



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง อิเล็กโทรรีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อผลิตเมทานอลด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี
แบบต่อเนื่องและวัฏจักรชีวิตของเมทานอลที่ได้

Electroreduction of carbon dioxide to methanol in
electrochemical flow cell and LCA of methanol

หัวหน้าโครงการ

ชื่อ-สกุล...ดร. พิสิฐพงษ์ อินทรพงษ์.....

สังกัด....มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.....

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้เพราะได้รับความช่วยเหลือและกรุณาเป็นอย่างสูงจาก รศ. ดร.สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิจัย ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจและความทุ่มเทของอาจารย์อย่างแท้จริงและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ศรายุทธ ยงประพัฒน์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และแนวคิด ในการทำวิจัยจนทำให้งานวิจัยเล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. มานิตย์ นิธิธนากุล ที่กรุณาให้แนวทางการทำงานวิจัย คำแนะนำ และสนับสนุนแนวคิดการทำวิจัยจนทำให้เกิดความคิดริเริ่มงานวิจัยเล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณพ่อ แม่และครอบครัวที่ร่วมเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมาทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ.2667 ภายใต้รหัสโครงการ (FRB670016/0164).

พิสิฐพงษ์ อินทรพงษ์

30 กันยายน 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการรีดักชันไฟฟ้าเคมีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂RR) บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นซีลีเนียม-ทองแดง เพื่อผลิตสารเคมีที่มีมูลค่า โดยพิจารณาผลของอัตราส่วนซีลีเนียมต่อทองแดง (Se:Cu) ที่ 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:6 และศักย์ไฟฟ้าที่ -0.9, -1.1, -1.3 และ -1.5 V ต่อประสิทธิภาพฟาราเดย์ (FE) และอัตราการผลิตจาก CO₂RR ในเซลล์ไฟฟ้าต่อเนื่อง ผลการทดลองพบว่า ตัวเร่ง 1:6-SeCu/C ให้ค่า FE ของกรดอะซิติกสูงสุด (72.2%) และอัตราการผลิตสูงสุด ($125.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) เมื่อเพิ่มปริมาณ Se ไปเป็นตัวเร่ง 1:1-SeCu/C ให้ค่า FE ของเมทานอล 80% ที่ -1.3 V พร้อมอัตราการผลิต $58 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ การมี Se ใน Cu มากขึ้นช่วยเพิ่มการคัดเลือกไปเป็นเมทานอลและยับยั้งการเกิด H₂ ความสามารถในการคัดเลือกและอัตราการผลิตสัมพันธ์กับเฟสผลึกและสถานะวาเลนซ์ของอะตอม Se และ Cu ซึ่งตรวจสอบด้วยเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) และเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (XPS) ตามลำดับ ในสถานะที่มี Cu มาก (1:6-SeCu/C) เกิดโครงสร้างผลึก SeCu เด่นและมีไอออน Se⁰/Cu²⁺ ที่ผิวตัวเร่ง เมื่อเพิ่ม Se มากขึ้น พลังงานยึดเหนี่ยวของ Se⁰ เลื่อนไปที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำลง (binding energy ต่ำลง) พร้อมการเปลี่ยนเฟสเป็น Cu_{2-x}Se (CuSe → Cu_{1.8}Se → Cu_{1.82}Se) ส่งผลให้ขนาดผลึกและพื้นที่ผิวเชิงไฟฟ้าของตัวเร่งแตกต่างกัน (34.0 ถึง $102.6 \text{ cm}^2 \text{ mg}_{\text{catalyst}}^{-1}$) นอกจากนี้ ตัวเร่ง (SeCu/C) ยังมีความเสถียรดีตลอด 24 ชม. โดยให้ความหนาแน่นกระแสเกิน 70 mA cm^{-2} ที่ศักย์ -1.3 V ภายใต้อัตราการไหลของอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม 0.5 mL/min การปรับปรุงกระบวนการ CO₂RR โดยลดการใช้พลังงานต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ หรือใช้พลังงานสะอาดมากขึ้น ช่วยลดรอยเท้าคาร์บอนและผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์และระบบนิเวศทางน้ำได้อย่างมีนัยสำคัญ สนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีการแปลง CO₂ ที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: การรีดักชันทางไฟฟ้าเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂RR) ,ตัวเร่งปฏิกิริยา ซีลีเนียม-ทองแดง (Se-Cu catalyst), ประสิทธิภาพฟาราเดย์ (Faradaic efficiency, FE),ผลของซีลีเนียมต่อการเลือกผลิตเมทานอล (Methanol selectivity) , ความหนาแน่นกระแส (Current density)

Abstract

This research explores the electrochemical reduction of carbon dioxide (CO₂RR) over selenium-copper-based catalysts that produce valuable chemicals. The effects of Selenium on the copper (Se:Cu) ratio of 1:1, 1:2, 1:4, and 1:6 and applied potential of -0.9, -1.1, -1.3, and -1.5 V on Faradaic efficiency (FE) and the production rate from CO₂RR in a flow cell. The results showed that the highest FE_{acetic acid} (72.2%) and production rate (125.5 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) were achieved from 1:6-SeCu/C catalyst. Further increasing Se to 1:1-SeCu/C catalyst, FE_{methanol} of 80% was achieved at -1.3 V with a production rate of 58 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. A higher Se content in Cu enhanced methanol selectivity and suppressed H₂ production. Selectivity and production rate related to the lattice phase and valence of selenium and copper atoms, as observed using X-ray diffraction (XRD) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), respectively. Cu-rich (1:6-SeCu/C) formed a dominant SeCu lattice and SeO/Cu²⁺ ions on the catalyst surface. When adding more Se, SeO binding energy shifted to lower BE with phase transformation of Cu_{2-x}Se (CuSe $\rightarrow$ Cu_{1.8}Se $\rightarrow$ Cu_{1.82}Se), causing different crystallite size and electrochemical surface area of the catalysts (34.0 to 102.6 $\text{cm}^2 \text{mg}_{\text{catalyst}}^{-1}$). The compound catalysts (SeCu/C) performed good stability over 24 h with a current density of over 70 mA cm^{-2} at an applied potential of -1.3 V under an optimum electrolyte flow rate of 0.5 ml/min. Improving the CO₂RR process by reducing energy consumption per unit of product or utilizing cleaner energy sources significantly lowers the carbon footprint as well as impacts on human health and aquatic ecosystems, thereby supporting the development of sustainable and environmentally friendly CO₂ conversion technologies.

Keywords: CO₂ Reduction/ SeCu catalyst/ Se:Cu Ratio/ Flow cell/ Electrochemical/ Applied potential

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	2
บทคัดย่อ	3
สารบัญ	6
สารบัญรูป	8
สารบัญตาราง	14
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	16
1.2 วัตถุประสงค์ของการ	19
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	20
1.4 ประโยชน์ของการวิจัย	20
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
2.2 ทบทวนวรรณกรรม	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.2 การประเมินวัฏจักรทางสิ่งแวดล้อม (Life cycle Assessment)	33
บทที่ 4 อภิปรายผลการวิจัย	
4.1 อภิปรายผล	
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้า	36
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	40
4.1.3 SEM-EDX	45
4.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา CO ₂ RR	47

4.2.1 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊ส	47
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว	50
4.2.3 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic Efficiency: FE)	57
4.2.4 การบริโภคคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂ Consumption)	62
4.2.5 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจาก CO ₂ RR	64
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุป	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	67
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	74
ภาคผนวก ข	85
ภาคผนวก ค	91
ภาคผนวก ง	116
ภาคผนวก ฉ	120

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 1.1 การปล่อย CO ₂ ที่เทียบเท่ากับวงจรชีวิตโดยเฉลี่ย (source: IPCC)	18
รูปที่ 1.2 แสดงราคาคาร์บอนเครดิตของระบบสหภาพยุโรป (EU ETS), California สหรัฐอเมริกา และ จีน ระยะเวลาของข้อมูลตั้งแต่ปี 2511 ถึง 2564	19
รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจาก CO ₂ ตามประสิทธิภาพฟาราเดย์ เทียบกับความหนาแน่นของกระแส สำหรับ CO ₂ RR	22
รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานต่อน้ำหนักและความหนาแน่นของพลังงานต่อน้ำหนักและจำนวนอิเล็กตรอนสำหรับผลิตแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ	22
รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบเปรียบเทียบต้นทุนเคมีภัณฑ์ต่างๆ ระหว่างราคาตลาดปัจจุบันกับราคาต้นทุนเคมีภัณฑ์ที่ผลิตจาก CO ₂	23
รูปที่ 3.1 ชุดการทดลอง เซลล์ไฟฟ้าต่อเนื่อง	30
รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพ CO ₂ RR และการแยกผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลว	32
รูปที่ 3.3 แสดงการทำสมดุลมวลและพลังงานของกระบวนการ CO ₂ RR จากตัวเร่ง SeCu(1:6)/C	34
รูปที่ 4.1 การวัด Cyclic voltammetry (CV) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C ในอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M KOH	35
รูปที่ 4.2 การวัด Cyclic voltammetry (CV) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Se/C ในอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M KOH	36
รูปที่ 4.3 การวัด Cyclic voltammetry (CV) ของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด ในอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M KOH	37
รูปที่ 4.4 การวัด Linear Sweep Voltammetry (V เทียบกับ Ag/AgCl)	38
รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu/C ที่มีอัตราส่วนโมลาร์ Se:Cu ต่างกัน	41
รูปที่ 4.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:2)/C บน Vulcan carbon(ก) ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา	45

(ข) แผนที่การกระจายธาตุของ Cu จากการวิเคราะห์ EDX (ค) แผนที่การกระจายธาตุของ Se จากการวิเคราะห์ EDX

รูปที่ 4.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:6)/C บน Vulcan carbon 45

(ก) ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา(ข) แผนที่การกระจายธาตุของ Cu จากการวิเคราะห์ EDX

(ค) แผนที่การกระจายธาตุของ Se จากการวิเคราะห์ EDX

รูปที่ 4.8 กราฟโครโนโพเทนทีโอสแตติก (Chronopotentiostatic curve) 45

ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.5

รูปที่ 4.9 กราฟโครโนโพเทนทีโอสแตติก (Chronopotentiostatic curve) 50

ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.5 M

รูปที่ 4.10 กราฟโครโนโพเทนทีโอสแตติก (Chronopotentiostatic curve) 51

ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:2)/C ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.5 M

รูปที่ 4.11 กราฟโครโนโพเทนทีโอสแตติก (Chronopotentiostatic curve) 52

ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:4)/C ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.5 M

รูปที่ 4.12 กราฟโครโนโพเทนทีโอสแตติก (Chronopotentiostatic curve) 52

ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:6)/C ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.5 M

รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ปริมาตรของ CO_2 53

ที่ถูกใช้ไป และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน (conversion) ของ CO_2

ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ปริมาตรของ CO_2 ที่ถูกใช้ไป 62

และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน (conversion) ของ CO_2 ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:6)/C ที่ศักย์ไฟฟ้า

รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ปริมาตรของ CO_2 ที่ถูกใช้ไป 63

และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน (conversion) ของ CO_2 ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:4)/C ที่ศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ

รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ปริมาตรของ CO_2 ที่ถูกใช้ไป 64

และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน (conversion) ของ CO₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:2)/C ที่ศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ

รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ปริมาตรของ CO₂ ที่ถูกใช้ไป 64

และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน (conversion) ของ CO₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C ที่ศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ

รูปที่ ง.1 กราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) ของก๊าซคาร์บอน มอนออกไซด์ 116

รูปที่ ง.2 กราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) ของก๊าซไฮโดรเจน 116

รูปที่ ง.3 กราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) ของฟอร์มัลดีไฮด์ 117

รูปที่ ง.4 กราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) ของกรดฟอร์มิก 117

รูปที่ ง.5 กราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) ของกรดอะซิติก 118

รูปที่ ง.6 กราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) ของเมทานอล 118

รูปที่ จ.1 พื้นที่ผิวเชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Active Surface Area) 121

ของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโน Cu/C

รูปที่ จ.2 กราฟการวัดกระแสแบบสวீปเชิงเส้น (Linear Sweep Voltammetry, LSV) 122

ของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโน Cu/C

รูปที่ จ.3 พื้นที่ผิวเชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Active Surface Area) 123

ของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโน SeCu(1:1)/C

รูปที่ จ.4 กราฟการวัดกระแสแบบสวี่ปเชิงเส้น (Linear Sweep Voltammetry, LSV) 123

ของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโน SeCu(1:1)/C

รูปที่ จ.5 พื้นที่ผิวเชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Active Surface Area) 124

ของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโน SeCu(1:2)/C

รูปที่ จ.6 กราฟการวัดกระแสแบบสวี่ปเชิงเส้น (Linear Sweep Voltammetry, 125

LSV) ของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโน SeCu(1:2)/C

รูปที่ จ.7 พื้นที่ผิวเชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Active Surface Area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโน SeCu(1:4)/C	126
รูปที่ จ.8 กราฟการวัดกระแสแบบสวீปเชิงเส้น (Linear Sweep Voltammetry, LSV) ของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโน SeCu(1:4)/C	127
รูปที่ จ.9 พื้นที่ผิวเชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Active Surface Area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโน SeCu(1:6)/C	127
รูปที่ จ.10 กราฟการวัดกระแสแบบสวี่ปเชิงเส้น (Linear Sweep Voltammetry, LSV) ของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโน SeCu(1:6)/C	127
รูปที่ จ.11 พื้นที่ผิวเชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Active Surface Area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโน Se/C	128
รูปที่ จ.12 กราฟการวัดกระแสแบบสวี่ปเชิงเส้น (Linear Sweep Voltammetry, LSV) ของตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโน Se/C	129
รูปที่ ฉ.1 SeCu (1:1)/C	134
รูปที่ ฉ.2 SeCu (1:2)/C	134
รูปที่ ฉ.3 SeCu (1:4)/C	135
รูปที่ ฉ.4 SeCu (1:6)/C	135
รูปที่ ฉ.5 SeCu (1:1)/C (Fresh)	136
รูปที่ ฉ.6 SeCu (1:1)/C (Used)	136
รูปที่ ฉ.7 SeCu (1:2)/C (Fresh)	137
รูปที่ ฉ.8 SeCu (1:2)/C (Used)	137
รูปที่ ฉ.9 SeCu (1:4)/C (Fresh)	137
รูปที่ ฉ.10 SeCu (1:4)/C (Used)	138
รูปที่ ฉ.11 SeCu (1:6)/C (Fresh)	138

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1 สภาวะการทำงานของ CO ₂ RR และการกำหนดพารามิเตอร์	32
ตารางที่ 4.1 ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างพีคออกซิเดชันและรีดักชันจากพล็อต Cyclic Voltammetry (CV) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se	37
ตารางที่ 4.2 ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se	38
ตาราง 4.3 แสดงค่าขนาดผลึก (crystallite size) ของแต่ละเฟสที่คำนวณจากผล XRD โดยใช้สมการ Scherrer	41
ตารางที่ 4.4 ขนาดผลึกที่คำนวณจากความกว้างครึ่งหนึ่งของพีค (FWHM) ของสัญญาณ XRD ด้วยสมการ Scherrer	43
ตารางที่ 4.5 ผลเฉลี่ยของการวิเคราะห์ SEM-EDX ของ SeCu ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ทั้งในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นตัวอย่างใหม่ (fresh catalysts) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้ว (used catalysts)	44
ตารางที่ 4.6 เวลาเก็บ (Retention time) ของแก๊สไฮโดรเจนและส่วนผสมก๊าซมาตรฐาน	47
ตารางที่ 4.7 ผลิตภัณฑ์ก๊าซจากปฏิกิริยา CO ₂ RR ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se	47
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด	52
ตารางที่ 4.9 เวลาเก็บ (Retention time) ที่ปรากฏของสารละลายมาตรฐาน	54
ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ของผลิตภัณฑ์เหลว	55
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าร้อยละของประสิทธิภาพฟาราเดอิก (%FE) ของผลิตภัณฑ์ทั้งในสถานะแก๊สและของเหลว	56
ตารางที่ 4.12 ปริมาณการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂ consumption) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา CO ₂ RR โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ภายใต้ศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน	62
ตารางที่ 4.13 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม	63
ตารางที่ ก.1 น้ำหนักโมเลกุลของธาตุและสารประกอบที่ใช้ในปฏิกิริยา	74
ตารางที่ ก.2 อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา Se:Cu และปริมาณของสารต่าง ๆ ที่ใช้	82

ตารางที่ ข.1 ผลลัพธ์ค่ามุม θ (องศา, °) และค่า FWHM ที่ได้จากเทคนิคการวิเคราะห์ XRD	85
ตารางที่ ข.2 ค่า ESCA ที่ได้จากการคำนวณของตัวเร่งปฏิกิริยาในแต่ละอัตราส่วน	88
ตารางที่ ค.1 ปริมาตรของสารละลายที่ใช้สำหรับแต่ละความเข้มข้นของสารมาตรฐานภายนอก (External Standard Solution) ในปริมาตรรวม 2 มิลลิลิตร	93
ตารางที่ ค.2 ค่าประจุและจำนวนโมลของอิเล็กตรอนรวมของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se	95
ตารางที่ ค.3 ปริมาตรก๊าซในตัวอย่างและปริมาตรก๊าซของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละอัตราส่วน	98
ตารางที่ ค.4 ประสิทธิภาพฟาราเดอิกของก๊าซในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se	100
ตารางที่ ค.5 พื้นที่ใต้กราฟของแต่ละผลิตภัณฑ์ และปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ จากตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se	105
ตารางที่ ค.6 ประสิทธิภาพฟาราเดอิกของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se	109
ตารางที่ ค.7 ปริมาณการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se	113
ตารางที่ ฉ.1 ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคของตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่วัดได้ ก่อนการใช้งาน โดยใช้โปรแกรม SEMAFOR ภายใต้กำลังขยาย SEM 100,000 เท่า	131

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

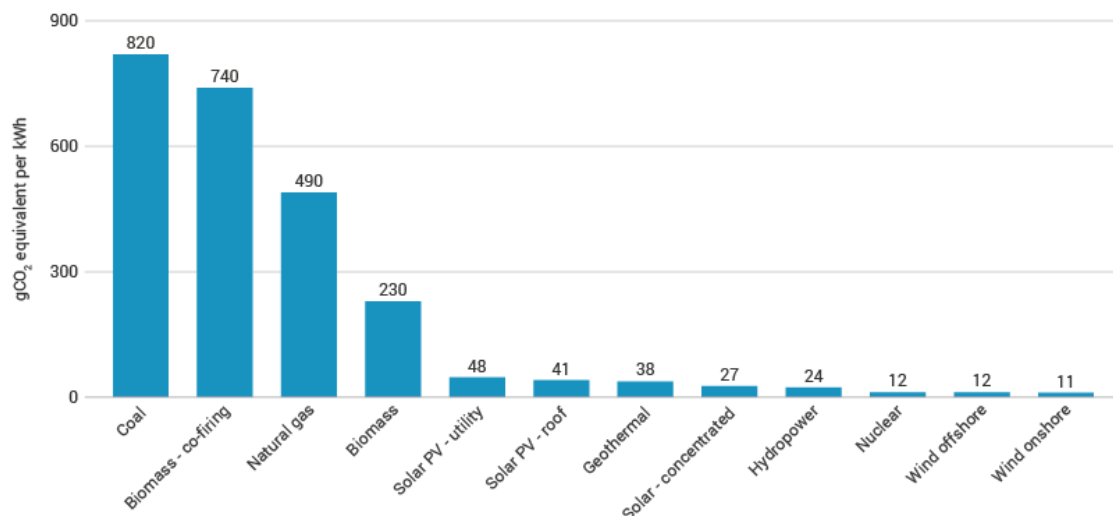
ผลของการปฏิวัติอุตสาหกรรม ทำให้การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้น ความเข้มข้น ของคาร์บอนไดออกไซด์(CO₂) ในบรรยากาศเพิ่มขึ้น โดยบรรยากาศโลกความเข้มข้นของ CO₂ เพิ่มขึ้นจาก 280 ppm ใน 1750 เป็น 414.7 ppm ในปี 2565 ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาด้าน สิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น ภาวะโลกร้อนและการทำให้เป็นกรดของ มหาสมุทร[1] ดังนั้นการหาวิธีการแปลงและใช้ CO₂ อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อเสริมสร้าง การเติบโตด้านพลังงานและคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การลด CO₂ แบ่งได้สองประเภทคือ วิธีการทาง กายภาพและทางเคมี

- ทางกายภาพ เช่น การกักเก็บทางธรณีวิทยาและใต้ท้องทะเลลึก ข้อจำกัดคือต้นทุนที่สูงและ กระบวนการที่ซับซ้อน [2]
- ทางเคมีวิธีการสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภท [3-6] ได้แก่ ชีวเคมี ไฟฟ้าเคมี โฟโตเคมีคอล กัมมันตภาพรังสีและแนวทางของเอนไซม์

การใช้ไฟฟ้าเคมีกับ CO₂ เพื่อตอบสนองความต้องการพลังงานแห่งอนาคตในขณะที่มาตรฐานการครองชีพ ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศเศรษฐกิจเกิดใหม่ การเข้าถึงแหล่งพลังงานราคา ถูกและยั่งยืน เพื่อรักษาความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและสังคม ในอดีตรูปแบบการผลิตไฟฟ้าที่ถูกที่สุดอาศัยการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการคาดการณ์ในอนาคตต้นทุนค่า ไฟฟ้าหมุนเวียนจะลดลงมากจนสามารถแข่งขันกับการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินได้

วัฏจักรวงจรชีวิตการผลิตไฟฟ้า (Life-cycle emissions of electricity) (รูปที่ 1) พลังงานลมและนิวเคลียร์ จะปล่อย CO₂ เทียบเท่ากับไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อย มีการประมาณค่าคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าคือ 12 กรัม CO₂/kWh การปล่อย CO₂ ส่วนใหญ่จากวงจรชีวิตของพลังงานนิวเคลียร์มาจากการผลิตซีเมนต์และเหล็กกล้าและการผลิตระหว่างการก่อสร้าง ในขณะที่การปล่อย CO₂ ส่วนใหญ่มาจากการใช้ถ่านหิน เชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซธรรมชาติ[7] ข้อมูลจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงานรายงานว่า การปลดปล่อยคาร์บอน ในประเทศไทยเกิดจากการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้งานมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 53 จากการใช้พลังงานรายสาขาเศรษฐกิจ ในประเทศไทยการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและการเดินทางหรือขนส่งคิดเป็นร้อยละ 42 และ 38 ตามลำดับ ประเทศไทยใช้พลังงานจากก๊าซธรรมชาติร้อยละ 59.88 พลังงานถ่านหินร้อยละ 18.34 พลังงานน้ำมันร้อยละ 0.17 และเป็นพลังงานหมุนเวียนร้อยละ 21.61 จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงเหล่านี้ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกปริมาณมาก [8]

การแปลง CO₂ ด้วยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีแบบรีดักชัน หรือ CO₂ reduction reaction (CO₂RR) เป็น เชื้อเพลิงและวัตถุดิบ เป็นวิธีแก้ปัญหาในการปิดวงจรคาร์บอนเมื่อใช้พลังงานหมุนเวียน ในขั้นตอนนี้ CO₂ จะ เปลี่ยนเป็นไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ โดยใช้น้ำและไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์มีความเป็นไปได้เมื่อใช้มุมมองด้านต้นทุนของ อุปกรณ์ทางไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนซึ่งจะมีราคาที่ลดลงในอนาคต เช่นเดียวกันกับระบบไฮโดรเจนอิเล็กทรอนิกส์ เซอร์เชิงพาณิชย์[7] คาร์บอนสุทธิที่เป็นกลางจะเกิดได้โดยการผลิตไฮโดรคาร์บอนจากการปล่อย CO₂ มาจากภาค การผลิตไฟฟ้าดั้งเดิม ดังนั้นกระบวนการ CO₂RR จะเป็นเทคโนโลยีที่ขับเคลื่อนการสร้างพลังงานหมุนเวียนที่ยั่งยืน ควบคู่ไปกับการรักษาสีเขียวสิ่งแวดล้อมได้ด้วย



รูปที่ 1.1 การปล่อย CO₂ ที่เทียบเท่ากับวงจรชีวิตโดยเฉลี่ย (source: IPCC) [7]

ประเทศไทยได้ให้สัตยาบันร่วมเป็นภาคีความตกลงปารีสเมื่อวันที่ 21 กันยายน 2559 ณ นครนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกาโดยนายกรัฐมนตรี ได้ประกาศว่า “การเข้าเป็นภาคีความตกลงปารีสเป็นก้าวที่สำคัญยิ่งก้าวหนึ่งของไทย ประเทศไทยเข้าร่วมเพราะตระหนักในความรับผิดชอบร่วมกันของทุกคนที่จะรักษาโลกนี้ไว้ให้กับลูกหลาน เจตนาารมณ์อันแน่วแน่ของประเทศไทยในการมุ่งสู่สังคมคาร์บอนต่ำ และมีความต้านทานต่อสภาพภูมิอากาศ” ประเทศไทยได้ยื่นข้อเสนอการมีส่วนร่วมของประเทศในการลดก๊าซเรือนกระจกและการดำเนินงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อย่างจริงจัง รวมถึงการสนับสนุนทางการเงิน เทคโนโลยี ภายหลังกปี ค.ศ. 2020 โดยกำหนดให้เป้าหมายขั้นต่ำที่ร้อยละ 20 จากกรณีปกติ และกำหนดให้เป้าหมายขั้นสูงที่ร้อยละ 25 จากกรณีปกติต่อ สำนักเลขาธิการอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศแล้ว [8] ดังนั้นการจัดหา เทคโนโลยีสำหรับลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจึงสอดคล้องกับโมเดลเศรษฐกิจ BCG’ หรือการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว (Bio-Circular-Green Economy Model) ตามแผนแม่บทฯ และแผนระดับที่ 3 ดังนี้

ยุทธศาสตร์ชาติ : ด้านการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เป้าหมาย : พัฒนาและสร้างใหม่ฐานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เพื่อลดผลกระทบทางลบ จากการพัฒนา สังคมเศรษฐกิจของประเทศ

ประเด็น : สร้างการเติบโตอย่างยั่งยืน บนสังคมเศรษฐกิจที่เป็นมิตรต่อสภาพภูมิอากาศ

แผนแม่บทภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ : ประเด็นที่ ๑๘ การเติบโตอย่างยั่งยืน

เป้าหมาย : สภาพแวดล้อมของประเทศไทยมีคุณภาพดีขึ้นอย่างยั่งยืน

แผนย่อยที่ 3 : การสร้างการเติบโตอย่างยั่งยืนบนสังคมที่เป็นมิตรต่อสภาพภูมิอากาศ

ยุทธศาสตร์การขับเคลื่อนการพัฒนาประเทศไทยด้วยโมเดลเศรษฐกิจ BCG พ.ศ. ๒๕๖๔-๒๕๖๘

ยุทธศาสตร์ที่ 1 : สร้างความยั่งยืนของฐานทรัพยากรและความหลากหลายทางชีวภาพ ด้วยการจัดสมดุลระหว่างการอนุรักษ์และการใช้ประโยชน์

แผนงานที่ 1.3 : พัฒนาระบบบริหารจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน (BCG-Resource Management System)

ตลาดคาร์บอน ระบบของกลุ่มสหภาพยุโรป (EU ETS) ได้เริ่มต้นในปี 2548 มีราคาคาร์บอนเครดิตต่ำที่สุดอยู่ที่ 123.59 บาทต่อตัน ในปี พ.ศ. 2556 ในขณะที่ข้อมูลของระบบ California ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้เริ่มต้นในปี พ.ศ. 2557 ราคาคาร์บอนเครดิตต่ำที่สุดอยู่ที่ 465.18 บาทต่อตัน และในปี พ.ศ. 2557 และข้อมูลของตลาดคาร์บอนในระบบประเทศจีน (China) พบว่าได้เริ่มต้นในปี 2564 ราคาคาร์บอนเครดิตต่ำที่สุดอยู่ที่ 12.25 บาทต่อตัน ในปี 2564 [9] สำหรับประเทศไทย โครงการ Thailand Voluntary Emission Reduction Program (T-VER) ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย อบก. ในปี 2557 องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) หรือ อบก. เปิดเผยในพิธีลงนามการซื้อขายคาร์บอนเครดิต ประจำปี 2561 เมื่อวันที่ 29 ต.ค. 2561 ปัจจุบันโครงการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจตามมาตรฐานของประเทศไทย หรือ T-VER มีการซื้อขายคาร์บอนเครดิต รวมทั้งสิ้นแล้วกว่า 2 แสนตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยมีมูลค่าการซื้อขายกว่า 6.2 ล้านบาท มีโครงการที่ขึ้นทะเบียน T-VER ทั้งสิ้น 129 โครงการ มีปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่คาดว่าจะลดได้ 3,422,134 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี ในจำนวนนี้มีโครงการที่ผ่านการรับรองจำนวน 55 โครงการ คิดเป็นปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ 1,969,877 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า การใช้เทคโนโลยีไฟฟ้าเคมี (electrochemical) เพื่อลด CO₂ สามารถสนับสนุนนโยบายของประเทศ ประกอบกับการใช้ประโยชน์จากโครงสร้างพื้นฐานตลาดคาร์บอนที่มีอยู่สำหรับกระตุ้นให้ภาคเอกชนมองเห็นการลดมลพิษในสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปกับการสร้างรายได้จากผลิตภัณฑ์เคมีพร้อมกับการขายคาร์บอนเครดิตได้อีกด้วย



รูปที่ 1.2 แสดงราคาคาร์บอนเครดิตของระบบสหภาพยุโรป (EU ETS), California สหรัฐอเมริกา และ จีน ระยะเวลาของข้อมูลตั้งแต่ปี 2511 ถึง 2564

