

# การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนนิเกิลโพลีเมอร์ด้วยวิธี ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าสำหรับการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโซเดียมโบโรไฮไดรด์

สุวิชา จันทน์กะพ้อ<sup>1\*</sup> วีระชาติ กุลศิริเกษม<sup>1</sup> และ อภิรัฐ โกสิตานนท์<sup>2</sup>

วันที่รับ 5 ธันวาคม 2567 วันที่แก้ไข 7 พฤษภาคม 2568 วันตอบรับ 16 กรกฎาคม 2568

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโพลีเมอร์โดยการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า เป็นกระบวนการแบบขั้นตอนเดียว ลดต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพเร่งปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจน ทำการศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชุบเคลือบระยะเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา การทดลองพบว่ามีอนุภาคนาโนขนาดเล็กของโคบอลต์และฟอสฟอรัสกระจายตัวเคลือบทับถมกันอยู่บนพื้นผิวรูพรุนของตัวรองรับ และพบว่าโคบอลต์ฟอสไฟด์ที่มีโครงสร้างอสัณฐานและมีพื้นผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการชุบเคลือบที่มากขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าระยะเวลา 15 นาที ปริมาณ 4.2 กรัม ใช้เร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 20 wt% อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ได้อัตราการผลิตไฮโดรเจน 2.25 ลิตรต่อนาที ที่ความดัน 0.5 บาร์ มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยการพอกพูนไม่ใช้ไฟฟ้า จึงมีความสามารถใช้เร่งปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

**คำสำคัญ:** ตัวเร่งปฏิกิริยา, การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า, ไฮโดรไลซิสโซเดียมโบโรไฮไดรด์

<sup>1</sup> ส่วนงานวิศวกรรมวัสดุระเบิดและนิวเคลียร์ ชิวะ เคมี, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

<sup>2</sup> ส่วนงานวิศวกรรมโลหการและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

\* ผู้แต่ง, อีเมล: suwicha.c@dti.or.th

# Preparation of Electrodeposited Cobalt Phosphide on Nickel Foam for Sodium Borohydride Hydrolysis

Suwicha chankapoe<sup>1\*</sup> Weerachart kulsirikasem<sup>1</sup> and Apirath Gositanon<sup>2</sup>

Received 5 December 2024, Revised 7 May 2025, Accepted 16 July 2025

## Abstract

This research studies the preparation of a cobalt phosphide catalyst on a nickel foam support via a one-step electrodeposition process. This method was aimed to reduce costs and enhance the catalytic efficiency for hydrogen production. The properties of the catalyst were studied with varying electrodeposition times of 5, 10, 15, and 20 minutes, as this factor affects its catalytic performance. The experimental results showed that small cobalt and phosphorus nanoparticles were dispersed and deposited on the porous surface of the support. The resulting amorphous cobalt phosphide catalyst exhibited an increased specific surface area with longer electrodeposition times. The catalyst prepared by electrodeposition for 15 minutes with a mass of 4.2 grams was used to catalyze the hydrolysis of a 20 wt% sodium borohydride solution with a flow rate of 10 mL/min. This catalyst achieved a hydrogen production rate of 2.25 L/min at a pressure of 0.5 bar, which was higher than that of a catalyst prepared by electroless deposition. The findings suggest that the electrodeposited catalyst is suitable for use in hydrogen production for fuel cell applications.

**Keywords:** Catalyst, Electrodeposition, Sodium Borohydride Hydrolysis

---

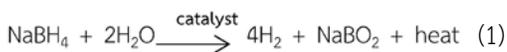
<sup>1</sup> NBC and Explosive Engineering Division, Defence Technology Institute

<sup>2</sup> Metallurgical and Material Engineering Division, Defence Technology Institute

\* Corresponding author: suwicha.c@dti.or.th

## 1. บทนำ

การผลิตไฮโดรเจนจากโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ( $\text{NaBH}_4$ ) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ให้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากมีความจุไฮโดรเจนสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งสามารถจัดเก็บและขนส่งได้ง่าย ทำให้มีความปลอดภัยมากกว่าไฮโดรเจนในสถานะแก๊สหรือของเหลว อีกทั้งสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ภายใต้อุณหภูมิและความดันปรกติ เมื่อนำสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยกระตุ้นให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ทำให้ผลิตไฮโดรเจนได้มากขึ้นด้วย แสดงในสมการ 1



การวิจัยและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเตรียมได้จากการใช้โลหะมีค่า (Noble Metals) เช่น แพลทินัม (Pt) รูทีเนียม (Ru) หรือลดต้นทุนด้วยการใช้สารประกอบเช่น โคบอลต์โบไรด์ ( $\text{CoB}$ ) [1] โคบอลต์ฟอสไฟด์ ( $\text{CoP}$ ) [2] นำมาเคลือบบนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวมาก เช่น อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ด้วยเทคนิคการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating) ใช้การตกตะกอนสะสมชั้นโลหะบนพื้นผิววัสดุด้วยปฏิกิริยาเคมีที่มีขั้นตอนมากและค่าใช้จ่ายสูง ควบคุมความหนาได้ยากจากสัดส่วนปริมาณสารเคมีที่ใช้ เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้ในสภาวะปฏิกิริยาที่รุนแรงพบปัญหาการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วเนื่องจากการยึดเกาะของโลหะบนตัวรองรับมีน้อย จึงต้องนำตัวเร่งปฏิกิริยามาปรับปรุงโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน เป็นต้น เพื่อให้มีแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น และลดการเกิดออกซิเดชันที่จะส่งผลทำให้พื้นที่ผิวลดลงได้ [3] ส่วนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

(Electrodeposition) อาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้า ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันทำให้ออกซิเดชันที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนมาพอกพูนบนผิวหน้าของตัวรองรับที่ต่อกับขั้วไฟฟ้าไว้ [4] ทำให้โลหะยึดติดกับตัวรองรับได้แข็งแรงกว่า สามารถใช้ในสภาวะปฏิกิริยาที่รุนแรงได้ อีกทั้งมีรูปแบบกระบวนการเคลือบที่ง่ายในขั้นตอนเดียวและจัดเตรียมอุปกรณ์ไม่ซับซ้อนลดต้นทุนได้ [5] จึงพัฒนาตัวรองรับที่นำไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีวัสดุชนิดนิเกิลโฟม (Nickel foam) มีคุณสมบัติพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง น้ำหนักเบา และมีการนำไฟฟ้าที่ดี จึงเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาหาระยะเวลาการชุบเคลือบไฟฟ้าซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาให้ได้อัตราการผลิตไฮโดรเจนที่สามารถนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง

## 2. การทบทวนวรรณกรรม

### 2.1 บทความวิจัย

มีการศึกษาที่น่าสนใจ โดย Guode Li and Shulei Chou [6] รวบรวมการศึกษาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเร่งผลิตไฮโดรเจนที่อุณหภูมิห้อง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับทองแดง นิเกิลโฟมและอะลูมินา มีประสิทธิภาพดี มีความคุ้มค่ามากกว่าโลหะชนิดอื่น และการเตรียมด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าทำให้มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นด้วย Byeong Gyu Gang [7] ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโฟมด้วยวิธีพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้าและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์บนตัวรองรับอะลูมินาด้วยวิธีพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้านำไปทดสอบผลิตไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ Keun Woo Cho [8] และ Yueping Guo [9] เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับทองแดงด้วยการชุบเคลือบที่ใช้ไฟฟ้า ได้รับความสัมพันธ์

