

การเพิ่มประสิทธิภาพอิเล็กโทรด SPCE ด้วยอนุภาคนาโนของทองคำและแพลทินัม
เพื่อปรับปรุงการตรวจวัดภาวะเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน
Enhancing SPCE Electrodes with Gold and Platinum Nanoparticles for
Improved Oxidative Stress Detection

สนธยา พงษ์ธานี^{1*} หยาดนภา ผาเจริญ² ศีตกานต์ นัตพบสุข² และ ชีราวุฒิ เพชรเย็น^{1,3}
Sonthaya Pongthanee^{1*}, Yardnapar Parcharoen², Sitakan Natphopsuk³ and
Chiravoot Pechyen^{1,3}

¹สาขาวิชานวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

¹ Materials Innovation and Technology Faculty of Science and Technology, Thammasat University

²วิทยาลัยแพทยนานาชาติจุฬารักษ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

²Chulabhorn International College of Medicine, Thammasat University

³หัวหน้าศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีสมัยใหม่และการผลิตขั้นสูงสำหรับนวัตกรรมทางการแพทย์

³Center of Excellence in Modern Technology and Advanced Manufacturing for Medical innovation

Email: Pongthanee.sty@gmail.com

Received : August 7, 2024

Revised : October 4, 2024

Accepted : November 29, 2024

บทคัดย่อ

ปัจจุบันปัญหาสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับภาวะเครียดออกซิเดชัน (Oxidative Stress) มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาโรคหลายชนิด เช่น โรคเบาหวาน โรคหัวใจ และโรคระบบประสาท การตรวจวัดภาวะนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในทางการแพทย์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาเซนเซอร์ที่ใช้อนุภาคทองคำ (AuNPs) และอนุภาคแพลทินัม (PtNPs) โดยสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมและวิเคราะห์การทดสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) แสดงตำแหน่งการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมจากนั้นใช้เทคนิคชุบด้วยไฟฟ้าลงบนขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (Screen-Printed Carbon Electrode, SPCE) สำหรับใช้ในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตริกเพื่อตรวจวัดภาวะเครียดออกซิเดชันในอนาคต โดยใช้อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมกับสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride: KCl) ที่กระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -1 โวลต์ และวิเคราะห์ผลด้วยการทดสอบด้วยรามานสเปกโทรสโกปีพบพีคที่ 1200-1450 cm^{-1} และ 1500-1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของคาร์บอน ทองคำและแพลทินัมที่ทับซ้อนกันและใช้เทคนิคกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) แสดงลักษณะอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมที่ชัดเจน และแสดงขนาดอนุภาคที่ค่าเฉลี่ย 6.4 นาโนเมตร

เมื่อทดสอบชีวไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิค โพลีกราฟิกัลโวลเทมเมตรี พบว่าการชุบที่กระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์ ให้สัญญาณที่ปรับปรุงชัดเจนที่สุดเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าอื่น ๆ รวมถึงชีวไฟฟ้าที่ไม่ได้ปรับปรุง การศึกษานี้สรุปว่าการใช้อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมสามารถปรับปรุงสัญญาณของชีวไฟฟ้า SPCE ได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานวิจัยการตรวจจับภาวะเครียดออกซิเดชันในอนาคต

คำสำคัญ: อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม, โพลีกราฟิกัลโวลเทมเมตรี, ภาวะเครียดออกซิเดชัน, ชีวไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน

ABSTRACT

Currently, health issues related to oxidative stress play a significant role in the development of various diseases, such as cancer, heart disease, and neurodegenerative disorders. Monitoring oxidative stress is critical in medical diagnostics. This research aims to develop a sensor utilizing gold nanoparticles (AuNPs) and platinum nanoparticles (PtNPs). The nanoparticles were synthesized and characterized using X-ray diffraction (XRD), revealing the diffraction patterns of gold and platinum nanoparticles. These nanoparticles were then electrochemically deposited onto Screen-Printed Carbon Electrodes (SPCE) for use in cyclic voltammetry (CV) to detect oxidative stress markers in future applications. The gold and platinum nanoparticles were combined with a potassium chloride (KCl) solution and electroplated at potentials of -0.25 V, -0.5 V, -0.75 V, and -1.0 V. Raman spectroscopy analysis showed peaks at $1200-1450\text{ cm}^{-1}$ and $1500-1600\text{ cm}^{-1}$, corresponding to overlapping peaks of carbon, gold, and platinum. Scanning Electron Microscopy (SEM) was employed to visualize the gold and platinum nanoparticles, revealing an average particle size of 6.4 nm . In cyclic voltammetry testing, the electrode electroplated at -0.25 V exhibited the most significant signal enhancement compared to other potentials and the unmodified electrode. This study concludes that gold and platinum nanoparticles can substantially improve the signal performance of SPCEs, and the modified electrodes hold promising potential for future research in oxidative stress detection.

Key Words: AuPtNPs, Cyclic voltammetry, Oxidative stress, Screen-Printed Carbon Electrode

