมมากยิ่งขึ้น เนื่องจาก %DD สูงจะแสดงความเป็นโคโตซานที่สูงกว่า และการที่ %DD สูงกลับทำปฏิกิริยาเกิดได้ช้ากว่านั้น เนื่องจากว่าผลรวมของไอออนในสารละลายที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดการขัดขวางกันเองและส่งผลให้เกิด AuNPs ได้น้อยลง สำหรับผลของมวลโมเลกุลโคโตซาน พบว่าเมื่อลด

มวลโมเลกุลสูง จะยิ่งทำให้ปริมาณในการสังเคราะห์ได้มากขึ้น เพราะมวลโมเลกุลที่สูง สายของโคโตซานจะยาวมาก และเกิดการพันเกี่ยวรบกวนการสังเคราะห์กันเอง ส่งผลให้สังเคราะห์ได้น้อยกว่าที่มวลโมเลกุลต่ำ แต่โมเลกุลไม่ค่อมมีผลต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคนัก ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคมากที่สุด นอกจาก %DD นั้นคือความเข้มข้นของโคโตซาน กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น จะทำให้ขนาดและรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปมากขึ้น ที่มีทั้งรูปทรงสามเหลี่ยม สามเหลี่ยมตัด สี่เหลี่ยม ห้าเหลี่ยม และหกเหลี่ยม เป็นต้น และส่งผลให้ช่วงความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงกว้างมากในตำแหน่งความยาวคลื่นสูงอีกด้วย

และเนื่องจากขนาดของ AuNPs ที่แตกต่างกันส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงแสงที่ต่างกัน การแยกขนาดของ AuNPs เพื่อนำไปประยุกต์ใช้จึงมีความน่าสนใจ งานวิจัยของ Li และคณะ (2558) ได้มีการศึกษาการแยกอนุภาคนาโนของโอเอลิตเอลเจเนทเอสเทอร์ (OAE) และขนาดของอนุภาคนาโนต่อการนำส่งวิตามินซี การศึกษาผลของความเร็วในการปั่นเหวี่ยงนั้นพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเหวี่ยง อนุภาคนาโนที่แยกได้นั้นจะมีขนาดลดลง จาก 730 เป็น 50 nm และความสามารถในการบรรจุวิตามินซีจะลดลงจาก 12.35 เป็น 4.95 % อาจเป็นเพราะจากอนุภาคนาโนขนาดใหญ่จะมีส่วนของส่วนที่ไม่ชอบน้ำมาก ทำให้สามารถบรรจุวิตามินอี ซึ่งเป็นสารไม่ชอบน้ำได้มากด้วยเช่นเดียวกัน และผลของการส่งผ่านวิตามินอีเข้าสู่ลำไส้เล็กส่วนกลาง (jejunum) อนุภาคนาโนขนาดเล็กจะช่วยให้ดูดซึมเข้าสู่เซลล์ลำไส้เล็กได้ดีกว่า งานวิจัยนี้เป็นการยืนยันทฤษฎีที่เป็นที่รู้โดยทั่วไปว่า อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะทำให้มีพื้นผิวสัมผัสที่มาก หากเป็นในเรื่องการเกิดปฏิกิริยาก็จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าหรือดีกว่า ถึงแม้ว่าอนุภาคขนาดใหญ่จะบรรจุสารได้ปริมาณที่มากกว่า แต่ท้ายที่สุดอนุภาคขนาดเล็กจะเป็นตัวส่งสารนั้นซึมเข้าไปเพื่อใช้งานได้มากกว่า จึงเป็นการแสดงถึงประโยชน์ของอนุภาคนาโนที่มีขนาดเล็กได้อย่าง

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น AuNPs มีคุณสมบัติพิเศษหลาย คุณสมบัติหนึ่งที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจคือการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ การที่ AuNPs จะสามารถเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดปริมาณสารหรือความเข้มข้นได้นั้น มีหลากหลายกลไกด้วยกัน เช่น การรวมกลุ่มของ AuNPs การสร้างพันธะกับไอออนลบ การย้อม หรือการกักร้อน ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงแสง (Optical properties) ของอนุภาคนาโนทองคำ จึงตรวจสอบได้หลายวิธี ได้แก่ การตรวจเทียบสี Colorimetry หรือการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโคปีหรือการกระตุ้นให้มีการสั่นภายในโมเลกุล ด้วยการดูดพลังงานและคายพลังงานออกมาในรูปของสเปกตรัมในช่วงฟลูออเรสเซนซ์ และการกระเจิงแสงแบบพื้นผิวขยายสัญญาณรามัน (Surface-enhanced Raman Scattering, SERS) ที่ผ่านมามีการใช้ AuNPs สำหรับการตรวจวัดสารประจุลบชนิดต่าง ๆ ซึ่งอาจจะเป็นสารที่มีความอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมหรือสารปนเปื้อน ได้แก่  $F^-$ ,  $CN^-$  และ  $AsO_3^{3-}/AsO_4^{3-}$  ดังแสดงในงานวิจัยของ



Fang และคณะ (2560) นอกจากการตรวจวัดสารปนเปื้อนในรูปของประจุลบแล้ว ยังมีการประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดทางชีวภาพ ดังงานวิจัยของ Xiao-Ming และคณะ (2561) ที่ได้มีรวบรวมเทคนิคของสีที่มองเห็นต่อการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ ดังที่ทราบแล้วว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านแสงและสีของ AuNPs นั้นเกิดจากหลายปัจจัย ได้แก่ ระยะห่างระหว่าง AuNPs โดยการเปลี่ยนแปลงสีของ AuNPs นั้นเกิดขึ้นได้จากการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำทั้งแบบการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลด้วยโครงสร้างร่างแห และการรวมกลุ่มแบบไม่เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลด้วยโครงสร้างร่างแห และปัจจัยที่เกิดขึ้นจากรูปร่างของ AuNPs ซึ่งมีทั้งการโตขึ้นของ AuNPs (Growth of AuNPs) และการกัดกร่อนของ AuNPs (Etching of AuNPs) AuNPs ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับโดยใช้การเปลี่ยนแปลงสีนั้น น่าสนใจและเป็นที่ต้องการในปัจจุบันมาก สิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาการพัฒนาเซนเซอร์นั้นมีอยู่ 3 ประการ ประการแรกคือต้องสังเคราะห์ AuNPs ให้มีปริมาณมาก แต่มีขนาดที่เท่า ๆ กัน หรือช่วยการกระจายของขนาดแคบ (high homogeneity) และอนุภาคจะต้องมีความเสถียร ประการที่สอง คืออนุภาคจะต้องมีคุณสมบัติที่จำเพาะเจาะจงต่อการตรวจจับสารที่ต้องการพิจารณาสูง (highly sensitive detection) และประการสุดท้ายคือการพัฒนาและประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น โดยใช้ประโยชน์ AuNPs ได้อย่างคุ้มค่า ด้วยการประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ ที่มีอยู่

นอกเหนือจากการศึกษาผลของขนาด AuNPs ต่อการนำมาประยุกต์ใช้แล้ว ในงานวิจัยนี้ยังสนใจเรื่องกระบวนการสังเคราะห์ AuNPs ด้วย เนื่องจากในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนในแต่ละครั้งจะใช้ระยะเวลา 3 ชั่วโมงแต่ปฏิกิริยาก็ยังดำเนินไปไม่สมบูรณ์ยังคงเหลือสารตั้งต้นอยู่ รวมถึงสารละลายที่ให้ไอออนทองคำด้วย จึงสนใจที่จะทำออกแบบกระบวนการสังเคราะห์เพื่อให้สามารถนำสารละลายที่ยังคงเหลือ (supernatant) กลับมาใช้ในการสังเคราะห์อีกได้อย่างคุ้มค่า และสามารถสังเคราะห์ AuNPs เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ต่อไป

## บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

##### 3.1.1 วัสดุ และอุปกรณ์

- (1) Visible spectrophotometer ยี่ห้อ METASH รุ่น V-5100
- (2) Spectrophotometer ยี่ห้อ UNICO รุ่น 1200
- (3) เครื่อง Conductivity Meter ยี่ห้อ Horiba รุ่น COM-100
- (4) เครื่อง pH meter ยี่ห้อ EUTECH INSTRUMENTS รุ่น pH 510
- (5) Transmission electron microscope (TEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEM-2100
- (6) เครื่องล้างระบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner) ยี่ห้อ GT SONIC รุ่น GT – 1860QTS
- (7) เครื่องซังสารทศนิยม 4 ตำแหน่งยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AY 220
- (8) เครื่อง centrifuge ยี่ห้อ WiseSpin รุ่น CF-10 และ ยี่ห้อ Orto alres รุ่น Microcen 23
- (9) เครื่องผสมสารละลาย ผลิตโดยบริษัท Gemmy industrial Corp. รุ่น VM-300
- (10) Magnetic stirrer with hot plate ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7
- (11) Micropipette ยี่ห้อ Nichipet EX และ ยี่ห้อ United Scientific
- (12) Brix Refractometer ยี่ห้อ ATAGO รุ่น ATC-1E
- (13) ตู้อบสารยี่ห้อ GRIEVE รุ่น LW-201C
- (14) Cuvette
- (15) เครื่องแก้ว

### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- (1) หางน้ำยาง ได้รับความอนุเคราะห์จาก Thai Eastern Group
- (2) โกลด์ (III) คลอไรด์ ไตรไฮเดรต (Gold (III) chloride trihydrate) ยี่ห้อ Sigma Aldrich
- (3) กลูต้าไธโอน (Glutathione:  $C_{10}H_{17}N_3O_6S$ ) ยี่ห้อ Sigma Aldrich
- (4) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid: HCl) ยี่ห้อ Merck
- (5) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid:  $H_2SO_4$ ) ยี่ห้อ tyco
- (6) กรดอะซิติก (Acetic acid:  $CH_3COOH$ ) ยี่ห้อ Merck
- (7) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride: NaCl) ยี่ห้อ EMSURE®
- (8) ซิสทีน (Cystein:  $C_3H_7NO_2S$ ) ยี่ห้อ Sigma Aldrich
- (9) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide :  $NH_4OH$ ) ยี่ห้อ J.T. Baker
- (11) เมทิลเรด อินดิเคเตอร์ (Methyl red indicator) ยี่ห้อ Panreac
- (12) พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก (Cationic polyacrylamide :  $PAM^+$ )
- (13) โซเดียมลอริลซัลเฟต (Sodium lauryl sulfate (SDS) ยี่ห้อ Ajax Finechem

## 3.2 วิธีการ

### 3.2.1 การหาปริมาณของแข็งทั้งหมดในหางน้ำยาง (%TSC)

ชั่งน้ำหนักจานแก้วกลม (Petri dish) จดบันทึกค่า เตรียมน้ำยางน้ำหนักประมาณ 10.0 g ลงบนจานแก้วกลม โดยจดบันทึกน้ำหนักตามจริงไว้ (น้ำหนักหางน้ำยางเริ่มต้น) จากนั้นนำจานแก้วกลมเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามกำหนดแล้วนำจานแก้วกลมออกจากตู้อบมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง จดบันทึกน้ำหนักแล้วนำไปลบกับน้ำหนักของจานแก้วกลม (น้ำหนักหางน้ำยางแห้ง) และคำนวณปริมาณของแข็งทั้งหมดจากสูตร

$$\%TSC = \frac{\text{น้ำหนักหางน้ำยางอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักหางน้ำยางเริ่มต้น}} \times 100$$

### 3.2.2 การหาปริมาณเนื้อยางแห้งในยางน้ำยาง (%DRC)

ชั่งน้ำหนักจานแก้วกลม (Petri dish) เทน้ำยาง 10.0 g ลงบนจานแก้วกลมจดบันทึกน้ำหนักเดิมกรดไฮดรอกลอร์ริคความเข้มข้น 2%w/v ปริมาณ 2-3 ml เพื่อให้ยางจับก้อน จากนั้นนำก้อนยางที่ได้ไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักยางแห้ง และคำนวณปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางจากสูตร

$$\%DRC = \frac{\text{น้ำหนักยางน้ำยางอบแห้งหลังจากจับยาง}}{\text{น้ำหนักยางน้ำยางเริ่มต้น}} \times 100$$

### 3.2.3 การหาปริมาณร้อยละของแอมโมเนีย (Alkalinity)

เทน้ำยางประมาณ 5 g กับน้ำกลั่นปริมาณ 200 ml ลงในขวดรูปชมพู่ หยดเมธิลเรดซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ 3 หยด จากนั้นไตเตรทด้วยกรดไฮดรอกลอร์ริค 0.1 N จนเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีในสารละลายจากสีเหลืองเป็นสีชมพู และคำนวณหาปริมาณร้อยละของแอมโมเนียจากสูตร

$$\% \text{ ความเป็นด่าง } (\% \text{ NH}_3 \text{ ต่อ น้ำหนัก น้ำยาง}) = \frac{1.7 \times N \times V}{m}$$

เมื่อ N = นอร์มัลลิตีของสารละลายกรดเกลือ

V = ปริมาตรของกรดเกลือที่ใช้ในการไตเตรท หน่วยมิลลิลิตร (ml)

m = นอร์มัลลิตีของสารละลายกรดเกลือ หน่วยกรัม (g)

### 3.2.4 การวัดปริมาณก ูโคสในเซรัม

ยางน้ำยางที่ได้จากการจับก้อนยางมาหยดสารลงบนกระจกของเครื่อง Brix Refractometer ประมาณ 2 หยดอ่านค่า %brix และจดบันทึก

### 3.2.5 การเตรียมเซรัมและการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

#### 3.2.5.1 เซรัมที่เตรียมจากการจับก้อนเนื้ออย่างด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก

เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 3 w/w ปริมาตร 25 ml ลงในหางน้ำยางที่มีปริมาตร 70 ml ซึ่งทำให้ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ประมาณ 5.76 ณ จุดนี้อนุภาคของยางจะเกิดการจับก้อน กรองของผสมด้วยผ้ากรองไนลอนเพื่อแยกอนุภาคยางที่จับก้อนออกจึงจะได้เซรัม จากนั้นเจือจางเซรัมด้วยสัดส่วนการเจือจาง (the dilution factor) แตกต่างกันได้แก่ 4 6 8 และ 10 เท่า แล้วจึงผสมเซรัมที่มีสัดส่วนการเจือจางแตกต่างกันี้กับสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่มีความเข้มข้น 0.8 mM นำสารผสมไปแช่ในเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิค โดยให้ความร้อนที่ 80 °C เป็นเวลา 15 นาที จนสังเกตเห็นการเกิดตะกอนของอนุภาคทองคำในสารผสม จากนั้นนำสารผสมไปตรวจวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ค่าความเป็นกรด-เบส ค่าการนำไฟฟ้า และค่าการดูดกลืนแสง (absorbance)

#### 3.2.5.2 เซรัมที่เตรียมจากการจับก้อนเนื้ออย่างด้วยสารละลายกรดอะซิติก

เติมสารละลายกรดอะซิติกที่มีความเข้มข้น 3 %w/w ปริมาตร 35 ml ลงในหางน้ำยางที่มีปริมาตร 70 ml ซึ่งทำให้สารผสมมีค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ pH 5.66 อนุภาคยางจะเกิดการจับก้อน กรองด้วยผ้ากรองไนลอนเพื่อแยกอนุภาคยางที่จับก้อนออกจึงได้เซรัม แล้วเจือจางเซรัมด้วยน้ำที่สัดส่วนการเจือจางต่าง ๆ ได้แก่ 2 4 6 8 และ 10 เท่า จากนั้นผสมเซรัมแต่ละการเจือจางกับสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่มีความเข้มข้น 0.8 มิลลิโมลาร์ แล้วนำสารผสมไปแช่ในเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิคและให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารผสมไปตรวจวัดคุณลักษณะต่าง ๆ เช่นเดียวกับข้อ 3.2.5.1

#### 3.2.5.3 เซรัมที่เตรียมจากการจับก้อนเนื้ออย่างด้วยสารละลายพอลิอะคริละไมด์ ประจุบวก

เติมสารละลายพอลิอะคริละไมด์ประจุบวกที่มีความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 350 มิลลิลิตรลงในหางน้ำยางที่มีปริมาตร 500 มิลลิลิตร ซึ่งทำให้สารผสมมีค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ที่ 10.5 เมื่ออนุภาคยางเกิดการจับก้อนจึงกรองด้วยผ้ากรองไนลอนเพื่อแยกอนุภาคยางออกจึงจะได้เซรัม แล้วเจือจางเซรัมที่มีสัดส่วนการเจือจางต่าง ๆ ได้แก่ 3 5 7 8 9 และ 10 เท่า จากนั้น ผสมเซรัมที่มีสัดส่วนการเจือจางต่างกันนี้สารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่มีความเข้มข้น 0.8 mM แล้วจึงนำสารผสมไปแช่ในเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิคที่อุณหภูมิ 80 เซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมไปตรวจวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ดังเช่นข้อ 3.2.5.1

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของการใช้สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่แตกต่างกันในการจับก้อนยาง โดยคาดว่าจะมีพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกเหลือตกค้างในเซรัมด้วยปริมาณที่แตกต่างกัน ในการทดลองนี้ใช้สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่มีความเข้มข้น 1.5 1.25 1.00 0.75 0.50 และ 0.25 %w/v และใช้เซรัมที่มีการเจือจาง 8 เท่าผสมกับสารละลายโกลด์คอลลอยด์ไตรไฮเดรตที่มีความเข้มข้น 0.8 mM เพื่อให้ได้อนุภาคนาโนทองคำ จากนั้นตรวจวัดคุณลักษณะเช่นเดียวกับข้างต้น และศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคโดยถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM)

เมื่อพิจารณาผลของสัดส่วนการเจือจางเซรัมที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำแล้ว จึงศึกษาผลของความเข้มข้นของโกลด์ (III) คลอไรด์ที่แตกต่างกัน โดยเตรียมสารละลายอนุภาคนาโนทองคำที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 mM ด้วยสัดส่วนการเจือจางเซรัม 8 เท่า แล้วจึงนำสารผสมไปแช่ในเครื่องล้างระบบอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 80 เซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมไปตรวจวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ดังเช่นข้อ 3.2.5.1 เพื่อพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำเพื่อทำการศึกษาในหัวข้ออื่น ๆ ต่อไป

### 3.2.6 การแยกอนุภาคนาโนทองคำด้วยการใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง

#### 3.2.6.1 การศึกษาความเร็วรอบในการปั่นเหวี่ยงต่อการแยกอนุภาคนาโนทองคำ

เริ่มต้นโดยปิเปตสารละลายอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ปริมาตร 15 ml ใส่ลงในหลอดเซนติฟิวก์พลาสติก นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 1,000, 3,000, 5,000 และ 8,000 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 50 นาที จะพบว่าสารในหลอดเซนติฟิวก์พลาสติกจะแยกชั้นตะกอนและชั้นของเหลวเหนือตะกอน (supernatant) นำคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนมาตรวจคุณลักษณะ ค่าการดูดกลืนแสง ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้า สังเกตสีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ ปริมาณของการดูดกลืนแสง และตำแหน่งของความยาวคลื่นที่คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำดูดกลืนแสงและบันทึกค่า

### 3.2.6.2 การเตรียมอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกัน

ในขั้นตอนนี้จะทำการแยกขนาดของอนุภาคนาโนทองคำด้วยการใช้ความเร็วรอบของการปั่นเหวี่ยงที่แตกต่างกันได้แก่ 4,000 rpm ร่วมกับ 8,000 rpm และ 8,000 rpm กรณีที่ 1 การเตรียมอนุภาคนาโนทองคำด้วยความเร็วรอบ 4,000 เริ่มต้นจากนำสารละลายคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ ใส่ลงในหลอดเซนติฟิวก์พลาสติกขนาดบรรจุ 15 ml นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4,000 rpm เป็นเวลา 50 นาที หลังจากนั้นจึงแยกส่วนคอลลอยด์เหนือตะกอนที่เหลือมารวบรวม และนำไปปั่นเหวี่ยงอีกครั้งที่ความเร็วรอบสูงสุดหรือ 8,000 rpm เพื่อแยกตะกอนอนุภาคนาโนทองคำที่อยู่ในสารละลายส่วนเหนือตะกอนอีกครั้ง เป็นเวลา 50 นาที หลังจากการปั่นเหวี่ยงสิ้นสุดลงจึงแยกส่วนของเหลวเหนือตะกอนออกไป และรวบรวมตะกอนอนุภาคนาโนทองคำที่ได้และเตรียมเป็นคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำดังหัวข้อที่ 3.2.8 ที่จะอธิบายให้ลำดับต่อไป ตรวจสอบวัดคุณลักษณะโดยวัดค่าการดูดกลืนแสง ค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า และนำตัวอย่างไปตรวจลักษณะสัญญาณ ของอนุภาคและวัดขนาดจากภาพถ่าย TEM กรณีที่ 2 การเตรียมอนุภาคนาโนทองคำด้วยความเร็วรอบ 8,000 นำสารละลายคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ ใส่ลงในหลอดเซนติฟิวก์พลาสติก ขนาดบรรจุ 15 ml นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบสูงสุดหรือ 8,000 rpm เป็นเวลา 50 นาที หลังจากการปั่นเหวี่ยงสิ้นสุดลงจึงแยกส่วนของเหลวเหนือตะกอนออกไป และรวบรวมตะกอนอนุภาคนาโนทองคำที่ได้และเตรียมเป็นคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำดังหัวข้อที่ 3.2.8 และตรวจวัดคุณลักษณะเช่นเดียวกับการเตรียมอนุภาคนาโนทองคำขนาดแรกที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

### 3.2.7 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยใช้ซัสสารตั้งต้นที่เหลือ

เริ่มต้นกระบวนการผลิตด้วยการเตรียมสารละลายผสมระหว่างสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต 1.4 mM และเซรัมที่สกัดส่วนการเจือจาง 8 เท่า ปริมาตรรวม 30 ml นำมาวัดคุณลักษณะของสารผสมได้แก่ ค่าการดูดกลืนแสง ค่าการนำไฟฟ้า และค่า pH จากนั้นสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมงจะได้สารละลายอนุภาคนาโนทองคำ นำมาวัดคุณลักษณะของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำอีกครั้ง ได้แก่ ค่าการดูดกลืนแสง ค่าการนำไฟฟ้า และค่า pH นำคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่ได้มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบสูงสุด (8,000 rpm) เป็นเวลา 50 นาที และนำสารละลายส่วนเหนือตะกอน 22.5 ml (75% ของปริมาตรสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ครั้งต่อไป) มาวัดคุณลักษณะของสารผสมอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบกับสารละลายเริ่มต้นของกระบวนการและผสมสารตัวเติม 7.5 ml (25% ของปริมาตรสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ครั้งต่อไป) ลงในสารละลายส่วนเหนือตะกอนที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้เพื่อให้ได้สารตั้งต้นรวมเท่ากับ 30 ml ตรวจสอบวัด

คุณลักษณะอีกครั้งสังเกตทั้งสามค่าว่ามีค่าใกล้เคียงกับสารละลายเริ่มต้นของกระบวนการหรือไม่ แตกต่างกันอย่างไรร

ส่วนของสารตัวเติมที่ผสมเพิ่มนั้นจะศึกษาผลของสารตัวเติมด้วยความเข้มข้นของสารละลายโกลด์คอลลอยด์ไตรไฮเดรต ที่แตกต่างกันได้แก่ 2.8 3.0 3.2 และ 3.4 mM กับเซรัมที่สกัดส่วนการเจือจางเซรัม 3 เท่า 7.5 ml ผสมรวมกับสารละลายส่วนเหนือตะกอน วัดคุณลักษณะและนำไปสังเคราะห์ในสภาวะเดิมอีกครั้งหลังจากการสังเคราะห์ นำคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำไปตรวจวัดคุณลักษณะ และวิเคราะห์ว่าความเข้มข้นของสารตัวเติมใดที่ทำให้ผลหลังจากการใช้สารตั้งต้นที่เหลือนั้น ใกล้เคียงกับคุณลักษณะของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำสภาวะที่เหมาะสมที่สุด หรือคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้จากสารละลายโกลด์คอลลอยด์ไตรไฮเดรต 1.4 mM และเซรัมที่สกัดส่วนการเจือจาง 8 เท่า ปริมาตรรวม 30 ml โดยสังเกตที่ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดและตำแหน่งความยาวคลื่นที่ได้ ให้ใกล้เคียงกับสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำนั้นเมื่อหาความเข้มข้นของโกลด์คอลลอยด์ไตรไฮเดรตที่ทำให้สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้ ปริมาณใกล้เคียงกับสภาวะที่เหมาะสมที่สุดแล้ว จึงนำมาพิจารณาต่อโดยการศึกษาสกัดส่วนการเจือจางเซรัมที่ต่างกัน ได้แก่ 2, 3, 4, 5 และ 6 เท่ากับความเข้มข้นของโกลด์คอลลอยด์ไตรไฮเดรตที่เลือกพิจารณา เตรียมเป็นสารละลายตัวเติม 7.5 ml ผสมรวมกับสารละลายส่วนเหนือตะกอนรอบแรกจากคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำอีกครั้ง นำไปตรวจวัดคุณลักษณะทั้งก่อนและหลังการนำไปสังเคราะห์ในสภาวะเดิมดังที่กล่าวในตอนต้น และพิจารณาเลือกความเข้มข้นของโกลด์คอลลอยด์ไตรไฮเดรตและสกัดส่วนการเจือจางเซรัมที่ใช้สำหรับเป็นสารละลายตัวเติม และจึงเริ่มแยกสารละลายส่วนเหนือตะกอนของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้จากรอบที่ 2 หลังเติมสารตัวเติมที่เลือกพิจารณา ทำการตรวจคุณลักษณะ สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ แยกสารละลายส่วนเหนือตะกอนและเติมสารตัวเติมใหม่อีกครั้ง ทำซ้ำตามลำดับเพื่อพิจารณาผลของการใช้สารตั้งต้นที่เหลือว่ามีแนวโน้มที่จะสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำให้มีคุณลักษณะคงที่และเทียบเท่ากับคุณลักษณะของคอลลอยด์ที่สภาวะที่เหมาะสมได้หรือไม่

### 3.2.8 การเตรียมคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำ

หลังจากขั้นตอนการแยกขนาดอนุภาคนาโนทองคำโดยใช้การปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบที่แตกต่างกันในหัวข้อที่ 3.2.6.2 และหลังจากปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบสูงสุดเพื่อรวบรวมตะกอนแล้ว จากนั้นเติมสารละลาย SDS ความเข้มข้น 2% เข้าไปแทนที่ให้มีปริมาตรรวมเท่าเดิม แล้วนำไปผสมให้สารกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อจับนำไอออนของสารตั้งต้นที่เหลือออกไปนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบสูงสุดอีกครั้ง เพื่อแยกส่วนของเหลวออก เติมน้ำกลั่นเข้าแทนที่เพื่อล้างสารละลาย SDS ที่ยังเหลือค้างออก ปั่นเหวี่ยงและทำซ้ำอีกครั้ง ในรอบสุดท้ายหลังการปั่นเหวี่ยง ให้



นำส่วนของเหลวเหนือตะกอนออกและเติมน้ำกลั่นแทนที่ได้สารละลายอนุภาคนาโนทองคำ 5 mL และผสมให้อนุภาคนาโนทองคำเข้ากับน้ำกลั่น เทสารละลายอนุภาคนาโนทองคำในน้ำรวมกันให้เป็นสารความเข้มข้นเดียวกัน (ในแต่ละขนาดที่แยกด้วยความเร็วรอบแตกต่างกัน) จากนั้นนำสารละลายอนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่เตรียมได้จากแต่ละความเร็วรอบของการปั่นเหวี่ยงไปวัดค่าการดูดกลืนแสง เพื่อพิจารณาปริมาณอนุภาคนาโนทองคำที่แยกออกมาได้จากค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นเจือจางสารละลายอนุภาคนาโนทองคำในน้ำให้มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากัน เพื่อให้ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนทองคำเท่ากันทั้งหมด แต่มีขนาดที่แตกต่างกัน (ตำแหน่งความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงจะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคนาโนทองคำ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการปั่นเหวี่ยง)

### 3.2.9 การศึกษาผลของ pH ต่อความเสถียรของอนุภาคนาโนทองคำ

หลังจากการเตรียมคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่มีขนาดแตกต่างกันจากความเร็วรอบของการปั่นเหวี่ยงที่ 4,000 rpm และ 8,000 rpm จะปรับสภาวะของอนุภาคนาโนทองคำให้อยู่ในสภาวะเป็นกรด โดยใช้สารละลายไฮดรอกลอริกเข้มข้น 37% เจือจางเป็นความเข้มข้นได้แก่ 0.46, 0.12 และ 0.006% ซึ่งจะมีค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 1.32, 1.75 และ 2.91 ตามลำดับ นำสารละลายกรดไฮดรอกลอริกแต่ละความเข้มข้น 10 ml ผสมกับคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำทั้ง 2 ขนาด ที่มีค่าการดูดกลืนแสง ประมาณ 0.92 10 ml (ถูกปรับให้มีค่าเท่ากันด้วยการเจือจางน้ำ) นำคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงทันที และเมื่อเวลาผ่านไป 18 ชั่วโมง จึงวัดค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำอีกครั้งและสังเกตความแตกต่างของสารละลายคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่เปลี่ยนแปลง

### 3.2.10 การทดสอบผลของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันต่ออนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกัน

นำสารละลายอนุภาคนาโนทองคำในน้ำแต่ละขนาด ที่เตรียมจาก 3.2.8 มาทดสอบผลของแอมโมเนีย โดยเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0, 100, 200, 300, 400 และ 500  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 1 ml ลงไปในสารละลายอนุภาคนาโนทองคำในน้ำกลั่นปริมาตร 2 ml (เพื่อให้ได้สารละลายรวม 3 ml สำหรับการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง) นำสารผสมนี้ไปให้ความร้อนที่ 80  $^{\circ}\text{C}$  พร้อมกับการสั่นด้วยเสียงในเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่บันทึกได้ มาสร้างเป็นกราฟมาตรฐานสำหรับการประมาณค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายที่อยู่ในช่วงความเข้มข้น 0 - 500  $\mu\text{M}$

หลังจากการสร้างกราฟมาตรฐานแล้ว จึงทดสอบการใช้กราฟมาตรฐานนี้ด้วยการเตรียมสารละลายไม่ทราบค่าความเข้มข้นที่อยู่ในช่วงที่ต้องการจะพิจารณาได้แก่ 125, 250, 325 และ 475  $\mu\text{M}$  1 ml เติมลงไปในการละลายตัวอย่างในหลอดอานาไลติก 2 ml และนำสารผสมนี้ไปให้ความร้อนที่ 80 °C พร้อมกับการสั่นด้วยเสียงในเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นคำนวณความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จากกราฟมาตรฐาน และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน หลังจากการทดสอบการใช้สมการจากกราฟมาตรฐานแล้ว จึงเปรียบเทียบว่าผลของการใช้อานาไลติกที่มีขนาดแตกต่างกัน

### 3.2.11 การทดสอบผลของสารละลายซิสทีนและกลูต้าไธโอนที่มีความเข้มข้น

แตกต่างกันต่ออานาไลติกที่มีขนาดแตกต่างกัน

นำสารละลายอานาไลติกในน้ำแต่ละขนาด ที่เตรียมจาก 3.2.8 มาทดสอบผลของซิสทีนและกลูต้าไธโอน โดยเพิ่มความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 1 ml ลงไปในสารละลายอานาไลติกในน้ำกลั่นปริมาตร 3 ml เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 0.5 ml ลงไปในแต่ละตัวอย่างและนำสารผสมนี้ไปให้ความร้อนที่ 80 °C พร้อมกับการสั่นด้วยเสียงในเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิก เป็นเวลา 20 นาที และนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง ทำซ้ำ 3 รอบในแต่ละความเข้มข้นและนำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ในแต่ละจุดมาเฉลี่ย จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยสร้างเป็นกราฟมาตรฐานสำหรับการประมาณค่าความเข้มข้นของซิสทีนและกลูต้าไธโอนในสารละลายที่อยู่ในช่วงความเข้มข้น 0 – 1,000  $\mu\text{M}$

หลังจากการสร้างกราฟมาตรฐานแล้ว จึงทดสอบการใช้กราฟมาตรฐานนี้ด้วยการเตรียมสารละลายไม่ทราบค่าความเข้มข้นที่อยู่ในช่วงที่ต้องการจะพิจารณาได้แก่ 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$  1 ml เติมลงไปในการละลายตัวอย่างในหลอดอานาไลติก 3 ml และเติมเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 0.5 ml ลงไปในแต่ละตัวอย่าง นำสารผสมนี้ไปให้ความร้อนที่ 80 °C พร้อมกับการสั่นด้วยเสียงในเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิก เป็นเวลา 20 นาที และนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง ทำซ้ำ 3 รอบในแต่ละความเข้มข้นเพื่อเฉลี่ยค่าการดูดกลืนแสงเช่นเดียวกัน จากนั้นคำนวณความเข้มข้นของซิสทีนและกลูต้าไธโอนจากกราฟมาตรฐาน และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน หลังจากการทดสอบการใช้สมการจากกราฟมาตรฐานแล้ว จึงเปรียบเทียบว่าผลของอานาไลติกที่มีขนาดแตกต่างกัน

### 3.2.12 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง TEM

แยกอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ออกจากสารละลาย โดยเปิดสารละลายอนุภาคนาโนทองคำปริมาตร 1.5 ml ใส่ลงในหลอดไมโครเซ็นทริฟิวก์จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 13,500 rpm เป็นเวลา 10 นาที จะพบว่าสารในหลอดไมโครเซ็นทริฟิวก์จะแยกชั้นตะกอนและชั้นของเหลว แยกชั้นของเหลวออกจากหลอดไมโครเซ็นทริฟิวก์ให้เหลือไว้เพียงตะกอนเท่านั้น จากนั้นเติมน้ำกลั่นแทนที่ให้มีปริมาตรเท่ากับ 1.5 ml ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงอีกครั้งและแยกส่วนที่เป็นชั้นของเหลวออก จากนั้นนำสารละลาย SDS ความเข้มข้น 2%w/w ปริมาตร 100  $\mu$ l เข้าไปแทนเพื่อรักษาสภาพของอนุภาคนาโนทองคำ แล้วนำสารละลายอนุภาคนาโนทองคำในสารละลาย SDS ผสมสารด้วยเครื่องผสมสารละลายให้อนุภาคกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในสารละลาย เมื่ออนุภาคกระจายตัวดีแล้วหยุดสารละลายตัวอย่างนี้ลงบนคอปเปอร์กริดแล้ววางทิ้งไว้ให้ของเหลวระเหยออกเป็นเวลา 1 วันก่อนจะนำไปตรวจ TEM