ของระยะเวลาชุบเคลือบ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารละลาย ที่ส่งผลต่อโครงสร้างอสัณฐานกับความสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส Ningning Bai [10] ศึกษาวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าแบบชั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิห้องในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์/โคบอลต์ฟอสไฟด์เคลือบบนตัวรองรับนิเกิลโฟม แล้วนำไปใช้เร่งปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจนได้มากขึ้น เป็นผลมาจากการที่โลหะเคลือบบนพื้นที่ผิวของตัวรองรับนิเกิลโฟมได้แข็งแรงและมีพื้นที่ผิวมากขึ้น สอดคล้องกับ Wei Youngsheng [11][12] พบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์บนนิเกิลโฟมด้วยกระบวนการชุบเคลือบที่ใช้ไฟฟ้า ทำให้โลหะยึดเกาะตัวรองรับได้อย่างแข็งแรงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากขึ้น จะเห็นได้ว่าการเตรียมโคบอลต์ฟอสไฟด์ให้สามารถเคลือบบนนิเกิลโฟมที่มีพื้นที่ผิวมากด้วยกระแสไฟฟ้า สามารถทำได้ด้วยการใช้ระบบ 2 ขั้วไฟฟ้าควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้จากองค์ประกอบของสารละลายที่ใช้และปรับระยะเวลาในการชุบเคลือบที่จะส่งผลต่อโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นและพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยึดติดกับตัวรองรับ ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจจะศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโฟมด้วยกระบวนการชุบเคลือบที่ใช้ไฟฟ้า ด้วยการใช้ระยะเวลาในการชุบเคลือบ 5, 10, 15 และ 20 นาที นำผลวิเคราะห์พื้นผิว องค์ประกอบ โครงสร้างผลึก และพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณโลหะเคลือบบนตัวรองรับมากที่สุด นำไปทดสอบใช้เร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ผลิตไฮโดรเจนเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโฟมด้วยกระบวนการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้า ด้วยชุดอุปกรณ์วัดประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน

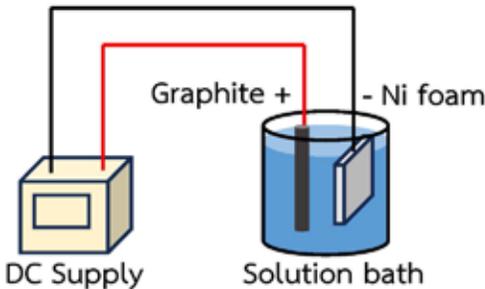
### 3. วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโฟมด้วยวิธีการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้า

เตรียมสารละลาย โคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซาไฮเดรต ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 98%, KemAus) 0.1 โมลต่อลิตร ไกลซีน ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ , AR Grade, RCI Labscan) 0.6 โมลต่อลิตร โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์โมโนไฮเดรต ( $\text{NaPH}_2\text{O}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , AR Grade, KemAus) 0.8 โมลต่อลิตร และน้ำปราศจากไอออน (DI water) ปรับความเป็นกรด-เบส ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ , 99% AR Grade, QReC) ให้ได้ค่า pH เท่ากับ 12 ในน้ำปราศจากไอออน 300 มิลลิลิตร ใช้เป็นสารละลายในการชุบเคลือบตัวรองรับโลหะนิเกิลโฟม (Nickel foam, 99%, MTI) จำนวนรูพรุน 110 PPI ขนาดความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 4.5 เซนติเมตร และความหนา 0.1 เซนติเมตร ที่เตรียมผิวโดยการทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วล้างด้วยเอทานอล ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , 99% AR Grade, MERCK) ในเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์นำมากัดผิวด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ , 37%, QReC) 0.3 มิลลิลิตร ในน้ำปราศจากไอออน 1,000 มิลลิลิตร เตรียมผิวให้เป็นตัวเร่งด้วยทิน (II) คลอไรด์ไดไฮเดรต ( $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 98% AR Grade, Alfa Aesar) 0.3 กรัม และกรดไฮโดรคลอริก 0.3 มิลลิลิตร ในน้ำปราศจากไอออน 300 มิลลิลิตร และกระตุ้นผิวด้วยแพลเลเดียมไดคลอไรด์ ( $\text{PdCl}_2$ , 99% AR Grade, ACROS) 0.003 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 300 มิลลิลิตร ทำการแช่ตัวรองรับที่เตรียมไว้ในสารละลายที่ให้ความร้อนมีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และกวนที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ปล่อยทิ้งให้แห้งในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง [13]

### 3.2 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโพลีเมอร์ด้วยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

