

ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโคบอลต์บนตัวรองรับคาร์บอนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็ม

EFFECT OF SURFACTANTS ON CHEMICAL SURFACE AREA OF PtCo/C CATALYST IN PEM FUEL CELL

ปานิสรา ปราบ ณ ศักดิ์¹, มะลิ หุ่นสม^{1,2} และ เก็จวาลี พุกกษาทร^{1,2,*}

Panisa Prabnasak¹, Mali Hunsom^{1,2} and Kejvalee Pruksathorn^{1,2,*}

¹ศูนย์วิจัยเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

²ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

*ติดต่อ E-mail: kejvalee.p@chula.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 02-218-7523

บทคัดย่อ

งานวิจัยศึกษาบทบาทของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อพื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมและโคบอลต์บนตัวรองรับคาร์บอนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยศึกษาสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (CTAB) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (SDS) และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Triton X-100) ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการแพร่ซึม (Impregnation) เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบหาพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Triton X-100) ให้พื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ามากกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกและชนิดประจุลบ นอกจากนี้เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวเผาที่อุณหภูมิ 700 และ 900 องศาเซลเซียสเพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิว พบว่าพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านการเผา โดยการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสให้พื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าสูงสุด และลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเป็น 900 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ: เซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็ม, ตัวเร่งปฏิกิริยา, สารลดแรงตึงผิว

Abstract

The surfactant has an important role in the properties of platinum-cobalt catalyst for proton exchange membrane fuel cells. This research synthesized platinum-cobalt catalyst using impregnation method with surfactants consisting of cationic (CTAB), anionic (SDS), and nonionic (Triton X-100). The electrochemical surface area (ESA) of catalysts was estimated from the area

under the hydrogen desorption peak obtained from cyclic voltammetry method. The results showed that catalysts containing Triton X-100 gave higher ESA than that containing CTAB and SDS. PtCo/C catalyst with surfactants calcined at 700 °C to eliminate surfactant gave the best ESA especially the catalyst with nonionic surfactant. However, the ESA of PtCo/C with surfactant at 900 °C were decreased.

Keywords: PEM Fuel cell, Catalyst, Surfactant

บทนำ

ตัวเร่งปฏิกิริยามีบทบาทสำคัญต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน หรือชนิดฟอสเฟต ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เป็นแพลทินัมทั้งด้านขั้วแอโนดและแคโทด [1] แต่สมรรถนะโดยรวมยังอยู่ในระดับที่ต่ำ จึงมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความว่องไวเพิ่มขึ้นโดยใช้โลหะผสมระหว่างแพลทินัมกับโคบอลต์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาให้สูงขึ้นและลดต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิงจากการใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว [2] อย่างไรก็ตามแม้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมกับโคบอลต์จะมีกัมมันตภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาแต่การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับยังไม่ดีนัก [3] จึงมีการนำสารลดแรงตึงผิวมาใช้ร่วมกับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมระหว่างแพลทินัมกับโคบอลต์ โดย Huang และคณะได้ศึกษาผลของ CTAB ต่อการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C พบว่าสารลดแรงตึงผิวช่วยลดการสูญเสียโลหะแพลทินัมระหว่างการสังเคราะห์และการรวมตัวกันเองของโลหะแพลทินัม [1] นอกจากนี้ Xiong และคณะใช้สารลดแรงตึงผิวเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมซัลเฟต (CTAS) ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา PtPd/C พบว่าสารลดแรงตึงผิวช่วยให้โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยามีความเหมาะสม ทำให้อิเล็กตรอน, โปรตอน, และออกซิเจนเคลื่อนที่ได้ดีและเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนได้ดียิ่งขึ้น [4] การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับสารลดแรงตึงผิวที่มีสมบัติช่วยในการกระจายตัว เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยาซึ่งจะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีศักยภาพและประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น งานวิจัยศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาPtCo/C โดยชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่ศึกษาได้แก่เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก โซเดียมโดเดซิลเบนซินซัลโฟเนต (SDS) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ และไตรตัน เอ็ก-100 (Triton X-100) สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์

