การสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินความเข้มข้นสูง แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อ

Continuous Synthesis of High Concentration Silver Nanoparticles Colloid by the Tubular Flow Reactor

ภัททวัฒน์ มณีวัฒนกิญโญ[1*] ณัฏฐพร พิมพะ[2] ชูชาติ ธรรมเจริญ[3] และ สนอง เอกสิทธิ์[3]

[1]คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ตำบลหลักหก อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000

[2]นาโนเทค อุทยานวิทยาศาสตร์ ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

[3]หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

E-mail: fuktongg@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินความเข้มข้นสูงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อสำหรับผลิตคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินปริมาณมากอย่างต่อเนื่อง คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินความเข้มข้นสูงผลิตโดยกระบวนการรีดักชันด้วยวิธีทางเคมี ระหว่างสารละลายเกลือของโลหะเงินและสารละลายตัวรีดิวซ์ในเครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อ จากการทดลองพบว่าเครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อสามารถผลิตคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินความเข้มข้น 1,000-10,000 ส่วนในล้านส่วน ในอัตรา 240 ลิตรต่อชั่วโมง จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงให้เห็นว่าคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินมีขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินความเข้มข้นสูงที่สังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อมีขนาดเล็กและมีค่าการกระจายตัวที่แคบ

คำสำคัญ: *เครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อ คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงิน การผลิตอย่างต่อเนื่อง*

Abstract

This research aims to study the synthesis of high concentration silver nanoparticles and to develope the tubular flow reactor for continuous production of large amount of silver nanoparticles. The highly concentrated silver nanoparticles were synthesized by chemical reduction of silver salt with a reducing agent in a tubular flow reactor. The tubular flow reactor was continuously produced silver nanoparticles at 240 liters per hour at the silver nanoparticles concentration of 1,000-10,000 ppm. The transmission electron microscopy images of synthesized silver nanoparticles reveal an average diameter of 10 nm. These highly concentrated silver nanoparticles had small size and narrow size distribution.

Keywords: *tubular flow reactor, silver nanoparticles, continuous process*

1. บทนำ

จากปัญหาของภาคอุตสาหกรรมมีการแข่งขันกันสูง ทั้งตลาดในประเทศและตลาดต่างประเทศ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมพอลิเมอร์และบรรจุภัณฑ์ ประสบปัญหาที่ไม่สามารถแข่งขันกับประเทศคู่แข่งทางการค้าเนื่องจากปัญหาด้านวัตถุดิบ โดยเฉพาะวัตถุดิบที่เป็นวัสดุนาโน การลดการนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศ โดยการใช้วัตถุดิบที่หาได้ในประเทศที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นด้วยตนเอง จึงเป็นแนวทางที่จะเพิ่มศักยภาพการแข่งขันของสินค้าไทยได้

ภาคอุตสาหกรรมบางกลุ่มมีความต้องการใช้อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินเพื่อเพิ่มสมบัติพิเศษให้กับผลิตภัณฑ์ เป็นหนทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าสินค้า สมบัติด้านการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเป็นสมบัติชนิดหนึ่งของคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงิน จึงเป็นทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าสินค้าในหลายกลุ่มภาคอุตสาหกรรมเช่น กลุ่มอุตสาหกรรมอุปโภคและบริโภค กลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอ ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางหรืออุตสาหกรรมพอลิเมอร์และบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น แต่ผู้ประกอบการและภาคอุตสาหกรรมของไทยต้องนำอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสิ้น ทำให้ขีดความสามารถในการแข่งขันลดลง ทำให้สินค้าไทยไม่สามารถแข่งขันด้านราคากับสินค้าจากต่างประเทศได้ นอกจากนั้นอนุภาคนาโนของเงินที่นำเข้าอาจไม่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานจริง ดังนั้นถ้าสามารถผลิตอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินเองได้ ก็จะสามารถเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันได้ ทั้งด้านราคา ปริมาณ และคุณภาพ

ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบสำหรับการผลิตอนุภาคนาโนของเงินปริมาณมากเพื่อการประยุกต์ใช้และรองรับปริมาณความต้องการภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งการมีเทคโนโลยีการผลิตคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินเป็นของตนเอง จะช่วยทำให้สามารถควบคุมปริมาณและราคาของวัตถุดิบคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินได้ ราคาที่ไม่สูงจะส่งผลให้มีการพัฒนาสินค้าใหม่ๆ จากเทคโนโลยีคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงิน รวมไปถึงการเพิ่มศักยภาพของสินค้าที่มีอยู่แล้วได้โดยไม่มีข้อจำกัด