### 3.2.13 การทดสอบผลของขนาดที่แตกต่างกันของอนุภาคนาโนทองคำต่อ

#### ความสามารถในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย

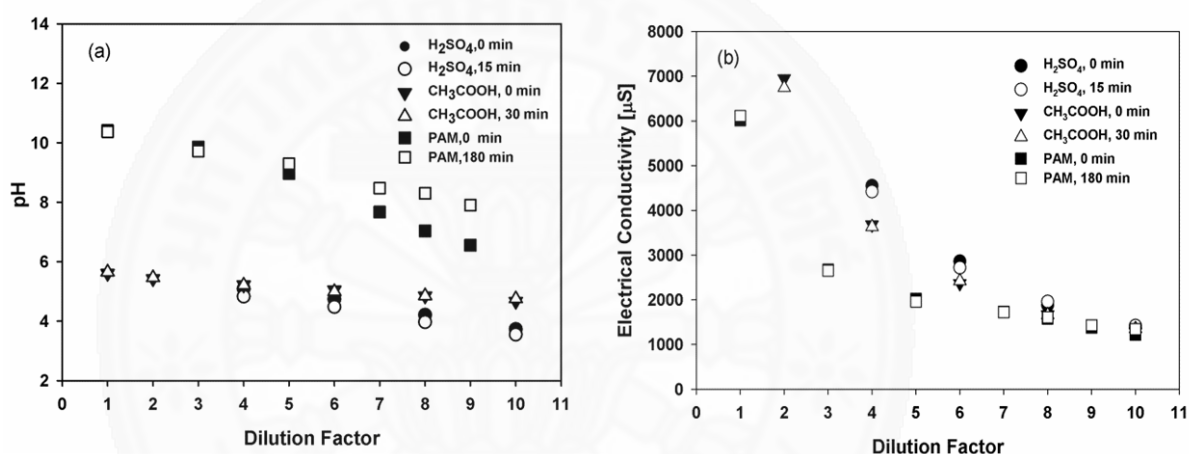
หลังจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำแล้ว จึงแยกอนุภาคนาโนทองคำและเตรียมเป็นคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำ ซึ่งเมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงจะได้อนุภาคนาโนทองคำที่แตกต่างกัน 3 ขนาดตามตำแหน่งของค่าการดูดกลืนแสงและสีของคอลลอยด์ ได้แก่ ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm (คอลลอยด์สีแดง) 529 nm (คอลลอยด์สีส้มแดง) จากการแยกที่ความเร็วรอบแตกต่างกันของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในข้อที่ 3.2.6.2 และเตรียมเป็นคอลลอยด์ในน้ำตามข้อที่ 3.2.8 และอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้เป็นตัวอย่างของอนุภาคนาโนทองคำขนาดใหญ่ ซึ่งมีตำแหน่งค่าการดูดกลืนแสงที่ 539 nm (คอลลอยด์สีม่วงเข้ม) (คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้จากสารละลายเนื้อตะกอนและสารตัวเติมที่มีความเข้มข้น 3.8 mM ในสัดส่วนการเจือจางเซรัม 3 เท่า แยกและเตรียมเป็นคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำ) จากนั้นจึงปรับให้คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำทั้ง 3 ตัวอย่างมีปริมาณค่าการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกัน เตรียมปริมาณของตัวอย่าง ตัวอย่างละ 2 ml/1 เชื้อทดสอบ โดยจะส่งตรวจผลของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ ขนาดละ 2 เชื้อทดสอบ ได้แก่ เชื้อแบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ เชื้อสแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ ได้แก่ เชื้ออีโคไล (*Escherichia coli*) ด้วยวิธีการทดสอบเชิงคุณภาพ Performance standards for antimicrobial disk susceptibility test (Clear zone test) โดยผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อตัวอย่างด้วยวิธี ฉายรังสี UV (UV sterilization) 15 นาที ก่อนการทดสอบ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1. ผลของสารจับก้อนยางที่แตกต่างกันต่อการเตรียมเซรามสำหรับใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

##### 4.1.1 ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) และลักษณะของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ



ภาพที่ 4.1 (a) ค่า pH (b) ค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ในเซรามที่ได้จากการจับก้อนยางแตกต่างกัน ณ เวลาเริ่มต้นและเวลาหลังจากเกิดปฏิกิริยา

ภาพที่ 1 (a) และ (b) แสดงให้เห็นว่าสถานะเริ่มต้นของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำในเซรามหลังการจับก้อนยางด้วยสารละลายกรดจะมีสภาพเป็นกรด ซึ่งบอกเป็นนัยว่ากรดที่เติมลงไปได้ทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียที่มีในหางน้ำยาง ในขณะที่เซรามที่เหลือสารจับก้อนด้วยสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกจะมีสภาพเป็นเบสจากปริมาณของแอมโมเนียที่ยังคงเหลือค้างอยู่ในหางน้ำยางแต่เดิม และเมื่อเจือจางหางน้ำยางมากขึ้น ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของเซรามลดลงตามการเจือจาง และเห็นได้ชัดว่าค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์ในระบบที่ใช้สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกจับก้อนยางนั้นจะมีค่าลดลงกว่าระบบที่เป็นกรด เนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุบวกที่อยู่บนสายโซ่ของพอลิอะคริลาไมด์นั้นไม่ว่องไวนักเมื่อเปรียบเทียบกับประจุอิสระของกรด อย่างไรก็ตามที่สัดส่วนการเจือจางเซรามสูง ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของระบบที่ใช้สารจับก้อนต่างกันมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังสัดส่วนการเจือจางที่ 5 ถึง 10 เท่า (ภาพที่ 4.1 (a)) ค่า pH ของระบบที่มีความ

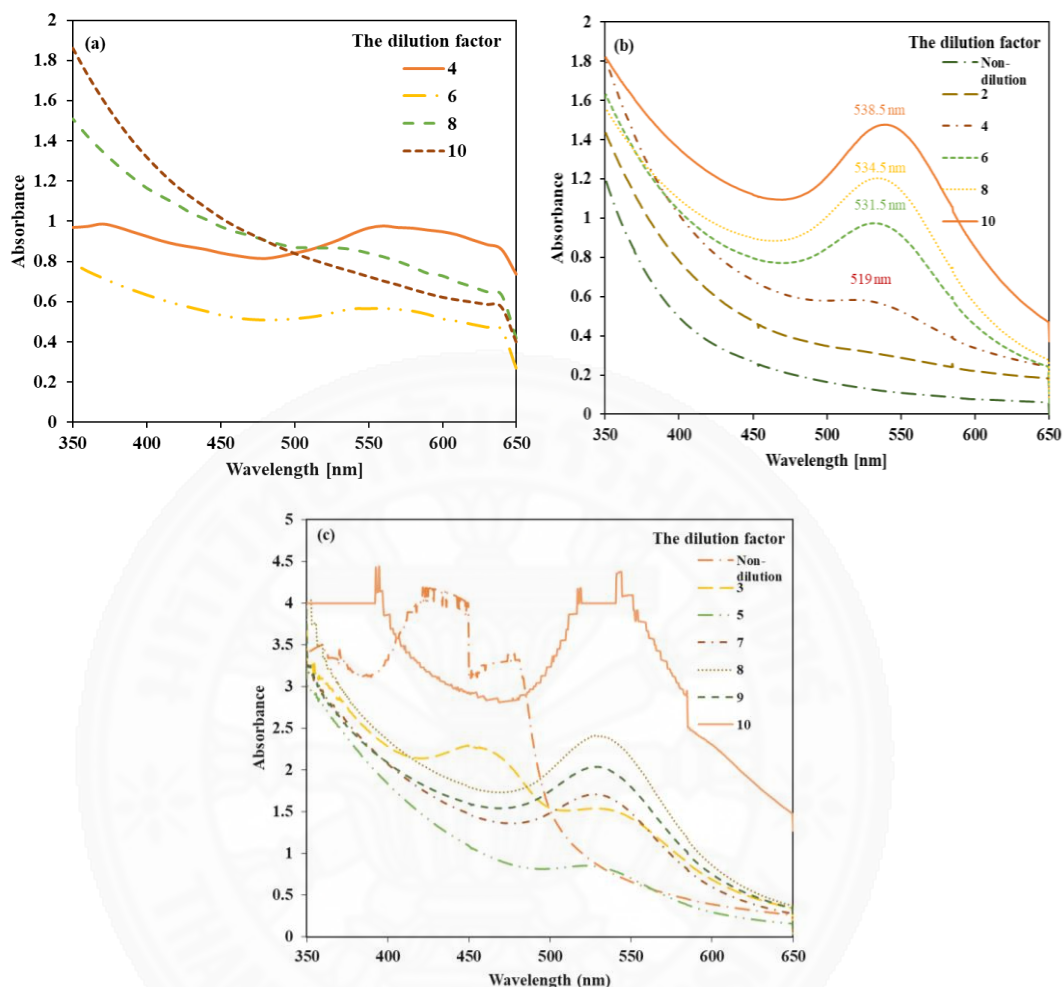
เป็นกรดจะเปลี่ยนแปลงไม่มากเพราะปฏิกิริยาถูกหยุดที่ระยะเวลาสั้นคือ 15 นาทีสำหรับระบบที่ใช้กรดซัลฟิวริกเมื่อเริ่มสังเกตเห็นตะกอนเกิดขึ้น และ 30 นาทีสำหรับระบบที่ใช้กรดอะซิติก ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (a) และ (b) ในขณะที่ระบบที่ใช้พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกนั้นพบว่าคอลลอยด์ยังคงเป็นสารเนื้อเดียว (homogeneous) ไม่สังเกตเห็นเกิดการรวมกลุ่มของอนุภาค ถึงแม้ว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจะนานถึง 3 ชั่วโมงแล้วก็ตาม



ภาพที่ 4.2 สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์จากเซรัมที่เตรียมจากสารจับก้อนยางต่างกันคือ (a) สารละลายกรดซัลฟิวริก (b) สารละลายกรดอะซิติก และ (c) สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก

เมื่อสังเกตสีของสารคอลลอยด์ในภาพที่ 4.2 จะพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนการเจือจางเซรัม 10 เท่า สีของสารละลายในระบบกรดซัลฟิวริกเปลี่ยนจากแดงอมม่วงไปเป็นสีฟ้าอมม่วง และสังเกตเห็นการกระจายของกลุ่มอนุภาคในสารผสม ในระบบของกรดอะซิติกนั้นสีของสารผสมจะเปลี่ยนจากเหลืองซึ่งเป็นสีเริ่มต้นจากสีของสารตั้งต้นที่ให้ไอออนทองคำ เป็นชมพู และสีไวน์แดงเข้มตามลำดับ โดยลักษณะของการเปลี่ยนสีในขณะที่เกิดอนุภาคนาโนทองคำนี้สอดคล้องกับที่พบในงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ สำหรับระบบของพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก ก็แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสีของสารผสมจากเหลือง เป็นชมพู และสีไวน์แดงเข้มตามลำดับเช่นเดียวกัน โดยไม่สังเกตเห็นกลุ่มของอนุภาคในกรณีของระบบที่ใช้กรดข้างต้น

#### 4.1.2 ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ



ภาพที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำจากการสังเคราะห์โดยใช้เซรัมจากหางน้ำยาง และใช้สัลดส่วนในการเจือจางเซรัมที่แตกต่างกัน โดยเซรัมนั้นได้จากการจับก้อนอย่างด้วยสารจับก้อนต่างกัน ได้แก่ (a) กรดซัลฟิวริก (b) กรดอะซิติก และ (c) พอลิอะคริลอะไมด์ประจุบวก

ในงานวิจัยที่หลายชิ้นรายงานว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (absorbance peak) ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำอยู่ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 520 – 550 นาโนเมตร แสดงถึงปรากฏการณ์การเกิดเรโซแนนซ์ของพลาสมอนที่พื้นผิว (surface plasmon resonance) ของอนุภาคนาโนทองคำ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระบบที่ใช้กรดดังแสดงในภาพที่ 4.3 (a) และ (b) แล้วจะพบว่าระบบของกรดซัลฟิวริกจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่น้อยและค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดก็ไม่ชัดเจนนัก แต่ในระบบของกรดอะซิติกนั้นจะแสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ชัดเจน โดยเมื่อเพิ่มสัลดส่วนการเจือจางเซรัมจาก 4 เท่าไปจนถึง 10 เท่า ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าขยับสูงขึ้นและเกิดการเลื่อน

ตำแหน่งไปยังตำแหน่งที่มีความยาวคลื่นที่สูงขึ้น นั่นคือเลื่อนจาก 519 นาโนเมตรไปยัง 538.5 นาโนเมตร หรือที่เรียกกันว่าบลูชิฟท์ (blue shift) ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดอนุภาคทองคำที่มาก และในขณะเดียวกันก็มีอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เกิดมากขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อมีการเจือจางเซรัม สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ เช่นน้ำตาลชนิดต่าง ๆ รวมถึงกรดอะซิติกก็จะเจือจางลง และสารที่ช่วยเพิ่มความเสถียร เช่น โปรตีน ก็ถูกเจือจางลงเช่นกัน ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าถึงแม้จะเจือจางเซรัมลง 10 เท่า ปริมาณของตัวรีดิวซ์ก็ยังคงมากเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา และทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดด้วย แต่เนื่องจากปริมาณโปรตีนและอะซิเตทไอออนที่เป็นประจุลบที่เป็นสารช่วยควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนทองคำก็ลดลงด้วยจึงส่งผลต่อความเสถียรของอนุภาคนาโน อะซิเตทไอออนนั้นสามารถดูดซับบนผิวของอนุภาคนาโนทองคำและสร้างชั้นประจุสองชั้น (double layer) ซึ่งช่วยผลักดันอนุภาคนาโนของทองคำไม่เกาะรวมตัวกัน จึงเป็นผลทำให้คอลลอยด์สามารถอยู่ในระบบได้อย่างเสถียรมากขึ้น ดังงานวิจัยของ Hormozi-Nezhad และคณะ (2555)

ระบบของพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกนั้นน่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากระบบนี้แสดงให้เห็นความเสถียรของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ในระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยานานถึง 3 ชั่วโมง โดยปราศจากการตกตะกอน หรือเกิดรวมกลุ่มกันเองของอนุภาค ดังแสดงในภาพที่ 4.3 (c) เมื่อใช้เซรัมที่ไม่ได้เจือจางจะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง 425 นาโนเมตรและ 460 นาโนเมตร ตำแหน่งที่ 425 นาโนเมตรแสดงถึงการเกิดไอออนเชิงซ้อน (complex ions) ระหว่างไอออนทองคำ  $Au^{3+}$  ของสารตั้งต้นและแอมโมเนียที่อยู่ในทางน้ำยาดั้งเดิมเป็น  $[Au(NH_3)_2]^{3+}$  ดังรายงานในงานวิจัยของ Pandey และคณะ (2556) ส่วนตำแหน่ง 460 นาโนเมตรคือตำแหน่งของอนุภาคนาโนทองคำ เมื่อเซรัมถูกเจือจางมากขึ้นค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 460 นาโนเมตรจะหายไปแต่ที่ตำแหน่ง 530 นาโนเมตรจะปรากฏชัดเจนขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดไอออนเชิงซ้อนน้อยลงแต่เกิดอนุภาคนาโนทองคำมากขึ้น โดยที่ pH ของสารผสมค่อนข้างคงที่ดังแสดงในภาพที่ 4.1 (a) ค่าการดูดกลืนแสงจะสูงที่สุดเมื่อสังเคราะห์ในสัดส่วนการเจือจาง 8 เท่าซึ่งหากสูงไปกว่านี้ความสามารถในการคุมขนาดอาจจะทำได้ยากขึ้น นอกเหนือจากนี้ค่า pH ที่แสดงในภาพที่ 4.1 (a) แสดงให้เห็นว่าเมื่อสัดส่วนการเจือจางเซรัมสูง pH ของสารผสมหลังจากเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อตอนเริ่มทำปฏิกิริยาแอมโมเนียจะเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนกับไอออนทองคำ แต่เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดไอออนเชิงซ้อนเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ เมื่อไอออนทองคำถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาเกิดเป็นอนุภาคนาโนทองคำมากขึ้น จะส่งผลให้ปฏิกิริยาของการเกิดไอออนเชิงซ้อนผันไปในทิศทางที่ให้ไอออนทองคำออกมาเพิ่มขึ้นเพื่อใช้ในปฏิกิริยาเกิดอนุภาคนาโนต่อไป แอมโมเนียจึงถูกปลดปล่อยออกมาจากไอออนเชิงซ้อน สาร

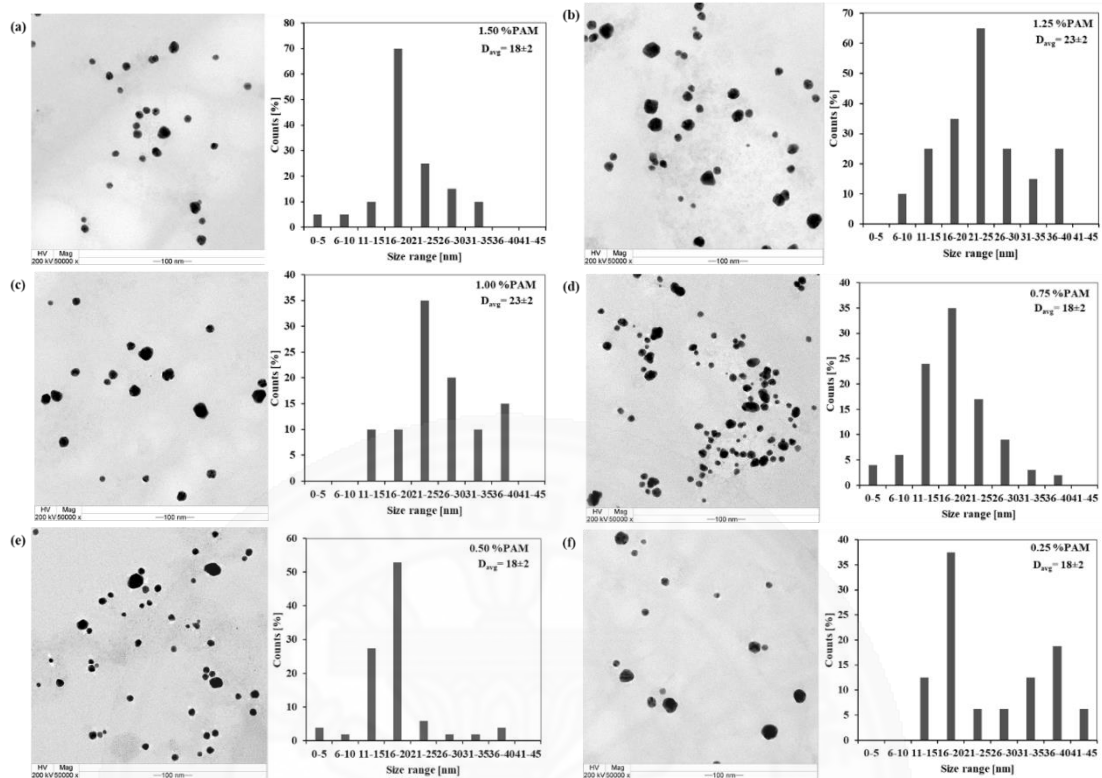
ผสมจึงมีค่า pH สูงขึ้นที่เวลา 3 ชั่วโมง อนุภาคนาโนทองคำจากระบบพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกนี้สามารถเก็บรักษาในลักษณะสารคอลลอยด์ที่มีความเสถียรดี ซึ่งใกล้เคียงกับคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่ได้จากระบบกรดอะซิติก แต่ต่างจากอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้จากระบบกรดซัลฟิวริกที่มีขนาดใหญ่จนเกิดการตกตะกอน เนื่องจากความเสถียรที่ดีของระบบคอลลอยด์อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้นี้ จึงได้ศึกษาผลของปริมาณพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่ใช้ในการจับก้อนยางซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณที่หลงเหลือในเซรัมเมื่อนำไปสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำต่อไปด้วย ดังจะแสดงผลให้เห็นในหัวข้อต่อไป

#### 4.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่ใช้ในการจับ

##### ก้อนยาง

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เพื่อตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา และกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้เซรัมหลังจากจับก้อนยางออกไปด้วยสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันแสดงดังในภาพที่ 4.4 เมื่อแปรค่าความเข้มข้นของของสารละลายที่ใช้เท่ากับ 1.5 1.25 1.0 0.75 0.50 และ 0.25 %w/v ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ  $18 \pm 2$  นาโนเมตร สำหรับความเข้มข้นของของสารละลาย 0.25%-0.75% และ 1.50% และเท่ากับ  $23 \pm 2$  นาโนเมตร สำหรับความเข้มข้นของของสารละลาย 1.00%-1.25% จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหมดจะพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกในช่วง 0.25%-1.5% ไม่แสดงผลกระทบที่ชัดเจนต่อขนาดของอนุภาคนาโน มีความเป็นไปได้ว่าในการละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกนั้นไม่สามารถทำให้พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกกระจายตัวออกจากกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ พอลิเมอร์มีโอกาสเกิดการเกี่ยวพันกัน (entanglement) ได้มากขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นสูงขึ้น ดังนั้นพอลิเมอร์อาจกระจายตัวได้ไม่เต็มที่ในการไปดูดซับที่ผิวของอนุภาคนาโนเพื่อคุมขนาดและเพิ่มความเสถียร อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นและโอกาสในการเกี่ยวพันกันนั้นส่งผลกระทบต่อความหนืดของสารละลายที่ใช้ จากการทดลองพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการจับก้อนยางคือการใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกเท่ากับ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สามารถจับก้อนยางได้โดยไม่ใช้เวลานานเกินไปและสารละลายผสมไม่เหนียวเกินไป ทำให้สามารถเตรียมเซรัมได้ง่าย อีกทั้งยังเป็นการประหยัดวัตถุดิบด้วย





ภาพที่ 4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ใน เซรัมจากหางน้ำยาง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลามิโดประจุบวกในการจับก้อนยาง แตกต่างกันได้แก่ ได้แก่ (a) 1.5 (b) 1.25 (c) 1.0 (d), 0.75 (e) 0.50 และ (f) 0.25 %w/v

#### 4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

ผลของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำด้วยเซรัมที่เตรียมได้จากการจับก้อนยางด้วยพอลิอะคริลามิโดประจุบวกที่สัดส่วนการเจือจางต่าง ๆ ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1 ทำให้ทราบว่าที่สัดส่วนการเจือจางเซรัม 8 เท่า ส่งผลให้สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้ดีที่สุด จึงนำเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 8 เท่า มาศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตเป็นลำดับต่อมา โดยเตรียมให้มีความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตมีต่าง ๆ ได้แก่ 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 mM แล้วจึงผสมกับเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 8 เท่า จากนั้นจึงนำไปตรวจสอบคุณลักษณะของสารแขวนลอย ได้แก่ ค่าการดูดกลืนแสง ค่าการนำไฟฟ้า และค่า pH ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าแนวโน้มของ pH จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตสูงขึ้น หรือมีแนวโน้มที่จะมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นตามความเป็นกรดที่มีของสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต

รวมถึงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่มีค่ามากขึ้นตามความเข้มข้นสารละลายโกลด์คลอไรด์ไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น เนื่องจากไอออนเดมที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในเซรัม เช่น แอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) ที่ยังคงหลงเหลืออยู่แม้จะมีการจับกันอย่างออกไปแล้ว รวมกับไอออนของสารละลายโกลด์คลอไรด์ไฮดรอกไซด์ที่แตกตัวในสารละลายทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามลำดับ

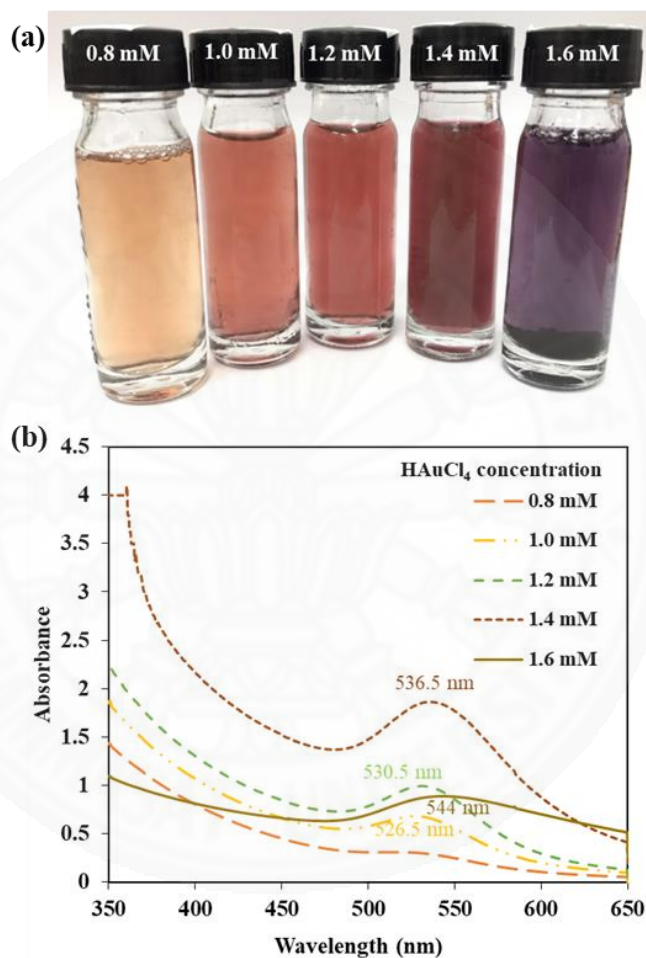
#### ตารางที่ 4.1

ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้า ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยเซรัมที่เตรียมจากสารจับกันอย่างด้วยสารละลาย PAM<sup>+</sup> สัดส่วนการเจือจางเซรัม 8 ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ความเข้มข้นแตกต่างกัน

Concentration of $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (mM)	Initial time		3 hours reaction time	
	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )
0.80	10.05	1200	9.93	1220
1.00	9.87	1240	9.71	1300
1.20	9.65	1300	9.56	1310
1.40	9.05	1400	9.17	1430
1.60	7.57	1921	7.84	1520

เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 °C ผ่านไป 3 ชั่วโมงพบว่าสารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำเริ่มเปลี่ยนแปลงเป็นสีไวน์แดง จากภาพที่ 4.5 (a) เห็นได้ว่า ในช่วงความเข้มข้นต่ำ ๆ ของสารละลายโกลด์ (III) คลอไรด์ สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำมีสีเหลืองอมส้ม ไปจนถึงสีส้มอมแดง ตามความเข้มข้น 0.8, 1.0 และ 1.2 mM ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาการดูดกลืนแสงจากภาพที่ 4.5 (b) จะเห็นค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มที่ต่ำ นั่นหมายความว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้ปริมาณที่น้อย สอดคล้องกับสีของสารละลายที่เป็นสีเหลืองอมส้มนั้น เกิดจากการที่อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้จะมีคุณสมบัติเชิงแสงที่ทำให้มองเห็นเป็นสีแดง แต่เมื่อเกิดในปริมาณที่น้อยและถูกเจือด้วยสีของสารละลายเริ่มต้นที่มีสีเหลือง ทำให้สีของสารละลายโดยรวมเป็นสีส้ม การที่อนุภาคนาโนทองคำเกิดขึ้นได้น้อยนั้น เนื่องมาจากความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไฮดรอกไซด์ที่ต่ำทำให้ไอออนที่ไม่เพียงพอกับปริมาณตัวรีดิวซ์ที่มี อีกทั้งผลของไอออนทองคำที่เกิดปฏิกิริยากับตัวรีดิวซ์นั้น เกิดขึ้นไปพร้อมกับผลของการควบคุมขนาดของการเกิดอนุภาคนาโนทองคำโดยโปรตีนและ

พอลิอะคริลาไมด์ที่หลงเหลืออยู่ในเซรัม ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นต่ำ นั่นคือ 526.5 nm และ 530.5 nm หรือสอดคล้องกับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเล็ก ต่อมาที่ความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไฮเดรตสูงขึ้นเป็น 1.4 mM จะเห็นสีของคอลลอยด์เป็นสีไวน์แดงเข้มดังภาพที่ 4.5 (a) และค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น 536.5 nm ดังภาพที่ 4.5 (b) ซึ่งสามารถประเมินเบื้องต้นได้ว่า สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้ปริมาณมาก



ภาพที่ 4.5 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ และ (b) ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ ที่สังเคราะห์ด้วยเซรัมที่เตรียมจากสารจับก้อนอย่างด้วยสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกสัดส่วนการเจือจางเซรัม 8 ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

ที่ความเข้มข้นของโกลด์คอลลอยด์ไฮเดรตสูงที่สุด 1.6 mM พบว่าสีของสารละลายเปลี่ยนสีม่วงเข้มพร้อมกับการเกิดตะกอนของอนุภาคนาโนทองคำสีม่วงจับก้อนขนาดใหญ่ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเกิดอนุภาคนาโนทองคำอย่างรวดเร็วเกินกว่าความสามารถของโปรตีนและพอลิอะคริลาไมด์จะควบคุมขนาดได้ จึงเกิดอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดใหญ่ สอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงที่เห็นได้ว่าอยู่ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นสูง ประมาณ 550 nm รวมถึงลักษณะการดูดกลืนแสงที่กว้างทำให้บ่งบอกได้ว่าอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้นั้นมีการกระจายขนาดมากจนเกินไปจึงไม่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์เพื่อแยกนำอนุภาคนาโนทองคำไปศึกษาต่อไป

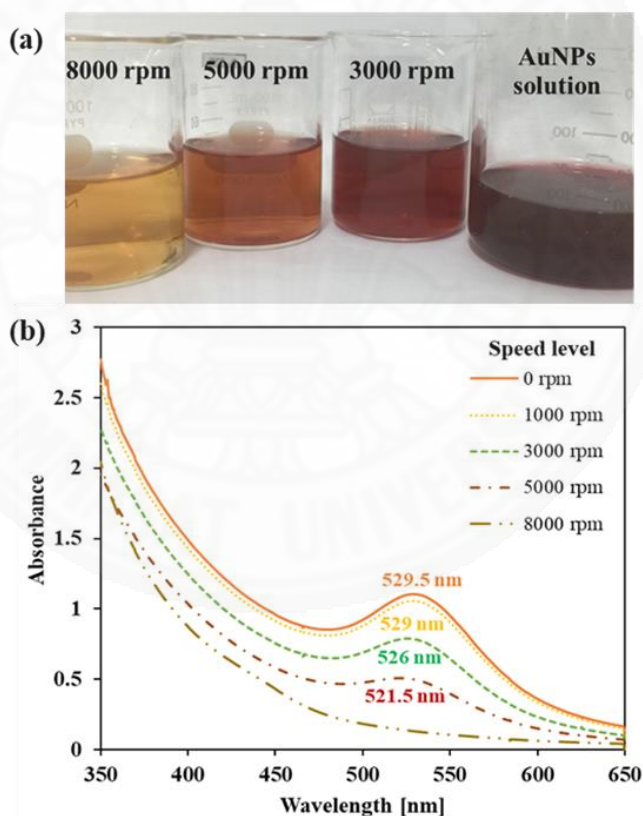
จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำที่เหมาะสมที่สุดในระบบที่ใช้เซรัมเป็นตัวรีดิคัล คือ การสังเคราะห์โดยใช้เซรัมที่สกัดส่วนการเจือจาง 8 เท่า ทำปฏิกิริยากับสารละลายโกลด์คอลลอยด์ไฮเดรตความเข้มข้น 1.4 mM ที่อุณหภูมิ 80 °C พร้อมกับการสั่นด้วยเสียง ซึ่งเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้นจะส่งผลให้สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้มากขึ้น แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้นอกจากการศึกษาก่อนนำอนุภาคนาโนทองคำไปใช้ประโยชน์แล้ว ยังมีการศึกษาที่จะนำสารตั้งต้นที่ยังคงเหลือ หรือยังไม่เกิดปฏิกิริยาไปใช้สังเคราะห์ซ้ำเพื่อใช้สารเคมีให้เกิดความคุ้มค่าที่สุดด้วย ดังนั้นในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำแต่ละครั้งจึงพิจารณาอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ในระยะเวลา 3 ชั่วโมงเท่านั้น

#### 4.3 ผลของการแยกขนาดของอนุภาคนาโนทองคำด้วยการปั่นเหวี่ยงแยก (centrifugation)

ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาผลของขนาดอนุภาคนาโนทองคำที่แตกต่างกันต่อการนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งจำเป็นจะต้องศึกษาการแยกขนาดของอนุภาคนาโนทองคำออกจากคอลลอยด์ที่สังเคราะห์ได้ ในที่นี้จะใช้การแยกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) โดยใช้หลักการเร่งให้อนุภาคนาโนทองคำตกตะกอนเร็วขึ้น ภายใต้สนามของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยหลักการแล้วการใช้ความเร็วรอบที่สูงขึ้น จะเพิ่มความเร่งในการตกตะกอนจึงทำให้สามารถตกตะกอนอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงได้ ซึ่งหมายถึง อนุภาคที่มีขนาดที่ใหญ่กว่าก็จะตกตะกอนออกมาปริมาณมากขึ้นด้วย

จากผลการศึกษาความเร็วรอบของการปั่นเหวี่ยงที่ 1000 ถึง 8000 รอบต่อนาที และนำสารละลายส่วนเหนือตะกอนไปวัดค่าการดูดกลืนแสงพบว่า ปริมาณค่าการดูดกลืนแสงจะลดลงตามความเร็วรอบที่มากขึ้น เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น อนุภาคนาโนทองคำส่วนใหญ่จะตกลงเป็นตะกอนมากขึ้น และจะเหลืออนุภาคนาโนทองคำในส่วนของสารละลายเหนือตะกอนน้อยลง ดังแสดงในภาพที่ 4.6 (b) จะเห็นแนวโน้มได้ว่า ค่าการดูดกลืนแสงของส่วนสารละลายเหนือตะกอนนั้น ลดลง

ตามความเร็วรอบที่มากขึ้น พร้อมทั้งสีของสารละลายที่จางลงตามความเร็วรอบที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ส่วนความแตกต่างของขนาดอนุภาคนาโนทองคำที่แยกได้จากการปั่นเหวี่ยงนั้น เมื่อเปรียบเทียบการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบต่ำกับสูง พบว่า ความเร็วรอบต่ำ จะมีความสามารถในการแยกอนุภาคนาโนทองคำได้น้อย และเหลืออนุภาคนาโนทองคำขนาดใหญ่อยู่ในส่วนของเหลวเหนือตะกอนเป็นปริมาณมากกว่าการใช้ความเร็วรอบสูง เช่น ที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อนุภาคนาโนทองคำในส่วน ของเหลวเหนือตะกอนมีค่าการดูดกลืนแสงที่ 529 nm สีของคอลลอยด์จะเป็นสีไวน์แดงเข้ม แต่ที่ ความเร็วรอบ 5,000 rpm จะเห็นได้ว่าสารละลายส่วนเหนือตะกอนมีค่าการดูดกลืนแสงที่ 521 nm และสีของคอลลอยด์เป็นสีส้ม โดยสมบัติเชิงแสงของอนุภาคนาโนทองคำพบว่าอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเล็กจะดูดกลืนแสงในตำแหน่งความยาวคลื่นต่ำ ดังนั้น อนุภาคนาโนทองคำในสารละลายส่วนเหนือตะกอนที่ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5,000 รอบต่อนาที จะมีขนาดเล็กกว่าสารละลายส่วนเหนือ ตะกอนที่ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.6 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำและ (b) ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน (supernatant) หลังจากการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 3,000, 5,000 และ 8,000 รอบต่อนาที (rpm)