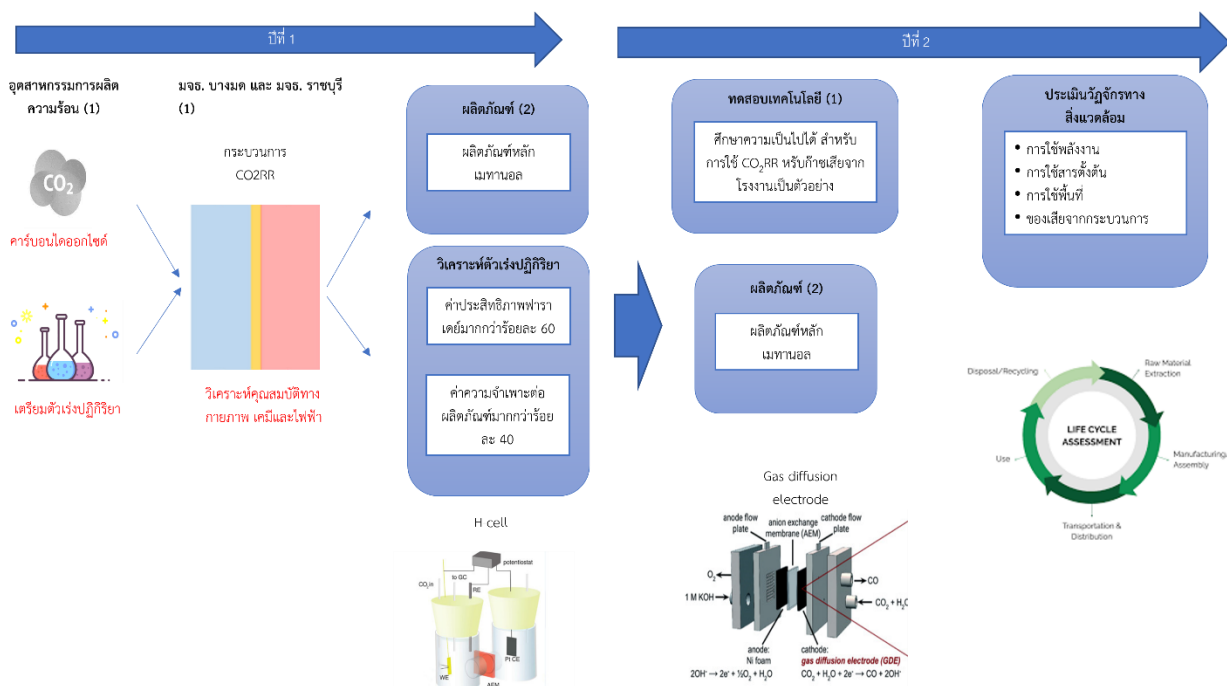
ทั้งนี้ ในการประชุม COP26 ล่าสุดประเทศไทยประกาศเป้าหมายที่จะบรรลุ Net Zero GHG Emissions ในปี 2065 หรือ 44 ปีนับจากนี้ ภายใต้เงื่อนไขการได้รับการสนับสนุนทางการเงินเทคโนโลยี และการสร้างขีดความสามารถในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก หากประเทศไทยปรับตัวเร็ว นอกจากจะช่วยโลกแล้ว ยังจะช่วยเพิ่มความสามารถการปรับตัวด้านการค้าต่างๆ เช่น มาตรการ Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) มาตรการปรับราคาคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดนของสหภาพยุโรป ที่จะมีการปรับราคาของสินค้านำเข้าให้สะท้อนถึงปริมาณการปล่อยคาร์บอนที่แท้จริงในกระบวนการผลิตสินค้า เพื่อป้องกันการนำเข้าสินค้าที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงเข้ามาในกลุ่มประเทศสมาชิกสหภาพยุโรป European Union (EU) และในระยะกลางและระยะยาวอาจมีมาตรการที่คล้ายคลึงกับมาตรการ CBAM มากขึ้นจากการที่หลายประเทศเริ่มทำ Net Zero

Commitment เทคโนโลยีการเกิดรีดักชันคาร์บอนไดออกไซด์ทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical CO₂ reduction reaction: CO₂RR) จึงตอบสนองต่อยุทธศาสตร์ของประเทศไทยเรื่องการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (คาร์บอนไดออกไซด์) จากการใช้เทคโนโลยีทางไฟฟ้าเคมีได้อย่างมีประสิทธิภาพและตอบสนองการเป็นสังคมคาร์บอนเป็นศูนย์ในโลกแห่งอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการ

- 1.1 เพื่อศึกษาค่าประสิทธิภาพฟาราเดย์และค่าการคัดสรรในการผลิตเมทานอลได้จากโลหะคูนานโน (Bimetallic Nanocatalyst) สำหรับรีดักชันคาร์บอนไดออกไซด์ทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์คาร์บอนไดออกไซด์แบบต่อเนื่อง (Flow cell)
- 1.2 เพื่อศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมและค่าความคงทน (Stability) ของตัวเร่งสำหรับเครื่องปฏิกรณ์คาร์บอนไดออกไซด์แบบต่อเนื่อง (flow cell) ในการผลิตเมทานอลได้จากโลหะคูนานโน (Bimetallic Nanocatalyst) ต่อดัชนีประสิทธิภาพฟาราเดย์ (FE)
- 1.3 เพื่อศึกษาวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ทางเคมีที่ได้มาจากคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อใช้เทคโนโลยี CO₂RR

1.3 ขอบเขตของการวิจัย



1.4 ประโยชน์ของการวิจัย

1. การวิจัยช่วยให้เกิดวิทยาการใหม่ด้านการใช้ประโยชน์จากคาร์บอนไดออกไซด์ เพิ่มพูนความรู้ทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติให้กับนักวิจัยในประเทศไทย ต่อ สถาบันบริการวิชาการ
2. การลด CO₂ ส่งผลดีต่อสุขภาพของประชาชน ลดต้นทุนแฝงด้านค่ารักษาพยาบาล ทั้งจากภาครัฐและภาคเอกชน ลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เช่น ภาวะโลกร้อน เป็นต้น

3. การวิจัยช่วยเป็นเครื่องมือของฝ่ายนโยบายที่ใช้ในการควบคุมการปล่อยมลพิษ ใช้แรงจูงใจทางเศรษฐศาสตร์ให้ลดมลพิษได้ตามเป้าหมายที่วางไว้
4. บริษัทและองค์กรที่สนใจการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมขององค์กรน้อยกว่าสิทธิที่ได้รับ สามารถขายสิทธิที่มีเหลือให้กับบริษัทอื่นได้ เมื่อเข้าร่วมสู่ระบบซื้อขายสิทธิในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจของไทย 2024 จากการลงทุนในเทคโนโลยีนี้

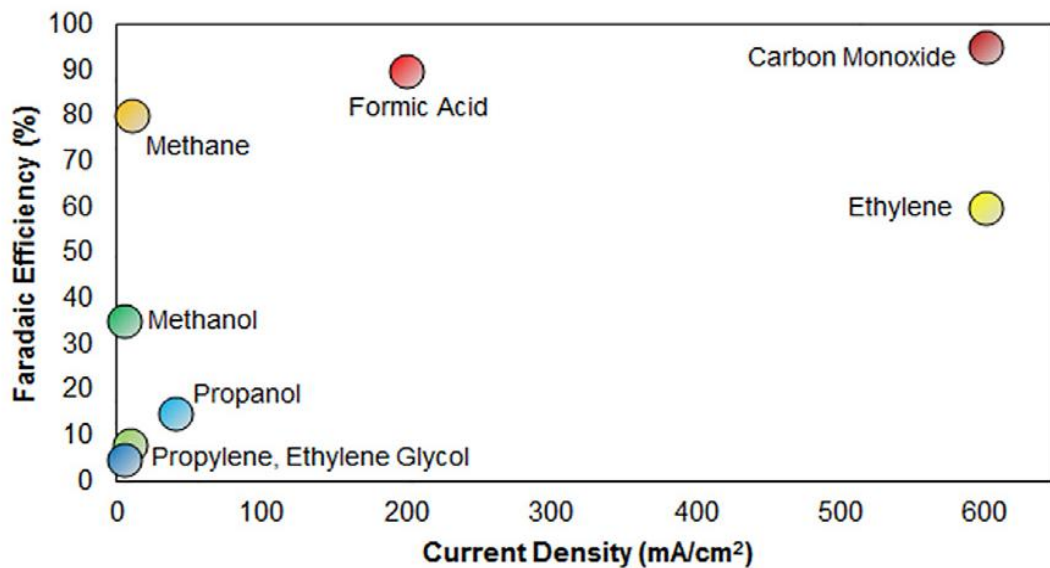
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

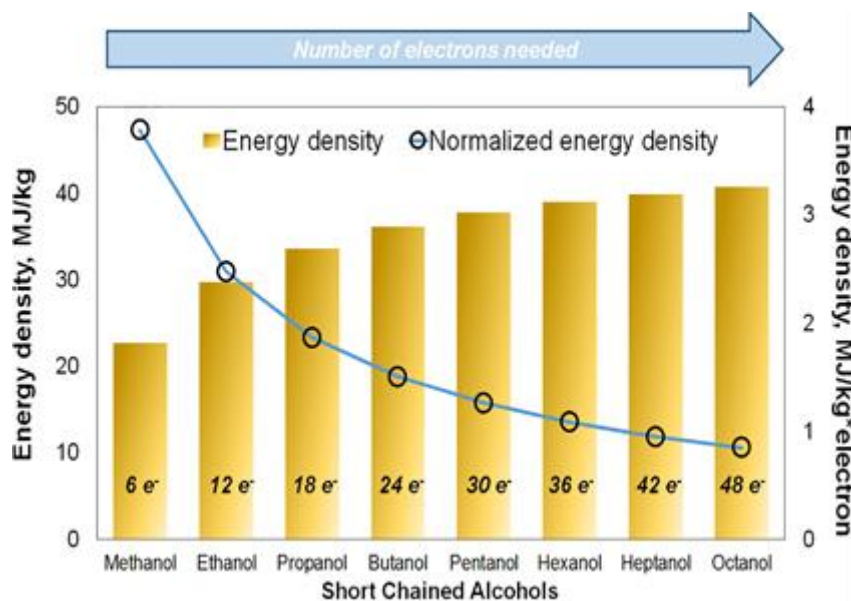
2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปฏิกิริยาการเกิดรีดักชันคาร์บอนไดออกไซด์ทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical CO₂ reduction reaction: CO₂RR) สู่รูปของเหลวไฮโดรคาร์บอนที่มีมูลค่า การลดของ CO₂ เป็น CO เป็นเทคโนโลยีที่สร้างความยั่งยืนทางด้านการสร้างคาร์บอนเป็นศูนย์ในอุตสาหกรรม การเปลี่ยนแปลง CO₂ เป็น CO ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและความหนาแน่นของกระแสที่ประเมินได้จากการถ่ายเทประจุเรียกว่า “ประสิทธิภาพฟาราเดย์ (Faraday efficiency: FE)” อธิบายถึงประสิทธิภาพของการถ่ายเทประจุในระบบที่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ในกรณีของอิเล็กโทรดสำหรับคาร์บอนไดออกไซด์แสดงถึง ค่าการเลือกของผลิตภัณฑ์ (Selectivity) ที่ได้มาจากสารตั้งต้น CO₂ ถ้าค่าการเลือกของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่ำ จะส่งผลให้การใช้ประโยชน์ของกระบวนการอิเล็กโทรไลต์จาก CO₂ ต่ำ และทำให้ต้นทุนในการแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเพิ่มขึ้นด้วย ปัจจุบันมีเพียง คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ กรดฟอร์มิก (HCOOH) เท่านั้นที่สามารถผลิตได้ในอัตราผลตอบแทนที่สูง โดยมี FE สูงใกล้เคียงสมบูรณ์ (ร้อยละ 100) ในทางตรงกันข้าม ค่าการเลือกที่จะผลิตเป็นแอลกอฮอล์ยังน้อยกว่าร้อยละ 40 เมทานอลร้อยละ 35 และ 1-โพรพานอล (n-propanol) ร้อยละ 25 [10-12] (ดังรูปที่ 1) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการใช้ CO₂ การผลิตไฮโดรคาร์บอนสายยาวต้องดูดซับโมเลกุลของ CO₂ จำนวนมากบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและการเปลี่ยนโมเลกุลเหล่านั้นให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าทางตลาด ดังนั้นจากมุมมองของการผลิตเชื้อเพลิง (การเก็บพลังงาน) เมื่อความยาวของไฮโดรคาร์บอน/แอลกอฮอล์ในขั้นตอนปฏิกิริยารีดักชันจะสามารถผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่ากัน การเน้นสร้างพลังงานสูงจะมาจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิง C4+

การเปลี่ยน CO₂ ไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอนสูงขึ้นมีค่าพลังงานมากที่ต้องใช้ เมื่อต้องการเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่มีความหนาแน่นพลังงานสูง ในขณะที่ลด CO หรือกรดฟอร์มิกต้องการเพียงการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ควบคู่โปรตอนสองตัวเท่านั้น การลด CO₂ ไปสู่เมทานอลใช้ 6 อิเล็กตรอน นอกจากนี้ ขั้นตอนการในขณะที่มีพลังงานเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามปริมาณอิเล็กตรอนที่ใช้ ความยาวของโซ่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของพลังงานมาตรฐานต่อจำนวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนลดลง (รูปที่ 2.1) แนวโน้มนี้ห้วงโซ่ที่ยาวขึ้นจะผลิตสารประกอบแอลกอฮอล์ที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับโมเลกุลของสายโซ่ที่สั้นกว่า เพื่อให้ได้ความจุในการจัดเก็บพลังงานโดยรวมที่ใกล้เคียงกัน



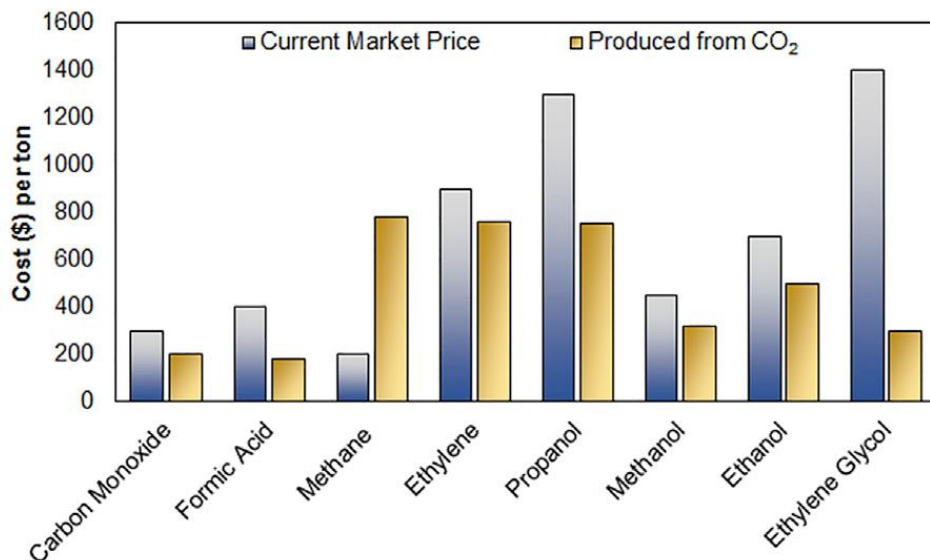
รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจาก CO₂ ตามประสิทธิภาพฟาราเดย์เทียบกับความหนาแน่นของกระแส สำหรับ CO₂RR



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานต่อน้ำหนักและความหนาแน่นของพลังงานต่อน้ำหนักและจำนวนอิเล็กตรอนสำหรับผลิตแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ

การเปรียบเทียบต้นทุนเคมีภัณฑ์ต่างๆ ระหว่างราคาตลาดปัจจุบันกับราคาต้นทุนเคมีภัณฑ์ที่ผลิตจาก CO₂ บนสมมติฐานกระบวนการ CO₂RR มีค่าใช้จ่าย 500 ดอลลาร์/กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 60% ประสิทธิภาพฟาราเดย์ร้อยละ 90 ค่าไฟฟ้า 2 ¢/กิโลวัตต์ชั่วโมง และต้นทุน CO₂ 30 ดอลลาร์/ตัน พบว่าเอทิลีนไกลคอล โพรพานอล กรดฟอร์มิก เอทานอล และเมทานอลเป็นเป้าหมายที่น่าสนใจทางเศรษฐกิจอย่างยิ่ง [13] เนื่องจากต้นทุนการผลิต จากกระบวนการ CO₂RR ต่ำกว่า (รูปที่ 3) แต่อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายการใช้ CO₂ ยังมีความอ่อนไหว/ไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าใช้จ่ายในการดักจับ ค่าขนส่งและในบางประเทศ การเก็บภาษีเป็นปัจจัยนำเข้า เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนอาจแปรผันได้ในอนาคต การลด CO₂ อาจทำให้ประหยัด

เพิ่มขึ้นหากเข้าถึงการใช้พลังงานหมุนเวียนที่มีต้นทุนต่ำ ความก้าวหน้าในการลด CO₂ สู่ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้นถือเป็นสัญญาณทางเศรษฐกิจที่ดีในการผลิตสารไฮโดรคาร์บอนจาก CO₂



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบเปรียบเทียบต้นทุนเคมีภัณฑ์ต่างๆ ระหว่างราคาตลาดปัจจุบันกับราคาต้นทุนเคมีภัณฑ์ที่ผลิตจาก CO₂ บนสมมติฐานกระบวนการ CO₂RR มีค่าใช้จ่าย 500 ดอลลาร์/กิโวลต์ต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 60% ประสิทธิภาพฟาราดีย์ร้อยละ 90 ค่าไฟฟ้า 2 ¢/กิโวลต์ต่อชั่วโมง และต้นทุน CO₂ 30 ดอลลาร์/ตัน

ตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนสำคัญอย่างมากต่อต้นทุนเคมีภัณฑ์ต่างๆ การพัฒนาตัวเร่งให้มีประสิทธิภาพฟาราดีย์สูงและค่าการคัดเลือกจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจสูง จะส่งผลให้กระบวนการ CO₂RR มีความเป็นไปได้ต่ออุตสาหกรรมปิโตรเคมีมากยิ่งขึ้น

2.2 ทบทวนวรรณกรรม

ตัวเร่งปฏิกิริยามีความหลากหลาย แต่ตัวเร่งปฏิกิริยา bimetallic ที่มี Cu เป็นองค์ประกอบพื้นฐานบนโลหะอื่นๆ สำหรับปฏิกิริยาไฟฟ้า CO₂RR ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง การเติมโลหะอื่นเข้าไปผสมในตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ Cu มีประสิทธิภาพมากต่อการเพิ่มค่าประสิทธิภาพของฟาราดีย์ (FE) และสามารถนำมาปรับปรุงการคัดเลือกไปสู่ผลิตภัณฑ์เป้าหมายหรือการเลือกเฉพาะได้มากยิ่งขึ้น [16–18]

Lee และคณะ 2016 [19] ศึกษาการใช้แพลทินัม (Pt) พบว่าสามารถผลิตแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลจากคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารไฟริดอกซี ขประสิทธิภาพของฟาราดีย์ (FE) อยู่ที่ร้อยละ 5

Cavin และคณะ 2021 [20] ศึกษาการใช้ Mo และ MoWVNbTaS₂ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้า CO₂RR โดยพบว่าโลหะดังกล่าวสามารถเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดี แต่ไม่พบผลผลิตประเภทแอลกอฮอล์

Yin และคณะ 2022 [21] ตัวเร่งสำหรับปฏิกิริยา CO₂RR ด้วยทองแดง (Cu) ซึ่งเป็นโลหะชนิดเดียวที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยน CO₂ ไปยังสารไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่ C₁ จนถึง C₂ โดยทองแดงมีการดูดซับ CO₂ ปานกลางต่อ การเปลี่ยนแปลงไปสู่ตัวกลาง *CO และมีความสามารถในการส่งเสริมให้เกิดพันธะระหว่างคาร์บอน (C—C) เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน C₂ ที่ศักยภาพต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากโลหะอื่นได้ [22,23] อย่างไรก็ตาม

ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าการคัดเลือกที่ไม่เฉพาะเจาะจงหรือเส้นทางในการเกิดผลิตภัณฑ์ไม่ชัดเจนสำหรับปฏิกิริยา CO_2RR บนตัวเร่งปฏิกิริยาทองแดง และในบางผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน ประสิทธิภาพของฟาราเดย์ (FE) ต่ำ การแก้ไขปัญหาลำบากขึ้นอาจมาจากการใช้ปัจจัยเชิงโครงสร้าง เช่นการปรับสัดส่วนวิทยาของตัวเร่ง ขนาด และตัวที่นำมารองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu เป็นองค์ประกอบรวมได้

อย่างไรก็ตามอิเล็กโทรด Cu ยังมีข้อเสียบางประการสำหรับ CO_2RR เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าเกิน (overpotential) สำหรับการทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สูง และปฏิกิริยาการแข่งขันที่ก่อให้เกิดไฮโดรเจนสูง [24, 25] นักวิจัยหลายคนได้ศึกษาเพื่อปรับปรุงการคัดเลือกและความหนาแน่นกระแสสำหรับ CO_2RR ให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เฉพาะเจาะจงมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ Cu เพียงอย่างเดียว Yang และคณะ 2019 [26] ศึกษาการเติม Se ร่วมกับ Cu (CuSe) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับการศึกษาทั้งความหนาแน่นกระแสและ FE สำหรับการผลิตเมทานอลเหนือกว่า Se หรือ Cu อย่างเดียว การเติมโลหะอื่นเข้าไปผสมเข้าไปทำให้ขนาดของโลหะลดลง ผลทดลองพบว่า $\text{Cu}_{1.63}\text{Se}$ มีค่าความต่างศักย์เชิงบวก (-1.815 V) เทียบกับ Ag/Ag^+ อิเล็กโทรด ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน CuS หรือ Se หรือ Cu อย่างเดียว ซึ่งบ่งชี้ว่า $\text{Cu}_{1.63}\text{Se}$ (1/3) มีความสามารถในการดูดซับ CO_2 ได้ดี Gao และคณะ 2018 [27] พบว่าเมื่อใช้ Palladium (Pd) ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา Cu พบค่าศักย์ไฟฟ้าเกินลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ Cu เพียงอย่างเดียว ประสิทธิภาพการทำงานของฟาราเดย์ของสำหรับ CO หรือ CHOOH สูงถึง 90% แต่พบว่าผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ส่วนใหญ่คือ CO หรือ HCOOH และได้แอลกอฮอล์เป็นส่วนน้อย งานวิจัยบางส่วนพบว่าค่าการคัดเลือกของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์และความเข้มข้นของสารละลายตัวกลางที่ใช้ด้วยเช่นกัน เมทานอลซึ่งเป็นสารเคมีโคกักกักที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นพลังงานสูง

เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (อิเล็กโทรไลเซอร์) เป็นกุญแจสำคัญในปฏิกิริยา CO_2RR และการกำหนดค่าอิเล็กโทรไลเซอร์อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพ CO_2RR อิเล็กโทรไลเซอร์สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักๆ คือ อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็งและของเหลว ส่วนใหญ่นิยมใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว ปัจจุบัน H-cell เป็นอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับ CO_2RR เนื่องจากการติดตั้งง่ายในห้องปฏิบัติการ เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการละลายของ CO_2 ต่ำในสารละลายที่เป็นน้ำ ซึ่งมักจะพบใน H-cell การปรับปรุงความเข้มข้นของ CO_2 ใกล้พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยากลายเป็นกุญแจสำคัญในการเพิ่มการคัดเลือกและกิจกรรมของ CO_2RR แคโทดของอิเล็กโทรไลต์ จะใช้ Gas diffusion electrode (GDE) เป็นอิเล็กโทรไลเซอร์ที่มีการไหลของ CO_2 อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ CO_2 สามารถเข้าสู่ขั้วแคโทดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงและความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้นได้ มากกว่า 100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร [28] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะ 2021 [29] พบว่าอิเล็กโทรไลเซอร์ที่มีการไหลของ CO_2 แบบต่อเนื่องสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของฟาราเดย์ของสารในกลุ่มแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล จากร้อยละ 5 ไปร้อยละ 12 ที่ความหนาแน่นของกระแสมากกว่า 500 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรได้ ดังนั้นการใช้ GDE จะทำให้เทคโนโลยี CO_2RR มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้ในการลงทุนมากยิ่งขึ้น

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้สำหรับเป็นสื่อกลางในการถ่ายโอนโปรตอนและ/หรือค่าความจุไฟฟ้า ค่าการลดเบส ค่าการนำไฟฟ้า ตลอดจนชนิดของไอออนบวกและประจุลบ ที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อตัวเร่งปฏิกิริยา และปฏิกิริยา CO_2RR สารละลายที่อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้มี 3 กลุ่ม

- กลุ่มที่ 1 สารละลายน้ำ (Aqueous Solutions) เมื่อ CO_2 ละลายในน้ำจะแตกตัวให้ H_2CO_3 HCO_3^- และ CO_3^{2-} ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าสารละลายอื่นๆ สารไบคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นไม่ได้ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ หรือผู้ให้โปรตอน Kortlevel และคณะ 2013 [30] พบว่าสารไบคาร์บอเนตส่งผลกระทบของไอออนบวก (Cation) ของอิเล็กโทรดของโลหะ เนื่องมาจากเกิดจากไอออนบวกจากการไฮโดรไลซิสของน้ำในบริเวณใกล้เคียงกับขั้วแคโทด [31] เมื่อขนาดไอออนบวกเพิ่มขึ้น ค่า pKa สำหรับการไฮโดรไลซิสของไอออนบวก

ลดลงและมีค่าต่ำเพียงพอสำหรับไฮเดรตของโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น K^+ , Rb^+ , และ Cs^+ ด้วยเหตุนี้ H^+ ที่เกิดจากการแตกตัวของ H_2O จะล้อมรอบขั้วของไอออนบวก ส่งผลกระทบให้ pH ลดลง และเพิ่มความเข้มข้นของ CO_2 ที่ละลายในพื้นที่ใกล้เคียงกับพื้นผิวอิเล็กโทรด ส่งผลให้ FE ของ H_2 ลดลงและการเพิ่มขึ้นของ FE ของ CO ดังนั้นสารละลาย $KHCO_3$ เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในแง่ของประสิทธิภาพและต้นทุนเนื่องจาก $KHCO_3$ ให้อัตราส่วนของสารตั้งต้นคาร์บอนที่สูงเพียงพอ

- กลุ่มที่ 2 สารละลายอินทรีย์ (Organic Electrolytes) ให้ความสามารถในการละลายของ CO_2 ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ CO_2 ในน้ำ
- กลุ่มที่ 3 ของเหลวไอออนิก (Ionic Liquids) การละลายของ CO_2 ในของเหลวไอออนิกเกี่ยวข้องกับสองกระบวนการ: การดูดซับทางกายภาพ และสารเคมีการดูดซับ CO_2 การก่อตัวของตัวกลาง $CO_2^{\bullet-}$ ที่ช่วยในการดูดซับ CO_2 ให้ละลายหรือผสมกับน้ำได้ดี [31] แต่ของเหลวไอออนิกที่ใช้ส่วนมากมีความเป็นพิษสูง ดังนั้นต้องใช้เครื่องมือด้านความปลอดภัยสูงในการดำเนินงานเช่นเดียวกับในสารละลายอินทรีย์

สารละลายที่อิเล็กโทรไลต์ประเภทสารละลายน้ำ เช่น $KHCO_3$ หรือ KCl กับตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-based จะได้ผลิตภัณฑ์หลัก ได้แก่ CO , CH_4 , CH_3COOH , C_2H_4 และ C_2H_5OH [33] มีการใช้อิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกันเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์เฉพาะเช่น เมทานอล ตัวอย่างเช่น Yang และคณะ 2019 [26] ใช้อิเล็กโทรไลต์ของเหลวไอออนิกเช่น 1-Butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate ($[Bmim]PF_6$)- CH_3CN-H_2O สำหรับ CO_2RR บนตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-Se ผลิตภัณฑ์หลักจากกระบวนการ CO_2RR คือเมทานอลที่มีประสิทธิภาพฟาราเดย์ร้อยละ 50 การเลือกชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกันจะส่งผลถึงประสิทธิภาพฟาราเดย์ที่แตกต่างกัน

ดังนั้น การนำ CO_2 จากภาคอุตสาหกรรมมาผลิตพลังงานและผลิตสารตั้งต้นเทียบเท่าสารทางปิโตรเคมีนั้นเป็นกระบวนการที่น่าสนใจ แต่การจะนำมาประยุกต์ใช้นั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความต้องการของตลาดและราคาผลิตภัณฑ์ และต้นทุนขั้วของอิเล็กโทรดสำหรับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 electrolyzer) ต้นทุนการดำเนินงานสำหรับเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้น (CO_2 feedstock) และการประเมินความคุ้มค่าทางสิ่งแวดล้อมต้องลงทุน เป็นต้น การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสุทธิของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ LCA สามารถพิจารณาการปล่อยมลพิษจากของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ที่เกิดขึ้นได้จากการใช้พลังงานต่างๆ ซึ่งสามารถประเมินกระบวนการ CO_2RR สำหรับผลิตภัณฑ์ทางเคมีและพลังงาน เช่น C_2H_4 [32] และ CH_3OH [33] เป็นต้น งานวิจัยการประเมินกระบวนการ CO_2RR ด้วย LCA ยังไม่หลากหลายอันเนื่องมาจากเทคโนโลยียังอยู่ในช่วงพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ณ ปัจจุบันผู้วิจัยเสนอว่าระบบ electrocatalytic captured CO_2 reduction (ECCR) เป็นทางเลือกที่สามารถใช้งานได้หลากหลาย(พลังงานและสารตั้งต้นทางปิโตรเคมี) ซึ่งมีข้อได้เปรียบที่ชัดเจนเกี่ยวกับการใช้ที่ดินและการใช้น้ำที่เหมาะสม เทคโนโลยีระยะแรกนี้มีความสามารถในการสร้างผลิตภัณฑ์ทางเคมีอย่างยั่งยืนในขณะที่ให้ประโยชน์ที่เกี่ยวข้องของเส้นทางการดักจับและการใช้คาร์บอน

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานุภาคนาโนเดี่ยวของ คอปเปอร์ หรือ เซเลเนียม บนตัวรองรับ

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้โลหะ 20% บนตัวรองรับ โดยใช้คาร์บอน Vulcan เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา และกวนในน้ำกลั่นเป็นเวลา 15 นาที เริ่มจาก ละลาย Copper(II) nitrate trihydrate ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) หรือ Sodium selenite (Na_2SeO_3) ในน้ำกลั่นและกวนเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ลงในสารละลาย Copper nitrate ที่อัตราส่วนโมล NaBH_4 เท่ากับ 16:1 กวนอย่างแรงเป็นเวลา 2 นาที ต่อมา เติมสารละลายกรดแอสคอร์บิกที่มีความเข้มข้น 1M และกวนเป็นเวลา 30 นาที แล้วกรองสารละลายที่ได้ด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นนำของแข็งที่ได้ไปให้ความร้อนที่ 80°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ได้ผงตัวเร่งปฏิกิริยา

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานุภาคนาโนของคอปเปอร์-เซเลเนียม (SeCu) แบบโลหะคู่ บนตัวรองรับ

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu แบบสองโลหะน้ำหนัก 20% บนตัวรองรับ โดยใช้คาร์บอน Vulcan เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา จะถูกสังเคราะห์ที่อัตราส่วน Cu:Se/C เท่ากับ 1:6, 1:4, 1:2, และ 1:1 โดยขั้นตอนในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu มีดังนี้:

