

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์แบบเคมีสีเขียวโดยใช้สารสกัดจากตำแยแมวจาก
กระบวนการสกัดด้วยน้ำกึ่งวิกฤต

Green Synthesis of Silver Nanoparticles using *Acalypha indica* L. Extract Obtained by
Subcritical Water Extraction

สมโภช ภู่อึ้ง¹, ศศิธร สรรพอคำ¹, มงคล วินทะไชย์² และ สุภาพรณ คางคำ^{2,*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย 225 ถนนพญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

²สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา แขวงหิรัญรูจี

เขตนบุรี กรุงเทพมหานคร 10600

E-mail: supp.kh@gmail.com

Sompoch Poopeerasupong¹, Sasithorn Sunphorka¹, Mongkon Wintachai² and Supaporn Khangkham^{2,*}

¹Field of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of

Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus, 225 Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330

²Field of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University,

Hiranruchi, Thon Buri, Bangkok 10600

E-mail: supp.kh@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์แบบเคมีสีเขียวโดยใช้สารสกัดจากตำแยแมวที่ได้จากกระบวนการสกัดด้วยน้ำกึ่งวิกฤตเป็นตัวรีดิวซ์ การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ได้ถูกประยุกต์ใช้เพื่อประเมินอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการสกัด ได้แก่ อุณหภูมิ ความดันเริ่มต้น และระยะเวลาในการสกัด ต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดในสารสกัด จากการทดลองพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดในสารสกัดเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามอุณหภูมิและระยะเวลา โดยมีค่าสูงสุด ณ ภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันในโตรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และระยะเวลาในการสกัด 60 นาที การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ถูกศึกษาภายใต้ภาวะอุณหภูมิ ความเข้มข้นของซิลเวอร์ในเตรต และระยะเวลาต่าง ๆ ซึ่งพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มข้นของซิลเวอร์ในเตรตส่งผลให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์มีขนาดใหญ่ขึ้น ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ คือ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเตรต 0.010 โมลต่อลิตร และเวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที โดยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็น

ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ถึง 30 นาโนเมตร นอกจากนี้ผลการศึกษายังชี้ว่าสารสกัดจากตำแยแมวอาจมีส่วนช่วยในการป้องกันหรือยับยั้งการจับตัวกันของอนุภาคได้

คำสำคัญ: การสกัดด้วยน้ำกึ่งวิกฤต; ตำแยแมว; อนุภาคนาโนซิลเวอร์; การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน; เคมีสีเขียว

Abstract

This study focused on the green synthesis of silver nanoparticles using *Acalypha indica* L. extract obtained by subcritical water extraction as a reducing agent. The Box-Behnken experimental design was applied for evaluating the influence of extraction process parameters namely temperature, initial pressure and operating time on total phenolic content of the extract. The results showed that the total phenolic content of the extract significantly depended on temperature and duration, and attained its maximum at 200 °C, initial N₂ pressure of 1 bar and 60 minutes of extract duration. The synthesis of silver nanoparticles was then investigated under various reaction temperatures, concentrations of AgNO₃ and reaction times. It was found that increasing temperatures and concentrations of AgNO₃ led to an increase in size of the particles. The optimal condition for silver nanoparticles synthesis was 50 °C, 0.010 mol/l of AgNO₃ solution and 180 minutes, at which the spherical silver nanoparticles with diameters of 1 to 30 nm could be obtained. Moreover, the results also revealed that *Acalypha indica* L. extract could help prevent or inhibit particle agglomeration.

Keywords: Subcritical water extraction; *Acalypha Indica* L.; Silver nanoparticles; Box-Behnken design; Green chemistry

1. บทนำ

อนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Ag nanoparticles: AgNPs) หรืออนุภาคของโลหะเงินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนเมตร เป็นวัสดุที่มีสมบัติโดดเด่นในด้านการยับยั้งเชื้อโรค [1] และมีการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เป็นสารกำจัดเชื้อโรค ใช้เป็นสารเคลือบผิวอุปกรณ์ต่าง ๆ การผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ และการผสมลงในเส้นใยก่อนนำไปผลิตสิ่งทอ เป็นต้น การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์สามารถทำได้ด้วยกระบวนการทางเคมี กระบวนการทางกายภาพ หรือกระบวนการทางชีวภาพ [1-2] ทั้งนี้การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเคมีเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากสามารถผลิตได้ในปริมาณมากและยังควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ง่าย การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกระบวนการเคมีมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่เกลือของซิลเวอร์ซึ่งสารที่นิยมใช้คือซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO₃) ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และสารให้ความคงตัว (Stabilizer) อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกระบวนการเคมีนั้นมีการใช้สารเคมีที่อาจส่งผล

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีความพยายามที่จะพัฒนากระบวนการผลิตอนุภาคนาโนซิลเวอร์ให้เป็นแบบเคมีสีเขียว (Green chemistry) ด้วยการลดปริมาณการใช้สารเคมี หรือใช้สารเคมีธรรมชาติทดแทนสารเคมีสังเคราะห์

สารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) เป็นสารจำพวกหนึ่งที่สามารถพบได้ตามธรรมชาติในพืชหลายชนิด และแสดงสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ทดลองนำเอาสารสกัดจากพืชที่หาได้ง่าย เช่น ใบกะเพรา ใบสะเดา มะเขือเทศ พริกสีเขียว เลมอน แดงกวา และใบหางกระรอกแดง เป็นต้น มาใช้เป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ [3-8] โดยพบว่าสารสกัดจากพืชเหล่านี้ล้วนมีองค์ประกอบของสารประกอบฟีนอลและสามารถใช้เป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ ยิ่งไปกว่านั้นสารสกัดจากพืชยังมีสารจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์ซึ่งช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาค ส่งผลให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์มีความคงตัวยิ่งขึ้น ทั้งนี้งานวิจัยทางด้านการสกัดสารจากพืชชนิดต่าง ๆ เพื่อใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ยังคงเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องเรื่อยมา วิธีการอย่างง่ายในสกัดสารจากพืชมักใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ หรือเฮกเซน ตามแต่ชนิดของสารประกอบที่ต้องการสกัด ในบรรดาการสกัดด้วยตัวทำละลายต่าง ๆ นั้น การสกัดด้วยน้ำกึ่งวิกฤติ (Subcritical water extraction: SWE) เป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความสนใจเนื่องจากสมบัติในการเป็นตัวทำละลายที่ดี ใช้ภาวะไม่รุนแรงจึงควบคุมกระบวนการได้ง่าย และไม่มีการใช้สารเคมีสังเคราะห์ จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกประยุกต์ใช้ในการสกัดสาร [9-10]

