# การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาขั้วแคโทด Bi/C และ Ni/C สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์กลูโคสแบบไม่มีเยื่อเลือกผ่าน

**สิตานันท์ บุญยอด[1] และ จักรพงศ์ ไชยบุรี[2*]**
มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง ต.บ้านพร้าว อ.ป่าพะยอม จ.พัทลุง 93210

[*] *Corresponding Author: chakkrapong@tsu.ac.th*
[1] *นิสิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์*
[2] *ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์*

**ข้อมูลบทความ**

**ประวัติบทความ :**
รับเพื่อพิจารณา : 30 มิถุนายน 2565
แก้ไข : 17 เมษายน 2566
ตอบรับ : 18 เมษายน 2566
DOI : 10.14456/kmuttrd.2023.8

**คำสำคัญ :** เซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์ / กลูโคส / ปฏิกิริยารีดักชัน / ขั้วแคโทด

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของกลูโคสในเซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์แบบไม่มีเยื่อเลือกผ่าน จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของโลหะบนตัวรองรับคาร์บอน ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ni/C และ Bi/C มีลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของโลหะบนตัวรองรับที่สม่ำเสมอ ตัวเร่งปฏิกิริยา Bi/C มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของกลูโคสได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/C จากผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อคุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้าในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของเชื้อเพลิงอัลคาไลน์แบบไม่มีเยื่อเลือกผ่าน โดยใช้กลูโคสเป็นเชื้อเพลิงที่ความเข้มข้นของสารสะสายกลูโคส 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 โมลาร์ ร่วมกับสารละลายอัลคาไลน์ KOH 0.1 โมลาร์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลเทมเมทรี พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Bi/C ที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 0.1 โมลาร์ ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ค่าความต่างศักย์เท่ากับ -0.95 V และให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุดที่ -1.00 $mA.cm^{-2}$ ที่สภาวะดังกล่าว ตัวเร่งปฏิกิริยาทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแคโทดได้

# Study of Performances of Bi/C and Ni/C Cathode Catalysts for Glucose Membraneless Alkaline Fuel Cells

**Sitanan Bunyord[1] and Chakkrapong Chaiburi[2*]**
Thaksin University, Phatthalung Campus, Ban Phrao, Papayom, Phatthalung 93210

*[*] Corresponding Author: chakkrapong@tsu.ac.th*
*[1] Student, Department of Chemistry, Faculty of Science.*
*[2] Assistant Professor, Department of Chemistry, Faculty of Science.*

**Article Info**

**Article History:**
Received: June 30, 2022
Revised: April 17, 2023
Accepted: April 28, 2023
DOI : 10.14456/kmuttrd.2023.8

**Keywords :** Alkaline Fuel Cells / Glucose / Reduction Reaction / Cathode Electrode

**Abstract**

This research aimed to analyze the efficiencies of two different catalysts for the reduction reaction of glucose in membraneless alkaline fuel cells. The results revealed that Ni/C and Bi/C catalysts exhibited smooth surface morphology and good metal distributions on their supporters. Bi/C catalyst possessed the superior capability to catalyze the reduction reaction of glucose than Ni/C catalyst. Comparison of the efficiency of the two catalysts on electrochemical characteristics of the membraneless alkaline fuel cell reduction reaction using glucose as a fuel was then conducted. Use of the glucose concentration of either 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, or 0.5 M, together with 0.1 M alkaline KOH solution, was assessed via cyclic voltammetry. Using Bi/C catalyst at the glucose concentration of 0.1 M resulted in the reduction reaction when the potential was -0.95 V; the maximum current density of -1.00 $mA.cm^{-2}$ was obtained. At such a condition, the catalyst was noted to be able to withstand the oxidation reaction that took place at the cathode.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของประชากร และการขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้ความต้องการทางด้านพลังงานไฟฟ้ามีปริมาณที่มากขึ้น โดยทั่วไป พลังงานไฟฟ้าเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน แก๊ส ธรรมชาติ หรือ ถ่านหิน เป็นต้น ประกอบกับเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ได้มาจากธรรมชาติและมีอยู่อย่างจำกัด อาจส่งผลให้เกิดการขาดแคลนขึ้นได้ในอนาคต สอดคล้องกับนโยบายด้านพลังงานของรัฐบาลดังนั้น รัฐบาลจึงมอบหมายให้กระทรวงพลังงานจัดทำแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555-2564) หรือ Alternative Energy Development Plan : AEDP (2012-2021) เพื่อกำหนดกรอบและทิศทางการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศ โดยแสวงหาและพัฒนาแหล่งพลังงานและระบบไฟฟ้าจากทั้งในและต่างประเทศ รวมทั้งให้มีการกระจายแหล่งและประเภทพลังงานให้มีความหลากหลาย