1. เตรียมคาร์บอน Vulcan ด้วย IPA ในขวดแล้วนำไปที่เครื่อง Sonicator เป็นเวลา 30 นาที
2. เตรียมสารละลาย ให้ละลาย Na_2SeO_3 ในน้ำกลั่นล่วงหน้าและละลาย $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ จากนั้นนำไปผสมรวมกันบนเครื่องกวนแล้วกวนเป็นเวลา 30 นาที
3. ผสมสารละลายคาร์บอน Vulcan กับสารละลาย SeCu ที่เตรียมไว้บนเครื่องกวนเป็นเวลา 30 นาที
4. เติม Sodium borohydride ลงในสารละลายคอปเปอร์เซเลเนียมพร้อมกับตัวรองรับ ที่อัตราส่วนโมล NaBH_4 เท่ากับ 16:1 กวนอย่างแรงเป็นเวลา 30 นาที
5. เติมสารละลายกรดแอสคอร์บิกที่มีความเข้มข้น 1M และกวนเป็นเวลา 30 นาที
6. กรองสารละลายโดยใช้เครื่องกรองสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำกลั่นและไอโซโพรพานอล จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่ 80°C เพื่อกำจัดความชื้นภายในตัวเร่งปฏิกิริยา

การเตรียมหมึกตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ชั่งน้ำหนักผงตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วผสมกับไอโซโพรพานอล
2. เติม Nafion D-521 ลงในส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยาและไอโซโพรพานอล
3. ใช้เครื่องผสมอัลตราโซนิกหรือ Sonicator ในการผสมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง การใช้เครื่องอัลตราโซนิกนี้ช่วยกระจายผงตัวเร่งปฏิกิริยาและส่งเสริมการเคลือบที่สม่ำเสมอ

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคนาโนบนกระดาษคาร์บอน

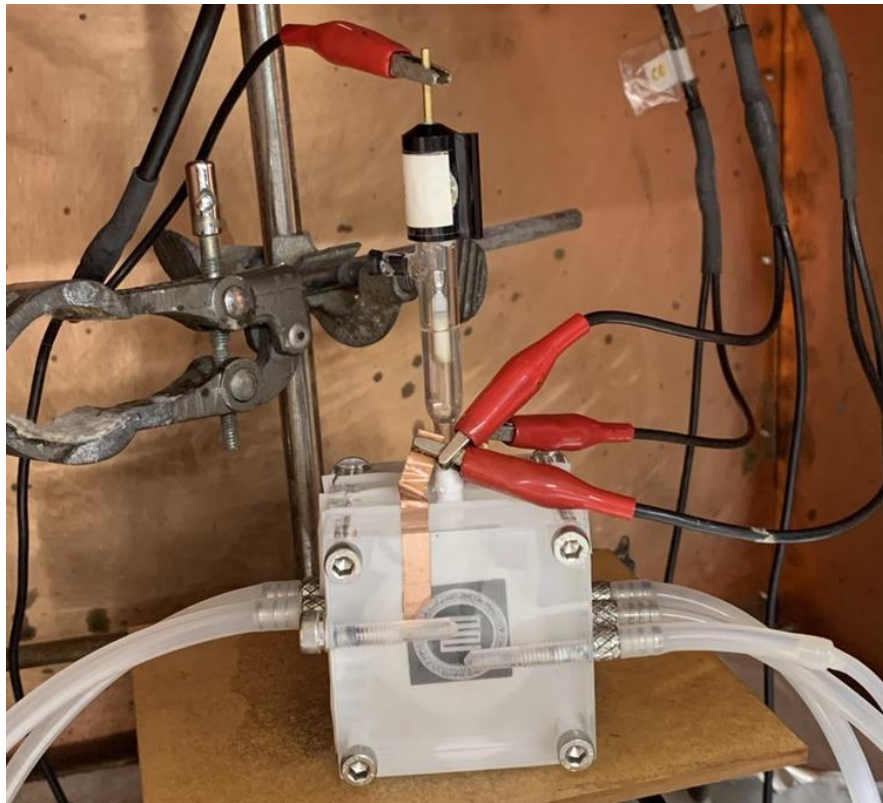
เริ่มจากตัดกระดาษคาร์บอนให้มีขนาด 24x24 ตารางมิลลิเมตร แล้วทำความสะอาดสิ่งสกปรกบนกระดาษคาร์บอน เช่น ฝุ่นหรือคราบน้ำมัน โดยล้างด้วยไอโซโพรพานอลแล้วนำกระดาษคาร์บอนไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C ในเตาอบสุญญากาศเพื่อลบความชื้น จากนั้นสามารถหาหมึกตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ให้ทั่วพื้นผิวของกระดาษคาร์บอนที่เตรียม ต้องทาอย่างสม่ำเสมอ แล้วรอประมาณ 30 นาทีเพื่อให้หมึกเคลือบแผ่นกระดาษอย่างทั่วถึง นำตัวทำละลายออกจากกระดาษคาร์บอนโดยการให้ความร้อนในเตาอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที

การเตรียมเครื่องมือและทดสอบ

การติดตั้งเซลล์ไฟฟ้าเคมี

- 1) ขั้นที่ 1: วางแก๊สแคมเบอร์ วางแหวนยางในแก๊สแคมเบอร์ จากนั้นวาง GDE (Gas Diffusion Electrode) บนแหวนยาง และวางเกสเกต ที่มีช่องสี่เหลี่ยมขนาด 24x24 ตารางมิลลิเมตร ไว้ด้านบนสุด
- 2) ใส่แกนกำหนดตำแหน่งทั้งสี่ แกนเหล่านี้ใช้เพื่อรักษาความเข้าศูนย์ของปะเก็นและห้อง ซึ่งทำให้การติดตั้งรวดเร็ว และสะดวก
- 3) ติดตั้งตัวเก็บประจุกระแสไฟฟ้าของ GDE ขั้วลบ
 - ก. ตัดฟอยล์ทองแดงนำไฟฟ้าแล้วติดไว้ด้านบนนอกถาดจากแหวนยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มม.
 - ข. พับฟอยล์ทองแดงที่เปิดออก
- 4) ขั้นที่ 2: วางแคโทไลต์แคมเบอร์ ตรวจสอบให้แน่ใจว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้านบนและมีช่องอยู่ตรงกลางพอดี จากนั้นนำเกสเกตที่มีช่องสี่เหลี่ยมขนาด 24x24 ตารางมิลลิเมตรวางให้ตรงกัน
- 5) ขั้นที่ 3: ติดตั้งเมมเบรนขนาด 20x20 ตารางมิลลิเมตร แล้ววางเกสเกตที่มีช่องสี่เหลี่ยมขนาด 24x24 ตารางมิลลิเมตรด้านบน วางให้ตรงกัน
- 6) ขั้นที่ 4: วางแอโนไลต์แคมเบอร์ และรักษาตำแหน่งของรูให้ตรงกัน แล้ววางเกสเกตที่มีช่องสี่เหลี่ยมขนาด 24x24 ตารางมิลลิเมตรให้ตรงกัน
- 7) ขั้นที่ 5: วางตะแกรงแพลตตินัมไว้ตรงกลางขนาด 10x10 มม. แล้วปิด จากนั้นตัดฟอยล์ทองแดงนำไฟฟ้าชิ้นหนึ่ง ติดฟอยล์ทองแดงนำไฟฟ้าบนแอโนดฟิกซิ่ง เพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อและนำไฟฟ้าของขั้วบวก
- 8) ขั้นที่ 6: ติดตั้งแผ่นยึดแอโนดฟิกซิ่ง
- 9) ขันน็อต 4 มุม ของตัวเซลล์ไฟฟ้าต่อเนื่อง
- 10) วางอิเล็กโทรดอ้างอิง ซึ่งเป็นอิเล็กโทรด Calomel ที่มีระบบอ้างอิง Ag/AgCl Sat.KCl ลงในช่องเปิดที่อยู่ด้านบนของห้อง Catholyte

สำหรับการทดลอง CO₂RR ทั้งหมด ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ความดัน 1 atm การวัด Cyclic Voltammetry (CV) และ Chronoamperometry (การอิเล็กโทรลิซิส CO₂) ในอิเล็กโทรไลต์ที่อิ่มตัวด้วย CO₂ ถูกดำเนินการเพื่อประเมินความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง Potentiostat Solartron 1287 ในการดำเนินการวัดทางเคมีไฟฟ้าทั้งหมด ศึกษาช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.9, -1.1, -1.3 และ -1.5 V เทียบกับ RHE



รูปที่ 3.1 ชุดการทดลอง เซลล์ไฟฟ้าต่อเนื่อง

การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. เทคนิคประเมินสัณฐานวิทยาทางพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) แบบกระจายพลังงานที่พลังงาน 20.0 กิโลโวลต์
2. การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ(SEM/EDS)เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการวิเคราะห์ทั้งอัตราส่วนมวลและจำนวนอะตอมของธาตุภายในอนุภาค โดยใช้เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น Hitachi/S-4800 และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน – SEM-EDS (6610LV)

3. เทคนิคประเมินขนาดของอนุภาคโลหะในระดับนาโน ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy, TEM)
4. เทคนิคดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (X-ray diffraction, XRD) ด้วยรังสี Cu K- α ผ่านรูปแบบการเลี้ยวเบนวิเคราะห์ด้วยมาตรฐานการเลี้ยวเบนทางด้านผลึก เพื่อศึกษาโครงสร้างที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่ง

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

1. การวิเคราะห์แก๊ส (Gas products Analysis)

แก๊สโครมาโทกราฟี (GC-14B, Shimadzu) ที่ติดตั้งตรวจจับการนำความร้อน (Thermal Conductivity Detector: TCD) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ก๊าซผลิตภัณฑ์ โดยใช้คอลัมน์ Unibeads C วิเคราะห์ตัวอย่างโดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 80 จนถึง 180 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นที่ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที

2) การวิเคราะห์ของเหลว (Liquid products Analysis)

วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากอิเล็กโตรไลซิสโดย High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

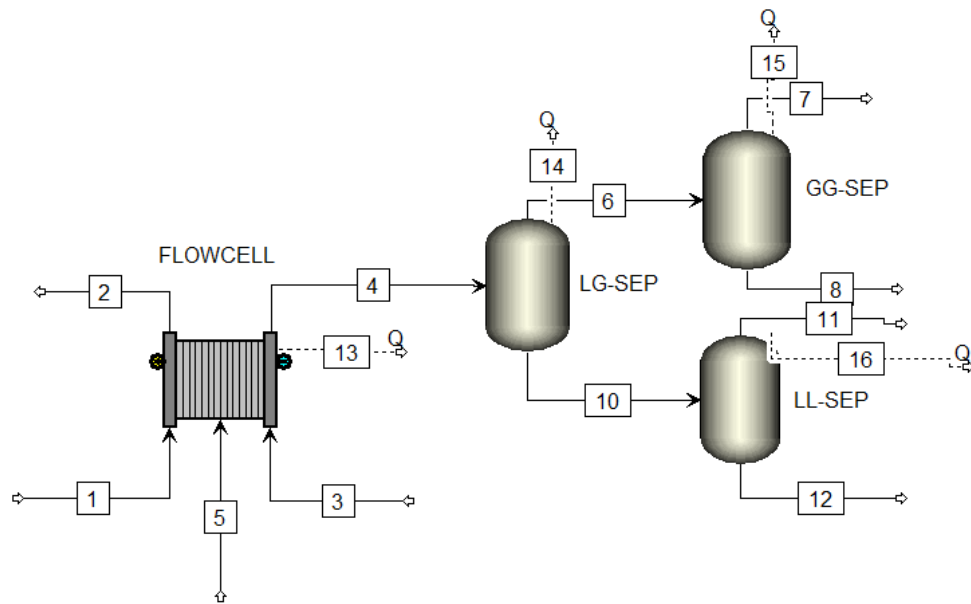
การคำนวณประสิทธิภาพฟาราเดย์ (Faradiac efficiency, FE) [1]

ประสิทธิภาพฟาราเดย์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ตรวจพบจริงโดยเทคนิคการวิเคราะห์ อย่างเช่น เทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่อยู่ในสถานะของเหลว (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) และเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) เทียบกับปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ควรเกิดขึ้นตามทฤษฎีโดยอ้างอิงจากจำนวนประจุที่มีการไหลผ่านเข้าสู่ระบบอิเล็กโตรไลซิส ซึ่งประสิทธิภาพฟาราเดย์จะแสดงถึงความสามารถหรือ Selectivity ของปฏิกิริยา โดยสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$\text{Faradaic efficiency (FE)} = \frac{nZF}{Q}$$

เมื่อ	n	คือ	จำนวนโมลของผลิตภัณฑ์ที่ตรวจจับได้
Z		คือ	จำนวนอิเล็กตรอนที่ต้องการเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ 1 โมเลกุล
F		คือ	ค่าคงที่ของฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ 96,485 คูลอมป์
Q		คือ	จำนวนประจุทั้งหมดที่มีการไหลผ่านเข้าสู่ระบบ

วัตถุประสงค์ของการกำหนดขอบเขตของการศึกษา เพื่อระบุและกำหนดสิ่งที่จะทำการประเมิน รวมถึงขอบเขตของระบบที่จะศึกษา (System Boundary) เพื่อให้สามารถรวบรวมข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพและตรงตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา LCA การกำหนดขอบเขตที่ชัดเจนจะช่วยให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้อง และสามารถนำไปใช้ในการเปรียบเทียบหรือการตัดสินใจได้อย่างเหมาะสม การกำหนดสิ่งที่จะศึกษาและหน่วยการทำงานดังรูปที่ 3.2

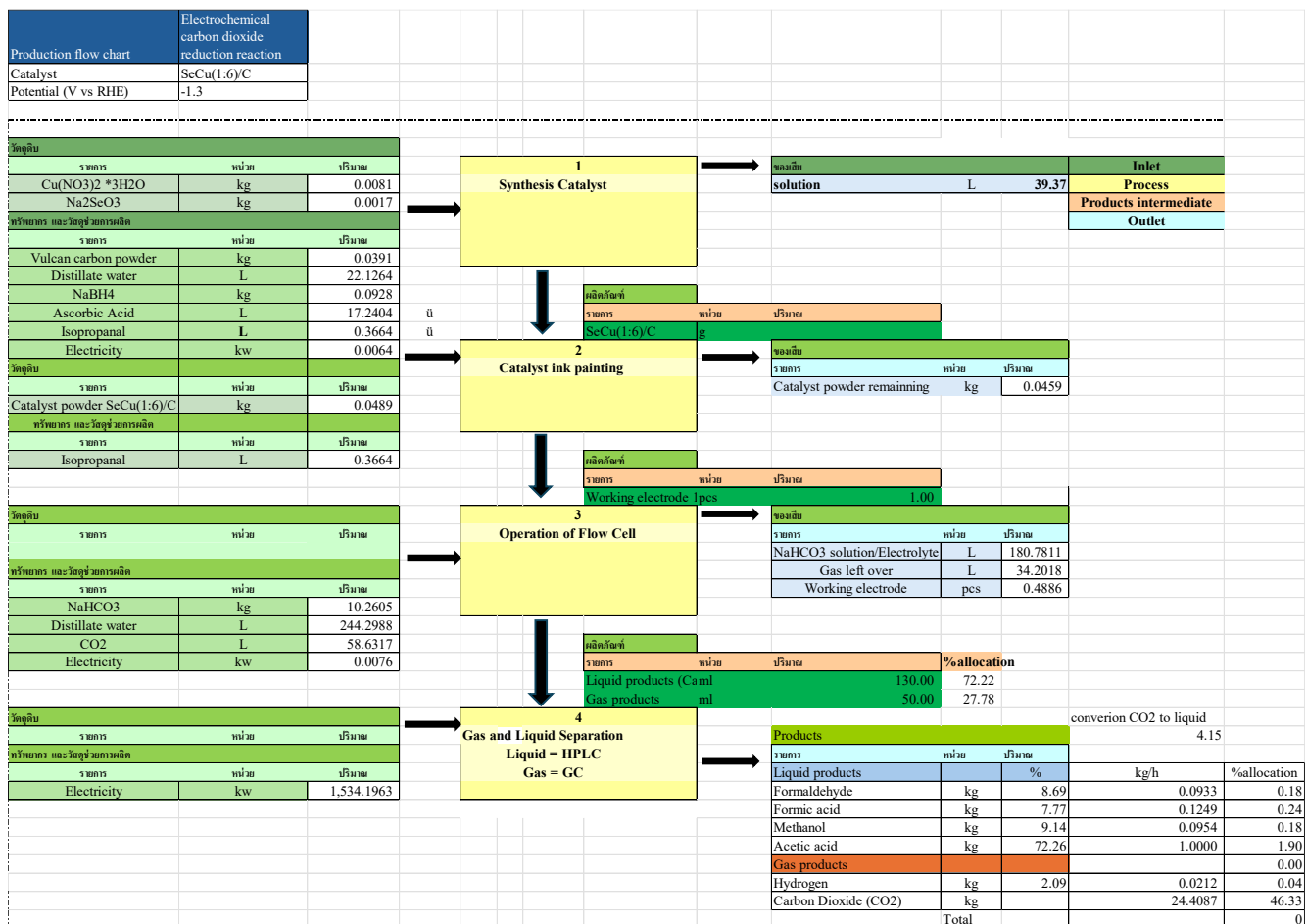


รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพ CO2RR และการแยกผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลว

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทำงานของ CO2RR และการกำหนดพารามิเตอร์

เส้นทาง	การดำเนินงาน	ค่า	หน่วย
1	อัตราการไหลเข้าด้านแอนโนด	0.5	ml/min
2	อัตราการไหลออกด้านแอนโนด	0.5	ml/min
3	อัตราการไหลเข้าด้านแคโทด	0.5	ml/min
4	อัตราการไหลออกด้านแคโทด	1.5	ml/min
5	อัตราการไหลเข้าของก๊าซ CO ₂	1	ml/min
6	อัตราการไหลออกของผลิตภัณฑ์ก๊าซ		
10	อัตราการไหลออกของผลิตภัณฑ์ของของเหลว		
	อุณหภูมิเซลล์ไฟฟ้า	25	°C
	ความดันเซลล์ไฟฟ้า	1	atm
	ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า	1.3	V

- การกำหนดพารามิเตอร์ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
 - ค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพลังงานไฟฟ้าพื้นฐานอ้างอิงตามเกณฑ์ของ TGO คือ 0.4999 kgCO₂eq/unit
 - ค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากสารเคมีและวัสดุ อ้างอิงจากฐานข้อมูล โปรแกรม Sigma pro 9.4.0.1 ด้วยกระบวนการ CML baseline 2000/the Netherlands, 1997
 - การปันส่วนผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม (allocation) ที่เกิดขึ้นในระบบผลิตภัณฑ์ เป็นไปโดยร้อยละน้ำหนัก อ้างอิงตามผลิตภัณฑ์หลักคือกรดอะซิติกของตัวเร่งปฏิกิริยา 1:6-SeCu/C
 - สมมติฐาน ไม่รวมค่าภาระทางสิ่งแวดล้อมดังนี้ การใช้พื้นที่ การขนส่ง และการตั้งเครื่องจักรอุปกรณ์
 - หน่วยการทำงาน (Functional Unit) คือ 1 kg acetic acid production ดังรูป



รูปที่ 3.3 แสดงการทำสมดุลมวลและพลังงานของกระบวนการ CO₂RR จากตัวเร่ง SeCu(1:6)/C

บทที่ 4

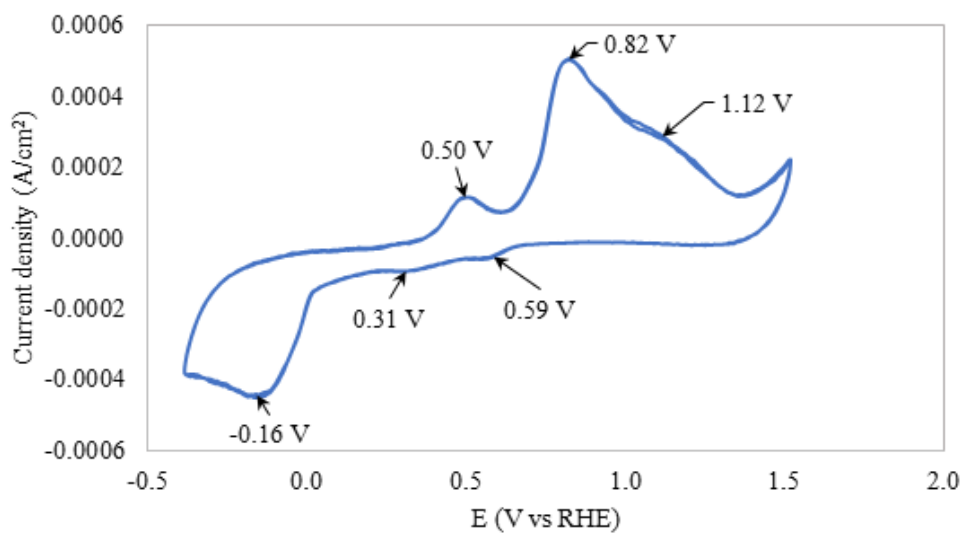
อภิปรายผล

4.1 อภิปรายผลการวิจัย

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้า

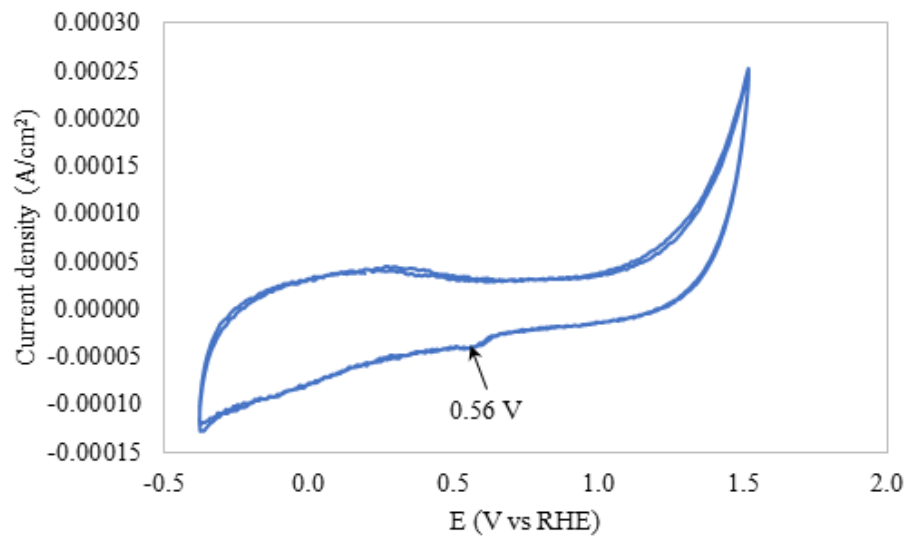
การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคเดียวนาโน Cu และ Se

การวัด Cyclic voltammetry (CV) ใช้เพื่อประเมินการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu 20% บนผงคาร์บอนบนอิเล็กโทรดคาร์บอนคล้ายแก้วในอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M KOH แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การวัด Cyclic voltammetry (CV) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C ในอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M KOH

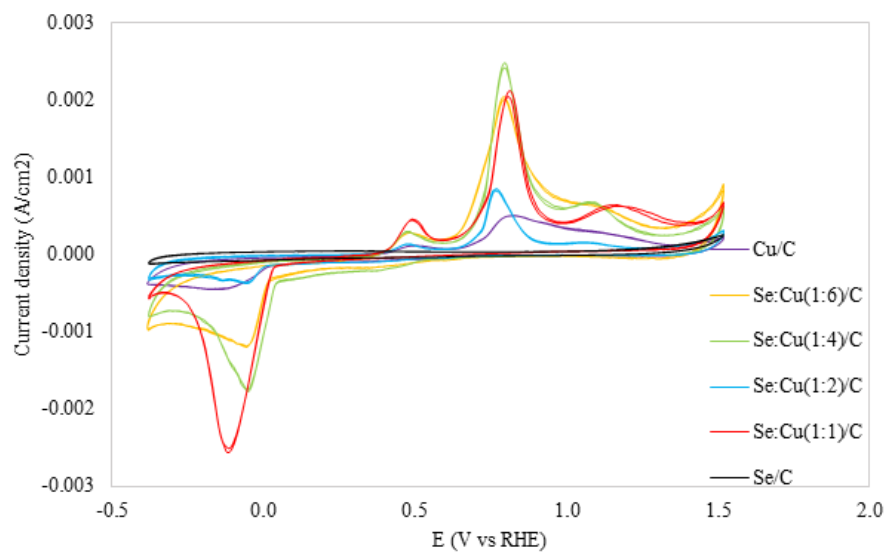
จุดทั้ง 6 จุดที่แสดงกระแส ของ Cu แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 โดยวัด Cyclic voltammetry (CV) จากลวด Cu ที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดมีรูปแบบเดียวกันกับ Cyclic voltammetry (CV) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu 20% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า Cu นาโนสามารถเกาะได้ดีบนผงคาร์บอน



รูปที่ 4.2 การวัด Cyclic voltammetry (CV) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Se/C ในอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M KOH

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะนานโนแบบคู่ bimetallic

อัตราส่วนของ Cu ต่อ Se สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา bimetallic (1:6, 1:4, 1:2, และ 1:1) โดยใช้ Cyclic Voltammetry ของตัวเร่งปฏิกิริยาในอิเล็กโทรไลต์ KOH ความเข้มข้น 0.5M แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C มีพื้นที่ใต้พีคออกซิเดชันมากที่สุด นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้พีคของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองโลหะในตำแหน่งปฏิกิริยาลด พื้นที่ใต้พีคออกซิเดชันของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C ก็มีขนาดใหญ่ที่สุดเช่นกันดังแสดงจากรูปที่ 4.3

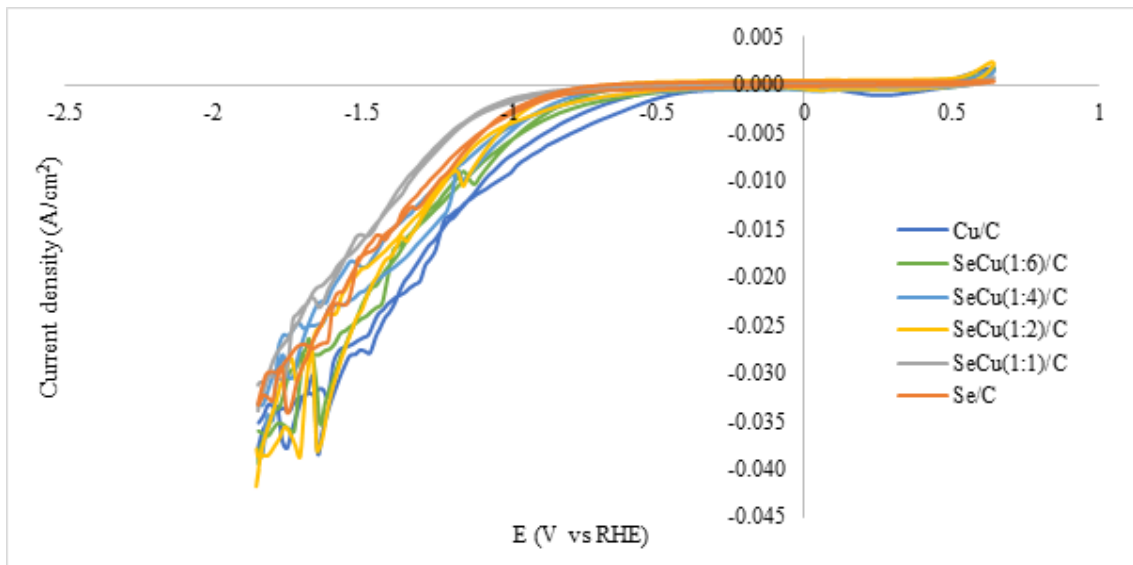


รูปที่ 4.3 การวัด Cyclic voltammetry (CV) ของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด ในอิเล็กโทรไลต์ 0.5 M KOH

ตารางที่ 4.1 แสดงตำแหน่งพีคของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบโลหะเดี่ยวและโลหะคู่ (SeCu(1:6)/C, SeCu(1:4)/C, SeCu(1:2)/C, และ SeCu(1:1)/C) พีคการปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C แบบโลหะคู่มีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.49 V ที่ตำแหน่ง 1, 0.81 V ที่ตำแหน่ง 2, และ 1.17 V ที่ตำแหน่ง 3 พีคการปฏิกิริยาลดของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:4)/C และ SeCu(1:6)/C ทั้งคู่มีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ -0.05 V (ตำแหน่ง 1), และตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:4)/C มีพีคที่ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.38 V (ตำแหน่ง 2) ที่ตำแหน่ง 3 ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:6)/C, SeCu(1:4)/C, SeCu(1:2)/C, และ Cu/C มีพีคที่ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.59 V

ตารางที่ 4.1 ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างพีคออกซิเดชันและรีดักชันจากผลลัพธ์ Cyclic Voltammetry (CV) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se

Catalyst	Potential (V vs RHE)					
	Oxidation reaction			Reduction reaction		
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 1	Position 2	Position 3
Cu/C	0.50	0.82	1.12	-0.16	0.31	0.59
Se:Cu (1:6)/C	0.48	0.79	1.09	-0.05	0.36	0.59
Se:Cu (1:4)/C	0.48	0.80	1.09	-0.05	0.38	0.59
Se:Cu (1:2)/C	0.47	0.77	1.06	-0.06	0.34	0.59
Se:Cu (1:1)/C	0.49	0.81	1.17	-0.11	-	-
Se/C	-	-	-	-	-	0.56



รูป 4.4 การวัด Linear Sweep Voltammetry (V เทียบกับ Ag/AgCl)

บนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบโลหะเดี่ยวและคู่ ในอิเล็กโทรไลต์ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.5M

จากการพิจารณาจากแนวโน้มของปฏิกิริยาใน Linear Sweep Voltammetry ศักย์ไฟฟ้าที่สามารถวัดได้แสดงถึงศักย์ครึ่งเซลล์หรือศักย์ของขั้วไฟฟ้าทำงานที่กระตุ้นให้กระแสกระจายได้ครึ่งหนึ่งตามที่คาดหวังไว้ ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ทำหน้าที่เป็นค่าประมาณของค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของไอออนที่เกี่ยวข้อง ค่าศักย์ไฟฟ้าของไอออนที่เป็นลบบ่งบอกถึงศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาการกลับด้าน ซึ่งหมายความว่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการกลับด้าน ดังนั้น ค่าศักย์ไฟฟ้านี้ยังเริ่มต้นปฏิกิริยาต่อเนื่องเมื่อมีการใช้กระแสไฟฟ้า โดยพิจารณาจากปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.5 M โดยใช้เทคนิค Cyclic Voltammetry ช่วงศักย์ไฟฟ้าของ -2.6 V ถึง -0.1 V แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se