ต้นคำแยแมว (*Acalypha indica* L.) ซึ่งเป็นวัชพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ง่ายและพบได้ทั่วไป เป็นพืชอีกชนิดหนึ่งที่มีการรายงานว่าพบส่วนประกอบที่เป็นสารกลุ่มสเตียรอยด์ ฟลาโวนอยด์ โกลโคไซด์ และสารประกอบฟีนอลซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ [7-8, 11-12] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากการสกัดสารประกอบฟีนอลจากต้นคำแยแมวด้วยน้ำกึ่งวิกฤติโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design) เพื่อประเมินอิทธิพลของอุณหภูมิ ความดันเริ่มต้นของไนโตรเจน และเวลาในการสกัด ต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลที่สกัดได้ และใช้เป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ อันเป็นการใช้ประโยชน์สารเคมีธรรมชาติในการทดแทนสารเคมีสังเคราะห์ และเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตอนุภาคนาโนซิลเวอร์ให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ต้นคำแยแมวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นต้นคำแยแมวสดที่ผ่านการล้างทำความสะอาด คัดเอาเฉพาะส่วนใบ แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาบดละเอียดให้เป็นผง ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช และบรรจุในภาชนะป้องกันความชื้นเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัด

2.2 การสกัดสารจากคำแยแมว

การสกัดสารจากคำแยแมวด้วยน้ำภาวะกึ่งวิกฤติกระทำในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง (Parr รุ่น 4560 Mini Bench Top Reactors) โดยนำผงคำแยแมวที่เตรียมไว้ปริมาณ 0.1 กรัม บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ เติมน้ำปราศจาก

ไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปิดเครื่องและทำการไล่แก๊สออกซิเจนที่ค้างอยู่ในระบบด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลาอย่างน้อย 60 วินาที จากนั้นจึงปรับความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยแก๊สไนโตรเจนจนถึงค่าที่ต้องการ เปิดเครื่องกวนและให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าตามที่ได้ออกแบบไว้จึงเริ่มทำการจับเวลา และเมื่อครบระยะเวลาจะทำการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วด้วยน้ำหล่อเย็น สารสกัดหยาบ (Crude extract) ที่ได้จะถูกนำไปกรองแยกตะกอน บรรจุในขวดสีชาและเก็บรักษาไว้ ณ อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (Total phenolic content: TPC) ในขั้นต่อไป

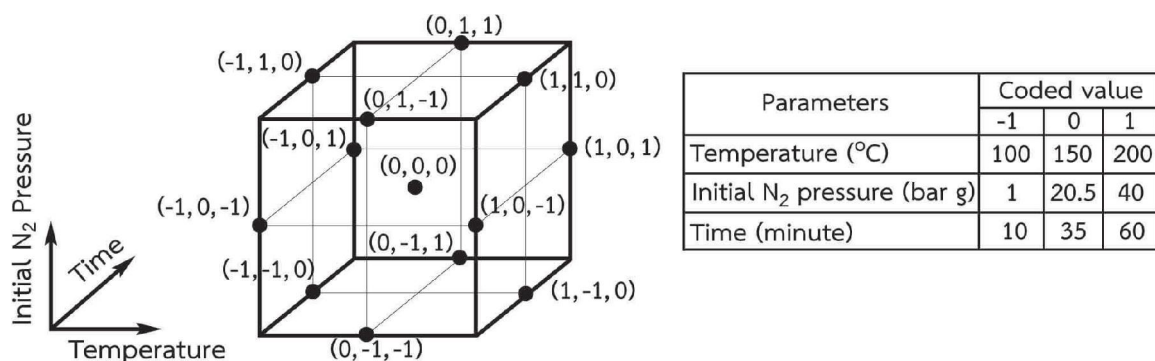
การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรของกระบวนการสกัดซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ (100 - 200 องศาเซลเซียส) ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น (1 - 40 บาร์เกจ) และระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด (10 - 60 นาที) ต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดถูกกระทำโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลของแต่ละตัวแปรได้โดยใช้จำนวนการทดลองที่น้อยที่สุด ภาวะที่ใช้ในการทดลองและความหมายของค่ารหัส (Coded value) แสดงดังรูปที่ 1 ในแต่ละภาวะจะทำการทดลองเพียง 1 ครั้ง ยกเว้นที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 20.5 บาร์เกจ และเวลา 35 นาที ซึ่งเป็นค่ากลางของแต่ละตัวแปร (สอดคล้องกับค่ารหัส 0, 0, 0) จะทำการทดลองทั้งหมด 5 ครั้งเพื่อเป็นตัวแทนในการทดสอบความแม่นยำของการทดลอง อิทธิพลของตัวแปรแต่ละตัวจะถูกประเมินโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} = 0.05$) และสร้างสมการถดถอย (Regression equation) ซึ่งมีสูตรทั่วไปดังสมการที่ (1) [13]

$$Y_0 = X_0 + \sum_{i=1}^3 a_i X_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} X_{ii}^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq 3} a_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

เมื่อ Y_0 คือปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด, X_0 คือค่าคาดหวังของแบบจำลอง, X_i หรือ X_j คือค่ารหัสของแต่ละตัวแปร (อุณหภูมิ ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น หรือเวลา) และ a_i หรือ a_{ii} หรือ a_{ij} คือสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปร

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดกระทำด้วยวิธี Folin-Ciocalteu colorimetric method โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน ซึ่งดัดแปลงจากวิธีมาตรฐาน ISO14502-1:2005 ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากการ



รูปที่ 1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 3 ตัวแปร; พิกัด x, y, z ที่ปรากฏในรูป คือค่ารหัสของอุณหภูมิ, ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น, ระยะเวลา ตามลำดับ

นำสารสกัดจากตำแยแมวปริมาตร 2 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำละลาย Folin Ciocalteu phenol reagent ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 3 นาทีแล้วเติมน้ำละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 7.5 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาณ 2 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 นาที นำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ (UV-Vis spectrometer; Shimadzu รุ่น Mini 1240) แล้วแปรผลค่าการดูดกลืนแสงเป็นความเข้มข้นโดยการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมของสารตัวอย่าง (mg GAE/g) คำนวณได้จากสมการที่ (2) โดยมี R^2 เท่ากับ 0.9975

$$Total\ phenolic\ content = 50.914 \times Absorbance \quad (2)$$

2.4 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์กระทำโดยผสมสารสกัดจากตำแยแมวปริมาตร 20 มิลลิลิตรกับสารละลายซิลเวอร์ในเตรตปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ ปิดฝาให้สนิทแล้วตั้งทิ้งไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ การทดลองในขั้นนี้จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปร 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ (25 - 75 องศาเซลเซียส) ความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเตรต (0.001 - 0.100 โมลต่อลิตร) และเวลาในการทำปฏิกิริยา (10 - 240 นาที) ต่อสมบัติของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้