ผลการศึกษานี้ทำให้ทราบว่า ที่ความเร็วรอบสูงสุด (8,000 rpm) สามารถแยกอนุภาคนาโนทองคำเกือบทั้งหมดออกจากสารละลายได้ และตะกอนอนุภาคนาโนทองคำนี้จะถูกนำไปใช้ทดสอบต่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ ในส่วนเหนือตะกอนที่มีการตรวจสอบคุณลักษณะได้แก่ pH ค่าการนำไฟฟ้า และค่าการดูดกลืนแสง ดังตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่า pH มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าการนำไฟฟ้าลดลงเมื่อรอบการเหวี่ยงสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการปั่นเหวี่ยงทำให้ไอออนที่อยู่ในของเหลวเคลื่อนตัวลงมาด้านล่างพร้อมตะกอน อย่างไรก็ตามค่าการนำไฟฟ้าลดลงไปไม่มากนัก จึงยังคงหลงเหลือไอออนของทองคำและตัวรีดิวซ์อื่น ๆ ที่จะสามารถนำไปใช้ซ้ำเพื่อสังเคราะห์ให้เกิดอนุภาคนาโนทองคำได้อีก โดยผลของการศึกษาการใช้ซ้ำสารตั้งต้นที่เหลือนั้นจะแสดงในหัวข้อต่อไป

#### ตารางที่ 4.2

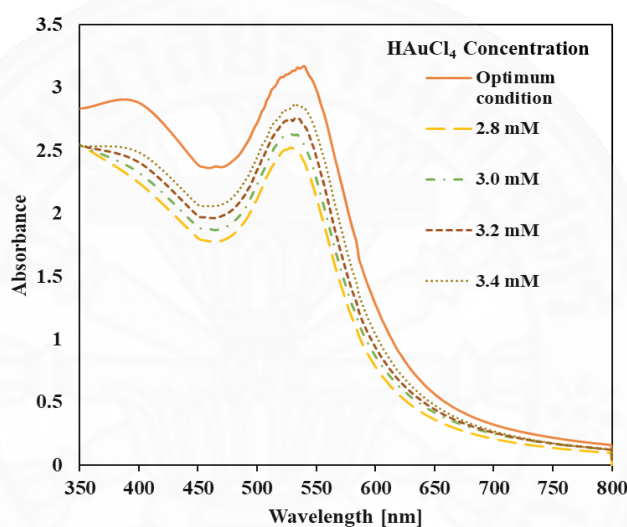
ค่า pH, ค่าการนำไฟฟ้า และตำแหน่งของความยาวคลื่นสูงสุดดูดกลืนแสงได้ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน หลังจากการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 3,000, 5,000 และ 8,000 rpm

Speed level of centrifugation	pH	Conductivity ( $\mu$ S)	ABS peak (nm)
0	8.23	1630	529.5
3,000	8.36	1620	526
5,000	8.37	1600	521.5
8,000	8.36	1560	-

#### 4.4 ผลของการใช้ซ้ำสารตั้งต้นที่เหลือเพื่อสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

เนื่องจากในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำในระบบของการใช้เซรัมจากการจับก้อนยางด้วยพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกนั้น ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นระยะเวลาอันยาวนานและสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สูงถึง 7 ชั่วโมง ดังผลการศึกษาในระดับชั้นปริญญาตรีที่ผ่านมา (Konglek และคณะ, 2560) เวลา 7 ชั่วโมงนั้นนานเกินไปในทางปฏิบัติและไม่คุ้มค่า เพราะปฏิกิริยาเกิดช้าลงเรื่อย ๆ ตามเวลา งานวิจัยนี้จึงเลือกทำปฏิกิริยาเพียง 3 ชั่วโมง โดยเริ่มต้นจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำด้วยเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 8 เท่า และโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตความเข้มข้น 1.4 mM ปริมาณ 30 ml หลังจากเกิดปฏิกิริยาเมื่อให้ความร้อนที่ 80 °C พร้อมกับการสั่นด้วยเสียง เป็นระยะเวลา

3 ชั่วโมง แล้วจึงนำคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้นี้ไปตรวจวัดคุณลักษณะ พบว่ามีค่า pH เท่ากับ 7.43 ค่าการนำไฟฟ้า 1810  $\mu\text{S}$  และมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 530 nm เมื่อผ่านการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบสูง 8,000 รอบต่อนาที เพื่อแยกอนุภาคนาโนทองคำออกจากสารละลายส่วนเหนือตะกอน ส่วนของสารละลายเหนือตะกอนได้ถูกนำไปวัดค่าคุณลักษณะ ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้า และพบว่ามีค่า pH เท่ากับ 7.57 และค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 1720  $\mu\text{S}$  เป็นการยืนยันอีกครั้งว่าในสารละลายส่วนเหนือตะกอนนั้น ยังคงเหลือไอออนของสารตั้งต้นและไอออนของตัวรีดิวซ์อื่น ๆ เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับค่า pH ก่อนเหวี่ยงแยก และค่าการนำไฟฟ้าก็ยังมีค่าสูงอยู่



ภาพที่ 4.7 ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วนการเจือจาง เซรัม 3 ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้นแตกต่างเป็น สารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน

หลังจากนำสารละลายส่วนเหนือตะกอนที่แยกอนุภาคนาโนทองคำออกไปด้วยการปั่นเหวี่ยงแล้วปริมาณ 22.5 ml มาเติมด้วยสารละลายตัวเติมที่มีความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตแตกต่างกัน ได้แก่ 2.8, 3.0, 3.2 และ 3.4 เติร์มในเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 3 เท่า ปริมาณ 7.5 ml โดยรวมทำให้เกิดสารละลายตั้งต้นใหม่ในการนำไปสังเคราะห์ 30 ml จากนั้นจึงนำไปให้ความร้อนที่ 80 °C และสั่นด้วยเสียงเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เช่นเดียวกับขั้นตอนการสังเคราะห์เดิม และนำมาตรวจคุณลักษณะการดูดกลืนแสงพบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงให้เห็นใน ภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่มากขึ้น ทำให้มีไอออนของทองคำที่จะเกิดปฏิกิริยากับตัวรีดิวซ์มากขึ้น และค่า pH ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำนั้นมีค่าลดลง หรือมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต

ที่เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.3 และในส่วนของค่าการนำไฟฟ้าจะเห็นได้ว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่สิ่งหนึ่งที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ หลังจากเติมสารละลายตัวเติมลงไปในการละลายส่วนเหนือตะกอน พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่ใช้เป็นสภาวะเทียบ (ซึ่งเรียกในที่นี้ว่า Optimum condition) เนื่องมาจากค่าการนำไฟฟ้าสะสมจากเติมในการละลายส่วนเหนือตะกอนร่วมกับไอออนจากสารละลายตัวเติมที่เพิ่มลงไป

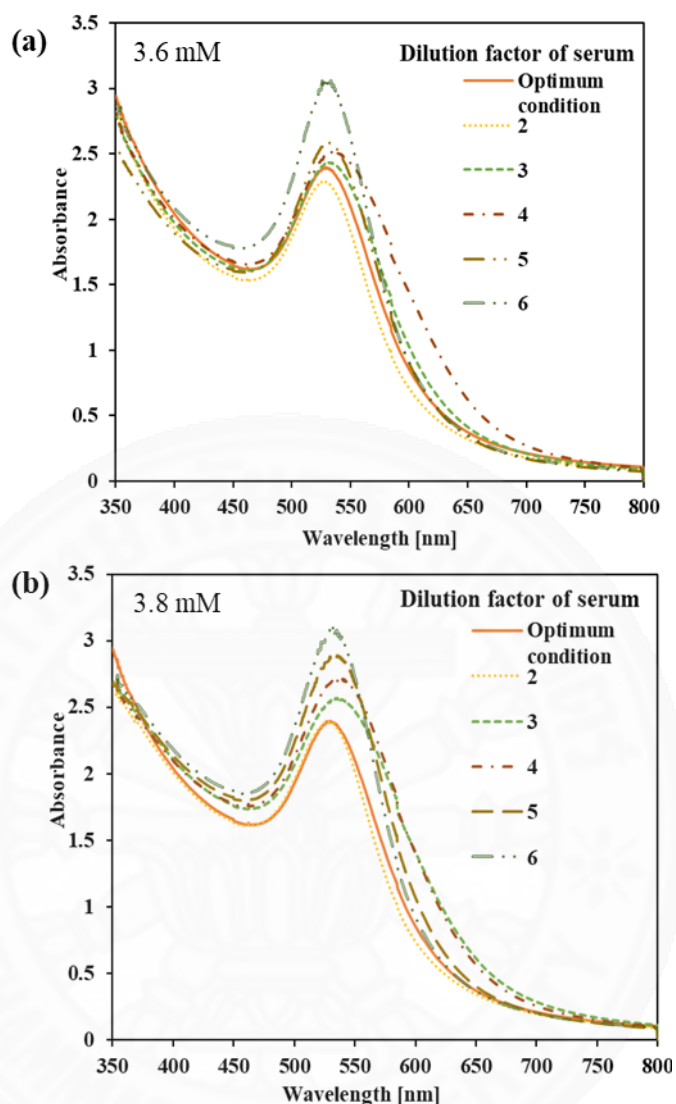
ตารางที่ 4.3

ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัปดาห์การเจือจาง เซรัม 3 เท่า ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน เป็นสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน

Concentration of $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (mM)	Initial time		3 hours reaction time	
	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )
Optimum condition	7.57	1560	7.43	1810
2.8	8.12	2030	8.49	2030
3.0	7.95	2020	8.07	2050
3.2	7.72	2010	7.89	2070
3.4	7.47	2030	7.86	2000

จากผลการศึกษาในภาพที่ 4.7 จึงเห็นได้ชัดว่าความเข้มข้นของสารละลายโกลด์คลอไรด์ ไตรไฮเดรตยังไม่เพียงพอต่อการเกิดอนุภาคนาโนทองคำได้เทียบเท่ากับสภาวะเทียบ ถึงแม้ว่าค่าการดูดกลืนแสงจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ ไตรไฮเดรตเพิ่มขึ้นก็ตาม ดังนั้นจึงเพิ่มความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ ไตรไฮเดรตเป็นที่ 3.6 และ 3.8 mM และได้มีการปรับค่าสัปดาห์การเจือจาง เซรัม ดังแสดงในผลการศึกษาต่อไป





ภาพที่ 4.8 ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วนการเจือจางเซรัมแตกต่างกัน ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้น (a) 3.6 mM และ (b) 3.8 mM เป็นสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน

ภาพที่ 4.8 (a) และ (b) แสดงผลของการศึกษาที่ใช้ความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่ความเข้มข้น 3.6 และ 3.8 mM กับเซรัมที่สัดส่วนการเจือจางแตกต่างกัน ได้แก่ 2, 3, 4, 5, และ 6 เท่า เป็นสารละลายตัวเติมลงในสารละลายส่วนเหนือตะกอน จากความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตทั้ง 2 กรณี พบว่าสัดส่วนการเจือจางเซรัมที่มากขึ้นทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำมากขึ้น หรือสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้มากขึ้น เนื่องจากการเจือจางเซรัมทำให้ลดผลของพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่หลงเหลือและลดปริมาณโปรตีนที่สามารถช่วยควบคุมขนาดลง ทำให้สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้เร็วขึ้น โดยจากภาพที่ 4.8 (a) และ (b) เห็น

ได้ว่าสารละลายตัวเดิมที่ความเข้มข้นของโกลด์คอลลอยด์ไตรไฮเดรตที่ 3.6 ในเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 3 เท่า และในสารละลายตัวเดิมที่ความเข้มข้นของโกลด์คอลลอยด์ไตรไฮเดรตที่ 3.8 ในเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 2 เท่า มีผลทำให้สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้ใกล้เคียงกับสภาวะเทียบของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำมากที่สุด เนื่องจากมีค่ากระดุกคลื่นแสงที่ใกล้เคียงกันที่ตำแหน่งของความยาวคลื่นใกล้เคียงกันได้แก่ 531.5 nm และ 527 nm ตามลำดับ เทียบกับตำแหน่งของความยาวคลื่นที่ 529.5 ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำสภาวะเทียบ และแนวโน้มของเส้นการดูดกลืนแสงที่แสดงถึงการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนทองคำมีลักษณะเช่นเดียวกันด้วย จากตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเจือจางของเซรัมทำให้ pH มีค่าลดลงหรือมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นจากผลของการเจือจางเซรัมทำให้ลดความเป็นเบสจากปริมาณของไอออนแอมโมเนียมที่หลงเหลืออยู่เซรัม และทำให้ความเป็นกรดของสารละลายโกลด์คอลลอยด์ไตรไฮเดรตแสดงออกได้อย่างชัดเจนขึ้น และเช่นเดียวกันกับค่าการนำไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อเจือจางเซรัมลงเป็นสัดส่วนต่าง ๆ เนื่องจากการเจือจางจะลดไอออนที่เหลืออยู่ในเซรัมลง แม้ปริมาณไอออนเดิมที่เหลือในสารละลายเหนือตะกอนและไอออนของทองคำที่เติมในส่วนของสารละลายตัวเดิมจะมีค่าคงเดิม ทำให้โดยรวมไอออนที่มีอยู่ในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ในระบบนี้ลดน้อยลงตามสัดส่วนการเจือจางเซรัมที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

#### ตารางที่ 4.4

ค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า และตำแหน่งของความยาวคลื่นสูงสุด ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วนการเจือจางเซรัมแตกต่างกัน ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้น 3.6 mM เป็นสารละลายตัวเดิมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน

Dilution factor of serum	Initial time		3 hours reaction time		
	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	ABS peak (nm)
Optimum condition	7.57	1560	7.43	1810	529.5
2	7.30	2220	8.04	2260	526
3	6.63	1950	7.14	2080	531.5
4	6.40	1800	6.54	1960	534

## ตารางที่ 4.4

ค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า และตำแหน่งของความยาวคลื่นสูงสุด ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัปดาห์การเจือจางเซรัมแตกต่างกัน ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้น 3.6 mM เป็นสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเนื้อตะกอน (ต่อ)

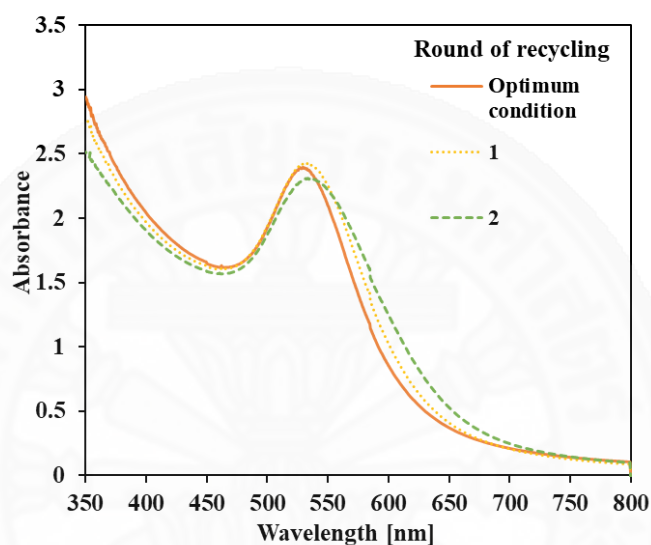
Dilution factor of serum	Initial time		3 hours reaction time		
	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	ABS peak (nm)
Optimum condition	7.57	1560	7.43	1810	529.5
5	6.20	1710	6.25	1820	532.5
6	5.84	1640	6.03	1770	528.5

## ตารางที่ 4.5

ค่า pH, ค่าการนำไฟฟ้า และตำแหน่งของความยาวคลื่นสูงสุด ที่ดูดกลืนแสงได้ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัปดาห์การเจือจางเซรัมแตกต่างกัน ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้น 3.8 mM เป็นสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเนื้อตะกอน

Dilution factor of serum	Initial time		3 hours reaction time		
	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	ABS peak (nm)
Optimum condition	7.57	1560	7.43	1810	529.5
2	8.10	2210	8.10	2330	527
3	7.10	2020	7.68	2100	534
4	6.80	1820	6.93	1930	537
5	6.42	1730	6.69	1860	533.5
6	6.15	1670	6.37	1810	532

จากผลการศึกษาเบื้องต้นจึงเลือกศึกษา 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 สารละลายตัวเดิมที่มีความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต 3.6 mM ในเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 3 เท่า และกรณีที่ 2 สารละลายตัวเดิมที่มีความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่ 3.8 mM ในเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 2 เท่า มาเป็นสถานะของสารละลายตัวเดิมที่จะนำมาใช้ซ้ำใหม่โดยเติมเข้าไปในสารละลายเนื้อตะกอนที่เกิดจากการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบสูงเพื่อแยกอนุภาคนาโนทองคำออกจากสารสังเคราะห์ก่อนหน้านี้ และจะวนซ้ำเช่นนี้เพื่อพิจารณาว่าภาพรวมของการใช้ซ้ำ



ภาพที่ 4.9 ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วนการเจือจางเซรัม 3 เท่า ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้น 3.6 mM เป็นสารละลายตัวเดิมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเนื้อตะกอนรอบที่ 1 และจากการสังเคราะห์โดยการเติมสารละลายตัวเดิมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเนื้อตะกอนที่ได้จากการสังเคราะห์ก่อนหน้านี้ เป็นการสังเคราะห์รอบที่ 2

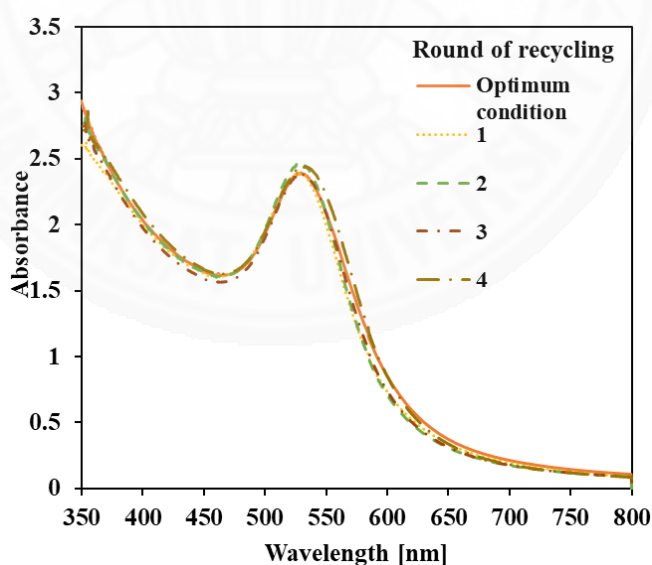
ในกรณีที่ 1 สารละลายตัวเดิมที่มีความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่ 3.6 mM ในเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 3 เท่า ที่ถูกเติมลงในสารละลายส่วนเนื้อตะกอนและทำปฏิกิริยาในสถานะเช่นเดิมกับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำดังที่กล่าวในเบื้องต้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากภาพที่ 4.9 เห็นได้ว่าการใช้ซ้ำสารตั้งต้นรอบแรกค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งพีกสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกับสถานะของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่ใช้เทียบแต่เริ่มสังเกตเห็นว่าแนวโน้มการดูดกลืนแสงที่บริเวณตำแหน่งความยาวคลื่นสูง (550-650 nm) จะเริ่มมีค่าสูงมากขึ้น นั่นหมายความว่าในสถานะนี้เริ่มทำให้เกิดการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อนำคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในรอบที่ 1 นี้ ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบสูงเพื่อแยกนำส่วนสารละลายเนื้อ

ตะกอนมาเติมด้วยสารละลายตัวเติมที่ความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่ 3.6 mM ในเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 3 เท่า อีกครั้งเป็นรอบที่ 2 หลังจากทำปฏิกิริยาที่ 3 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้นั้นมีค่าการดูดกลืนแสงที่น้อยลงกว่าคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำสถานะเทียบ และมีแนวโน้มของการดูดกลืนแสงในบริเวณความยาวคลื่นสูงมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ในรอบที่ 2 ทำให้เกิดอนุภาคนาโนทองคำขนาดใหญ่ขึ้นอีก เมื่อพิจารณา pH ค่าการนำไฟฟ้าและตำแหน่งของค่าการดูดกลืนแสง ดังตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า pH ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำลดลงในรอบที่ 1 และเพิ่มขึ้นในรอบที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่ามีความเป็นเบสเพิ่มขึ้นจากการที่ไอออนทองคำในการสังเคราะห์ในรอบที่ 2 นั้นถูกรีดิวซ์กลายเป็นอนุภาคนาโนทองคำปริมาณมากขึ้น ทำให้ไอออนทองคำลดลงส่งผลให้ความเป็นกรดของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำลดน้อยลง แต่ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามการสะสมของไอออนในคอลลอยด์ดังที่ได้กล่าวไว้เบื้องต้น อีกทั้งคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในรอบที่ 2 นี้มีตำแหน่งของการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 536 nm ซึ่งเป็นผลที่แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้นั้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำสถานะเทียบ ที่มีค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเพียง 529.5 nm จากส่วนนี้ทำให้พิจารณาได้ว่าสถานะของสารละลายตัวเติมที่ความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่ 3.6 mM ในเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 3 เท่า สามารถสังเคราะห์ให้เกิดอนุภาคนาโนทองคำขึ้นใหม่ได้ แต่คุณสมบัติและปริมาณที่ได้นั้นเกิดความแตกต่างจากคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำตัวเทียบที่ต้องการควบคุม จึงทำให้เกิดการศึกษากรณีที่ 2 ของสารละลายตัวเติมสถานะต่อไป นั่นคือสารละลายตัวเติมที่ความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่ 3.8 mM ในเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 2 เท่า

ตารางที่ 4.6

ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัปดาห์การเจือจาง เซอร์รี่ 3 เท่า กับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ความเข้มข้น 3.6 mM เป็นสารละลายตัว เติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนรอบที่ 1 และจากการสังเคราะห์โดยการ เติมสารละลายตัวเติมนลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนที่ได้จากการสังเคราะห์ ก่อนหน้า เป็นการสังเคราะห์รอบที่ 2 และคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน

Round of recycle process	Initial time		3 hours reaction time				Supernatant	
	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	ABS peak (nm)	ABS Intensity	pH	Conductivity ( $\mu\text{M}$ )
Optimum condition	7.6	1560	7.4	1810	529.5	2.396	7.9	1720
1	6.6	1950	7.1	2080	531.5	2.432	7.5	1840
2	6.9	2210	7.6	2340	536	2.310	-	-



ภาพที่ 4.10 ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัปดาห์การเจือจาง เซอร์รี่ 2 เท่า ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้น 3.8 mM เป็นสารละลายตัวเติมนลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนรอบที่ 1 และจากการสังเคราะห์โดยการเติมสารละลายตัวเติมนลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนที่ได้จากการสังเคราะห์ก่อนหน้า โดยทดสอบการใช้ซ้ำ 4 รอบ

## ตารางที่ 4.7

ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ด้วยสัดส่วนการเจือจาง เซรัม 2 เท่า ทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารละลาย HAuCl<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O ที่ความเข้มข้น 3.8 mM เป็นสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนรอบที่ 1 และจากการสังเคราะห์โดยการเติมสารละลายตัวเติมลงในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนที่ได้จากการสังเคราะห์ก่อนหน้านี้ โดยทดสอบใช้ซ้ำคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอนเป็นจำนวน 4 รอบ และคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในส่วนเหนือตะกอน

Round of recycle process	Initial time		3 hours reaction time				Supernatant	
	pH	Conductivity (μS)	pH	Conductivity (μS)	ABS peak (nm)	ABS Intensity	pH	Conductivity (μM)
Optimum condition	7.6	1560	7.4	1810	529.5	2.3959	7.87	1720
1	8.1	2210	8.1	2330	527	2.3931	8.1	2160
2	8.0	2670	8.4	2690	529.5	2.4672	8.3	2580
3	7.8	2950	8.5	2750	531	2.3877	8.0	2770
4	8.0	3070	8.5	3120	531.5	2.4419	-	-

จากผลการศึกษาทำให้เห็นได้ว่าสามารถหาสภาวะของสารตัวเติมเบื้องต้นที่จะสามารถใช้ซ้ำสารตั้งต้นที่ยังเหลือในสารละลายเหนือตะกอนได้อีกอย่างคุ้มค่า และสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้จริง อย่างไรก็ตามสภาวะที่ใช้ได้นั้น เฉพาะในระบบของการใช้เซรัมที่เตรียมได้จากทางน้ำยางที่มีคุณสมบัติ %TRC เท่ากับ 8.3532%, %DRC เท่ากับ 4.8338%, %Alkalinity เท่ากับ 0.758% และ %Brix เท่ากับ 4.1% เท่านั้น โดยสภาวะของสารตัวเติมที่เหมาะสม คือ 7.5 ml ของสารละลายตัวเติมที่ความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่ 3.8 mM ในเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 2 เท่า ใน 22.5 ml ของสารละลายเหนือตะกอน ทำปฏิกิริยาที่ 80 °C พร้อมการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และการสังเคราะห์นั้นทำให้ได้คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำใกล้เคียงกับสภาวะเทียบที่ต้องการ ดังแสดงตัวอย่างการใช้ซ้ำ ที่ทดสอบเป็นจำนวน 4 รอบ ในตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงแนวโน้มว่าการเติมสารละลายตัวเติมที่ได้จากการทดลองนั้น สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้สภาวะใกล้เคียงกับสภาวะเทียบในรอบต่อ ๆ ไปได้เช่นกัน และจากการคำนวณแสดงให้เห็นว่า มวล

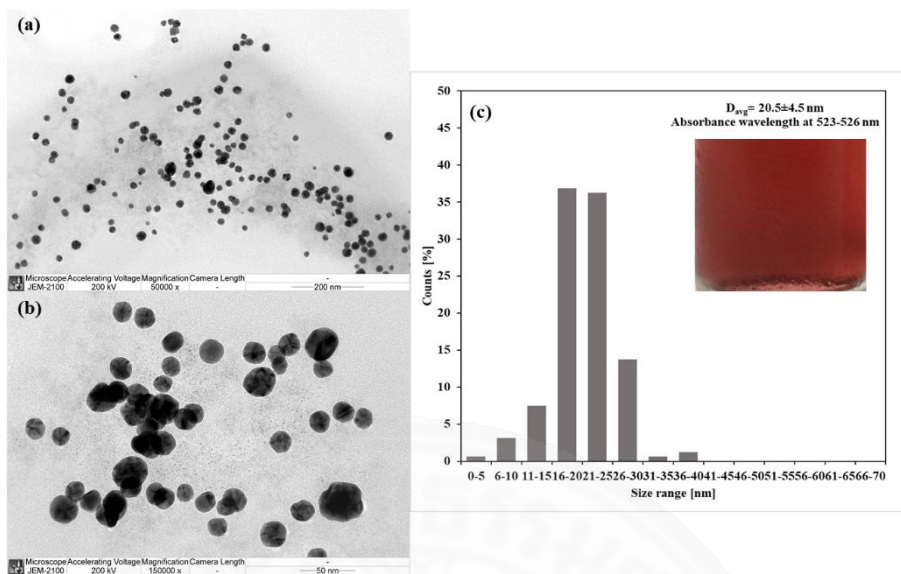
ของทองคำในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำเริ่มต้นที่ใช้เป็นสภาวะเทียบ เท่ากับ 8.2726 mg (30 ml) ซึ่งเมื่อปั่นเหวี่ยงแยกอนุภาคนาโนทองคำออก พบว่า มีมวลของทองคำในส่วนของสารละลายเหนือตะกอน เท่ากับ 2.5878 mg (22.5 ml) โดยมีมวลของทองคำต่อปริมาตรสารละลายเหนือตะกอน เท่ากับ 0.115 mg/ml และ มีมวลของทองคำจากการเติมด้วยสารละลายตัวเติม เท่ากับ 5.685 mg (7.5 ml) ในส่วนของตะกอนมีมวลทองคำเท่ากับ 5.685 mg (7.5 ml) ซึ่งมีมวลของทองคำต่อปริมาตรส่วนตะกอน เท่ากับ 0.757 mg/ml โดยการคำนวณนั้นจะแสดงในภาคผนวก ก.3 นอกจากนี้อนุภาคนาโนทองคำที่ได้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเมื่อจำนวนรอบของการใช้ซ้ำเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 4.7 สามารถออกแบบการแยกอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดที่แตกต่างกันได้ด้วยการปั่นเหวี่ยง ดังผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.4 ได้เช่นเดียวกัน อีกทั้งหากต้องการศึกษาสำหรับทางน้ำย้างที่มีคุณสมบัติอื่นแตกต่างออกไป จะต้องมีการทดลองซ้ำเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของสารละลายตัวเติมให้สามารถใช้กับคุณสมบัติของทางน้ำย้างนั้น ๆ ได้โดยการใช้ลักษณะของการศึกษาดังที่แสดงมาในหัวข้อนี้

#### 4.5 ผลของการแยกขนาดอนุภาคนาโนทองคำด้วยการปั่นเหวี่ยงและผลของ pH ต่อความเสถียรของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ

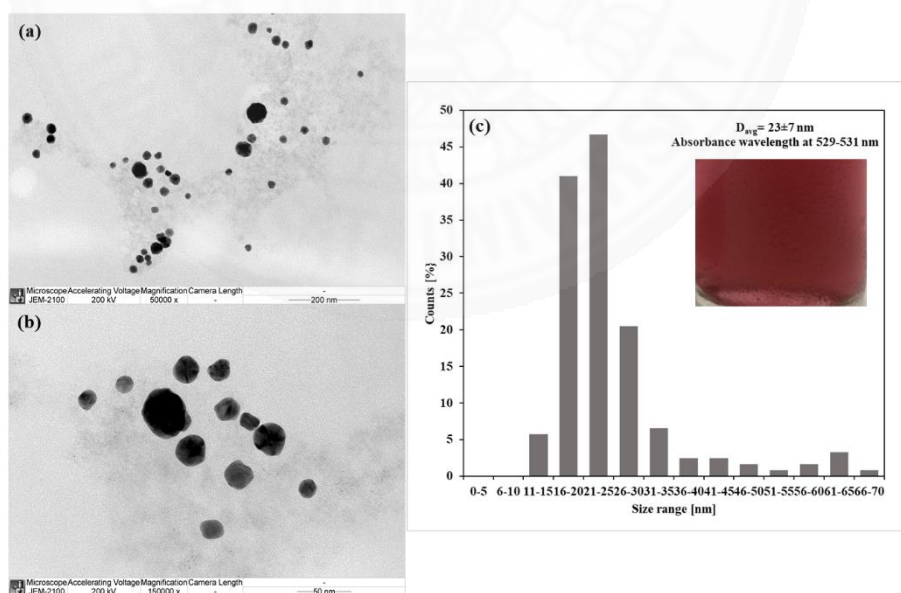
จากการทบทวนวรรณกรรมในบทที่ผ่านมาพบว่าอนุภาคนาโนทองคำนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันหลายประการเมื่อมีขนาดที่แตกต่างกัน เช่น คุณสมบัติเชิงแสง ความสามารถในการดูดกลืนแสง งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของขนาดของอนุภาคนาโนทองคำต่อการนำไปประยุกต์ใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอนใน ชั้นแรกจึงได้แยกขนาดของอนุภาคนาโนทองคำโดยใช้วิธีการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบแตกต่างกันเพื่อให้สามารถแยกขนาดอนุภาคนาโนทองคำได้ โดยในการศึกษานี้ได้แยกขนาดอนุภาคนาโนทองคำออกเป็น 2 ขนาด นั่นคือกรณีที่ 1 คือการใช้การปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 rpm เพื่อแยกอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดใหญ่บางส่วนออกจากคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ และนำคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำส่วนเหนือตะกอนมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบสูงสุดอีกครั้ง (8,000 rpm) เพื่อแยกอนุภาคนาโนทองคำขนาดเล็กที่ไม่สามารถแยกได้ด้วยความเร็วรอบ 4,000 rpm ออกมา จากนั้นจึงเตรียมให้เป็นคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำ และในกรณีที่ 2 คือแยกอนุภาคนาโนทองคำด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8,000 rpm และเตรียมให้เป็นคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำเช่นเดิม เนื่องจากการแยกขนาดอนุภาคนาโนทองคำด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ได้ศึกษาในหัวข้อที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า การแยกอนุภาคด้วยความเร็วรอบ



ต่ำ จะสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ให้ตกลงเป็นตะกอนอนุภาคนาโนทองคำก่อน และยังคงเหลืออนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเล็กกว่าอยู่ในส่วนของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำส่วนเหนือตะกอน ดังนั้น การแยกอนุภาคนาโนทองคำด้วยความเร็วรอบ 4,000 rpm นั้นจะต้องมีขนาดอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเล็กกว่าอยู่ในส่วนของคอลลอยด์เหนือตะกอน (กรณีที่1) และในการแยกที่ความเร็วรอบ 8,000 rpm (กรณีที่2) จะสามารถแยกอนุภาคนาโนทองคำทั้งหมด รวมถึงอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าการแยกในกรณีที่ 1 ซึ่งสีของสารคอลลอยด์แสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.11 และ ภาพที่ 4.12 ตามลำดับ จะเห็นว่า อนุภาคนาโนทองคำที่แยกได้จากกรณีที่ 1 จะแสดงคุณสมบัติเชิงแสงให้มองเห็นสีของคอลลอยด์เป็นสีแดง และในส่วนของอนุภาคนาโนทองคำที่แยกได้จากกรณีที่ 2 จะแสดงคุณสมบัติเชิงแสงให้มองเห็นสีของคอลลอยด์เป็นสีม่วงแดง และเพื่อยืนยันผลจากการวิเคราะห์ขนาดจึงเตรียมขนาดของอนุภาคนาโนทองคำให้มีค่าการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกัน ไปตรวจคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาและวัดขนาดของอนุภาคเพื่อสร้างแผนภาพการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่แยกได้ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่ากรณีที่ 1 คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำสามารถดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 523 ถึง 526 nm ทำให้อนุภาคนาโนทองคำส่วนใหญ่มีการกระจายขนาดที่กว้างในช่วงขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก (0 - 40 nm) ดังแสดงให้เห็นในแผนภาพการกระจายขนาดดังภาพที่ 4.11 (c) และขนาดเฉลี่ยเท่ากับ  $20.5 \pm 4.5$  ซึ่งเมื่อเทียบกับการแยกในกรณีที่ 2 คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำสามารถดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 529 ถึง 531 nm จะเห็นได้ว่าอนุภาคนาโนทองคำส่วนใหญ่มีการกระจายขนาดอยู่ในช่วงของขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (11 - 70 nm) และมีการกระจายขนาดที่มากกว่ากรณีที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 4.12 (c) โดยขนาดเฉลี่ยเท่ากับ  $23 \pm 7$  nm จากผลนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า อนุภาคนาโนทองคำที่ถูกแยกทั้ง 2 กรณี มีขนาดของอนุภาคบางส่วนคาบเกี่ยวกันนั่นคือขนาดของอนุภาคนาโนทองคำในช่วง 11 ถึง 40 nm ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นส่วนที่แสดงคุณสมบัติเชิงแสงให้เห็นเป็นสีแดง (เป็นช่วงของขนาดอนุภาคที่ได้ในการแยกแบบกรณีที่ 1 ทั้งหมด) ส่งผลให้การแยกขนาดอนุภาคนาโนทองคำด้วยกรณีที่ 2 แสดงคุณสมบัติเชิงแสงของอนุภาคใกล้เคียงกับการแยกขนาดอนุภาคนาโนทองคำด้วยกรณีที่ 1 เนื่องจากมีการผสมกันของอนุภาคนาโนทองคำในขนาดที่มีคุณสมบัติเชิงแสงในการมองเห็นสีของคอลลอยด์เป็นสีแดงกับอนุภาคนาโนทองคำในขนาดที่มีคุณสมบัติเชิงแสงในการมองเห็นสีของคอลลอยด์เป็นสีม่วง ทำให้สีที่มองเห็นเป็นสีม่วงประกายแดงนั่นเอง

