

# การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยใช้เซรัม ที่เตรียมจากหางน้ำยางธรรมชาติ : ผลของสารจับก้อนยางที่เหลือ

## Synthesis of Gold Nanoparticles Using Serum from Skim Natural Rubber Latex: The Effect of Remaining Coagulants

ปาไลดา พงสานนท์ และภาณุ ต่านวานิชกุล\*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Palida Pongsanon and Panu Danwanichakul\*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University,  
Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้เซรัมจากหางน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำยางข้น เพื่อใช้เป็นตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มความเสถียรในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สารจับก้อนยางที่ใช้ศึกษาได้แก่ สารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายกรดอะซิติก และสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ ประจุบวก การทดลองนำเซรัมที่เจือจางด้วยน้ำในสัดส่วนต่าง ๆ ผสมกับสารละลายโกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรตที่ทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นในการให้ออกอนของทองคำ ผลการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้มีขนาดใหญ่ เซรัมที่มีกรดซัลฟิวริกหลงเหลืออยู่ ขณะที่เซรัมที่มีกรดอะซิติกและพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกหลงเหลืออยู่ ได้คอลลอยด์ของอนุภาคนาโนทองคำที่มีความเสถียร โดยมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร อย่างไรก็ตาม ความเสถียรของระบบคอลลอยด์เมื่อทำปฏิกิริยาการสังเคราะห์เป็นเวลานาน พบว่าระบบที่ใช้พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกมีความเสถียรของคอลลอยด์สูงที่สุด การศึกษานี้ยังพบว่าการเจือจางเซรัมเป็นปัจจัยที่จำเป็นในการสังเคราะห์ เนื่องจากการควบคุมปฏิกิริยาทำได้เมื่อความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มความเสถียรไม่สูงเกินไป ภาพแสดงสัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่มีพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกมีขนาด 5-45 นาโนเมตร หรือมีขนาดเฉลี่ย  $23 \pm 2$  นาโนเมตร

**คำสำคัญ :** อนุภาคนาโนทองคำ; หางน้ำยางธรรมชาติ; กรดซัลฟิวริก; กรดอะซิติก; พอลิอะคริลาไมด์

## Abstract

This research proposed the use of the serum from the skim natural rubber latex (SNRL), the waste from the concentrated latex production, as a source of reducing and stabilizing agents in a green synthesis of gold nanoparticles (AuNPs). The coagulants including  $H_2SO_4$ ,  $CH_3COOH$ , and cationic polyacrylamide (PAM) solutions were used to remove rubber particles and the serums with remaining coagulants were obtained. The serum was diluted with water for various dilution factors and then mixed with gold (III) chloride trihydrate ( $HAuCl_4 \cdot 3H_2O$ ). The results showed that the serum with remaining  $H_2SO_4$  gave large particles, while the serums with both  $CH_3COOH$  and PAM could stabilize and yield AuNPs, of which the characteristic absorbance peaks around 530 nm were observed. However, regarding the degree of colloidal stability when the reaction was prolonged, the serum with PAM was superior. Dilution of the serum was found necessary since the reaction could be controlled when the concentrations of both reducing and stabilizing agents were not too high. Figures from Transmission Electron Microscope (TEM) confirmed that using the serum with PAM, the AuNPs were synthesized and had the size ranged from 5-45 nm or the average diameter of  $23 \pm 2$  nm.

**Keywords:** gold nanoparticle; skim natural rubber latex; sulfuric acid; acetic acid; polyacrylamide

## 1. บทนำ

การผลิตน้ำยางชั้นจากต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis* Muel. Arg.) ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เมื่อหมุนเหวี่ยงน้ำยางสดจะได้หางน้ำยาง (skim natural rubber latex, SNRL) เป็นผลพลอยได้ในปริมาณมาก หางน้ำยางประกอบด้วยอนุภาคยางประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแขวนลอยอยู่ในเซรัม (serum) ร่วมกับสาร อินทรีย์อื่น ๆ ได้แก่ น้ำตาลหลายชนิด เช่น กลูโคส (glucose) ฟอสโฟลิปิด (phospholipid) กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) และโปรตีน (protein) เป็นต้น งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของเงิน (silver nanoparticle, AgNP) ในหางน้ำยางที่ถูกเจือจาง [1] เพราะสารอินทรีย์บางชนิด เช่น น้ำตาลในหางน้ำยางสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) และโปรตีนทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเสถียร (stabilizing

agent) ให้กับระบบคอลลอยด์ของอนุภาคนาโนของเงิน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้โดยตรงกับผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเพิ่มสมบัติการต่อต้านแบคทีเรีย (antibacterial) หรือสามารถแยกอนุภาคนาโนของเงินออกในภายหลังเพื่อใช้ประโยชน์อื่น ๆ อย่างไรก็ตาม การที่มีอนุภาคยางอยู่ร่วมในระหว่างการสังเคราะห์นั้น พบว่าเป็นอุปสรรคในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนในระบบที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากสาร ละลายไอออนของโลหะที่มีประจุบวกโดยเฉพาะอย่างยิ่งประจุที่มีความวาเลนซ์สูง (high valence) เช่น  $Au^{3+}$  ที่ความเข้มข้นสูง จะเกิดแรงทางไฟฟ้าสถิตดึงดูดกับประจุลบที่อยู่บนผิวของอนุภาคยาง ทำให้ระบบคอลลอยด์ของอนุภาคยางเกิดความไม่เสถียร จึงเกิดการจับก้อนของอนุภาคยางขึ้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาเฉพาะส่วนที่เป็นเซรัมเท่านั้น โดยปกติโรงงานผลิตน้ำยางชั้นนิยมใช้กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid,  $H_2SO_4$ ) ในการจับก้อน