Catalyst	Potential (V)
Cu/C/C	-0.45
SeCu(1:6)/C	-0.60
SeCu(1:4)/C	-0.56
SeCu(1:2)/C	-0.70
SeCu(1:1)/C	-0.80
Se/C	-0.74

ตารางที่ 4.2 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับจากปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาหลายชนิด: Cu/C, SeCu(1:6)/C, SeCu(1:4)/C, SeCu(1:2)/C, SeCu(1:1)/C และ Se/C ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C ให้กระแสไฟฟ้าที่สูงที่สุด

ในปฏิกิริยาเหล่านี้ แม้ว่าค่ากระแสของตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดจะคล้ายกัน แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดจะถูกกำหนดโดยใช้ Cyclic Voltammetry (V เทียบกับ Ag/AgCl) ร่วมกับค่าศักย์ไฟฟ้า พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{SeCu}(1:1)/\text{C}$ ให้กระแสไฟฟ้าที่สูงที่สุดที่ -0.80 V ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C ต้องการกระแสไฟฟ้าต่ำที่สุดในการกระตุ้นปฏิกิริยาที่ -0.45 V

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

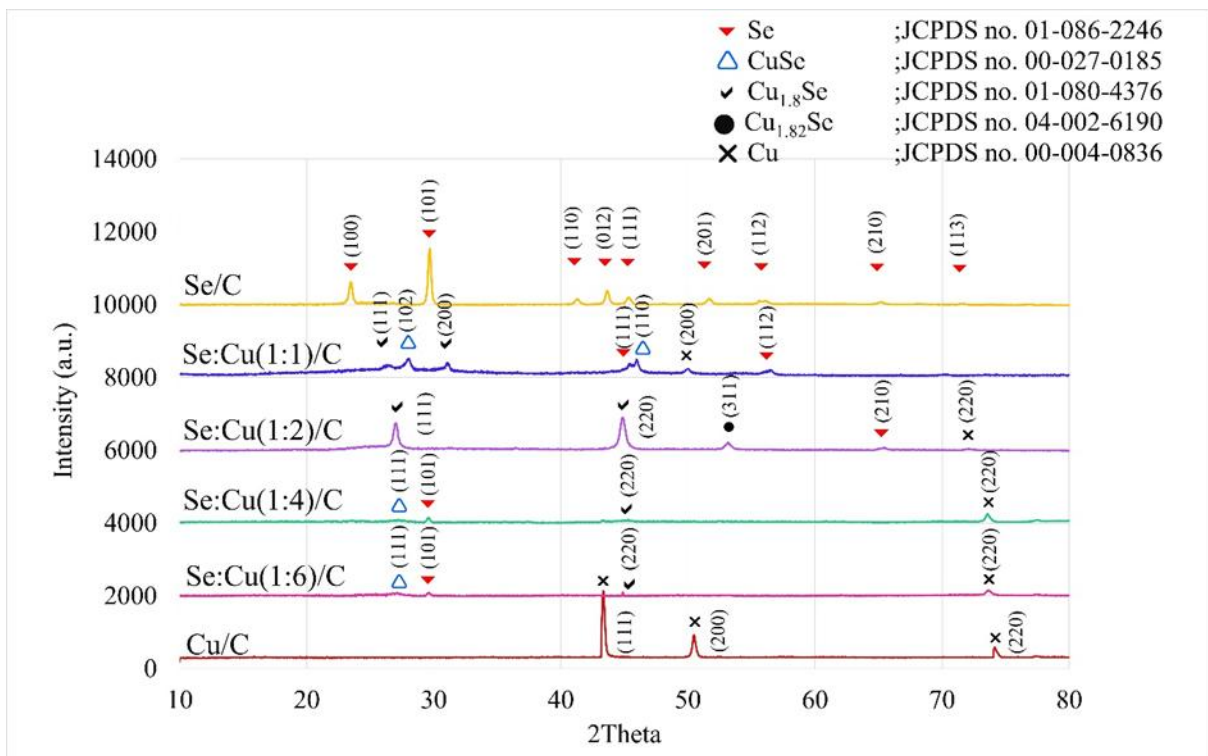
เทคนิค XRD ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ขึ้น โดยการระบุพิกที่เป็นลักษณะเฉพาะ (characteristic peaks) ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (lattice planes) ขององค์ประกอบแต่ละชนิดที่ปรากฏบนผิวหน้าตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ทำการวิเคราะห์เชิงลึกกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบเป็น Cu, Se และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบโลหะผสม (bimetallic) SeCu/C ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu ที่มีปริมาณต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.5 จากผล XRD พบว่า ลวดลายการเลี้ยวเบนของ Cu/C แสดงพิกที่เด่นชัดเฉพาะของทองแดงบริสุทธิ์ (pure copper) ซึ่งบ่งชี้ว่าการสังเคราะห์เฟส Cu ประสบความสำเร็จโดยไม่มีการปนเปื้อนของซิลิเนียมหรือเฟสอื่น ๆ ที่มีความสำคัญ พิกที่เป็นลักษณะเฉพาะของ Cu ปรากฏที่ค่า 2θ ประมาณ 43.32° , 50.46° และ 74.12° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (111), (200) และ (220) ของโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์หน้ากลาง (face-centered cubic, fcc) ของทองแดง พิกเหล่านี้ถูกระบุด้วยเครื่องหมายกากบาทสีดำ และสอดคล้องกับ JCPDS card no. 00-004-0836 ยืนยันธรรมชาติการตกผลึกของอนุภาคทองแดง ลวดลายการเลี้ยวเบนของ Se/C แสดงพิกเด่นชัดที่ค่า 2θ ประมาณ 23.6° , 29.8° , 41.1° , 43.7° , 45.3° , 50.4° , 55.1° , 61.7° และ 65.9° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (100), (101), (110), (102), (111), (201), (112), (210) และ (113) ของซิลิเนียม (Se) ตามลำดับ พิกเหล่านี้สอดคล้องกับเฟสทกเหลี่ยมของ Se โดยยืนยันด้วย JCPDS card no. 01-086-2246 และถูกระบุด้วยสามเหลี่ยมสีแดงในลวดลาย

จากการวิเคราะห์พิกของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบโลหะผสม SeCu พบว่าอัตราส่วน $\text{Se}:\text{Cu}$ ที่ 1:6, 1:4, 1:2 และ 1:1 ให้ลวดลายการเลี้ยวเบนที่แตกต่างกัน สำหรับ SeCu/C 1:6 พบพิกของ CuSe , Se, $\text{Cu}_{1.8}\text{Se}$ และ Cu ที่ค่า 2θ 27.14° , 29.58° , 44.88° และ 73.62° ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (111), (101), (220) และ (220) ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน SeCu/C 1:4 ก็ให้พิกที่ตำแหน่งเดียวกัน พิกของ CuSe และ $\text{Cu}_{1.8}\text{Se}$ ตรงกับ JCPDS card no. 00-027-0185 และ 01-080-4376

สำหรับ SeCu/C 1:2 พิกของ $\text{Cu}_{1.8}\text{Se}$ ปรากฏที่ 27.02° และ 44.88° (ระบุด้วยวงกลมสีดำ) ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (111) และ (220) นอกจากนี้ยังพบพิกของ $\text{Cu}_{1.82}\text{Se}$ ที่ 53.16° สอดคล้องกับระนาบ (311) พิกของ Se บริสุทธิ์ที่ 65.48° สอดคล้องกับระนาบ (210) และพิกของ Cu ที่ 74.68° สอดคล้องกับระนาบ (220) โดยพิกของ $\text{Cu}_{1.82}\text{Se}$ ตรงกับ JCPDS card no. 04-002-6190

ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu/C 1:1 มีลักษณะคล้ายกับ SeCu/C 1:2 โดยให้พีคที่ 28.04° , 31.10° , 45.36° , 45.96° , 49.98° และ 56.46° ซึ่งสอดคล้องกับ CuSe, Cu_{1.8}Se, Se, CuSe, Cu และ Se ตามลำดับ พีคเหล่านี้สอดคล้องกับระนาบผลึก (111), (102), (200), (111), (110) และ (112)

ผลจาก XRD ยังสามารถใช้ประมาณขนาดผลึก (crystallite size) ได้โดยใช้สมการ Scherrer (สมการที่ 3 ในบทที่ 2) ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 จากผลการคำนวณขนาดอนุภาค พบว่า CuSe และ Cu_{1.8}Se ในตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu/C 1:1 มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ ซึ่งบ่งชี้ว่าสัดส่วน Se:Cu ที่ 1:1 ช่วยให้เกิดโครงสร้างผลึกที่ละเอียดขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้สมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยาดีขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่มากขึ้นและการกระจายตัวของจุดออกฤทธิ์ที่ดีกว่า



รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu/C ที่มีอัตราส่วนโมลาร์ Se:Cu ต่างกัน โดยสัญลักษณ์ในภาพแทนเฟสต่าง ๆ ดังนี้: (r) Cu, (6) Se, (a) Cu_{1.8}Se, (n) Cu_{1.82}Se และ (è) CuSe ผลการทดสอบแสดงให้เห็นการเกิดเฟสผสมของ Cu, Se, CuSe และ Cu_{1.8}Se ซึ่งยืนยันการเกิดปฏิกิริยาและการก่อตัวของสารประกอบระหว่าง Se และ Cu ตามสัดส่วนที่สังเคราะห์

ตาราง 4.3 แสดงค่าขนาดผลึก (crystallite size) ของแต่ละเฟสที่คำนวณจากผล XRD โดยใช้สมการ Scherrer (สมการที่ 3 ในบทที่ 2) การคำนวณใช้การฟิตกราฟแบบ Gaussian ด้วยโปรแกรม Origin ผลลัพธ์แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu/C ที่มีอัตราส่วน Se:Cu = 1:1 มีขนาดผลึกของ CuSe และ Cu_{1.8}Se เล็กที่สุด

ซึ่งบ่งชี้ว่ามีการกระจายตัวของเฟสที่ดีและพื้นที่ผิวมากขึ้น
ปฏิกิริยา

ซึ่งมีแนวโน้มที่จะช่วยเพิ่มสมรรถนะของตัวเร่ง

Catalyst	Component in catalysts	Lattice	Crystallite size (nm.)
Cu/C	Cu	Cubic	28.57
SeCu(1:6)/C	CuSe	Cubic	6.12
	Se	Hexagonal	32.58
	Cu _{1.8} Se	Cubic	5.59
	Cu	Cubic	15.29
SeCu(1:4)/C	CuSe	Cubic	6.43
	Se	Hexagonal	33.43
	Cu _{1.8} Se	Cubic	5.29
	Cu	Cubic	21.69
SeCu(1:2)/C	Cu _{1.8} Se	Cubic	15.16
	Cu _{1.8} Se	Hexagonal	14.94
	Cu _{1.82} Se	Cubic	15.01
	Se	Cubic	19.41
	Cu	Cubic	32.10
SeCu(1:1)/C	Cu _{1.8} Se	Cubic	2.97
	CuSe	Cubic	17.27
	Cu _{1.8} Se	Cubic	15.89
	Se	Hexagonal	22.16
	CuSe	Cubic	7.88

Catalyst	Component in catalysts	Lattice	Crystallite size (nm.)
	Cu	Cubic	18.91
	Se	Hexagonal	12.06
Se/C	Se	Hexagonal	18.90

ตารางที่ 4.4 ขนาดผลึกที่คำนวณจากความกว้างครึ่งหนึ่งของพีค (FWHM) ของสัญญาณ XRD ด้วยสมการ Scherrer

Catalyst	Component in catalysts	Lattice	Crystallite size (nm.)
Cu/C	Cu	Cubic	26.10
SeCu(1:6)/C	CuSe	Cubic	9.97
	Se	Hexagonal	27.39
	Cu _{1.8} Se	Cubic	8.60
	Cu	Cubic	16.00
SeCu(1:4)/C	CuSe	Cubic	6.93
	Se	Hexagonal	25.68
	Cu _{1.8} Se	Cubic	4.73
	Cu	Cubic	19.83
SeCu(1:2)/C	Cu _{1.8} Se	Cubic	17.76
	Cu _{1.8} Se	Cubic	16.53
	Cu _{1.82} Se	Hexagonal	14.81
	Se	Hexagonal	15.23
	Cu	Cubic	24.98

Catalyst	Component in catalysts	Lattice	Crystallite size (nm.)
SeCu(1:1)/C	Cu _{1.8} Se	Cubic	2.32
	CuSe	Cubic	6.94
	Cu _{1.8} Se	Cubic	5.73
	Se	Hexagonal	11.04
	CuSe	Cubic	12.69
	Cu	Cubic	10.19
	Se	Hexagonal	7.39
Se/C	Se	Hexagonal	19.59

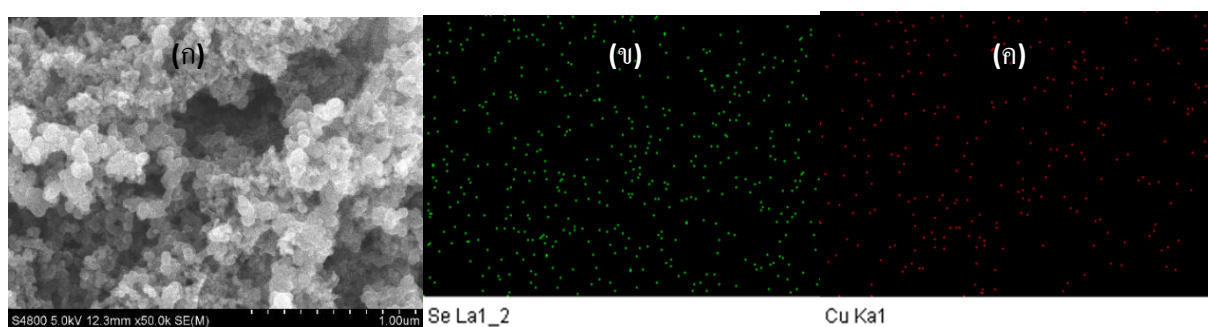
4.1.3 SEM-EDX

SEM-EDX ถูกใช้ในการหาปริมาณการบรรจุโลหะ (metal loading) และการกระจายตัวของโลหะบนผิวคาร์บอน ผลการวิเคราะห์ SEM-EDX แสดงการกระจายตัวของธาตุที่ไม่ใช่โลหะและโลหะ โดยเฉพาะ Se และ Cu ดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสม (bimetallic catalysts) มีการกระจายตัวบนพื้นผิวอย่างสม่ำเสมอ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7: (a) ภาพจาก SEM และ (b) และ (c) ภาพจาก EDX สำหรับข้อมูลที่เหลือ สามารถดูได้ในภาคผนวก F

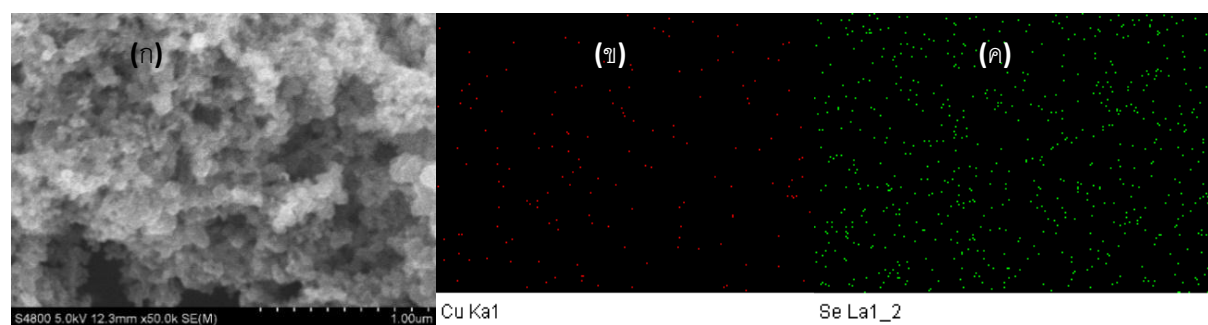
ตารางที่ 4.5 ผลเฉลี่ยของการวิเคราะห์ SEM-EDX ของ SeCu ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ทั้งในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นตัวอย่างใหม่ (fresh catalysts) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้ว (used catalysts)

Catalyst	Intensity		Analyzed Weight (%)		Intended weight (%)		Weight (%) error	
	Se	Cu	Se	Cu	Se	Cu	Se	Cu
SeCu (1:6)/C (Fresh)	0.32	1.02	27.14	72.86	17.16	82.84	58.16	12.05
SeCu (1:6)/C (Used)	0.39	1.03	36.44	63.56	43.64	56.34	16.50	12.82
SeCu (1:4)/C	0.33	1.02	21.35	78.65	23.70	76.30	9.93	3.09

(fresh)								
SeCu (1:4)/C (Used)	0.29	1.01	15.78	84.22	23.70	76.30	33.43	10.39
SeCu (1:2)/C (Fresh)	0.38	1.02	39.26	60.74	38.32	61.68	2.45	1.52
SeCu (1:2)/C (Used)	0.26	1.00	33.26	66.75	38.32	61.68	13.22	8.22
SeCu (1:1)/C (Fresh)	0.43	1.03	61.84	38.16	55.41	44.59	11.60	14.42
SeCu (1:1)/C (Used)	0.32	1.02	25.40	74.60	55.41	44.59	54.16	67.31



รูปที่ 4.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:2)/C บน Vulcan carbon (ก) ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา (ข) แผนที่การกระจายธาตุของ Cu จากการวิเคราะห์ EDX (ค) แผนที่การกระจายธาตุของ Se จากการวิเคราะห์ EDX



รูปที่ 4.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:6)/C บน Vulcan carbon (ก) ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา (ข) แผนที่การกระจายธาตุของ Cu จากการวิเคราะห์ EDX (ค) แผนที่การกระจายธาตุของ Se จากการวิเคราะห์ EDX

อัตราส่วนโมลของโลหะถูกแทนด้วยอัตราส่วนเชิงอะตอม (atomic ratio) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากร้อยละอะตอม (atomic percentage) ผลลัพธ์ของอัตราส่วนเชิงอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากกระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ ได้มีการตรวจสอบตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการใช้งานเพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการบรรจุโลหะ (catalyst loading process) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดในการตรวจสอบ ไม่สามารถตรวจสอบชิ้นงานเดียวกันได้ จึงอาจทำให้ค่าที่แสดงในตารางมีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ผลลัพธ์โดยรวมชี้ให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการใช้งานยังคงมีอยู่และกระจายตัวอย่างสมบูรณ์

4.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา CO₂RR

ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยา CO₂RR บนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ได้รับการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Gas Chromatography (GC) สำหรับผลิตภัณฑ์แก๊ส และ High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) สำหรับผลิตภัณฑ์ของเหลว

4.2.1 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่อง Gas Chromatography โดยควบคุมอุณหภูมิของเครื่อง GC ให้อยู่ในช่วง 80 – 180 °C ใช้เครื่องตรวจจับแบบ Thermal Conductivity Detector (TCD) ร่วมกับคอลัมน์ Unibeads-C ความยาว 2.0 เมตร เพื่อทำการวัดปริมาณไฮโดรเจน (H₂), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), มีเทน (CH₄) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

ชุดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ประกอบด้วย Cu/C, SeCu(1:1)/C, SeCu(1:2)/C, SeCu(1:4)/C และ SeCu(1:6)/C โดยมีปริมาณโลหะบรรจุอยู่ที่ 20%wt บนคาร์บอน ใช้สารละลายโซเดียมโบรไมด์ 0.5 M เป็นอิเล็กโทรไลต์ และใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ -0.9 V ถึง -1.5 V เทียบกับอิเล็กโทรด Hg/HgCl (ในสารละลาย NaCl อิ่มตัว) ทำปฏิกิริยานาน 2 ชั่วโมง เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสิ้นจึงเก็บผลิตภัณฑ์แก๊สลงในถุงเก็บก๊าซ (gas bag) และนำไปฉีดเข้าระบบ GC เพื่อเปรียบเทียบกับก๊าซไฮโดรเจนและส่วนผสมก๊าซมาตรฐาน

เวลาการกัก (Retention time) ของแก๊สแต่ละชนิดรายงานในตารางที่ 4.6 หลังจากนั้นทำการฉีดตัวอย่างผลิตภัณฑ์ปริมาตร 1 mL เข้าไปในเครื่อง GC และผลลัพธ์ที่ได้ (ตารางที่ 4.7) ถูกใช้คำนวณปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซอื่น ๆ ในผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเพื่อนำไปใช้คำนวณประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic Efficiency) และอัตราการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Conversion)

ตารางที่ 4.6 เวลาพัก (Retention time) ของแก๊สไฮโดรเจนและส่วนผสมก๊าซมาตรฐาน

Standard	Retention time (min)
Hydrogen (H ₂)	0.924
Air	2.189
	2.303
Carbon monoxide (CO)	3.004
Methane (CH ₄)	3.117
Carbon dioxide (CO ₂)	9.458
Acetylene (C ₂ H ₂)	13.194
Ethylene (C ₂ H ₄)	16.138
Ethane (C ₂ H ₆)	19.588

ตารางที่ 4.7 ผลิตรัณท์ก๊าซจากปฏิกิริยา CO₂RR ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se

catalyst	Potential	Volume of gas (ml)		% Faradaic efficiency	
	Volts	H ₂	CO	H ₂	CO
Cu/C	-0.9	-	-	-	-
	-1.1	0.012	0.02	0.29	0.48
	-1.3	0.098	0.044	2.16	0.96
	-1.5	0.415	0.281	6.26	4.24
SeCu(1:1)/C	-0.9	-	-	-	-
	-1.1	-	-	-	-
	-1.3	-	-	-	-
	-1.5	0.107	-	4.41	-
SeCu(1:2)/C	-0.9	-	-	-	-
	-1.1	0.008	-	0.25229	-

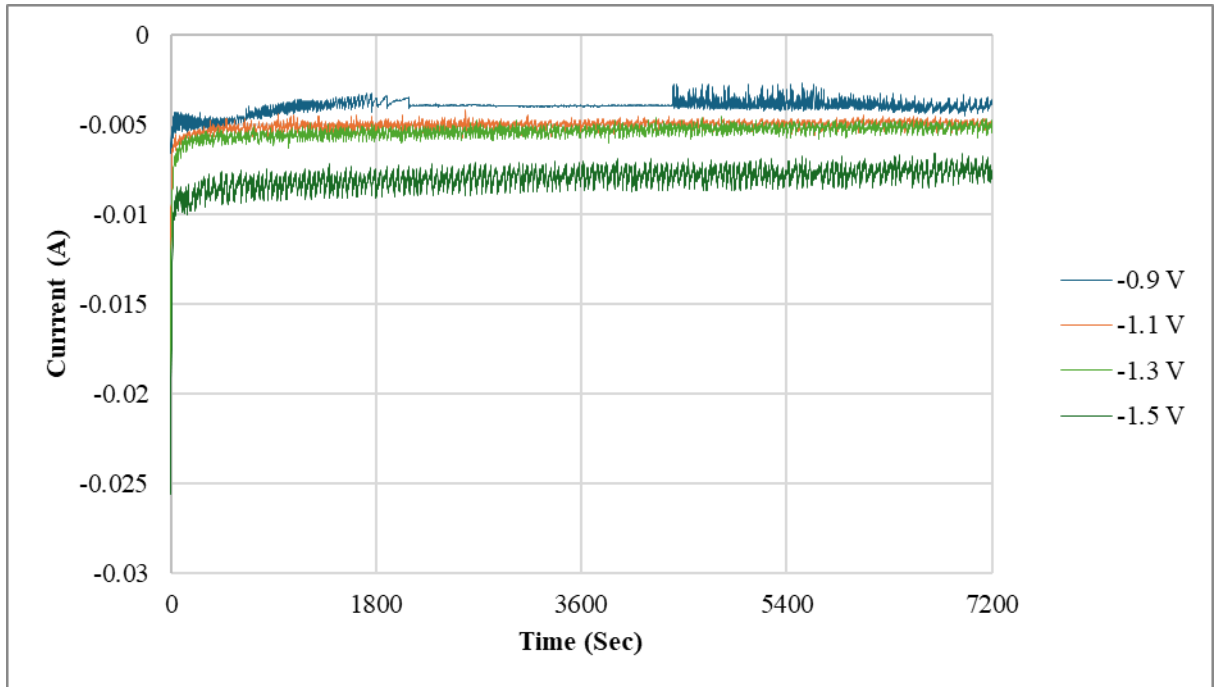
	-1.3	0.094	-	2.35261	-
	-1.5	0.222	-	8.08241	-
SeCu(1:4)/C	-0.9	-	-	-	-
	-1.1	-	-	-	-
	-1.3	0.131	-	2.96	-
	-1.5	0.432	0.024	8.94	0.5
SeCu(1:6)/C	-0.9	-	-	-	-
	-1.1	-	-	-	-
	-1.3	0.077	-	2.09	-
	-1.5	0.1	-	12.17	-

จากผลผลิตก๊าซที่ได้บนตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C พบว่ามีฟิคปรากฏ 2 จุดที่เวลา 0.920 นาที และ 3.008 นาที ซึ่งเป็นก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ตามลำดับ จากนั้นทำการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟฟิคเพื่อหาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนได้ 0.012 ml, 0.098 ml และ 0.415 ml หรือคิดเป็นประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ที่ 0.29 %, 2.16 % และ 6.26 % ที่ศักย์ไฟฟ้า -1.1 V, -1.3 V และ -1.5 V ตามลำดับ ปริมาตรของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ -1.1 V, -1.3 V และ -1.5 V มีค่า 0.020 ml, 0.044 ml และ 0.281 ml ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพฟาราเดอิก 0.48 %, 0.96 % และ 4.24 %

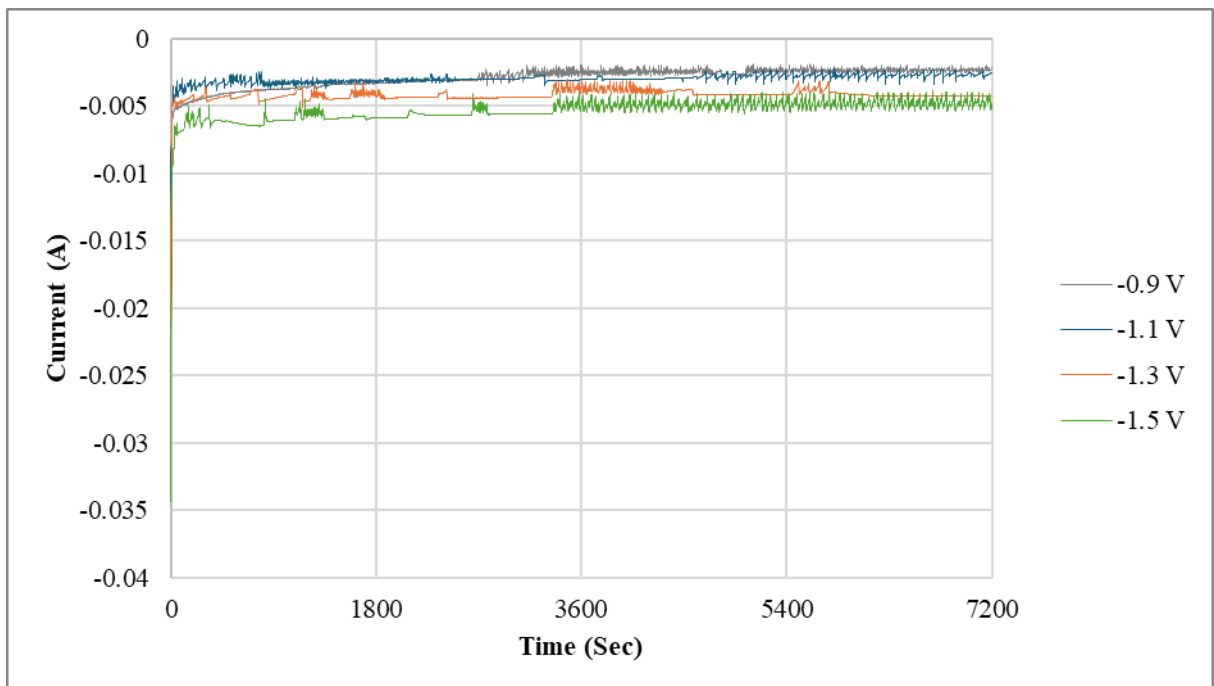
เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C พบการเกิดไฮโดรเจนที่ศักย์ -1.5 V โดยปริมาตรไฮโดรเจนในผลผลิตก๊าซเท่ากับ 0.107 ml และมีประสิทธิภาพฟาราเดอิก 2.41 % สำหรับปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:2)/C พบเฉพาะฟิคของไฮโดรเจน โดยปริมาตรไฮโดรเจนในผลผลิตก๊าซเท่ากับ 0.008 ml, 0.094 ml และ 0.222 ml และมีประสิทธิภาพฟาราเดอิก 0.25 %, 2.35 % และ 4.08 % ที่ศักย์ไฟฟ้า -1.1 V, -1.3 V และ -1.5 V ตามลำดับ

สำหรับปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:4)/C พบฟิคของไฮโดรเจนที่ศักย์ -1.3 V และ -1.5 V โดยปริมาตรไฮโดรเจนเท่ากับ 0.131 ml และ 0.432 ml และมีประสิทธิภาพฟาราเดอิก 2.96 % และ 8.94 % ตามลำดับ ฟิคของคาร์บอนมอนอกไซด์ปรากฏที่ศักย์ -1.5 V โดยปริมาตรของคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 0.024 ml และประสิทธิภาพฟาราเดอิก 0.50 %