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับภาวะเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) เป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากภาวะเครียดออกซิเดชันเป็นสาเหตุหลักของการเกิดโรคเรื้อรังหลายชนิด เช่น โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคมะเร็ง โรคเบาหวาน และโรคทางระบบประสาท เช่น อัลไซเมอร์ (Storz and Imlay, 1999) ซึ่งภาวะเครียดออกซิเดชันเกิดจากการสะสมของอนุมูลอิสระที่มากเกินไปทำให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์และเนื้อเยื่อต่าง ๆ ของร่างกายการตรวจจับและวิเคราะห์ระดับภาวะเครียดออกซิเดชันในร่างกายจึงเป็นสิ่งสำคัญในการวินิจฉัยและติดตามโรค (Sies *et al.*, 2017) การใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry; CV) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับภาวะเครียดออกซิเดชัน อย่างเช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide), ซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide), และสารชีวโมเลกุลอื่น ๆ ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (Elgrishi *et al.*, 2018) การปรับปรุงขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน (Screen-Printed Carbon Electrode: SPCE) ด้วยอนุภาคนาโนทองคำ (Gold nanoparticles: AuNPs) และแพลทินัม (Platinum nanoparticles: PtNPs) มีความสำคัญหลายประการโดยวัตถุประสงค์หลักของการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า SPCE คือ 1) เพิ่มความไวในการตรวจจับ อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมมีพื้นที่ผิวที่กว้างและคุณสมบัติทางเคมีที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าและการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ทำให้การตรวจจับสารออกซิเดชันมีความไวสูงขึ้น (Dechtrirat *et al.*, 2018) 2) เพิ่มความเสถียรของขั้วไฟฟ้า การเคลือบอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมบน SPCE สามารถเพิ่มความเสถียรในการทำงานของขั้วไฟฟ้า ทำให้สามารถใช้งานได้นานขึ้นและลดการเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้า (Wang *et al.*, 2022) 3) ประหยัดค่าใช้จ่าย SPCE เป็นขั้วไฟฟ้าที่ผลิตง่ายและราคาถูก การปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยไม่ต้องลงทุนมากในการผลิตอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อน 4) การวิเคราะห์ที่แม่นยำและรวดเร็ว การใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีกับขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงแล้วสามารถวิเคราะห์ระดับของสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับภาวะเครียดออกซิเดชัน ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ 5) การประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและการแพทย์ ขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงแล้วสามารถนำไปใช้ในการวิจัยด้านชีวเคมีและการแพทย์ เพื่อศึกษากระบวนการออกซิเดชันและพัฒนาวิธีการตรวจจับโรคที่เกิดจากภาวะเครียดออกซิเดชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น การปรับปรุงขั้วไฟฟ้า SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมเพื่อใช้ในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี จึงเป็นการพัฒนาที่มีความสำคัญและมีศักยภาพในการตรวจจับและวิเคราะห์สารออกซิเดชันที่เกี่ยวข้องกับภาวะเครียดออกซิเดชัน ซึ่งสามารถนำไปสู่การพัฒนาการวินิจฉัยและการรักษาโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การศึกษาการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมเพื่อใช้ในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี เพื่อการตรวจจับภาวะเครียดออกซิเดชัน โดยที่เรื่องภาวะเครียดออกซิเดชัน

(Faradilla *et al.*, 2022) เป็นที่นิยมในวงการการแพทย์ในปัจจุบัน การพัฒนา SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมเป็นผลมาจากความต้องการในการพัฒนาเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดออกซิเดชันและเกี่ยวกับภาวะอนุมูลอิสระในร่างกาย (Free radicles) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดโรคต่าง ๆ รวมถึงภาวะที่เกี่ยวข้องกับอายุ มะเร็ง โรคหัวใจ และโรคเรื้อรังอื่น ๆ การพัฒนาขั้วไฟฟ้าที่มีความไวต่อการตอบสนองและความถูกต้อง ในการตรวจวัดออกซิเดชันจึงเป็นสิ่งที่ช่วยเรื่องการอ่านสัญญาณได้ดีมากขึ้น SPCE ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมมีความไวต่อการตอบสนองที่สูงต่อการเปลี่ยนแปลงในออกซิเดชัน ทำให้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวัดระดับภาวะเครียดออกซิเดชัน ในตัวอย่างทดลองและที่สำคัญเป็นอุปกรณ์ที่สามารถผลิตได้ในขนาดที่เล็กและราคาถูก ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานในสถานที่ต่าง ๆ และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในช่วงเวลาที่เร็วขึ้นการใช้ SPCE ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี เป็นการพัฒนาเทคนิคที่มีความถูกต้องและอ่อนไหวต่อการวัดภาวะเครียดออกซิเดชัน ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้งานได้ง่ายและความไวต่อการทำงานการศึกษาดังกล่าวมีความสำคัญอย่างมากในการเข้าใจและการควบคุมสุขภาพของมนุษย์ โดยเฉพาะในการวิเคราะห์และการตรวจวัดภาวะเครียดออกซิเดชันที่เป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดโรคต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้อง (Faradilla *et al.*, 2022)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาและพัฒนารูปแบบการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม และใช้เทคนิคการชุบด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Deposition) ลงบน SPCE เพื่อปรับปรุงสัญญาณโดยใช้ในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ในการวิเคราะห์การปรับปรุงสัญญาณเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าแบบปกติที่ไม่ได้มีการชุบไฟฟ้า

วัตถุประสงค์การวิจัย

สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมเพื่อนำมาปรับปรุงขั้วไฟฟ้า SPCE ด้วยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงสัญญาณ และหากระแสไฟฟ้าที่สามารถปรับปรุงสัญญาณได้ดีที่สุดสำหรับพัฒนาเป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดภาวะเครียดออกซิเดชัน

วิธีการดำเนินการวิจัย

เครื่องมือการวิจัย

ไฮโดรเจนเตตระคลอโรออเรต(Hydrogen Tetrachloroaurate; $\text{HAuCl}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ดีไฮโดรเจนเฮกซะคลอโรแพลติน (IV) เฮกซะไฮเดรต (Dihydrogen hexachloroplatinate (IV) hexahydrate; $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), กรดคลอโรจีนิก (Chlorogenic Acid; CGA) เป็นสารเคมีใช้สำหรับวิเคราะห์ทดสอบ โดยถูกเตรียมในรูปแบบของสารละลายในน้ำปราศจากไอออน (DI Water), โพแทสเซียมคลอไรด์

(Potassium chloride; KCl) ความเข้มข้น 0.5 M ในน้ำปราศจากไอออน, ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลีน (Phosphate-buffered saline; PBS) 1 M ในน้ำปราศจากไอออน และ เครื่องปาล์มเซ็นส์ (PalmSens4; FRA / EIS: 10 μ Hz up to 1 MHz) สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าที่ถูกปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม

1. สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม (AuPtNPs)

เตรียมสารละลายทองคำ 0.5 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 250 มิลลิลิตร และ แพลทินัม 0.5 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 250 มิลลิลิตร จากนั้นเตรียม CGA 1 กรัมในน้ำ 7 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนจนเดือด 10 นาที ใส่สารละลายแพลทินัมที่เตรียมไว้ 1 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำมาตั้งให้ความร้อนจนเดือดและใส่สารละลายทองคำที่เตรียมไว้ 1 มิลลิลิตร และกวนให้เข้ากัน โดยสารละลายทั้งหมดจะเป็นสัดส่วน 1:1:1 และทิ้งไว้ข้ามคืน (Chen and Meng, 2021; Chen *et al.*, 2021)

การเตรียมอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมที่สังเคราะห์แล้วเพื่อนำไปทดสอบด้วย XRD เพื่อระบุชนิดของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม เริ่มจากล้างสารละลาย CGA ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาให้เหลือแค่อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมบริสุทธิ์ด้วยการปั่นเหวี่ยง จากนั้นนำไปใส่เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dry) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วจึงนำไปทดสอบ

2. การชุบด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Deposition) ลงบนขั้วไฟฟ้า SPCE

เตรียมอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม 2% ในสารละลาย KCl ความเข้มข้น 0.5 M ในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นใช้ไมโครปิเปตดูดสารละลายที่ผสมไว้หยดลงบนขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ต่ออยู่บนเครื่องปาล์มเซ็นส์ จนสารละลายคลุมทั่วส่วนของขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) จากนั้นให้กระแสไฟฟ้าที่ -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -0.1 โวลต์ ใช้เวลาในการให้กระแสไฟฟ้าที่ 300 วินาทีโดยใช้โหมดวัดกระแสไฟฟ้าตามเวลา (Chronoamperometer; CA) (Parchaen, 2014 และ Weichun Ye, 2012) ทำทั้งหมด 5 ซ้ำ จากนั้นนำไปอบให้แห้งใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อนำไปทดสอบด้วยเทคนิค รามานสเปกโทรสโกปี และ SEM เพื่อยืนยันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมบนขั้วไฟฟ้า SPCE และ ทดสอบการปรับปรุงสัญญาณด้วยเครื่องปาล์มเซ็นส์ในโหมดไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry; CV) ต่อไป

3. การทดสอบการปรับปรุงสัญญาณบนขั้วไฟฟ้า SPCE ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

เตรียมสารละลาย PBS 1 M ในน้ำปราศจากไอออน นำขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ชุบด้วยไฟฟ้ากับอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมต่อกับเครื่องปาล์มเซ็นส์ใช้ไมโครปิเปตดูดสารละลายที่ผสมไว้หยดลงบนขั้วไฟฟ้า SPCE จากนั้นให้กระแสไฟฟ้าที่ -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -0.1 โวลต์ ใช้เวลาในการให้กระแสไฟฟ้าที่ 300 วินาที โดยใช้โหมดไซคลิกโวลแทมเมทรี ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้น

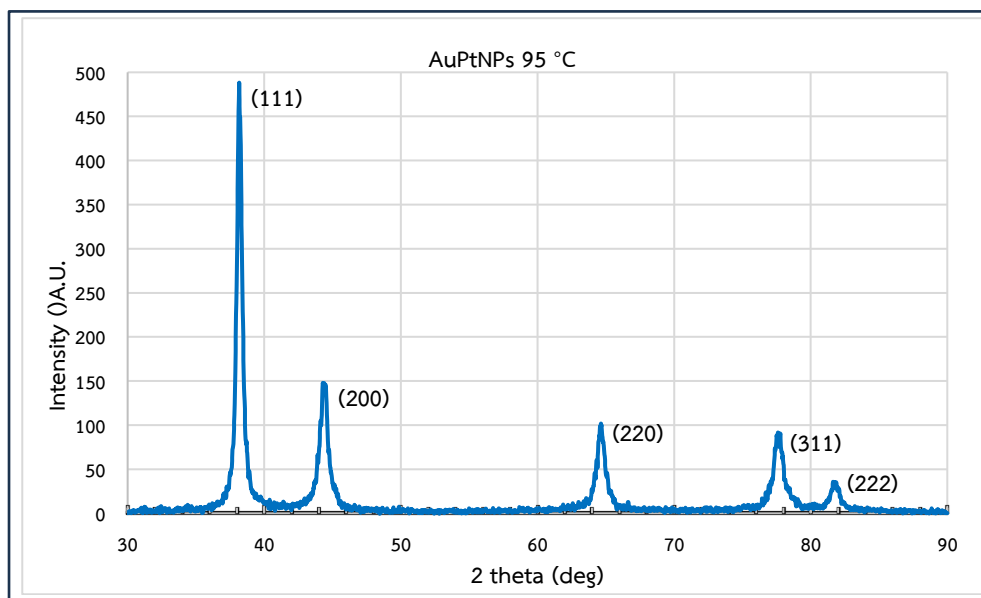
วิเคราะห์ผลจากกราฟที่แสดงค่าโดยเครื่องปาล์มเซ็นส์เพื่อหาช่วงไฟฟ้าที่ให้กระแสไฟฟ้าสูงที่สุด (Lisund *et al.*, 2022; Parcharoen, 2014)

ผลการวิจัย

1. การตรวจสอบสมบัติของอนุภาคนาโน

1.1. การตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD)