ทางน้ำยาง เมื่อแยกยางออกไปแล้ว จะเหลือเซรัมที่มีความเป็นกรดสูง จำเป็นต้องปรับให้เป็นกลางและลดค่าพีเอชก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากในเซรัมยังมีสารที่น่าจะเป็นประโยชน์ต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนอยู่ จึงน่าจะนำมาใช้แทนสารเคมีอื่น ๆ ในการสังเคราะห์ได้ เช่น ไตรโซเดียมซิเตรต (trisodium citrate) [2,3] งานวิจัยนี้สนใจการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองคำ (gold nanoparticle, AuNP) ซึ่งมีสมบัติเฉพาะที่น่าสนใจมากมาย เช่น สมบัติเชิงแสงและสมบัติเชิงไฟฟ้า โดยสมบัติเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเซนเซอร์ประสิทธิภาพสูงโดยใช้สมบัติการเปลี่ยนสี [3] ตัวอย่าง เช่น เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดซิสทีน (cysteine) และกลูตาไทโอน (glutathione) โดยอาศัยหลักการการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนทองคำที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนสี [4] เซนเซอร์ตรวจวัดโปรตีน [5] หรือเซนเซอร์ตรวจวัดปรอท [6] เป็นต้น นอกจากนี้อนุภาคนาโนทองคำยังใช้เป็นตัวเร่งได้ด้วย เช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลาย 4-ไนโตรฟินอล (4-nitrophenol, 4-NP) ไปเป็น 4-อะมิโนฟินอล (4-aminophenol) [7] ปัจจุบันการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองคำด้วยวิธีการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (green synthesis) กำลังเป็นที่สนใจอย่างมาก โดยการใช้สารสกัดจากวัสดุธรรมชาติที่ต่างกันเป็นแหล่งของตัวรีดิวซ์ [8-14] ซึ่งในงานวิจัยเหล่านี้พบว่าอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้มีขนาด 10-50 นาโนเมตร (nm) ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520-550 nm และคอลลอยด์ของอนุภาคนาโนทองคำมีสีไวน์แดง

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการใช้ประโยชน์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยใช้สารจับก้อน 2 ชนิด คือ สารละลายกรดอะซิติก (acetic acid,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) และสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ (polyacrylamide,

PAM) โดยเปรียบเทียบกับสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ซึ่งเป็นสารจับก้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำยางชันในปัจจุบัน การจับก้อนนี้มาจากทางน้ำยางด้วยสารละลายกรดอะซิติกซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่ย่อยได้ง่ายด้วยจุลินทรีย์ (microorganism) ส่วนพอลิอะคริลาไมด์เป็นพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารจับก้อนโดยทั่วไปในการรวมตะกอนของแข็งในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั้งในเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม [15-17] งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารจับก้อนที่ยังคงเหลืออยู่ในเซรัมต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ โดยศึกษาการเจือจางเซรัมด้วยน้ำด้วยสัดส่วนที่ต่างกัน และกำหนดให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เป็นตัวให้อิออนของทองคำคงที่

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 วัสดุ

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยทางน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยอีสเทิร์น จำกัด (ประเทศไทย) ทางน้ำยางที่ได้รับมามีปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber content) 3.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นด่างหรือปริมาณแอมโมเนีย 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต [gold (III) chloride trihydrate,  $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ] จาก Sigma Aldrich จำกัด (ประเทศสหรัฐอเมริกา) พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก (cationic polyacrylamide, PAM) จากบริษัท Water Doctor จำกัด (ประเทศไทย) กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) จากบริษัท Tyco จำกัด (ประเทศสหรัฐอเมริกา) และกรดอะซิติก (acetic acid,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) จากบริษัท Merck จำกัด (ประเทศเยอรมนี) โดยสารทุกชนิดนำไปใช้เลย (ไม่ได้ผ่านกระบวนการอีก)

### 2.2 การเตรียมเซรัมและการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

2.2.1 เซรัมที่เตรียมจากการจับก้อนเนื้อ  
อย่างด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก

เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความ  
เข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตร 25 มิลลิลิตร  
ลงในทางน้ำยงที่มีปริมาตร 70 มิลลิลิตร ซึ่งทำให้มีค่า  
ความเป็นกรด-เบส (pH) ประมาณ 5.76 ณ จุดนี้  
อนุภาคของยางจะเกิดการจับก้อน กรองของผสมด้วย  
ผ้ากรองไนลอนเพื่อแยกอนุภาคยางที่จับก้อนออก จึง  
จะได้เซรัม จากนั้นเจือจางเซรัมด้วยสัดส่วนการเจือจาง  
(the dilution factor) ต่างกัน ได้แก่ 4, 6, 8 และ 10  
เท่า แล้วจึงผสมเซรัมที่มีสัดส่วนการเจือจางแตกต่างกัน  
นี้กับสารละลายโกลด์คอลลอยด์ไตรไฮเดรตที่มีความ  
เข้มข้น 0.8 มิลลิโมลาร์ นำสารผสมไปแช่ในเครื่องล้าง  
ระบบอัลตราโซนิค (ultrasonic cleaner) รุ่น VGT-  
1860 QTD ของบริษัท GT sonic จำกัด โดยให้ความ  
ร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จน  
สังเกตเห็นการเกิดตะกอนของอนุภาคทองคำในสาร  
ผสม จากนั้นนำสารผสมไปตรวจวัดคุณลักษณะต่าง ๆ  
ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบสด้วยเครื่องวัดความเป็น  
กรด-เบส รุ่น pHTestr® 30 ของบริษัท Oakton  
จำกัด ค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า รุ่น  
COM-100 ของบริษัท HM digital จำกัด และค่าการ  
ดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืน  
แสงชนิดคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible  
spectrometer) รุ่น V5100 ของบริษัท Metash จำกัด

2.2.2 เซรัมที่เตรียมจากการจับก้อนเนื้อ  
อย่างด้วยสารละลายกรดอะซิติก

เติมสารละลายกรดอะซิติกที่มีความ  
เข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตร 35 มิลลิลิตร  
ลงในทางน้ำยงที่มีปริมาตร 70 มิลลิลิตร ซึ่งทำให้สาร  
ผสมมีค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ pH 5.66 อนุภาค  
ยางจะเกิดการจับก้อน กรองด้วยผ้ากรองไนลอนเพื่อ  
แยกอนุภาคยางที่จับก้อนออกจึงได้เซรัม แล้วเจือจาง

เซรัมด้วยน้ำที่สัดส่วนการเจือจางต่าง ๆ ได้แก่ 2, 4, 6,  
8 และ 10 เท่า จากนั้นผสมเซรัมแต่ละการเจือจางกับ  
สารละลายโกลด์คอลลอยด์ไตรไฮเดรตที่มีความเข้มข้น  
0.8 มิลลิโมลาร์ แล้วนำสารผสมไปแช่ในเครื่องล้าง  
ระบบอัลตราโซนิคและให้ความร้อนที่ 80 องศา  
เซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารผสมไป  
ตรวจวัดคุณลักษณะต่าง ๆ เช่นเดียวกับข้อ 2.2.1

2.2.3 เซรัมที่เตรียมจากการจับก้อนเนื้อ  
อย่างด้วยสารละลายพอลิอะคริลไมด์ประจุบวก

เติมสารละลายพอลิอะคริลไมด์ประจุ  
บวกที่มีความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อ  
ปริมาตร ปริมาณ 350 มิลลิลิตร ลงในทางน้ำยงที่มี  
ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ซึ่งทำให้สารผสมมีค่าความเป็น  
กรด-เบสอยู่ที่ 10.5 เมื่ออนุภาคยางเกิดการจับก้อนจึง  
กรองด้วยผ้ากรองไนลอนเพื่อแยกอนุภาคยางออกจึง  
จะได้เซรัม แล้วเจือจางเซรัมที่มีสัดส่วนการเจือจาง  
ต่าง ๆ ได้แก่ 3, 5, 7, 8, 9 และ 10 เท่า จากนั้นผสม  
เซรัมที่มีสัดส่วนการเจือจางต่าง ๆ นี้กับสารละลาย  
โกลด์คอลลอยด์ไตรไฮเดรตที่มีความเข้มข้น 0.8 มิลลิ  
โมลาร์ แล้วจึงนำสารผสมไปแช่ในเครื่องล้างระบบ  
อัลตราโซนิคที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง  
จากนั้นนำสารผสมไปตรวจวัดคุณลักษณะต่าง ๆ  
ดังเช่นข้อ 2.2.1

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของการใช้สาร  
ละลายพอลิอะคริลไมด์ประจุบวกที่ต่างกันในกร  
จับก้อนยาง โดยคาดว่าจะมีพอลิอะคริลไมด์ประจุ  
บวกเหลือตกค้างในเซรัมด้วยปริมาณที่ต่างกัน ในการ  
ทดลองนี้ใช้สารละลายพอลิอะคริลไมด์ประจุบวกที่มี  
ความเข้มข้น 1.5, 1.25, 1.00, 0.75, 0.50 และ 0.25  
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และใช้เซรัมที่มีการ  
เจือจาง 8 เท่า ผสมกับสารละลายโกลด์คอลลอยด์ไตร  
ไฮเดรตที่มีความเข้มข้น 0.8 มิลลิโมลาร์ เพื่อให้ได้  
อนุภาคนาโนทองคำ จากนั้นตรวจวัดคุณลักษณะ

เช่นเดียวกับข้างต้น และศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคโดยถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM)