เฮกซะคลอโรพลาทานิกแอซิด, โคบอลต์คลอไรด์, คาร์บอนวัลแคน XC-72, เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB), โซเดียมโดเดซิลเบนซินซัลโฟเนต (SDS), ไตรตัน เอ็ก-100 (Triton X-100), โซเดียมไฮดรอกไซด์, เมทานอล, เครื่องเขย่าความถี่สูง, กระจกทรง, ตู้อบ, เครื่องเผาสาร

วิธีการทดลอง

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมโคบอลต์ (20% w/w) บนตัวรองรับคาร์บอนด้วยเทคนิคการแพร่ซึม (Impregnation) โดยผสมผงคาร์บอน (วัลแคน XC-72, Cabot) กับน้ำปราศจากไอออนแล้วนำไปเข้าเครื่องเขย่าด้วยความถี่สูง 30 นาที เติมสารละลายเฮกซะคลอโรแพลทาตินิกแอซิด ($\text{H}_2\text{Cl}_6\text{Pt}$, Aldrich) , สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Ajax Finechem), สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, Univar) ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรและเมทานอล (CH_3OH , Qrec) นำสารผสมที่ได้ใส่ตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการแพร่ซึมมากรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนก่อนนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สารลดแรงตึงผิวในการสังเคราะห์ ใช้สารละลายสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น 0.0412 โมลต่อลิตรผสมกับสารละลายผงคาร์บอนโดยเตรียมด้วยวิธีการเดียวกับข้างต้นและนำไปเผาเพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิวที่อุณหภูมิ 700 และ 900 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน 3 ชั่วโมง

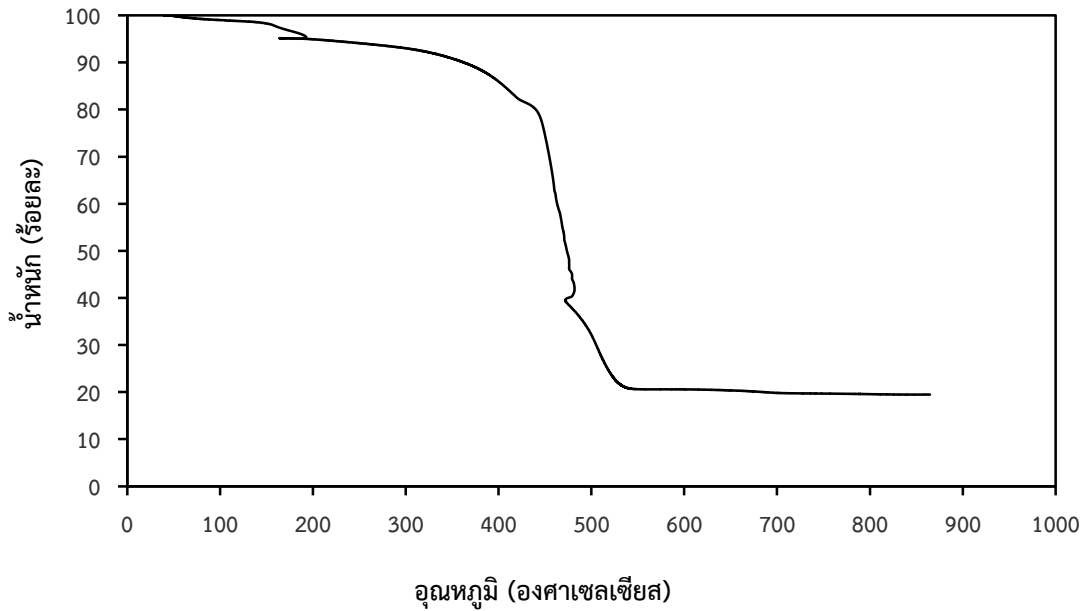
การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วทำงานสำหรับการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้กับน้ำปราศจากไอออนแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความถี่สูง 30 นาที เติมไอโซโพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$, Qrec) เขย่าต่อ 30 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายแนฟฟิออน (nafion 117, Aldrich) เขย่าต่อ 30 นาที จะได้น้ำหมึกตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบบนขั้วกลาสซีคาร์บอน