2.5 การวิเคราะห์สมบัติของสารสกัดจากตำแยแมวและอนุภาคนาโนซิลเวอร์

หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบในสารสกัดจากตำแยแมววิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR; PerkinElmer รุ่น Spectrum one) อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้นำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM; JEOL รุ่น JEM-1400) ที่กำลังขยาย 300,000 เท่า และวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray spectroscopy (EDX)

3. ผลการวิจัยและการอภิปราย

3.1 ผลของภาวะในการสกัดต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด

ผลการทดลองการสกัดสารจากตำแยแมวภายใต้ภาวะอุณหภูมิ ความดันในโตรีเจนเริ่มต้น และระยะเวลาต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจาก 100 เป็น 200 องศาเซลเซียส (การทดลองที่ 1 และ 14, 2 และ 15, 3 และ 16, 4 และ 17) ส่งผลให้สารสกัดมีปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดเพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากน้ำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ลดลงจาก 80 ที่อุณหภูมิห้อง เป็น 35 เมื่ออยู่ในภาวะกึ่งวิกฤตที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำกึ่งวิกฤตมีสมบัติเป็นตัวทำละลายใกล้เคียงกับเมทานอลหรือเอซิโตนที่อุณหภูมิห้อง [9] จึงสามารถละลายสารประกอบประเภทฟีนอลและพอลิฟีนอลในตำแยแมวซึ่งเป็นสารที่มีขั้วได้ดี [14, 15] นอกจากนั้นการเพิ่มอุณหภูมิยังส่งผลให้ค่าผลคูณไอออน (Ion product) ของน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเอง (Self-catalysis) [9] เมื่อพิจารณาการเพิ่มระยะเวลาในการสกัด (การทดลองที่ 2 และ

ตารางที่ 1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดในสารสกัดจากตำแยแมวที่ได้จากภาวะต่าง ๆ

ลำดับ	อุณหภูมิ (°C)	ความดันไนโตรเจน (บาร์เกจ)		ระยะเวลา (นาที)	TPC* (mg GAE/g)
		เริ่มต้น	สุดท้าย		
1	100.0	1.0	1.6	35	21.0
2	100.0	20.5	23.1	10	19.1
3	100.0	20.5	23.1	60	21.3
4	100.0	40.0	47.0	35	18.1
5	150.0	1.0	2.4	10	22.6
6	150.0	1.0	2.4	60	43.3
7	150.0	20.5	28.0	35	37.8
8	150.0	20.5	28.0	35	34.2
9	150.0	20.5	28.0	35	40.9
10	150.0	20.5	28.0	35	34.6
11	150.0	20.5	28.0	35	39.4
12	150.0	40.0	55.3	10	28.3
13	150.0	40.0	55.3	60	42.3
14	200.0	1.0	2.4	35	69.5
15	200.0	20.5	63.1	10	55.4
16	200.0	20.5	36.1	60	60.5
17	200.0	40.0	66.9	35	66.5

*สารประกอบฟีนอลทั้งหมด (Total phenolic content)

3, 5 และ 6, 12 และ 13, 15 และ 16) พบว่าส่งผลให้สารสกัดมีปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดสูงขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากระยะเวลาที่น้ำภาวะกึ่งวิกฤตสัมผัสกับสารตั้งต้นยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอิทธิพลของความดันไนโตรเจนเริ่มต้น (การทดลองที่ 1 และ 4, 5 และ 12, 6 และ 13, 14 และ 17) กลับพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นและไม่เป็นแนวโน้มกับความดันไนโตรเจนเริ่มต้น

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรทั้งสามต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดซึ่งพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) คือ อุณหภูมิ (X_1) และระยะเวลาในการสกัด (X_3) โดยอุณหภูมิมีผลทั้งในแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนระยะเวลามีผลแบบเชิงเส้นเท่านั้น ในขณะที่ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น (X_2) เป็นปัจจัยที่ส่งผลอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดเป็นหลักซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้อภิปรายแล้วข้างต้น จากข้อมูลการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้สามารถเสนอสมการถดถอยโดยในที่นี้จะละทิ้งอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งไม่มีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดเพื่อลดความซับซ้อนของสมการได้ดังสมการที่ (3)

$$Y_0 = 37.37 + 21.55X_1 - 0.17X_2 + 5.26X_3 + 5.69X_1^2 + 0.74X_2^2 - 3.99X_3^2 \quad (3)$$

ค่า R^2 และ adjusted R^2 ของสมการถดถอยนี้มีค่าเท่ากับ 0.95 และ 0.92 ตามลำดับ อีกทั้งผลการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) พบว่าเศษเหลือของแบบจำลองนี้มีการแจกแจงแบบปกติดังรูปที่ 2 (ก) อีกทั้งยังมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบใด ๆ ต่อค่าคาดคะเน (Predicted value) นั่นคือเป็นอิสระต่อกันดังรูปที่ 2 (ข) แสดงว่า

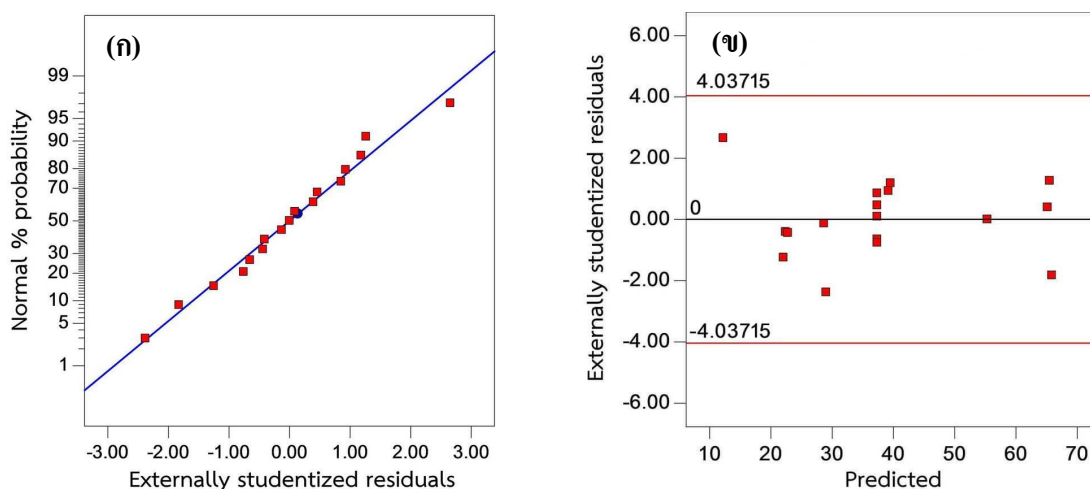
แบบจำลองที่เสนอไว้ดังสมการที่ (3) นี้มีความถูกต้อง เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ของพจน์ X_1 , X_3 และ X_1^2 ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พบว่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ X_1 มีค่ามากกว่าของพจน์อื่น ๆ แสดงว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด

ภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดสูงสุดวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) ดังรูปที่ 3 โดยกำหนดความดันไนโตรเจนเริ่มต้นไว้ที่ค่าต่ำสุด คือ 1 บาร์ เกจ ซึ่งสรุปได้ว่าภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดสารจากคำแยแมว คือ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เกจ และระยะเวลาในการสกัด 60 นาที สามารถสกัดสารประกอบฟีนอลทั้งหมดได้สูงถึง 70 mgGAE/g โดยประมาณ ซึ่งสูงกว่าการสกัดด้วยวิธีซอกซ์เลต (Soxhlet extraction) โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปที่สามารถสกัดสารประกอบฟีนอลทั้งหมดได้ในปริมาณ 1 ถึง 7 mgGAE/g เท่านั้น [16] และเลือกนำสารสกัดที่ได้จากภาวะนี้ไปใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในขั้นต่อไป

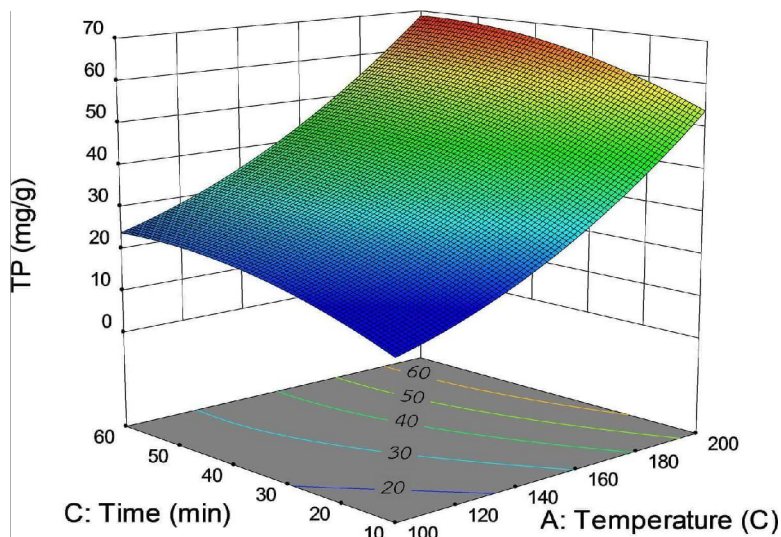
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	4,132.24	6	688.71	32.44	< 0.0001*
Temperature: X_1	3,714.11	1	3,714.11	174.93	< 0.0001*
Initial N_2 pressure: X_2	0.24	1	0.24	0.011	0.9178
Time: X_3	221.11	1	221.11	10.41	0.0091*
X_1^2	136.34	1	136.34	6.42	0.0297*
X_2^2	2.31	1	2.31	0.11	0.7484
X_3^2	67.01	1	67.01	3.16	0.1060
Residual	212.31	10	21.23		
Lack of Fit	177.71	6	29.62	3.42	0.1269
Pure Error	34.60	4	8.65		
Total	4,344.55	16			

* ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p-values < 0.05)

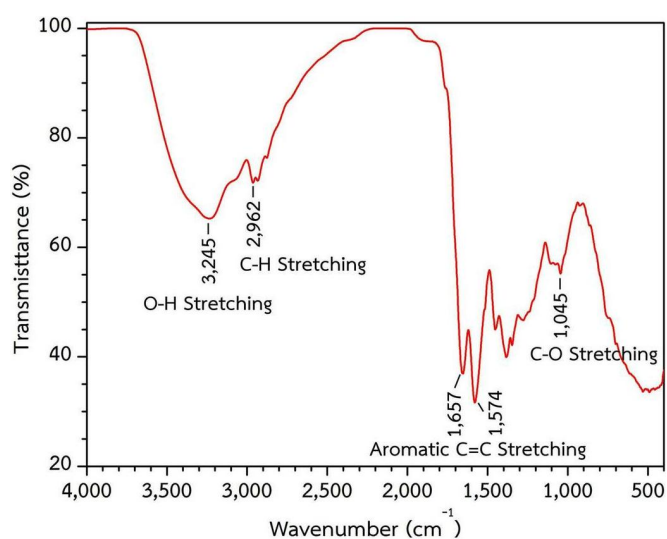


รูปที่ 2 การวิเคราะห์เศษเหลือ; (ก) การแจกแจงแบบปกติ และ (ข) ความสัมพันธ์กับค่าคาดคะเน



รูปที่ 3 พื้นผิวตอบสนองของปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ ภายใต้ความดันในโตรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ

ผลการวิเคราะห์สารสกัดจากตำแยแมวด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันและพันธะเคมีขององค์ประกอบแสดงดังรูปที่ 4 พบว่ามีการปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น $3,245$, $2,962$ และ $1,045 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H ในหมู่แอลกอฮอล์หรือฟีนอล พันธะ C-H ของหมู่แอลเคน และพันธะ C-O ของหมู่แอลคอกซี ตามลำดับ นอกจากนี้ยังปรากฏแถบการดูดกลืนที่เลขคลื่น $1,657$ และ $1,574 \text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องการสั่นแบบยืดของพันธะ C=C ในสารประกอบแอโรมาติก และแถบการดูดกลืนที่เลขคลื่นระหว่าง $1,200$ ถึง $1,400 \text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H ของหมู่แอโรมาติก แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากตำแยแมวประกอบด้วยสารประกอบฟีนอล รวมทั้งมีสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เป็นองค์ประกอบด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4 FT-IR สเปกตรัมของสารสกัดจากตำแยแมว