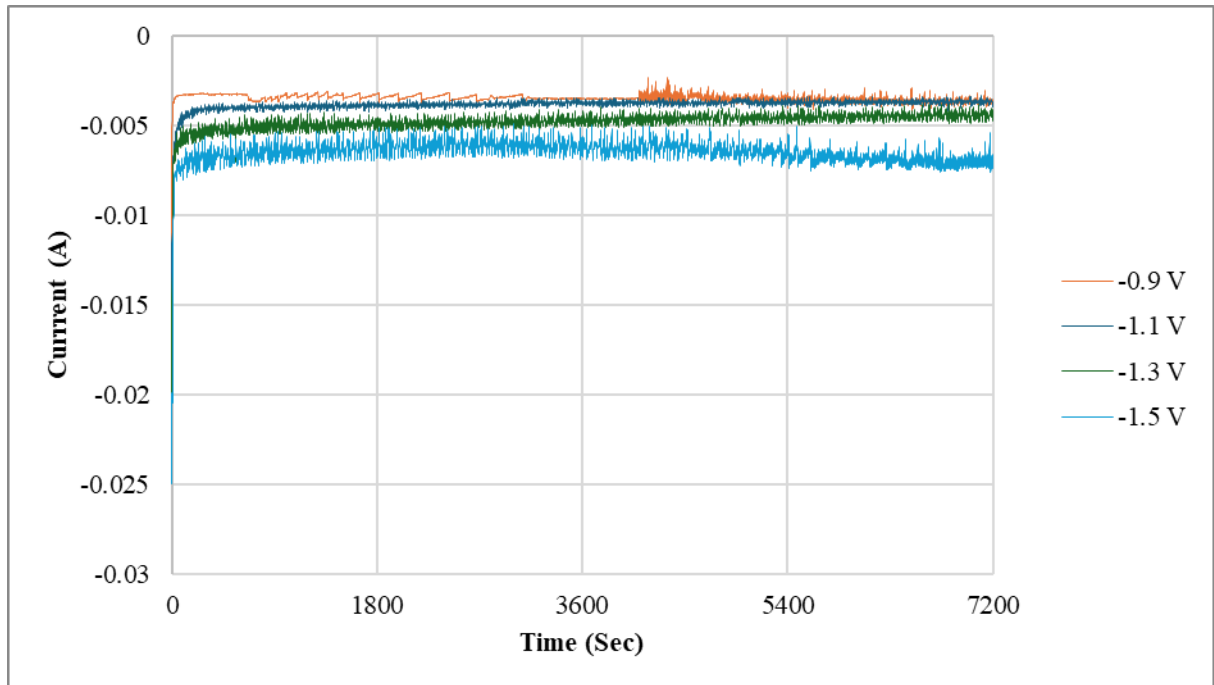
สำหรับปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:6)/C พบเฉพาะฟิคของไฮโดรเจน โดยปริมาตรไฮโดรเจนเท่ากับ 0.077 ml และ 0.100 ml ในผลผลิตก๊าซ และมีประสิทธิภาพฟาราเดอิก 2.09 % และ 2.17 % ที่ศักย์ไฟฟ้า -1.3 V และ -1.5 V ตามลำดับ



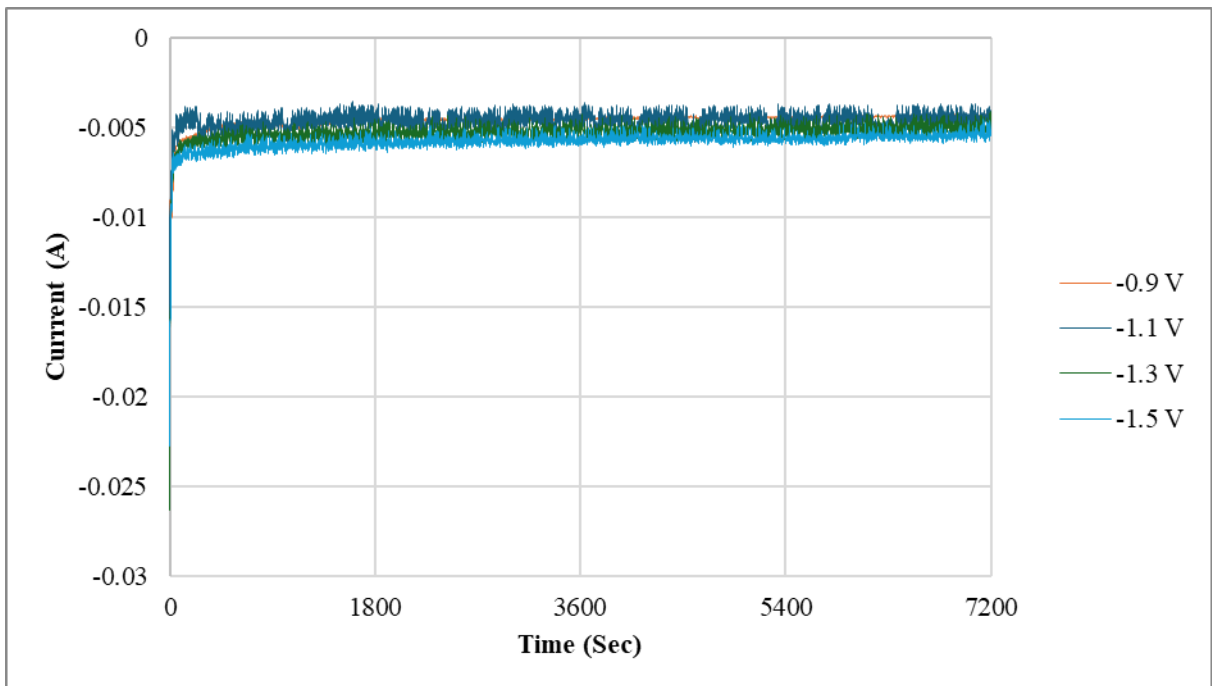
รูปที่ 4.8 กราฟโครโนโพเทนทีโอสแตติก (Chronopotentiostatic curve) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaHCO₃ ความเข้มข้น 0.5 M



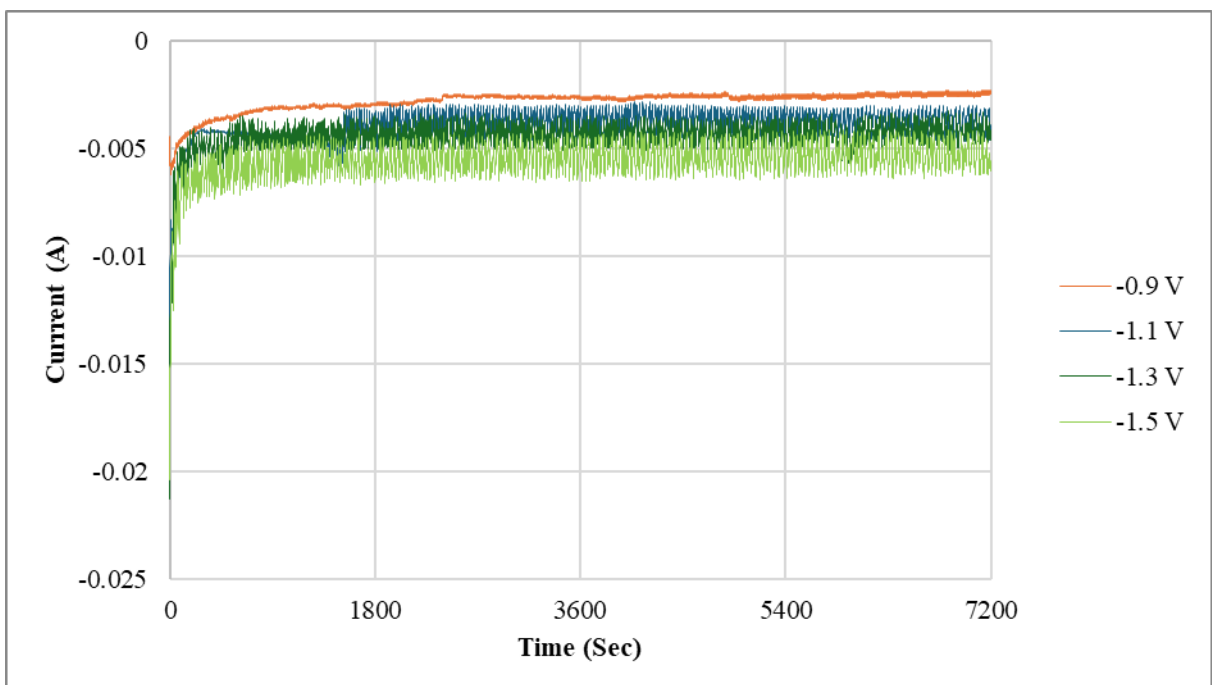
รูปที่ 4.9 กราฟโครโนโพเทนทีโอสแตติก (Chronopotentiostatic curve) ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.5 M



รูปที่ 4.10 กราฟโครโนโพเทนทีโอสแตติก (Chronopotentiostatic curve) ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:2)/C ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.5 M



รูปที่ 4.11 กราฟโครโนโพเทนทีโอสแตติก (Chronopotentiostatic curve) ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:4)/C ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.5 M



รูปที่ 4.12 กราฟโครโนโพเทนทีโอสแตติก (Chronopotentiostatic curve) ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:6)/C ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.5 M

รูปที่ 4.8 - 4.12 แสดงกราฟ Chronopotentiostatic ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำโดยการจ่ายกระแสคงที่ให้กับอิเล็กโทรด (ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C, SeCu(1:6)/C, SeCu(1:4)/C, SeCu(1:2)/C และ SeCu(1:1)/C) และทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า) ที่เกิดขึ้นตามเวลา เทคนิคนี้ใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเฉพาะความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่ควบคุมกระแสคงที่

ตารางที่ 4.8 แสดงค่ากระแสสูงสุด (Maximum current) ที่วัดได้ในแต่ละศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละอัตราส่วน

Catalyst	Potential (V)	Current (mA)
Cu/C	-0.9	-2.71
	-1.1	-4.22
	-1.3	-4.57
	-1.5	-6.61
SeCu(1:6)/C	-0.9	-2.28
	-1.1	-2.82
	-1.3	-3.27
	-1.5	-4.06
SeCu(1:4)/C	-0.9	-4.28
	-1.1	-3.57
	-1.3	-4.12
	-1.5	-4.57
SeCu(1:2)/C	-0.9	-2.31
	-1.1	-3.35
	-1.3	-3.06
	-1.5	-4.93

Catalyst	Potential (V)	Current (mA)
SeCu(1:1)/C	-0.9	-1.85
	-1.1	-2.15
	-1.3	-3.06
	-1.5	-3.90

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด (Maximum current density) ที่สังเกตได้สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละอัตราส่วนจากรูปที่ 4.19 – 4.23 ภายใต้ศักย์ไฟฟ้าที่กำหนดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ข้อมูลนี้สะท้อนให้เห็นถึงสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน และช่วยให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการประยุกต์ใช้งานในอนาคต

ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.9 V พบว่าความหนาแน่นกระแสของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C เท่ากับ -2.71 mA ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C มีความหนาแน่นกระแสเพียง -1.85 mA การเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นว่าการเติมซีลีเนียมลงในสูตรตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสลดลงภายใต้สภาวะไฟฟ้าเคมีเดียวกัน การลดลงของกระแสนี้บ่งบอกว่าการเติมซีลีเนียมส่งผลต่อสมบัติการเร่งปฏิกิริยาของทองแดง อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของโลหะผสม (alloy composition) โครงสร้างผิว (surface structure) และสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ (electronic properties) ของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งล้วนมีผลต่อประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ศักย์ไฟฟ้า -0.9 V

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว

ตารางที่ 4.9 เวลาพัก (Retention time) ที่ปรากฏของสารละลายมาตรฐาน

Components	Retention time (min)
Oxalic acid	8.368
Formic acid	18.5
Acetic acid	20.112
Methanol	24.4

จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากปฏิกิริยาการรีดักชันบนตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C, SeCu(1:6)/C, SeCu(1:4)/C, SeCu(1:2)/C และ SeCu(1:1)/C ภายใต้ศักย์ไฟฟ้า -0.9 V, -1.1 V, -1.3 V และ -1.5 V เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวแสดงใน ตารางที่ 4.10 พบว่า SeCu(1:1)/C ให้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์สูงที่สุดในการเปลี่ยน CO₂ โดย CO₂ ถูกเปลี่ยนเป็นเมทานอลได้ดีที่สุดที่ศักย์ -1.3 V และให้ความเข้มข้นเมทานอล 80.29 นอกจากนี้ พบว่า SeCu(1:6)/C เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสำหรับการเปลี่ยน CO₂ เป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่ กรดฟอร์มิกที่ศักย์ -1.1 V และกรดอะซิติกที่ศักย์ -1.3 V ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดทั้งสองกรณี

จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า SeCu(1:1)/C เหมาะสมสำหรับการผลิตเมทานอลที่ศักย์ -1.3 V ในขณะที่ SeCu(1:6)/C เหมาะสมสำหรับการผลิตกรดอะซิติกที่ศักย์ -1.3 V

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ของผลิตภัณฑ์เหลว

Catalyst	Potential	%Faradaic efficiency			Total
	(V vs RHE)	Formic acid	Acetic acid	Methanol	
Cu/C	-0.9	0.00	0.00	0.00	0.00
	-1.1	14.63	0.00	0.00	14.63
	-1.3	17.78	0.00	0.00	17.78
	-1.5	20.48	31.82	0.00	52.30
SeCu(1:6)/C	-0.9	9.81	79.40	10.79	100.00
	-1.1	7.00	71.98	9.15	88.14
	-1.3	7.77	72.26	9.14	89.17
	-1.5	11.77	60.42	6.34	78.53
SeCu(1:4)/C	-0.9	0.00	0.00	0.00	0.00
	-1.1	10.21	88.26	0.00	98.47
	-1.3	17.07	0.00	35.99	53.06
	-1.5	13.72	0.00	38.32	52.05
SeCu(1:2)/C	-0.9	0.00	73.27	0.00	73.27
	-1.1	0.00	34.86	60.08	94.93

	-1.3	0.00	69.98	11.79	81.77
	-1.5	3.55	56.06	6.64	66.25
SeCu(1:1)/C	-0.9	38.81	0.00	33.71	72.52
	-1.1	0.00	0.00	51.08	51.08
	-1.3	0.00	0.00	80.29	80.29
	-1.5	0.00	0.00	76.85	76.85

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency: FE) ของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ โดยพบว่า SeCu(1:6)/C ให้ค่า FE สูงสุดที่ 94.82% ที่ศักย์ไฟฟ้า -1.5 V ซึ่งประกอบด้วยผลิตภัณฑ์หลักคือ กรดฟอร์มิก 28.22% และกรดอะซิติก 64.43% แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:6)/C มีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยน CO₂ ให้เป็นสารเคมีที่ต้องการ

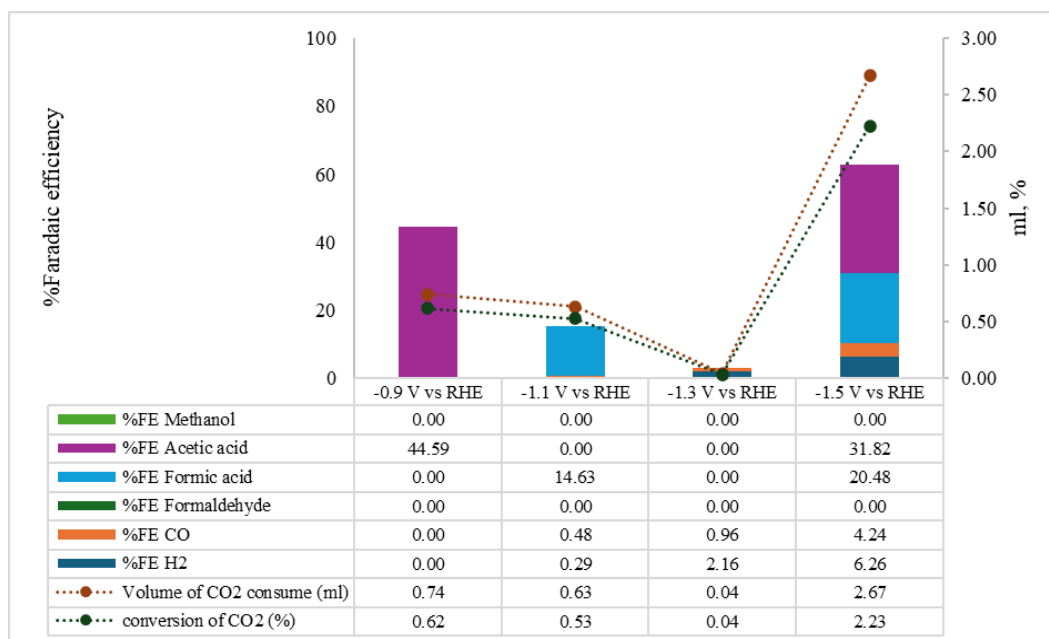
ที่ศักย์ไฟฟ้า -1.3 V ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C ให้ค่า FE เท่ากับ 80.29% โดยได้ผลิตภัณฑ์เพียงชนิดเดียวคือเมทานอล จากผลลัพธ์สามารถสรุปได้ว่า สัดส่วนของ Se และ Cu ในตัวเร่งปฏิกิริยามีผลอย่างมากต่อชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดย SeCu(1:6)/C มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการผลิตกรดอินทรีย์ (formic acid และ acetic acid) ขณะที่ SeCu(1:1)/C เหมาะสมสำหรับการผลิตเมทานอล ดังนั้น การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาให้เหมาะสมกับการผลิตสารเฉพาะชนิดถือเป็นประเด็นสำคัญที่ควรเน้นในการวิจัยในอนาคต

4.2.3 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic Efficiency: FE)

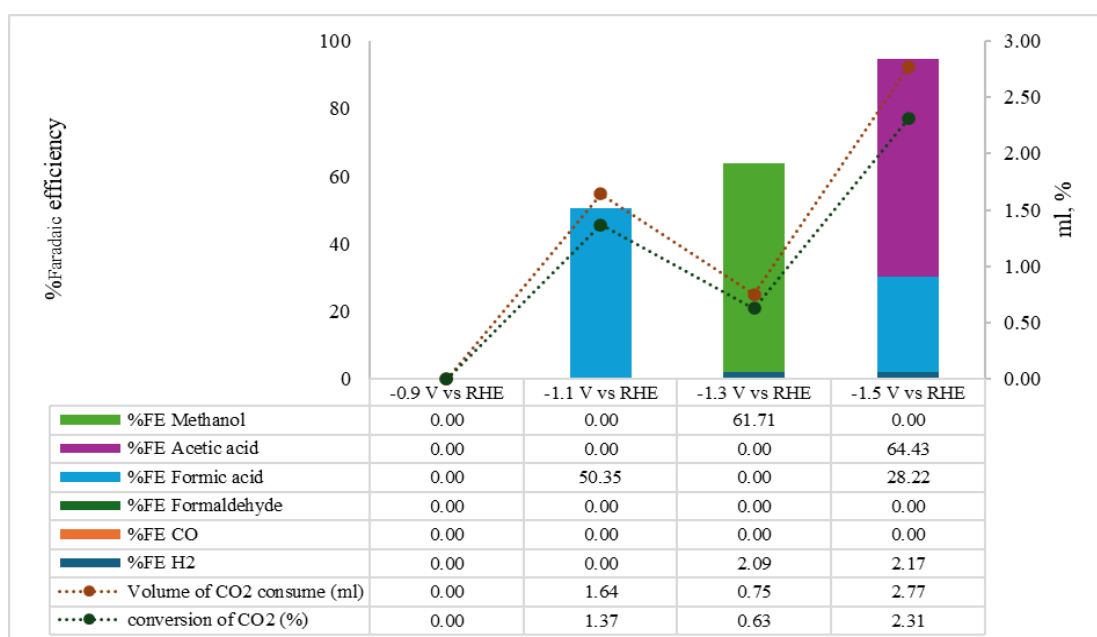
ตารางที่ 4.11 และ รูปที่ 4.13 – 4.17 แสดงค่าร้อยละของประสิทธิภาพฟาราเดอิก (%FE) ของผลิตภัณฑ์ทั้งในสถานะแก๊สและของเหลว ได้แก่ H₂, CO, กรดฟอร์มิก, กรดอะซิติก และเมทานอล

Catalyst	Potential (V vs RHE)	%Faradaic efficiency					Total
		H ₂	CO	Formic acid	Acetic acid	Methanol	
Cu/C	-0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-1.1	0.29	0.48	14.63	0.00	0.00	15.40
	-1.3	2.16	0.96	0.00	0.00	0.00	3.12

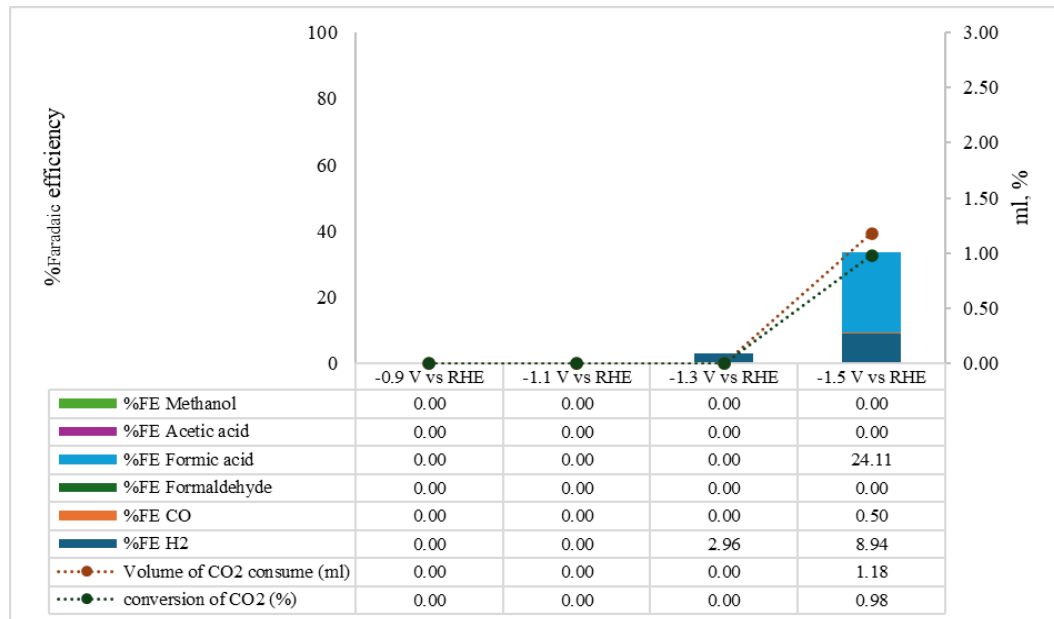
Catalyst	Potential (V vs RHE)	%Faradaic efficiency					Total
		H ₂	CO	Formic acid	Acetic acid	Methanol	
	-1.5	6.26	4.24	20.48	31.82	0.00	62.80
SeCu(1:6)/ C	-0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-1.1	0.00	0.00	50.35	0.00	0.00	50.35
	-1.3	2.09	0.00	0.00	0.00	61.71	63.80
	-1.5	2.17	0.00	28.22	64.43	0.00	94.82
SeCu(1:4)/ C	-0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-1.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-1.3	2.96	0.00	0.00	0.00	0.00	2.96
	-1.5	8.94	0.50	24.11	0.00	0.00	33.56
SeCu(1:2)/ C	-0.9	0.00	0.00	0.00	62.14	0.00	62.14
	-1.1	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
	-1.3	2.35	0.00	0.00	0.00	0.00	2.35
	-1.5	4.08	0.00	0.00	25.11	0.00	29.20
SeCu(1:1)/ C	-0.9	0.00	0.00	38.81	0.00	33.71	72.52
	-1.1	0.00	0.00	0.00	0.00	51.08	51.08
	-1.3	0.00	0.00	0.00	0.00	90.29	90.29
	-1.5	2.41	0.00	0.00	0.00	86.85	89.26



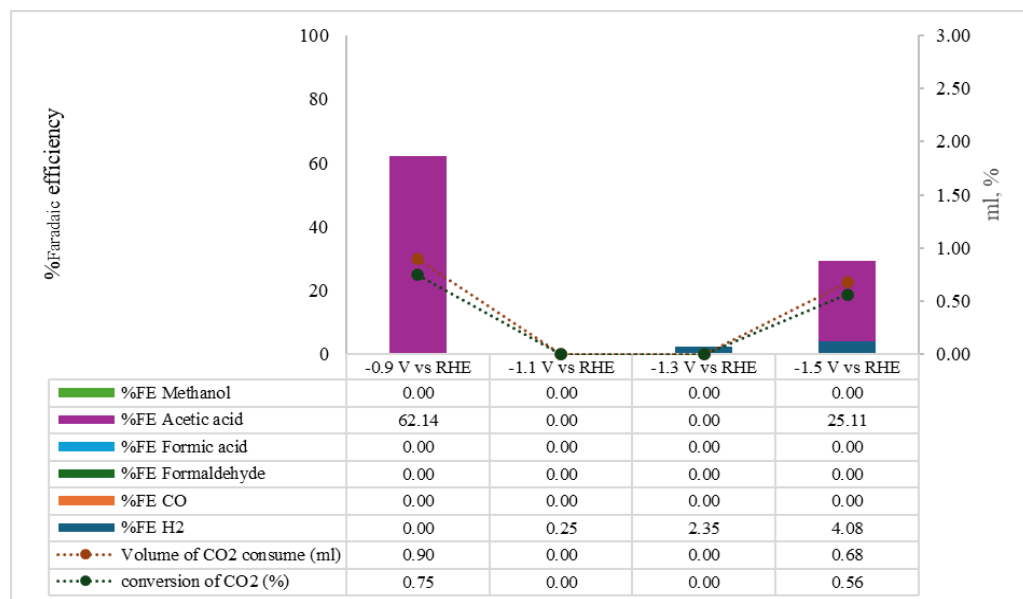
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ปริมาตรของ CO₂ ที่ถูกใช้ไป และเปอร์เซ็นต์การ



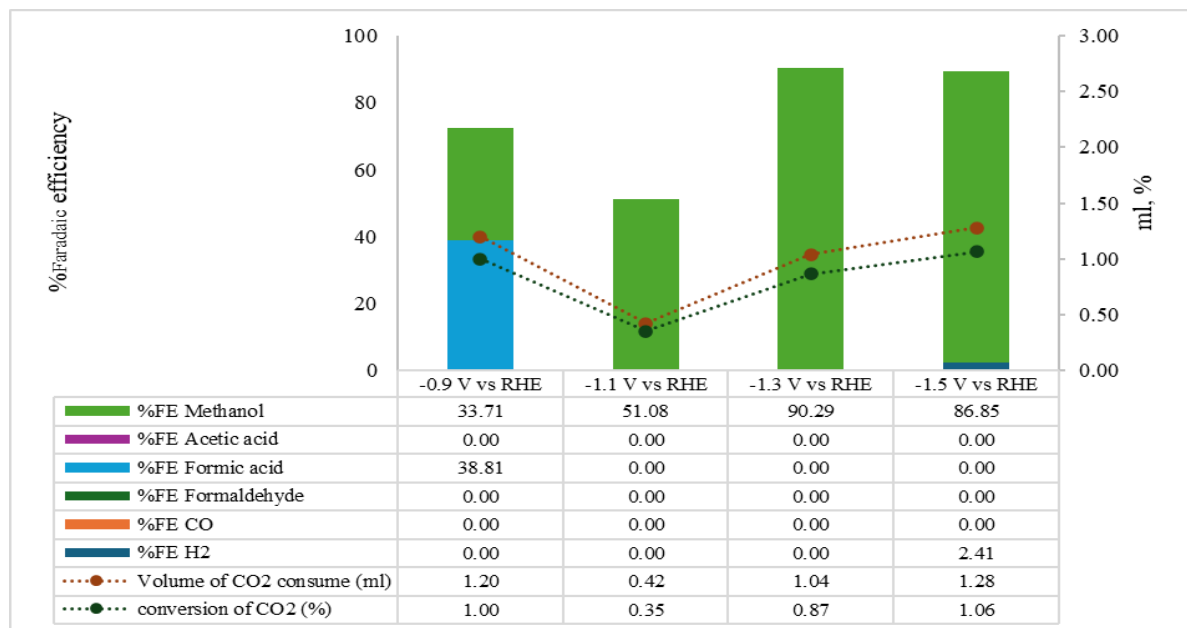
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ปริมาตรของ CO₂ ที่ถูกใช้ไป และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง (conversion) ของ CO₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:6)/C ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆเปลี่ยนแปลง (conversion) ของ CO₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C ที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ปริมาตรของ CO₂ ที่ถูกใช้ไป และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน (conversion) ของ CO₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:4)/C ที่ศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ปริมาตรของ CO₂ ที่ถูกใช้ไป และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน (conversion) ของ CO₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:2)/C ที่ศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพฟาราเดอิก (Faradaic efficiency) ปริมาตรของ CO₂ ที่ถูกใช้ไป และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน (conversion) ของ CO₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C ที่ศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาประสิทธิภาพฟาราเดอิก (%FE) ของผลิตภัณฑ์แก๊สและของเหลวที่เกิดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu ที่มีอัตราส่วน Se:Cu แตกต่างกันไปพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:6)/C ที่ศักย์ -1.3 V ให้ค่า %FE สูงสุด 94.82% โดยให้ผลิตภัณฑ์เป็น H₂ 2.17%, กรดฟอร์มิก 28.22% และกรดอะซิติก 64.43% โดยไม่พบการเกิด CO และเมทานอล ในขณะที่ ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C ที่ศักย์ -1.3 V ให้ค่า FE เท่ากับ 90.29% โดยให้เมทานอลเพียงชนิดเดียวโดยไม่มีปฏิกิริยาข้างเคียง ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณ Se ในอัตราส่วน Cu:Se ไปที่ 1:1 ช่วยส่งเสริมการเกิดเมทานอลแบบเลือกจำเพาะ (selective methanol formation) ดังนั้น SeCu(1:6)/C เหมาะสมสำหรับการผลิตกรดอินทรีย์ (กรดอะซิติกและกรดฟอร์มิก) ในขณะที่ SeCu(1:1)/C เหมาะสมสำหรับการผลิตเมทานอลแบบจำเพาะ ซึ่งให้ข้อมูลเชิงลึกในการปรับปรุงการออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเฉพาะทาง

4.2.4 การบริโภคคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Consumption)

ตารางที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13–4.17 แสดงผลการบริโภคคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ consumption) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการ CO₂RR (Carbon Dioxide Reduction Reaction) ที่ศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน (-0.9, -1.1, -1.3 และ -1.5 V เทียบกับ RHE) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C, SeCu(1:6)/C, SeCu(1:4)/C, SeCu(1:2)/C และ SeCu(1:1)/C

ผลการทดลองแสดงว่า Cu/C ให้ประสิทธิภาพสูงสุดของปฏิกิริยา CO₂RR ที่ศักย์ -1.5 V โดยมีการเปลี่ยน CO₂ เท่ากับ 2.23% สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu/C ที่มีอัตราส่วนต่างกัน พบว่า SeCu(1:1)/C ให้ค่าการเปลี่ยน

CO₂ สูงสุด 2.31% ที่ศักย์ -1.5 V ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปฏิกิริยา CO₂RR ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จากผลการทดลอง ศักย์ -1.5 V ถือเป็นศักย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดที่ทดสอบในตารางนี้

การเลือกค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมมีความสำคัญ เนื่องจากถ้าใช้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินไป จะทำให้ของเหลวที่เป็นผลิตภัณฑ์บางส่วนเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแก๊สมากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ในปริมาณมากขึ้นและลดปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ต้องการ ดังนั้น ในการทำปฏิกิริยารีดักชันทางไฟฟ้าเคมีบนตัวเร่งปฏิกิริยา ควรเลือกค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบที่ต้องการและมีประสิทธิภาพสูงสุด