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก (98% H_2SO_4 , Qrec) ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรที่อิมิตัวด้วยไนโตรเจน ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.2-0.8 โวลต์ โดยใช้กลาสซีคาร์บอนที่เคลือบด้วยน้ำหมึกตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นขั้วทำงาน Ag/AgCl เป็นอิเล็กโทรดอ้างอิง แห่งแพลทินัมเป็นเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดและอัตราการสแกน 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงการทดสอบการสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา PtCo/C+CTAB พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา PtCo/C+CTAB เกิดการสลายตัว 2 ช่วง ที่อุณหภูมิประมาณ 100-200 องศาเซลเซียส และ 350-550 องศาเซลเซียส การสลายตัวช่วงแรกเป็นการสลายตัวของน้ำและความชื้น สารลดแรงตึงผิว (CTAB) จะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 350-550 องศาเซลเซียส มีปริมาณการสลายตัวรวมร้อยละ 80 บอกได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณของโลหะแพลทินัมและโคบอลต์รวมกันประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามปริมาณที่ต้องการเตรียม จากช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวของ CTAB ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา PtCo/C มีค่าสูงกว่าการสลายตัวปกติของ CTAB เนื่องจากในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา CTAB เกิดพันธะกับโลหะแพลทินัม ทำให้ CTAB บริเวณนั้นสลายตัวได้ยากขึ้น [5] เช่นเดียวกับกับ SDS และ Triton ดังนั้นงานวิจัยจึงใช้อุณหภูมิ 700 และ 900 องศาเซลเซียสในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้เพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิว CTAB, SDS และ Triton X-100 ให้หมด



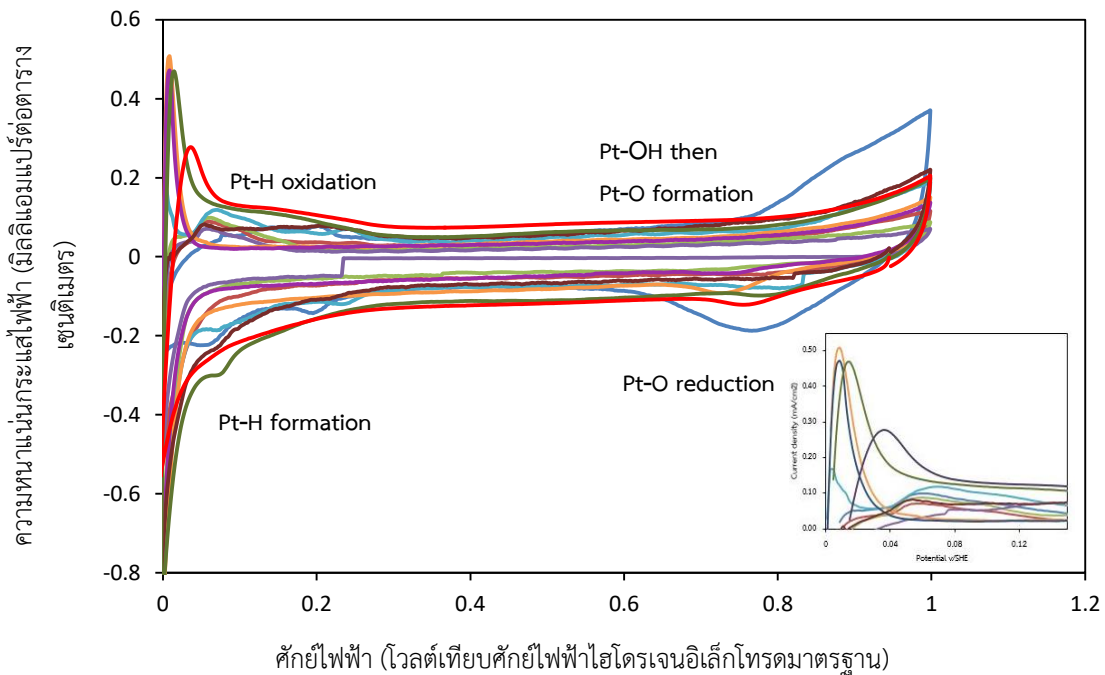
รูปที่ 1. กราฟ TGA ของตัวเร่งปฏิกิริยา PtCo/C+CTAB