เซลล์เชื้อเพลิงถือเป็นทางเลือกหนึ่งของแหล่งพลังงานทดแทนซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Reaction) ภายในเซลล์ได้โดยตรง โดยเซลล์เชื้อเพลิงจากน้ำตาลกลูโคสมีความสำคัญในแง่สามารถช่วยเพิ่มฐานอุตสาหกรรมน้ำตาลในประเทศไทยให้สูงขึ้น และประเทศไทยก็จะมีพลังงานหมุนเวียนเพิ่มขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงแบบไม่มีเยื่อเลือกผ่านที่ใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นแบบใช้สารละลายแอลคาไลน์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ โดยข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดน้ำตาลกลูโคสแบบอัลคาไลน์ นี้มีความได้เปรียบคือ สามารถใช้ของเหลวเช่น น้ำตาลกลูโคสเป็นเชื้อเพลิงที่ด้านแอโนดได้ โดยที่มีปัญหาการสูญเสียเชื้อเพลิงจากกระบวนการแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านน้อยกว่า จึงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Basu และคณะ [1] ซึ่งได้ศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันของ PtRu/C ตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วแอโนด และถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วแคโทด ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้น้ำตาลกลูโคสในสารละลาย KOH เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้ Cyclic voltammetry ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสและสารละลาย KOH พบว่า ได้ Power density มากที่สุดคือ 1.38 $mW.cm^{-2}$ ความหนาแน่นกระแส (Current Density) 2.74 $mA.cm^{-2}$ ที่ความต่างศักย์ (Voltage) 0.51 V โดยความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส 0.2 M ใน 1 M KOH อุณหภูมิ 30°C Arjona และคณะ [2] ได้ทำงานวิจัยตัวเร่งปฏิกิริยา $Au_{50}Pd_{50}$/C และ $Au_{35}Pd_{65}$/C เป็นขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C พบว่าได้ Power density มากที่สุดคือ 0.28 $mW.cm^{-2}$ โดยความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส 10 mM ต่อมา Arjona และคณะ [3] ได้ทำงานวิจัยตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้วแอโนด AuAg บนท่อคาร์บอนนาโน (MWCNT) และ Au บนท่อคาร์บอนนาโนส่วนขั้วแคโทดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C ที่ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส 10 mM ใน 0.3 M KOH พบว่าได้ Power density มากที่สุดคือ 1.6 $mW.cm^{-2}$ ความหนาแน่นกระแส(Current Density) 9.50 $mA.cm^{-2}$ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Au/MWCNTs ใช้เป็นขั้วแอโนดและได้ Power density คือ 1.04 $mW.cm^{-2}$ ความหนาแน่นกระแส (Current Density) 5.40 $mA.cm^{-2}$ ในปี 2023 Favergy และคณะ [4] ได้วิจัยโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C Pd/C และ Au/C กลไกการเกิดออกซิเดชันของกลูโคส กรดกลูโคนิก และซอร์บิทอลในทองคำแพลทินัมและแพลเลเดียมโดยใช้ไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) ซึ่งเมื่อสัมผัสกับเชื้อเพลิงกลูโคสจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในปีต่อมา Guerra-Balcazar และคณะ [5] ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้น้ำตาลกลูโคสในสารละลาย KOH เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ใช้ Au/MWCNTs และ Au/C ในขั้วอาโนด เพื่อเปรียบเทียบ Power density ส่วนขั้วแคโทดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส 10 mM ใน 0.3 M KOH ตัวเร่งปฏิกิริยา Au/MWCNTs ได้ Power density คือ 0.28 $mW.cm^{-2}$ Cuevas-Muñiz และคณะ [6] ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา Au/C และตัวเร่งปฏิกิริยา AuAg/C เป็นขั้วแอโนด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ส่วนขั้วแคโทดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส 0.01 M ใน 0.3 M KOH พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Au/C จากงานวิจัยได้ Power density คือ 0.52 $mW.cm^{-2}$ ที่ความต่างศักย์ (Voltage) 0.6 V ต่อมา Cuevas-Muñiz และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้น้ำตาลกลูโคส ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Au/C เป็นขั้วแอโนดและตัวเร่งปฏิกิริยา PtAg/C เป็นขั้วแคโทด สามารถทนต่อน้ำตาลกลูโคสที่ข้ามมาฝั่งแคโทด (Crossover) ซึ่งจะทำให้ได้ Power density น้อยลง จากงานวิจัยได้ Power density คือ 0.62 $mW.cm^{-2}$ ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส 100 mM ใน 0.3 M KOH Li และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา $Au/MnO_2$-C Pt/C และ Au/C catalysts เป็น

ขั้วแอโนด ถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วแคโทด พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Au/$MnO_2$-C มีค่า Power density คือ 1.10 $mW.cm^{-2}$ ความหนาแน่นกระแส (Current Density) 2.50 $mA.cm^{-2}$ โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส 0.3 M ใน 1 M KOH ที่อุณหภูมิ 30°C Li และคณะ [9] ได้ทำการวิจัยตัวเร่งปฏิกิริยา 2-hydroxy-1, 4-naphthoquinone (NQ) บนถ่านกัมมันต์-นิกเกิลโฟม (NQ/AC/Ni-foam) ใช้เป็นขั้วแอโนด โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส 1 M ใน 3 M KOH ตัวเร่งปฏิกิริยา NQ/AC/Ni-foam ซึ่งจะทำให้ได้ Power density คือ 16.10 $W.m^{-2}$ ความหนาแน่นกระแส (Current Density) 48.09 $A.m^{-2}$ Song และคณะ [10] ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา 1.7 mg cm-2 Pd/C กับ 30 wt % PTFE เป็นสาร Ionomer บนตัวรองรับ Carbon black ร่วมกับ 20 wt % PTFE ปริมาณ 0.3 $mg.cm^{-2}$ ใช้เป็นขั้วแอโนด และ 1.2 mg $cm^{-2}$ Pd/C กับ 5 wt % PTFE บนตัวรองรับ Carbon black ร่วมกับ 20 wt % PTFE ปริมาณ 1.4 $mg.cm^{-2}$ เป็นขั้วแคโทด มีค่า Power density เท่ากับ 11.52 $mW.cm^{-2}$ ความหนาแน่นกระแส (Current Density) 35 $mA.cm^{-2}$ โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส 0.5 M ใน 2 M KOH ในปี 2013 Basu และคณะ [11] ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา PtAu/C และ PtBi/C สำหรับขั้วแอโนด และตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C สำหรับขั้วแคโทด ศึกษาในเซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์มีเยื่อเลือกผ่าน โดยใช้สารละลายกลูโคสเป็นเชื้อเพลิงพบว่าที่อุณหภูมิ 30 °C ตัวเร่งปฏิกิริยา PtBi/C ให้ Power density คือ 4.8 $mW.cm^{-2}$ มากกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา PtAu/C คือ 2.44 $mW.cm^{-2}$ Bagotzky และคณะ [12] ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการรีดักชันของออกซิเจนและการดูดซับในตัวกลางที่เป็นด่าง ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลและออกไซด์ของโคบอลต์ การศึกษาด้วยวิธีโพเทนทิโอไดนามิกและวิธีอิเล็กโทรดแบบวงแหวน พบว่าโครงสร้าง Spinel $Co_3O_4$ และ $NiCo_2O_4$ เหมาะสมที่สุด แสดงให้เห็นว่าออกซิเจนที่ดูดซับในระหว่างการอบความร้อนของชิ้นงานทดสอบส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนบนออกไซด์ของโครงสร้าง Spinel ต่อมา Chang และคณะ [13] กิจกรรมทางไฟฟ้าและความเสถียรของอิเล็กโทรดที่เตรียมด้วยความร้อนต่างๆ (ของโลหะชนิด Pd, Pt, Ir, Co, Ru และ Ni) สำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในสภาวะ 1 M KOH ซึ่งที่ผ่านมาก็มีการศึกษาปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนของโลหะออกไซด์ $RuO_2$ $IrO_2$ PtO PdO NiO และ $Co_3O_4$ ได้รับการศึกษาทั้งในสภาวะกรดและสภาวะด่าง ศึกษา Hydrogen Evolution และ Oxygen Evolution แต่ก็ยังไม่มีการศึกษาที่ชัดเจนเกี่ยวกับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน [13]