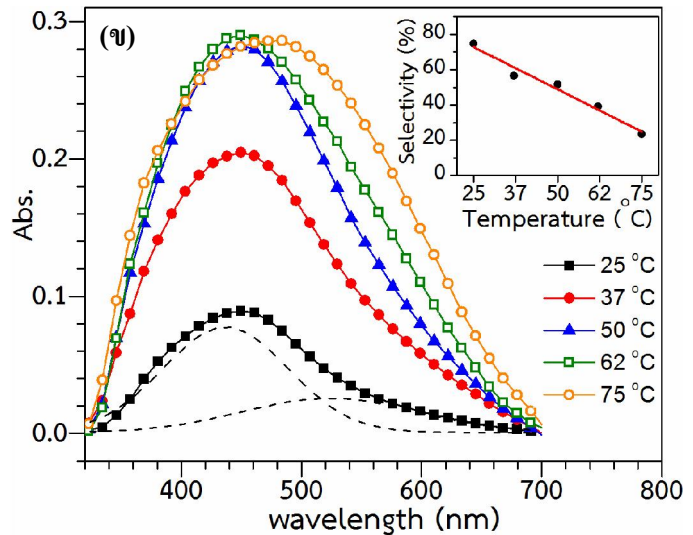
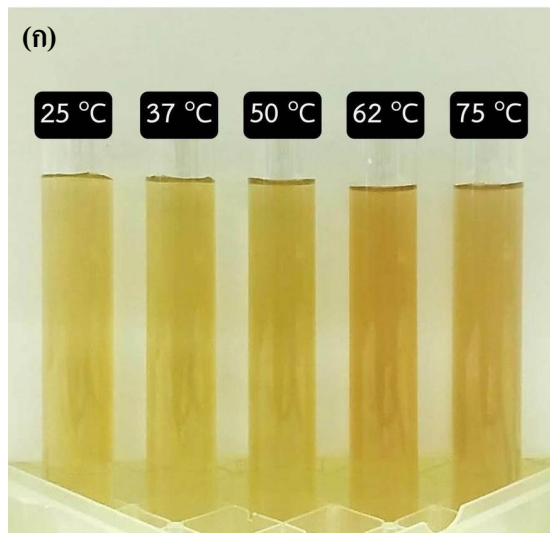
3.2 ผลของภาวะในการทำปฏิกิริยาต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อสมบัติของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25, 32, 50, 67 และ 75 องศาเซลเซียส โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ในเตรต 0.01 โมลต่อลิตร และเวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที ผลการทดลองพบว่าสารละลายซิลเวอร์ในเตรตมีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมใสไม่มีสี กลายเป็นสีน้ำตาลอ่อนเมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่ง โดยสารละลายที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงจะมีสีเข้มกว่าที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) ทั้งนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์แสดงได้ดังสมการที่ (4) [17]



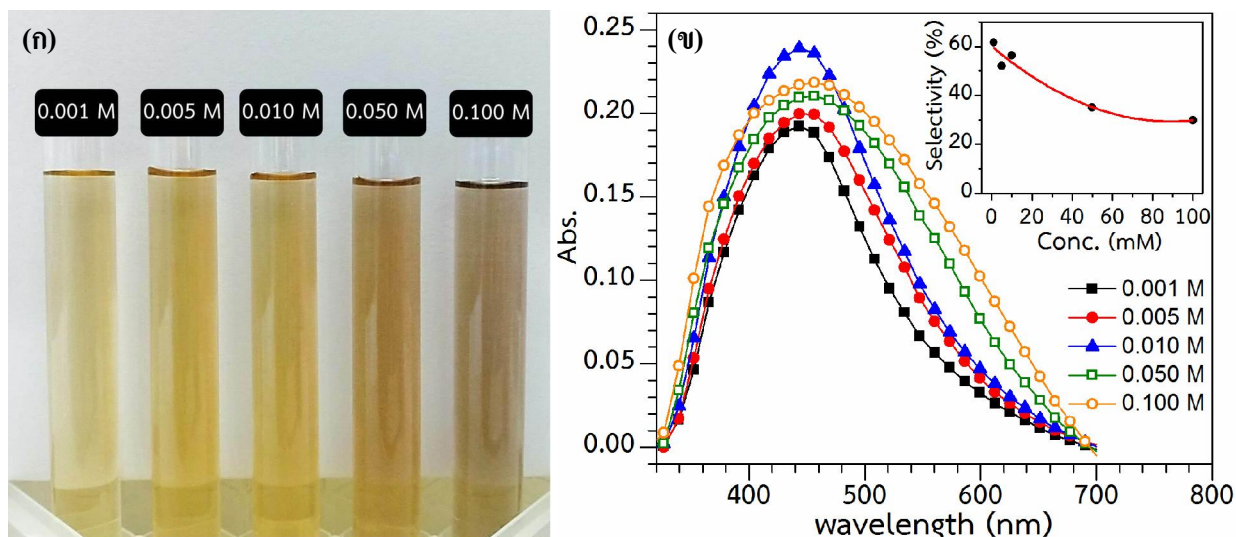
กล่าวคือ สารประกอบพอลิฟีนอล ($\text{Ar}(\text{OH})_n$) จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นสารประกอบควิโนน ($\text{Ar}(=\text{O})_n$) ในขณะที่ซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) จะถูกรีดิวซ์เป็นโลหะเงิน (Ag^0) เกิดเป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์กระจายตัวอยู่ในรูปของคอลลอยด์ [17] และด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลเวอร์นี้เองที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย เมื่อนำคอลลอยด์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรสโกปีจะพบการดูดกลืนแสงที่มียอดฟิสิกอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 440 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) ซึ่งเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์ที่พื้นผิว (Surface Plasmon Resonance: SPR) ของอนุภาคโลหะขนาดเล็กระดับนาโนเมตร [18] และยังสังเกตได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้พื้นที่ใต้กราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นั่นคือการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณอนุภาคนาโนซิลเวอร์มากขึ้น สอดคล้องกับแนวโน้มของความเข้มสีของคอลลอยด์ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาลักษณะของฟิสิกการดูดกลืนแสงพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ฟิสิกการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเบี่ยงเบนไปทางค่าความยาวคลื่นที่สูงขึ้นซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดขึ้นอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ ดังนั้นเพื่อให้ทราบข้อมูลในรายละเอียดจึงทำการแยกสัญญาณฟิสิกการดูดกลืนแสงตามลักษณะการแจกแจงแบบเกาส์เซียน (Gaussian deconvolution) ตัวอย่างการแยกสัญญาณฟิสิกการดูดกลืนแสงของคอลลอยด์ที่สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสแสดงดังเส้นประในรูปที่ 5 (ข) ผลการแยกสัญญาณฟิสิกพบว่า การดูดกลืนแสงของคอลลอยด์ทุกตัวอย่างมีการแจกแจงเป็นสองช่วง กล่าวคือ ช่วงแรกมียอดฟิสิกตรงกับค่าความยาวคลื่นประมาณ 440 นาโนเมตรซึ่งสอดคล้องกับการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ และช่วงที่สองมียอดฟิสิกเกิดขึ้นที่ค่าความยาวคลื่นสูงกว่า 500 นาโนเมตรซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงของอนุภาคโลหะเงินขนาดใหญ่ แสดงให้เห็นว่าโลหะเงินที่เกิดขึ้นมีทั้งส่วนที่เป็นอนุภาคระดับนาโนเมตรและอนุภาคนาโนขนาดใหญ่อยู่ปะปนกัน จากข้อมูลพื้นที่ใต้กราฟการดูดกลืนแสงทั้งสองช่วงทำให้สามารถประเมินร้อยละการเลือกเกิด (Selectivity) ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้และแสดงผลไว้ดังรูปแทรกในรูปที่ 5 (ข) ซึ่งพบว่าร้อยละการเลือกเกิดมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามหลักจลนศาสตร์ [19] ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้อาจทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาค (Aggregation) เกิดเป็นอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ รวมถึงมีการเปลี่ยนรูปร่างหรือสัณฐานของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่อุณหภูมิสูงได้