การตรวจสอบสมบัติของอนุภาคนาโนด้วยเทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์มาใช้ในการวิเคราะห์และระบุโครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด (Holder and Schaak, 2019 และ Mourdikoudis *et al.*, 2018) ผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD จากภาพประกอบ 1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมมีตำแหน่งการเลี้ยวเบนอยู่ที่ 2 theta ประมาณ 38.1°, 44.4°, 64.8°, 77.6° และ 81.8° ตามลำดับโดยที่ 81.8° เป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนของแพลทินัม เนื่องจากระนาบ (111), (200), (220), (311) และ (222) (Mavukkandy *et al.*, 2016; Sneha *et al.*, 2014) ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมอ้างอิงจาก (Kumar *et al.*, 2017)

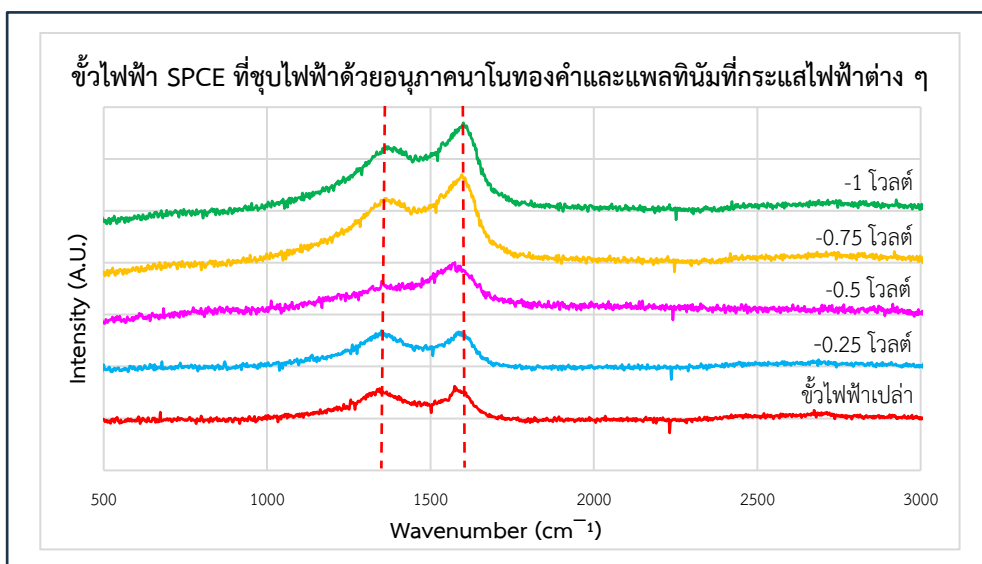


ภาพประกอบ 1 กราฟแสดงผล XRD patterns ของผลึกอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม

2. การตรวจสอบข้อไฟฟ้า SPCE ที่ผ่านการชุบด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Deposition) ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม

2.1. การตรวจสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy)

เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจยืนยันเอกลักษณ์ของสารโดยอาศัยหลักการทางแสง โดยที่สารแต่ละตัวจะมีลักษณะการกระเจิงแสงไม่เหมือนกัน โดยหลังจากการชุบไฟฟ้าด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมลงบนข้อไฟฟ้า SPCE ข้อไฟฟ้าถูกนำมาตรวจสอบการมีอยู่ของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม

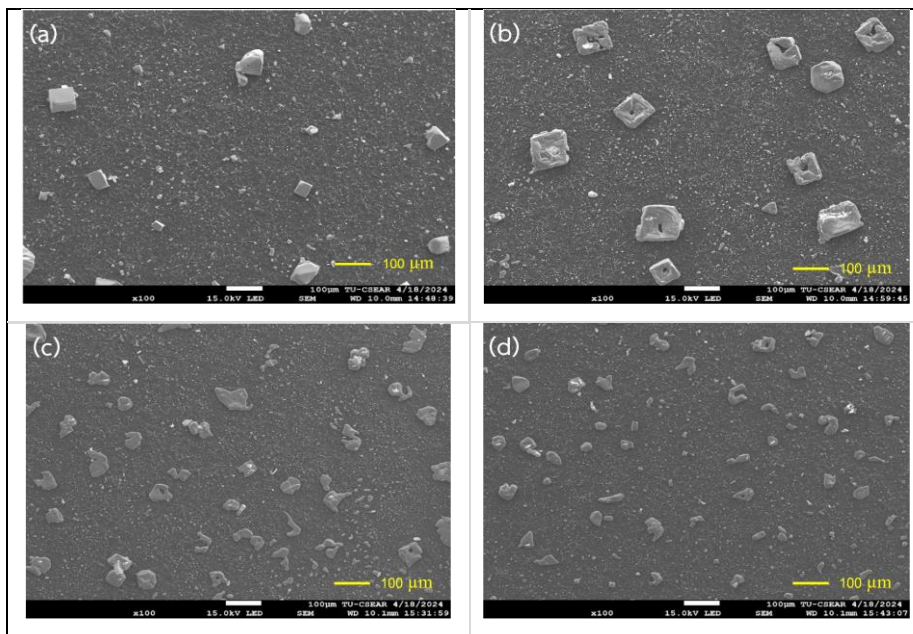


ภาพประกอบ 2 พิกของข้อไฟฟ้า SPCE ที่ชุบด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมที่กระแสไฟฟ้าต่าง ๆ มีดังนี้: ที่กระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์: พิกอยู่ที่ 1351.558 cm^{-1} และ 1594.545 cm^{-1} ที่กระแสไฟฟ้า -0.5 โวลต์: พิกอยู่ที่ 1349.63 cm^{-1} และ 1568.51 cm^{-1} ที่กระแสไฟฟ้า -0.75 โวลต์: พิกอยู่ที่ 1348.665 cm^{-1} และ 1584.903 cm^{-1} ที่กระแสไฟฟ้า -1 โวลต์: พิกอยู่ที่ 1348.665 cm^{-1} และ 1580.081 cm^{-1} ข้อไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการชุบไฟฟ้า: พิกอยู่ที่ 1349.63 cm^{-1} และ 1578.153 cm^{-1}