จากงานวิจัยข้างต้นน้ำตาลกลูโคสจึงมีโอกาสที่จะพัฒนาไปสู่พลังงานทดแทนได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม น่าจะเป็นอีกแหล่งพลังงานชีวมวลทางเลือก สามารถผลิตทดแทนได้ ราคาไม่แพง และไม่เป็นพิษ สิ่งที่สำคัญคือช่วยเพิ่มมูลค่าในอุตสาหกรรมน้ำตาลของประเทศไทยให้สูงขึ้นโดยสามารถนำไปใช้ในเครื่องต้นแบบเซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์แบบไม่มีเยื่อเลือกผ่านที่ใช้กลูโคสเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะพลาตินัม (Pt) ซึ่งมีราคาแพงมาก ในสภาวะที่เป็นอัลคาไลน์มีความเป็นไปได้ในการเร่งปฏิกิริยาได้ โดยไม่ใช้ พลาทินัม (Pt) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการลดปัญหาการขาดแคลนพลาตินัมและลดต้นทุนในการผลิต ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาพลาทินัมมีราคาสูง โดยศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับขั้วแคโทด ซึ่งสามารถทนต่อการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแคโทดได้ เนื่องจากเมื่อมีการเติมเชื้อเพลิงกลูโคสที่ความเข้มข้นต่างกันลงไป ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีความทนทานต่อสภาวะการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลายกลูโคสที่ทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องมาจากขั้วแคโทดต้องการให้เร่งปฏิกิริยารีดักชัน ไม่ได้ต้องการให้เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์สมบูรณ์ ส่งผลให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยการศึกษาของ Favergy และคณะ ในปี 2023 [4] ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะพลาตินัม (Pt) เมื่อสัมผัสกับเชื้อเพลิงกลูโคสจะเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา Bi/C และ Ni/C ของขั้วแคโทด เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโมเลกุลเดียว โดยศึกษาเบื้องต้นสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความทนทานต่อสภาวะการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลายกลูโคสที่ทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำไปใช้งานสำหรับขั้วแคโทด

## 2. วิธีทดลอง

### 2.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 2.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ni/C

เตรียมตัวรองรับปฏิกิริยา Vulcan XC – 72R Carbon (บริษัท Cabot บอสตัน สหรัฐอเมริกา) โดยนำไปกระจายตัวใน

สารละลาย 5 M $HNO_3$ (บริษัท Sigma-Aldrich เซนต์หลุยส์ สหรัฐอเมริกา) จากนั้นคนด้วย Magnetic Stirrers 30 นาที ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน หลายๆครั้ง จากนั้นนำไปอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารประกอบ Nickel (ll) Nitrate Hexahydrate $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (บริษัท Sigma-Aldrich เซนต์หลุยส์ สหรัฐอเมริกา) 1.98 กรัม ละลายใน Ethylene glycol (บริษัท Loba Chemie มหาราษฎระ อินเดีย) 50 มิลลิลิตร ด้วยเครื่อง Ultrasonic bath (บริษัท Skymen เชินเจิ้น จีน) และ Sonicate ที่ความถี่ 42 kHz เป็นเวลา 30 นาที เติม Vulcan XC – 72R carbon 1.60 กรัม ลงไปผสมกับสารละลายในเครื่อง Ultrasonic bath (บริษัท Skymen เชินเจิ้น จีน) และ Sonicate ที่ความถี่ 42 kHz ต่ออีกเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นย้ายมากวนบนเครื่องคนสารแม่เหล็ก ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ปรับค่า pH ให้เป็น 11 โดยใช้สารละลาย NaOH (บริษัท Loba Chemie มหาราษฎระ อินเดีย) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ จากนั้นกรองตะกอนและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนหลายๆ ครั้ง แล้วนำตะกอนที่ได้นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเกิดเป็นสารประกอบนิกเกิลบนคาร์บอน