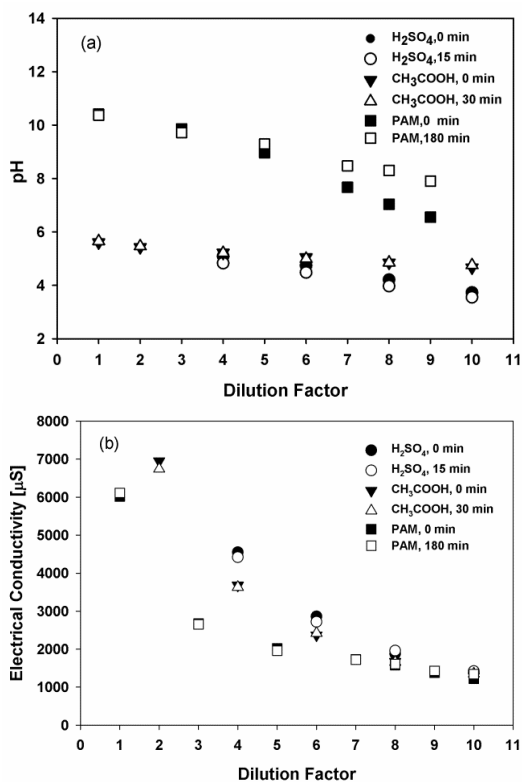


Figure 1 The (a) pH and (b) conductivity of AuNPs colloidal systems at the initial time and the later times of reaction for various serum conditions.

### 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

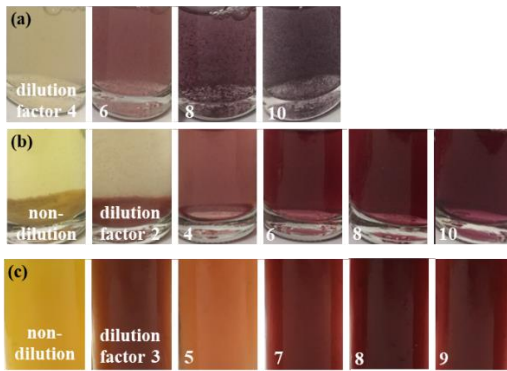
#### 3.1 ค่าความเป็นกรด-เบส ค่าการนำไฟฟ้า และลักษณะของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ

รูปที่ 1a และ 1b แสดงให้เห็นว่าสภาวะเริ่มต้นของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำในเซรัมหลังการจับก้อนยางด้วยสารละลายกรดจะมีสภาพเป็นกรด ซึ่งบอกเป็นนัยว่ากรดที่เติมลงไปได้ทำปฏิกิริยากับ

แอมโมเนียที่มีในหางน้ำยาง ในขณะที่เซรัมที่เหลือสารจับก้อนด้วยสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกจะมีสภาพเป็นเบสจากปริมาณของแอมโมเนียที่ยังคงเหลือค้างอยู่ในหางน้ำยางแต่เดิม และเมื่อเจือจางหางน้ำยางมากขึ้น ค่าของความเป็นกรด-เบสและค่าการนำไฟฟ้าของเซรัมลดลงตามการเจือจาง จะเห็นได้ชัดว่าค่าการนำไฟฟ้าของคอลลอยด์ในระบบที่ใช้สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกจับก้อนยางนั้นจะมีค่าลดลงกว่าระบบที่เป็นกรด เนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุบวกที่อยู่บนสายโซ่ของพอลิอะคริลาไมด์นั้นไม่ว่องไวนักเมื่อเปรียบเทียบกับประจุอิสระของกรด อย่างไรก็ตาม ที่สัดส่วนการเจือจางเซรัมสูงส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของระบบที่ใช้สารจับก้อนต่างกันมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังสัดส่วนการเจือจางที่ 5-10 เท่า (รูปที่ 1b) ค่าความเป็นกรด-เบสของระบบที่มีความเป็นกรดจะเปลี่ยนแปลงไม่มากเพราะปฏิกิริยาถูกหยุดที่ระยะเวลาสั้น คือ 15 นาที สำหรับระบบที่ใช้กรดซัลฟิวริกเมื่อเริ่มสังเกตเห็นตะกอนเกิดขึ้น และ 30 นาที สำหรับระบบที่ใช้กรดอะซิติก ดังแสดงในรูปที่ 2a และ 2b ขณะที่ระบบที่ใช้พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกนั้นพบว่าคอลลอยด์ยังคงเป็นสารเนื้อเดียว (homogeneous) โดยไม่เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคถึงแม้ว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจะนานถึง 3 ชั่วโมง ก็ตาม

เมื่อสังเกตสีของสารคอลลอยด์ในรูปที่ 2 จะพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเจือจางเซรัม 10 เท่า สีของสารละลายในระบบกรดซัลฟิวริกเปลี่ยนจากแดงอมม่วงไปเป็นสีฟ้าอมม่วง และสังเกตเห็นการกระจายของกลุ่มอนุภาคในสารผสม ในระบบของกรดอะซิติกนั้นสีของสารผสมจะเปลี่ยนจากเหลืองซึ่งเป็นสีเริ่มต้นจากสีของสารตั้งต้นที่ให้ไอออนทองคำ เป็นชมพู และสีไวน์แดงเข้มตามลำดับ โดยลักษณะของการเปลี่ยนสีในขณะที่เกิดอนุภาคนาโนทองคำนี้สอดคล้องกับที่พบใน

งานวิจัยที่เคยมีรายงานมาแล้ว [8-14] สำหรับระบบของพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกก็แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสีของสารผสมจากเหลือง เป็นชมพู และสีไวน์แดงเข้มตามลำดับเช่นเดียวกัน โดยไม่สังเกตเห็นกลุ่มของอนุภาคอย่างในกรณีของระบบที่ใช้กรดข้างต้น