ตารางที่ 4.12 ปริมาณการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ consumption) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา CO₂RR โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ภายใต้ศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

Catalyst	Potential (V vs RHE)	Conversion of CO ₂ (%)
Cu/C	-0.9	0
	-1.1	0.53
	-1.3	0.04
	-1.5	2.23
SeCu(1:6)/C	-0.9	0
	-1.1	1.37
	-1.3	0.63
	-1.5	2.31
SeCu(1:4)/C	-0.9	0
	-1.1	0
	-1.3	0
	-1.5	0.98
SeCu(1:2)/C	-0.9	0
	-1.1	0
	-1.3	0
	-1.5	0.56
SeCu(1:1)/C	-0.9	1.00
	-1.1	0.35
	-1.3	0.87
	-1.5	1.06

4.2.5 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจาก CO₂RR

ตารางที่ 4.1.4 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม กรณีศึกษาพื้นฐานการผลิตกรดอะซิติก จาก CO₂RR

Impact category	Unit	Total	Synthesis catalyst	Prepared Cell Cathode	CO ₂ RR Operation	Product Separation
Abiotic depletion	kg Sb eq	17.31	0.02	1.19	15.87	0.24
Acidification	kg SO ₂ eq	27.38	0.01	0.35	26.95	0.08
Eutrophication	kg PO ₄ --- eq	7.65	0.00	0.08	7.56	0.01
Global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	2494.13	1.18	85.35	2379.73	27.88
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	8367.04	4.55	71.54	8285.56	5.40
Freshwater aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	3244.83	1.85	31.45	3208.59	2.94
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	4585370.92	2308.90	49276.40	4527469.49	6316.14
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	27.59	0.01	0.15	27.42	0.01
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄ eq	0.90	0.00	0.08	0.82	0.00

จากผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม กรณีศึกษาพื้นฐานการผลิตกรดอะซิติก จาก CO₂RR กระบวนการพื้นฐาน ดังตารางที่ 4.1.4 พบว่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมทางน้ำ Freshwater aquatic ecotoxicity และ Marine aquatic ecotoxicity มากที่สุด 4,585 ton 1,4-DBeq. และ 3.2 ton 1,4-DBeq อันเนื่องมาจากการกระบวนการอิเล็กโตรเคมีคลอรีนดักจับของคาร์บอนไดออกไซด์ จากการเหลือทิ้งของ NaHCO₃ เป็นสารอิเล็กโตรไลต์ในการทำให้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ความเป็นพิษต่อมนุษย์ อันเนื่องมาจากการเหลือก๊าซ CO₂ และ hydrogen ในบรรยากาศ ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ (Human toxicity) ค่าผลกระทบจากสภาวะโลกร้อน (Global warming (GWP100)) ยังคงสูงอยู่เนื่องมาจากในกรณีพื้นฐานยังไม่มีให้นำ CO₂ ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยามาใช้ใหม่ต่อในกระบวนการ หากนำสารละลายเกลือซึ่งเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาที่เหลือสามารถเข้าสู่กระบวนการอีกครั้งได้ โดยตั้งสมมติฐานว่าร้อยละ 20 ของสารอิเล็กโตรไลต์สูญหายหรือหลุดออกจากกระบวนการ จะพบผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่ประเมินใหม่ ดังตารางที่ 4.1.5

ตารางที่ 4.1.5 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมกรณีศึกษาการผลิตอะซิติก จาก CO₂RR โดยมีการนำสารอิเล็กโทรไลต์กลับมาใช้ใหม่

Impact category	Unit	Total	Synthesis catalyst	Prepared Cell Cathod	CO ₂ RR Operation	Product Separation
Abiotic depletion	kg Sb eq	7.55	0.31	1.19	6.05	0.00024
Acidification	kg SO ₂ eq	10.80	0.19	0.35	10.27	0.00008
Eutrophication	kg PO ₄ --- eq	3.00	0.04	0.08	2.88	0.00002
Global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	1017.12	24.06	85.35	907.68	0.02792
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00000
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	3321.22	93.06	71.54	3156.62	0.00540
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	1291.70	37.81	31.45	1222.44	0.00294
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1821542.96	47256.22	49276.40	1725004.01	6.32486
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	10.78	0.18	0.15	10.44	0.00001
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄ eq	0.41	0.02	0.08	0.31	0.00000

ผลการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) จากตารางที่ 4.1.4 และ 4.1.5 แสดงให้เห็นว่าการนำสารอิเล็กโทรไลต์กลับมาใช้ใหม่ ผลกระทบสิ่งแวดล้อมลดลงอย่างมากในทุกหมวด โดยเฉพาะ Global Warming ลดลงจาก 2494.13 → 1017.12 kg CO₂ eq (~59%) และ Human Toxicity ลดลงจาก 8367 → 3321 kg 1,4-DB eq (~60%) นอกจากนี้ Marine Aquatic Ecotoxicity ซึ่งมีค่าผลกระทบสูงสุดก็ลดลงกว่า 60% แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงกระบวนการ CO₂RR (เช่น ลดการใช้พลังงานต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ หรือใช้พลังงานสะอาดขึ้น) มีผลอย่างมากต่อการลดรอยเท้าสิ่งแวดล้อม โดยการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยายังคงมีส่วนผลกระทบต่ำ (<3%) เมื่อเทียบกับการเดินระบบโดยรวม

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและข้อเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations)

บทสรุป (Conclusion)

ในการรีดักชันทางไฟฟ้าเคมีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วน Se:Cu ต่างกัน และมีการบรรจุทุกโลหะ Se และ Cu บนกระดาษคาร์บอนในปริมาณ 20 wt% โดยใช้อิเล็กโทรไลต์เป็น สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.5 โมลาร์ กระบวนการนี้ใช้ศักย์ไฟฟ้าในช่วง -2.1 V ถึง -0.1 V เทียบกับ Ag/AgCl (ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์อิ่มตัว) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ XRD พบเฟสผลึกที่ชัดเจนของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C, Se/C และ SeCu/C โดยตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C ให้ขนาดอนุภาคของ เฟส CuSe และ Cu_{1.8}Se เล็กที่สุด โครงสร้างผลึกที่มีขนาดเล็กส่งผลให้พื้นที่ผิวสูงขึ้นและมีการกระจายตัวของ ตำแหน่งออกฤทธิ์ที่ดีกว่า ซึ่งอาจช่วยเพิ่มสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้า ปริมาณการเกิด ผลิตภัณฑ์ก็เพิ่มขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:6)/C ให้ค่า FE สูงถึง 94.82% สำหรับการผลิตกรดอะซิติกและกรดฟอร์มิกที่ศักย์ -1.5 V ในขณะที่ SeCu(1:1)/C ให้ค่า FE เท่ากับ 90.29% สำหรับการผลิตเมทานอลที่ศักย์ -1.3 V การมีซีลีเนียมมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการผลิตเมทานอลที่อัตราส่วน Se:Cu = 1:1 การเพิ่ม ศักย์ไฟฟ้าจาก -0.9 V เป็น -1.5 V ช่วยเพิ่มความหนาแน่นกระแส ทำให้เกิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ สำหรับปฏิกิริยา CO₂RR โดย SeCu(1:1)/C ให้ค่า FE สูงสุดที่ -1.3 V อย่างไรก็ตาม SeCu(1:4)/C ให้ค่าความ หนาแน่นกระแสสูงสุดที่ ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:6)/C ให้การเปลี่ยน CO₂ เท่ากับ 2.31% สำหรับกรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก ในขณะที่ SeCu(1:1)/C ให้การเปลี่ยน CO₂ เท่ากับ 1.06% สำหรับเมทานอลที่ศักย์ไฟฟ้า -1.3 V

ผลการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) แสดงให้เห็นว่าการนำสารอิเล็กโทรไลต์กลับมาใช้ซ้ำสามารถลด ผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีนัยสำคัญในทุกหมวดหมู่ โดยเฉพาะหมวด Global Warming ที่ลดลงจาก 2,494.13 เหลือ 1,017.12 kg CO₂ eq หรือคิดเป็นการลดลงราว 59% ขณะที่หมวด Human Toxicity ลดลงจาก 8,367 เหลือ 3,321 kg 1,4-DB eq ($\approx$ 60%) นอกจากนี้ Marine Aquatic Ecotoxicity ซึ่งเป็น หมวดที่มีค่าผลกระทบสูงที่สุด ก็ลดลงมากกว่า 60% ผลลัพธ์เหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่าการปรับปรุงกระบวนการ CO₂RR เช่น การลดการใช้พลังงานต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ หรือการใช้พลังงานสะอาด สามารถช่วยลดรอยเท้า คาร์บอนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง (References)

1. Albo, J., & Irabien, A. (2016). อิเล็กโทรดก๊าซแพร่ที่บรรจุทุก Cu_2O สำหรับการรีดักชัน CO_2 อย่างต่อเนื่องให้เป็นเมทานอล (Cu₂O-loaded gas diffusion electrodes for the continuous electrochemical reduction of CO₂ to methanol). Journal of Catalysis [Electronic], 343, 232–239. Available: ScienceDirect [2023, Dec 6].
2. Albo, J., Sáez, A., Solla-Gullón, J., Montiel, V., & Irabien, A. (2015). การผลิตเมทานอลจากการรีดักชันไฟฟ้าของ CO_2 โดยขั้ว Cu_2O และ $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ ในน้ำ (Production of methanol from CO₂ electroreduction at Cu₂O and Cu₂O/ZnO-based electrodes in aqueous solution). Applied Catalysis B: Environmental [Electronic], 176–177, 709–717. Available: ScienceDirect [2023, Dec 6].
3. Brasted, R. C. (2020). ซีลีเนียม / ธาตุเคมี (Selenium | chemical element). Encyclopædia Britannica [online]. Available: <https://www.britannica.com/science/selenium>
4. BYJU'S (n.d.). คาร์บอนไดออกไซด์ – นิยาม สมบัติ และปัญหาสิ่งแวดล้อม (Carbon dioxide – Definition, Properties & Environmental Problems with Videos) [online]. Available: <https://byjus.com/chemistry/carbon-dioxide/>
5. Chang, F., et al. (2022). ตัวเร่งปฏิกิริยาทองแดงสำหรับรีดักชัน CO_2 เป็นผลิตภัณฑ์หลายคาร์บอน (Copper-Based Catalysts for Electrochemical CO₂ Reduction to Multicarbon Products). Electrochemical Energy Reviews [Electronic], 5(3). Available: Springer Link [2023, Dec 6].
6. Cheersonic (2022). บทนำ MEA และเทคนิคการเคลือบ (Introduction to Membrane Electrode Assembly – MEA Coating Techniques). Ultrasonic Coating Solutions [online]. Available: <https://cheersonic-liquid.com/en/introduction-to-membrane-electrode-assembly>
7. Copper.org (2019). ทรัพยากร: สมบัติอะตอมและผลึกของทองแดง (Resources: General, Atomic and Crystallographic Properties and Features of Copper) [online]. Available: https://www.copper.org/resources/properties/atomic_properties.html
8. Duarte, M., Bert De Mot, Hereijgers, J., & Breugelmans, T. (2019). ผลของการจ่าย CO_2 แบบพาความร้อนในอิเล็กโทรดก๊าซแพร่ต่อการรีดักชันไฟฟ้าของ CO_2 (Electrochemical Reduction of CO₂: Effect of Convective CO₂ Supply in Gas Diffusion Electrodes). ChemElectroChem [Electronic], 6(22), 5596–5602. Available: Europe Chemistry [2023, Dec 6].
9. Electrocatalysts – an overview | ScienceDirect Topics (n.d.). ภาพรวมตัวเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้า [online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/electrocatalysts>

10. **Encyclopædia Britannica** (2019). *พัลลาเดียม / การใช้ สมบัติ และข้อเท็จจริง* (Palladium | Uses, Properties, & Facts). Available: <https://www.britannica.com/science/palladium-chemical-element>
11. **Encyclopædia Britannica, The Editors of.** (2018). *ทองแดง / นิยามและข้อเท็จจริง* (Copper | Definition & Facts) [online]. Available: <https://www.britannica.com/science/copper>
12. **Francis, S. A., et al.** (2018). *การรีดักชัน CO₂ ในน้ำเป็น 1-โพรพานอลที่อิเล็กโทรด MoS₂* (Reduction of Aqueous CO₂ to 1-Propanol at MoS₂ Electrodes). *Chemistry of Materials [Electronic]*, 30(15), 4902–4908. Available: ACS Publications [2023, Dec 6].
13. **Harvey, D.** (2021). *23.1: ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง* (23.1: Reference Electrodes). *Chemistry LibreTexts* [online]. Available: https://chem.libretexts.org/.../23.01%3A_Reference_Electrodes
14. **Health and Safety Executive** (n.d.). *อันตรายทั่วไปของคาร์บอนไดออกไซด์* (General hazards of Carbon Dioxide) [online]. Available: <https://www.hse.gov.uk/carboncapture/carbondioxide.htm>
15. **Hoang, T., Ma, S., Gold, J. I., Paul, & Gewirth, A. A.** (2017). *ฟิล์มทองแดงนาโนพรุนจากการสะสมไฟฟ้าควบคุมสารเติมแต่งสำหรับเร่งปฏิกิริยารีดักชัน CO₂* (Nanoporous Copper Films by Additive-Controlled Electrodeposition: CO₂ Reduction Catalysis). *ACS Catalysis [Electronic]*, 7(5), 3313–3321. Available: ACS Publications [2023, Dec 6].
16. **Hoang, T. T. H., et al.** (2018). *โลหะผสม Cu–Ag นาโนพรุนสำหรับการรีดักชัน CO₂ แบบเลือกจำเพาะเป็นเอทิลีนและเอทานอล* (Nanoporous Copper–Silver Alloys ...). *Journal of the American Chemical Society [Electronic]*, 140(17), 5791–5797. Available: ACS Publications [2023, Dec 6].
17. **Kuhl, K., & Stanford University, Dept. of Chemistry.** (2013). *การรีดักชันทางไฟฟ้าเคมีของ CO₂ บนผิวโลหะทรานซิชัน* (Electrochemical reduction of carbon dioxide on transition metal surfaces). *Purl.stanford.edu* [Electronic]. Available: <https://purl.stanford.edu/ch356ht8074>
18. **Li, J., et al.** (2018). *อนุภาคทองแดงช่วยการสังเคราะห์ไฟฟ้าแบบเลือกจำเพาะของ n-โพรพานอล* (Copper adparticle enabled selective electrosynthesis of n-propanol). *Nature Communications [Electronic]*, 9(1). Available: www.nature.com [2023, Dec 6].
19. **Lin, R., Guo, J., Li, X., Patel, P., & Seifitokaldani, A.** (2020). *เครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีสำหรับการแปรรูป CO₂* (Electrochemical Reactors for CO₂ Conversion). *Catalysts [Electronic]*, 10(5), 473. Available: MDPI [2023, Dec 6].

20. Liu, L., Yao, H., Jiang, Z., & Fang, T. (2018). การศึกษาทฤษฎีการสังเคราะห์เมทานอลจากไฮโดรจิเนชัน CO_2 บนผิว $\text{PdCu}_3(111)$ (Theoretical study ...). *Applied Surface Science [Electronic]*, 451, 333–345. Available: ScienceDirect [2023, Dec 6].
21. Lu, L., et al. (2018). การรีดักชัน CO_2 เป็นเมทานอลอย่างมีประสิทธิภาพสูงบนแอโรเจลโลหะผสม Pd-Cu (Highly Efficient Electroreduction of CO_2 to Methanol on Pd-Cu Bimetallic Aerogels). *Angewandte Chemie [Electronic]*, 130(43), 14345–14349. Available: Wiley Online Library [2023, Dec 6].
22. Ma, D., Jin, T., Xie, K., & Huang, H. (2021). ภาพรวมสถาปัตยกรรมโพลีเซลล์และการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับรีดักชัน CO_2 (An overview of flow cell architecture design and optimization for electrochemical CO_2 reduction). *Journal of Materials Chemistry A [Electronic]*, 9(37), 20897–20918. Available: RSC [2023, Dec 6].
23. Marcandalli, G., Goyal, A., & Koper, M. T. M. (2021). ผลของอิเล็กโทรไลต์ต่อ FE ของการรีดักชัน CO_2 เป็น CO บนอิเล็กโทรดทองคำ (Electrolyte Effects on the Faradaic Efficiency ...). *ACS Catalysis*, 11(9), 4936–4945. Available: ACS Publications [2023, Dec 6].
24. MatMatch (n.d.). สมบัติของทองแดง – Matmatch (Properties of Copper – Matmatch) [online]. Available: <https://matmatch.com/learn/material/copper-properties>
25. Mortimer, R. J. (2008). *H-cell*, ใน *Electrochemical Dictionary*, p. 321. Available: Springer eBooks [2023, Dec 6].
26. Prifti, H., Parasuraman, A., Winardi, S., Lim, T. M., & Skyllas-Kazacos, M. (2012). เมมเบรนสำหรับแบตเตอรี่รีดอกซ์โฟลว์ (Membranes for Redox Flow Battery Applications). *Membranes [Electronic]*, 2(2), 275–306. Available: MDPI [2023, Dec 6].
27. Rahaman, M., et al. (2020). การสร้าง *n*-โพรพานอลแบบเลือกจำเพาะจาก CO_2 บนโฟมโลหะผสม PdCu (Selective *n*-propanol formation from CO_2 over ... PdCu alloy foam electrocatalysts). *Green Chemistry [Electronic]*, 22(19), 6497–6509. Available: RSC [2023, Dec 6].
28. Ren, D., Deng, Y., Handoko, A. D., Chen, C. S., Malkhandi, S., & Yeo, B. S. (2015). การรีดักชัน CO_2 แบบเลือกจำเพาะเป็นเอทิลีนและเอทานอลบนตัวเร่ง Cu(I)O (Selective Electrochemical Reduction of CO_2 to Ethylene and Ethanol on Cu(I)O Catalysts). *ACS Catalysis [Electronic]*, 5(5), 2814–2821. Available: ACS Publications [2023, Dec 6].
29. Ren, D., Ang, B. S.-H., & Yeo, B. S. (2016). ปรับเลือกจำเพาะการรีดักชัน CO_2 ไปสู่เอทานอลบนตัวเร่ง Cu_xZn ที่ได้จากออกไซด์ (Tuning the Selectivity ... on Oxide-Derived Cu_xZn). *ACS Catalysis [Electronic]*, 6(12), 8239–8247. Available: ACS Publications [2023, Dec 6].
30. Rui, L., Oriol Piqué, Lim, S. Y., Tanhaei, M., Calle-Vallejo, F., & Yeo, B. S. (2020). เพิ่มประสิทธิภาพการรีดักชัน CO_2 สู่เอทานอลบนคอมโพสิต Cu-Ag โดยเปิดเส้นทางเร่งปฏิกิริยา

- ทางเลือก (Enhancing CO₂ Electroreduction to Ethanol on Cu–Ag Composites ...). ACS Catalysis [Electronic], 10(7), 4059–4069. Available: ACS Publications [2023, Dec 6].
31. **Salvatore, D., & Berlinguette, C. P.** (2019). แรงดันไฟฟ้ามีความสำคัญเมื่อรีดักชัน CO₂ ในโฟลว์เซลล์ (Voltage Matters When Reducing CO₂ in an Electrochemical Flow Cell). ACS Energy Letters [Electronic], 5(1), 215–220. Available: ACS Publications [2023, Dec 6].
 32. **Sauermoser, M., Kizilova, N., Pollet, B. G., & Kjelstrup, S.** (2020). ลวดลายช่องไหลใน PEMFC (Flow Field Patterns for PEM Fuel Cells). Frontiers in Energy Research [Electronic], 8. Available: Frontiers [2023, Dec 6].
 33. **Vedantu** (n.d.). คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) [online]. Available: <https://www.vedantu.com/chemistry/carbon-dioxide>
 34. **Wang, S., Kou, T., Baker, S. E., Duoss, E. B., & Li, Y.** (2021). การรีดักชัน CO₂ เป็นแอลกอฮอล์: สถานะความเข้าใจและความท้าทาย (Electrochemical Reduction of CO₂ to Alcohols: Current Understanding, Progress, and Challenges). Advanced Energy and Sustainability Research [Electronic], 3(1), 2100131. Available: Wiley Online Library [2023, Dec 6].
 35. **Wikipedia** (2023). อิเล็กโทรดแคลอเมลอิ่มตัว (Saturated calomel electrode) [online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Saturated_calomel_electrode
 36. **Xie, H., Wang, T., Liang, J., Li, Q., & Sun, S.** (2018). ตัวเร่ง Cu-นาโนสำหรับการรีดักชัน CO₂ ทางไฟฟ้าเคมี (Cu-based nanocatalysts for electrochemical reduction of CO₂). Nano Today [Electronic], 21, 41–54. Available: ResearchGate [2023, Dec 6].
 37. **Yang, D., et al.** (2019). การรีดักชัน CO₂ แบบเลือกจำเพาะเป็นเมทานอลบนตัวเร่งนาโนคอปเปอร์ซีลีไนด์ (Selective electroreduction of CO₂ to methanol on copper selenide nanocatalysts). Nature Communications [Electronic], 10(1). Available: www.nature.com [2023, Dec 6].
 38. **Yang, H., Chuai, H., Meng, Q., Wang, M., Zhang, S., & Ma, X.** (2022). ตัวเร่งไฟฟ้าคู่โลหะฐานทองแดงสำหรับ CO₂RR: จากกลไกการควบคุมผลิตภัณฑ์ (Copper-based bimetallic electrocatalysts for CO₂ reduction: From mechanism understandings to product regulations). Materials Reports: Energy [Electronic], 100174. Available: ScienceDirect [2023, Dec 6].
 39. **Zeng, L., Shi, J., Chen, H., & Lin, C.** (2021). Ag Nanowires/C เป็นตัวเร่งที่เลือกจำเพาะและมีประสิทธิภาพสำหรับ CO₂RR (Ag Nanowires/C as a Selective and Efficient Catalyst for CO₂ Electroreduction). Energies [Electronic], 14(10), 2840. Available: MDPI [2023, Dec 6].
 40. **Zhan, B., Zhang, S., Yu, J., Xiao, X., Guo, X., Mao, D., & Lu, G.** (2017). ไฮโดรจิเนชันแบบไม่เป็นเนื้อเดียวของเมทิลเอสเทอร์กรดอะมิโนเชิงไครัลส์แอลกอฮอล์ โดยคงคอนฟิกูเรชันไว้ บนตัวเร่ง

Mg-ดัดแปลง Cu/ZnO/Al₂O₃ (Heterogeneous Catalytic Hydrogenation of Chiral Amino Acid Methyl Esters ...). *Catalysis Letters* [Electronic], 147(8), 2160–2166. Available: Springer Link [2023, Dec 6].

ภาคผนวก (Appendix)

ภาคผนวก ก
การคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

การคำนวณการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักโมเลกุลของธาตุและสารประกอบที่ใช้ในปฏิกิริยา

Element and compound	Molecular weight (g/mol)
Copper (Cu)	63.55
Selenium (Se)	78.97
Copper Nitrate (II) trihydrate (Cu (NO ₃) ₂ · 3H ₂ O)	241.56
Sodium Selenite (Na ₂ SeO ₃)	172.94
Sodium borohydride (NaBH ₄)	37.84
Ascorbic acid (C ₆ H ₈ O ₆)	176.12
Nafion D-521	544.16

ตารางที่ ก.2 อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา Se:Cu และปริมาณของสารต่าง ๆ ที่ใช้

Metal ratio		Metallic nanoparticles 0.01 M			NaBH ₄ 1 M		Ascorbic acid 1.5 M	
Se	Cu	Cu (NO ₃) ₂ · 3H ₂ O (g)	Na ₂ SeO ₃ (g)	DI water (ml)	NaBH ₄ 97% (g)	DI water (ml)	Ascorbic acid 99.7% (g)	DI water (ml)
-	1	0.0760	-	25.33	0.1964	5.04	4.8370	18.25
1	-	-	0.0438	31.47	0.1581	4.05	3.8922	14.69
1	1	0.0339	0.0243	30.42	0.1752	4.49	4.3135	16.28
1	2	0.0469	0.0168	30.02	0.1817	4.66	4.4749	16.89
1	4	0.0580	0.0104	29.12	0.1873	4.80	4.6130	17.41
1	6	0.0630	0.0075	28.07	0.1899	4.87	4.6749	17.64

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ผลคำนวณ

คำนวณขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา

ประมาณค่าโดยใช้สมการ Scherrer (Scherrer Equation)

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}$$

โดยที่:

D = ขนาดผลึกเฉลี่ย (nm หรือ Å)

K = ค่า Scherrer constant (มักใช้ 0.9)

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (Cu K α = 0.15406 nm)

β = ความกว้างครึ่งหนึ่งของยอด (Full Width at Half Maximum, FWHM) ของพีค XRD (หน่วยเรเดียน)

θ = มุม Bragg (ครึ่งหนึ่งของ 2θ ที่ให้พีคสูงสุด)

ตารางที่ ข.1 ผลลัพธ์ค่ามุม θ (องศา, °) และค่า FWHM ที่ได้จากเทคนิคการวิเคราะห์ XRD

Catalyst	Peak Element	2theta (degree, °)	FWHM	Particle size (nm.)
Cu/C	Cu	43.320	0.300	28.493
	Cu	50.460	0.280	31.365
	Cu	74.120	0.540	18.436
SeCu 1:6/C	CuSe	27.140	0.820	9.966
	Se	29.580	0.300	27.388
	Cu _{1.8} Se	44.880	1.000	8.595
	Cu	73.620	0.620	16.004
SeCu 1:4/C	CuSe	27.200	1.180	6.927
	Se	29.580	0.320	25.677
	Cu _{1.8} Se	45.320	1.820	4.730
	Cu	73.540	0.500	19.835
SeCu 1:2/C	Cu _{1.8} Se	27.020	0.460	17.762
	Cu _{1.8} Se	44.880	0.520	16.529
	Cu _{1.82} Se	53.160	0.600	14.805

Catalyst	Peak Element	2theta (degree, °)	FWHM	Particle size (nm.)
	Se	65.480	0.620	15.233
	Cu	74.680	0.400	24.980
SeCu 1:1/C	Cu _{1.8} Se	26.460	3.520	2.318
	CuSe	28.040	1.180	6.939
	Cu _{1.8} Se	31.100	1.440	5.726
	Se	45.360	0.780	11.039
	CuSe	45.960	0.680	12.690
	Cu	49.980	0.860	10.192
	Se	56.460	1.220	7.391
Se/C	Se	23.480	0.360	22.539
	Se	29.660	0.300	27.393
	Se	41.280	0.460	18.455
	Se	43.620	0.360	23.769
	Se	45.320	0.500	17.218
	Se	51.660	0.520	16.973
	Se	56.080	0.920	9.783
	Se	65.200	0.500	18.860
	Se	71.640	0.460	21.299

ตารางที่ ข.2 ค่า ESCA ที่ได้จากการคำนวณของตัวเร่งปฏิกิริยาในแต่ละอัตราส่วน

Catalysts	ESCA (cm ² /mg)
Cu/C	15.0594
SeCu(1:1)/C	114.1860
SeCu(1:2)/C	24.3154
SeCu(1:4)/C	47.4785
SeCu(1:6)/C	34.0029
Se/C	15.0594

ภาคผนวก ก

วิธีการวัดปริมาณผลิตภัณฑ์ (Products Measurement Method Section)

1 การคำนวณการเตรียมตัวอย่างสำหรับ HPLC

1.1 การเตรียมสารมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว

- กำหนดปริมาตรรวมของสารมาตรฐาน = 2 มิลลิลิตร
- ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน = 500 ppm

1.2 การเตรียมสารละลายสต็อกมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานทุกชนิดให้มีความเข้มข้น 10,000 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตร สำหรับแต่ละสาร ได้แก่:

- กรดออกซาลิก (Oxalic acid)
- ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)
- กรดฟอร์มิก (Formic acid)
- กรดอะซิติก (Acetic acid)
- เมทานอล (Methanol)

$$\text{จากสมการ } \text{ppm} = \frac{W(\text{solute, mg})}{1 \text{ L}}$$

$$\text{Volume of DI water} = 25 \text{ ml}$$

$$\begin{aligned} \text{Weight of each compound used} &= 10,000 \text{ ppm} \cdot \frac{1 \text{ mg}}{1 \text{ L}} \cdot 25 \text{ ml} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1,000 \text{ ml}} \\ &= 250 \text{ mg} \cdot \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \\ &= 0.25 \text{ g of standard} \end{aligned}$$

1.3 Internal standard

Oxalic acid

การเตรียมสารมาตรฐานภายนอก (External Standard Solution)

จากสารละลายสต็อกกรดออกซาลิกที่มีความเข้มข้น 10,000 ppm

กำหนดให้สารละลายมาตรฐานภายนอกมีความเข้มข้นของกรดออกซาลิก 1,500 ppm ในปริมาตร 2 mL

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad C_1 V_1 &= C_2 V_3 \\ (10,000 \text{ ppm}) (\text{volume of oxalic acid}) &= (1500 \text{ ppm}) (2 \text{ ml}) \\ \text{Volume of oxalic acid} &= 0.3 \text{ ml} \end{aligned}$$

การเตรียมสารละลายผลิตภัณฑ์ของเหลว

จากสารละลายสต็อกกรดออกซาลิกที่มีความเข้มข้น 10,000 ppm

กำหนดให้สารละลายผลิตภัณฑ์ของเหลวมีความเข้มข้นของกรดออกซาลิก 50 ppm ในปริมาตร 2 mL

$$\text{ใช้สมการ: } C_1 V_1 = C_2 V_3$$

$$(10,000 \text{ ppm}) (\text{volume of oxalic acid}) = (50 \text{ ppm}) (2 \text{ ml})$$

$$\text{Volume of oxalic acid} = 0.01 \text{ ml}$$

1.4 สารมาตรฐานภายนอก External standard

1.4.1 การเตรียมสารละลายสต็อกของสารมาตรฐานภายนอก

เตรียมสารละลายมาตรฐานภายนอกให้มีความเข้มข้น 500 ppm ปริมาตรรวม 2 mL

$$\text{จากสมการ} \quad C_1V_1 = C_2V_3$$

$$(10,000 \text{ ppm}) (\text{volume of standard}) = (500 \text{ ppm}) (2 \text{ ml})$$

$$\text{Volume of standard} = 0.1 \text{ ml}$$

$$= 100 \text{ } \mu\text{L} \text{ of each } 10,000 \text{ ppm}$$

compound

ในสารละลายมาตรฐานภายนอกความเข้มข้น 500 ppm ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ประกอบด้วยกรดออกซาลิก ฟอรัมาดีไฮด์ กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และเมทานอล อย่างละ 500 ppm

$$\text{Volume of DI water} = 2 \text{ ml} - (4) (0.1 \text{ ml})$$

$$= 1.6 \text{ ml of DI water}$$

$$= 1,600 \text{ } \mu\text{L} \text{ of DI water}$$

1.4.2 ตัวอย่างการเตรียมสารมาตรฐานภายนอกความเข้มข้น 200 ppm จากสารละลายสต็อกมาตรฐานภายนอกความเข้มข้น 500 ppm

$$\text{จากสมการ} \quad C_1V_1 = C_2V_3$$

$$(500 \text{ ppm}) (\text{volume of standard}) = (200 \text{ ppm}) (2 \text{ ml})$$

$$\text{Volume of standard} = 0.8 \text{ ml}$$

$$= 800 \text{ } \mu\text{L} \text{ of } 500 \text{ ppm of external}$$

standard

กำหนดปริมาตรของกรดออกซาลิกในสารมาตรฐานภายนอกทุกความเข้มข้น

$$= 0.3 \text{ ml of } 10,000 \text{ ppm of oxalic acid stock solution.}$$

$$\text{Volume of DI water} = 2 \text{ ml} - 0.8 \text{ ml} - 0.3 \text{ ml}$$

$$= 0.9 \text{ ml of DI water}$$

$$= 900 \text{ } \mu\text{L} \text{ of DI water}$$

ตารางที่ ค.1 ปริมาตรของสารละลายที่ใช้สำหรับแต่ละความเข้มข้นของสารมาตรฐานภายนอก (External Standard Solution) ในปริมาตรรวม 2 มิลลิลิตร

Concentration (ppm)	Volume of 500 ppm solution (μL)	Volume of oxalic acid (μL)	Volume of DI water (μL)
10	40	300	1660
30	120	300	1580
50	200	300	1500
100	400	300	1300
200	800	300	900

2 การคำนวณประสิทธิภาพฟาราเดอิก

พิจารณาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:4)/C ที่ศักย์ไฟฟ้า -1.5 V ค่าประจุที่ได้จากกระบวนการที่ศักย์ไฟฟ้า -1.5 V บนตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:4)/C คือ -41.566 Coul/cm².

$$\begin{aligned}
 \text{Total mole } e^- &= \frac{\text{Charge}}{\text{Faradaic number}} \\
 &= \frac{-41.566 \text{ C/cm}^2}{96,485 \text{ C/mol}} \\
 &= 0.000430794 \text{ mol } e^-
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ค.2 ค่าประจุและจำนวนโมลของอิเล็กตรอนรวมของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se

Catalyst	Potential (Volts)	Charge (Coul/cm ²)	Total mole e ⁻ (mol)
Cu/C	-0.9	-28.853	0.000299
	-1.1	-36.352	0.000377
	-1.3	-38.946	0.000404
	-1.5	-57.062	0.000591
SeCu(1:1)/C	-0.9	-20.838	0.000216
	-1.1	-21.425	0.000222
	-1.3	-30.037	0.000311
	-1.5	-38.303	0.000397
SeCu(1:2)/C/C	-0.9	-25.038	0.000259
	-1.1	-27.618	0.000286
	-1.3	-34.498	0.000358
	-1.5	-46.787	0.000485
SeCu(1:4)/C	-0.9	-33.162	0.000344

Catalyst	Potential (Volts)	Charge (Coul/cm ²)	Total mole e ⁻ (mol)
	-1.1	-33.551	0.000348
	-1.3	-38.052	0.000394
	-1.5	-41.566	0.000431
SeCu(1:6)/C	-0.9	-20.31	0.000210
	-1.1	-28.279	0.000293
	-1.3	-31.739	0.000329
	-1.5	-39.794	0.000412

3 การคำนวณด้วยเครื่อง GC (GC Calculation)

3.1 การคำนวณปริมาตรของแก๊ส (Volume of Gas Calculation)

3.1.1 การคำนวณปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ก๊าซ

กำหนด ปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ก๊าซ = 33.2 มิลลิลิตร

ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) โดยฉีดตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ได้ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ของก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 551.4 $\mu\text{V}\cdot\text{min}$.