เช่นกัน [20] เมื่อพิจารณาทั้งในแง่ของปริมาณและร้อยละการเลือกเกิดจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยสารสกัดจากตำแยแมว คือ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงสี (ก) UV-Vis สเปกตรัม (ข) และร้อยละการเลือกเกิด (รูปแทรก) ของคอลลอยด์ AgNPs ที่สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้สารละลาย AgNO_3 0.01 โมลต่อลิตร และระยะเวลา 180 นาที

การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเตรตทำการทดลองที่ความเข้มข้น 0.001, 0.005, 0.01, 0.05 และ 0.10 โมลต่อลิตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของคอลลอยด์ที่เข้มข้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 6 (ก)) และสอดคล้องกับพื้นที่ใต้กราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 6 (ข)) นั่นคือการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเตรตจะทำให้ปริมาณอนุภาคนาโนซิลเวอร์มากขึ้นทั้งนี้การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเตรตนั้นเป็นการเพิ่มปริมาณซิลเวอร์ไอออนซึ่งเป็นสารตั้งต้น จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อทำการแยกสัญญาณฟลักการดูดกลืนแสงเพื่อประเมินร้อยละการเลือกเกิดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์พบว่า ร้อยละการเลือกเกิดของมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเตรต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.050 โมลต่อลิตรขึ้นไปจะให้อัตราการเลือกเกิดน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด คือ ร้อยละ 30 โดยประมาณเท่านั้น แสดงว่าการใช้ความเข้มข้นสูงส่งผลให้เกิดอนุภาคโลหะเงินที่มีขนาดใหญ่ ทั้งนี้การเพิ่มความเข้มข้นย่อมส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วจึงอาจทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาค (Aggregation) เกิดเป็นอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ได้ จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ในเตรตที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยสารสกัดจากตำแยแมว คือ 0.010 โมลต่อลิตร

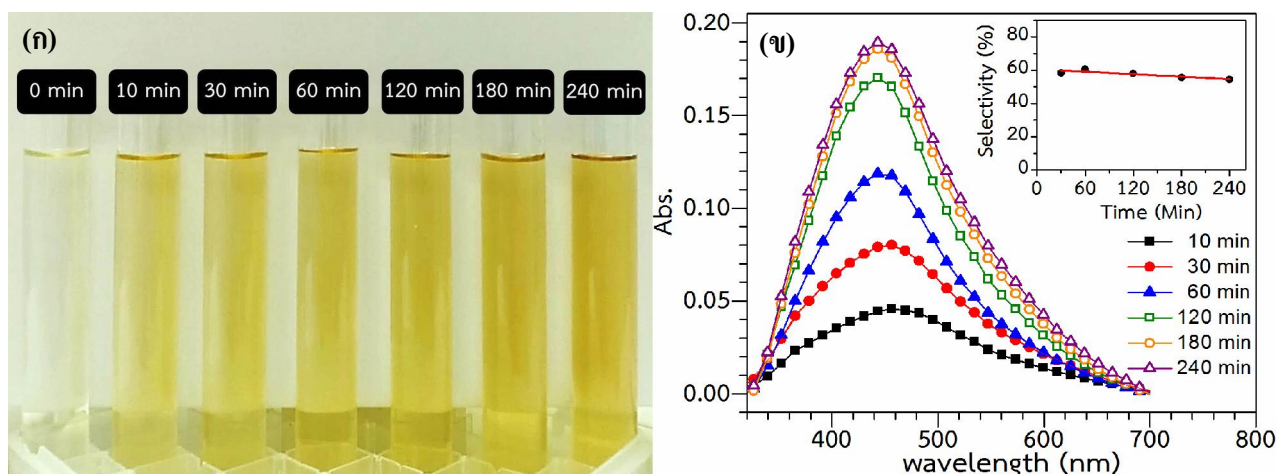


รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงสี (ก) UV-Vis สเปกตรัม (ข) และร้อยละการเลือกเกิด (รูปแทรก) ของคอลลอยด์ AgNPs ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลาย AgNO₃ ความเข้มข้นต่าง ๆ ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 180 นาที