เตรียมตัวรองรับโลหะนิเกิลโพลีเมอร์ 110 PPI ขนาดความกว้าง 6 เซนติเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร และความหนา 0.1 เซนติเมตร แช่ในเอทานอลและให้เครื่องอัลตราโซนิกส์ทำงานที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำมาแช่กรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตรเป็นเวลา 30 นาที นำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำมาต่อกับขั้วลบของชุดอุปกรณ์ชุบเคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าและต่อขั้วบวกกับแท่งแกรไฟต์ แสดงในรูปที่ 1 จุ่มแผ่นนิเกิลโพลีเมอร์ในสารละลายโคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซาไฮเดรต 0.1 โมลต่อลิตร ไกลซีน 0.6 โมลต่อลิตร โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์โมโนไฮเดรต 0.8 โมลต่อลิตร และน้ำปราศจากไอออนที่ปรับความเป็นกรด-เบส ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้ค่า pH เท่ากับ 12 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าคงที่ 200 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์ชุบเคลือบด้วยกระแสไฟฟ้า

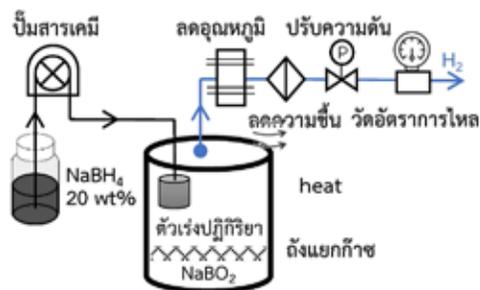
ของตัวรองรับนิเกิลโพลีเมอร์ ชุบเคลือบระยะเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชุบเคลือบไฟฟ้าเสร็จแล้วล้างด้วยเอทานอลและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง [14]

### 3.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้นำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พร้อมวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเชิงปริมาณ แสดงผลภาพถ่ายพื้นผิว สเปกตรัมและวิเคราะห์เชิงปริมาณ (SEM-EDS, Zeiss Sigma 500 VP, Germany) วิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ (BET, Micromeritics ASAP 2460, USA) วิเคราะห์โครงสร้างของผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD, PANalytical X'Pert PRO, Netherlands) และคำนวณร้อยละของโลหะ (% metal loading)

### 3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน

อัตราการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen Generation Rate, HGR) คือ ปริมาณของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลาและมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยา หาค่าได้จากการบันทึกผลอัตราการไหลพร้อมผลรวมของปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ทั้งหมดด้วยชุดอุปกรณ์วัดประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน แสดงในรูปที่ 2 ดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 700 มิลลิลิตร ที่เตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 wt% โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 20 wt% และน้ำปราศจากไอออนให้มีการควบคุมการไหลของสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ด้วยปั๊มขนาด 10 มิลลิลิตรต่อนาที



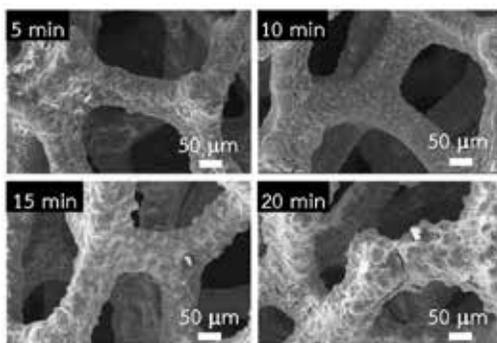
รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์วัดประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน

ดูดสารละลายจากภาชนะบรรจุเข้าสู่ลูกที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับน้ำหนัก 4.2 กรัม อยู่ในถังแยกก๊าซที่มีระบบควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่คายความร้อนไม่ให้มากกว่า 70 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดความปลอดภัยและผลิตไฮโดรเจนได้อัตราคงที่ แยกโซเดียมเมตาบอเรต ( $\text{NaBO}_2$ ) ออกมาอยู่ด้านล่างของถัง พร้อมกับน้ำไฮโดรเจนที่ผลิตได้ไปลดความร้อนด้วยน้ำ และลดความชื้นด้วยซิลิกาเจล แล้วปรับแรงดันไฮโดรเจนขาออกให้คงที่ที่ 0.5 บาร์ เพื่อวัดและบันทึกปริมาณไฮโดรเจนด้วยเครื่องวัดอัตราการไหล (OMEGA FMA4000, USA) นำค่าเฉลี่ยของปริมาตรของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลาเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนตัวรองรับได้ ค่าอัตราการผลิตไฮโดรเจนที่แสดงถึงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