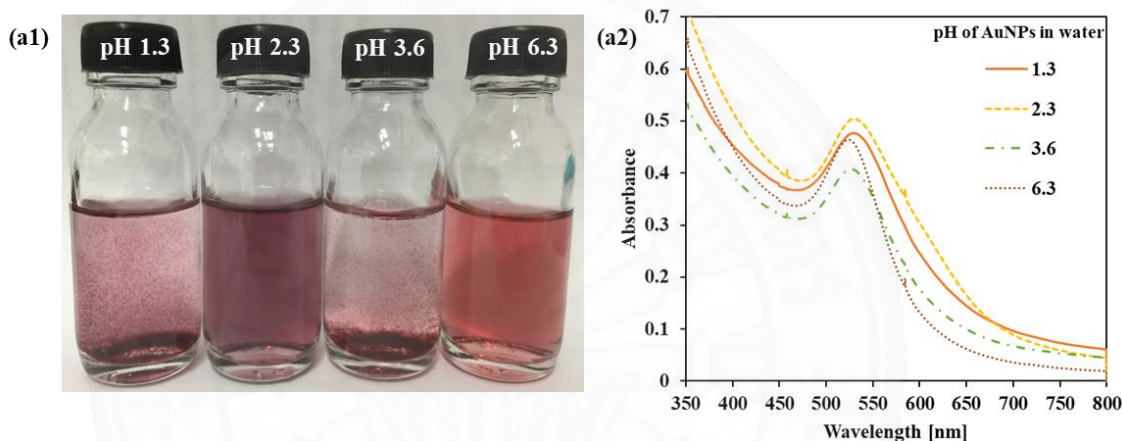


ภาพที่ 4.11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (a) กำลังขยาย 50,000x และ (b) กำลังขยาย 150,000x และแผนภาพการกระจายขนาดของคอลลอยด์อนุภาคนาโนคอลลอยด์ส่วนเนื้อตะกอนที่แยกจากการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 rpm และปั่นเหวี่ยงสารละลายส่วนเนื้อตะกอนที่ 8,000 เพื่อแยกตะกอนออกจากนั้นจึงเตรียมในสารละลาย SDS ซึ่งมีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm



ภาพที่ 4.12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (a) กำลังขยาย 50,000x และ (b) กำลังขยาย 150,000x และแผนภาพการกระจายขนาดของคอลลอยด์อนุภาคนาโนคอลลอยด์ที่แยกจากการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8,000 rpm และเตรียมในสารละลาย SDS ซึ่งมีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm

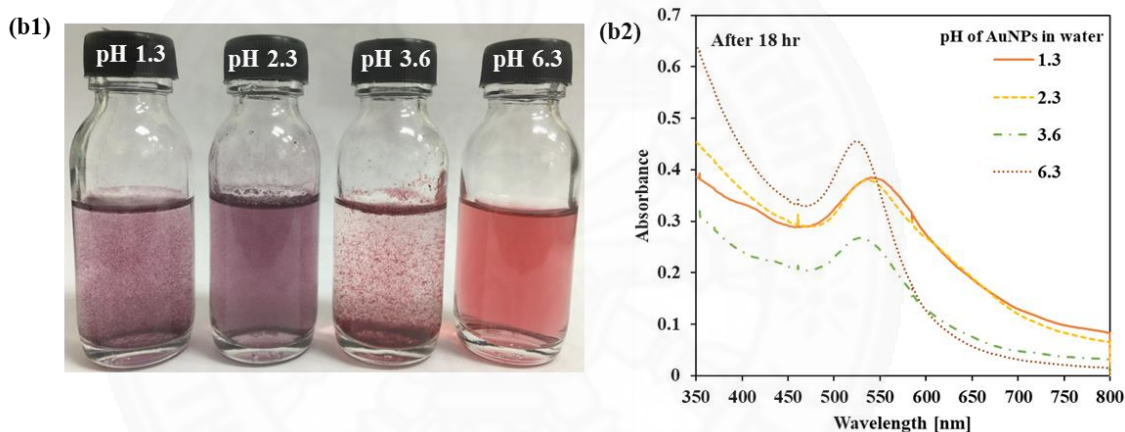
หลังจากที่ตรวจสอบคุณลักษณะของอนุภาคนาโนทองคำที่ถูกแยกออกด้วย 2 กรณีที่แตกต่างกันแล้ว จึงได้มีการทดสอบความเสถียรของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำก่อนที่จะนำคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำเหล่านี้ไปทดสอบความสามารถในการเป็นเซนเซอร์ต่อไป ด้วยการปรับค่า pH ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำให้อยู่ในสภาวะที่เป็นกรดด้วยสารละลายเข้มข้นของกรดไฮดรอกลอริก และปรับให้มีค่าการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกันด้วยการเจือจางอนุภาคนาโนทองคำด้วยน้ำ และสังเกตค่าการดูดกลืนแสงจากการตรวจวัดความสามารถในการดูดกลืนแสงให้ใกล้เคียงกัน แทนการปรับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนทองคำในคอลลอยด์ให้เท่ากันในสภาวะของ pH ที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.13 (a1) ลักษณะของคอลลอยด์และ (a2) ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm หลังการปรับค่า pH ให้มีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 1.3, 2.3, และ 3.6 ด้วยกรดไฮดรอกลอริกเข้มข้น เปรียบเทียบกับค่า pH เริ่มต้นของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่ค่า 6.3 ณ เวลาเริ่มต้นที่ปรับ pH

เมื่อปรับค่า pH ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำให้มีความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น ในกรณีของอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาด  $20.5 \pm 4.5$  nm จะเห็นได้ว่าอนุภาคนาโนทองคำมีการรวมกลุ่มกันเป็นตะกอนทันทีเมื่อถูกปรับค่า pH จากค่าเริ่มต้นที่ 6.3 เป็น 3.6, 2.3 และ 1.3 และทำให้สีของอนุภาคนาโนทองคำที่รวมกลุ่มนั้นเปลี่ยนแปลงจากตะกอนสีแดงไปเป็นตะกอนสีม่วงในที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4.13 (a1) และจากค่าการดูดกลืนแสงที่ภาพที่ 4.13 (a2) จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่า pH ไปเป็น 3.6 ค่าการดูดกลืนแสงลดลงจาก pH เริ่มต้น (6.3) และตำแหน่งของการดูดกลืนแสงสูงสุดเกิดการเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่มากขึ้น หรือเลื่อนไปทางบลูชิฟท์ ทั้งนี้อนุภาคนาโนทองคำเกิดการรวมตัวเป็นตะกอนแดงขนาดใหญ่ที่เห็นได้อย่างชัดเจน ส่วนในกรณีที่ pH เท่ากับ 2.3 อนุภาคนาโนทองคำมีการรวมกลุ่มเป็นขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้สีของคอลลอยด์เป็นสีม่วงเข้มขึ้นจากเริ่มต้นที่เป็นสี

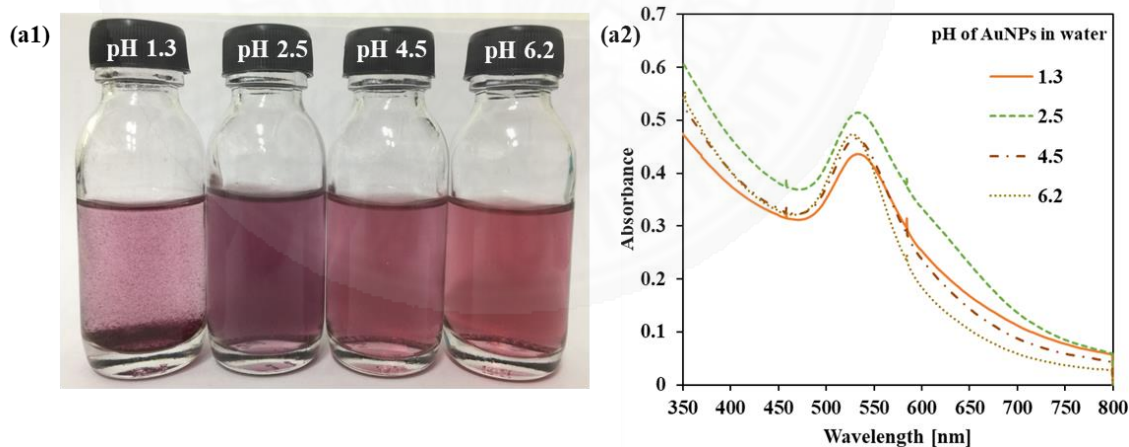
แดง และลักษณะค่าการดูดกลืนแสงเกิดการเลื่อนไปในทิศทางบลูชิฟท์เช่นเดียวกัน ถัดมาเมื่อเพิ่มความเป็นกรดที่ pH 1.3 จะสังเกตเห็นได้ว่าอนุภาคนาโนทองคำรวมกลุ่มเป็นตะกอนสีม่วงอ่อนขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งเดียวกับ pH 2.3 มีค่าลดลงเนื่องจากอนุภาคส่วนใหญ่ได้รวมเป็นตะกอน หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 18 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำยังคงมีการรวมตัวกันขนาดใหญ่ขึ้น สีตะกอนเป็นม่วงเข้มมากขึ้น และเกิดตะกอนเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.14 (b1) และ (b2) ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์ที่ pH เท่ากับ 3.6, 2.3 และ 1.3 ที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของการดูดกลืนแสงไปทางบลูชิฟท์ และค่าการดูดกลืนแสงลดลงจากเวลาเริ่มต้นเนื่องจากอนุภาคเกิดการรวมกลุ่มมากขึ้นดังที่ได้กล่าวในเบื้องต้น



ภาพที่ 4.14 (b1) ลักษณะของคอลลอยด์และ (b2) ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm หลังการปรับค่า pH ให้มีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 1.3, 2.3, และ 3.6 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เปรียบเทียบกับค่า pH เริ่มต้นของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่ค่า 6.3 ณ เวลาหลังจากปรับค่า pH 18 ชั่วโมง

ในส่วนของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาด  $23 \pm 7$  จะเห็นได้ว่าลักษณะของอนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกปรับค่า pH ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำให้มีความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น อนุภาคนาโนทองคำมีการรวมกลุ่มตกตะกอนเช่นเดียวกับกรณีของอนุภาคนาโนทองคำขนาด  $20.5 \pm 4.5$  โดยเมื่อเวลาเริ่มต้นที่มีการปรับ pH ให้อยู่ในสภาพเป็นกรดทันทีนั้น สีของคอลลอยด์จะเปลี่ยนไปจากสีแดงอมม่วงไปเป็นสีม่วงเข้มขึ้นตามลำดับเมื่อ pH เปลี่ยนไปจาก 6.2 ไปเป็น 4.5 และ 2.5 ดังแสดงในภาพที่ 4.15 (a1) และสอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงในภาพที่ 4.15 (a2) ที่ตำแหน่งของค่าการดูดกลืนแสงมีการเลื่อนไปทางบลูชิฟท์มากขึ้น โดยที่อนุภาคนาโนทองคำนั้นยังไม่

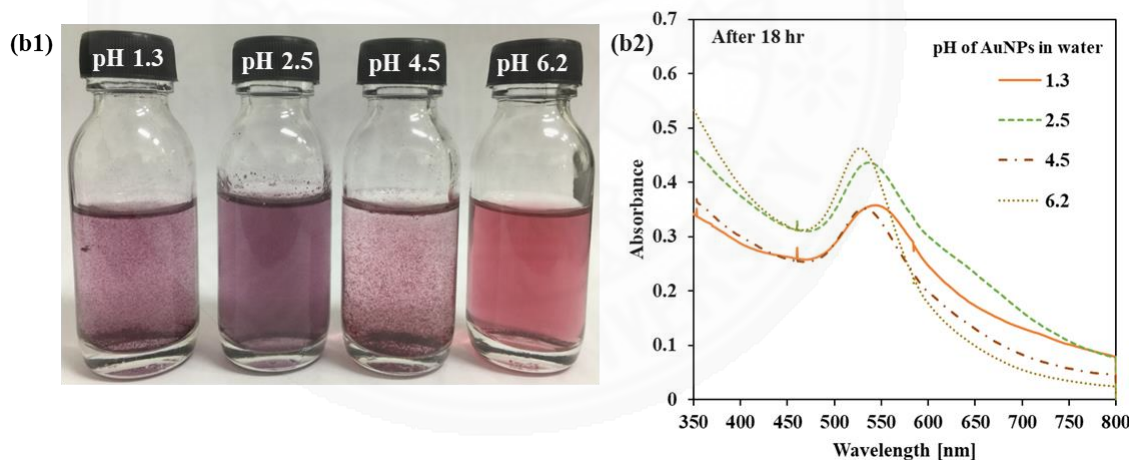
จับก้อนเป็นตะกอนที่ชัดเจน แต่เมื่อปรับค่า pH ไปที่ 1.3 จะเห็นได้ว่าคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำเกิดการรวมกลุ่มเป็นตะกอนสีม่วงเข้มทันที ซึ่งนั่นทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่เลื่อนไปทิศทางบลูชิฟท์นั้นมีค่าลดลงเพราะคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำส่วนใหญ่จับก้อนตกตะกอนไปแล้ว และจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 18 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าที่สภาวะ pH 4.5 คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำเกิดการรวมกลุ่มและตกตะกอนมากขึ้นเป็นตะกอนขนาดใหญ่ พร้อมกับทั้งค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงและมีเส้นของการดูดกลืนแสงที่กว้างขึ้น บ่งบอกถึงอนุภาคนาโนทองคำที่มีการกระจายขนาดมากยิ่งขึ้น แต่สภาวะที่ pH เท่ากับ 2.5 คอลลอยด์นาโนทองคำเริ่มเกิดตะกอนสีม่วงฟ้ามากขึ้นแต่เป็นลักษณะที่เป็นตะกอนขนาดเล็กกว่าสภาวะที่กล่าวก่อนหน้า พร้อมทั้งสีของคอลลอยด์มีสีม่วงเข้มขึ้นสอดคล้องค่าการดูดกลืนแสงที่สังเกตเห็นว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นบริเวณ 600 - 650 nm แสดงถึงการรวมตัวของอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีไปเป็นสีฟ้าแต่เมื่อปนกับคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีสีม่วงทำให้คอลลอยด์โดยรวมของสารละลายมองเห็นเป็นสีม่วงฟ้า และสุดท้ายที่สภาวะ pH เท่ากับ 1.3 จากเดิมที่เกิดตะกอนตั้งแต่เริ่มปรับสภาวะ แต่เมื่อเวลาผ่านไป คอลลอยด์ยังรวมกลุ่มและตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นตะกอนขนาดใหญ่ที่มีสีม่วงเข้มมากขึ้นเช่นเดียวกัน พร้อมกับค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงจากการที่อนุภาครวมกลุ่มตกตะกอนเช่นเดียวกับที่อธิบายในกรณีอื่นก่อนหน้า ดังแสดงในภาพที่ 4.16 (b1) และภาพที่ 4.16 (b2)



ภาพที่ 4.15 (a1) ลักษณะของคอลลอยด์และ (a2) ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm หลังการปรับค่า pH ให้มีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 1.3, 2.5, และ 4.5 ด้วยกรดไฮดรอกลอริกเข้มข้น เปรียบเทียบกับค่า pH เริ่มต้นของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่ค่า 6.2 ณ เวลาเริ่มต้นที่ปรับ pH

จากผลของการปรับค่า pH ในทั้ง 2 กรณีทำให้เห็นได้ว่าอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเล็กกว่า ( $20.5 \pm 4.5$  nm) มีความไวต่อสภาวะความเป็นกรดมากกว่า สังเกตได้จากการที่อนุภาคนาโนทองคำเกิดการรวมกลุ่มหลังจากการปรับสภาวะให้มีความเป็นกรดมาก และเมื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ อนุภาคนาโนทองคำทั้ง 2 ขนาดจะเสียความเสถียรภาพไป

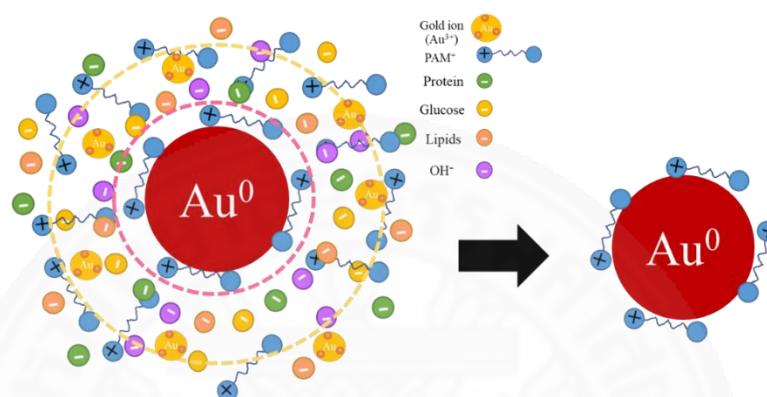
อีกทั้งเนื่องจากการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ในระบบนี้ ถูกสังเคราะห์ในสภาวะที่เป็นเบสจากเซรัมที่เตรียมจากหางน้ำยาง ซึ่งยังคงมีสารละลายแอมโมเนียเจือปนอยู่ และคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้จึงอยู่ในสภาวะที่เป็นเบสเช่นเดียวกัน และจากการศึกษาพบว่าคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่อยู่ได้ในสภาวะที่มีความเสถียร ดังนั้นจึงไม่ได้พิจารณาคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่อยู่ในสภาวะที่เป็นเบส จากผลการทดลองนี้ทำให้เห็นว่าคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่เตรียมได้ในเบื้องต้นหรือที่สภาวะเป็นกรดอ่อนถึงเบสอ่อนหรือ pH ประมาณ 6-8 มีความเสถียร เนื่องจากเป็นสภาวะที่ไม่ทำให้อนุภาคเกิดการรวมกลุ่มขึ้นเอง และทำให้สนใจที่จะนำสภาวะของคอลลอยด์นาโนทองคำนี้ไปทดสอบการเกิดการรวมกลุ่มและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสงด้วยความเข้มข้นที่แตกต่างกันของซิสทีนและกลูต้าไธโอนต่อไป



ภาพที่ 4.16 (b1) ลักษณะของคอลลอยด์และ (b2) ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm หลังการปรับค่า pH ให้มีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 1.3, 2.5, และ 4.5 ด้วยกรดไฮดรอกลอริกเข้มข้น เปรียบเทียบกับค่า pH เริ่มต้นของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่ค่า 6.2 ณ เวลาหลังจากปรับค่า pH 18 ชั่วโมง

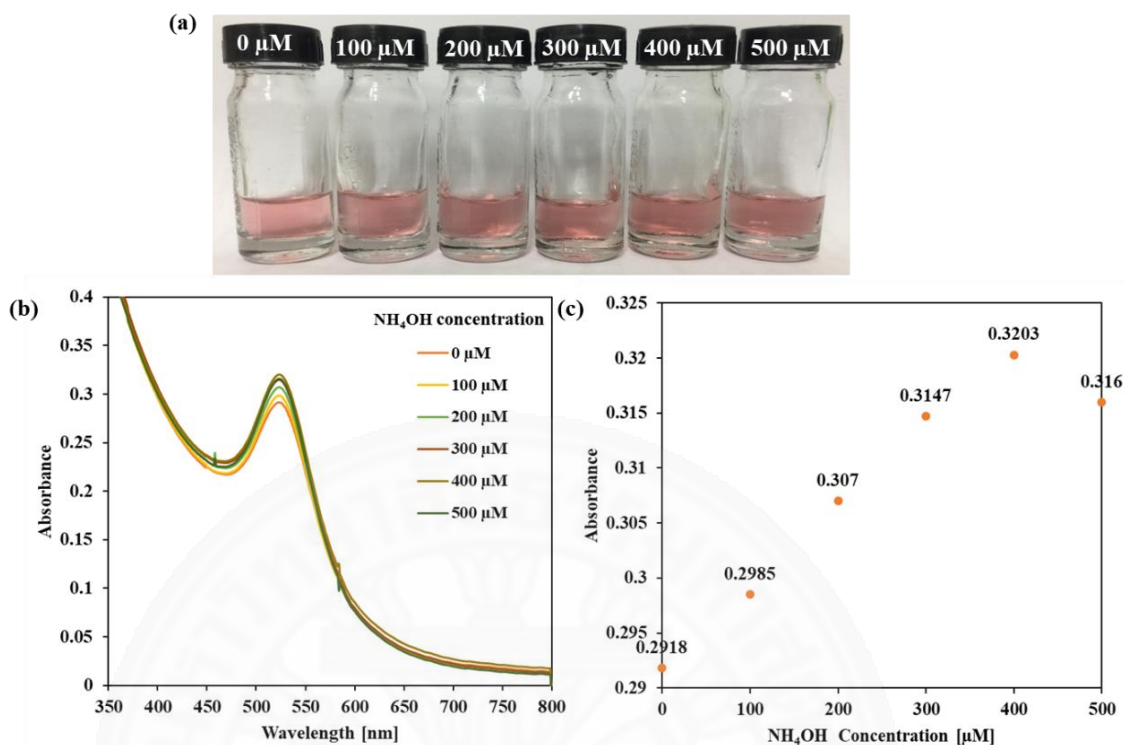
#### 4.6 ผลของความเข้มข้นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ กลูต้าไรโอน และซิสทีนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ

##### 4.6.1 ผลของความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.17 แสดงลักษณะจำลองของอนุภาคนาโนทองคำก่อนถูกแยกออกจากสารคอลลอยด์และอนุภาคนาโนทองคำที่ล้างไอออนคงเหลือและเตรียมเป็นคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำ

จากงานวิจัยของ Pandey และคณะ (2556) ที่ได้ศึกษาการเตรียมกราฟมาตรฐานสำหรับการตรวจวัดความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่ำ โดยใช้ปฏิกิริยาของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้เกิดการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนร่วมกับแอมโมเนีย ทำให้เกิดเป็นสารประกอบ  $[\text{Au}(\text{NH}_3)_2]^{3+}$  ซึ่งส่งผลให้เกิดค่าพิคการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 408 nm และส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่ตำแหน่งของความยาวคลื่น 539 nm มีค่าลดลง ในกรณีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ ยังคงมีสารละลายแอมโมเนียเจือปนอยู่ ซึ่งเป็นแอมโมเนียที่หลงเหลืออยู่ในเซรัมแม้จะผ่านการจับก่อนแยกออกไปแล้ว และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เซรัมจากทางน้ำยังมีสถานะเป็นเบส (pH 10-11) ทำให้จำเป็นต้องแยกอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ออกมาก่อน เพื่อตัดผลการรบกวนของแอมโมเนียมไอออนและไอออนอื่น ๆ ที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในแสดงดังภาพที่ 4.17 ก่อนที่จะทดสอบกับแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน รวมไปถึงการทดสอบกับซิสทีนและกลูต้าไรโอนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันด้วย อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำนั้นก็ยังหลงเหลือพอลิอะคริลาไมด์บนผิวของอนุภาคนาโนทองคำเนื่องจากไม่สามารถแยกออกไปได้ ซึ่งทราบจากการนำคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำนี้ไปตรวจวิเคราะห์ EDS (ผลแสดงในภาคผนวก ค.) และพบปริมาณของคาร์บอนซึ่งนำมาจากพอลิเมอร์ชนิดนี้

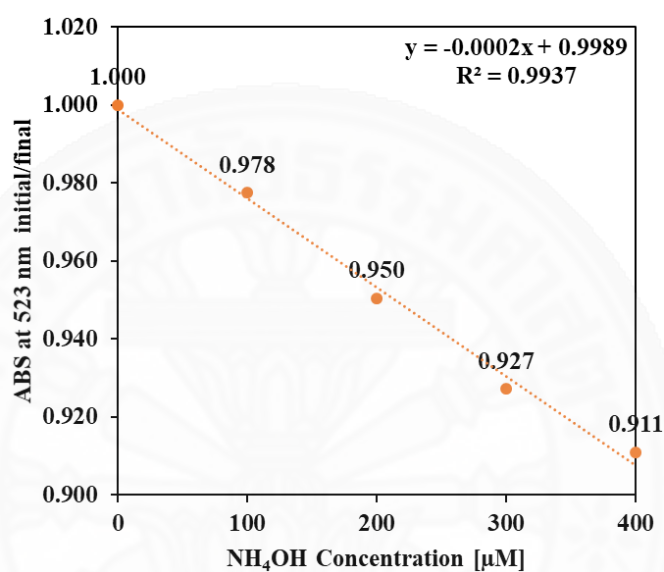


ภาพที่ 4.18 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ต่อความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ได้แก่ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500  $\mu\text{M}$  (b) ค่าการดูดกลืนแสงและ (c) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 523 nm

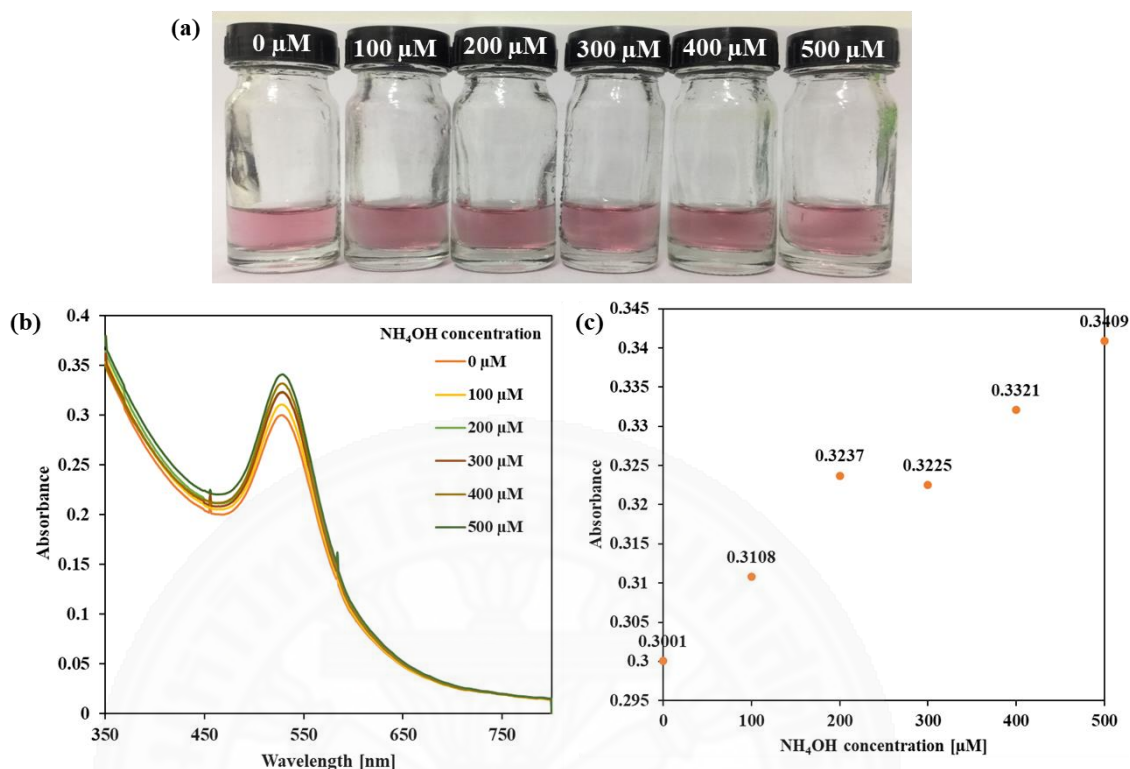
หลังจากเตรียมคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ในน้ำแล้วทดสอบอนุภาคนาโนทองคำด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500  $\mu\text{M}$  และนำไปทำปฏิกิริยาโดยให้ความร้อนที่  $80^\circ\text{C}$  พร้อมการสั่นด้วยเสียง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งในการทดสอบผลของขนาดอนุภาคนาโนทองคำที่แตกต่างกันต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับแอมโมเนียดังแสดงในภาพที่ 4.18 และภาพที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าอนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm และ  $23 \pm 7$  nm ที่ถูกทดสอบด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันนั้น ไม่ส่งผลให้สีของอนุภาคเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในภาพที่ ในภาพที่ 4.18 (a) และภาพที่ 4.20 (a) ตามลำดับ แต่ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 523 nm (อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 523-526 nm) และ 530 nm (อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 529-531 nm) เพิ่มขึ้นตามลำดับความเข้มข้น ดังแสดงในภาพที่ 4.18 (c) และภาพที่ 4.20 (c) โดยจากผลการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกันนั้นสามารถใช้ทำนายความเข้มข้น



ของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จากการสร้างกราฟมาตรฐานได้ในลักษณะเดียวกัน นั่นคือพิจารณา สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเริ่มต้นของอนุภาคนาโนทองคำที่ ไม่มีผลของความเข้มข้นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเดิมที่ เปลี่ยนไปหลังจากได้รับผลจากความเข้มข้นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.19 และภาพที่ 4.21



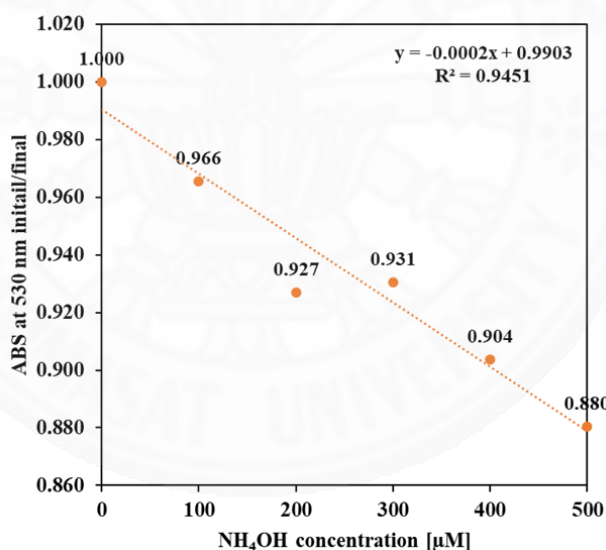
ภาพที่ 4.19 กราฟมาตรฐานของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและค่าการดูดกลืนแสงที่ เปลี่ยนแปลงไป ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 523 nm เทียบกับความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอก- ซิดในช่วงความเข้มข้น 0 - 400 µM



ภาพที่ 4.20 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ต่อความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ได้แก่ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500  $\mu\text{M}$  (b) ค่าการดูดกลืนแสงและ (c) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm

หลังจากพบว่า การทดสอบอนุภาคนาโนทองคำกับแอมโมเนียมมีแนวโน้มที่เป็นลักษณะเดียวกันจึงเริ่มทดสอบความสามารถในการเป็นเซนเซอร์ด้วยการเตรียมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น ได้แก่ 125, 250, 325 และ 475  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 1 ml ผสมกับคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำ 2 ml จากนั้นให้ความร้อนที่ 80  $^{\circ}\text{C}$  พร้อมด้วยการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งพิกสูงสุดที่ไม่มีผลของความเข้มข้นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ของอนุภาคนาโนทองคำแต่ละขนาดแล้วนำค่าที่อ่านได้มาหารด้วยค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไป ณ ตำแหน่งความยาวคลื่นเดิม เมื่อเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ และนำมาแทนค่าในสมการกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณความเข้มข้นและคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ผลที่ได้คือสำหรับกราฟมาตรฐานของอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาด  $20.5 \pm 4.5$  nm ทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 18.4%, 8.40%, 11.08% และ 36.42% ตามลำดับที่ความเข้มข้น 125, 250, 325 และ 475  $\mu\text{M}$  ซึ่งจากผลนี้ทำให้เห็นได้ถึงความเข้มข้นที่คำนวณได้ในช่วงความเข้มข้น 100-500  $\mu\text{M}$  สามารถใช้ประเมินความเข้มข้นเบื้องต้นได้ถึงแม้ว่าแนวโน้มของ

ความเข้มข้นที่ 500  $\mu\text{M}$  จะมีความคลาดเคลื่อนมาก อาจเนื่องจากความผิดพลาดของสภาวะการทดสอบปฏิกิริยาที่ผิดพลาด ดังแสดงในภาพที่ 4.18 (c) แต่สมการของกราฟมาตรฐานสามารถใช้คำนวณความเข้มข้นในช่วง 400 - 500  $\mu\text{M}$  ได้ แต่มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูง และสำหรับกราฟมาตรฐานของอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาด  $23 \pm 7$  nm ทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 188.01%, 15.17%, 6.29% ตามลำดับความเข้มข้น 125, 250, 350 และ 475  $\mu\text{M}$  ซึ่งจากผลนี้ทำให้เห็นได้ว่าความเข้มข้นที่คำนวณได้ในช่วงความเข้มข้น 200-500  $\mu\text{M}$  สามารถใช้ประเมินความเข้มข้นเบื้องต้นได้ แต่ในช่วง 0-200  $\mu\text{M}$  มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่สูงมาก ซึ่งเป็นไปได้จากการเกิดปัญหาการควบคุมสภาวะการทดสอบคล้ายในกรณีของข้างต้น โดยจากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 กรณีของการใช้อุณหภูมิที่ต่างกันมาสร้างกราฟมาตรฐานนั้นสามารถใช้ได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงของทั้งสองกรณีมีค่าเท่ากันโดยดูจากความชันของกราฟมาตรฐานของการประเมินความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 4.19 และภาพที่ 4.21



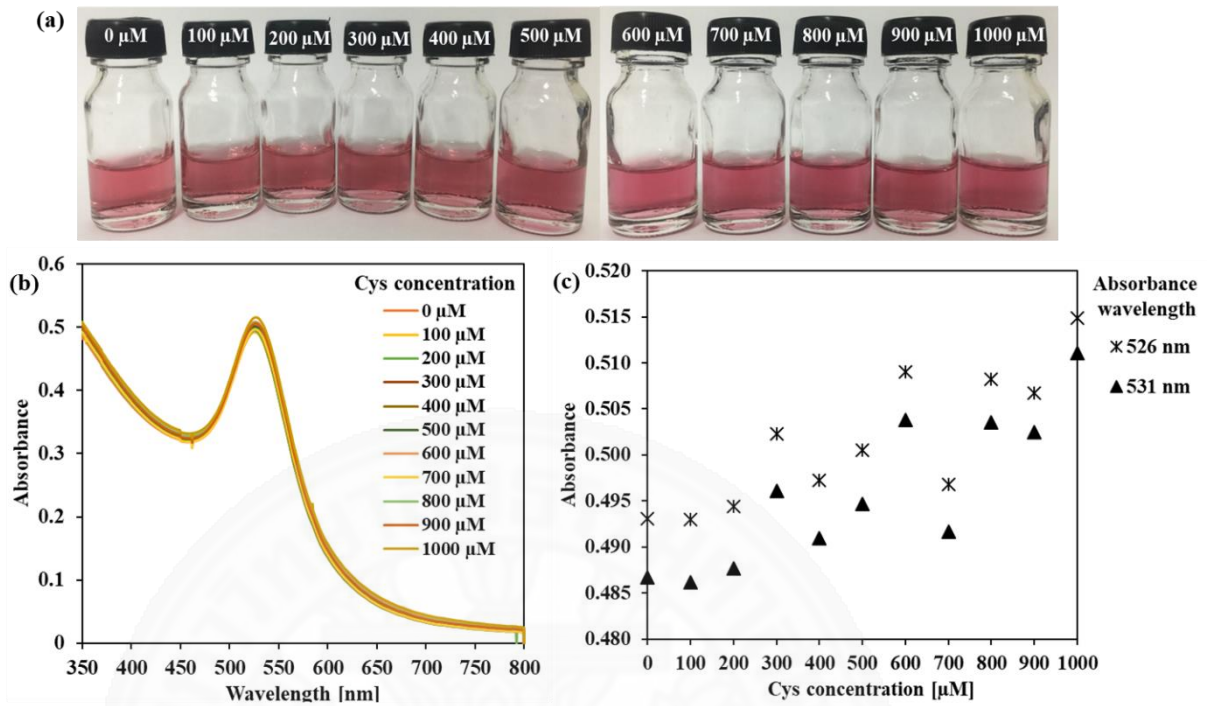
ภาพที่ 4.21 กราฟมาตรฐานของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm เทียบกับความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในช่วงความเข้มข้น 0 - 500  $\mu\text{M}$

ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ต่างกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำอย่างมีแนวโน้มที่ชัดเจน คือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนีย สีของสารละลายอนุภาคนาโนทองคำไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากก่อนทำ

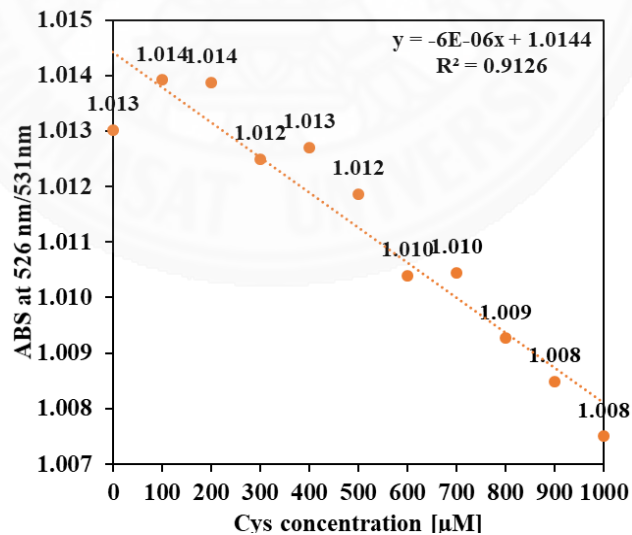
ปฏิกิริยา และค่าการดูดกลืนแสงที่พีคของการดูดกลืนแสงสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแอมโมเนียมีไอออนมีการทำปฏิกิริยากับอนุภาคนาโนทองคำ แตกต่างไปจากการเกิดปฏิกิริยาในงานวิจัยของ Pandey และคณะ จากผลของแอมโมเนียต่ออนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ในระบบของงานวิจัยนี้ ทำให้เห็นได้ว่าแอมโมเนียมีส่วนทำให้อนุภาคนาโนทองคำเคลื่อนตัวเข้ามาใกล้กันมากยิ่งขึ้นและส่งผลต่อค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่มากขึ้นตามลำดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย

#### 4.6.2 ผลของความเข้มข้นที่ของซิสทีนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกัน

ในผลของการทดสอบซิสทีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกันต่ออนุภาคนาโนทองคำที่ขนาดแตกต่างกัน เห็นผลของขนาดต่อประสิทธิภาพในการใช้เป็นตัวประเมินความเข้มข้นของซิสทีนมากกว่าในกรณีของแอมโมเนียที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา โดยอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ซึ่งมีสีของอนุภาคนาโนทองคำเป็นสีแดง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซิสทีนจะสังเกตเห็นว่าสีของสารทดสอบมีความเข้มข้นเล็กน้อยตามลำดับ ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 4.22 (a) ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 526 nm มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เห็นได้ชัดว่ามีความเข้มข้นที่ค่าการดูดกลืนแสงตกลงในบางจุด ซึ่งวิเคราะห์ว่าเกิดจากอุปกรณ์ที่อุณหภูมิตกลงต่ำกว่าที่กำหนดไว้ ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคนาโนทองคำและซิสทีนเกิดขึ้นได้อย่างไม่สมบูรณ์ และจากค่าการดูดกลืนแสงนี้เห็นได้ชัดว่ามีการเคลื่อนของตำแหน่งที่อนุภาคนาโนทองคำเกิดการดูดกลืนแสงไปที่ 531 nm แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนทองคำนั้นเริ่มมีการรวมกลุ่มกันขึ้น ในภาพที่ 4.22 (b) และ (c) เห็นได้ว่าช่วงความเข้มข้นของอนุภาคนาโนทองคำที่สูงขึ้น ความแตกต่างระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 526 nm และ 531 nm มีค่าลดน้อยลงเรื่อย ๆ จากค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm เริ่มมีค่าสูงขึ้นตามการรวมกลุ่มของอนุภาค

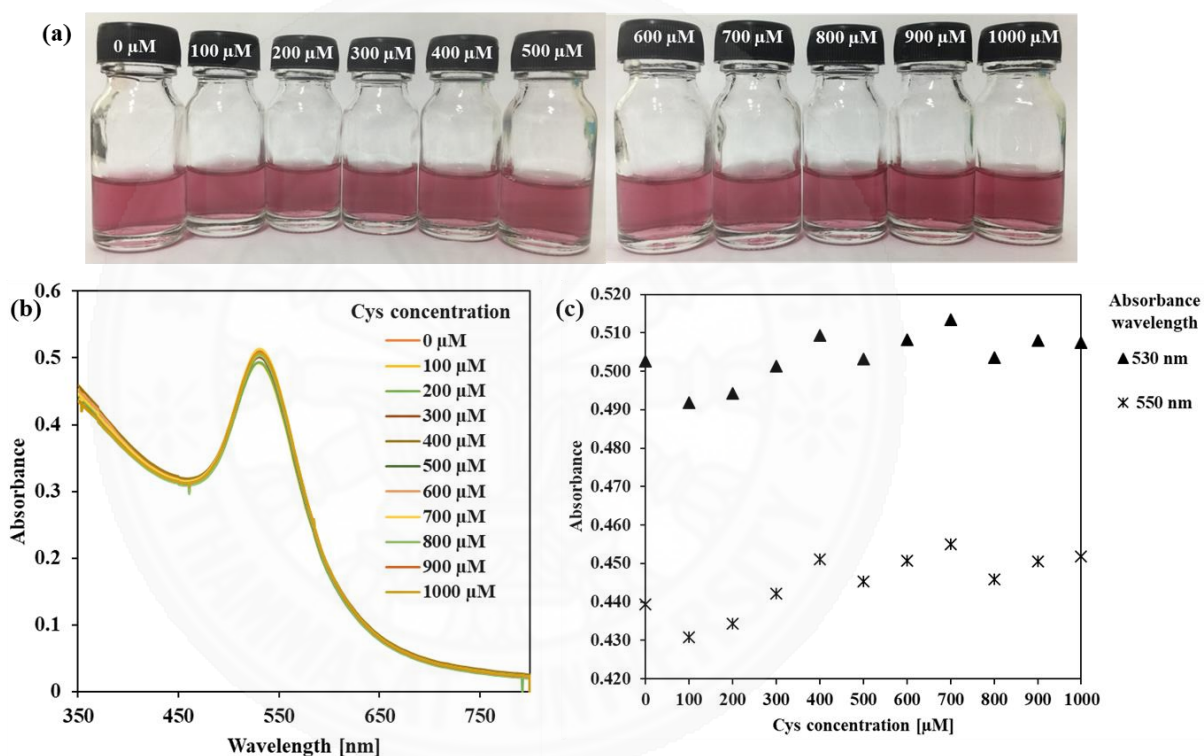


ภาพที่ 4.22 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ต่อซีสทีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000  $\mu\text{M}$   
 (b) ค่าการดูดกลืนแสงและ (c) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 และ 531 nm



ภาพที่ 4.23 กราฟมาตรฐานของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 530 nm เทียบกับความเข้มข้นของซีสทีนในช่วงความเข้มข้น 0 - 1000  $\mu\text{M}$

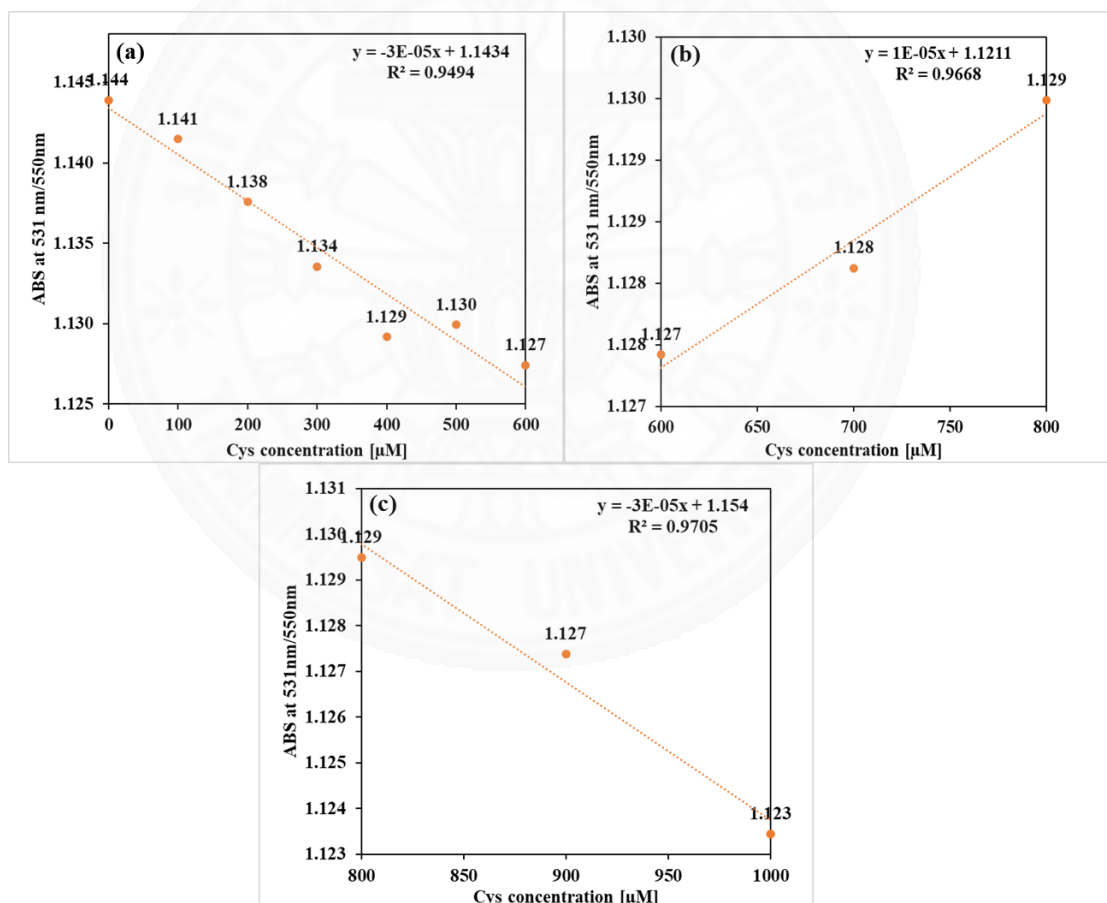
หลังจากที่นำแนวโน้มน้ำที่ได้จากการทดสอบผลของซิสทีนต่ออนุภาคนาโนทองคำ และสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับประเมินความเข้มข้นของซิสทีนโดยใช้ความเข้มข้นที่ได้แก่ 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$  หลังจากนั้นไปทดสอบและวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm และ 531 nm พิจารณาเป็นสัดส่วนของค่าการดูดกลืนแสงและนำไปใช้ในสมการจากกราฟมาตรฐาน ดังภาพที่ 4.23 เพื่อคำนวณความเข้มข้น แล้วหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน จากการคำนวณมีเปอร์เซ็นต์ของการคลาดเคลื่อน ได้แก่ 6.67%, 3.03% และ 5.88 % ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยมาก ถือได้ว่าสมการจากกราฟมาตรฐานสามารถใช้ประเมินความเข้มข้นของซิสทีนได้ดี



ภาพที่ 4.24 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ต่อซิสทีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000  $\mu\text{M}$  (b) ค่าการดูดกลืนแสงและ (c) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 และ 550 nm

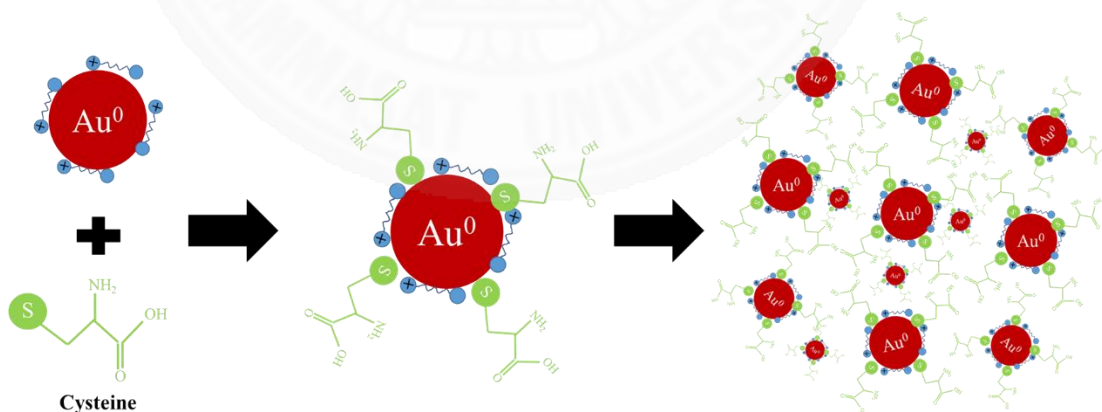
เมื่อทดสอบอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาด  $23 \pm 7$  nm ซึ่งสีของอนุภาคเป็นสีม่วงแดง เมื่อถูกทดสอบด้วยซิสทีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน สีของสารทดสอบนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัด ดังในภาพที่ 4.25 (a) ซึ่งเมื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm ของอนุภาคนาโนทองคำ และตำแหน่งความยาวคลื่นที่เคลื่อนไปที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 550

nm หลังจากการเกิดการรวมตัว สังเกตเห็นว่า แนวโน้มของทั้ง 2 ตำแหน่งความยาวคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับความเข้มข้น และความแตกต่างระหว่างค่าการดูดกลืนแสงทั้งสองตำแหน่งค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากการเกิดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 550 nm ซึ่งหลังจากนำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดค่าได้จาก 2 ตำแหน่งมาคำนวณเป็นสัดส่วนและสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการประเมินค่าความเข้มข้นของซิสทีน พบว่าลักษณะกราฟมาตรฐานถูกแบ่งเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในภาพที่ 4.25 (a), (b) และ (c) ซึ่งหลังจากทดสอบการใช้งานด้วยความเข้มข้น ได้แก่ 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$  พบว่าหลังจากคำนวณค่าความเข้มข้นจากการใช้สมการจากกราฟมาตรฐาน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเป็น 1.33%, 5.45% และ 21.57% ตามลำดับ (ที่ความเข้มข้น 250 และ 550  $\mu\text{M}$  ใช้สมการจากกราฟมาตรฐานจากภาพที่ 4.25 (a) และ 850  $\mu\text{M}$  ใช้สมการมาตรฐานจากภาพที่ 4.25 (c) )



ภาพที่ 4.25 กราฟมาตรฐานของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 550 nm เทียบกับความเข้มข้นของซิสทีน ในช่วงความเข้มข้น (a) 0 – 600  $\mu\text{M}$  (b) 600 - 800  $\mu\text{M}$  และ (c) 800 – 1000  $\mu\text{M}$

ในกรณีของการทดสอบผลของซิสทีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกันกับคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างจากงานวิจัยของ Hormozi-Nezhad และคณะ (2555) เนื่องจากพฤติกรรมของอนุภาคนาโนทองคำที่เปลี่ยนไปจากผลของของซิสทีนเป็นลักษณะของการใช้อนุภาคนาโนทองคำในสภาวะที่ไม่ได้แยกอนุภาคออกจากสารคอลลอยด์ซึ่งเป็นไปได้ว่าอนุภาคนาโนทองคำในระบบของ Hormozi-Nezhad และคณะ อยู่ในสภาวะที่ล้อมรอบด้วยไอออนของทองคำที่ยังคงหลงเหลือและซิเตรทไอออนจากสารละลายไตรโซเดียมซิเตรทที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และสารช่วยให้คงตัว (stabilizing agent) พบว่าอนุภาคนาโนทองคำเกิดการรวมกลุ่มกันเนื่องมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างโมเลกุลของซิสทีน ที่ครอบคลุมผิวของอนุภาคนาโนทองคำแทนหมู่ฟังก์ชันซิเตรท ผลจากการรวมกลุ่มทำให้ค่าการดูดกลืนแสงเดิมของอนุภาคนาโนทองคำลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซิสทีน และเกิดการเคลื่อนของความยาวคลื่นแสงไปทางบลูชิฟท์ขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดอนุภาคนาโนทองคำที่ใกล้ชิดกันมากขึ้น และส่งผลต่อการเปลี่ยนคุณลักษณะเชิงแสงของอนุภาคนาโนทองคำ คือ ทำให้มีการมองเห็นสีที่เปลี่ยนไปเป็นสีฟ้า โดยลักษณะการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำ เป็นเพียงการเข้ามาใกล้กันของอนุภาคเท่านั้น ไม่ได้หลอมรวมกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น เป็นไปได้ว่านอกจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาค ไอออนในสารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่ล้อมรอบอยู่ เป็นลักษณะ double layer จะรักษาระยะห่างของแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคนาโนทองคำด้วย เป็นผลให้อนุภาคนาโนทองคำแสดงคุณลักษณะเชิงแสงเป็นสีฟ้า

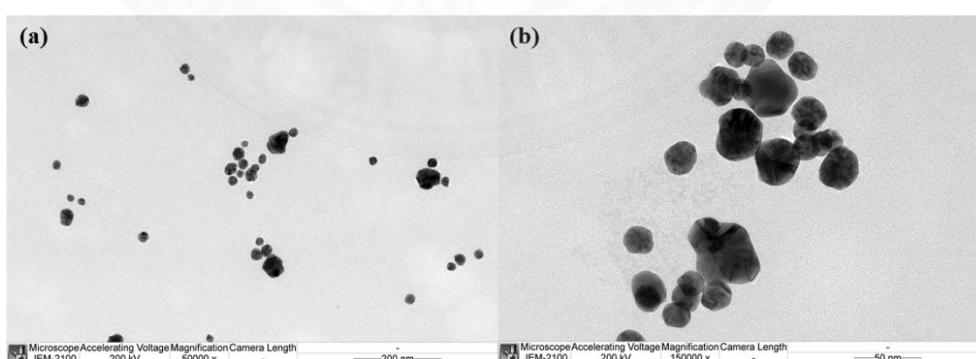


ภาพที่ 4.26 ลักษณะของการยึดเกาะของซิสทีนบนผิวของอนุภาคนาโนทองคำและลักษณะการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างโมเลกุลของซิสทีน



การทดสอบซิสทีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกันด้วยอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ในระบบของเซรัมจากหางน้ำยาง ได้แยกอนุภาคออกมาอยู่ในน้ำที่ไม่มีชั้นของไอออนช่วยในการรักษาความเสถียรหรือป้องกันอนุภาคจากแรงดึงดูดรอบนอก แต่เกลือฟอสเฟตและครีโอสไมต์บางส่วนติดอยู่บนผิวอนุภาคนาโนทองคำ ทำให้ซิสทีนที่มีหมู่ฟังก์ชันไทออล (-SH) มายึดเกาะบนผิวของอนุภาคนาโนทองคำและส่งผลต่อการเกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำขึ้น ดังแสดงให้เห็นแบบจำลองการรวมกลุ่มในภาพที่ 4.26 และส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนที่ตำแหน่งความยาวคลื่นสูงสุดที่พิจารณาเพิ่มสูงขึ้นในความเข้มข้นช่วงแรกคล้ายกับกรณีของแอมโมเนีย แต่เนื่องจากการรวมกลุ่มที่เกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าฟ้าของโมเลกุลซิสทีนนั้น มีส่วนทำให้อนุภาคนาโนทองคำเข้ามาใกล้ชิดติดกันได้ แต่ไม่ส่งผลจนทำให้อนุภาคนาโนทองคำหลอมรวมกัน ดังแสดงให้เห็นภาพลักษณะสัณฐานวิทยาในภาพที่ 4.27

ผลของแรงดึงดูดทางไฟฟ้านี้ทำให้ตำแหน่งของการดูดกลืนแสงเคลื่อนที่ไปทางความยาวคลื่นแสงที่สูงขึ้นตามความเข้มข้น แต่เนื่องจากแรงดึงดูดที่ทำให้อนุภาคใกล้ชิดติดกันไม่มากนักจึงไม่ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงแสงเปลี่ยนแปลงมาก เนื่องจากการรวมกลุ่มและทำให้การเปลี่ยนแปลงสีในสารทดสอบเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากจนไม่สามารถเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน โดยภาพที่ 4.22 (a) การทดสอบอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm มองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่มีความเข้มข้นและมีประกายม่วงมากขึ้นจากเดิมที่เป็นสีแดง แต่ในกรณีของการทดสอบอนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ซึ่งเดิมมีสีม่วงอมแดงมากกว่าอนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ทำให้ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของสารทดสอบเลย ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.24 (a)



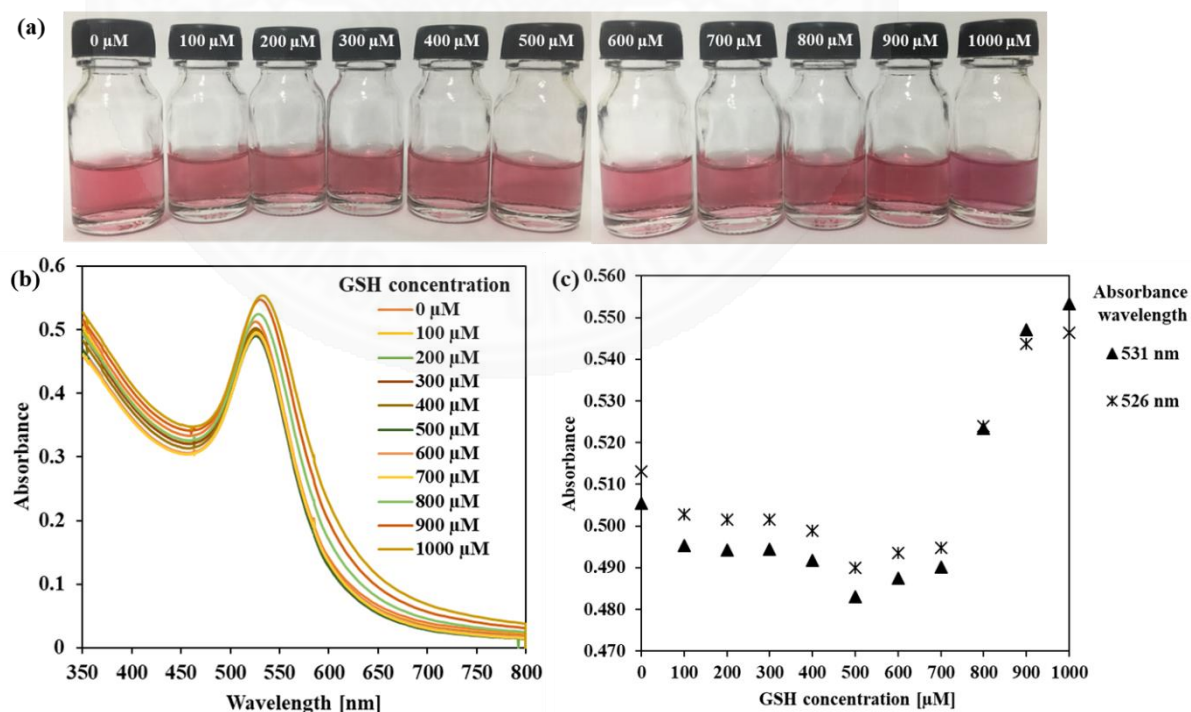
ภาพที่ 4.27 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (a) กำลังขยาย 50,000x และ (b) กำลังขยาย 150,000x ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำเมื่อทำปฏิกิริยากับ 1 mM ของซิสทีน โดยใช้ความร้อนที่ 80°C ร่วมกับการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 20 นาที

จากผลการทดสอบด้วยความเข้มข้นของซีสทีนอื่น ๆ เห็นได้ว่าอนุภาคนาโนทองคำขนาดเล็กกว่าหรือสีแดง ( $20.5 \pm 4.5$  nm) มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่เป็นแนวโน้มที่ชัดเจนมาก หรือมีความสัมพันธ์ในลักษณะเส้นตรงอย่างสม่ำเสมอตั้งแต่ความเข้มข้นที่ 0-1000  $\mu\text{M}$  อีกทั้งเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการทดสอบมีค่าน้อยมาก หรือค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าจริงเป็นอย่างมาก เมื่อเทียบกับการใช้อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือสีม่วงแดง ( $23 \pm 7$  nm) ซึ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงมีความสม่ำเสมอในช่วงความเข้มข้นที่ 0-600  $\mu\text{M}$  และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยมากเช่นเดียวกัน ทำให้สามารถประเมินค่าความเข้มข้นของซีสทีนได้อย่างใกล้เคียงมาก ในผลการทดสอบนี้เห็นได้ว่าอนุภาคนาโนทองคำทั้ง 2 ขนาดสามารถใช้ประเมินความเข้มข้นของซีสทีนได้เช่นเดียวกัน แต่การรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำที่ส่งผลต่อการดูดกลืนแสงแตกต่างกัน

#### 4.6.3 ผลของความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มี

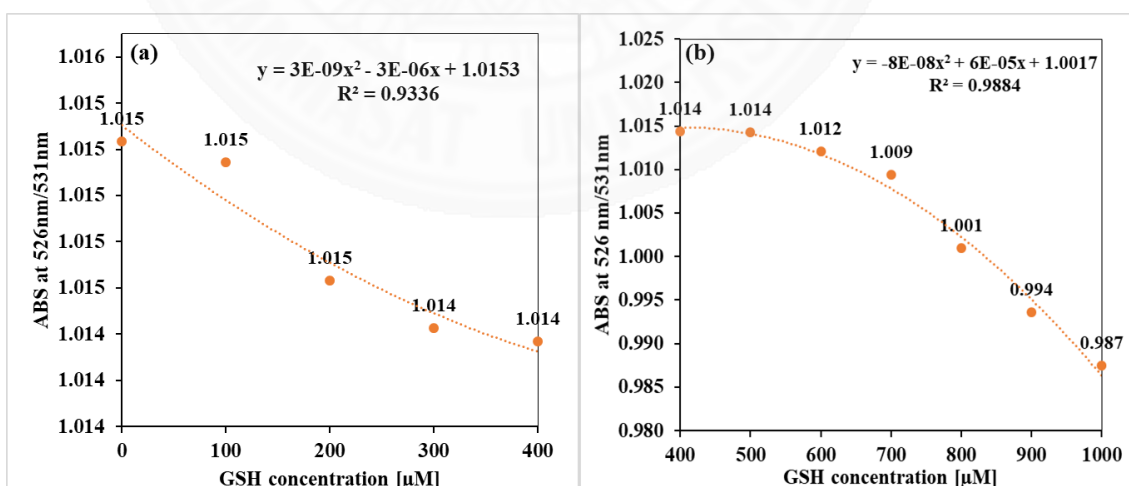
##### ขนาดแตกต่างกัน

เมื่อทดสอบอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกันด้วยกลูต้าไธโอนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยสัดส่วนของการผสมสารรวมถึงสภาวะในการทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับการทดสอบด้วยซีสทีน ผลของการทดสอบพบว่ามีลักษณะของการรวมกลุ่มที่ชัดเจนและมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Hormozi-Nezhad และคณะ (2555) ซึ่งจะอธิบายผลของแต่ละขนาดดังนี้



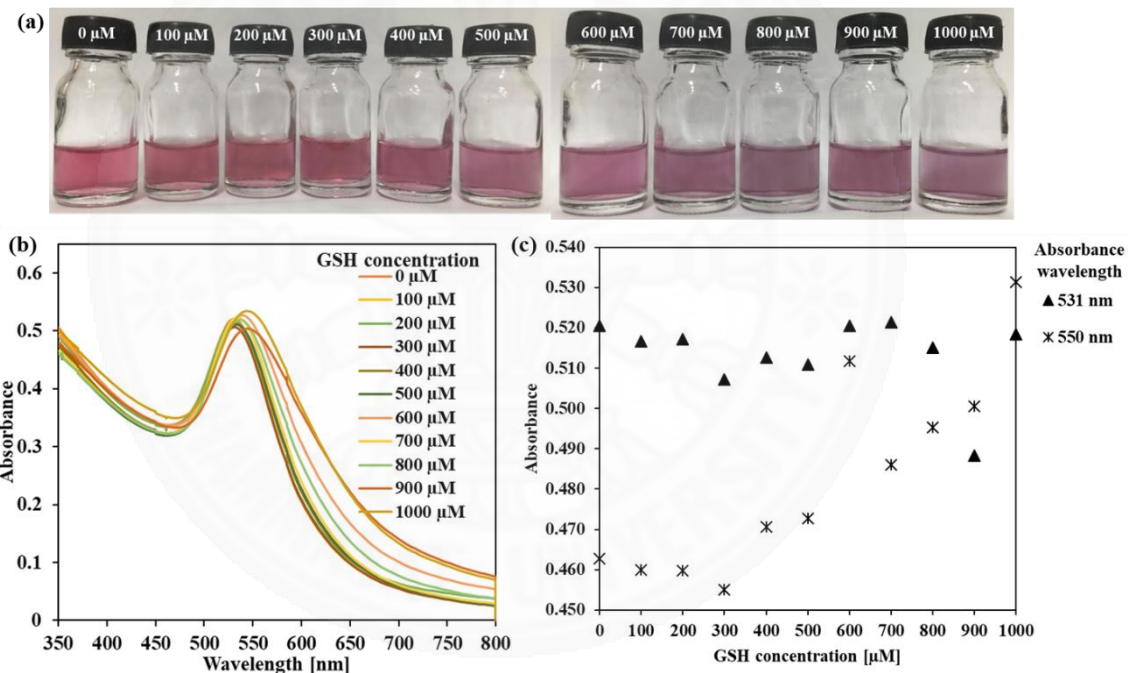
ภาพที่ 4.28 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ต่อกลูต้าไธโอนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000  $\mu\text{M}$  (b) ค่าการดูดกลืนแสงและ (c) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 และ 531 nm

ผลของอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ซึ่งมีสีของคอลลอยด์เป็นสีแดง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนมากขึ้นสังเกตเห็นได้ว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงอย่างชัดเจนในช่วงความเข้มข้นที่ 100-500  $\mu\text{M}$  ในตำแหน่งของความยาวคลื่นที่ 526 ของอนุภาคนาโนทองคำเริ่มต้น ซึ่งมีแนวโน้มว่าเกิดจากกลูต้าไธโอนทำให้อนุภาคนาโนทองคำรวมกลุ่มกันได้มากกว่าในกรณีของซิสทีน ทำให้การรวมกลุ่มนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคนาโนทองคำอย่างชัดเจนและเกิดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นตามลำดับความเข้มข้นของกลูต้าไธโอน แต่สีของสารทดสอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในความเข้มข้นช่วงแรก แต่ในช่วงความเข้มข้นที่ 600 - 1,000  $\mu\text{M}$  จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งของ 526 nm มีค่าเพิ่มมากขึ้นพร้อมกับเห็นสีของสารทดสอบเปลี่ยนเป็นสีแดงอมม่วงมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.28 (a) ผลจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงในภาพที่ 4.28 (b) พบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้น มีการเปลี่ยนตำแหน่งของความยาวคลื่นไปทางความยาวคลื่นที่สูงขึ้นตามลำดับความเข้มข้น ซึ่งการเปลี่ยนตำแหน่งของความยาวคลื่นไปทิศทางบลูชิฟท์นี้ เกิดจากการรวมกลุ่มเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้เลือกพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเป็นตำแหน่งของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm ของอนุภาคนาโนทองคำเริ่มต้น และ 550 nm ของความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปหลังจากทดสอบด้วยกลูต้าไธโอนเท่านั้นเพื่อให้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.28 (c) และเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างค่าการดูดกลืนแสงทั้ง 2 ตำแหน่งนี้มีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ อย่างชัดเจนเนื่องจากการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำ และการเปลี่ยนแปลงสีของสารทดสอบ



ภาพที่ 4.29 กราฟมาตรฐานของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 531 nm เทียบกับความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนในช่วงความเข้มข้น (a) 0 – 400  $\mu\text{M}$  และ (b) 400 - 1000  $\mu\text{M}$

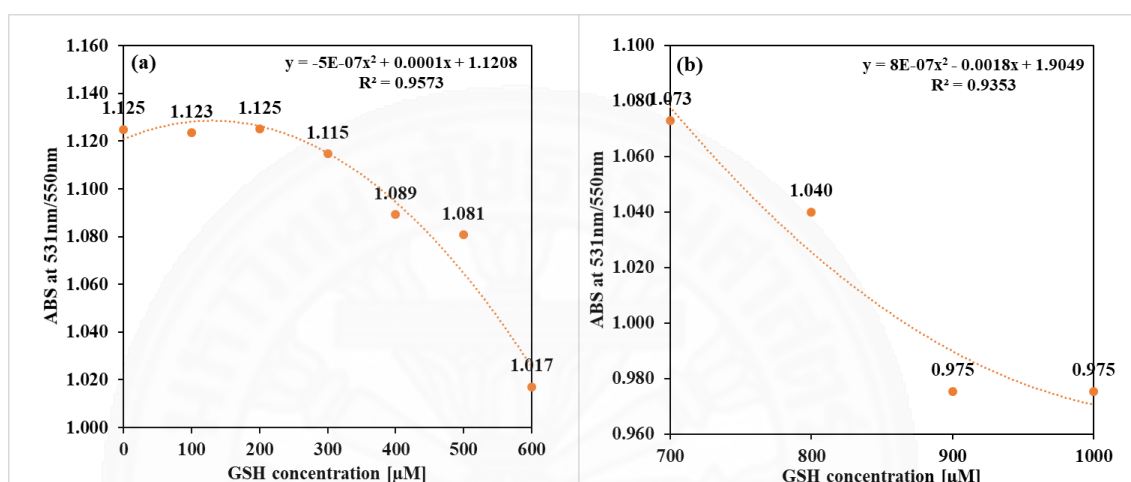
การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับประเมินค่าความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนพบว่า เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 526 nm ต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 531 nm พบว่าได้กราฟมาตรฐาน 2 ช่วง คือ ที่ช่วงความเข้มข้น 0 - 400  $\mu\text{M}$  และช่วงความเข้มข้นที่ 400 - 1,000  $\mu\text{M}$  ดังแสดงในภาพที่ 4.29 โดยความสัมพันธ์ที่ได้นั้นเป็นลักษณะของสมการพหุนามกำลังสอง ซึ่งเมื่อทดสอบสมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$  และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเป็น 30.66%, 12.01% และ 8.55% ซึ่งสามารถประเมินค่าความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนในเบื้องต้นได้ แต่มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงจากการใช้สมการจากกราฟมาตรฐานในภาพที่ 4.29 (a)