รายงานการวิจัยอย่างแพร่หลายเกี่ยวกับการสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินมีเผยแพร่ในบทความทางวิชาการตามวารสารและสิทธิบัตรนานาชาติ ซึ่งวิธีการสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่สังเคราะห์โดยกระบวนการรีดักชันด้วยวิธีทางเคมี (Chemical reduction method) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยจะรีดิวซ์เกลือของเงินด้วยตัวรีดิวซ์ ทำให้ได้คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงิน แต่ควบคุมขนาดของอนุภาคได้ยากเนื่องจากอนุภาคแต่ละอนุภาคจะสามารถเกิดการรวมตัวกันได้ (Coagulation) หรืออาจเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็วทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น งานวิจัยที่ผ่านมาจึงต้องมีการเติมสารช่วยให้อยู่ตัว (Stabilizer) หรือปรับปรุงผิวของคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินเพื่อทำให้คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินมีความอยู่ตัวและไม่มีการรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน ตัวอย่างเช่น จากบทความทางวิชาการที่เผยแพร่ในวารสารนานาชาติโดย Shirtcliffe et al., (1999) ได้เสนอวิธีการเตรียมคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่มีขนาดอนุภาคเล็กโดยใช้โบโรไฮไดรด์ เป็นตัวรีดิวซ์ ตัวทำละลายที่ใช้ทั้งหมดเป็นน้ำที่ถูกกำจัดก๊าซในสภาวะภายใต้สุญญากาศและถูกทำให้อิ่มตัวด้วยก๊าซอาร์กอน เวลาการใช้จะถูกจำกัดให้อยู่ภายใน 2 ชั่วโมง วิธีการสังเคราะห์ทำได้โดยฉีดสารละลายเกลือของเงิน 4.06×10^{-4} M ปริมาตร 1 mL ลงไปในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 9.03×10^{-5} M ปริมาตร 1 mL และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3×10^{-3} M ปริมาตร 1 mL ที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 2 ^{o}C ปฏิกิริยาจะใช้เวลาทั้งสิ้นอย่างน้อย 10 ชั่วโมง ความเข้มข้นของคอลลอยด์อนุภาค

นาโนของเงินที่ได้คือ 14.49 ppm คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่สังเคราะห์ได้จะมีรูปร่างเป็นทรงกลมและมีขนาดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 14.7 nm มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอยู่ที่ 5.1 ซึ่งถือว่ามีการกระจายตัวอยู่ในระดับที่ดีปานกลาง แต่การจะเก็บรักษาอนุภาคไว้ให้ได้นานต้องเก็บไว้ภายใต้ก๊าซเฉื่อย (Mohan et al., 2007) และได้เสนอการใช้ไฮโดรเจล (Hydrogel) สำหรับเป็น Nanoreactors ซึ่งเป็นวิธีการสังเคราะห์แบบใหม่สำหรับคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินเพื่อประยุกต์ใช้ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ใช้โบโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์และใช้ Sodium acrylate เป็นสารช่วยให้อยู่ตัว ความเข้มข้นของคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่สังเคราะห์ได้คือ 188.8 ppm และมีรูปร่างเป็นทรงกลม พบว่าขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยมีค่า 2.67 ± 0.97 nm และมีการกระจายตัวของอนุภาคที่แคบมาก คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่สังเคราะห์ได้ยังแสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ นอกจากนี้ยังมีความอยู่ตัวที่สูงโดยสามารถเก็บไว้ได้มากกว่า 6 เดือนโดยไม่มีการรวมตัวกัน