2.2. การตรวจสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบพื้นผิวของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับโครงสร้างพื้นผิว ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคนาโนได้ ภาพที่แสดงในภาพประกอบ 3 เป็นภาพของอนุภาคนาโนทองคำและ

แพลทินัมบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ผ่านการชุบด้วยไฟฟ้าที่ใช้กระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -1 โวลต์ โดยขยายด้วยกำลังขยาย 100 เท่า และใช้พลังงานลำแสงอิเล็กตรอนที่ 15.0 กิโลโวลต์



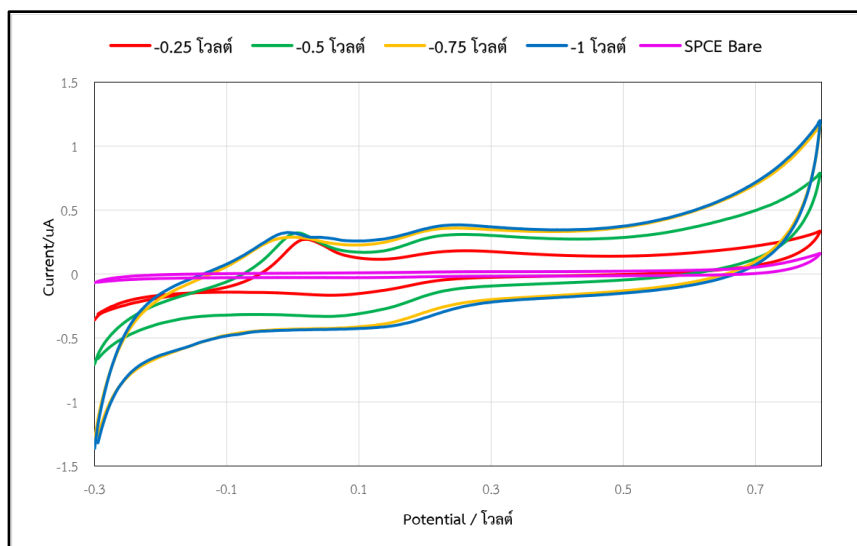
ภาพประกอบ 3 แสดงภาพจากเทคนิค SEM ของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า SPCE: (a) ขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ชุบด้วยกระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์ (b) ขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ชุบด้วยกระแสไฟฟ้า -0.5 โวลต์ (c) ขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ชุบด้วยกระแสไฟฟ้า -0.75 โวลต์ (d) ขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ชุบด้วยกระแสไฟฟ้า -1 โวลต์

จากภาพประกอบ 3 จะเห็นความแตกต่างของสัณฐานวิทยาของพื้นผิว SPCE เมื่อมีการกระตุ้นไฟฟ้าที่ต่างกันระหว่าง -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -1.0 โวลต์ ซึ่งส่งผลต่อการจัดเรียงตัวและขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว โดยสามารถอธิบายความแตกต่างได้ดังนี้ ภาพ (a) ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.25 โวลต์ พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคในรูปทรงที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ และอนุภาคมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับภาพอื่น ๆ ภาพ (b) ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.5 โวลต์ อนุภาคที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการกระจายตัวเป็นกลุ่ม ๆ อย่างเห็นได้ชัด การรวมตัวของอนุภาคแสดงถึงกระบวนการเติบโตที่ชัดเจนขึ้น ภาพ (c) ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.75 โวลต์ สัณฐานวิทยาของอนุภาคเปลี่ยนไปเป็นลักษณะที่มีความแตกต่างทั้งในด้านรูปทรงและการกระจายตัว มีการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอ และการจัดเรียงตัวของอนุภาคไม่เป็นระบบเท่าในภาพ (a) และ (b) ภาพ (d) ที่ศักย์ไฟฟ้า -1.0 โวลต์ การกระจายตัวของอนุภาคมีความไม่สม่ำเสมออย่างชัดเจนมากที่สุด และขนาดของอนุภาคยังคงมีการเติบโตและกระจาย

ไปในลักษณะที่ซับซ้อนกว่า ความแตกต่างของสัญญาณวิทยาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการสะสมและการจัดเรียงตัวของอนุภาคบนพื้นผิว SPCE

2.3. การตรวจสอบสัญญาณชีวไฟฟ้า SPCE ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี เป็นวิธีการวัดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าของสารเคมีในสารละลายที่ใช้ตรวจสอบสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของชีวไฟฟ้าและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของชีวไฟฟ้า การปรับปรุงสมบัติของชีวไฟฟ้าด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของชีวไฟฟ้าได้ โดยเพิ่มพื้นที่ผิวที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้นและปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมี การทดสอบใช้สารละลาย PBS เป็นอิเล็กโทรไลต์ และใช้กระแสไฟฟ้าต่างกันว่า -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -1 โวลต์ เป็นเวลา 300 วินาที ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง



ภาพประกอบ 4 แสดงกราฟเปรียบเทียบของ การทดสอบสัญญาณไฟฟ้าด้วยเทคนิค CV ที่กระแสไฟฟ้าแตกต่างกันของชีวไฟฟ้า SPCE ที่ชุบไฟฟ้าด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม

ตารางที่ 1 ผลการทำไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) สำหรับอิเล็กโทรดทั้งห้า (-0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์, -1 โวลต์ และ SPCE)

อิเล็กโทรด	I _{pa}	E _{pa}	I _{pc}	E _{pc}	ΔE _p (mV)	คุณภาพ ของฟิค	เชิงเส้นของ I _p / V ^{1/2} (%)	กระแสความจุ (μA)
-0.25 โวลต์	0.33	0.80	-0.36	-0.30	1097.74	0.94	91.99	9.41
-0.5 โวลต์	0.78	0.80	-0.70	-0.30	1097.74	0.27	74.97	3.05
-0.75 โวลต์	1.16	0.80	-1.30	-0.30	1097.74	0.43	7.36	9.80
-1 โวลต์	1.19	0.80	-1.36	-0.30	1097.74	0.19	62.94	8.18
SPCE	0.16	0.80	-0.07	-0.30	1097.74	0.01	83.31	3.67