ภาพที่ 4.30 (a) สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ต่อความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสารละลายกลูต้าไธโอน ได้แก่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000  $\mu\text{M}$  (b) ค่าการดูดกลืนแสงและ (c) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 และ 550 nm

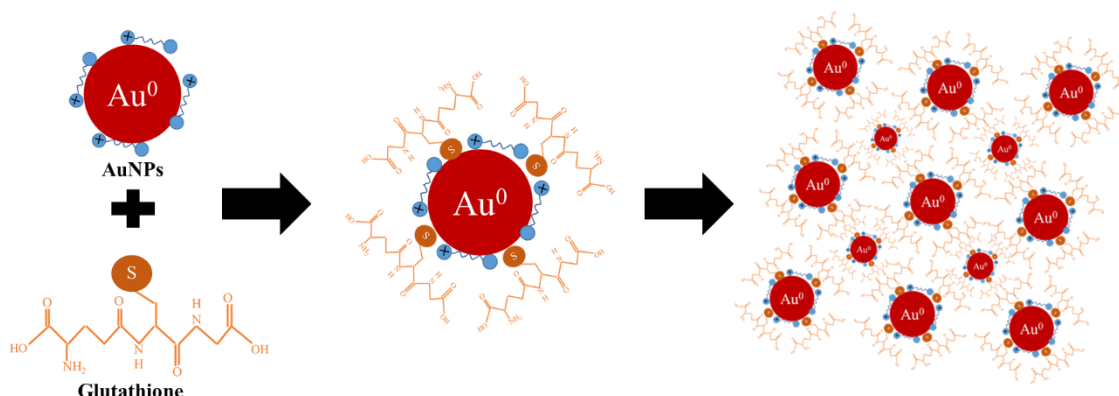
เมื่อทดสอบผลของกลูต้าไธโอนต่ออนุภาคนาโนทองคำขนาด  $23 \pm 7$  nm พบว่าเห็นผลของการรวมกลุ่มอนุภาคนาโนทองคำได้อย่างชัดเจนมากนั่นคือสีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในสารทดสอบเปลี่ยนแปลงจากสีม่วงแดงไปเป็นสีม่วงอย่างชัดเจนดังแสดงให้เห็นในภาพที่

4.30 (a) และเมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงและเลือกพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm และ 550 nm ดังภาพที่ 4.30(b) และ (c) พบว่า ความแตกต่างระหว่างค่าการดูดกลืนแสงทั้ง 2 ตำแหน่งมีค่าลดลงตามลำดับความเข้มข้นอย่างชัดเจน ซึ่งหมายความว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงในตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 550 nm ที่บ่งบอกถึงการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 4.31 กราฟมาตรฐานของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 550 nm เทียบกับความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนในช่วงความเข้มข้น (a) 0 – 600 μM และ (b) 600 - 1000 μM

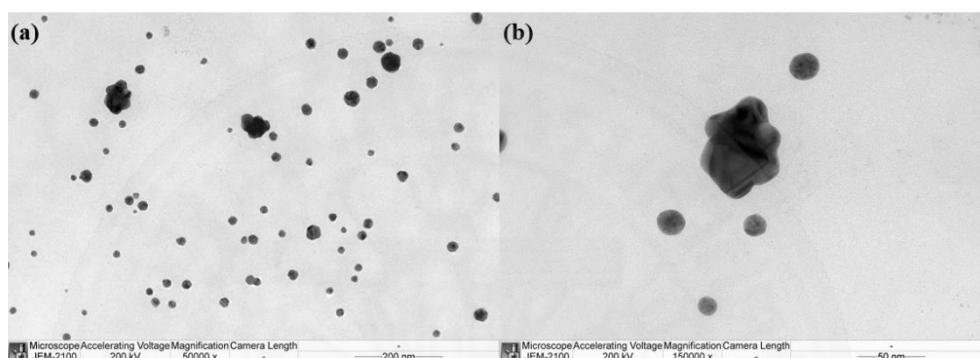
และเช่นเดียวกันหลังจากการสร้างกราฟมาตรฐาน ด้วยสัดส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm ต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 550 nm พบว่าสามารถสร้างกราฟมาตรฐานได้ 2 ช่วงความเข้มข้น นั่นคือในช่วงความเข้มข้นของ 0 – 600 μM และ 600 - 1000 μM ดังแสดงในภาพที่ 4.31 (a) และ (b) ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้เป็นลักษณะของความสัมพันธ์แบบสมการพหุนามกำลังสองเช่นเดียวกัน และทั้งนี้เมื่อทดสอบการใช้สมการจากกราฟมาตรฐานด้วยกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850 μM และวัดค่าการดูดกลืนแสง 2 ตำแหน่งความยาวคลื่นที่พิจารณา จากนั้นพิจารณาสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของทั้ง 2 ค่า และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเป็น 1.21%, 5.20% และ 3.33% ในกรณีนี้เป็นกราฟมาตรฐานที่สามารถประเมินความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับความเข้มข้นจริง และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่ำ



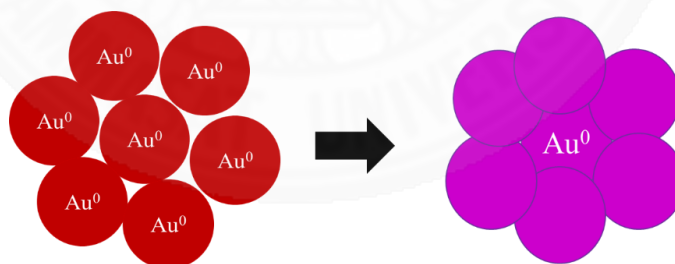
ภาพที่ 4.32 ลักษณะของการยึดติดของกลูต้าไธโอนบนผิวของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำและลักษณะการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของกลูต้าไธโอน

ผลการทดสอบด้วยกลูต้าไธโอนที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือขนาดเฉลี่ยเท่ากับ  $23 \pm 7$  nm มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอนุภาคนาโนทองคำขนาดเล็กหรือ  $20.5 \pm 4.5$  nm เนื่องจากโมเลกุลของกลูต้าไธโอนนั้นมีขนาดใหญ่ อาจทำให้การเข้าครอบคลุมผิวของอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเล็กทำให้ยากกว่าอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งแตกต่างจากกรณีของความเข้มข้นซิสติน ที่ไวต่อกับอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเล็กมากกว่า เพราะขนาดของโมเลกุลซิสตินนั้นมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของกลูต้าไธโอนมาก การที่โมเลกุลของซิสตินจะครอบคลุมผิวของอนุภาคนาโนทองคำขนาดใหญ่และเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับโมเลกุลของซิสตินอื่น ๆ จึงเป็นไปได้ช้ากว่า อีกทั้งแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของกลูต้าไธโอนคือ การเกิดพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรง โดยลักษณะการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำด้วยกลูต้าไธโอนนั้นแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.32 นอกจากนี้จากการตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาในภาพที่ 4.33 พบว่าอนุภาคนาโนทองคำที่เกิดการรวมกลุ่มกันด้วยผลของกลูต้าไธโอนนั้นเป็นการเกิดแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจนให้อนุภาคนาโนทองคำนั้นมีการเคลื่อนตัวเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น และส่งผลต่อการดูดกลืนแสงที่สูงขึ้นดังที่กล่าวในผลก่อนหน้า และบางส่วนของอนุภาคนาโนทองคำนั้นเมื่อเข้ามาใกล้ชิดกันในระยะหนึ่งโดยไม่มีสถานะของไอออนอื่น ๆ ล้อมรอบเพื่อเป็นชั้นป้องกันหรือรักษาความเสถียรระหว่างโมเลกุล ทำให้อนุภาคนาโนทองคำที่เกิดการรวมกลุ่มกันขึ้นในลักษณะของการหลอมติดกันเป็นอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากธรรมชาติของอนุภาคชนิดเดียวกันย่อมมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันมากกว่าแรงดึงดูดกับอนุภาคชนิดอื่น และผลของอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสงที่ทำให้สีของคอลลอยด์เปลี่ยนไปเป็นสีม่วงเข้มชัดเจน ดังแสดงในแบบจำลองของอนุภาคนาโนทองคำที่รวมกลุ่มในภาพที่ 4.34 การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าลักษณะการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโน

ทองคำนี้มีความแตกต่างไปจากงานวิจัยของ Hormozi-Nezhad และคณะ ที่กล่าวว่ากลูต้าไรโอน ส่งผลให้อนุภาคนาโนทองคำเกิดการเคลื่อนตัวมาใกล้ชิดกันและเปลี่ยนคุณลักษณะเชิงแสงไปเป็นสีฟ้า แต่อุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ในระบบที่ใช้เซรัมจากหางน้ำยางและแยกอนุภาคให้อยู่ในคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำ เป็นการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำที่เป็นการหลอมรวมเป็นขนาดที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้สีของอนุภาคนาโนทองคำที่เห็นอันเนื่องมาจากคุณลักษณะเชิงแสงนั้นเห็นเป็นสีม่วงนั่นเอง

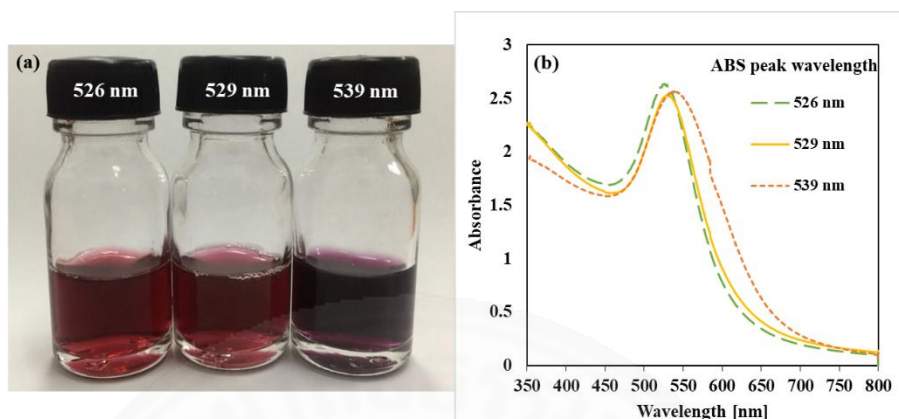


ภาพที่ 4.33 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (a) กำลังขยาย 50,000x และ (b) กำลังขยาย 150,000x ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำเมื่อทำปฏิกิริยากับ 1 mM ของกลูต้าไรโอนโดยใช้ความร้อนที่ 80°C ร่วมกับการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 20 นาที



ภาพที่ 4.34 ลักษณะของการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำและการเปลี่ยนคุณลักษณะเชิงแสงของอนุภาคนาโนทองคำเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้นจากผลของการเพิ่มความเข้มข้นของกลูต้าไรโอน

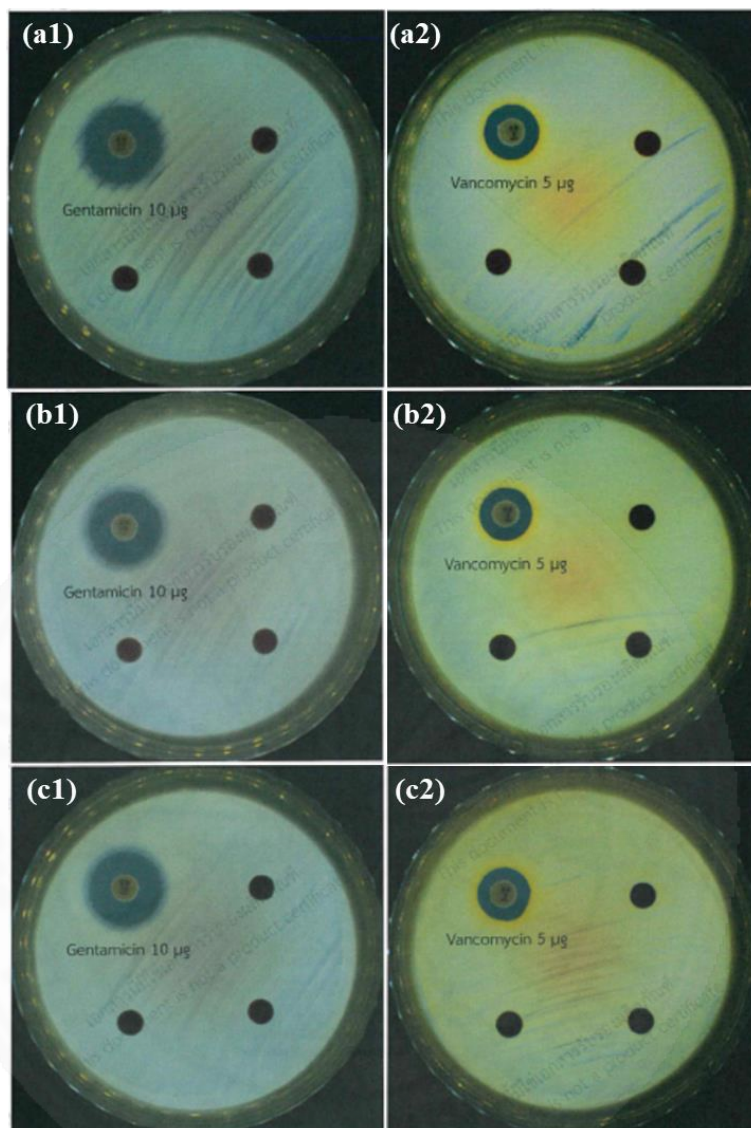
#### 4.7 ผลความสามารถในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial activity)



ภาพที่ 4.35 (a) สารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีค่าขนาดแตกต่างกัน โดยพิจารณาจาก (b) ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ

เมื่อเตรียมอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยพิจารณาที่สีของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่แตกต่างกันดังภาพที่ 4.35 (a) ซึ่งพิจารณาจากความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นแตกต่างกัน จากขนาดเล็กไปขนาดที่ใหญ่กว่า ตามตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 526, 529 และ 539 nm ที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 4.35 (b) พบว่าเมื่อทดสอบความต้านทานต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ เชื้อสแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ ได้แก่ เชื้ออีโคไล (*Escherichia coli*) ด้วยวิธีการทดสอบเชิงคุณภาพ Performance standards for antimicrobial disk susceptibility test (Clear zone test) เป็นเวลาหนึ่งสัปดาห์ ผลของการทดสอบแสดงในภาพที่ 4.36 พบว่าไม่มีระยะหรือโซนที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดได้ในทั้ง 3 ตัวอย่างทดสอบ หรือแสดงผลว่าอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ในระบบของทางน้ำยาง ไม่มีคุณสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งแตกต่างจากผลของงานวิจัยอื่นที่ศึกษาการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนทองคำ ดังงานวิจัยของ Velmurugan และคณะ (2559) ซึ่งเป็นไปได้ว่าการทดสอบความต้านเชื้อแบคทีเรียเป็นผลมาจากการสารอื่นที่ใช้สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยไม่ผ่านการแยกอนุภาคออกจากสารที่สังเคราะห์ได้ ทำให้ผลการต้านเชื้อแบคทีเรียอาจจะเกิดจากสารรีดิวซ์หรือสารอื่น ๆ ที่ผสมในคอลลอยด์ หรือเนื่องจากอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ในระบบทางน้ำยาง ยังคงมีพอลิเมอร์พอลิอะคริลไมด์ครอบคลุมผิวของอนุภาค ซึ่งอาจทำให้บดบังคุณสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนทองคำและทำให้ไม่เห็นผลการต้านแบคทีเรียเมื่อนำไปทดสอบนั่นเอง





ภาพที่ 4.36 ผลการตรวจความสามารถในการต้านทางเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนทองคำที่ดูดกลืนแสงในตำแหน่ง 526 nm ต่อเชื้อ (a1) *Escherichia coli* และเชื้อ (a2) *Staphylococcus aureus*, อนุภาคนาโนทองคำที่ดูดกลืนแสงในตำแหน่ง 529 nm ต่อเชื้อ (b1) *Escherichia coli* และเชื้อ (b2) *Staphylococcus aureus* และอนุภาคนาโนทองคำที่ดูดกลืนแสงในตำแหน่ง 539 nm ต่อเชื้อ (c1) *Escherichia coli* และเชื้อ (c2) *Staphylococcus aureus*

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 ผลของสารก่อการจับก้อนยางที่เหลือต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ และการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

จากการศึกษาพบว่า สำหรับระบบพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกนั้นพบว่า พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่ตกค้างสามารถทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเสถียรที่ดีให้กับระบบคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ โดยสามารถทำปฏิกิริยาได้นานถึง 3 ชั่วโมงโดยไม่ตกตะกอนและยังเก็บรักษาต่อไปในสภาวะคอลลอยด์ได้ ในงานวิจัยพบว่า การแปรความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่ใช้ในการจับก้อนยางในช่วง 0.25-1.5 %w/v นั้นไม่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ สภาวะในการสังเคราะห์ที่ดีที่สุดคือใช้สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่มีความเข้มข้น 0.5 %w/v ในการเตรียมเซรัม โดยเซรัมที่ได้จะต้องนำไปเจือจางด้วยสัดส่วนการเจือจาง 8 เท่า ทำไปทำปฏิกิริยาร่วมกับสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่มีความเข้มข้น 1.2 mM ซึ่งสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดโดยเฉลี่ย  $23 \pm 2$  นาโนเมตร และเมื่อศึกษาผลของสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันได้แก่ 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 mM กับเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 8 เท่า เพื่อศึกษาผลของสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตต่อการเป็นสารตั้งต้นและให้ออออนทองคำ ซึ่งผลที่ได้พบว่าที่ความเข้มข้น 1.4 mM และเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 8 เท่า ให้ความร้อน 80 °C พร้อมการสั่นด้วยเสียงในเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิก เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีสีไวน์แดง และมีค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุดอยู่ในช่วงประมาณ 536 nm ซึ่งหมายความว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้ในปริมาณมากที่สุด และใช้พิจารณาสำหรับการการสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำต่อไป โดยสภาวะในการสังเคราะห์นี้ เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเซรัมจากหางน้ำยางที่มีคุณสมบัติ %TRC เท่ากับ 8.3532%, %DRC เท่ากับ 4.8338%, %Alkalinity เท่ากับ 0.3756% และ %Brix เท่ากับ 4.1% เท่านั้น ซึ่งเงื่อนไขนี้อาจจะแตกต่างกันออกไปบ้างตามแต่สมบัติที่แตกต่างกันของหางน้ำยางที่ได้รับมาจากสวนในแต่ละครั้ง

### 5.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนทองคำและการแยกขนาดของอนุภาคนาโนทองคำ

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนทองคำในงานวิจัยนี้ นอกจากจะมีการศึกษาความเข้มข้นที่แตกต่างกันของพอลิอะคริลาไมด์ต่อการเตรียมเซรัมแล้ว ได้มีการศึกษาผลของความเร็วยวรอบในการปั่นเหวี่ยงต่อการแยกขนาดอนุภาคนาโนทองคำด้วย ซึ่งพบว่าความเร็วยวรอบสูงจะสามารถแยกอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเล็กให้ตกเป็นตะกอนได้มากขึ้น แต่หากใช้ความเร็วยวรอบต่ำ อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดใหญ่จะตกตะกอนก่อนตามมวลที่มากกว่า และยังคงเหลืออนุภาคนาโนทองคำขนาดเล็กอยู่บนคอลลอยด์ส่วนเหนือตะกอน ซึ่งจะทราบขนาดและปริมาณของอนุภาคนาโนทองคำที่เหลืออยู่ในทั้ง 2 ส่วนได้จากการนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อพิจารณาค่าของการดูดกลืนแสงสูงสุด และตำแหน่งของความยาวคลื่นที่อนุภาคนาโนทองคำสามารถดูดกลืนได้ ผลจากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดทั้งหมดได้สรุปดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1

ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์โดยใช้เซรัมที่เตรียมจากหางน้ำย่าง

ปัจจัย	ขนาดและปริมาณของอนุภาค	เหตุผล
ความเข้มข้นของพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่หลงเหลือในเซรัม	การเพิ่มความเข้มข้น ไม่ส่งผลต่อการควบคุมขนาดอนุภาคนาโนทองคำที่ชัดเจน	เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นจะยิ่งทำให้พอลิเมอร์เกิดการเกาะกลุ่มพันเกี่ยวกันมากขึ้น และกระจายตัวในหางน้ำย่างได้ไม่สม่ำเสมอ
สัดส่วนการเจือจางของเซรัม	เมื่อเจือจางมากขึ้น จะสามารถสังเคราะห์ AuNPs ได้มากขึ้น และขนาดใหญ่ขึ้น	เป็นการลดพอลิเมอร์ประจุบวกที่รบกวนการทำปฏิกิริยาและลดโปรตีนซึ่งเป็นตัวช่วยควบคุมขนาดในเซรัมลงด้วย
ความเข้มข้นของสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต	ความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้สังเคราะห์ AuNPs ได้มากขึ้น และมีขนาดใหญ่ขึ้น	เป็นสารตั้งต้น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น และเร็วขึ้น

## ตารางที่ 5.1

ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์โดยใช้เซรัมที่เตรียมจากหางน้ำยาง (ต่อ)

ปัจจัย	ขนาดและปริมาณของอนุภาค	เหตุผล
ระยะเวลาทำปฏิกิริยา	สังเคราะห์ AuNPs ได้มากขึ้นตามระยะเวลาที่มากขึ้น	สารตั้งต้นจะถูกใช้ได้มากขึ้นเมื่อระยะเวลาของปฏิกิริยาดำเนินไป
ความเร็วรอบในการปั่นเหวี่ยง	ความเร็วรอบสูง ส่งผลต่อการแยกอนุภาคนาโนทองคำขนาดใหญ่เป็นตะกอนมาก และเหลืออนุภาคขนาดเล็กบนสารละลายส่วนเหนือตะกอนน้อย	การเพิ่มความเร็วจนเกินไป การเพิ่มความแรงของการตกตะกอน อนุภาคนาโนทองคำที่เล็กลงจะสามารถตกตะกอนได้มากขึ้น

### 5.1.3 ผลของการใช้ซัสสารตั้งต้นที่เหลือ

จากผลการศึกษาทำให้เห็นได้ว่าสามารถหาสภาวะของสารตัวเติมเบื้องต้นที่จะสามารถใช้ซัสสารตั้งต้นที่ยังเหลือในสารละลายเหนือตะกอนได้อีกอย่างคุ้มค่า และสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำได้จริง โดยเป็นสภาวะที่จะใช้ได้ในระบบของการใช้เซรัมที่เตรียมได้จากหางน้ำยางที่ใช้ในการวิจัยนี้เท่านั้น (หางน้ำยางที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับที่กล่าวในข้างต้น) นั่นคือ 7.5 ml ของสารละลายตัวเติมที่ความเข้มข้นของโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่ 3.8 mM ในเซรัมที่สัดส่วนการเจือจาง 2 เท่า ใน 22.5 ml ของสารละลายเหนือตะกอน ทำปฏิกิริยาที่ 80 °C พร้อมการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และการสังเคราะห์นั้นทำให้ได้คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำใกล้เคียงกับสภาวะเทียบ (Optimum condition) ที่ต้องการในทุกรอบการใช้ซัสสารตั้งต้นที่เหลือจากการสังเคราะห์ก่อนหน้า อีกทั้งหากอนุภาคนาโนทองคำที่ได้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ตามจำนวนรอบที่ใช้ซัสและการผสมของไอออน เราสามารถออกแบบการแยกอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดที่แตกต่างกันด้วยปั่นเหวี่ยงดังผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.4 อีกทั้งหากต้องการศึกษาสำหรับหางน้ำยางที่มีคุณสมบัติอื่นแตกต่างออกไปจะต้องมีการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของสารละลายตัวเติมให้สามารถใช้กับคุณสมบัติของหางน้ำยางนั้น ๆ ได้ โดยมวลของทองคำที่สังเคราะห์ได้ในระบบของการใช้ซัสสารตั้งต้นที่เหลือในแต่ละรอบนั้น สามารถประมาณได้จากการคำนวณดังแสดงดังตารางที่ 5.2

## ตารางที่ 5.2

มวลของทองคำที่คำนวณได้แต่ละส่วนของสารละลายในการใช้ซ้ำสารตั้งต้นที่เหลือ

สารละลาย	เงื่อนไขของสารละลาย		ปริมาตร สารละลาย (ml)	มวลของ ทองคำ (mg)	มวลของทองคำต่อ ปริมาตรของ สารละลาย (mg/ml)
	H <sub>AuCl<sub>4</sub></sub> .3H <sub>2</sub> O (mM)	The dilution factor of serum			
สารคอลลอยด์ สถานะเทียบ	1.4	8	30	8.2726	0.2758
สารละลายส่วน เหนือตะกอน	-	-	22.5	2.5878	0.115
สารละลายตัวเต็ม	3.8	2	7.5	5.685	0.758
ส่วนตะกอน	-	-	7.5	5.685	0.758

#### 5.1.4 ผลของการแยกขนาดอนุภาคนาโนทองคำและความเสถียรของคอลลอยด์ อนุภาคนาโนทองคำในน้ำจากการปรับค่า pH

ผลการศึกษาการแยกขนาดของอนุภาคนาโนทองคำด้วยความเร็วรอบของการ  
ปั่นเหวี่ยงที่แตกต่างกันให้ผลสรุปดังตารางที่ 5.3 ดังนี้

## ตารางที่ 5.3

คุณลักษณะของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่แยกจากการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบต่างกัน และความเสถียรในสภาวะที่เป็นกรด

คุณสมบัติของ คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ	ความเร็วรอบในการปั่นเหวี่ยง	
	4,000 rpm (อนุภาคนาโนทองคำในส่วนสารละลาย เหนือตะกอน ที่ถูกแยกส่วนตะกอนด้วย การปั่นเหวี่ยง 8,000 rpm)	8,000 rpm (ส่วนตะกอน)
สีของคอลลอยด์	สีแดง	สีม่วงแดง
ความยาวคลื่นของการ ดูดกลืนแสง	523-526 nm	529-531 nm
ขนาดเฉลี่ย	20.5±4.5 nm	23±7 nm
ความเสถียร ในสภาวะกรด	คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำเกิดการรวมกลุ่มและตกตะกอน เมื่อมีค่า pH ที่เปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะกรด	

เนื่องจากการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ ถูกสังเคราะห์ในสภาวะที่เป็นเบสจากเซรัม (pH 10-11) ที่เตรียมจากหางน้ำยาง และยังคงมีสารละลายแอมโมเนียเจือปนอยู่ และคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้อยู่ในสภาวะที่เป็นเบส (pH 6 - 9) เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นสภาวะที่อนุภาคมีความเสถียร ดังนั้นจึงไม่พิจารณาคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่อยู่ในสภาวะที่เป็นเบส จากผลการทดลองนี้ทำให้เห็นได้ว่าคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่เตรียมได้ในเบื้องต้นหรือที่ pH ประมาณ 6 - 8 มีความเสถียรภาพ เนื่องจากเป็นสภาวะที่ไม่ทำให้อนุภาคเกิดการรวมกลุ่มขึ้นเอง และทำให้น้ำไปทดสอบการเกิดการรวมกลุ่มและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสงด้วยความเข้มข้นที่แตกต่างกันของซิสทีนและกลูต้าไธโอนต่อไป

#### 5.1.5 ผลของความเข้มข้นของแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่แตกต่างกัน

หลังจากการทดสอบความเป็นเซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ในระบบของงานวิจัยนี้ แสดงผลสรุปดังตารางที่ 5.4

## ตารางที่ 5.4

ผลของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำ

สารเคมี	หมู่ฟังก์ชัน	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	ผลกระทบจากปฏิกิริยา	สีของตัวอย่างทดสอบ	ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทดสอบ	สถานะของการทดสอบ
แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์	Amine (-NH <sub>2</sub> )	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	อนุภาคเคลื่อนตัวเข้ามาอยู่ใกล้กันมากขึ้น ABS สูงขึ้น	ไม่เปลี่ยนแปลง	0.29-0.34	ให้ความร้อน 80 °C พร้อมการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
ซิสทีน	Thiol group (-SH)	แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction)	ABS สูงขึ้นพร้อมกับเกิดการรวมกลุ่มของอนุภาค	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	0.43-0.52	ให้ความร้อน 80 °C พร้อมการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 20 นาที
กลูต้าไธโอน	Thiol group (-SH)	พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding)	ABS สูงขึ้น อนุภาคเกิดการรวมกลุ่ม และรวมเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น	เปลี่ยนแปลงเป็นสีม่วงมากขึ้น	0.45-0.56	ให้ความร้อน 80 °C พร้อมการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 20 นาที

#### 5.1.5.1 ผลของขนาดที่ต่างกันต่อความสามารถในการเป็นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอนเซนเซอร์

หลังการทดสอบด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอนที่ความเข้มข้นแตกต่างกันต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกัน สามารถสรุปผลของการสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการทำนายความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอน ที่ไม่ทราบค่าได้ดังสรุปในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5

ลักษณะของการพิจารณาความเป็นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอนเซนเซอร์

ลักษณะของการพิจารณา	แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์		ซิสทีน		กลูต้าไธโอน	
	20.5 ± 4.5 nm	23 ± 7 nm	20.5 ± 4.5 nm	23 ± 7 nm	20.5 ± 4.5 nm	23 ± 7 nm
ประเภทของสมการมาตรฐาน	สมการเส้นตรง	สมการเส้นตรง	สมการเส้นตรง	สมการเส้นตรง	สมการพหุนามกำลังสอง	สมการพหุนามกำลังสอง
ค่า R <sup>2</sup>	0.99	0.95	0.91	0.94	0.93 & 0.99	0.96 & 0.94
ช่วงความเข้มข้นที่สามารถพิจารณาได้	0 – 400 μM	0 – 500 μM	0 - 1,000 μM	0 – 600 μM	0 – 400 & 400-1000 μM	0 – 600 & 700-1000 μM

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกัน 2 ขนาด ได้แก่ 20.5 ± 4.5 และ 23 ± 7 สามารถใช้เป็นเซนเซอร์ได้ โดยการสร้างกราฟและสมการมาตรฐานอย่างง่าย เพื่อประมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอน โดยการทดสอบพบว่า แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไธโอน ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงแสงของอนุภาคนาโนทองคำแต่ละขนาดต่อการเกิดการรวมกลุ่มแตกต่างกัน และจะส่งผลต่อคุณสมบัติการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งหากต้องการข้อสรุปที่แน่ชัดว่าขนาดของอนุภาคนาโนทองคำใดที่ให้ประสิทธิภาพการเป็นเซนเซอร์ที่ดีกว่ากันนั้น จำเป็นจะต้องศึกษาให้มีความหลากหลายขนาด และแยกให้ได้ขนาดอนุภาคนาโนทองคำที่มีการกระจายขนาดเท่ากันมากขึ้น (monodisperse) เพื่อความชัดเจนของผลของขนาดต่อประสิทธิภาพการเป็นเซนเซอร์ และจากผลการทดสอบในกรณีของซิสทีน และกลูต้าไธโอน จำเป็นจะต้องทำซ้ำแต่ละความเข้มข้น 3 รอบ และนำมาเฉลี่ยเพื่อสร้างกราฟและสมการมาตรฐาน ซึ่งการทำซ้ำนี้เพื่อลดผลของอุปกรณ์ที่อาจให้ความร้อนและการสั่นขณะทำปฏิกิริยาได้อย่างไม่สม่ำเสมอไปตามที่ต้องการควบคุม รวมถึงทำซ้ำกับสารที่ต้องการทดสอบความเข้มข้นก่อนนำค่าไปใช้ในสมการมาตรฐานที่สร้างได้เช่นเดียวกัน



### 5.1.6 ผลของการทดสอบความสามารถในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่แตกต่างกัน

เมื่อเตรียมอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกันต่อการนำไปทดสอบความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ เชื้อสแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*) และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ ได้แก่ เชื้ออีโคไล (*Escherichia coli*) ด้วยวิธีการทดสอบเชิงคุณภาพ Performance standards for antimicrobial disk susceptibility test (Clear zone test) ซึ่งพบว่าอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ในระบบของงานวิจัยนี้ ไม่มีคุณสมบัติต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำควรควบคุมปริมาตรในการสังเคราะห์และภาชนะในการบรรจุก่อนการสังเคราะห์ให้เป็นชนิดเดียวกัน เพื่อควบคุมให้ปฏิกิริยาเกิดได้ในลักษณะเดียวกัน และสามารถศึกษาปัจจัยที่ต้องจำเป็นต้องควบคุมสภาวะให้คงที่ได้ เช่น การศึกษาการใช้ซ้ำสารตั้งต้นที่เหลือ เป็นต้น

2. เนื่องจากการใช้เครื่องกลางระบบอัลตราโซนิก เป็นตัวให้ความร้อนในขณะการทำปฏิกิริยานั้นอาจทำให้เกิดปัญหาอุณหภูมิตกหรือเกินไปจากอุณหภูมิที่ต้องการ อีกทั้งการใช้ฟังก์ชันการสั่นด้วยเสียงก็อาจจะส่งผลให้แต่ละตำแหน่งในอุปกรณ์นั้น ได้รับการสั่นสะเทือนที่ไม่เท่ากัน และอาจจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาที่ต้องอาศัยสภาวะที่คงที่มาก ซึ่งอาจทำให้ผลการศึกษาไม่เห็นแนวโน้มที่ชัดเจน ดังนั้นอาจจะต้องศึกษาโดยใช้อุปกรณ์อื่นที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ หรือออกแบบการทดลองที่สามารถควบคุมให้ได้รับอุณหภูมิและการสั่นสะเทือนได้อย่างเท่าเทียมกัน

3. ควรมีการศึกษาเรื่องขนาดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการนำไปประยุกต์ใช้เพิ่มเติมให้เห็นถึงความแตกต่างของขนาดและสีที่ชัดเจนมากขึ้น

4. ควรศึกษาศึกษาวิธีการแยกอนุภาคนาโนทองคำที่มีการกระจายตัวของขนาดต่ำลง เพื่อให้เห็นผลกระทบของขนาดอนุภาคนาโนทองคำต่อประสิทธิภาพของการนำไปประยุกต์ใช้ที่ชัดเจนมากขึ้น

5. ในการทดสอบความเป็นเซนเซอร์สามารถใช้สมการที่สร้างจากกราฟมาตรฐานอย่างง่าย (ฟังก์ชันใน โปรแกรม excel) แทนการใช้สมการจากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) เนื่องจากสามารถประมาณค่าความเข้มข้นได้ใกล้เคียงและให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนใกล้เคียง หรือต่ำกว่าในบางกรณีที่ทดสอบ แสดงการเปรียบเทียบในภาคผนวก ก.5

## รายการอ้างอิง

### หนังสือและบทความในหนังสือ

- จิตต์ลัดดา ศักดาพาณิชย์. (2553). *เทคโนโลยียางธรรมชาติ (Natural Rubber Technology)*.  
กรุงเทพฯ: เทคโนโลยี คอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด.
- ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. (2544). *เครื่องมือวิทยาศาสตร์ (Scientific instruments)*. ขอนแก่น: หจก.  
โรงพิมพ์คลังน่านานาวิทยา, น.271
- วราภรณ์ ขจรไชยกูล. (2549). *ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน (Natural Rubber :  
Production and Applications)*. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.),  
น.38

### บทความวารสาร

- Bhosale, M.A., Gupta, S.S.R. & Bhanage B.M. (2016) Size controlled synthesis of gold nanostructures using ketones and their catalytic activity towards reduction of p-nitrophenol. *Polyhedron* 120, 96–102.
- Fang, C., Dharmarajan R., Megharaj, M. & Naidu, R. (2017). Gold nanoparticle-based optical sensors for selected anionic contaminants. *Trends in Analytical Chemistry* 86, 143-154.
- Hormozi-Nezhad, M. R., Seyedhosseini, E. & Robotjazi, H. (2012). Spectrophotometric determination of glutathione and cysteine based on aggregation of colloidal gold nanoparticles. *Scientia Iranica F*, 19(3), 958–963.
- Hoshyar, P., Khayati, G.R., Poorgholami, M. & Kaykhali, M. (2016). A novel green one-step synthesis of gold nanoparticles using crocin and their anti-cancer activities. *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology* 159, 237–242.
- Li, J.F., Huang, P.C. & Wu, F.Y. (2017). Highly selective and sensitive detection of glutathione based on anti-aggregation of gold nanoparticles via pH regulation. *Sensors and Actuators B*, 240, 553–559.
- Li, Q., Liu, C.G. & Yu Y. (2015). Separation of monodisperse alginate nanoparticles and effect of particle size on transport of vitamin E. *Carbohydrate Polymers*, 124, 274–279.