ตัวอย่างบทความที่เผยแพร่ในสิทธิบัตรนานาชาติโดย Raghuraman et al (2006) เสนอวิธีการเตรียมคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินโดยการใช้ตัวรีดิวซ์ที่ไม่เป็นพิษ เช่น Phosphene amino acid กับเกลือชนิดต่างๆของโลหะเงิน ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า 30 นาที และอุณหภูมิที่ใช้น้อยกว่า 40 °C ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจะมีมากกว่า 70% ของสารตั้งต้นและได้อนุภาคโลหะเงินที่มีขนาดอยู่ในช่วง 10 - 20 nm ผลการสังเคราะห์ถ้าให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดทั้งหมดเป็น 98% ของสารตั้งต้น คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่ได้มีขนาดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 10 nm และต้องเก็บไว้โดยผสมสารละลายกลุ่มอะมิโนเพื่อช่วยให้เสถียรใน Deionized water และพบว่าไม่เกิดการรวมตัวกันมากกว่า 30 วัน

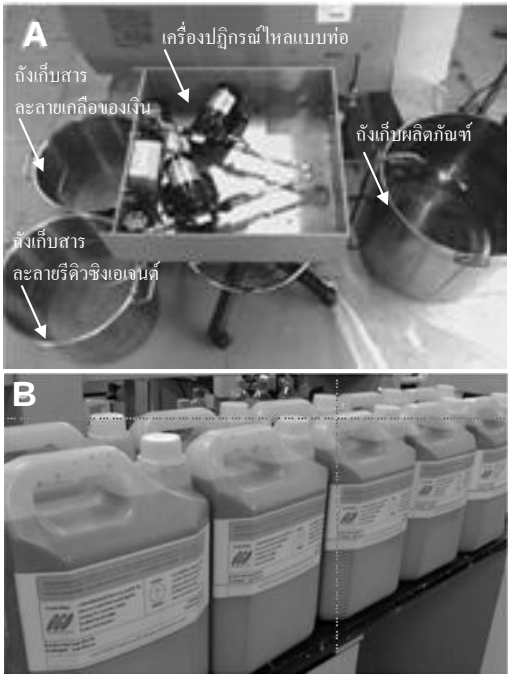
จากงานวิจัยที่ผ่านมายังพบข้อจำกัดที่สำคัญคือการสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินสังเคราะห์ได้ที่ความเข้มข้นต่ำ (50 – 1,000 ส่วนในล้านส่วน) ด้วยวิธีการผลิตแบบชุดซึ่งเป็นการผลิตที่ไม่ต่อเนื่อง และทำการผลิตคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินเพียงการผลิตระดับห้องปฏิบัติการ ปริมาณการผลิตไม่เพียงพอรองรับความต้องการของการนำไปใช้สำหรับภาคอุตสาหกรรม และยังไม่มีงานวิจัยที่ทำการผลิตคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่ควบคุมคุณภาพการผลิตได้ ที่ความเข้มข้นสูง มีความอยู่ตัว ผลิตได้ปริมาณมากและต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะสังเคราะห์และการผลิตคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินความเข้มข้นสูงที่สามารถควบคุมคุณภาพการผลิตได้ มีความอยู่ตัว ผลิตได้ปริมาณมากและต่อเนื่องเพื่อที่จะสามารถผลิตคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินเพื่อรองรับการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

2. วัตถุประสงค์

เพื่อผลิตและสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินความเข้มข้นสูงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อ (ความเข้มข้น 1,000 - 10,000 ส่วนในล้านส่วน) ด้วยกระบวนการรีดักชันด้วยวิธีทางเคมี (Chemical reduction) มีความอยู่ตัวไม่น้อยกว่า 6 เดือน ผลิตได้ในอัตราการผลิต (100 - 120 ลิตร/ชั่วโมง) มีขนาดอนุภาคที่เล็ก (5 - 20 nm) และการกระจายตัวของอนุภาคที่แคบเพื่อรองรับความต้องการของอุตสาหกรรม

3. อุปกรณ์และวิธีการ



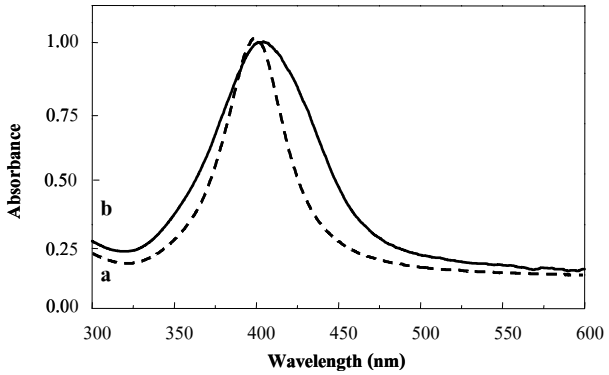
รูปที่ 1 (A) เครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อสำหรับผลิตคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินแบบต่อเนื่อง (B) คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินจากกระบวนการผลิตด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อ

การสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินความเข้มข้นสูงด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อ ทำการผลิตโดยกระบวนการรีดักชันด้วยวิธีทางเคมี (Chemical reduction) มีการใช้สารเคมีและวิธีการเพื่อทำการสังเคราะห์ การปรับสภาวะในการสังเคราะห์ วิธีตรวจวัดความสมบรูณ์ของปฏิกิริยา และวัดผลที่ปรับปรุง (Maneewattanapinyo et al., 2554) สรุปโดยย่อคือ ใช้สารละลายเกลือของเงินเป็นสารตั้งต้น คือ สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.094 M ($AgNO_3$; Merck) และสารละลายรีดิวซิงเอเจนต์ คือโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.07 M ($NaBH_4$; Merck) จากนั้นทำการสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อ (แสดงดังรูปที่ 1) ที่คณะผู้ประดิษฐ์พัฒนาออกแบบและสร้างขึ้น ด้วยหลักการทำงานที่ใช้ระบบการดูดสารละลายจากถังเก็บสารละลายเกลือของเงินและถังเก็บสารละลายรีดิวซิงเอเจนต์ ทำการดูดสารละลายทั้งสองจากถังเก็บฉีดอัดพร้อมกัน จากนั้นสารละลายจากถังเก็บทั้งสองไหลรวมกันสู่ท่อผสม ในท่อผสมเกิดปฏิกิริยารีดักชันระหว่างสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต กับสารละลายรีดิวซิงเอเจนต์ ปฏิกิริยาที่ได้เกิดอย่างสมบูรณ์ โดยสังเกตจากสารละลายใสไม่มีสีจะเปลี่ยนสีเป็นสารละลายใสสีเหลืองเข้ม หลังการผสมรวมกันและไหลสู่ถังเก็บผลิตภัณฑ์ คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อ นำมาตรวจวัดความเข้มข้นและประมาณขนาดอนุภาค รูปร่างของอนุภาคและค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคจาก Plasmon extinction spectrum โดย Portable UV/Vis Spectrophotometer (Ocean optics USB 4000 UV/Vis Spectrophotometer) จากนั้นนำคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่งเพื่อยืนยันผลที่ได้ โดยบันทึกขนาดคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

4. ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

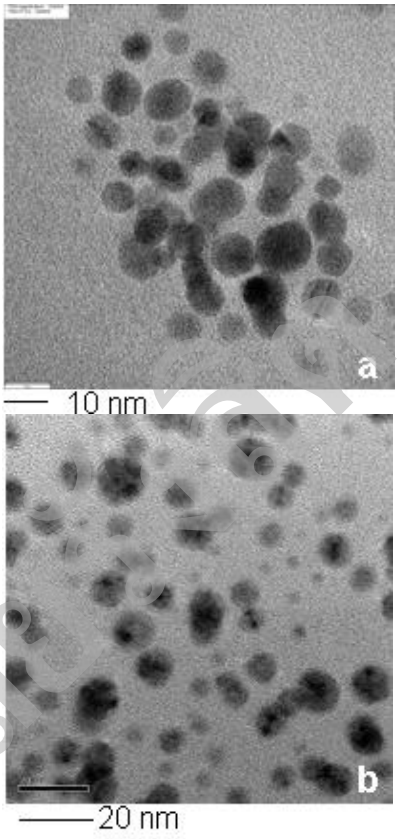
การปรับสภาวะในการผลิตและสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินให้ได้คุณภาพตามวัตถุประสงค์ข้างต้น ได้จากการตรวจวัด Plasmon extinction spectrum ในแต่ละสภาวะที่ใช้ในการผลิต เนื่องจาก Plasmon extinction spectrum ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงิน แสดงความสัมพันธ์กับ ขนาดอนุภาค รูปร่างของอนุภาคและค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Poovathinthodiyil et al, 2003) คือ ถ้าสเปกตรัมที่แคบ (Narrow peak) แสดงค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ (Narrow particle size

distribution) ถ้าตำแหน่ง λ_{Max} ของสเปกตรัมไปความยาวคลื่นยาว (Longer wavelength) แสดงว่าอนุภาคมีขนาดใหญ่