รูปที่ 2 แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของไฮโดรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคโซคลิกโวลแทมเมทรีในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร อิมิตด้วยไนโตรเจน โดยเส้นกราฟสีฟ้าแสดงตัวเร่งปฏิกิริยา PtCo/C, สีส้มแสดง PtCo/C +CTAB ที่ไม่ได้เผา, สีน้ำเงินแสดง PtCo/C +SDS ที่ไม่ได้เผา, สีน้ำตาลแสดง PtCo/C +Triton X-100 ที่ไม่ได้เผา, สีเทาแสดง PtCo/C +CTAB ที่เผา 700°C, สีเหลืองแสดง PtCo/C +CTAB ที่เผา 900°C, สีเขียวแสดง PtCo/C +SDS ที่เผา 700°C, สีม่วงแสดง PtCo/C +SDS ที่เผา 900°C, สีดำแสดง PtCo/C +Triton X-100 ที่เผา 700°C และสีแดงแสดง PtCo/C +Triton X-100 ที่เผา 900°C พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาคำนวณได้จากการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟ (Q_H)ที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิคโซคลิกโวลแทมเมทรีบริเวณที่เกิดการคายซับของอะตอมไฮโดรเจนดังรูปที่ 2 (เล็ก) และสามารถคำนวณพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้ตามสมการที่ (1) และ (2) [6]

$$Q_H = \frac{1}{v} \int_{E_1}^{E_2} (i - i_{dl}) dE \quad (1)$$

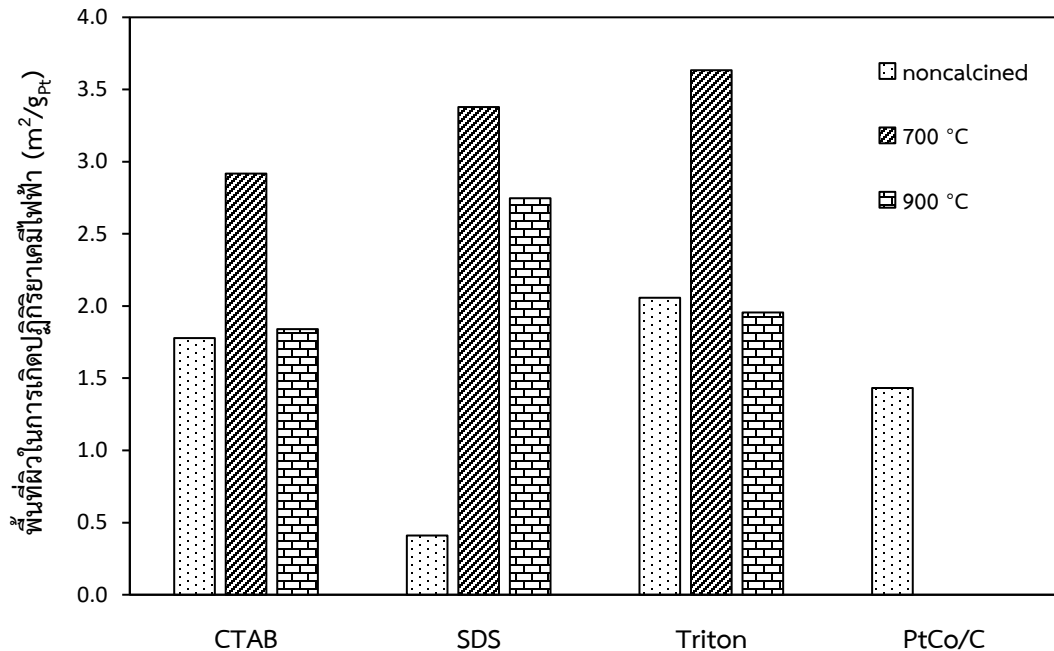
$$ESA = \frac{Q_H}{210 \times C} \quad (2)$$