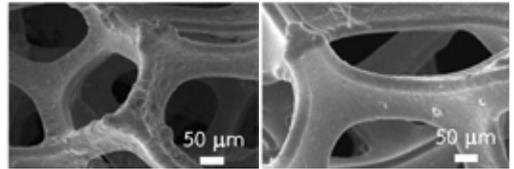
#### 4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

##### 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบของธาตุเชิงปริมาณ

แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาถึงรายละเอียดของรูปร่างและขนาดของอนุภาคผลึกบนตัวรองรับในรูปที่ 3 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวที่เคลือบบน



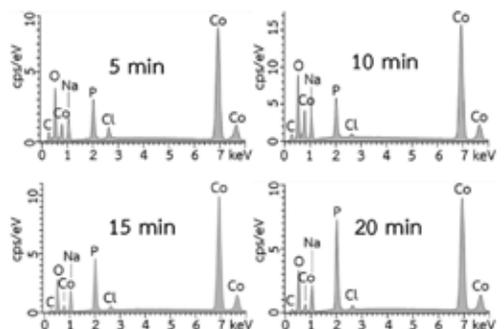
CoP/Ni foam Electrodeposition



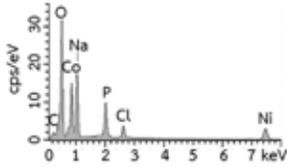
CoP/Ni foam Electroless plating Nickel foam

##### รูปที่ 3 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง

ตัวรองรับที่เตรียมด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า มีลักษณะเป็นผลึกทรงกลมและทับถมกันอย่างไม่เป็นระเบียบกระจายอยู่บนพื้นผิวของตัวรองรับทั้งด้านบนและด้านในรูพรุน มีการทับถมมากขึ้นตามระยะเวลาในการชุบเคลือบที่เพิ่มขึ้น ส่วนลักษณะของผลึกที่เคลือบบนตัวรองรับด้วยวิธีการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้าพบมีการกระจายอยู่ภายนอกรูพรุนของตัวรองรับในรูปที่ 4 และตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีระบุปริมาณของธาตุและองค์ประกอบอื่นบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค EDS พบที่โคบอลต์และฟอสฟอรัสที่พื้นผิวของตัวรองรับซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของโคบอลต์ฟอสไฟด์ โดยองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้วิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าระยะเวลา 15 นาที มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโคบอลต์มากที่สุดและมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการชุบเคลือบที่ใช้ไฟฟ้าส่งผลต่อการมีอยู่ของโคบอลต์และฟอสฟอรัสบนพื้นผิวของตัวรองรับ



CoP/Ni foam Electrodeposition



CoP/Ni foam Electroless plating

รูปที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค EDS

#### 4.2 การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ

พิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบของโลหะโคบอลต์มากที่สุดได้จากวิธีการชุบเคลือบด้วย

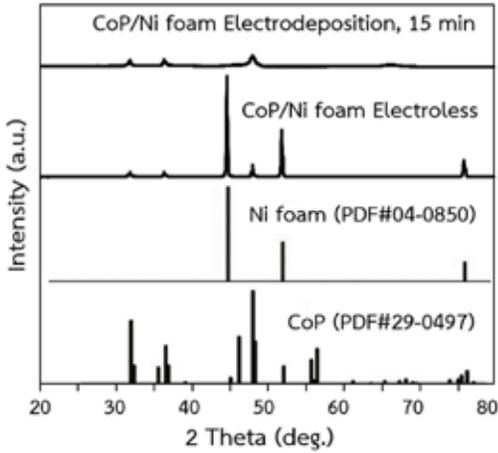
ไฟฟ้าที่ใช้ระยะเวลา 15 นาที นำไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซ แสดงในตารางที่ 2 พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าเกิดการสะสมของอนุภาคโลหะบนพื้นผิวของตัวรองรับทำให้เกิดการเติบโตแบบสามมิติ (3D) ได้มากกว่า สอดคล้องกับการคำนวณร้อยละน้ำหนักของ CoP จากการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้ามีมากกว่าด้วย