**Figure 2** The color change of AuNPs colloidal systems with (a)  $H_2SO_4$ , (b)  $CH_3COOH$  and (c) PAM.

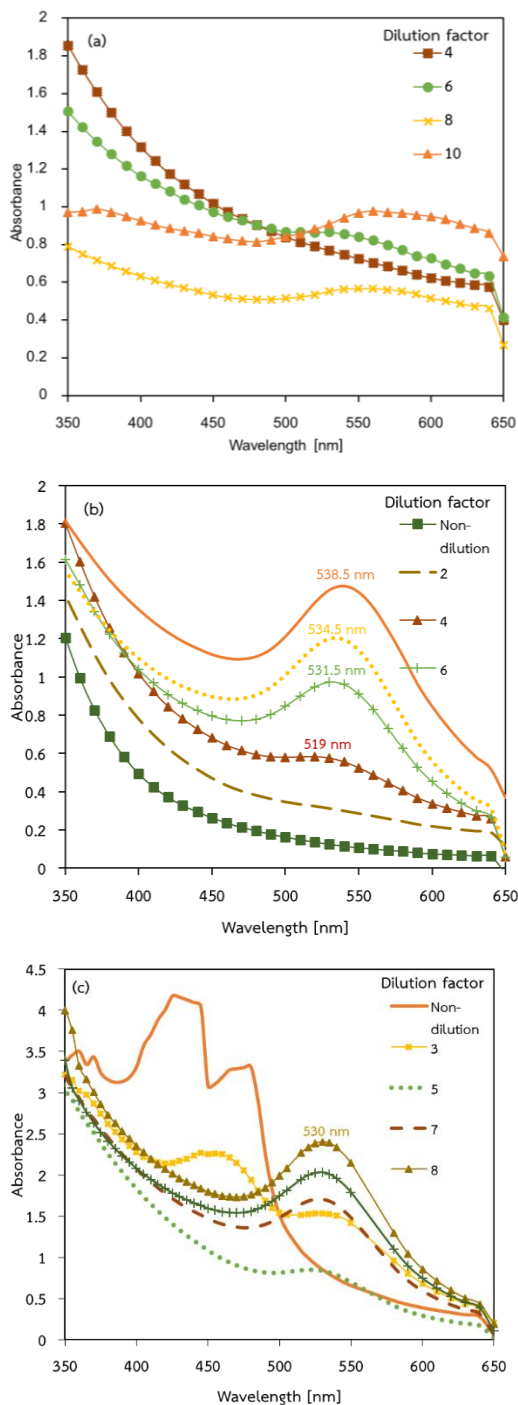
### 3.2 ค่าการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำ

งานวิจัยที่เคยมีรายงานมาแล้ว [8-14] นั้นพบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (absorbance peak) ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำอยู่ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 520-550 นาโนเมตร แสดงถึงปรากฏการณ์การเกิดเรโซแนนซ์ของพลาสมอนที่พื้นผิว (surface plasmon resonance) ของอนุภาคนาโนทองคำ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้กรดดังแสดงในรูปที่ 3a และ 3b แล้วจะพบว่าระบบของกรดซัลฟิวริกจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่น้อยและค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดก็ไม่ชัดเจนนัก แต่ในระบบของกรดอะซิติกนั้นจะแสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ชัดเจน โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเจือจางเซรัมจาก 4 เท่าไปจนถึง 10 เท่า ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าขยับสูงขึ้นและเกิดการ

เลื่อนตำแหน่งไปยังตำแหน่งที่มีความยาวคลื่นที่สูงขึ้น นั่นคือ เลื่อนจาก 519 ไปเป็น 538.5 นาโนเมตร หรือที่เรียกกันว่าบลูชิฟต์ (blue shift) ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดอนุภาคทองคำที่มากขึ้น และขณะเดียวกันก็มีอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เกิดมากขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อมีการเจือจางเซรัม สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ เช่น น้ำตาลชนิดต่าง ๆ รวมถึงกรดอะซิติกก็จะเจือจางลง และสารที่ช่วยเพิ่มความเสถียร เช่น โปรตีน ก็ถูกเจือจางลงเช่นกัน ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าถึงแม้จะเจือจางเซรัมลง 10 เท่า ปริมาณของตัวรีดิวซ์ก็ยังคงมากเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา และทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดด้วย แต่เนื่องจากปริมาณโปรตีนและอะซิเตทไอออนที่เป็นประจุลบที่เป็นสารช่วยควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนทองคำก็ลดลงด้วยจึงส่งผลต่อความเสถียรของอนุภาคนาโน อะซิเตทไอออนนั้นสามารถดูดซับบนผิวของอนุภาคนาโนทองคำและสร้างชั้นประจุสองชั้น (double layer) ซึ่งช่วยผลักให้อนุภาคนาโนของทองคำไม่เกาะรวมตัวกัน จึงเป็นผลทำให้คอลลอยด์สามารถอยู่ในระบบได้อย่างเสถียรภาพมากขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Hormozi-Nezhad และคณะ [3]

ระบบของพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากระบบนี้แสดงให้เห็นความเสถียรของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ในระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยานานถึง 3 ชั่วโมง โดยปราศจากการตกตะกอน หรือเกิดรวมกลุ่มกันเองของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 3c เมื่อใช้เซรัมที่ไม่ได้เจือจางจะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง 425 และ 460 นาโนเมตร ตำแหน่งที่ 425 นาโนเมตรแสดงถึงการเกิดไอออนเชิงซ้อน (complex ion) ระหว่างไอออนทองคำ  $Au^{3+}$  ของสารตั้งต้นและแอมโมเนียที่อยู่ในหาน้ำย้างแต่เดิมเป็น  $[Au(NH_3)_2]^{3+}$  ดังรายงานวิจัยของ Pandey และคณะ [10] ส่วนตำแหน่ง 460 นาโนเมตร

คือ ตำแหน่งของอนุภาคนาโนทองคำ เมื่อเซรัมถูกเจือจางมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 460 นาโนเมตร จะหายไป แต่ที่ตำแหน่ง 530 นาโนเมตรจะปรากฏชัดเจนขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดไอออนเชิงซ้อนน้อยลง แต่เกิดอนุภาคนาโนทองคำมากขึ้น โดยที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารผสมก่อนข้างคองที่ ดังแสดงในรูปที่ 1 a โดยค่าการดูดกลืนแสงจะสูงที่สุดเมื่อสังเคราะห์ในสัปดาห์การเจือจาง 8 เท่า ซึ่งหากสูงไปกว่านี้ความสามารถในการคุมขนาดอาจทำได้ยากขึ้น นอกเหนือจากนี้ค่าความเป็นกรด-เบสที่แสดงในรูปที่ 1a แสดงให้เห็นว่าเมื่อสัปดาห์การเจือจางเซรัมสูง ค่าความเป็นกรด-เบสของสารผสมหลังจากเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อตอนเริ่มทำปฏิกิริยาแอมโมเนียจะเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนกับไอออนทองคำ แต่เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดไอออนเชิงซ้อนเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ เมื่อไอออนทองคำถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาเกิดเป็นอนุภาคนาโนทองคำมากขึ้นในระหว่างเกิดปฏิกิริยา จะส่งผลให้ปฏิกิริยาของการเกิดไอออนเชิงซ้อนผันไปในทิศทางที่ให้ไอออนทองคำออกมาเพิ่มขึ้น เพื่อใช้ในปฏิกิริยาเกิดอนุภาคนาโนต่อไป แอมโมเนียจึงถูกปลดปล่อยออกมา สารผสมจึงมีค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้นที่เวลา 3 ชั่วโมง อนุภาคนาโนทองคำจากระบบพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกนี้สามารถเก็บรักษาในลักษณะสารคอลลอยด์ที่มีความเสถียรดี ซึ่งใกล้เคียงกับคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่ได้จากระบบกรดซัลฟิวริกที่มีขนาดใหญ่จนเกิดการตกตะกอน เนื่องจากความเสถียรที่ดีของระบบคอลลอยด์อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้นี้ จึงได้ศึกษาผลของปริมาณพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่ใช้ในการจับก้อนยาง ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณที่หลงเหลือในเซรัมเมื่อนำไปสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำต่อไปด้วย ดังจะแสดงผลให้เห็นในหัวข้อต่อไป



**Figure 3** The absorbance of AuNPs colloidal systems using SNRL serums with remaining different coagulants, (a) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, (b) CH<sub>3</sub>COOH and (c) PAM.

### 3.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่ใช้ในการจับก้อนยาง

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้เซรัมหลังจากจับก้อนยางออกไปด้วยสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่มีความเข้มข้นต่างกันแสดงดังในรูปที่ 4 เมื่อแปรค่าความเข้มข้นของของสารละลายที่ใช้เป็น 1.5, 1.25, 1.0, 0.75, 0.50 และ 0.25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้เป็น  $18 \pm 2$  นาโนเมตร สำหรับความเข้มข้นของของสารละลาย 0.25-0.75 % และ 1.50 % และ  $23 \pm 2$  นาโนเมตร สำหรับความเข้มข้นของของสารละลาย 1.00-1.25 % การเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหมดจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกในช่วง 0.25-1.5 % ไม่แสดงผลกระทบที่ชัดเจนต่อขนาดของอนุภาคนาโน มีความเป็นไปได้ว่าการละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกนั้นไม่สามารถทำให้พอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกกระจายตัวออกจากกันอย่างมีประสิทธิภาพ พอลิเมอร์มีโอกาสเกิดการเกี่ยวพันกัน (entanglement) กันได้มากขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นมากขึ้น ดังนั้นพอลิเมอร์อาจกระจายตัวได้ไม่ดีนักในการไปดูดซับที่ผิวของอนุภาคนาโนเพื่อคุมขนาดและเพิ่มความเสถียร อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเข้มข้นและโอกาสในการเกี่ยวพันกันนั้นส่งผลกระทบต่อความหนืดของสารละลายที่ใช้ การทดลองพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการจับก้อนยางคือการใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สามารถจับก้อนยางได้โดยไมใช้เวลานานเกินไปและสารละลายผสมไม่เหนียวเกินไป ทำให้สามารถเตรียมเซรัมได้โดยง่าย อีกทั้งยังประหยัด