From hydrogen gas standard equation $y = 41,775x - 8.43$

$$\begin{aligned}\text{Volume of hydrogen gas in the sample } x &= \frac{y - (-8.43)}{41,775} \\ x &= \frac{551.4 - (-8.43)}{41,775}\end{aligned}$$

$$x = 0.012997487 \text{ ml H}_2 / 1 \text{ ml sample}$$

$$\begin{aligned}\text{Total volume of hydrogen in the sample} &= (\text{vol of H}_2) \cdot (\text{volume of gas product}) \\ &= (0.012997487) \cdot (33.2) \\ &= 0.431516553 \text{ ml of H}_2\end{aligned}$$

3.1.2 การคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในผลิตภัณฑ์ก๊าซ

กำหนด: ปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ก๊าซ = 33.2 มิลลิลิตร

วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) โดยฉีดตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร

ได้ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 41.7 $\mu\text{V}\cdot\text{min}$.

From carbon monoxide gas standard equation $y = 54,680x - 352.48$

$$\begin{aligned}\text{Volume of carbon monoxide gas in the sample } x &= \frac{y - (-352.48)}{54,680} \\ x &= \frac{41.7 - (-352.48)}{54,680}\end{aligned}$$

$$x = 0.012997487 \text{ ml H}_2 / 1 \text{ ml sample}$$

$$\begin{aligned}\text{Total volume of carbon monoxide in the sample} &= (\text{vol of CO}) \cdot (\text{volume of gas product}) \\ &= (0.012997487) \cdot (33.2) \\ &= 0.000729045 \text{ ml of CO}\end{aligned}$$

ตารางที่ ค.3 ปริมาตรก๊าซในตัวอย่างและปริมาตรก๊าซของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละอัตราส่วน

Catalyst	Potential (Volts)	Area under the peak ($\mu\text{V}\cdot\text{min}$)		Vol gas (ml)	Total vol (ml)	
		H ₂	CO		H ₂	CO
Cu/C	-0.9	0	0	31.0	0	0
	-1.1	24.9	4.7	30.8	0.0121	0.0203
	-1.3	137.8	395.2	31.5	0.0976	0.0436
	-1.5	576.8	4620.4	30.5	0.4150	0.2805
SeCu(1:1)/C	-0.9	0	0	26.3	0	0
	-1.1	0	0	42.6	0	0
	-1.3	0	0	40.0	0	0
	-1.5	132.3	0	36.2	0.1073	0
SeCu(1:2)/C/C	-0.9	0	0	30.9	0	0
	-1.1	18.7	0	32.9	0.0081	0
	-1.3	113.1	0	37.6	0.0942	0
	-1.5	268.6	0	35.6	0.2217	0
SeCu(1:4)/C	-0.9	0	0	55.0	0	0
	-1.1	0	0	36.0	0	0
	-1.3	162.3	0	35.5	0.1308	0
	-1.5	551.4	41.7	33.2	0.4315	0.0242
SeCu(1:6)/C	-0.9	0	0	24.5	0	0
	-1.1	0	0	25.0	0	0
	-1.3	123.2	0	28.0	0.0769	0
	-1.5	148.2	0	30.0	0.1004	0

3.2 การคำนวณประสิทธิภาพฟาราเดอิก

3.2.1 การคำนวณประสิทธิภาพฟาราเดอิกของก๊าซไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ก๊าซ

กำหนดให้ 1 mol of gas = 22,400 ml

$$\begin{aligned}\text{mol of hydrogen per 1 ml} &= 0.431516553 \text{ ml} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{22,400 \text{ ml}} \\ &= 1.92641\text{E-}05 \text{ mol H}_2\end{aligned}$$

จากปฏิกิริยา $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$ (2 mole of electron react to get 1 mole of hydrogen gas)

$$\begin{aligned}\text{mole e}^- \text{ of hydrogen gas in the product} &= (\text{mole of H}_2) \cdot (\text{mole e}^- \text{ react to form H}_2) \\ &= 1.92641\text{E-}05 \text{ mol H}_2 \cdot 2 \text{ mol e}^-/\text{mole H}_2 \\ &= 3.85283\text{E-}05 \text{ mol e}^- \\ \text{Faradaic efficiency} &= \frac{\text{mol e}^- \text{ of hydrogen gas in product}}{\text{total mol e}^-} \cdot 100 \\ &= \frac{3.85283\text{E-}05 \text{ mol e}^-}{0.0004308 \text{ mol e}^-} \cdot 100 \\ &= 8.94 \%\end{aligned}$$

3.2.2 การคำนวณประสิทธิภาพฟาราเดอิกของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในผลิตภัณฑ์ก๊าซ

กำหนดให้ 1 mol of gas = 22,400 ml

$$\begin{aligned}\text{mol of carbon monoxide per 1 ml} &= 0.000729045 \text{ ml} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{22,400 \text{ ml}} \\ &= 0.024204291 \text{ mol CO}\end{aligned}$$

จากปฏิกิริยา $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ (2 mole of electron react to get 1 mole of carbon monoxide gas)

$$\begin{aligned}\text{mole e}^- \text{ of carbon monoxide gas in the product} &= (\text{mole of H}_2) \cdot (\text{mole e}^- \text{ react to form CO}) \\ &= 0.024204291 \text{ mol CO} \cdot 2 \text{ mol e}^-/\text{mole CO} \\ &= 2.1611\text{E-}06 \text{ mol e}^- \\ \text{Faradaic efficiency} &= \frac{\text{mol e}^- \text{ of hydrogen gas in product}}{\text{total mol e}^-} \cdot 100 \\ &= \frac{2.1611\text{E-}06 \text{ mol e}^-}{0.0004308 \text{ mol e}^-} \cdot 100 \\ &= 0.50 \%\end{aligned}$$

ตารางที่ ค.4 ประสิทธิภาพฟาราเดอิกของก๊าซในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se

Catalyst	Potential (Volts)	Total mole of electron (mol e ⁻)	Mole electron of gas products (mol)		Faradaic efficiency (%)		Total FE
			H ₂	CO	H ₂	CO	%
Cu/C	-0.9	0.00030	0	0	0	0	0
	-1.1	0.00038	1.08×10^{-6}	1.82×10^{-6}	0.29	0.48	0.77
	-1.3	0.00040	8.71×10^{-6}	3.89×10^{-6}	2.16	0.96	3.12
	-1.5	0.00059	3.71×10^{-5}	2.50×10^{-5}	6.26	4.24	10.50
SeCu(1:1)/C	-0.9	0.00022	0	0	0	0	0
	-1.1	0.00022	0	0	0	0	0
	-1.3	0.00031	0	0	0	0	0
	-1.5	0.00040	9.58×10^{-6}	0	2.41	0	2.41
SeCu(1:2)/C	-0.9	0.00026	0	0	0	0	0
	-1.1	0.00029	7.22×10^{-7}	0	0.25	0	0.25
	-1.3	0.00036	8.41×10^{-6}	0	2.35	0	2.35
	-1.5	0.00048	1.98×10^{-5}	0	4.08	0	4.08
SeCu(1:4)/C	-0.9	0.00034	0	0	0	0	0
	-1.1	0.00035	0	0	0	0	0.00
	-1.3	0.00039	1.17×10^{-5}	0	2.96	0	2.96
	-1.5	0.00043	3.85×10^{-5}	2.16×10^{-6}	8.94	0.50	9.45
SeCu(1:6)/C	-0.9	0.00021	0	0	0	0	0
	-1.1	0.00029	0	0	0	0	0
	-1.3	0.00033	6.87×10^{-6}	0	2.09	0	2.09
	-1.5	0.00041	8.96×10^{-6}	0	2.17	0	2.17

4 การคำนวณด้วย HPLC (HPLC Calculation)

4.1 การคำนวณความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ของเหลว (Concentration of Liquid Calculation)

4.1.1 การคำนวณปริมาณกรดฟอร์มิกในผลิตภัณฑ์ของเหลว

กำหนด:

ปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C ที่ศักย์ไฟฟ้า $-1.5 \text{ V} = 133.5$ มิลลิลิตร

วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย HPLC โดยฉีดตัวอย่างปริมาตร 2 มิลลิลิตร ซึ่งประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ของเหลว 1.99 มิลลิลิตร และสารละลายกรดออกซาลิก 500 ppm 0.01 มิลลิลิตร

ค่าพื้นที่ใต้กราฟของกรดฟอร์มิกเท่ากับ 3,932 $\mu\text{V}\cdot\text{s}$.

จาก formic acid external standard equation $y = 589.16x - 1,841$

$$\text{Volume of formic acid in the sample} = \frac{y - (-1,841)}{589.16}$$

$$x = \frac{3,932 - (-1,841)}{589.16} \cdot \frac{2}{1.99}$$

$$x = 20.065 \text{ ppm}$$

$$x = 20.065 \text{ mg/L}$$

$$\text{Concentration of formic acid in the sample} = \frac{\text{Vol of formic acid in sample}}{\text{MW of formic acid}}$$

$$= \frac{20.065 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{46.03 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot \frac{\text{g}}{1000 \text{ mg}}$$

$$= 0.00044 \text{ mol/L (M)}$$

$$\text{Mole of formic acid in the liquid product} = (\text{Conc formic a}) \cdot (\text{Vol liquid product})$$

$$= 0.00044 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 133.5 \text{ ml} \cdot \frac{\text{L}}{1000 \text{ ml}}$$

$$= 5.82 \times 10^{-5} \text{ mol of formic acid}$$

4.1.2 การคำนวณปริมาณกรดอะซิติกในผลิตภัณฑ์ของเหลว

กำหนด:

ปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C ที่ศักย์ไฟฟ้า $-1.5 \text{ V} = 133.5$ มิลลิลิตร

วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย HPLC โดยฉีดตัวอย่างปริมาตร 2 มิลลิลิตร ซึ่งประกอบด้วย ผลิตภัณฑ์ของเหลว 1.99 มิลลิลิตร และสารละลายกรดออกซาลิก 500 ppm 0.01 มิลลิลิตร

ค่าพื้นที่ใต้กราฟของกรดอะซิติกเท่ากับ $6,130 \mu\text{V}\cdot\text{s}$.

จาก Acetic acid external standard equation $y = 446.57x - 508.67$

$$\text{Volume of Acetic acid in the sample } x = \frac{y - (-508.67)}{446.57}$$

$$x = \frac{6,130 - (-508.67)}{446.57} \cdot \frac{2}{1.99}$$

$$x = 14.941 \text{ ppm}$$

$$x = 14.941 \text{ mg/L}$$

$$\text{Concentration of formic acid in the sample} = \frac{\text{Vol of Acetic acid in sample}}{\text{MW of Acetic acid}}$$

$$= \frac{14.941 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{60.052 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot \frac{\text{g}}{1000 \text{ mg}}$$

$$= 0.00025 \text{ mol/L (M)}$$

$$\text{Mole of Acetic acid in the liquid product} = (\text{Conc acetic a}) \cdot (\text{Vol liquid product})$$

$$= 0.00025 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 133.5 \text{ ml} \cdot \frac{\text{L}}{1000 \text{ ml}}$$

$$= 3.32 \times 10^{-5} \text{ mol of formic acid}$$

4.1.3 การคำนวณปริมาณเมทานอลในผลิตภัณฑ์ของเหลว

กำหนด:

ปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากตัวเร่งปฏิกิริยา SeCu(1:1)/C ที่ศักย์ไฟฟ้า $-1.3\text{ V} = 139$ มิลลิลิตร

วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย HPLC โดยฉีดตัวอย่างปริมาตร 2 มิลลิลิตร ซึ่งประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ของเหลว 1.99 มิลลิลิตร และสารละลายกรดออกซาลิก 500 ppm 0.01 มิลลิลิตร

ค่าพื้นที่ใต้กราฟของเมทานอลเท่ากับ $1,465\text{ }\mu\text{V}\cdot\text{s}$.

จาก Acetic acid external standard equation $y = 75.858x - 876.34$

$$\text{Volume of Acetic acid in the sample } x = \frac{y - (-876.34)}{75.858}$$

$$x = \frac{1,465 - (-876.34)}{75.858} \cdot \frac{2}{1.99}$$

$$x = 7.799\text{ ppm}$$

$$x = 7.799\text{ mg/L}$$

$$\text{Concentration of formic acid in the sample} = \frac{\text{Vol of Acetic acid in sample}}{\text{MW of Acetic acid}}$$

$$= \frac{7.799 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{32.04 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot \frac{\text{g}}{1000 \text{ mg}}$$

$$= 0.00024\text{ mol/L (M)}$$

$$\text{Mole of Acetic acid in the liquid product} = (\text{Conc methanol}) \cdot (\text{Vol liquid product})$$

$$= 0.00024 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 139 \text{ ml} \cdot \frac{\text{L}}{1000 \text{ ml}}$$

$$= 3.38 \times 10^{-5} \text{ mol of formic acid}$$

ตารางที่ ค.5 พื้นที่ใต้กราฟของแต่ละผลิตภัณฑ์ และปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากตัวเร่ง

ปฏิกิริยา Cu และ Se

Catalyst	Potential	Area under the peak ($\mu\text{V}\cdot\text{s}$)				Volume
	V	Formaldehyde	Formic acid	Acetic acid	Methanol	ml
Cu/C	-0.9	0	0	3084	0	123.8
	-1.1	0	1102	966	0	124
	-1.3	0	0	789	0	134.5
	-1.5	0	4035	4089	0	136.5
SeCu(1:6)/C	-0.9	0	2332	0	1097	133
	-1.1	0	0	0	1248	123
	-1.3	0	0	1599	1790	124
	-1.5	0	0	854	1988	125
SeCu(1:4)/C	-0.9	0	0	3389	0	138
	-1.1	0	0	0	546	139
	-1.3	0	0	0	0	138.5
	-1.5	0	0	2500	0	135
SeCu(1:2)/C	-0.9	0	0	0	0	123.5
	-1.1	0	0	0	0	124

	-1.3	0	0	0	0	131
	-1.5	0	3618	0	0	126
SeCu(1:1)/C	-0.9	0	0	0	0	136.5
	-1.1	0	5584	1601	0	131.6
	-1.3	0	0	0	1465	139
	-1.5	0	3932	6130	785	133.5

4.2 การคำนวณประสิทธิภาพฟาราเดอิก

4.2.1 การคำนวณประสิทธิภาพฟาราเดอิกของกรดฟอร์มิกในผลิตภัณฑ์ของเหลว

จากปฏิกิริยา $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{HCOOH}_{(\text{aq})}$ (โดย ต้องใช้อิเล็กตรอน 2 โมล เพื่อให้ได้กรดฟอร์มิก 1 โมล)

mole e^- of formic acid in the product

$$= (\text{mole of formic a}) \cdot (\text{mole } \text{e}^- \text{ react to form formic a})$$

$$= 5.82 \times 10^{-5} \text{ mol formic a} \cdot 2 \text{ mol } \text{e}^- / \text{mole formic a}$$

$$= 0.00012 \text{ mol } \text{e}^-$$

$$\begin{aligned} \text{Faradaic efficiency} &= \frac{\text{mol } \text{e}^- \text{ of formic a in product}}{\text{total mol } \text{e}^-} \cdot 100 \\ &= \frac{0.00012 \text{ mol } \text{e}^-}{0.0004124 \text{ mol } \text{e}^-} \cdot 100 \\ &= 28.22 \% \end{aligned}$$

4.2.2 การคำนวณประสิทธิภาพฟาราเดอิกของกรดอะซิติกในผลิตภัณฑ์ของเหลว

จากปฏิกิริยา: $2\text{CO}_2 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH}_{(\text{aq})} + 2\text{H}_2\text{O}$ (โดย ต้องใช้อิเล็กตรอน 8 โมล เพื่อให้ได้กรดอะซิติก 1 โมล)

mole e⁻ of acetic acid in the product

$$= (\text{mole of acetic a}) \cdot (\text{mole e}^- \text{ react to form acetic a})$$

$$= 3.32 \times 10^{-5} \text{ mol acetic a} \cdot 8 \text{ mol e}^-/\text{mole acetic a}$$

$$= 0.00027 \text{ mol e}^-$$

$$\text{Faradaic efficiency} = \frac{\text{mol e}^- \text{ of acetic a in product}}{\text{total mol e}^-} \cdot 100$$

$$= \frac{0.00027 \text{ mol e}^-}{0.0004124 \text{ mol e}^-} \cdot 100$$

$$= 64.43 \%$$

4.2.3 การคำนวณประสิทธิภาพฟาราเดอิกของเมทานอลในผลิตภัณฑ์ของเหลว

จากปฏิกิริยา $\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}_{(\text{aq})} + \text{H}_2\text{O}$ (โดย ต้องใช้อิเล็กตรอน 6 โมล เพื่อให้ได้เมทานอล 1 โมล)

mole e⁻ of methanol in the product

$$= (\text{mole of methanol}) \cdot (\text{mole e}^- \text{ react to form methanol})$$

$$= 3.38 \times 10^{-5} \text{ mol methanol} \cdot 8 \text{ mol e}^-/\text{mole methanol}$$

$$= 0.00020 \text{ mol e}^-$$

$$\text{Faradaic efficiency} = \frac{\text{mol e}^- \text{ of methanol in product}}{\text{total mol e}^-} \cdot 100$$

$$= \frac{0.00020 \text{ mol e}^-}{0.0003289 \text{ mol e}^-} \cdot 100$$

$$= 61.71 \%$$

ตารางที่ ค.6 ประสิทธิภาพฟาราเดอิกของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Cu และ Se

Catalyst	Potential	Total mole of electron	Mole electron of liquid products (mol)				Faradaic efficiency (%)				Total FE
	V vs RHE	Mol e ⁻	Formaldehyde	Formic acid	Acetic acid	Methanol	Formaldehyde	Formic acid	Acetic acid	Methanol	%
Cu/C	-0.9	0.00030	0	0	1.33E-04	0	0	0	44.59	0	44.59
	-1.1	0.00038	0	5.51E-05	0	0	0	14.63	0	0	14.63
	-1.3	0.00040	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1.5	0.00059	0	1.21E-04	1.88E-04	0	0	20.48	31.82	0	52.30
SeCu(1:6)/C	-0.9	0.00022	0	8.38E-05	0	7.28E-05	0	38.81	0	33.71	72.52
	-1.1	0.00022	0	0	0	1.13E-04	0	0	0	51.08	51.08
	-1.3	0.00031	0	0	0	2.81E-04	0	0	0	90.29	90.29
	-1.5	0.00040	0	0	0	3.45E-04	0	0	0	86.85	86.85
SeCu(1:4)/C	-0.9	0.00026	0	0	1.61E-04	0	0	0	62.14	0	62.14
	-1.1	0.00029	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1.3	0.00036	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1.5	0.00048	0	0	1.22E-04	0	0	0	25.11	0	25.11

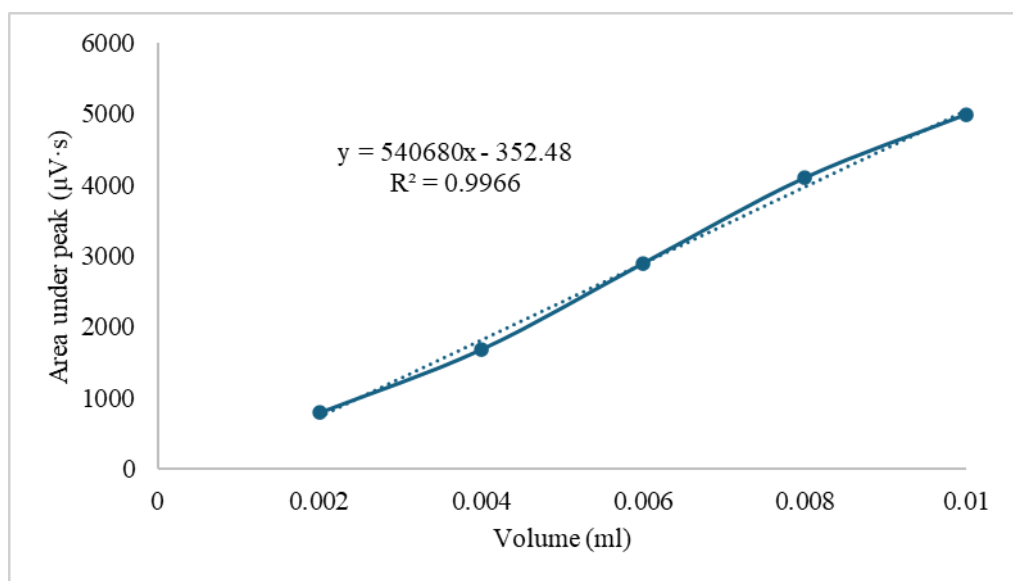
SeCu(1:2)/C	-0.9	0.00034	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1.1	0.00035	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1.3	0.00039	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1.5	0.00043	0	1.04E-04	0	0	0	24.11	0	0	24.11
SeCu(1:1)/C	-0.9	0.00021	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1.1	0.00029	0	1.48E-04	0	0	0	50.35	0	0	50.35
	-1.3	0.00033	0	0	0	2.03E-04	0	0	0	61.71	61.71
	-1.5	0.00041	0	1.16E-04	2.66E-04	0	0	28.22	64.43	0	92.65

ภาคผนวก ง

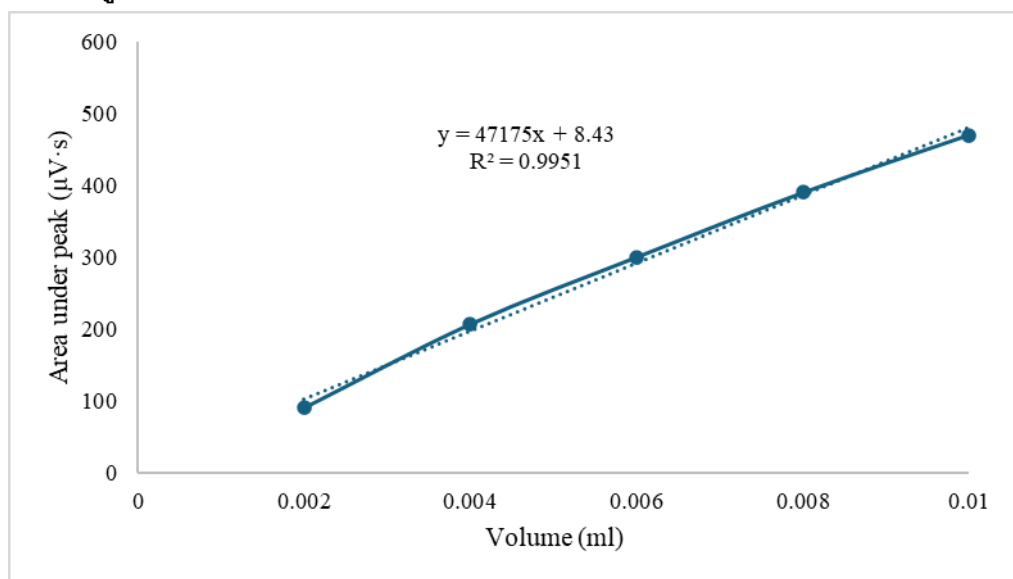
เส้นกราฟสอบเทียบ (Calibration Curve)

การสร้างเส้นกราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)

GC calibration Curve



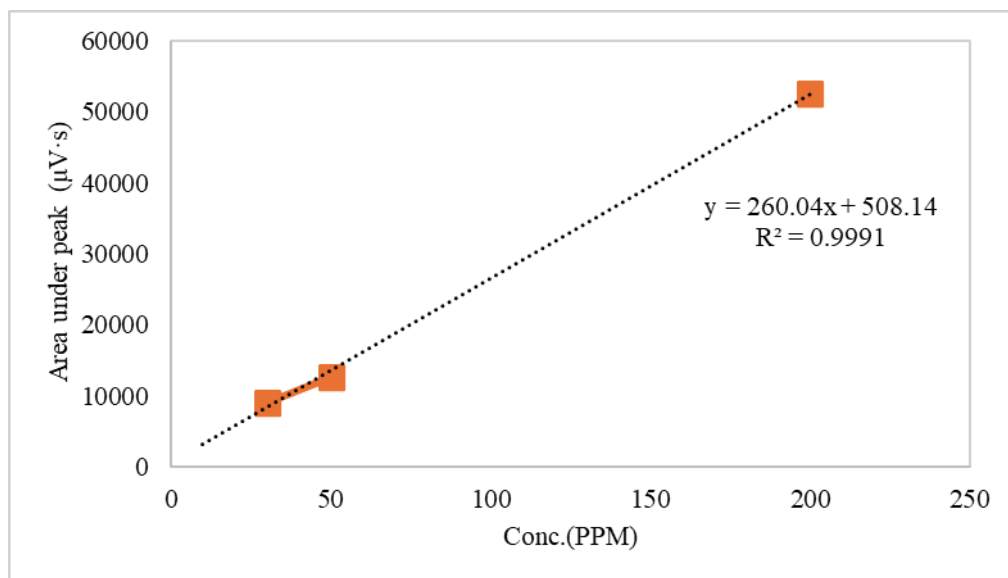
รูปที่ ง.1 กราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) ของก๊าซคาร์บอน มอนออกไซด์



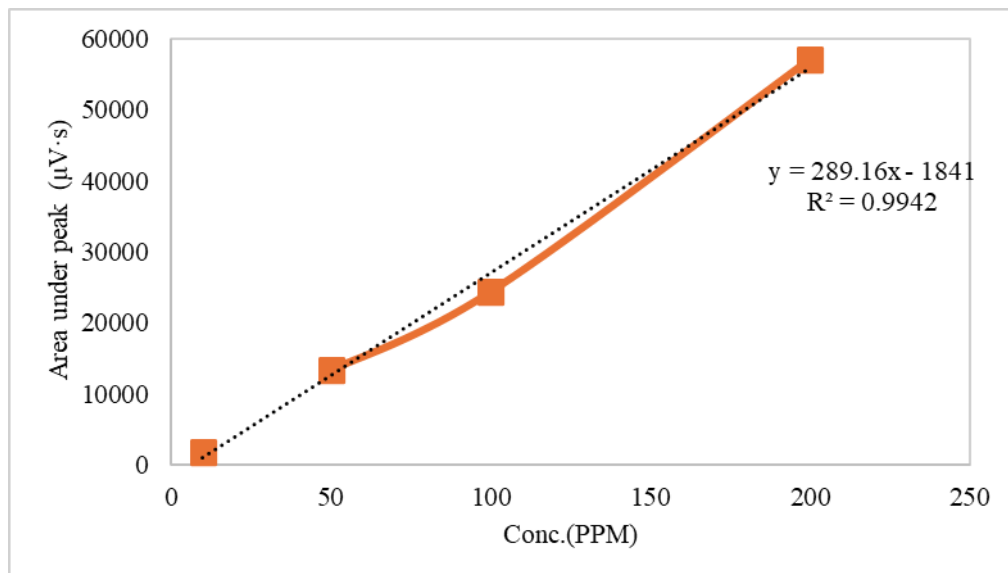
รูปที่ ง.2 กราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) ของก๊าซไฮโดรเจน