**2.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Bi/C**

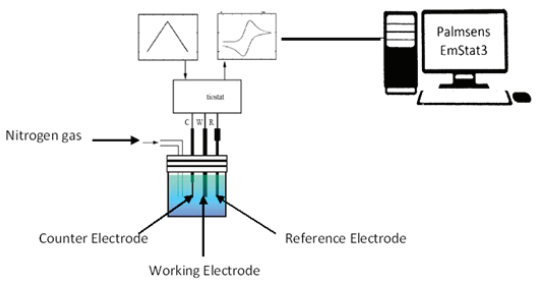
เตรียมตัวรองรับปฏิกิริยา Vulcan XC – 72R carbon (บริษัท Cabot บอสตัน สหรัฐอเมริกา) โดยนำไปกระจายตัวในสารละลาย 5 M $HNO_3$ (บริษัท Sigma-Aldrich เซนต์หลุยส์สหรัฐอเมริกา) จากนั้นคนด้วย Magnetic Stirrers 30 นาทีล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนหลาย ๆ ครั้ง จากนั้นนำไปอบจนแห้ง นำสารประกอบ Bismuth(III) nitrate $Bi(NO_3)_3$ (บริษัท Sigma-Aldrich เซนต์หลุยส์ สหรัฐอเมริกา) 0.76 กรัม ละลายใน Ethylene glycol (บริษัท Loba Chemie มหาราษฎระอินเดีย) 50 มิลลิลิตร ด้วยเครื่อง Ultrasonic bath (บริษัท Skymen เชินเจิ้น จีน) และ Sonicate ที่ความถี่ 42 kHz เป็นเวลา 30 นาที เติม Vulcan XC – 72R carbon 1.60 กรัม ลงไปผสมกับสารละลายในเครื่อง Ultrasonic bath (บริษัท Skymen เชินเจิ้น จีน) และ Sonicate ที่ความถี่ 42 kHz ต่ออีก 10 นาที นำสารละลายทั้งหมดย้ายมากวนบนเครื่องคนสารแม่เหล็ก แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ปรับค่า pH ให้เป็น 11 ด้วยใช้สารละลาย 1M NaOH (บริษัท Loba Chemie มหาราษฎระอินเดีย) จากนั้นกรองตะกอนและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เกิดเป็นสารประกอบบิสมัทบนคาร์บอน

**2.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและวิเคราะห์ปริมาณโลหะ ด้วยเทคนิควิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS)**

ศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้าด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, FT-SEM, ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 450 FEG) ) ซึ่งจะศึกษาลักษณะของพื้นผิวและรูปร่างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียม และวิเคราะห์ปริมาณโลหะ ด้วยเทคนิควิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) รวมถึงหาขนาดของอนุภาคด้วยโปรแกรมของเครื่อง EDS

**2.3 การศึกษาคุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้าของตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี**

ศึกษาคุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้าของตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry, CV) (รูปที่ 1) ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) เป็น Glassy Carbon เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Bi/C และ Ni/C ที่จะทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) เป็น Ag/AgCl ขั้วไฟฟ้าช่วย Counter Electrode เป็นพลาตินัม (Pt) โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้มีช่วงค่าความต่างศักย์จาก -1.2 V ถึง 1.2 V อัตราการสแกนหยาบ (Rough Scan Rate) เท่ากับ 50 $mV.s^{-1}$ และมีรอบการสแกน (Number of Scans) เท่ากับ 20 รอบ และอัตราการสแกนละเอียด (Fine Scan Rate) เท่ากับ 10 $mV.S^{-1}$ และมีรอบสแกน (Number of Scans) เท่ากับรอบ นำผลสแกนละเอียดมาสร้างกราฟ ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา

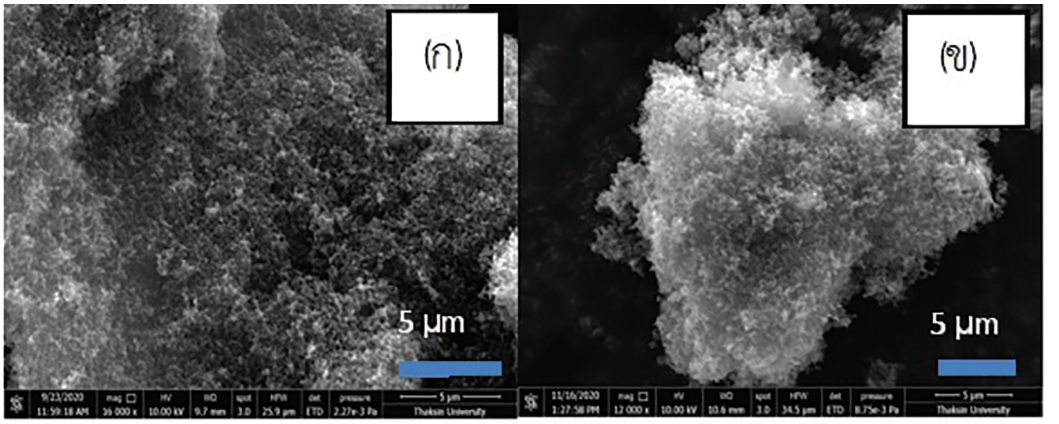



**รูปที่ 1** รูปแบบการจัดอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี [14]

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยส่วนแรกเป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้า 2 ชนิดบนวัสดุรองรับคาร์บอนคือตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล (Ni/C) และตัวเร่งปฏิกิริยาบิสมัส (Bi/C) (รูปที่ 2) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