เมื่อ ν คือ อัตราการสแกน (มิลลิโวลต์ต่อวินาที) C คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)



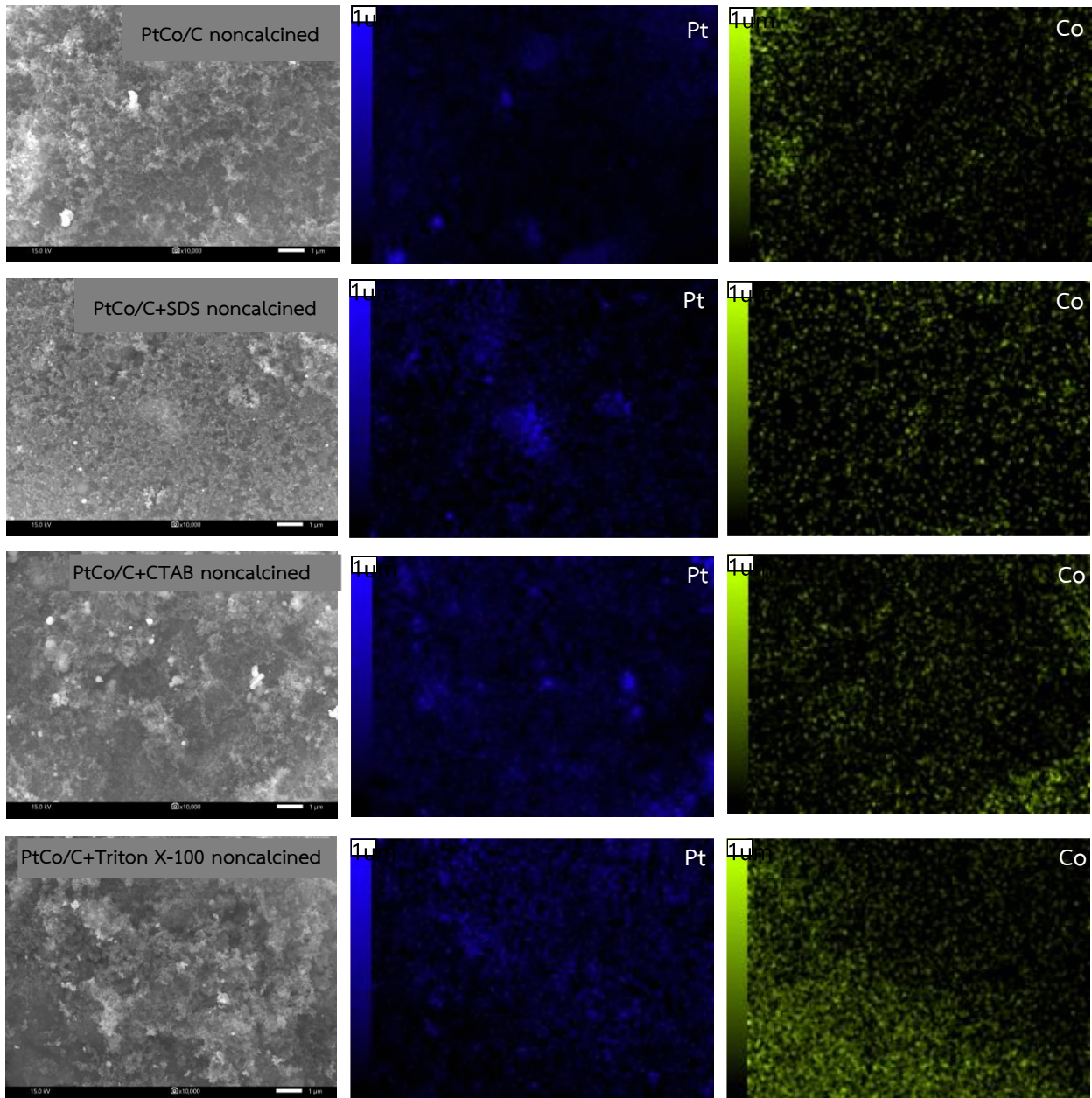
รูปที่ 2. กราฟ CV ของตัวเร่งปฏิกิริยา ภาพเล็กคือบริเวณที่เกิดการคายซับของอะตอมไฮโดรเจน

พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (ESA) ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการสังเคราะห์ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใส่สารลดแรงตึงผิว ยกเว้นสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวที่ผสมเข้าไปในการสังเคราะห์ช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นและทำให้ระยะห่างระหว่างอะตอมของแพลทินัมใกล้ขึ้นและเหมาะสมที่จะเกิดการแตกตัวและการดูดซับในปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น [7] อีกทั้งสารลดแรงตึงผิวอาจช่วยลดการสูญเสียโลหะแพลทินัมในระหว่างการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา [1] โดยยืนยันผลจากการกระจายตัวของโลหะแพลทินัมและโคบอลต์บนพื้นผิวคาร์บอน ซึ่งหาโดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM-EDX) เมื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา PtCo/C แบบไม่เผาทั้งใช้และไม่ใช้สารลดแรงตึงผิวดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า PtCo/C+Triton X-100 มีการกระจายตัวของโลหะแพลทินัมและโคบอลต์ดี ไม่รวมตัวกันเป็นก้อน ในขณะที่โลหะแพลทินัมและโคบอลต์ของ PtCo/C, PtCo/C+SDS และ PtCo/C+CTAB จะมีการรวมกันเป็นกระจุกอย่างเห็นได้ชัด



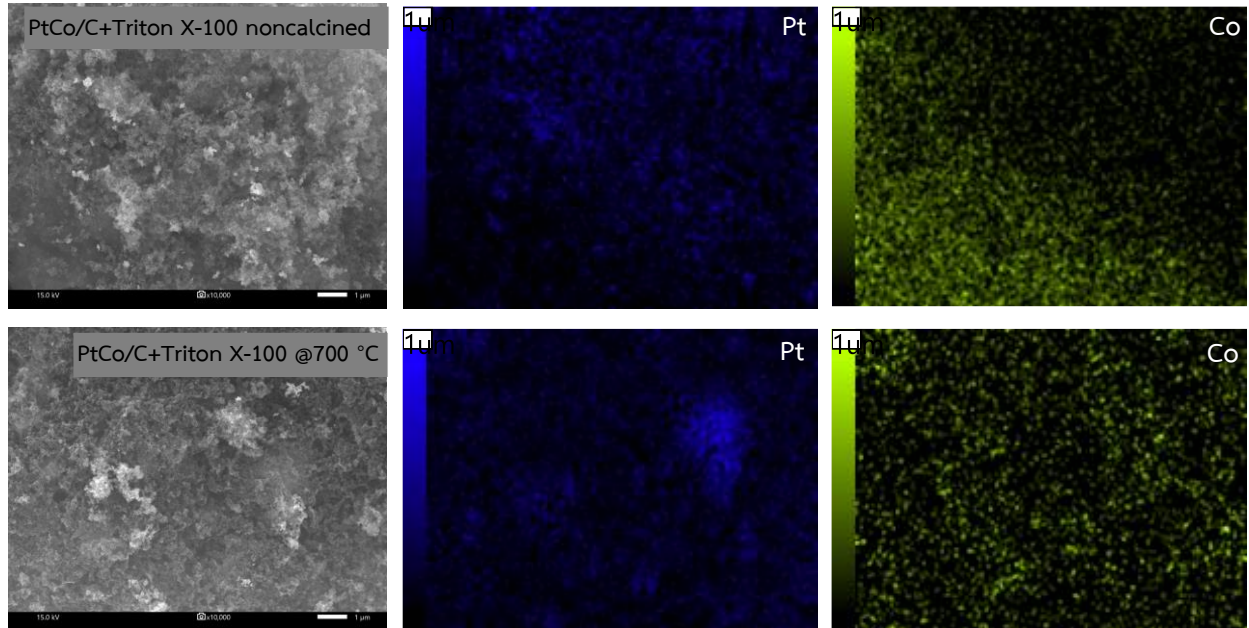
รูปที่ 3 พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สารลดแรงตึงผิวไปเผาที่อุณหภูมิ 700 และ 900 องศาเซลเซียสเพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิวออกพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เผาที่มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 3) เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Lipophilic) ของสารลดแรงตึงผิวเข้าไปฟอร์มตัวเป็นไมเซลล์จึงช่วยยับยั้งการรวมตัวกันเองของอนุภาคทำให้โลหะแพลทินัมและโคบอลต์บนคาร์บอนมีขนาดอนุภาคเล็กลงและเมื่อเผากำจัดออกจึงลดการบดบังของส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น [1] อีกทั้งอาจเนื่องมาจากการเผาเพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิวช่วยให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคโลหะดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5 ตัวเร่งปฏิกิริยา PtCo/C+Triton X-100 มีการกระจายตัวและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าสูงที่สุด อาจเป็นผลของโครงสร้างสายโซ่ไอโซออกทิลและวงเบนซีนของ Triton X-100 ที่สามารถดูดซับพื้นผิวคาร์บอนได้ดีรวมทั้งทำให้ดูดซับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็น hydration shell ส่งผลให้เกิดเสถียรภาพแบบสเตอริกเกิดพันธะแวนเดอร์วาลส์ระหว่างอนุภาคคาร์บอนช่วยให้การกระจายตัวดีขึ้น [8]