การสร้างเส้นกราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) สำหรับการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วย HPLC

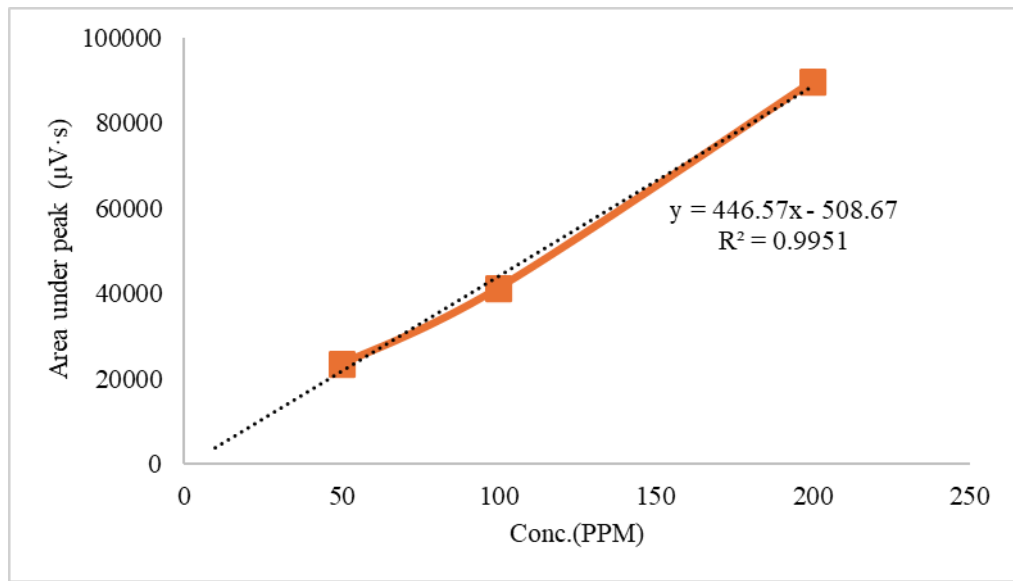
HPLC calibration Curve



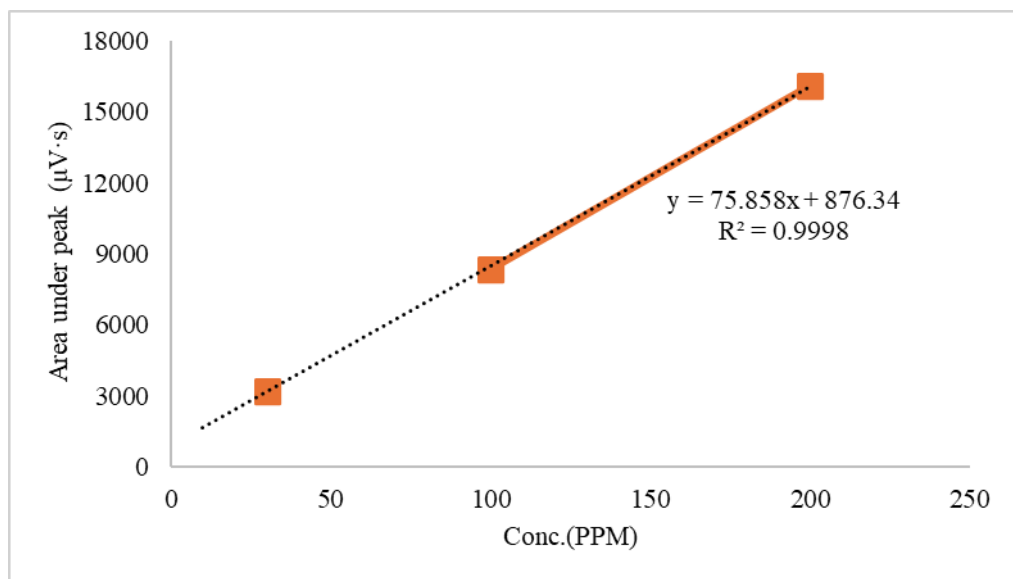
รูปที่ ง.3 กราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) ของฟอร์มิกแอซิด



รูปที่ ง.4 กราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) ของกรดฟอร์มิก



รูปที่ ๕.5 กราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) ของกรดอะซิติก



รูปที่ ๕.6 กราฟสอบเทียบ (Calibration Curve) ของเมทานอล

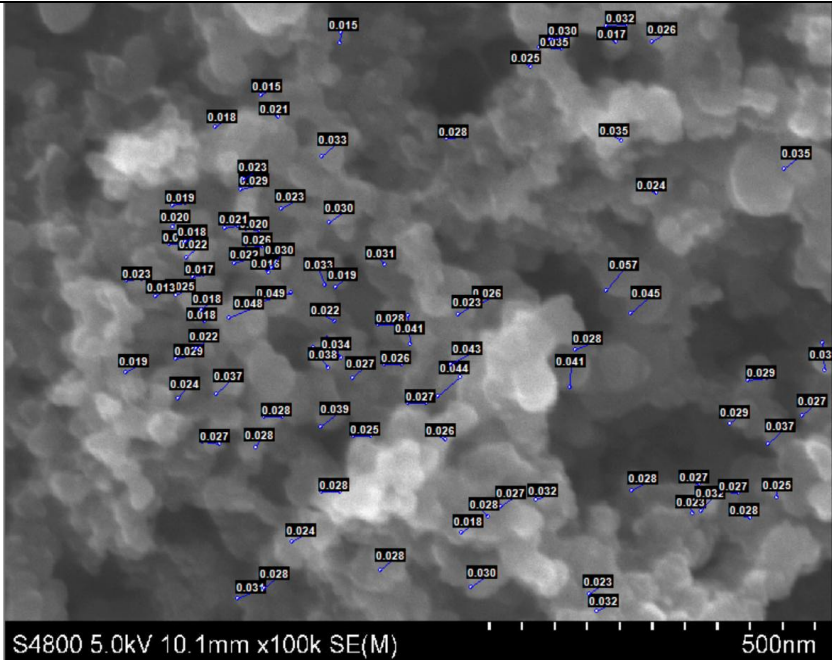
ภาคผนวก จ

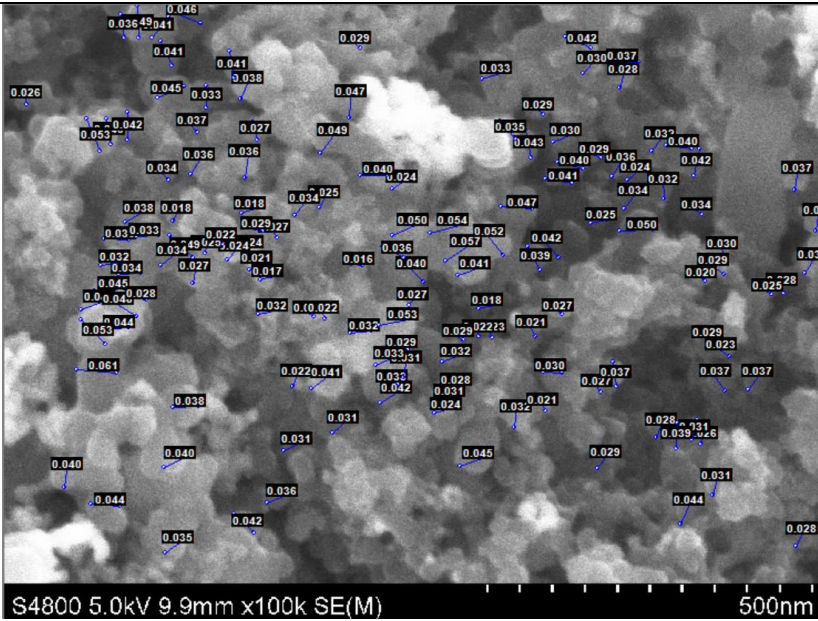
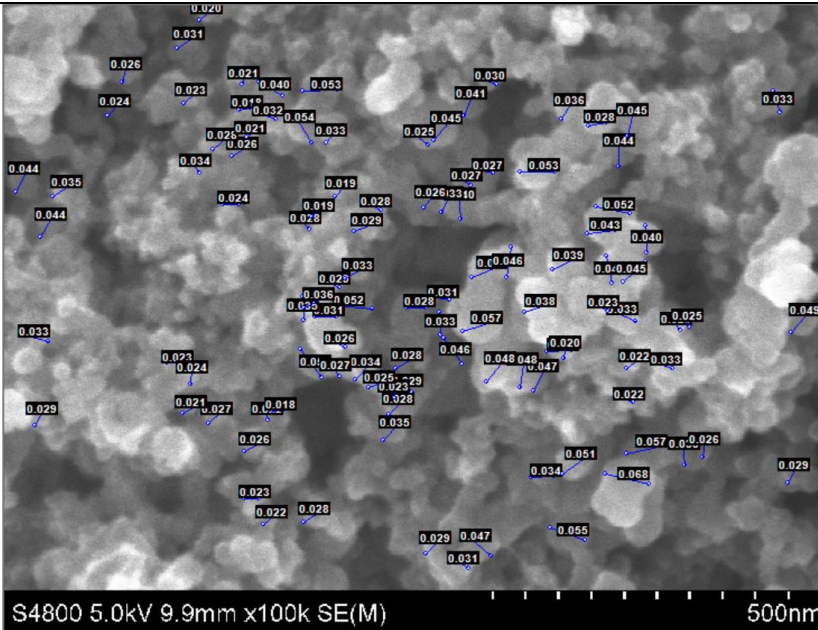
การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Characterization)

ผลการวิเคราะห์ SEM และค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค (SEM Result and Average Particle Size)

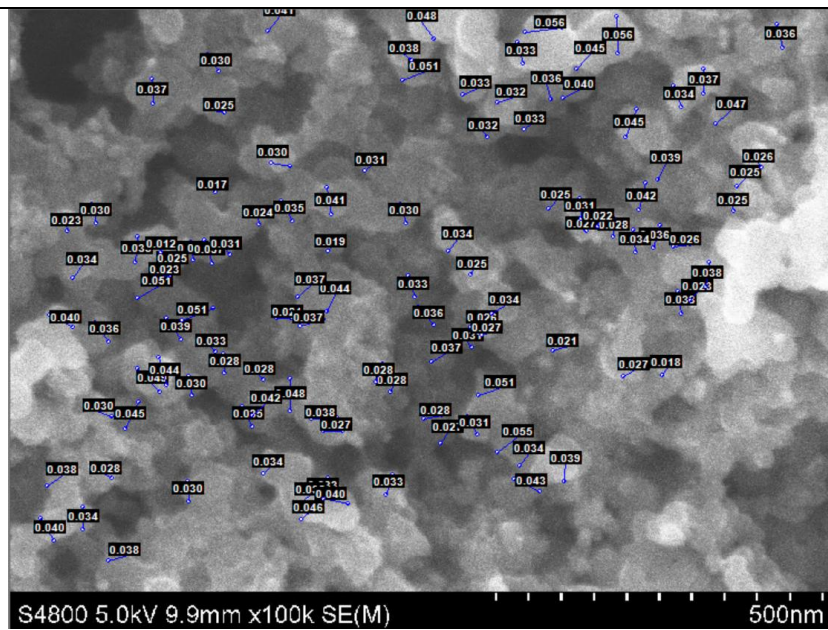
ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนต่าง ๆ ทั้ง ก่อน และ หลังการใช้งาน ได้รับการวัดโดยใช้โปรแกรม SEMAFORE ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เฉพาะทางสำหรับการวิเคราะห์ภาพ SEM โปรแกรมนี้ช่วยให้สามารถวัดขนาดอนุภาคได้อย่างแม่นยำ โดยอาศัยเทคนิคการประมวลผลภาพและการวิเคราะห์ขั้นสูง

ตารางที่ ฅ.1 ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคของตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่วัดได้ ก่อนการใช้งาน โดยใช้โปรแกรม SEMAFORE ภายใต้กำลังขยาย SEM 100,000 เท่า

Catalyst	Figure of catalyst	Average particle size (nm.)
SeCu (1:1)/C		28.7

SeCu (1:2)/C		34.61
SeCu (1:4)/C		34.25

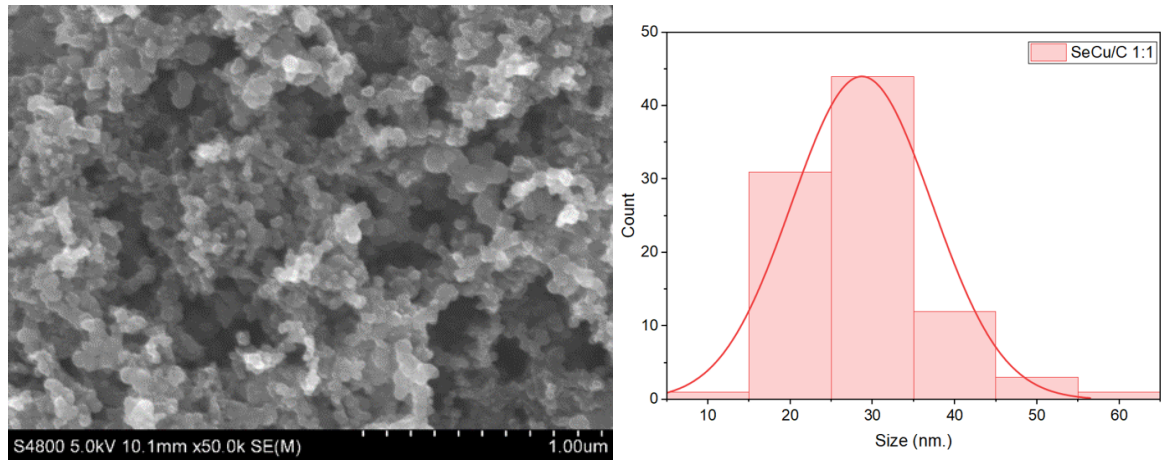
SeCu (1:6)/C



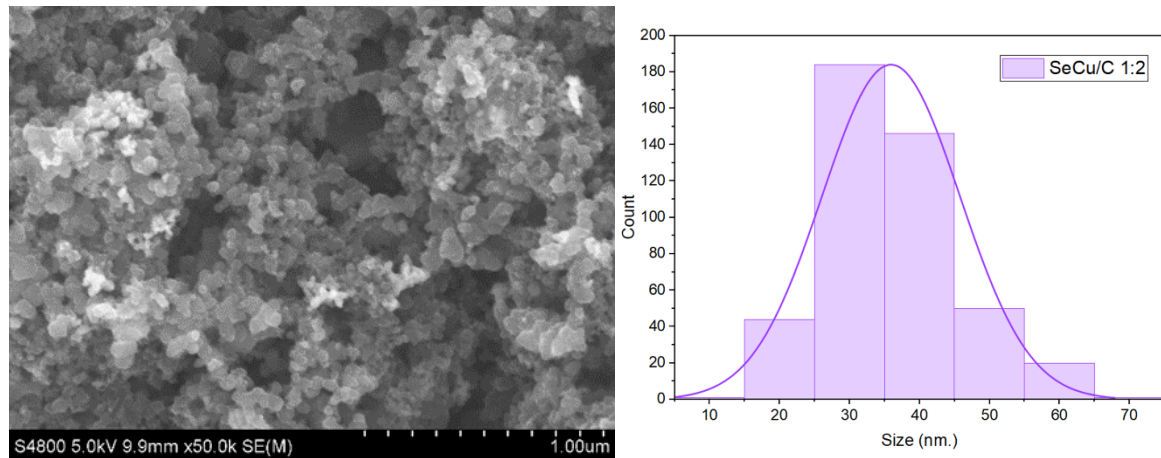
34.82

กราฟการกระจายตัว (Distribution Curve)

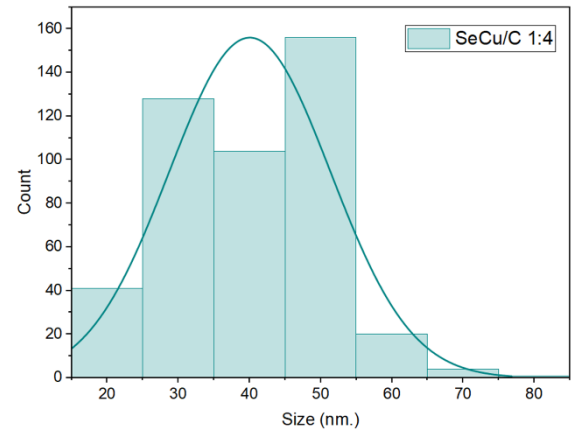
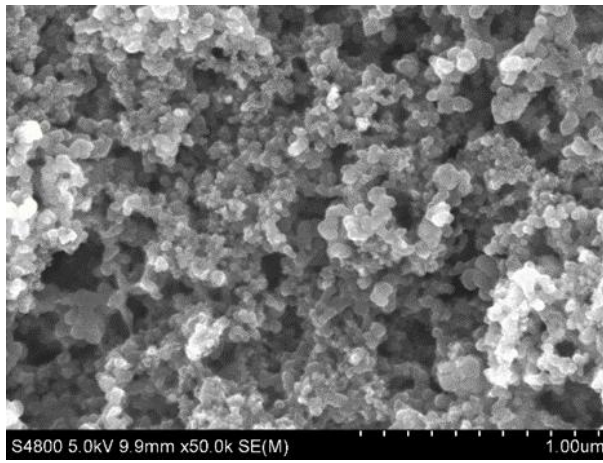
กราฟการกระจายตัวของตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนต่าง ๆ



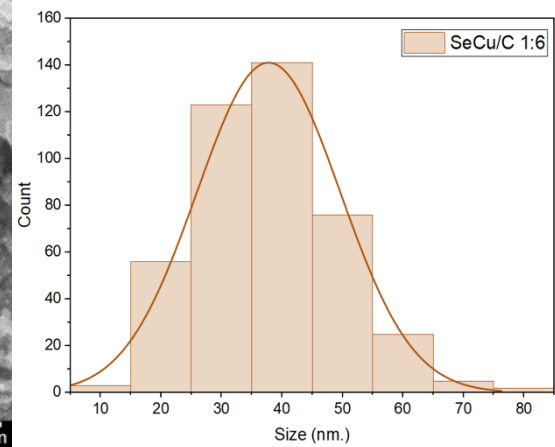
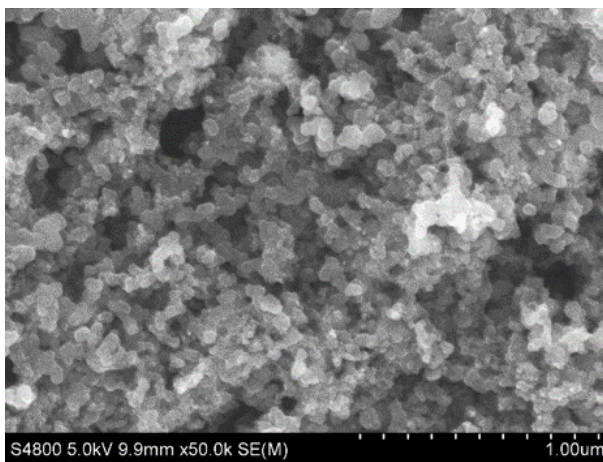
รูปที่ จ.1 SeCu (1:1)/C



รูปที่ จ.2 SeCu (1:2)/C



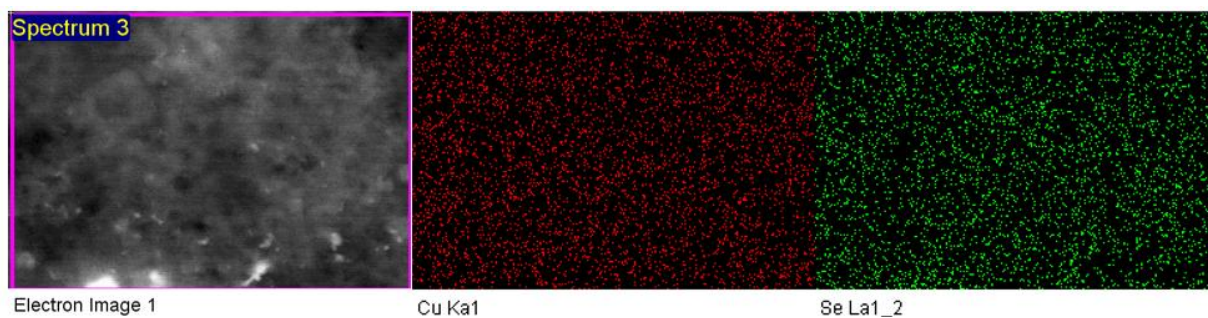
รูปที่ ๓.3 SeCu (1:4)/C



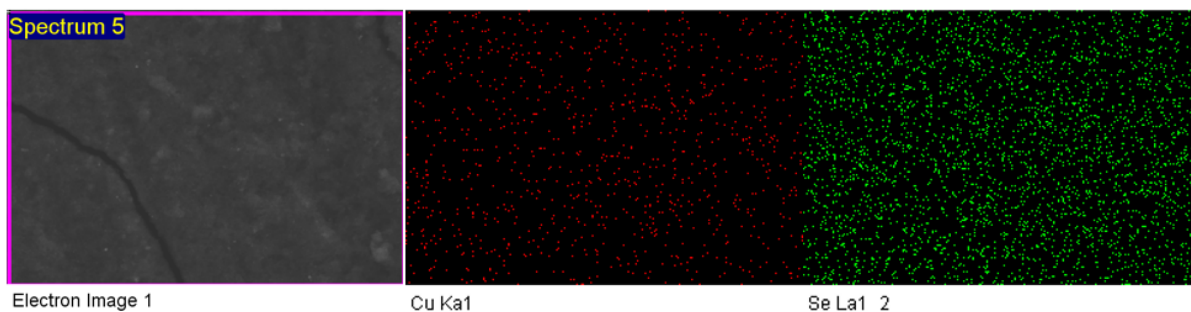
รูปที่ ๓.4 SeCu (1:6)/C

การทำแผนที่ด้วย SEM-EDX (SEM-EDX mapping)

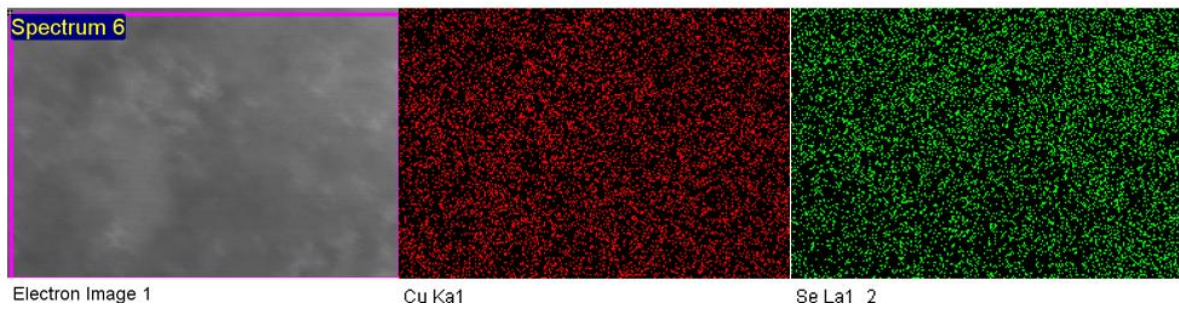
ภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนต่าง ๆ ทั้งก่อนและหลังการใช้งานประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่: **Electron Image** – ภาพอิเล็กทรอนิกส์แบบขาวดำ แสดงลักษณะผิวของตัวอย่าง, **Cu Mapping** – แผนที่การกระจายตัวของทองแดง (Cu) บนพื้นผิวตัวอย่าง แสดงด้วยจุดสีแดง, **Se Mapping** – แผนที่การกระจายตัวของซีลีเนียม (Se) บนพื้นผิวตัวอย่าง แสดงด้วยจุดสีเขียว การแสดงผลทั้งสามส่วนนี้ทำให้สามารถมองเห็นได้ทั้งลักษณะผิวและการกระจายตัวของธาตุสำคัญบนตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างชัดเจน



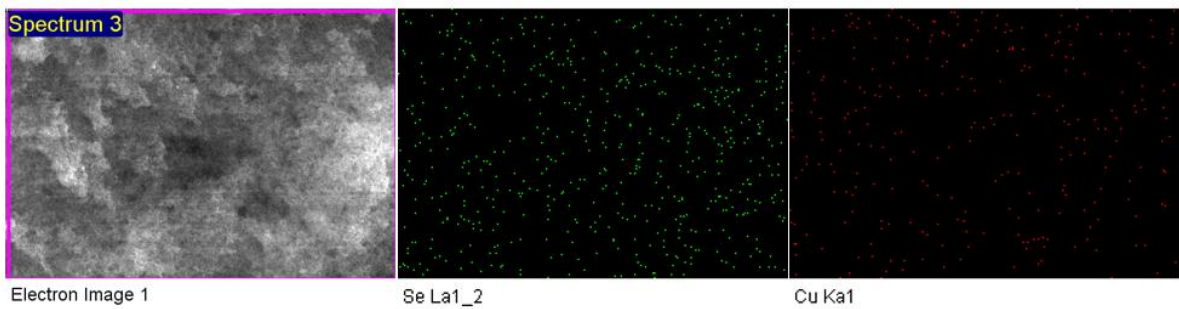
รูปที่ จ.5 SeCu (1:1)/C (Fresh)



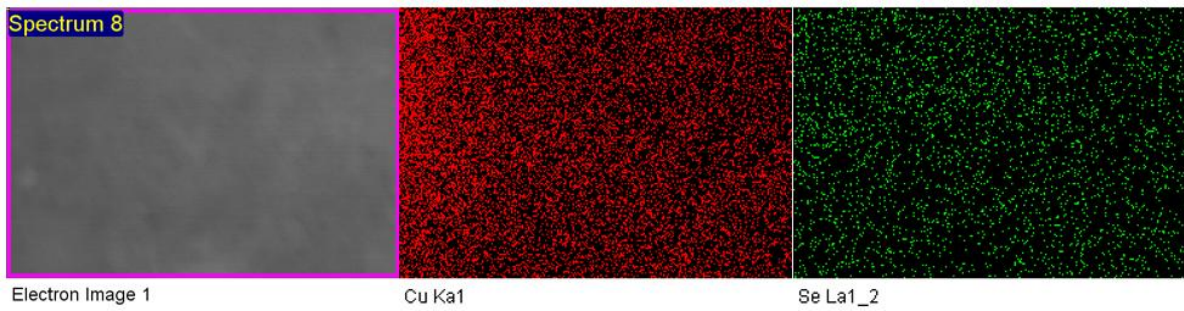
รูปที่ จ.6 SeCu (1:1)/C (Used)



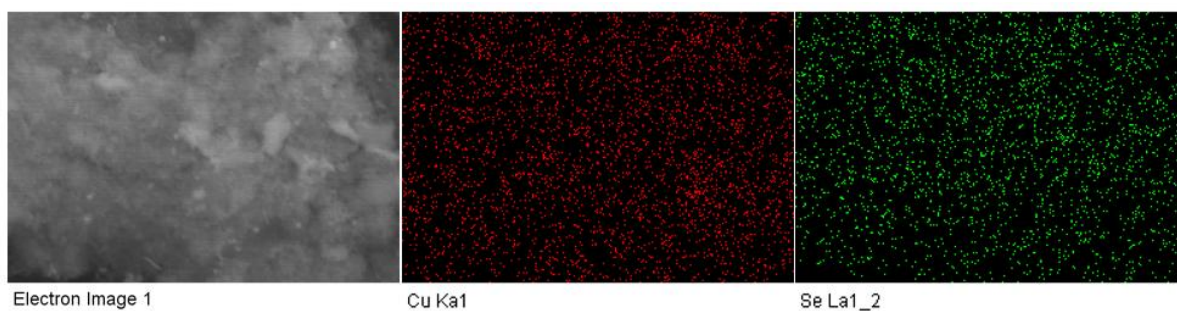
รูปที่ จ.7 SeCu (1:2)/C (Fresh)



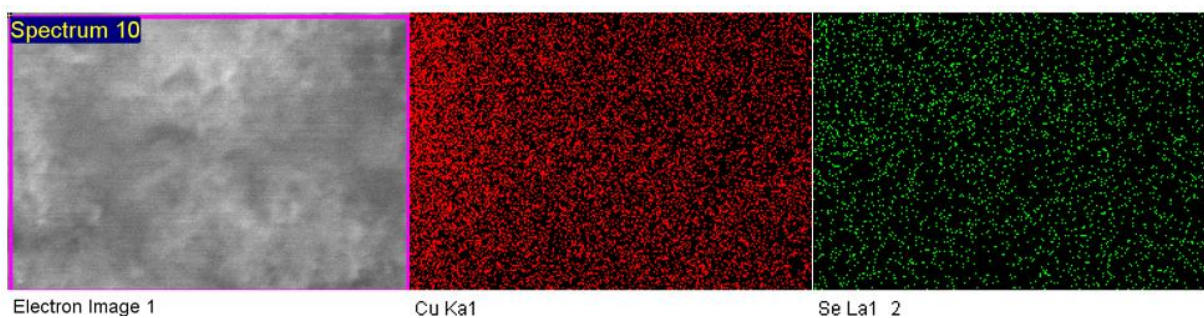
รูปที่ จ.8 SeCu (1:2)/C (Used)



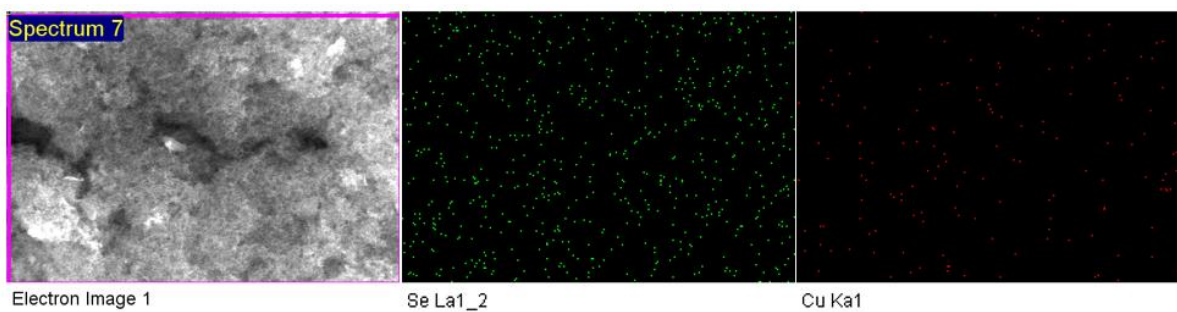
รูปที่ จ.9 SeCu (1:4)/C (Fresh)



รูปที่ จ.10 SeCu (1:4)/C (Used)



รูปที่ จ.11 SeCu (1:6)/C (Fresh)



รูปที่ จ.12 SeCu (1:6)/C (Used)