- Maddinedi, S.B., Mandal, B.K., Ranjan S. & Dasgupta N. (2015). Diastase assisted green synthesis of size controllable gold nanoparticles. *RSC Adv*, 5, 26727–26733.
- Maddinedi, S.B., Mandal, B.K. & Anna K.K. (2017). Environment friendly approach for size controllable synthesis of biocompatible Silver nanoparticles using diastase. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 49, 131-136.
- Ma, X.M., Sun, M., Lin, Y., Liu Y.J., Luo, F., Guo, L.H., Qiu B., Lin Z.Y. & Chen G.N. (2018). Progress of Visual Biosensor Based on Gold Nanoparticles. *Cite this article as: Chinese J. Anal. Chem.*, 46(1), 1–10.
- Mocanu, A., Cernic, I., Tomoaia, G., Bobos, L. D., Horovitz, O. & Tomoaia-Cotisel, M. (2009). Self-assembly characteristics of gold nanoparticles in the presence of cysteine. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 338, 93–101.
- Nawamawat, K., Sakdapipanich, J.T., Ho, C.C., Ma, Y., Song, J. & Vancso, J.G., (2011). Surface nanostructure of Hevea brasiliensis natural rubber latex particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 390, 157-166.
- Pandey, S., Goswami, G. K. & Nanda, K. K. (2013). Green synthesis of polysaccharide/gold nanoparticle nanocomposite: An efficient ammonia sensor. *Carbohydrate Polymers*, 94, 229– 234.
- Rad, A. G., Abbasi, H. & Afzali, M. H. (2011). Gold Nanoparticles: Synthesising, Characterizing and Reviewing Novel Application in Recent Years. *Physics Procedia*, 22, 203 – 208.
- Raghuwanshi, V.S., Garusinghe, U.M., Raj, P., Kirby, N., Hoell, A., Batchelor, W. & Garnier, G. (2018). Cationic polyacrylamide induced nanoparticles assembly in a cellulose nanofiber network. *Journal of Colloid and Interface Science*, 529, 180–186.
- Santhoshkumar, J., Rajeshkumar, S., & Kumar S. V. (2017). Phyto-assisted synthesis, characterization and applications of gold nanoparticles – A review. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 11, 46–57.
- Sun, L., Li, J., Cai, J., Zhong, L., Ren, G. & Ma, Q. (2017). One pot synthesis of gold nanoparticles using chitosan with varying degree of deacetylation and molecular weight. *Carbohydrate Polymers*, 178, 105–114.

- Suwatthanakul, T., Than-ardna, B., Danwanichakul, D. & Danwanichakul, P. (2016). Synthesis of silver nanoparticles in skim natural rubber latex at room temperature. *Materials Letters*, 168, 31–35.
- Teepoo, S., (2012). Nanoparticles: Synthesis and Applications for Chemical Analysis. *J Sci TEchnol MSU*, 32(2). 238-245.
- Velmurugan, P., Shim, L., Bang, K.S. & Oh B.T. (2016). Gold nanoparticles mediated coloring of fabrics and leather for antibacterial activity. *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology*, 160, 102–109.
- Yana, W., Chena, C., Wanga, L., Zhang, D., Li, A.J., Yaoa, Z. & Shi L.Y. (2016). Facile and green synthesis of cellulose nanocrystal-supported gold nanoparticles with superior catalytic activity. *Carbohydrate Polymers*, 140, 66–73.

### วิทยานิพนธ์

- Konglek, P., Pongsanon, P. & Danwanichakul, P.(2016). *Synthesis of gold nanoparticles using skim natural rubber latex and their application*. (Bachelor' thesis). Thammasat University, Faculty of engineering, Chemical Engineering.

### สื่ออิเล็กทรอนิกส์

- จรัญญา. (2560). กยท. ยัน บริหารงานมีประสิทธิภาพ ราคาขายง เป็นไปตามกลไกตลาด. [online]. สืบค้นจาก <https://news.mthai.com/economy-news/598632.html>
- ระบบจัดการความรู้ การยางแห่งประเทศไทย (2011). *ผลิตภัณฑ์ยางพารา*. [online]. สืบค้นจาก [http://km.rubber.co.th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=134:2011-05-20-04-17-11&catid=47:2011-05-20-04-40-40&Itemid=144](http://km.rubber.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=134:2011-05-20-04-17-11&catid=47:2011-05-20-04-40-40&Itemid=144)
- ณปภัช พิมพดี. (2560). *คลังความรู้ SciMath: แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล* สืบค้นจาก <http://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7164-2017-06-04-15-16-29>
- ฐานข้อมูลความปลอดภัยวัสดุนาโน. (2018). *ลักษณะสมบัติเฉพาะ อนุภาคนาโนทองคำ (Nano-Au). Nanosafety*. [Database]. สืบค้นจาก [http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat\\_id=9&p\\_id=258](http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat_id=9&p_id=258)

ภาคผนวก



**ภาคผนวก ก**  
**ตัวอย่างการคำนวณในงานวิจัย**

**ก.1 การคำนวณเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของหางน้ำยาง**

**ก.1.1 การคำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมดในหางน้ำยาง (TSC)**

ครั้งที่ 1

เมื่อ น้ำหนักหางน้ำยางแห้ง เท่ากับ 0.8370 g

น้ำหนักหางน้ำยางเริ่มต้น เท่ากับ 10.0162 g

ครั้งที่ 2

เมื่อ น้ำหนักหางน้ำยางแห้ง เท่ากับ 0.835 g

น้ำหนักหางน้ำยางเริ่มต้น เท่ากับ 9.9911 g

ครั้งที่ 3

เมื่อ น้ำหนักหางน้ำยางแห้ง เท่ากับ 0.8332 g

น้ำหนักหางน้ำยางเริ่มต้น เท่ากับ 9.9942 g

จะได้ปริมาณของแข็งทั้งหมดเฉลี่ย หรือ TSC

$$\begin{aligned} \text{TSC} &= \frac{0.837 + 0.8359 + 0.8332}{10.0162 + 9.9911 + 9.9942} \text{ g} \times 100 \\ &= 8.3532 \% \end{aligned}$$

**ก.1.2 การคำนวณหาปริมาณเนื้อยางแห้งในหางน้ำยาง (DRC)**

ครั้งที่ 1

เมื่อ น้ำหนักหางน้ำยางอบแห้งหลังจากจับยาง เท่ากับ 0.5052 g

น้ำหนักหางน้ำยางเริ่มต้น เท่ากับ 9.9888 g

ครั้งที่ 2

เมื่อ น้ำหนักหางน้ำยางอบแห้งหลังจากจับยาง เท่ากับ 0.5078 g

น้ำหนักหางน้ำยางเริ่มต้น เท่ากับ 10.0025 g

ครั้งที่ 3

เมื่อ น้ำหนักหางน้ำยางอบแห้งหลังจากจับยาง เท่ากับ 0.4874 g

น้ำหนักหางน้ำยางเริ่มต้น เท่ากับ 10.0831 g

ดังนั้นปริมาณเนื้อเยื่อแห้งเฉลี่ย หรือ DRC คือ

$$\begin{aligned} \text{DRC} &= \frac{0.5052 + 0.5078 + 0.4874}{9.9888 + 10.0025 + 10.0831} \text{ g} \times 100 \\ &= 4.9894 \% \end{aligned}$$

### ก.1.3 การคำนวณหาปริมาณร้อยละของแอมโมเนีย (%Alkalinity)

$$\% \text{ ความเป็นด่าง } (\% \text{ NH}_3 \text{ ต่อน้ำหนักน้ำยาล้าง}) = \frac{1.7 \times N \times V}{m}$$

เมื่อ N = นอร์มัลลิตีของสารละลายกรดเกลือ

V = ปริมาตรของกรดเกลือที่ใช้ในการไตเตรท หน่วยมิลลิลิตร (ml)

m = นอร์มัลลิตีของสารละลายกรดเกลือ หน่วยกรัม (g)

ตารางที่ ก.1

ปริมาณของกรดไฮดรอกลอริกที่ใช้ในการไตเตรท (V), น้ำหนักตัวอย่างของเซรัม (m) และ % Alkalinity ต่อน้ำหนักของเซรัมเฉลี่ย

ตัวอย่าง น้ำยาล้าง	ปริมาตรของ กรดไฮดรอกลอริก V, มิลลิลิตร (ml)	น้ำหนักของ ตัวอย่างน้ำยาล้าง m, กรัม (g)	% Alkalinity ต่อน้ำหนักน้ำยาล้าง
1	11.3	5.0320	0.3818%
2	11.5	5.0190	0.3895%
3	10.6	5.0631	0.3577%
เฉลี่ย	11.13	5.038	0.3763

$$\text{จะได้ \% Alkalinity ต่อน้ำหนักเซรัม} = \frac{1.7 \times N \times V}{m} = \frac{1.7 \times 0.1 \times 11.13}{5.038} = 0.3756\%$$

## ก.2 การคำนวณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

### ก.2.1 การคำนวณความเข้มข้นของพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก (PAM<sup>+</sup>)

เมื่อต้องการเตรียมความเข้มข้นของ PAM<sup>+</sup> ที่ความเข้มข้น 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 และ 1.50 %w/v เพื่อทดสอบความปริมาณของ PAM<sup>+</sup> ที่หลงเหลือในเซรัมต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

เตรียมความเข้มข้น PAM<sup>+</sup> 1.5% ปริมาตร 500 ml สำหรับใช้เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นเพื่อเตรียมเป็นความเข้มข้นอื่น ๆ ดังนี้  
 ชั่งน้ำหนักของ PAM<sup>+</sup> ให้มีมวล เท่ากับ

$$\frac{1.5 \text{ g}_{\text{PAM}^+}}{100 \text{ ml}_{\text{solution}}} \times 500 \text{ ml}_{\text{solution}} = 7.5 \text{ g}_{\text{PAM}^+}$$

และละลาย PAM<sup>+</sup> ที่ชั่งน้ำหนักได้ด้วยน้ำกลั่น เพื่อเตรียมให้ได้สารละลายปริมาตร 150 ml

เตรียมความเข้มข้นของ PAM<sup>+</sup> ที่แตกต่างกันจาก สารละลาย PAM<sup>+</sup> ที่ความเข้มข้น 1.5% w/v ให้มีปริมาตร 42 ml (เพื่อใช้จับก้อนทางน้ำยาง 60 ml โดยคำนวณตามสัดส่วนของ ปริมาตร PAM : SNRL เท่ากับ 350 ml : 500 ml) ได้ดังดังนี้

ตารางที่ ก.2

ปริมาตรของ PAM<sup>+</sup> 1.5 % w/v และน้ำกลั่น สำหรับเตรียมความเข้มข้นของ PAM<sup>+</sup> เป็นความเข้มข้นที่ 0.25, 0.50, 0.75, 1.0 และ 1.25 % w/v

ความเข้มข้น PAM <sup>+</sup> (μM)	ปริมาตรของ PAM <sup>+</sup> ความเข้มข้น 1.5 %w/v (ml)	ปริมาตรของน้ำกลั่น (ml)
0.25	7	35
0.50	14	28
0.75	21	21
1.00	28	14
1.25	35	7
1.50	42	0



### ก.2.2 การคำนวณหาปริมาณของสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต (HAuCl<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เมื่อต้องการเตรียมสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต (HAuCl<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O) ที่มีความเข้มข้น 8 mmol/L ปริมาตร 50 ml จะต้องผสมน้ำกลั่นกับ HAuCl<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O ปริมาณ

$$= \frac{8 \text{ mmol}}{1 \text{ l}} \times 50 \text{ ml} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{393.83 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times \frac{1 \text{ mol}}{1000 \text{ mmol}}$$

$$= 0.1575 \text{ g}$$

เมื่อต้องการให้ในสารแขวนลอยที่มีปริมาตร 30 ml มีความเข้มข้นของ HAuCl<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O เท่ากับ 1.4 mmol/L จากสารละลาย HAuCl<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O ที่มีความเข้มข้น 8 mmol/L จะต้องใช้สารละลาย HAuCl<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O เข้มข้น 8 mmol/L ปริมาตร

$$= \frac{1.4 \text{ mmol}}{1 \text{ l}} \times 30 \text{ ml} \times \frac{1 \text{ l}}{8 \text{ mmol}}$$

$$= 5.25 \text{ ml}$$

### ก.2.3 การคำนวณหาปริมาตรเซรัมและน้ำกลั่นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

จากข้อ ก.1.6 เมื่อต้องการให้ในสารแขวนลอยที่มีปริมาตร 30 ml จะต้องใช้เซรัมที่เจือจาง 8 เท่า ปริมาตร

$$= 30 \text{ ml} - 5.25 \text{ ml} = 24.75 \text{ ml}$$

โดยจะใช้ปริมาตรของเซรัมเท่ากับ

$$= \frac{24.75 \text{ ml}}{8} = 3.094 \text{ ml}$$

ดังนั้นจะใช้ปริมาตรน้ำกลั่นเท่ากับ

$$= 24.75 \text{ ml} - 3.094 \text{ ml} = 21.66 \text{ ml}$$

### ก.3 การคำนวณปริมาณของทองคำที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการใช้สารตั้งต้นที่เหลือ

จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimum condition) ณ ความเข้มข้นของ HAuCl<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O เท่ากับ 1.4 mM และ เซรัมที่สัดส่วนการเจือจางเซรัม 8 เท่า โดยปริมาตรเริ่มต้นที่สังเคราะห์เท่ากับ 30 ml จะมีมวลของทองคำ (Au) เท่ากับ

$$\frac{1.4 \times 10^{-3} \text{ mol}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{393.83 \text{ g}_{\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}}}{\text{mol}} \times 30 \text{ ml} = 0.016541 \text{ g}_{\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}}$$

สัดส่วนของน้ำหนักทองคำ (Au) ในมวลโมเลกุลของ  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ

$$\frac{196.96655 \text{ g}_{\text{Au}}}{393.83 \text{ g}_{\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}}} = 0.50013$$

ดังนั้น น้ำหนักของทองคำในสารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำเริ่มต้น เท่ากับ

$$0.016541 \text{ g}_{\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}} \times 0.50013 = 0.0082726 \text{ g}_{\text{Au}} = 8.2726 \text{ mg}_{\text{Au}}$$

เนื่องจากการทดลองใช้ซ้ำสารตั้งต้นที่เหลือ พบว่า ทราบว่าสารละลายตัวเดิมที่เติมในส่วน  
ของสารละลายเหนือตะกอนที่สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำให้มีคุณสมบัติเท่าสภาวะเทียบ  
มีเงื่อนไข คือ ความเข้มข้นของ  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 3.8 mM และ เซลล์ที่สัดส่วนการเจือจาง 2  
เท่า ปริมาตรเท่ากับ 7.5 ml ซึ่งในส่วนของสารละลายตัวเดิมนี้ มีมวลของทองคำเท่ากับ

$$\frac{3.8 \times 10^{-3} \text{ mol}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{393.83 \text{ g}_{\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}}}{\text{mol}} \times 7.5 \text{ ml} = 0.01137 \text{ g}_{\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}}$$

ดังนั้น น้ำหนักของทองคำในสารละลายตัวเดิม เท่ากับ

$$0.01137 \text{ g}_{\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}} \times 0.50013 = 0.005685 \text{ g}_{\text{Au}} = 5.685 \text{ mg}_{\text{Au}}$$

หลังการสังเคราะห์เป็นเวลา 3 ชั่วโมงด้วยความร้อนที่ 80 °C พร้อมการสั่นด้วยเสียง ซึ่ง  
เมื่อได้คอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำมาแล้ว จะต้องปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกอนุภาคออก และนำส่วน  
สารละลายเหนือตะกอนออกมา 22.7 ml ในการนำกลับไปสังเคราะห์อีกครั้ง ซึ่งจะต้องมีมวลของ  
ทองคำเท่าเดิมกับคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำเริ่มต้นหลังจากเติมด้วยสารละลายตัวเดิม จะทำให้  
ทราบมวลของทองคำที่เหลืออยู่ในส่วนของสารละลายเหนือตะกอนว่ามีค่า เท่ากับ

$$8.2726 \text{ mg}_{\text{Au}} - 5.685 \text{ mg}_{\text{Au}} = 2.5878 \text{ mg}_{\text{Au}}$$

และเมื่อทราบมวลของทองคำในสารละลายเหนือตะกอนแล้ว สามารถประมาณมวล  
ของอนุภาคนาโนทองคำแยกที่แยกออกด้วยการปั่นเหวี่ยงเหลือในส่วนตะกอน 7.5 ml เท่ากับ

$$8.2726 \text{ mg}_{\text{Au}} - 2.5878 \text{ mg}_{\text{Au}} = 5.685 \text{ mg}_{\text{Au}}$$

จากมวลของทองคำในแต่ละส่วนที่คำนวณได้นี้ ทำให้ทราบได้ว่า มวลของทองคำต่อ  
ปริมาตรในแต่ละส่วน ดังนี้

มวลของทองคำต่อปริมาตรของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สภาวะเทียบ เท่ากับ

$$\frac{8.2726 \text{ mg}_{\text{Au}}}{30 \text{ ml}_{\text{supernatant}}} = 0.2758 \text{ mg/ml}$$

มวลของทองคำต่อปริมาตรของส่วนสารละลายเหนือตะกอน เท่ากับ

$$\frac{2.5878 \text{ mg}_{\text{Au}}}{22.5 \text{ ml}_{\text{supernatant}}} = 0.115 \text{ mg/ml}$$

มวลของทองคำต่อปริมาตรของส่วนตะกอน เท่ากับ

$$\frac{5.685 \text{ mg}_{\text{Au}}}{7.5 \text{ ml}_{\text{sediment}}} = 0.758 \text{ mg/ml}$$

มวลของทองคำต่อปริมาตรของสารละลายส่วนเหนือตะกอน เท่ากับ

$$\frac{5.685 \text{ mg}_{\text{Au}}}{7.5 \text{ ml}_{\text{sediment}}} = 0.758 \text{ mg/ml}$$

#### ก.4 การคำนวณการเตรียมความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และกลูต้าไรโอน

##### ก.4.1 การคำนวณการเตรียมความเข้มข้นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) เพื่อใช้ในการทดสอบความเป็นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เซ็นเซอร์

ในการศึกษาผลของแอมโมเนียในสารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่ได้จากการแยกขนาดด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 rpm (ขนาด 20.5 ± 4.5 nm) และ 8,000 rpm (ขนาด 23±7 nm) เพื่อแยกอนุภาคนาโนทองคำออกมาล้างด้วยสารละลาย 2% SDS และน้ำกลั่น ต้องการเตรียมสารละลายรวม 3 ml โดยแบ่งเป็น 1 ส่วน หรือ 1 ml เติมสารละลาย NH<sub>4</sub>OH ที่มีความเข้มข้น 100, 200, 300, 400 และ 500 μM และอีก 2 ส่วน หรือ 2 ml เป็นสารแขวนลอยอนุภาคนาโนทองคำในน้ำ

วิธีเตรียมความเข้มข้น NH<sub>4</sub>OH 1000 μM ปริมาตร 30 ml จาก NH<sub>4</sub>OH ที่มีความเข้มข้น 28 %NH<sub>4</sub>OH และวิธีการเตรียมสารละลาย NH<sub>4</sub>OH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. เปลี่ยนความเข้มข้นของ 28 %NH<sub>4</sub>OH ให้เป็นหน่วยความเข้มข้น μM ดังนี้

$$\frac{\left[ \frac{28 \text{ ml}}{100 \text{ ml}} \right]_{\text{conc.}} \times \left[ \frac{0.9 \text{ g}}{\text{ml}} \right]_{\text{density}}}{\left[ \frac{35.5 \text{ g}_{\text{NH}_4\text{OH}}}{1 \text{ mol}} \right]_{\text{MW}}} = 7.19 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{ml}}$$

$$7.19 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{ml}} \times \left[ \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} \right] \times \left[ \frac{1 \mu\text{mol}}{10^{-6} \text{ mol}} \right]$$

$$7.19 \times 10^6 \frac{\mu\text{mol}}{\text{l}} = 7.19 \times 10^6 \text{ mM}$$

2. เตรียมความเข้มข้น 1,000 μM จากความเข้มข้น 7.19×10<sup>6</sup> μM (28 %NH<sub>4</sub>OH) ดังนี้ ปริมาตรของ 28 %NH<sub>4</sub>OH เท่ากับ

$$\frac{1,000 \mu\text{M} \times 30 \text{ ml}}{7.19 \times 10^6 \mu\text{M}} = 0.0417 \text{ ml} = 41.7 \mu\text{l}$$

ดังนั้น ปริมาณน้ำกลั่นที่ใช้ เท่ากับ

$$30 \text{ ml} - 0.0417 \text{ ml} = 29.958 \text{ ml}$$

3. เตรียมความเข้มข้น  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จาก ความเข้มข้น  $1,000 \mu\text{M}$  (เตรียมได้จากข้อที่ 2.) ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ เตรียมความเข้มข้น  $\text{NH}_4\text{OH}$   $300 \mu\text{M}$  ปริมาตร  $1 \text{ ml}$  จาก  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่มีความเข้มข้น  $1,000 \mu\text{M}$  จำนวนความเข้มข้น  $1,000 \mu\text{M}$  ที่ใช้ได้ดังนี้

ปริมาตร  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่ความเข้มข้น  $1,000 \mu\text{M}$  ที่ต้องใช้เท่ากับ

$$\frac{300 \mu\text{M} \times 1 \text{ ml}}{1,000 \mu\text{M}} = 0.3 \text{ ml}$$

ปริมาณน้ำกลั่นที่ต้องใช้เท่ากับ

$$1 \text{ ml} - 0.3 \text{ ml} = 0.7 \text{ ml}$$

ตารางที่ ก.3

ปริมาตรของ  $\text{NH}_4\text{OH}$   $1,000 \mu\text{M}$  และน้ำกลั่น สำหรับเตรียมความเข้มข้นของ  $\text{NH}_4\text{OH}$  เป็นความเข้มข้นที่ 0, 100, 200, 300, 400 และ  $500 \mu\text{M}$

ความเข้มข้น $\text{NH}_4\text{OH}$ ( $\mu\text{M}$ )	ปริมาตรของ $\text{NH}_4\text{OH}$ ความเข้มข้น $1,000 \mu\text{M}$ (ml)	ปริมาตรของน้ำกลั่น (ml)
0	0	1
100	0.1	0.9
200	0.2	0.8
300	0.3	0.7
400	0.4	0.6
500	0.5	0.5

#### ก.4.2 การคำนวณการเตรียมความเข้มข้นซิสทีน (Cysteine, Cys) เพื่อใช้ในการทดสอบความเป็นซิสทีนเซ็นเซอร์

ในการศึกษาผลของ Cys ในสารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่ได้จากการแยกขนาดด้วยการปั่นเหวี่ยง เช่นเดียวกับที่กล่าวในหัวข้อ ก.3.1 ต้องการเตรียมสารละลายรวม 3 ml โดยแบ่งเป็น 1 ml เติมสารละลาย Cys ที่มีความเข้มข้น 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000  $\mu\text{M}$  ผสมกับ 3 ml เป็นสารแขวนลอยอนุภาคนาโนทองคำ ในน้ำ และ 0.5 ml ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 M แสดงวิธีการเตรียมสารละลายได้ ดังนี้

เตรียมสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 30 ml ดังนี้

ซึ่งน้ำหนักของ NaCl ให้มีมวล เท่ากับ

$$\left[ \frac{0.1 \text{ mol}_{\text{NaCl}}}{1000 \text{ ml}} \right]_{\text{conc.}} \times \left[ \frac{58.44 \text{ g}_{\text{NaCl}}}{1 \text{ mol}} \right]_{\text{MW}} \times 30 \text{ ml}_{\text{solution}} = 0.1753 \text{ g}_{\text{NaCl}}$$

ผสมกับน้ำกลั่นได้ให้สารละลาย NaCl ปริมาตร 30 ml

เตรียมความเข้มข้น Cys ที่ 1,000  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 30 ml ได้ดังนี้ดังนี้

ซึ่งน้ำหนักของ Cys ให้มีมวล เท่ากับ

$$\left[ \frac{1,000 \times 10^{-6} \text{ mol}_{\text{Cys}}}{1000 \text{ ml}} \right]_{\text{conc.}} \times \left[ \frac{121.16 \text{ g}_{\text{Cys}}}{1 \text{ mol}} \right]_{\text{MW}} \times 30 \text{ ml}_{\text{solution}} = 9.219 \times 10^{-3} \text{ g}_{\text{Cys}} = 9.219 \text{ mg}_{\text{Cys}}$$

ผสมกับน้ำกลั่นได้ให้สารละลาย Cys ปริมาตร 30 ml

เตรียมความเข้มข้น Cys ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จาก ความเข้มข้น 1,000  $\mu\text{M}$  ที่เตรียมได้ในขั้นต้น ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ เตรียมความเข้มข้น Cys ที่ 500  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 1 ml จากสารละลาย Cys ที่มีความเข้มข้น 1,000  $\mu\text{M}$  คำนวณความเข้มข้น 1,000  $\mu\text{M}$  ที่ใช้ได้ดังนี้

ปริมาตรสารละลาย Cys ความเข้มข้น 1,000  $\mu\text{M}$  ที่ต้องใช้เท่ากับ

$$\frac{500 \mu\text{M} \times 1 \text{ ml}}{1,000 \mu\text{M}} = 0.5 \text{ ml}$$

ปริมาณน้ำกลั่นที่ต้องใช้เท่ากับ

$$1 \text{ ml} - 0.5 \text{ ml} = 0.5 \text{ ml}$$

## ตารางที่ ก.4

ปริมาณของสารละลาย Cys 1,000  $\mu\text{M}$  และน้ำกลั่น สำหรับเตรียมความเข้มข้นของ Cys เป็นความเข้มข้นที่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น สารละลาย Cys ( $\mu\text{M}$ )	ปริมาตรของ สารละลาย Cys ความเข้มข้น 1,000 $\mu\text{M}$ (ml)	ปริมาตรของน้ำกลั่น (ml)
0	0	1
100	0.1	0.9
200	0.2	0.8
300	0.3	0.7
400	0.4	0.6
500	0.5	0.5
600	0.6	0.4
700	0.7	0.3
800	0.8	0.2
900	0.9	0.1
1,000	1.0	0

#### ก.4.3 การคำนวณการเตรียมความเข้มข้นกลูตาไธโอน (Glutathione, GSH) เพื่อใช้ในการทดสอบความเป็นกลูตาไธโอนเซ็นเซอร์

ในการศึกษาผลของ GSH ในสารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่ได้จากการแยกขนาดด้วยการปั่นเหวี่ยง เช่นเดียวกับที่กล่าวในหัวข้อ ก.3.1 ต้องการเตรียมสารละลายรวม 3 ml โดยแบ่งเป็น 1 ml เติมสารละลาย GSH ที่มีความเข้มข้น 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000  $\mu\text{M}$  ผสมกับ 3 ml เป็นสารแขวนลอยอนุภาคนาโนทองคำในน้ำ และ 0.5 ml ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 M แสดงวิธีการเตรียมสารละลายได้ ดังนี้

เตรียมสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 30 ml เช่นเดียวกับการเตรียมในหัวข้อ ก.3.2

เตรียมความเข้มข้น GSH ที่ 1,000  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 30 ml ได้ดังนี้ดังนี้

ซึ่งน้ำหนักของ GSH ให้มีมวล เท่ากับ

$$\left[ \frac{1,000 \times 10^{-6} \text{ mol}_{\text{GSH}}}{1000 \text{ ml}} \right]_{\text{conc.}} \times \left[ \frac{307.3 \text{ g}_{\text{GSH}}}{1 \text{ mol}} \right]_{\text{MW}} \times 30 \text{ ml}_{\text{solution}}$$

$$= 9.219 \times 10^{-3} \text{ g}_{\text{GSH}} = 9.219 \text{ mg}_{\text{GSH}}$$

ผสมกับน้ำกลั่นได้ให้สารละลาย GSH ปริมาตร 30 ml

เตรียมความเข้มข้น GSH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จาก ความเข้มข้น 1,000  $\mu\text{M}$  ที่เตรียมได้ใน  
ขั้นต้น ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ เตรียมความเข้มข้น GSH ที่ 700  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 1 ml จากสารละลาย GSH  
ที่มีความเข้มข้น 1,000  $\mu\text{M}$  คำนวณความเข้มข้น 1,000  $\mu\text{M}$  ที่ใช้ได้ดังนี้

ปริมาตรสารละลาย GSH ความเข้มข้น 1,000  $\mu\text{M}$  ที่ต้องใช้เท่ากับ

$$\frac{700 \mu\text{M} \times 1 \text{ ml}}{1,000 \mu\text{M}} = 0.7 \text{ ml}$$

ปริมาณน้ำกลั่นที่ต้องใช้เท่ากับ

$$1 \text{ ml} - 0.7 \text{ ml} = 0.3 \text{ ml}$$

ตารางที่ ก.5

ปริมาตรของสารละลาย GSH 1,000  $\mu\text{M}$  และน้ำกลั่น สำหรับเตรียมความเข้มข้นของ GSH เป็น  
ความเข้มข้นที่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น สารละลาย GSH ( $\mu\text{M}$ )	ปริมาตรของ สารละลาย GSH ความ เข้มข้น 1,000 $\mu\text{M}$ (ml)	ปริมาตรของน้ำกลั่น (ml)
0	0	1
100	0.1	0.9
200	0.2	0.8
300	0.3	0.7
400	0.4	0.6
500	0.5	0.5

## ตารางที่ ก.5

ปริมาณของสารละลาย GSH 1,000  $\mu\text{M}$  และน้ำกลั่น สำหรับเตรียมความเข้มข้นของ GSH เป็นความเข้มข้นที่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000  $\mu\text{M}$  (ต่อ)

ความเข้มข้น สารละลาย GSH ( $\mu\text{M}$ )	ปริมาณของ สารละลาย GSH ความ เข้มข้น 1,000 $\mu\text{M}$ (ml)	ปริมาณของน้ำกลั่น (ml)
600	0.6	0.4
700	0.7	0.3
800	0.8	0.2
900	0.9	0.1
1,000	1.0	0

ก.5 การคำนวณความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซิสทีน และ กลูต้าไธโอน และการหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการใช้สมการมาตรฐานทำนายความเข้มข้น

ก.5.1 การคำนวณความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และการหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการใช้สมการมาตรฐานทำนายความเข้มข้น

(1) ผลของแอมโมเนียต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย

$20.5 \pm 45.5 \text{ nm}$

จากความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 523 nm เป็นสัดส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ไม่มีผลของแอมโมเนียต่อค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไปเมื่อเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และสร้างกราฟมาตรฐานด้วย excel ดังแสดงในบทที่ 4 ภาพที่ 4.19

จากกราฟจะได้ความสัมพันธ์  $y = -2 \times 10^{-4}x + 0.9989$

โดยที่

y คือ  $\frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 523 nm ที่เริ่มต้น}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 523 nm เมื่อเติม } \text{NH}_4\text{OH}}$   
 x คือ ความเข้มข้นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่คำนวณได้



ตัวอย่างการคำนวณ เตรียมความเข้มข้น  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่  $250 \mu\text{M}$  ปริมาตร  $1 \text{ ml}$  ลงในสารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำขนาด  $20.5 \pm 4.5 \text{ nm}$  ปริมาตร  $2 \text{ ml}$  ทำปฏิกิริยาที่ความร้อน  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  พร้อมด้วยการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา  $1 \text{ ชั่วโมง}$  วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น  $523 \text{ nm}$  ที่เริ่มต้น และ ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น  $523 \text{ nm}$  เมื่อเติม  $\text{NH}_4\text{OH}$  เพื่อทดสอบการใช้สมการมาตรฐานจากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ ดังนี้

วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น  $523 \text{ nm}$  = 0.2918

ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น  $523 \text{ nm}$  เมื่อเติม  $\text{NH}_4\text{OH}$  = 0.3062

$$y = \frac{0.2918}{0.3062} = 0.953$$

$$\therefore x = \frac{0.953 - 0.9989}{-2 \times 10^{-4}} = 229.00$$

ดังนั้น ความเข้มข้นที่คำนวณได้จากสมการมาตรฐาน เท่ากับ  $229 \mu\text{M}$  เนื่องจากความเข้มข้นที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ  $250 \mu\text{M}$  ดังนั้นจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังนี้

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน (\%Error)} = \frac{|\text{ความเข้มข้นที่กำหนด} - \text{ความเข้มข้นที่คำนวณได้}|}{\text{ความเข้มข้นที่กำหนด}} \times 100$$

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|250 - 229|}{250} \times 100 = 8.4\%$$

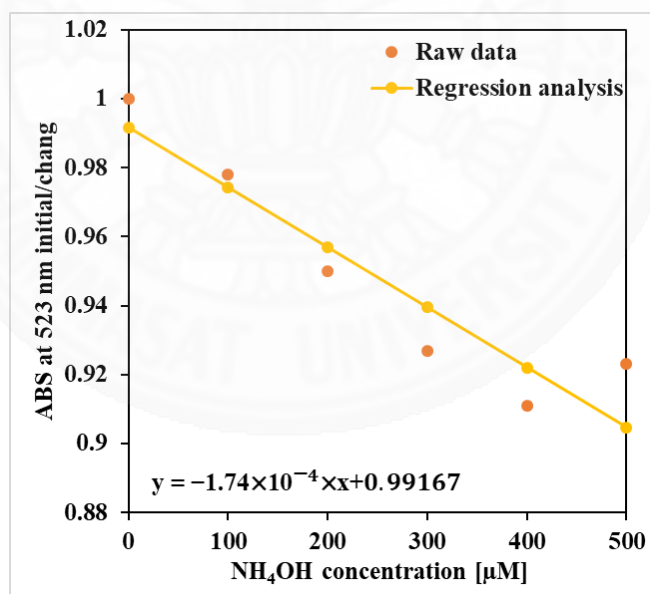
เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นไม่ทราบค่า คำนวณความเข้มข้นที่ได้จากการใช้สมการข้างต้น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น แสดงผลการคำนวณทั้งหมดให้เห็นดังตารางที่ ก.6