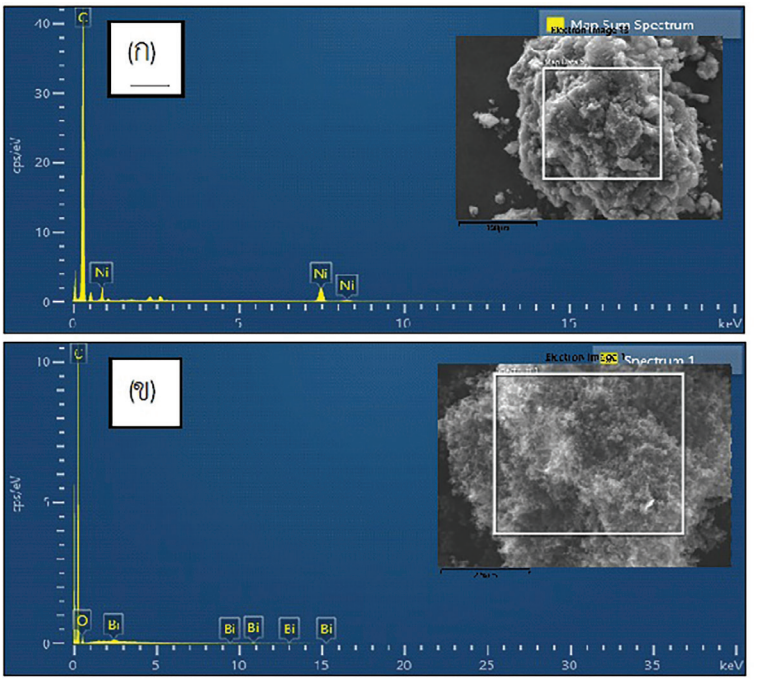



**รูปที่ 2** ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) Ni/C (ข) Bi/C

**ตารางที่ 1** ร้อยละโดยน้ำหนัก ร้อยละโดยอะตอม ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้า Ni/C และ Bi/C

| ตัวเร่งปฏิกิริยา | ร้อยละโดยน้ำหนัก (Ni : Bi : C) | ร้อยละโดยอะตอม (Ni : Bi : C) | ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (nm) | ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ (%) |
|---|---|---|---|---|
| Ni/C | 7.97 : 0.00 : 92.03 | 1.74 : 0.00 : 98.26 | 76.53 | 7.97 : 92.03 |
| Bi/C | 0.00 : 0.58 : 90.95 | 0.00 : 0.03 : 93.43 | 71.73 | 0.58 : 90.95 |

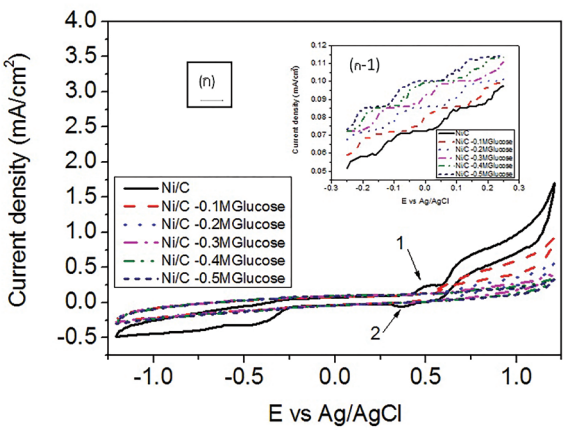
จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะขรุขระและมีขนาดอนุภาคเล็กจับตัวเป็นกลุ่มก้อน (รูปที่ 2) ทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะ ด้วยเทคนิควิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) (รูปที่ 3) ดังตารางที่ 1 ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/C พบว่ามีโลหะนิกเกิลกระจายตัวอยู่บนวัสดุรองรับคาร์บอน ร้อยละ 7.97 ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา Bi/C พบว่ามีโลหะบิสมัทกระจายตัวอยู่บนวัสดุรองรับคาร์บอน ร้อยละ 0.58 จากการวิเคราะห์ผลองค์ประกอบของธาตุ ด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectrometer (EDS) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเฉพาะจุดไม่น้อยกว่า 3 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งเป็นเทคนิคของเครื่องมือ EDS จึงอาจทำให้ผลการทดลองในเรื่องร้อยละโดยน้ำหนักและร้อยละโดยอะตอมขององค์ประกอบของธาตุคลาดเคลื่อน ไม่ตรงกับที่ได้ในขั้นเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา



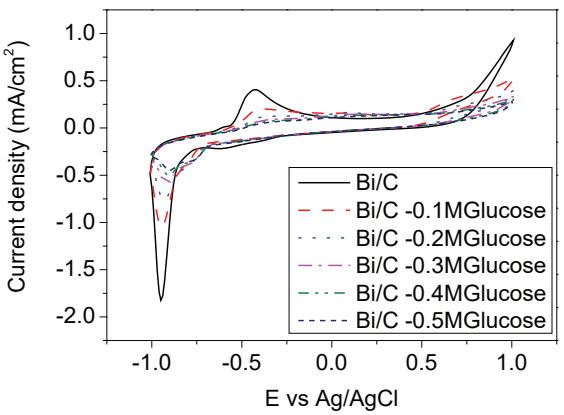

**รูปที่ 3** ผลของการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS) (ก) Ni/C (ข) Bi/C

### 3.2 การศึกษาคุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้า

เป็นการศึกษาคุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้า ศึกษาการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของเซลล์เชื้อเพลิงกลูโคสในสารละลาย KOH ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี เพื่อนำไปใช้สำหรับขั้วแคโทด ซึ่งต้องการให้เร่งปฏิกิริยารีดักชัน โดยไม่ต้องการให้เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแคโทด ซึ่งสามารถเกิดจากสารละลายกลูโคสสามารถข้ามเยื่อเลือกผ่าน (Membrane) จากฝั่งขั้วแอโนดข้ามไป (Crossover) ยังฝั่งขั้วแคโทด ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถทนต่อการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ปฏิกิริยารีดอกซ์ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้น้อยลง โดยถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น Pt/C ใช้เป็นขั้วแคโทด เมื่อเจือด้วยสารละลายกลูโคส ทำให้เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นที่ขั้วแคโทด ส่งผลทำให้ปฏิกิริยารีดอกซ์ไม่สมบูรณ์ [4, 15]