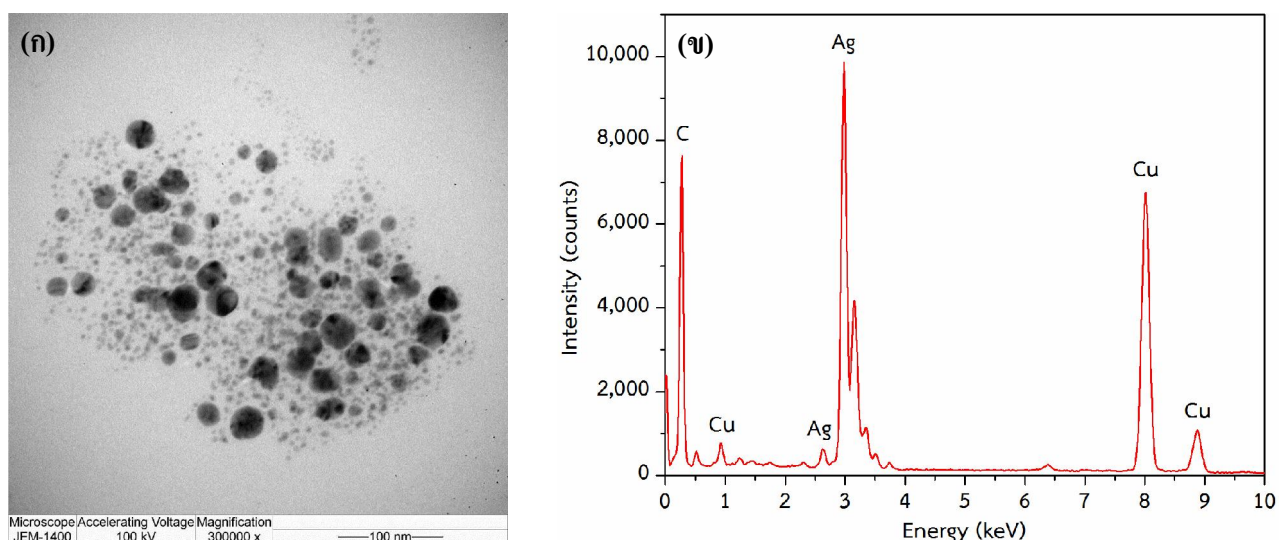
การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสมบัติของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ทำการทดลองที่ 10, 30, 60, 120, 180 และ 240 นาที โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ในเตรต 0.01 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าสีของคอลลอยด์มีความเข้มขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (รูปที่ 7 (ก)) และสอดคล้องกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่มีพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเช่นกัน (รูปที่ 7 (ข)) นั่นคือการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ปริมาณอนุภาคนาโนซิลเวอร์มากขึ้น แต่ทั้งนี้การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 180 เป็น 240 นาที ไม่ทำให้ได้อนุภาคนาโนซิลเวอร์เพิ่มขึ้นเท่าใดนักแสดงว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นจนเกือบสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 180 นาที และเป็นที่น่าสังเกตว่าการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างฟิสิกส์หรือการเลื่อนค่าความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนสูงสุด (ประมาณ 443 นาโนเมตร) เท่าใดนักแม้ว่าจะใช้ระยะเวลานานถึง 240 นาที ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละการเลือกเกิดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ประเมินได้จากการแยกสัญญาณฟิสิกส์ที่มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในช่วง 30 ถึง 240 นาที แสดงว่าการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่ส่งผลต่อการเกิดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ การที่อนุภาคนาโนซิลเวอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติแม้จะผ่านไประยะเวลานานบ่งบอกว่าอนุภาคมีความคงตัวสูง ไม่เกิดการจับตัวเป็นก้อน (Agglomeration) ทั้งนี้มีงานวิจัยรายงานว่าสารอินทรีย์ที่อยู่ในสารสกัดจากพืชสามารถห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลเวอร์และช่วยลดโอกาสที่อนุภาคนาโนขนาดเล็กจะจับตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ [1, 4, 21] จึงเป็นไปได้ว่าสารสกัดจากตำแยแมวมองมีองค์ประกอบที่สามารถป้องกันหรือชะลอการจับตัวของอนุภาคได้

ภาพถ่ายของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่ กำลังขยาย 300,000 เท่า (รูปที่ 8 (ก)) แสดงให้เห็นว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงกลม มีขนาดอนุภาค

ระหว่าง 1 - 30 นาโนเมตร โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับไม่กี่นาโนเมตรนั้นมีการกระจายตัวค่อนข้างดี ไม่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน สอดคล้องกับลักษณะของแถบพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่พื้นผิวที่ปรากฏใน UV-Vis สเปกตรัมดังที่แสดงไปแล้วข้างต้น และผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX (รูปที่ 8 (ข)) ปรากฏพีกที่คมชัด (Sharp peak) ณ ตำแหน่ง 3 keV อันเป็นการยืนยันการเกิดขึ้นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ นอกจากนี้ยังพบพีกของคาร์บอนซึ่งคาดว่าเป็นสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในสารสกัดจากตำแยแมวซึ่งยึดเกาะอยู่ที่ผิวอนุภาค ทั้งนี้พีกของทองแดงที่ปรากฏขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการใช้ grid ทองแดงเป็นอุปกรณ์ในการวิเคราะห์



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงสี (ก) และ UV-Vis สเปกตรัม (ข) และร้อยละการเลือกเกิด (รูปแทรก) ของคอลลอยด์ AgNPs ที่สังเคราะห์ในระยะเวลาต่าง ๆ ด้วยสารละลาย AgNO_3 0.01 โมลต่อลิตร และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 8 ภาพ TEM (ก) และ EDX สเปกตรัม (ข) ของ AgNPs ที่สังเคราะห์จากสารละลาย AgNO_3 0.01 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 180 นาที; ภาพที่แสดงเป็นตัวแทนจาก 6 ภาพที่กำลังขยายเดียวกัน

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยใช้สารสกัดจากตำแยแมวเป็นตัวรีดิวซ์จากธรรมชาติ กระบวนการสกัดด้วยน้ำกึ่งวิกฤตสามารถสกัดสารสำคัญประเภทสารประกอบฟีนอลจากตำแยแมวได้ โดยปริมาณสารประกอบฟีนอลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัด ภาวะที่ทำให้สารสกัดจากตำแยแมวมีปริมาณสารประกอบฟีนอลสูงที่สุดประมาณ 70 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมของสารตัวอย่าง คือ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันในโตรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ และระยะเวลา 60 นาที สารสกัดที่ได้สามารถรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออนให้เป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ ภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยาคือ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นสารละลายซิลเวอร์ในเตรต 0.01 โมลต่อลิตร และระยะเวลา 180 นาที อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ภายใต้ภาวะดังกล่าวมีลักษณะเป็นทรงกลม มีการกระจายของขนาดอยู่ในช่วง 1 ถึง 30 นาโนเมตร สารสกัดจากตำแยแมวนอกจากจะมีบทบาทในการเป็นตัวรีดิวซ์แล้ว ยังอาจมีบทบาทเป็นสารเพิ่มความคงตัวด้วยการช่วยป้องกันหรือชะลอการจับตัวกันของอนุภาค ทำให้อนุภาคนาโนซิลเวอร์มีเสถียรภาพยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก สาขาวิชาเคมี และศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา รวมถึงบุคลากรทุกท่าน สำหรับการให้ความสนับสนุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.M. Gamboa, E.R. Rojas, V.V. Martínez and J. Vega-Baudrit, "Synthesis and characterization of silver nanoparticles and their application as an antibacterial agent," International Journal of Biosensors & Bioelectronics, Vol. 5, No. 5, 2019, pp. 166-173.
- [2] อัจฉริยา ชมเชย, การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนซิลเวอร์นาโนด้วยวิธีทางชีวภาพโดยเชื้อแอคติโนมัยซีท [Online], 2561, Available: <http://cmruir.cmru.ac.th/handle/123456789/1414> [September 1, 2020].
- [3] กานต์พิมล กรไกร และ รินา ภัทรมานนท์, "อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชและความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์," วารสารวิทยาศาสตร์ มข., ปีที่ 45, ฉบับที่ 1, 2560, หน้า 34-52.
- [4] S.K. Panda, S. Sen, S. Roy and A. Moyez, "Synthesis of Colloidal Silver Nanoparticles by Reducing Aqueous AgNO₃ Using Green Reducing Agents," Materials Today: Proceedings, Vol. 5, No. 3, Part 3, 2018, pp. 10054-10061.
- [5] R. Sithara, P. Selvakumar, C. Arun, S. Anandan and P. Sivashanmugam, "Economical synthesis of silver nanoparticles using leaf extract of Acalypha hispida and its application in the detection of Mn(II) ions," Journal of Advanced Research, Vol. 8, No. 6, 2017, pp. 561-568.