ตารางที่ ก.6

ผลการทดสอบสมการมาตรฐานจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 45.5$  nm ด้วยสารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่ความเข้มข้น 125, 250, 325, 475  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น ไม่ทราบค่าของ $\text{NH}_4\text{OH}$ ( $\mu\text{M}$ )	ABS Reading (y)	ความเข้มข้น $\text{NH}_4\text{OH}$ ที่คำนวณได้ (x) ( $\mu\text{M}$ )	%Error
125	0.969	148.00	18.40
250	0.953	229.00	8.40
325	0.941	289.00	11.08
475	0.869	648.00	36.42

การสร้างสมการมาตรฐานด้วยการใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพที่ ก.1



ภาพที่ ก.1 กราฟมาตรฐานจากการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 523 nm เทียบกับความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในช่วงความเข้มข้น 0 - 500  $\mu\text{M}$

จะได้สมการความสัมพันธ์ ได้แก่

$$y = -1.74 \times 10^{-4}x + 0.99167$$

เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นไม่ทราบค่า คำนวณความเข้มข้นที่ได้จากการใช้สมการข้างต้น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น แสดงผลให้เห็นดังตารางที่ ก.7

ตารางที่ ก.7

ผลการทดสอบสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 45.5$  nm ด้วยสารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่ความเข้มข้น 125, 250, 325, 475  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น ไม่ทราบค่าของ $\text{NH}_4\text{OH}$ ( $\mu\text{M}$ )	ABS Reading (y)	ความเข้มข้น $\text{NH}_4\text{OH}$ ที่คำนวณได้ (x) ( $\mu\text{M}$ )	%Error
125	0.969	128.54	2.84
250	0.953	221.65	11.34
325	0.941	290.61	10.58
475	0.869	703.26	48.05

(2) ผลของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm

จากความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm เป็นสัดส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ไม่มีผลของแอมโมเนียต่อค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไปเมื่อเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และสร้างกราฟมาตรฐานด้วย excel ดังแสดงในบทที่ 4 ภาพที่ 4.21 จากกราฟจะได้ความสัมพันธ์

$$y = -2 \times 10^{-4}x + 0.9903$$

โดยที่

y คือ  $\frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm ที่เริ่มต้น}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm เมื่อเติม } \text{NH}_4\text{OH}}$

x คือ ความเข้มข้นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่คำนวณได้

ตัวอย่างการคำนวณ เตรียมความเข้มข้น  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่  $250 \mu\text{M}$  ปริมาตร  $1 \text{ ml}$  ลงในสารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำขนาด  $23 \pm 7 \text{ nm}$  ปริมาตร  $2 \text{ ml}$  ทำปฏิกิริยาที่ความร้อน  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  พร้อมด้วยการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา  $1 \text{ ชั่วโมง}$  วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น  $530 \text{ nm}$  ที่เริ่มต้นและ ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น  $530 \text{ nm}$  เมื่อเติม  $\text{NH}_4\text{OH}$  เพื่อทดสอบการใช้สมการมาตรฐานจากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ ดังนี้

$$\text{วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น } 530 \text{ nm} = 0.3001$$

$$\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น } 530 \text{ nm} \text{ เมื่อเติม } \text{NH}_4\text{OH} = 0.3166$$

$$y = \frac{0.3001}{0.3166} = 0.9479$$

$$\therefore x = \frac{0.9479 - 0.9903}{-2 \times 10^{-4}} = 212.00$$

ดังนั้น ความเข้มข้นที่คำนวณได้จากสมการมาตรฐาน เท่ากับ  $229 \mu\text{M}$  เนื่องจากความเข้มข้นที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ  $250 \mu\text{M}$  ดังนั้นจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{ความคลาดเคลื่อน (\%Error)} &= \frac{|\text{ความเข้มข้นที่กำหนด} - \text{ความเข้มข้นที่คำนวณได้}|}{\text{ความเข้มข้นที่กำหนด}} \times 100 \\ \% \text{ความคลาดเคลื่อน} &= \frac{|250 - 212|}{250} \times 100 = 15.17\% \end{aligned}$$

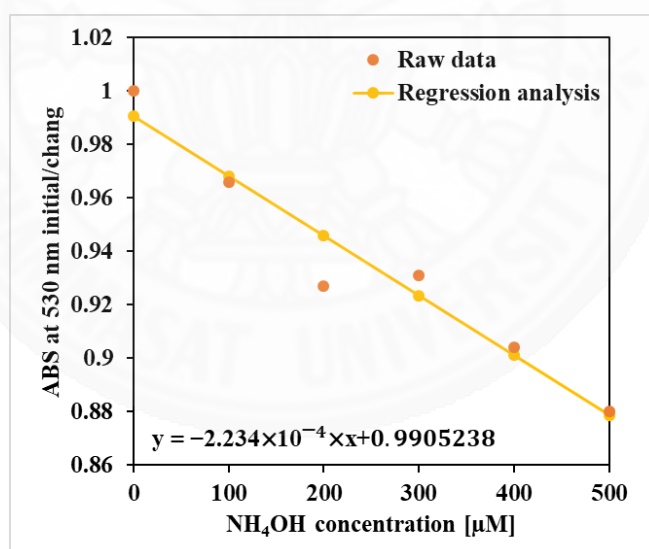
เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นไม่ทราบค่า คำนวณความเข้มข้นที่ได้จากการใช้สมการข้างต้น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น แสดงผลการคำนวณทั้งหมดให้เห็นดังตารางที่ ก.8

ตารางที่ ก.8

ผลการทดสอบสมการมาตรฐานจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ด้วยสารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่ความเข้มข้น 125, 250, 325, 475  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น ไม่ทราบค่าของ $\text{NH}_4\text{OH}$ ( $\mu\text{M}$ )	ABS Reading (y)	ความเข้มข้น $\text{NH}_4\text{OH}$ ที่คำนวณได้ (x) ( $\mu\text{M}$ )	%Error
125	0.918	360.01	188.01
250	0.948	212.08	15.17
325	0.929	304.55	6.29
475	0.887	514.78	8.37

การสร้างสมการมาตรฐานด้วยการใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพที่ ก.2



ภาพที่ ก.2 กราฟมาตรฐานจากการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm เทียบกับความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในช่วงความเข้มข้น 0 - 500  $\mu\text{M}$

จะได้สมการความสัมพันธ์ ได้แก่

$$y = -2.234 \times 10^{-4} x + 0.9905238$$

เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นไม่ทราบค่า คำนวณความเข้มข้นที่ได้จากการใช้สมการข้างต้น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น แสดงผลให้เห็นดังตารางที่ ก.9

ตารางที่ ก.9

ผลการทดสอบสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ด้วยสารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่ความเข้มข้น 125, 250, 325, 475  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น ไม่ทราบค่าของ $\text{NH}_4\text{OH}$ ( $\mu\text{M}$ )	ABS Reading (y)	ความเข้มข้น $\text{NH}_4\text{OH}$ ที่คำนวณได้ (x) ( $\mu\text{M}$ )	%Error
125	0.918	323.30	158.64
250	0.948	190.87	23.65
325	0.929	273.65	15.80
475	0.887	461.86	2.77

ก.5.2 การคำนวณความเข้มข้นของซีสทีน และการหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการใช้สมการมาตรฐานทำนายความเข้มข้น

(1) ผลของซีสทีนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย

$20.5 \pm 4.5$  nm

จากความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm เป็นสัดส่วนกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm เมื่อเติมซีสทีนและสร้างกราฟมาตรฐานด้วย excel ดังแสดงในบทที่ 4 ภาพที่ 4.22 จากกราฟจะได้ความสัมพันธ์

$$y = -6 \times 10^{-6}x + 1.0144$$

โดยที่

y คือ  $\frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm}}$   
 x คือ ความเข้มข้นซีสทีนที่คำนวณได้

ตัวอย่างการคำนวณ เตรียมความเข้มข้น Cys ที่ 550  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 1 ml ลงในสารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำขนาด  $20.5 \pm 4.5$  nm ปริมาตร 3 ml ทำปฏิกิริยาที่ความร้อน  $80^\circ\text{C}$  พร้อมด้วยการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm และ ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm เมื่อเติม Cys เพื่อทดสอบการใช้สมการมาตรฐานจากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ ดังนี้

$$\text{วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น } 526 \text{ nm} = 0.4991$$

$$\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น } 531 \text{ nm} = 0.4936$$

$$y = \frac{0.4991}{0.4936} = 1.011$$

$$\therefore x = \frac{1.011 - 1.0144}{-6 \times 10^{-6}} = 566.67$$

ดังนั้น ความเข้มข้นที่คำนวณได้จากสมการมาตรฐาน เท่ากับ  $566.67 \mu\text{M}$  เนื่องจากความเข้มข้นที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ  $550 \mu\text{M}$  ดังนั้นจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังนี้

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน (\%Error)} = \frac{|\text{ความเข้มข้นที่กำหนด} - \text{ความเข้มข้นที่คำนวณได้}|}{\text{ความเข้มข้นที่กำหนด}} \times 100$$

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|550 - 566.67|}{550} \times 100 = 3.03 \%$$

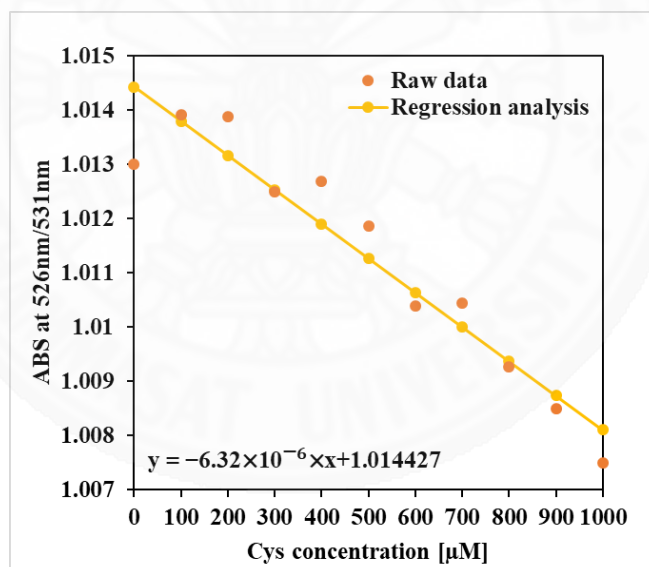
เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นไม่ทราบค่า คำนวณความเข้มข้นที่ได้จากการใช้สมการข้างต้น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น แสดงผลการคำนวณทั้งหมดให้เห็นดังตารางที่ ก.10

ตารางที่ ก.10

ผลการทดสอบสมการมาตรฐานจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ด้วยสารละลาย Cys ที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น ไม่ทราบค่าของ Cys ( $\mu\text{M}$ )	ABS Reading (y)	ความเข้มข้น Cys ที่คำนวณได้ (x) ( $\mu\text{M}$ )	%Error
250	1.013	233.33	6.67
550	1.011	566.67	3.03
850	1.009	900.00	5.88

การสร้างสมการมาตรฐานด้วยการใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพที่ ก.3



ภาพที่ ก.3 กราฟมาตรฐานจากการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 531 nm เทียบกับความเข้มข้นของซิสทีนในช่วงความเข้มข้น 0 - 1000  $\mu\text{M}$

จะได้สมการความสัมพันธ์ ได้แก่

$$y = -6.32 \times 10^{-6}x + 1.014427$$



เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นไม่ทราบค่า คำนวณความเข้มข้นที่ได้จากการใช้สมการข้างต้น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น แสดงผลให้เห็นดังตารางที่ ก.11

ตารางที่ ก.11

ผลการทดสอบสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ด้วยสารละลาย Cys ที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น ไม่ทราบค่าของ Cys ( $\mu\text{M}$ )	ABS Reading (y)	ความเข้มข้น Cys ที่คำนวณได้ (x) ( $\mu\text{M}$ )	%Error
250	1.013	161.18	35.53
550	1.011	498.27	9.41
850	1.009	917.05	7.89

(2) ผลของซิสทีนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm

จากความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm เป็นสัดส่วนกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 550 nm เมื่อเติมซิสทีนและสร้างกราฟมาตรฐานด้วย excel ดังแสดงในบทที่ 4 ภาพที่ 4.23

จากกราฟจะได้ 3 ความสัมพันธ์ ได้แก่

$$(1) 0 - 600 \mu\text{M} \quad : \quad y = -3 \times 10^{-5}x + 1.1434$$

$$(2) 600 - 800 \mu\text{M} \quad : \quad y = 1 \times 10^{-5}x + 1.1211$$

$$(3) 800 - 1000 \mu\text{M} \quad : \quad y = -3 \times 10^{-5}x + 1.154$$

โดยที่

$$y \text{ คือ } \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 550 nm}}$$

$$x \text{ คือ ความเข้มข้นซิสทีนที่คำนวณได้}$$

ตัวอย่างการคำนวณ เตรียมความเข้มข้น Cys ที่ 250  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 1 ml ลงในสารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำขนาด  $23 \pm 7$  nm ปริมาตร 3 ml ทำปฏิกิริยาที่ความร้อน  $80^\circ\text{C}$  พร้อมด้วยการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm และ ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 550 nm เมื่อเติม Cys เพื่อทดสอบการใช้สมการมาตรฐานจากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ ดังนี้

$$\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm} = 0.4911$$

$$\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 550 nm} = 0.4323$$

$$y = \frac{0.4911}{0.4323} = 1.136$$

$$\therefore x = \frac{1.136 - 1.1434}{-3 \times 10^{-5}} = 246.67$$

ดังนั้น ความเข้มข้นที่คำนวณได้จากสมการมาตรฐาน เท่ากับ  $233.33 \mu\text{M}$  เนื่องจากความเข้มข้นที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ  $250 \mu\text{M}$  ดังนั้นจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังนี้

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน (\%Error)} = \frac{|\text{ความเข้มข้นที่กำหนด} - \text{ความเข้มข้นที่คำนวณได้}|}{\text{ความเข้มข้นที่กำหนด}} \times 100$$

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|250 - 246.67|}{250} \times 100 = 1.33 \%$$

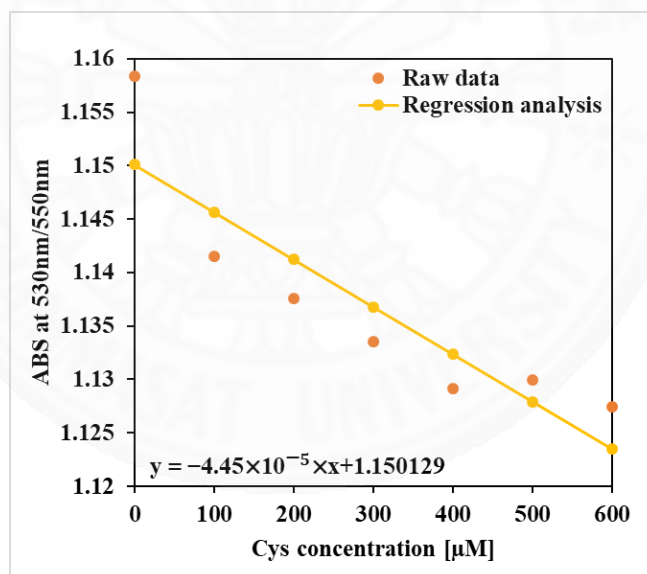
เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นไม่ทราบค่า คำนวณความเข้มข้นที่ได้จากการใช้สมการข้างต้น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น แสดงผลการคำนวณทั้งหมดให้เห็นดังตารางที่ ก.12

ตารางที่ ก.12

ผลการทดสอบสมการมาตรฐานจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ด้วยสารละลาย Cys ที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น ไม่ทราบค่าของ Cys ( $\mu\text{M}$ )	ABS Reading (y)	ความชัน	จุดตัดแกน	ความเข้มข้น Cys ที่คำนวณได้ (x) ( $\mu\text{M}$ )	%Error
250	1.136	-0.00003	1.1434	246.67	1.33
550	1.126	-0.00003	1.1434	580.00	5.45
850	1.123	-0.00003	1.154	1033.33	21.57

การสร้างสมการมาตรฐานด้วยการใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพที่ ก.4



ภาพที่ ก.4 กราฟมาตรฐานจากการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 530 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 550 nm เทียบกับความเข้มข้นของซิสทีนในช่วงความเข้มข้น 0 - 1000  $\mu\text{M}$

จะได้สมการความสัมพันธ์ได้แก่

$$y = -4.45 \times 10^{-5}x + 1.150129$$

เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นไม่ทราบค่า คำนวณความเข้มข้นที่ได้จากการใช้สมการข้างต้น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น แสดงผลให้เห็นดังตารางที่ ก.13

ตารางที่ ก.13

ผลการทดสอบสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ด้วยสารละลาย Cys ที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น ไม่ทราบค่าของ Cys ( $\mu\text{M}$ )	ABS Reading (y)	ความเข้มข้น Cys ที่คำนวณได้ (x) ( $\mu\text{M}$ )	%Error
250	1.013	315.52	26.21
550	1.011	552.47	0.45
850	1.009	606.39	28.66

ก.5.3 การคำนวณความเข้มข้นของกลูต้าไธโอน และการหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการใช้สมการมาตรฐานทำนายความเข้มข้น

(1) ผลของกลูต้าไธโอนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย

$20.5 \pm 4.5$  nm

จากความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm เป็นสัดส่วนกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm เมื่อเติมกลูต้าไธโอนและสร้างกราฟมาตรฐานด้วย excel ดังแสดงในบทที่ 4 ภาพที่ 4.29

จากกราฟจะได้ 2 ความสัมพันธ์ ได้แก่

$$(1) 0 - 400 \mu\text{M} \quad : \quad y = -3 \times 10^{-9} x^2 - 3 \times 10^{-6} x + 1.0153$$

$$(2) 400 - 1,000 \mu\text{M} \quad : \quad y = -8 \times 10^{-8} x^2 + 6 \times 10^{-5} x + 1.0017$$

โดยที่

y คือ  $\frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm}}$

x คือ ความเข้มข้นกลูต้าไธโอนที่คำนวณได้

ตัวอย่างการคำนวณ เตรียมความเข้มข้น GSH ที่ 550  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 1 ml ลงในสารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำขนาด  $20.5 \pm 4.5$  nm ปริมาตร 3 ml ทำปฏิกิริยาที่ความร้อน  $80^\circ\text{C}$  พร้อมด้วยการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm และ ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm เมื่อเติม Cys เพื่อทดสอบการใช้สมการมาตรฐานจากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ ดังนี้

$$\text{วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm} = 0.4995$$

$$\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm} = 0.4934$$

$$y = \frac{0.4995}{0.4934} = 1.012$$

แก้สมการพหุนามกำลัง 2 จะได้คำตอบ 2 ค่า ให้เลือกคำตอบที่มีค่าเป็นบวกและไม่เกินความเข้มข้นของ GSH พิจารณา จะได้ว่า

$$x = 483.97$$

ดังนั้น ความเข้มข้นที่คำนวณได้จากสมการมาตรฐาน เท่ากับ  $483.97 \mu\text{M}$  เนื่องจากความเข้มข้นที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ  $550 \mu\text{M}$  ดังนั้นจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{\%ความคลาดเคลื่อน (\%Error)} &= \frac{|\text{ความเข้มข้นที่กำหนด} - \text{ความเข้มข้นที่คำนวณได้}|}{\text{ความเข้มข้นที่กำหนด}} \times 100 \\ \text{\%ความคลาดเคลื่อน} &= \frac{|550 - 483.97|}{550} \times 100 = 12.01 \text{ \%} \end{aligned}$$

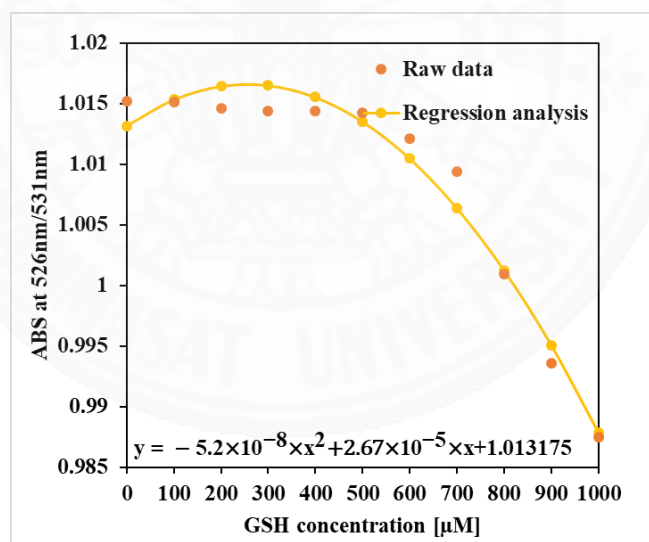
เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นไม่ทราบค่า คำนวณความเข้มข้นที่ได้จากการใช้สมการข้างต้น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น แสดงผลการคำนวณทั้งหมดให้เห็นดังตารางที่ ก.14

ตารางที่ ก.14

ผลการทดสอบสมการมาตรฐานจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ด้วยสารละลาย GSH ที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น ไม่ทราบค่าของ GSH ( $\mu\text{M}$ )	ABS Reading (y)	ความเข้มข้น GSH ที่คำนวณได้ (x) ( $\mu\text{M}$ )	%Error
250	1.014	326.64	30.66
550	1.012	483.97	12.01
850	1	777.34	8.55

การสร้างสมการมาตรฐานด้วยการใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพที่ ก.5



ภาพที่ ก.5 กราฟมาตรฐานจากการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 531 nm เทียบกับความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนในช่วงความเข้มข้น 0 - 1000  $\mu\text{M}$

จะได้สมการความสัมพันธ์ ได้แก่

$$y = -5.2 \times 10^{-8}x^2 + 2.67 \times 10^{-5}x + 1.013175$$

เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นไม่ทราบค่า คำนวณความเข้มข้นที่ได้จากการใช้สมการข้างต้น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น แสดงผลให้เห็นดังตารางที่ ก.15

ตารางที่ ก.15

ผลการทดสอบสมการมาตรฐานด้วยการวิเคราะห์จากการถดถอยจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $20.5 \pm 4.5$  nm ด้วยสารละลาย GSH ที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น ไม่ทราบค่าของ GSH ( $\mu\text{M}$ )	ABS Reading (y)	ความเข้มข้น GSH ที่คำนวณได้ (x) ( $\mu\text{M}$ )	%Error
250	1.014	482.85	48.22
550	1.012	542.28	1.42
850	1	818.52	3.85

## (2) ผลของกลูต้าไธโอนต่อคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย

$23 \pm 7$  nm

จากความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm เป็นสัดส่วนกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 550 nm เมื่อเติมกลูต้าไธโอนและสร้างกราฟมาตรฐานด้วย excel ดังแสดงในบทที่ 4 ภาพที่ 4.31

จากกราฟจะได้ 2 ความสัมพันธ์ ได้แก่

$$(1) 0 - 600 \mu\text{M} \quad : \quad y = -5 \times 10^{-7} x^2 + 0.0001x + 1.1208$$

$$(2) 700 - 1,000 \mu\text{M} \quad : \quad y = 8 \times 10^{-7} x^2 - 0.0018x + 1.9049$$

โดยที่

$$y \text{ คือ } \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 550 nm}}$$

$$x \text{ คือ ความเข้มข้นกลูต้าไธโอนที่คำนวณได้}$$

ตัวอย่างการคำนวณ เตรียมความเข้มข้น GSH ที่ 850  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 1 ml ลงในสารคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำขนาด  $23 \pm 7$  nm ปริมาตร 3 ml ทำปฏิกิริยาที่ความร้อน  $80^\circ\text{C}$  พร้อมด้วยการสั่นด้วยเสียงเป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 526 nm และ ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm เมื่อเติม Cys เพื่อทดสอบการใช้สมการมาตรฐานจากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ ดังนี้

$$\text{วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm} = 0.4894$$

$$\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 550 nm} = 0.5066$$

$$y = \frac{0.4894}{0.5066} = 0.966$$

แก้สมการพหุนามกำลัง 2 จะได้คำตอบ 2 ค่า ให้เลือกคำตอบที่มีค่าเป็นบวกและไม่เกินความเข้มข้นของ GSH พิจารณา จะได้ว่า

$$x = 821.68$$

ดังนั้น ความเข้มข้นที่คำนวณได้จากสมการมาตรฐาน เท่ากับ  $821.68 \mu\text{M}$  เนื่องจากความเข้มข้นที่ใช้ทดสอบ เท่ากับ  $850 \mu\text{M}$  ดังนั้นจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ดังนี้

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน (\%Error)} = \frac{|\text{ความเข้มข้นที่กำหนด} - \text{ความเข้มข้นที่คำนวณได้}|}{\text{ความเข้มข้นที่กำหนด}} \times 100$$

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|850 - 821.68|}{850} \times 100 = 3.33\%$$

เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นไม่ทราบค่า คำนวณความเข้มข้นที่ได้จากการใช้สมการข้างต้น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น แสดงผลการคำนวณทั้งหมดให้เห็นดังตารางที่ ก.16

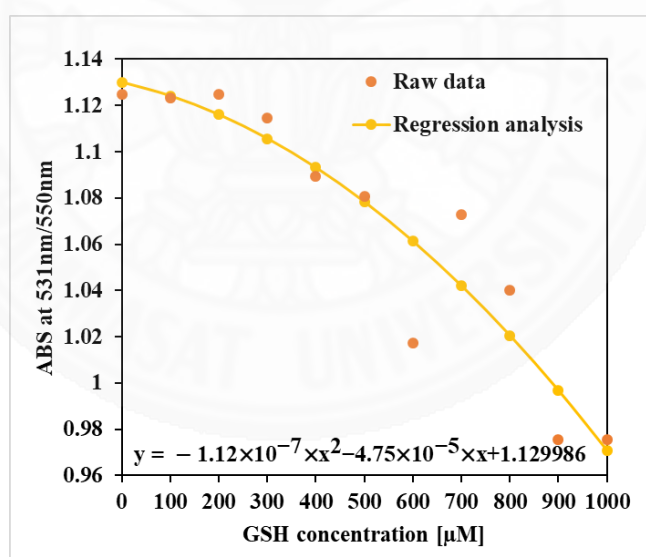


ตารางที่ ก.16

ผลการทดสอบสมการมาตรฐานจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ด้วยสารละลาย GSH ที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น ไม่ทราบค่าของ GSH ( $\mu\text{M}$ )	ABS Reading (y)	ความเข้มข้น GSH ที่คำนวณได้ (x) ( $\mu\text{M}$ )	%Error
250	1.21	246.97	1.21
550	5.20	521.43	5.20
850	3.33	821.68	3.33

การสร้างสมการมาตรฐานด้วยการใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพที่ ก.6



ภาพที่ ก.6 กราฟมาตรฐานจากการวิเคราะห์การถดถอยของสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 531 nm เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 550 nm เทียบกับความเข้มข้นของกลูต้าไธโอนในช่วงความเข้มข้น 0 - 1000  $\mu\text{M}$

จะได้สมการความสัมพันธ์ได้แก่

$$y = -1.12 \times 10^{-7}x^2 - 4.75 \times 10^{-5}x + 1.129986$$

เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นไม่ทราบค่า คำนวณความเข้มข้นที่ได้จากการใช้สมการข้างต้น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น แสดงผลให้เห็นดังตารางที่ ก.17

ตารางที่ ก.17

ผลการทดสอบสมการมาตรฐานด้วยการวิเคราะห์จากกราฟถดถอยจากอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 7$  nm ด้วยสารละลาย GSH ที่ความเข้มข้น 250, 550 และ 850  $\mu\text{M}$

ความเข้มข้น ไม่ทราบค่าของ GSH ( $\mu\text{M}$ )	ABS Reading (y)	ความเข้มข้น GSH ที่คำนวณได้ (x) ( $\mu\text{M}$ )	%Error
250	1.014	120.41	107.62
550	1.012	725.52	24.19
850	1	1016.47	16.38

## ภาคผนวก ข.

คุณสมบัติ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบส  
และตำแหน่งความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสง

ตารางที่ ข.1

ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ในเซรัมที่ได้จากการจับ  
ก้อนยางด้วยสารละลาย  $H_2SO_4$  ความเข้มข้น 3% (เซรัมมีค่า pH เท่ากับ 5.76 ) ด้วยสัดส่วนการเจือ  
จางที่แตกต่างกัน ณ เวลาเริ่มต้นและเวลาหลังจากเกิดปฏิกิริยาที่ 15 นาที

Dilution factor of serum	Initial of reaction		15 min of reaction	
	pH	Conductivity ( $\mu S$ )	pH	Conductivity ( $\mu S$ )
4	5.09	4550	4.83	4420
6	4.74	2860	4.48	2720
8	4.21	1880	3.97	1960
10	3.73	1390	3.55	1420

ตารางที่ ข.2

ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ในเซรัมที่ได้จากการจับ  
ก้อนยางด้วยสารละลาย  $CH_3COOH$  ความเข้มข้น 3% (เซรัมมีค่า pH เท่ากับ 5.66 ) ด้วยสัดส่วนการ  
เจือจางที่แตกต่างกัน ณ เวลาเริ่มต้นและเวลาหลังจากเกิดปฏิกิริยาที่ 30 นาที

Dilution factor of serum	Initial of reaction time		30 min of reaction time	
	pH	Conductivity ( $\mu S$ )	pH	Conductivity ( $\mu S$ )
non-dilution	5.61	inexplicable	5.65	inexplicable
2	5.43	6950	5.46	6740
4	5.22	3680	5.21	3630
6	5.05	2370	4.99	2420

## ตารางที่ ข.2

ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ในเซรัมที่ได้จากการจับก้อนยางด้วยสารละลาย  $\text{CH}_3\text{COOH}$  ความเข้มข้น 3% (เซรัมมีค่า pH เท่ากับ 5.66 ) ด้วยสัดส่วนการเจือจางที่แตกต่างกัน ณ เวลาเริ่มต้นและเวลาหลังจากเกิดปฏิกิริยาที่ 30 นาที (ต่อ)

Dilution factor of serum	Initial of reaction time		30 min of reaction time	
	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )		pH
8	4.85	1670	4.85	1660
10	4.67	1280	4.75	1350

## ตารางที่ ข.3

ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ในเซรัมที่ได้จากการจับก้อนยางด้วยสารละลาย PAM ความเข้มข้น 0.5% ด้วยสัดส่วนการเจือจางที่แตกต่างกัน ณ เวลาเริ่มต้นและเวลาหลังจากเกิดปฏิกิริยาที่ 3 ชั่วโมง

Dilution factor of serum	Initial time		3 hours reaction time	
	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )
non-dilution	10.41	6020	10.37	6110
3	9.86	2670	9.72	2650
5	8.97	2020	9.29	1960
7	7.67	1730	8.47	1720
8	7.04	1580	8.3	1610
9	6.55	1380	7.90	1430
10	6.02	1220	5.86	1340

ตารางที่ ข.4

ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ในเซรัมจากทางน้ำยาง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกในการจับก้อนยางแตกต่างกัน ได้แก่ 1.5, 1.25, 1.0, 0.75, 0.50 และ 0.25 %w/v ณ เวลาเริ่มต้นและเวลาหลังจากเกิดปฏิกิริยาที่ 3 ชั่วโมง

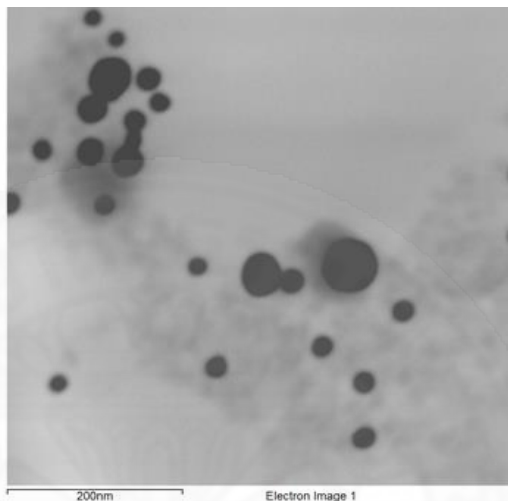
Concentration of PAM (%w/v)	Initial time		3 hours reaction time	
	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )
1.50	7.23	1370	8.33	1380
1.25	8.23	1420	8.38	1470
1.00	8.14	1380	8.74	1320
0.75	6.33	1140	7.79	1240
0.50	7.46	1300	8.57	1340
0.25	8.73	1260	8.93	1210

ตารางที่ ข.5

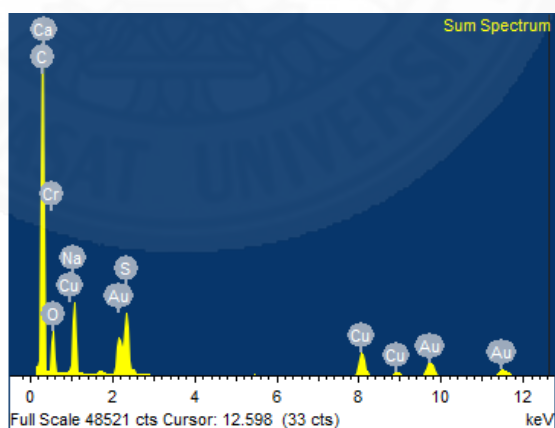
ค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาด  $20.5 \pm 4.5$  nm และ  $23 \pm 7$  nm เมื่อถูกปรับสภาวะความเป็นกรดด้วยสารละลายไฮดรอกลอริกเข้มข้น

Properties of AuNPs			
Size $20.5 \pm 4.5$ nm		Size $23 \pm 7$ nm	
pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )	pH	Conductivity ( $\mu\text{S}$ )
1.3	-	1.3	-
2.3	3520	2.5	2700
3.6	82.2	4.5	87.3
6.3	36.9	6.2	38.1

**ภาคผนวก ค.**  
**ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพด้วย**  
**Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDX)**



ภาพที่ ค.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของคอลลอยด์ที่นำไปตรวจ EDS ของอนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่สังเคราะห์ได้จากสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต 1.4 mM และสัดส่วนการเจือจางเซรัม 8 เท่า ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ ค.2 ผลการตรวจ EDS ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่สังเคราะห์ได้จากสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต 1.4 mM และสัดส่วนการเจือจางเซรัม 8 เท่า ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

## ตาราง ค.1

ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของธาตุที่วัดได้จาก EDS ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำในน้ำที่  
สังเคราะห์ได้จากสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต 1.4 mM และสัปดาห์การเจือจางเซรัม 8 เท่า  
ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

Element	Weight%	Atomic%
C K	59.98	82.65
O K	5.75	5.94
Na K	6.89	4.96
S K	7.03	3.63
Ca K	0.05	0.02
Cr K	0.16	0.05
Cu K	5.97	1.56
Au L	14.17	1.19
<b>Totals</b>	100.00	

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวปาลิดา พงศานนท์
วันเดือนปีเกิด	18 มกราคม 2538
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2559: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ทุนการศึกษา	ปีงบประมาณ 2560: ทุนการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

## ผลงานทางวิชาการ

- ปาริชาติ คงเล็ก, ปาลิดา พงศานนท์ และ ภาณุ ตำนานิชกุล. (2560). *การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยใช้หางน้ำยางและการประยุกต์ใช้*. (ปริญญาานิพนธ์ระดับปริญญาตรี). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมเคมี
- ปาลิดา พงศานนท์ และ ภาณุ ตำนานิชกุล. (2563). การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยใช้เซรัมที่เตรียมจากหางน้ำยางธรรมชาติ: ผลของสารจับก้อนยางที่เหลือ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 28 (2).