คำจำกัดความในตาราง

- I_{pa} (กระแสฟิคแอโนดิก): แสดงค่ากระแสสูงสุดที่สังเกตได้ในระหว่างการออกซิเดชัน
- E_{pa} (ศักย์ที่กระแสฟิคแอโนดิก): ศักย์ที่กระแสฟิคแอโนดิกเกิดขึ้น
- I_{pc} (กระแสฟิคคาโทดิก): แสดงค่ากระแสสูงสุดที่สังเกตได้ในระหว่างการรีดักชัน
- E_{pc} (ศักย์ที่กระแสฟิคคาโทดิก): ศักย์ที่กระแสฟิคคาโทดิกเกิดขึ้น
- ΔE_p (mV): ความแตกต่างระหว่างศักย์ของฟิคแอโนดิกและคาโทดิก คำนวณโดยอิงถึงปฏิกิริยาทางอิเล็กโทรเคมีที่มีการย้อนกลับได้มากขึ้น
- คุณภาพของฟิค: บ่งบอกถึงคุณภาพหรือความชัดเจนของฟิคที่สังเกตได้
- เชิงเส้นของ I_p ต่อ V^{1/2}: บ่งบอกถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างกระแสฟิค (I_p) กับรากที่สองของอัตราสแกน (V^{1/2}) เชิงเส้นสูงบ่งชี้ถึงกระบวนการควบคุมการกระจายตัว
- กระแสความจุ: บ่งบอกถึงกระแสที่ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี แต่เป็นผลจากชั้นความจุ

อภิปรายผลการวิจัย

การปรับปรุงชีวไฟฟ้า SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม โดยใช้ CGA เป็นตัวรีดิวซ์และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการชุบไฟฟ้าลงบนชีวไฟฟ้า SPCE ที่กระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์, และ -1 โวลต์ พบว่ากระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์ สามารถปรับปรุงสัญญาณได้ดีที่สุด การทดลองตรวจสอบผลตั้งแต่การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม รวมถึงการปรับปรุงสัญญาณด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) พบว่า อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมมีตำแหน่งการเลี้ยวเบนอยู่ที่ 2 theta ประมาณ 38.1°, 44.4°, 64.8°, 77.6° และ 81.8° ตามลำดับโดยที่ 81.8° เป็นตำแหน่ง

การเลี้ยวเบนของแพลทินัม เนื่องจากระนาบ (111), (200), (220), (311) และ (222) ซึ่งอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกแบบ face-centered cubic (FCC) โดยพิคหลักที่ 38.1° เป็นพิคที่บ่งบอกถึงการมีอยู่ของโครงสร้างผลึกทองคำและแพลทินัมแบบ FCC ในปริมาณที่มากและเป็นระเบียบ (Dheyab *et al.*, 2020; Khalil *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2012)

การตรวจสอบข้อไฟฟ้า SPCE ที่ผ่านการชุบไฟฟ้าด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม โดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี พบว่ามีการเลื่อนตำแหน่งจุดพิคและความเข้มของพิคที่สูงขึ้นของสเปกตรัมรามานเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับ SPCE ที่ไม่ได้ชุบไฟฟ้า ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของสเปกตรัมรามาน ซึ่งอาจเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนาโนและ SPCE นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นผิว ภาพประกอบ 2 แสดงให้เห็นว่าพิคของข้อไฟฟ้า SPCE ที่ไม่ได้ผ่านการชุบกับข้อไฟฟ้า SPCE ที่ผ่านการชุบไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ มีความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างกันที่ความเข้ม ซึ่งข้อไฟฟ้า SPCE ที่ผ่านการชุบไฟฟ้ามีความเข้มที่สูงกว่า เนื่องจากความยาวคลื่นของคาร์บอนบนข้อไฟฟ้า และความยาวคลื่นของทองคำและแพลทินัมมีความใกล้เคียงกันมาก (Li *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024; Ren *et al.*, 2007) ดังนั้นการตรวจสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปีจึงบอกได้เพียงเบื้องต้นว่ามีอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมอยู่บนพื้นผิวของข้อไฟฟ้า SPCE จึงได้มีการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM เพิ่มเติม

การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างและขนาดของอนุภาคนาโนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) พบว่าลักษณะอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดประมาณ 6.4 นาโนเมตร

การตรวจสอบพื้นผิวของข้อไฟฟ้า SPCE ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าการปรับปรุงข้อไฟฟ้าด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมบนพื้นผิวของข้อไฟฟ้า SPCE ที่ใช้กระแสไฟฟ้าต่างกัมีผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคนาโน การใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้อัตราการกระจายตัวของอนุภาคนาโนลดลงและการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ โดยที่กระแสไฟฟ้าต่ำ -0.25 โวลต์ อนุภาคนาโนมีขนาดเล็กและการกระจายสม่ำเสมอมากกว่า แต่เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่ -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -1 โวลต์ อนุภาคนาโนมีขนาดเกาะกลุ่มและการกระจายตัวได้น้อยลง

การตรวจสอบสัญญาณข้อไฟฟ้า SPCE ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ผลการใช้กระแสไฟฟ้าในการปรับปรุงข้อไฟฟ้า SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมบนข้อไฟฟ้า SPCE แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการตอบสนองกระแสไฟฟ้าของการวัด CV การปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยงานวิจัยนี้พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ปรับปรุงและให้ผลดีที่สุดคือ -0.25 โวลต์ โดยวัดจากพื้นที่ใต้กราฟที่มีค่ามากที่สุด ได้แก่ -0.25 โวลต์ มีพื้นที่ใต้กราฟ 5.72 ตารางเซนติเมตร, -0.5 โวลต์ มีพื้นที่ใต้