วัตถุดิบด้วย

### 4. สรุป

งานวิจัยนี้เสนอแนวทางในการออกแบบกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้วัตถุดิบเหลือใช้ ซึ่งก็คือเซรัมที่ได้จากการจับก้อนเนื้อยางออกไปแล้วในโรงงานผลิตน้ำยางข้น การศึกษาพบว่าหากจะนำเซรัมของหางน้ำยางไปใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนนั้น ไม่ควรใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกในการจับก้อนยางดังที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากกรดซัลฟิวริกที่ตกค้างในเซรัมช่วยเร่งปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคนาโนให้เร็วเกินไป และในระบบนี้ไม่มีสารช่วยควบคุมขนาดและรักษาความเสถียรเพิ่มเติมนอกจากโปรตีนที่อยู่ในเซรัม จึงทำให้ได้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่และเกิดการจับกันเป็นตะกอนอย่างชัดเจน สารจับก้อนยางที่น่าสนใจ ได้แก่ สารละลายกรดอะซิติก และสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวก ในระบบกรดอะซิติกนั้นจะเห็นว่าสามารถหวนวงปฏิกิริยาให้หนาขึ้นกว่าการใช้กรดซัลฟิวริก และได้คอลลอยด์ที่มีความเสถียรขึ้น สำหรับระบบพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกนั้นพบว่าพอลิอะคริลาไมด์ประจุบวกที่ตกค้างสามารถทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเสถียรที่ดีให้กับระบบคอลลอยด์อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยานานถึง 3 ชั่วโมง โดยไม่ตกตะกอน และยังเก็บรักษาต่อไปในสภาวะคอลลอยด์ได้ งานวิจัยนี้ยังพบว่าการแปรความเข้มข้นของสารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่ใช้ในการจับก้อนยางในช่วง 0.25-1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไม่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ สภาวะในการสังเคราะห์ที่ดีที่สุดคือ ใช้สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ที่มีความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในการเตรียมเซรัม เซรัมที่ได้จะต้องนำไปเจือจางด้วยสัดส่วนการเจือจาง 8 เท่า



และทำปฏิกิริยาร่วมกับสารละลายโกลด์คลอไรด์ ไตรไฮเดรตที่มีความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลาร์ โดยเจือจางนี้อาจต่างกันไปบ้างตามแต่ละสมบัติที่ต่างกันของหางน้ำยางที่ได้รับมาจากสวนในแต่ละครั้ง งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดโดย

เฉลี่ย  $23 \pm 2$  นาโนเมตร การสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนี้ควรที่จะดำเนินการร่วมกับการผลิตน้ำยางขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับอุตสาหกรรมยางพาราอีกด้วย

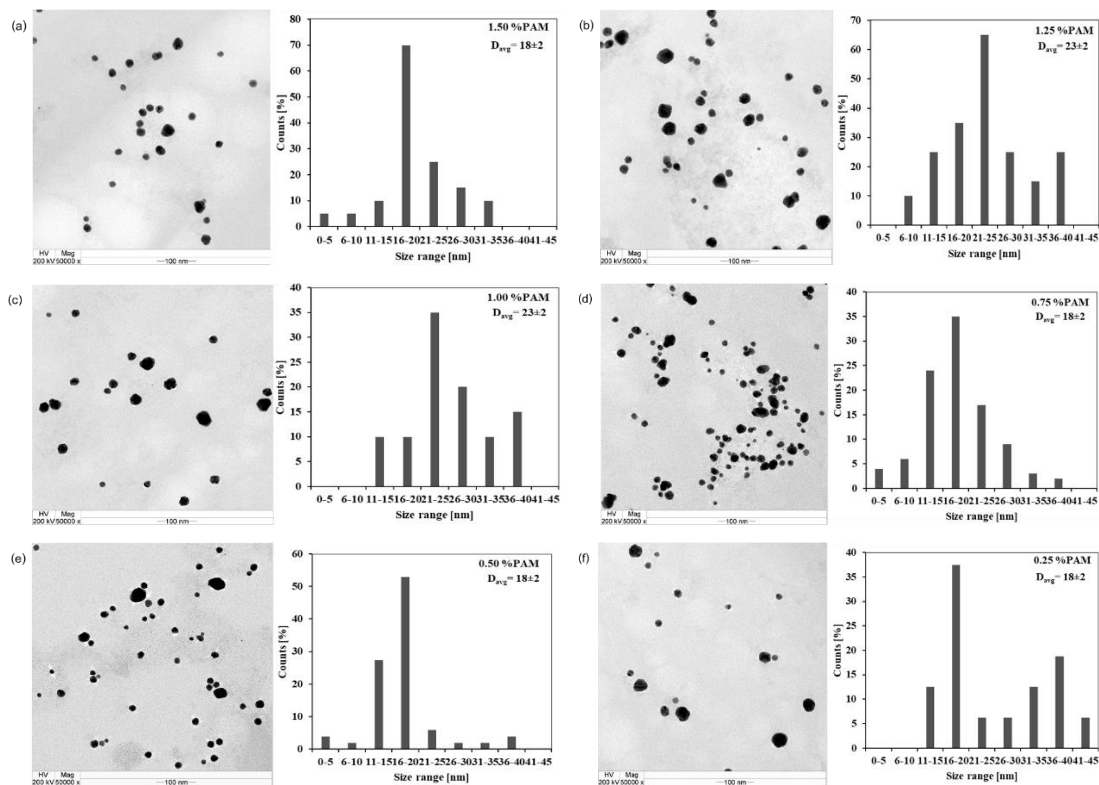


Figure 4 TEM micrographs and particle size distributions of AuNPs synthesized in the SNRL serums using PAM solutions with different initial concentrations, (a) 1.5 %, (b) 1.25 %, (c) 1.0 %, (d), 0.75 %, (e) 0.50 % and (f) 0.25 %.

### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปี 2560 และขอขอบคุณทุนการศึกษาตามสัญญาฉบับที่ ท.02 /2560 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับการสนับสนุน และขอขอบคุณอาจารย์และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความสนับสนุนและอำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย

### 6. References

[1] Suwatthanarak, T. , Than-ardna, B. , Danwanichakul, D. and Danwanichakul, P., 2016, Synthesis of silver nanoparticles in

- skim natural rubber latex at room temperature, Mater. Lett. 168: 31-35.
- [2] Bartosewicz, B., Bujno, K., Liszewska, M., Budner, B., Bazarnik, P., Płociński, T. and Jankiewicz, J. J., 2018, Effect of citrate substitution by various  $\alpha$ -hydroxy carboxylate anions on properties of gold nanoparticles synthesized by Turkevich method, Colloids Surf. A 549: 25-33.
- [3] Hormozi-Nezhad, M. R., Seyedhosseini, E. and Robatjazi, H., 2012, Spectrophotometric determination of glutathione and cysteine based on aggregation of colloidal gold nanoparticles, Sci. Iranica F 19: 958-963.
- [4] Priyadarshinia, E. and Pradhan, N., 2017, Gold nanoparticles as efficient sensors in colorimetric detection of toxic metal ions: A review, Sensor. Actuator. B 238: 888-902.
- [5] Wei, X., Wang, Y., Zhao, Y. and Chen, Z., 2017, Colorimetric sensor array for protein discrimination based on different DNA chain length-dependent gold nanoparticles aggregation, Biosens. Bioelectron. 97: 332-337.
- [6] Rad, A.G., Abbasi, H. and Afzali, M.H., 2011, Gold nanoparticles: Synthesizing, characterizing and reviewing novel application in recent years, Phys. Proc. 22: 203-208.
- [7] Yuan, C.G., Huo, C., Yu, S. and Gui, B., 2017, Biosynthesis of gold nanoparticles using *Capsicum annuum* var. *grossum* pulp extract and its catalytic activity, Phys. E 85: 19-26.
- [8] Hoshyar, R., Khayati, G.R., Poorgholami M. and Kaykhaii, M., 2016, A novel green one-step synthesis of gold nanoparticles using crocin and their anti-cancer activities, J. Photochem. Photobiol. B Biol. 159: 237-242.
- [9] Kumar, C. G., Poornachandra, Y. and Mamidyala, S.K., 2014, Green synthesis of bacterial gold nanoparticles conjugated to resveratrol as delivery vehicles, Colloids Surf. B Biointerfaces 123: 311-317.
- [10] Pandey, S., Goswami, K.G. and Nanda K.K., 2013, Green synthesis of polysaccharide/ gold nanoparticle nanocomposite: An efficient ammonia sensor, Carbohydr. Polym. 94: 229-234.
- [11] Patra, J.K., Kwon, Y. and Baek, K.H., 2016, Green biosynthesis of gold nanoparticles by onion peel extract: Synthesis, characterization and biological activities, Adv. Powder Technol. 27: 2204-2213.
- [12] Santhoshkumar, J., Rajeshkumar, S. and Kumar, S.V., 2017, Phyto-assisted synthesis, characterization and applications of gold nanoparticles: A review, Biochem. Biophys. Rep. 11: 46-57.
- [13] Sun, L., Li, J., Cai, J., Zhong, L., Ren, G. and Ma Q., 2017, One pot synthesis of gold nanoparticles using chitosan with varying degree of deacetylation and molecular weight, Carbohydr. Polym. 178: 105-114.

- [14] Yan, W., Chena, C., Wang, L., Zhang, D., Li, A.J., Yao, Z. and Shi L.Y., 2016, Facile and green synthesis of cellulose nanocrystal-supported gold nanoparticles with superior catalytic activity, *Carbohydr. Polym.* 140: 66-73.
- [15] Entrya, J.A., Sojka, R.E., Watwood, M. and Ross, C., 2002, Polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural runoff contaminants, *Environ. Pollut.* 120: 191-200.
- [16] Ma, J., Fu, K., Jiang, L., Ding, L., Guan, Q., Zhang, S., Zhang, H., Shi, J., Fu, X., 2017, Flocculation performance of cationic polyacrylamide with high cationic degree in humic acid synthetic water treatment and effect of kaolin particles, *Sep. Purif. Technol.* 181: 201-212.
- [17] Zhao, C., Zheng, H., Gaoc, B., Liu, Y., Zhai, J., Zhang, S. and Xu, B., 2018, Ultrasound-initiated synthesis of cationic polyacrylamide for oily wastewater treatment: Enhanced interaction between the flocculants and contaminants, *Ultrason. Sonochem.* 42: 31-41.
- [18] Sakdapipanich, J., 2010, *Natural Rubber Technology*, TechnoBiz Communications Co., Ltd., Bangkok. (in Thai)
- [19] Khajornchaikool, W. , 2 006, *Natural Rubber: Production and Applications*, The Thailand Research Fund (TRF), Bangkok, 38 p. (in Thai)