รูปที่ 4. (ซ้าย) ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา และ (ขวา) ภาพ EDX mapping ของโลหะแพลทินัมโคบอลต์ บนตัวเร่งปฏิกิริยา PtCo/C, PtCo/C+SDS, PtCo/C+CTAB, PtCo/C+Triton X-100 ที่ไม่ผ่านการเผา

แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ค่า ESA จะลดลง อาจเนื่องมาจากการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคของโลหะแพลทินัมและโคบอลต์ ส่งผลให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง [2]



รูปที่ 5. (ซ้าย) ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา และ (ขวา) ภาพ EDX mapping ของโลหะแพลทินัมและโคบอลต์บนตัวเร่งปฏิกิริยาPtCo/C+Triton X-100 แบบไม่เผาและเผาที่ 700 องศาเซลเซียส

สรุปผลการทดลอง

การใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา PtCo/C ด้วยเทคนิคการแพร่ซึมสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า เนื่องจากช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายตัวของแพลทินัมและโคบอลต์ดีขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยา PtCo/C ที่เตรียมโดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Triton X-100) ให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ามากที่สุด นอกจากนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิวคือ 700 °C เนื่องจากทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Huang, R. Sh., Chao, W. K., Yu, R. S., Hsueh, K. L., & Shieu, F. Sh. (2012). Synthesis of highly dispersed platinum/carbon catalyst using cetyltrimethyl ammonium bromide as a

- dispersant for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 205, 93-99
- [2] Chaisubanan, N., Maniwan, W., & Hunsom, M. (2017). Effect of heat-treatment on the performance of PtM/C (M=Cr,Pd,Co) catalysts towards the oxygen reduction reaction in PEM fuel cell. *Energy*, 127, 454-461.
- [3] Jeon, M. K., Paul, j., & McGinn. (2012). Co-alloying effect of Co and Cr with Pt for oxygen electro-reduction reaction. *Electrochimica Acta*, 64, 147-153
- [4] Xiong, X., Chen, W., Wang, W., Li, J., & Chen, S. (2017). Pt-Pd nanodendrites as oxygen reduction catalyst in polymer-electrolyte-membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 25234-25243.
- [5] Wu, Sz. H., & Chen, Dh. W. (2004). Synthesis of high-concentration Cu nanoparticles in aqueous CTAB solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 273, 165-169.
- [6] มะลิ หุ่นสม. (2555). เซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์และสารวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [7] Karthikeyan, N., Giridhar, V. V., & Vasudevan, D. (2010). Surfactant effects on methanol oxidation at Pt-Ru/C coated glassy carbon electrode. *Journal of Solid State Electrochem*, 14, 877-881
- [8] Zhang, Z., Qu, Ch., Zheng, T., Lai, Y., & Li, J. (2013). Effect of triton X-100 as dispersant on carbon black for LiFePO₄ cathode. *International Journal of Electrochemical Science*, 8, 6722-6733