กราฟ 2.24 ตารางเซนติเมตร, -0.75 โวลต์ มีพื้นที่ใต้กราฟ 0.71 ตารางเซนติเมตร และ -1 โวลต์ มีพื้นที่ใต้กราฟ 0.57 ตารางเซนติเมตร

จากตารางที่ 1 อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 โวลต์ แสดงกระแสฟิคที่ค่อนข้างต่ำ ($I_{pa}=0.33 \mu A$, $I_{pc}=-0.36 \mu A$) ค่าความแตกต่างของศักย์ที่น้อย แสดงให้เห็นถึงการโยกย้ายอิเล็กตรอนที่ช้า ในขณะที่อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.5 โวลต์ แสดงกระแสฟิคที่สูงขึ้นมาก ($I_{pa}=0.78 \mu A$, $I_{pc}=-0.70 \mu A$) ซึ่งบ่งชี้ถึงกิจกรรมทางอิเล็กโทรเคมีที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 โวลต์ อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.75 และ -1 โวลต์ แสดงกระแสฟิคที่สูงที่สุดในบรรดาอิเล็กโทรดทั้งหมด (อิเล็กโทรดที่ศักย์ -1 โวลต์ มี $I_{pa}=1.19 \mu A$, $I_{pc}=-1.36 \mu A$) ซึ่งบ่งชี้ถึงกิจกรรมทางอิเล็กโทรเคมีที่สูง อิเล็กโทรด SPCE แสดงกระแสฟิคที่ต่ำที่สุด ($I_{pa}=0.16 \mu A$, $I_{pc}=-0.07 \mu A$) ซึ่งบ่งบอกถึงกิจกรรมทางอิเล็กโทรเคมีที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรดอื่น ๆ

อิเล็กโทรดทุกชนิดมีค่า ΔE_p เท่ากันที่ 1097.74 มิลลิโวลต์ ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างของศักย์ที่สูงและอาจเป็นผลมาจากความต้านทานภายในสูงหรือปฏิกิริยาทางอิเล็กโทรเคมีที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ง่าย คุณภาพฟิคที่สูงสุดพบในอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 โวลต์ (0.94) แสดงถึงฟิคที่ชัดเจน ในขณะที่ SPCE แสดงคุณภาพฟิคที่ต่ำมาก (0.01) ซึ่งบ่งบอกถึงฟิคที่ไม่ชัดเจนหรือแบนราบ

สมการเชิงเส้นของ I_p ต่อ $v^{1/2}$ ของอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 โวลต์ แสดงเชิงเส้นสูงสุด (91.99%) ซึ่งบ่งบอกถึงกระบวนการควบคุมการกระจายตัวของประจุที่ดี ในขณะที่อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.75 โวลต์ แสดงเชิงเส้นต่ำสุด (7.36%) ซึ่งบ่งชี้ว่าปัจจัยอื่นอาจมีผลต่อการกระแสนตอบสนอง

อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.75 โวลต์ มีค่ากระแสความจุสูงสุด (9.80 μA) แสดงถึงความจุสูงมาก ในขณะที่ SPCE และอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.5 โวลต์ มีกระแสความจุต่ำกว่า ซึ่งแสดงถึงความจุน้อยกว่า

จากการเปรียบเทียบกิจกรรมทางอิเล็กโทรเคมี อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.75 และ -1 โวลต์ แสดงกิจกรรมทางอิเล็กโทรเคมีที่สูงสุด ซึ่งเห็นได้จากกระแสฟิคที่สูงขึ้น ค่าความแตกต่างระหว่างศักย์ฟิคสูงสุดในทุกอิเล็กโทรดแสดงถึงการย้อนกลับของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ไม่ค่อยดี อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบคุณภาพฟิคและเชิงเส้น อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 และ -0.75 โวลต์ โดดเด่นในด้านคุณภาพฟิคและเชิงเส้นตามลำดับ ส่วน SPCE แสดงผลการทำงานต่ำสุดในทุกมิติที่วัดได้ กระแสความจุสูงในอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.75 โวลต์ บ่งบอกถึงความจุที่มีนัยสำคัญ ข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.75 และ -1 โวลต์ ควรได้รับการสำรวจเพิ่มเติมสำหรับการใช้งานที่ต้องการกิจกรรมทางอิเล็กโทรเคมีสูง ส่วนอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 โวลต์ นำเสนอบาลานซ์ที่ดีระหว่างคุณภาพฟิคและเชิงเส้น ส่วนอิเล็กโทรด SPCE แสดงผลการทำงานต่ำในทุกมิติที่วัดได้