รูปที่ 2 Extinction spectra ของคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงิน (----- a) คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่ผลิตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อ สำหรับผลิตคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินแบบต่อเนื่อง (λ_{Max} = 399 nm) และ (——b) คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์นำเข้าจากต่างประเทศ (λ_{Max} = 405 nm)

จากการวัด Plasmon extinction spectrum คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่ผลิตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อสำหรับผลิตคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินแบบต่อเนื่อง แสดง λ_{Max} = 399 nm และแสดงค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยความกว้างที่ครึ่งของความสูง (Full width at half height, FWHH) คือ 45 nm และ วัด Plasmon extinction spectrum คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์แสดง λ_{Max} = 405 nm และแสดงค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยความกว้างที่ครึ่งของความสูงคือ 75 nm (แสดงดังรูปที่ 2)



รูปที่ 3 คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินบันทึกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscope) ขนาดอนุภาคมีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ประมาณ 10 นาโนเมตร (a) คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่ผลิตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อสำหรับคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินแบบต่อเนื่อง (b) คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

ผลการบันทึกขนาดคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (แสดงดังรูปที่ 3) คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่ผลิตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ อนุภาครูปร่างทรงกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ประมาณ 10 นาโนเมตรและคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์อนุภาครูปร่างทรงกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ประมาณ 20 นาโนเมตร และจากการวัด Plasmon extinction spectrum แสดงว่าคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่

สังเคราะห์ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่ประดิษฐ์ขึ้น มีลักษณะทรงกลม ขนาดเล็ก มีการกระจายของขนาดอนุภาคที่แคบกว่าคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

5. การอภิปรายผล

จากการทดลองใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.094 M และสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 0.07 M ทำการสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อที่คณะผู้ประดิษฐ์พัฒนาออกแบบและสร้างขึ้น พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อสามารถผลิตคอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงิน ทรงกลมมีขนาดนุภาคประมาณ 10 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 10,00 ส่วนในล้านส่วน ได้อย่างต่อเนื่อง (อัตราเร็วเฉลี่ย 240 ลิตรต่อชั่วโมง) การสังเคราะห์ทั้งหมดทำที่อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท (mmHg)) เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์จะไม่มีของเสีย (Byproduct) หรือปฏิกิริยาข้างเคียง (Side reaction) พร้อมรองรับการนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมซึ่งสอดคล้องตามวัตถุประสงค์ที่กล่าวไว้ข้างต้น

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้สามารถผลิตและสังเคราะห์คอลลอยด์อนุภาคนาโนของเงินความเข้มข้นสูง (1,000 - 10,000 ส่วนในล้านส่วน) ที่ควบคุมคุณภาพการผลิตได้ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ไหลแบบท่อด้วยกระบวนการรีดักชันด้วยวิธีทางเคมี ผลิตได้ในอัตราการผลิต 240 ลิตร/ชั่วโมง มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10 nm การกระจายตัวของอนุภาคที่แคบ เพื่อรองรับความต้องการใช้งานของอุตสาหกรรม

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณหน่วยวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.), สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.), สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และศูนย์นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8. เอกสารอ้างอิง

Maneewattanapinyo, P., Banlunara, W., Thammacharoen, C., Ekgasit, S. and Kaewamatawong, T. (2011). An eavluation of acute toxicity of colloidal silver nanoparticles. J. Vet. Med. Sci. 73(11): 1417-1423.

Mohan, Y. M., Lee, K., Premkumar, T. and Geckeler, K. E. (2007). Hydrogel networks as nanoreactors: A novel approach to silver nanoparticles for antibacterial applications. Polymer. 48: 158-164.

Poovathinthodiyil, R., Jie, F. and Scott, L. W. (2003). Completely “Green” synthesis and stabilization of metal nanoparticles. J. Am. Chem. Soc. 125: 13940-13941.

Raghuraman, K. and Katti, K. K. (2006). Methods for producing silver nanoparticles. US Patent No. 0045916A1.

Shirtcliffe, N., Nickel, U., and Schneider, S. (1999). Reproducible preparation of silver sols with small particle size using borohydride reduction: For use as nuclei for preparation of larger particles. J. Colloid Inter. Sci. 211: 122-129.