**รูปที่ 4** เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) Ni/C (ก-1) ส่วนขยายของ Ni/C และ (ข) Bi/C ในสารละลายอัลคาไลน์ 0.1 M KOH และเมื่อเจือด้วยสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 M ที่ Scan Rate 0.01 $V.s^{-1}$ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน




**รูปที่ 4** เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) Ni/C (ก-1) ส่วนขยายของ Ni/C และ (ข) Bi/C ในสารละลายอัลคาไลน์ 0.1 M KOH และเมื่อเจือด้วยสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 M ที่ Scan Rate 0.01 V.s$^{-1}$ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (ต่อ)

ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา Bi/C และ Ni/C ในสารละลาย 0.1 M KOH พบว่ากรณีที่ทำการสแกนย้อนกลับ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/C ที่ช่วงความต่างศักย์ -0.25 ถึง -1.20 V พบว่าปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลายอัลคาไลน์ และที่ช่วงความต่างศักย์ตำแหน่งที่ 1 และช่วงความต่างศักย์ตำแหน่งที่ 2 จากรูปที่ 4(ก) จะเกิดการเปลี่ยนระหว่าง Ni(II) และ Ni(III) [16] กลไกของโลหะ Ni ในสารละลายอัลคาไลน์ จะมีการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายกลูโคสจากรูปที่ 4(ก-1) ดังสมการต่อไปนี้ (สมการที่ 1-3) [16]

$$Ni + 2OH^- \rightarrow Ni(OH)_2 + 2e^- \quad (1)$$

$$Ni(OH)_2 + OH^- \rightarrow NiO(OH) + H_2O + e^- \quad (2)$$

$$NiO(OH) + Glucose \rightarrow Ni(OH)_2 + Glucolactone \quad (3)$$

ปรากฏตำแหน่งการออกซิเดชันจากการดูดซับกลูโคสบนโลหะ Active site ของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่ชัดเจน อาจจะเกิดจากส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนขัดขวางการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ฟังก์ชันแอลกอฮอล์ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสมากขึ้น

ส่วนไซคลิกโวลเทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา Bi/C ปรากฏตำแหน่งการออกซิเดชันจากการดูดซับกลูโคสบนโลหะเกิดขึ้น ในกรณีที่ทำการสแกนไปข้างหน้า (Forward Scan) ที่ช่วงความต่างศักย์ -0.6 ถึง-0.2 V vs. Ag/AgCl ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดที่ค่าความต่างศักย์ -0.430 V โดยให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุดเท่ากับ 0.29 mA.cm$^{-2}$ และพบว่า ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา Bi/C ปรากฏตำแหน่งการรีดักชัน ในกรณีที่ทำการสแกนย้อนกลับที่ช่วงความต่างศักย์ -0.8 ถึง -1.2 V vs. Ag/AgCl พบว่าปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าสูงสุดที่ค่าความต่างศักย์ -0.95 V โดยให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุดเท่ากับ -1.77 mA.cm$^{-2}$ ดังรูปที่ 4(ข)

ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา Bi/C และ Ni/C ในสารละลาย 0.1 M KOH และเมื่อเจือด้วยสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 M พบว่ากรณีที่ทำการสแกนย้อนกลับ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/C ที่ช่วงความต่างศักย์ -0.25 ถึง -1.20 V พบว่าปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นลดลงเมื่อเทียบกับที่ไม่ได้เจือด้วยสารละลายกลูโคส เนื่องมาจากสารละลายกลูโคสเกิดการดูดซับตรงตำแหน่ง Active site ของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ Current density ของตำแหน่งรีดักชันลดลง[16] จากรูปที่ 4(ก) เมื่อ

เจือด้วยสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 M จะไม่เห็น Peak ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 เนื่องมาจากสารละลายกลูโคสเกิดการดูดซับตรงตำแหน่ง Active site ของตัวเร่งปฏิกิริยา อาจจะเกิดจากส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนขัดขวางการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ฟังก์ชันแอลกอฮอล์เมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสมากขึ้น ส่วนที่ช่วงความต่างศักย์ 0.50 ถึง 1.20 V พบว่าปฏิกิริยา Oxygen Evolution Reaction (OER) ดังสมการที่ 4

$$4OH^- \rightarrow O_2 + 4H_2O + 4e^- \quad (4)$$

พบว่าปฏิกิริยา Oxygen Evolution Reaction (OER) ลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส ส่งผลให้สารละลายกลูโคสเกิดการดูดซับบนโลหะ Active site ของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเกิดจากส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนขัดขวางการปฏิกิริยาในขั้นตอนแรกของปฏิกิริยา OER หมู่ $OH^-$ จากสารละลายอิเล็กโทรไลน์ จะดูดซับบน Active site ให้ Active site และ $OH^-$ ทำพันธะกัน เป็นสาร Intermediate แต่เมื่อไฮโดรคาร์บอนขัดขวางการเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนแรก ส่งผลให้ปฏิกิริยา OER ลดลง [17]

ส่วนไซคลิกโวลเทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา Bi/C ปรากฏตำแหน่งการออกซิเดชันจากการดูดซับกลูโคสบนโลหะเกิดขึ้น ในกรณีที่ทำการสแกนไปข้างหน้า (Forward Scan) ที่ช่วงความต่างศักย์ -0.6 ถึง -0.2 V vs. Ag/AgCl ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส และพบว่าไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา Bi/C ปรากฏตำแหน่งการรีดักชัน ในกรณีที่ทำการสแกนย้อนกลับ ที่ช่วงความต่างศักย์ -0.8 ถึง-1.2 V vs. Ag/AgCl และเมื่อเจือด้วยสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 0.1 M ค่าความต่างศักย์ -0.95 V C ให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุดเท่ากับ -1.00 $mA.cm^{-2}$ ดังรูปที่ 4(ข) พบว่าปฏิกิริยารีดักชันจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส สารละลายกลูโคสเกิดการดูดซับตรงตำแหน่ง Active site ของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ Current density ของตำแหน่งรีดักชันลดลง [16] อาจจะเกิดจากส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนขัดขวางการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ฟังก์ชันแอลกอฮอล์ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสมากขึ้น ซึ่งสามารถทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแคโทดได้ เนื่องจากเมื่อมีการเติมเชื้อเพลิงกลูโคสที่ความเข้มข้นต่างกันลงไป แสดงถึงความทนทานต่อสภาวะการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลายกลูโคสที่ทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาการทนทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวเร่งปฏิกิริยาก็เพื่อ เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้งาน อาจมีการข้ามฝั่ง (Crossover) ของเชื้อเพลิง (สารละลายกลูโคส) จากฝั่งขั้วแอโนดมายังฝั่งขั้วแคโทดโดยรั่วซึมข้ามเยื่อเลือกผ่าน (Membrane) ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาขั้วแคโทดเร่งปฏิกิริยารีออกซิเดชันขึ้นได้ เพราะขั้วแคโทดต้องการรับอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนด ต้องการให้เร่งปฏิกิริยารีดักชัน เพื่อให้เร่งปฏิกิริยารีดอกซ์สมบูรณ์ ส่งผลให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้

ในระหว่างปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (ORR) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในเซลล์เชื้อเพลิง โมเลกุลของออกซิเจนในวัตถุดิบตั้งต้นจะถูกดูดซับลงบนพื้นผิวของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแคโทด ปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลออกซิเจนกับพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับออร์บิทัล d ของอะตอมโลหะกลางในตัวเร่งปฏิกิริยาและอิเล็กตรอน p ของโมเลกุลออกซิเจน

การดูดซับโมเลกุลของออกซิเจนเกี่ยวข้องกับการทำลายพันธะระหว่างออกซิเจนกับออกซิเจน (O-O) ทำให้เกิดการก่อตัวของอะตอมของออกซิเจน 2 อะตอม จากนั้นอะตอมเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอาจมีออร์บิทัลว่างที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้ จากนั้นอิเล็กตรอน p ของอะตอมออกซิเจนจะถูกแยกส่วนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งช่วยให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากอะตอมออกซิเจนไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาสะดวกขึ้นการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากอะตอมของออกซิเจนไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนที่สำคัญใน ORR เนื่องจากจะนำไปสู่การรีดักชันของออกซิเจนไปสู่น้ำในที่สุด กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับชุดของตัวกลางเช่น การก่อตัวของซุปเปอร์ออกไซด์ ($O_2^-$) เปอร์ออกไซด์ ($O_2^{2-}$) และอนุมูลไฮดรอกซิล ($OH^-$) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านกลไกเดียวกันของอันตรกิริยาของวงโคจร d-p [18-19]

ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (ORR) เกี่ยวข้องกับเลขออกซิเดชันของ Ni และ Bi ปฏิกิริยา ORR เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากโมเลกุลออกซิเจนไปยังวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยา และสถานะออกซิเดชันของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถมีอิทธิพลต่อความสามารถในการมีส่วนร่วมในกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปฏิกิริยา ORR เกี่ยวข้องกับชุด

ของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยา และการดูดซับและการแยกออกของโมเลกุลออกซิเจนและตัวกลางที่พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกลไกการเกิดปฏิกิริยาโดยรวม สถานะออกซิเดชันของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของพื้นผิว ซึ่งจะส่งผลต่อการดูดซับและปฏิกิริยาของออกซิเจน [18-19]

โดยสรุป ปฏิสัมพันธ์ระหว่างออร์บิทัล d ของอะตอมโลหะกลางในตัวเร่งปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน p ของวัตถุดิบป้อนออกซิเจนและตัวกลางมีบทบาทสำคัญในการอำนวยความสะดวกในการดูดซับโมเลกุลออกซิเจนและการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในระหว่างกระบวนการปฏิกิริยา ORR

## 4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/C และ Bi/C ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงขนาดเล็ก เกาะกันแน่นเป็นกลุ่มก้อนบนพื้นผิวของวัสดุรองรับคาร์บอน มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 76.53 และ 71.73 nm ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อคุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้าในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของเชื้อเพลิงอัลคาไลน์โดยใช้กลูโคสเป็นเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารสะสายกลูโคส 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 M ร่วมกับสารละลาย 0.1 M KOH ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลเทมเมทรี พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Bi/C ที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 0.1 M ปรากฏตำแหน่งการรีดักชันที่มีค่าความต่างศักย์เท่ากับ -0.95 V ให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุดที่ -1.00 $mA.cm^{-2}$ ซึ่งสามารถทนต่อการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้สำหรับขั้วแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์ที่ใช้สารละลายกลูโคสเป็นเชื้อเพลิง

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณโครงการวิจัยกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) งบประมาณด้าน ววน. Full Proposal ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2564 ที่สนับสนุนงบวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Basu, D. and Basu, S., 2010, “A Study on Direct Glucose and Fructose Alkaline Fuel Cell,” *Electrochimica Acta,* 55 (20), pp. 5775-5779. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.05.016

2. Arjona, N., Dector, A., Guerra-Balc_azar, M., Alvarez-Contreras, L., Sabate, N., Esquivel, JP., Ledesma-Garca, J. and Arriaga, LG., 2014, “Effect of Metal Content in the Electrocatalytic Activity of *AuxPdy* Mixtures and their Use in a Glucose Membraneless Microfluidic Fuel Cell,” *RSC Advance*, 50, pp. 26158-26165. https://doi.org/10.1039/C4RA03141E