ตารางที่ 1 ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา

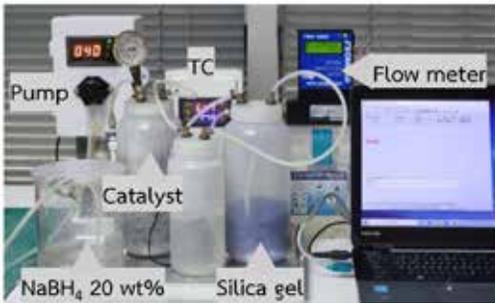
CoP/Ni foam	องค์ประกอบธาตุ (wt%)						
	Co	C	O	P	Na	Cl	Ni
Electrodeposition							
5 min	60.8	9.7	13.6	5.2	7.2	1.5	2.0
10 min	63.4	7.5	15.1	5.5	8.1	0.4	-
15 min	70.1	3.8	8.6	8.3	8.6	0.6	-
20 min	62.9	4.1	10.5	12.6	9.3	0.6	-
Electroless	47.3	14.4	14.9	6.8	5.2	0.9	10.5

ตารางที่ 2 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและเปอร์เซ็นต์การโหลดของตัวเร่งปฏิกิริยา

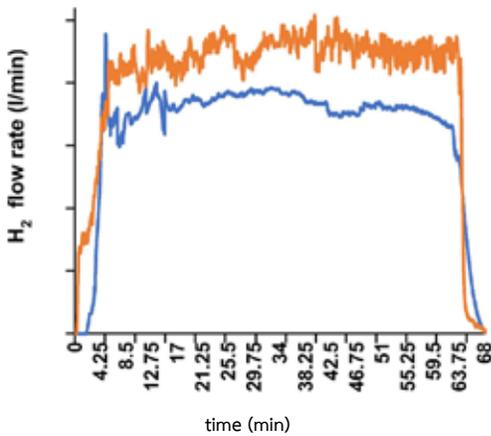
ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ย (m <sup>2</sup> /g)	องค์ประกอบธาตุ (wt%)		
		ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	ปริมาตรรูพรุนเฉลี่ย (cm <sup>3</sup> /g)	ร้อยละของ CoP (wt%)
Ni Foam	0.3187	20.95945	0.002041	
CoP/Ni foam Electrodeposition*				
	1.7836	7.94002	0.003626	50.3
CoP/Ni foam Electroless				
	0.3422	8.81539	0.000876	27.1



รูปที่ 5 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 6 ชุดอุปกรณ์ทดสอบเร่งปฏิกิริยา  
การผลิตไฮโดรเจน



รูปที่ 7 อัตราการผลิตไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยา

### 4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก

ผลวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโพลีที่ชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าระยะเวลา 15 นาที พบพีคหลักของโคบอลต์ฟอสไฟด์ที่มีมุม  $2\theta$  ประมาณ  $31.6^\circ$  (111),  $36.2^\circ$  (200) และ  $48.1^\circ$  (211) ตาม PDF#29-0497 แสดงในรูปแบบที่ 5 สอดคล้องกับ Ningning Bai [10] ที่พบพีคมีความเข้มต่ำและฐานกว้าง บ่งบอกถึงการมีปริมาณโคบอลต์ฟอสไฟด์ที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous structure) ไม่มีระเบียบผลึกที่ชัดเจนเคลือบอยู่บนตัวรองรับเป็นพื้นผิวที่ไม่สมมาตร และมีตำแหน่งว่างสำหรับการเกิดจุดเร่งปฏิกิริยามากขึ้น ส่งผลให้มีจำนวนตำแหน่งที่ออกฤทธิ์ทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemically active sites) มากกว่า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา [15]