- [6] D. Gnanasangeetha and M. Suresh, "A Review on Green Synthesis of Metal and Metal Oxide Nanoparticles," Nature Environment and Pollution Technology, Vol. 19, No. 5, 2020, pp. 1789-1800.
- [7] L. Castillo-Henríquez, K. Alfaro-Aguilar, J. Ugalde-Álvarez, L. Vega-Fernández, G. Montes de Oca-Vásquez and J.R. Vega-Baudrit, "Green Synthesis of Gold and Silver Nanoparticles from Plant Extracts and Their Possible Applications as Antimicrobial Agents in the Agricultural Area," Nanomaterials, Vol. 10, No. 9, 2020, pp. 1763-1786.
- [8] A. Rónavári, N. Igaz, D.I. Adamecz, B. Szerencsés, C. Molnar, Z. Kónya, I. Pfeiffer and M. Kiricsi, "Green Silver and Gold Nanoparticles: Biological Synthesis Approaches and Potentials for Biomedical Applications," Molecule, Vol. 26, No. 4, 2021, pp. 844-886.
- [9] W. Yang, "Degradation mechanism of biomass in subcritical water and applications of the remained solid char," Doctor of Philosophy in Environmental Science, Okayama University, 2015, pp. 6-8.
- [10] Z. Zekovi, S. Vidovi, J. Vladi, R. Radosavljevi, A. Cvejic, M.A. Elgndi and B. Pavli, "Optimization of subcritical water extraction of antioxidants from Coriandrum sativum seeds by response surface methodology," The Journal of Supercritical Fluids, Vol. 95, 2014, pp. 560-566.
- [11] พัทธนี ศรีงาม, อารยาพร มคธเทศ, ประภากร ตั้งชนธานี, พิทย กาญจนบุตร, พิทยา ภาภิรมย์ และ วชิราภรณ์ กัมปนาทวารวรรณ, "การศึกษาฤทธิ์ทางยาของรากต้นตำแยแมว (*Acalypha indica* L.) ในแมวบ้าน," วารสารสัตวแพทยศาสตร์ มข., ปีที่ 15, ฉบับที่ 1, 2548, หน้า 6-17.
- [12] C. Krishnaraj, P. Muthukumaran, R. Ramachandran, M.D. Balakumaran and P.T. Kalaichelvan, "Acalypha indica Linn: Biogenic synthesis of silver and gold nanoparticles and their cytotoxic effects against MDA-MB-231, human breast cancer cells," Biotechnology Reports, Vol. 4, No. 1, 2014, pp. 42-49.
- [13] M. Otto, Chemometrics: Statistics and Computer Application in Analytical Chemistry, 3th edition, Wiley-VCH, Germany, 2017.
- [14] N. Agustina, Y.A. Purwestri and L.H. Nugroho, "Antioxidant activity and histochemical analysis of *Acalypha indica* L. and *Acalypha wilkesiana* Muell. Arg. vegetative and generative organs," International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research, Vol. 8, No. 10, 2016, pp. 1657-1662.
- [15] S. Ravi, B. Shanmugam, G.V. Subbaiah, S.H. Prasad and K.S. Reddy, "Identification of food preservative, stress relief compounds by GC-MS and HR-LC/Q-TOF/MS; evaluation of antioxidant activity of *Acalypha indica* leaves methanolic extract (in vitro) and polyphenolic fraction (in vivo)," International Journal of Food Science and Technology, Vol. 54, No. 6, 2017, pp. 1585-1596.

- [16] R. Pragada, V. Vangeapurapu, S. Ethadi and V. Praneeth, “Phytochemical investigation and in vitro anti oxidant, anti microbial activity of different fractions of *Acalypha indica* Linn,” International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, Vol. 3, No. 4, 2011, pp. 314-317.
- [17] M. Ozyürek, N. Güngör, S. Baki, K. Güçlü and R.A. Apak, “Development of a silver nanoparticle-based method for the antioxidant capacity measurement of polyphenols,” Analytical Chemistry, Vol. 84, No. 18, 2012, pp. 8052-8059.
- [18] ปวีณา เดือนฉาย, “การประยุกต์ใช้อนุภาคทองคำนาโนเมตรในการตรวจวัดเชิงสี,” วารสารวิชาการปทุมวัน, ปีที่ 9, ฉบับที่ 26, 2562, หน้า 34-50.
- [19] S. Jain and M.S. Mehata, “Medicinal plant leaf extract and pure flavonoid mediated green synthesis of silver nanoparticles and their enhanced antibacterial property,” Scientific Reports, Vol. 7, 2017, pp. 1-13.
- [20] X. Jiang, W. Chen, C. Chen, S. Xiong and A. Yu, “Role of temperature in the growth of silver nanoparticles through a synergetic reduction approach,” Nanoscale Research Letters, Vol. 6, No. 1, 2011, pp. 1-9.
- [21] Y. Zhou and R.C. Tang, “Facile and eco-friendly fabrication of AgNPs coated silk for antibacterial and antioxidant textiles using honeysuckle extract,” Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, Vol. 178, 2018, pp. 463-471.