3. Arjona, N., Armenta-Gonz_alez, AJ., Rivas, S., Guerra-Balc_azar, M., Ledesma-Garca, J. and Arriaga, LG., 2015, “A New Type of High Performance Air-breathing Glucose Membraneless Microfluidic Fuel Cell,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (42), pp. 14699-14705. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.141

4. Faverge, T., Gilles, B., Bonnefont, A., Maillard, F., Coutanceau, C. and Chatenet, M., 2023, “In Situ investigation of D-glucose Oxidation into Value-added Products on Au, Pt and Pd under Alkaline Conditions: a Comparative Study,” *ACS Catalysis*, 13 (4), pp. 2657–2669. https://doi.org/10.1021/acscatal.2c05871

5. Guerra-Balcázar, M., Cuevas-Muñiz, FM., Castaneda, F., Ortega, R., Álvarez-Contreras, L., Ledesma-García, J. and Arriaga, LG., 2011, “Carbon Nanotubes as Catalyst Support in a Glucose Microfluidic Fuel Cell in Basic Media,” *Electrochimica Acta*, 56 (24), pp. 8758-8762. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.07.099

6. Cuevas-Muniz, FM., Guerra-Balcazar, M., Castaneda, F., Ledesma-Garcia, J., Ledesma-Garcia, J. and Arriaga, LG., 2011, “Performance of Au and AuAg Nanoparticles Supported on Vulcan in a Glucose Laminar Membraneless Microfuel Cell,” *Journal of Power Sources*, 196 (14), pp. 5853–5857. https://

doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.02.081

7. Cuevas-Muniz, FM., Guerra-Balcazar, M., Esquivel, JP., Sabaté, N., Arriaga, LG. and Ledesma-Garcia, J., 2012, "Glucose Microfluidic Fuel Cell Based on Silver Bimetallic Selective Catalysts for On-chip Applications," *Journal of Power Sources*, 216 (15), pp. 297-303. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.101

8. Li, L., Scott, K. and Hao Yu, E., 2013, "A Direct Glucose Alkaline Fuel Cell Using MnO2–Carbon Nanocomposite Supported Gold Catalyst for Anode Glucose Oxidation," *Journal of Power Sources*, 221 (1), pp. 1-5. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.08.021

9. Li, Z., Liu, X., Liu, P. and Zhang, P., 2016, "The Performance of Electron-Mediator Modified Activated Carbon as Anode for Direct Glucose Alkaline Fuel Cell," *Catalysts*, 6 (7), pp. 1-12. https://doi.org/10.3390/catal6070095

10. Song, B.Y., Li, Y.S., He, Y.L., Cheng, Z.D., 2014, "Anode Structure Design for the High-Performance Anionexchange Membrane Direct Glucose Fuel Cell," *Energy Procedia*, 61, pp. 2118–2122. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.089

11. Basu, D., Sood, S. and Basu, S., 2013, "Performance Comparison of Pt–Au/C and Pt–Bi/C Anode Catalysts in Batch and Continuous Direct Glucose Alkaline Fuel Cell," *Chemical Engineering Journal*, 228, pp. 867–870. http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2013.05.049

12. Bagoizky, V.S. and Shumilova, N.A., Trushcheva, E.I., 1976, "Electrochemical Oxygen Reduction on Oxide Catalysts," *Electrochimica Acta*, 21 (11), pp. 919-924. https://doi.org/ 10.1016/0013-4686(76)85066-9

13. Chang, C.C. and Wen, T.C., 1997, "An Investigation of Thermally Prepared Electrodes for Oxygen Reduction in Alkaline Solution," *Materials Chemistry and Physics*, 47 (2-3), pp. 203-210. https://doi.org/10.1016/S0254-0584(97)80052-1

14. Suwanraksa, K., 2019, Influence of Palladium Cerium Oxide Alloy Electrocatalyst on Carbon Support Material for the Electrooxidation Reaction of Xylitol Fuel in Alkaline Solution, Chemistry Research Project, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung Campus, 93 p. (In Thai)

15. Dirkx, J.M.H. and Baan, H.S., 1981, "The Oxidation of Glucose with Platinum on Carbon as Catalyst," *Journal of Catalysis*, 67, pp. 1-13. https://doi.org/10.1016/0021-9517(81)90256-6

16. Gao, X., Du, X., Liu, D., Gao, H., Wang, P. and Yang, J., 2020, "Core-shell Gold-nickel Nanostructures as Highly Selective and Stable Nonenzymatic Glucose Sensor for Fermentation Process," *Scientific Reports*, 10, p. 1365. https://doi.org/10.1038/s41598-020-58403-x

17. Xie, X., Du, L., Yan, L., Park S., Qiu, Y., Sokolowski, J., Wang, W. and Shao, Y., 2022, "Oxygen Evolution Reaction in Alkaline Environment: Material Challenges and Solutions," *Advanced Functional Materials*, 32 (21), p. 2110036. https://doi.org/10.1002/adfm.202110036

18. Wang, X., Li, Z., Qu, Y., Yuan, T., Wang, W., Wu, Y. and Li, Y., 2019, "Review of Metal Catalysts for Oxygen Reduction Reaction: From Nanoscale Engineering to Atomic Design," *Chem*, 5 (6), pp. 1486–1511. https://doi.org/10.1016/j.chempr.2019.03.002

19. Qin, N., Yu, S., Ji, Z., Wang, Y., Li, Y., Gu, S., Gan, Q., Wang, Z., Li, Z., Luo, G., Zhang, K. and Lu, Z., 2022, "Oxidation State as a Descriptor in Oxygen Reduction Electrocatalysis," *CCS Chemistry*, 4 (11), pp. 3587–3598. https://doi.org/10.31635/ccschem.022.202101531