สรุปผลการทดลอง

ภาวะเครียดออกซิเดชันเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดโรคเรื้อรังและโรคทางระบบประสาท การตรวจจับภาวะนี้ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) สามารถเพิ่มความแม่นยำได้โดยการปรับปรุง ขั้วไฟฟ้า SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs) และแพลทินัม (PtNPs) การศึกษานี้สังเคราะห์ อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม และใช้เทคนิคการชุบไฟฟ้าบน SPCE เพื่อเพิ่มความไวในการตรวจจับ โดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ศักย์ -0.25 โวลต์ พบว่าปรับปรุงสัญญาณได้ดีที่สุด ผลการวิเคราะห์ ด้วย XRD และ SEM ยืนยันโครงสร้างผลึกแบบ FCC ของอนุภาคนาโนที่ขนาดเฉลี่ย 6.4 นาโนเมตร การทดลองด้วย CV แสดงว่าอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 โวลต์ มีคุณภาพฟิคและเชิงเส้นที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาวิธีวินิจฉัยทางการแพทย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- Chen, R., Wu, S. & Meng, C. (2021). Size-tunable green synthesis of platinum nanoparticles using chlorogenic acid. *Research on Chemical Intermediates*, 47(5), 1775-1787. <https://doi.org/10.1007/s11164-020-04377-4>.
- Chen, R., Yi, G., Wu, S. & Meng, C. (2021). Controlled green synthesis of Au–Pt bimetallic nanoparticles using chlorogenic acid. *Research on Chemical Intermediates*, 47(10), 4051-4066. <https://doi.org/10.1007/s11164-021-04513-8>.
- Dechtrirat, D., Yingyuad, P., Prajongtat, P., Chuenchom, L., Sriprachuabwong, C., Tuantranont, A. & Tang, I.M. (2018). A screen-printed carbon electrode modified with gold nanoparticles, poly(3,4-ethylenedioxythiophene), poly(styrene sulfonate) and a molecular imprint for voltammetric determination of nitrofurantoin. *Microchimica Acta*, 185(5), 261. <https://doi.org/10.1007/s00604-018-2797-3>.
- Dheyab, M., Abdul Aziz, A., Jameel, M., Khaniabadi, M.P. & Oglat, A. (2020). Rapid Sonochemically-Assisted Synthesis of Highly Stable Gold Nanoparticles as Computed Tomography Contrast Agents. *Applied Sciences*, 10, 7020. <https://doi.org/10.3390/app10207020>.
- Elgrishi, N., Rountree, K. J., Mc Carthy, B.D., Rountree, E.S., Eisenhart, T.T. & Dempsey, J.L. (2018). A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry. *Journal of Chemical Education*, 95(2), 197-206. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00361>.

- Faradilla, P., Setiyanto, H., Manurung, R.V. & Saraswaty, V. (2022). Electrochemical sensor based on screen printed carbon electrode–zinc oxide nano particles/molecularly imprinted-polymer (SPCE–ZnONPs/MIP) for detection of sodium dodecyl sulfate (SDS) [10.1039/D1RA06862H]. *RSC Advances*, 12(2), 743-752. <https://doi.org/10.1039/D1RA06862H>
- Holder, C.F. & Schaak, R.E. (2019). Tutorial on powder X-ray diffraction for characterizing nanoscale materials. *ACS NANO*, 13, 7359-7365.
- Khalil, M., Mostafa, Y. & torad, E. (2014). Biosynthesis and characterization of Pt and Au-Pt nanoparticles and their photo catalytic degradation of methylene blue. *International Journal of Advanced Research*, 2, 694-703.
- Kumar, M., Boddeti, G. & Annapurna, N. (2017). Green Synthesis and Characterization of Platinum Nanoparticles using Sapindus mukorossi Gaertn. Fruit Pericarp. *Asian Journal of Chemistry*, 29, 2541-2544. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2017.20842A>
- Lee, C.F., Chang, C.L., Yang, J.C., Lai, H.Y. & Chen, C.H. (2012). Morphological determination of face-centered-cubic metallic nanoparticles by X-ray diffraction. *Journal of Colloid and Interface Science*, 369(1), 129-133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.12.053>
- Li, Z., Deng, L., Kinloch, I. A. & Young, R.J. (2023). Raman spectroscopy of carbon materials and their composites: Graphene, nanotubes and fibres. *Progress in Materials Science*, 135, 101089.
- Lisnund, S., Blay, V., Muamkhunthod, P., Thunyanon, K., Pansalee, J., Monkathok, J., Maneechote, P., Chansaenpak, K. & Pinyou, P. (2022). Electrodeposition of Cobalt Oxides on Carbon Nanotubes for Sensitive Bromhexine Sensing. *Molecules*, 27(13), 4078.
- Liu, Y., Liu, C., Xin, Y., Liu, P., Xiao, A. & Ling, Z. (2024). A Signal-Based Auto-Focusing Method Available for Raman Spectroscopy Acquisitions in Deep Space Exploration. *Remote Sensing*, 16(5), 820.
- Mavukkandy, M., Chakraborty, S., Abbasi, T. & Abbasi, S.A. (2016). A clean-green synthesis of platinum nanoparticles utilizing a pernicious weed lantana (*Lantana camara*). *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9, 84-90. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2016.84.90>.
- Mourdikoudis, S., Pallares, R.M. & Thanh, N.T. (2018). Characterization techniques for nanoparticles: comparison and complementarity upon studying nanoparticle properties. *Nanoscale*, 10(27), 12871-12934.

- Parcharoen, Y., Kajitvichyanukul, P., Sirivisoot, S., & Termsuksawad, P. (2014). Hydroxyapatite electrodeposition on anodized titanium nanotubes for orthopedic applications. *Applied Surface Science*, 311, 54-61.
- Ren, B., Liu, G.k., Lian, X.B., Yang, Z. & Tian, Z.Q. (2007). Raman spectroscopy on transition metals. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 388, 29-45. <https://doi.org/10.1007/s00216-007-1141-2>.
- Sies, H., Berndt, C. & Jones, D. P. (2017). Oxidative stress. *Annual review of biochemistry*, 86, 715-748.
- Sneha, K., Esterle, A., Sharma, N. & Sahi, S. (2014). Yucca-derived synthesis of gold nanomaterial and their catalytic potential. *Nanoscale research letters*, 9, 627. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-627>.
- Storz, G. & Imlay, J.A. (1999). Oxidative stress. *Current Opinion in Microbiology*, 2(2), 188-194. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1369-5274\(99\)80033-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1369-5274(99)80033-2).
- Wang, J., Xu, S., Sun, P., Du, H. & Wang, L. (2022). Enhanced electrochemical performance of screen-printed carbon electrode by RF-plasma-assisted polypyrrole modification. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(25), 19923-19936. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08811-8>.
- Weichun Y.H.K., Liu, Q., Yan, J., Zhou, Feng., Wang, C. (2012). Electrochemical deposition of Au-Pt alloy particles with cauliflower-like microstructures for electrocatalytic methanol oxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.132>.