### 4.4 การทดสอบอัตราการผลิตไฮโดรเจน

รูปที่ 6 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ฟอสไฟด์บนนิเกิลโพลีที่เตรียมด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าระยะเวลา 15 นาที ในรูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบอัตราการผลิตไฮโดรเจนเฉลี่ย 2.25 ลิตรต่อนาที (SD = 0.1) ที่แรงดัน 0.5 บาร์ อัตราการผลิตไฮโดรเจน 2.58 ลิตรต่อนาทีกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้าและหาเปอร์เซ็นต์การแปรสภาพ (% conversion) จากอัตราการไหลของไฮโดรเจนที่ผลิตได้มากกว่า 2 ลิตรต่อนาทีอยู่ที่ 45% มีระยะเริ่มต้น (Initial Stage) 5 นาที

## 5. สรุปและอภิปรายผล

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าทำให้มีการกระจายตัวและมีการเคลือบที่ถมของอนุภาคโคบอลต์ฟอสไฟด์บนตัวรองรับนิเกิลโพลีมีพื้นที่ผิวมากขึ้น เกิดโครงสร้างอสัณฐานและมีแรงยึดเกาะมากขึ้น ทำให้สามารถนำไปใช้ในสภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงส่งผลให้เร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ

โซเดียมโบโรไฮไดรด์ผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้า อีกทั้งการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำได้ในกระบวนการขั้นตอนเดียวสามารถลดต้นทุนได้ด้วย ใช้เร่งผลิตไฮโดรเจนได้อย่างต่อเนื่องมากกว่า 2 ลิตรต่ออนาที เพียงพอสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง UL-200W ขนาด 200 วัตต์ ผลิตกระแสไฟฟ้า 8 แอมป์ แรงดัน 25 โวลต์ สำหรับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก [16][17] อย่างไรก็ตามพบว่า การเกิดปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจนในช่วงแรกใช้ระยะเวลาสั้น นานาพิจารณาศึกษานำตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีระยะเริ่มต้นน้อยกว่ามาใช้ร่วมด้วยในสัดส่วนที่เหมาะสม เป็นการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยการสนับสนุนทุนการวิจัย อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย และพื้นที่ในการทำวิจัย รวมไปถึงการอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ จากโครงการวิจัยพื้นฐานวิจัยและพัฒนาระบบเก็บแก๊สไฮโดรเจนในรูปสารเคมีของส่วนงานวิศวกรรมวัสดุระเบิดและนิวเคลียร์ ชิวะ เคมี ฝ่ายวิจัยและพัฒนา การสนับสนุนเจ้าหน้าที่และเครื่องมือทดสอบคุณสมบัติของวัสดุของส่วนงานวิศวกรรมโลหการและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยและแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องจนทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. I. Simagina *et al.*, “Recent advances in applications of Co-B catalysts in NaBH<sub>4</sub>-based portable hydrogen generators,” *Catalysts*, vol. 11, no. 2, Feb. 2021, Art. no. 268. doi: 10.3390/catal11020268.
- [2] H. M. Youssef *et al.*, “Fabrication of CoP@P, N-CNTs-deposited nickel foam for energy-efficient hydrogen generation via electrocatalytic urea oxidation,” *Catalysts*, vol. 15, no. 7, Jul. 2025, Art. no. 652. doi: 10.3390/catal15070652.
- [3] T. H. Oh and S. Kwon, “Performance evaluation of hydrogen generation system with electroless-deposited Co-P/Ni foam catalyst for NaBH<sub>4</sub> hydrolysis,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, no. 15, pp. 6425-6435, May 2013.
- [4] H. N. Abdelhamid, “A review on hydrogen generation from the hydrolysis of sodium borohydride,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 45, no. 38, pp. 19317-19333, Aug. 2020.
- [5] H. Dai, Y. Liang, P. Yao, C. Chen, and X. Wang, “Amorphous cobalt-boron/nickel foam as an effective catalyst for hydrogen generation from alkaline sodium borohydride solution,” *J. Power Sources*, vol. 177, no. 1, pp. 174-180, Feb. 2008.
- [6] G. Li *et al.*, “Non-noble metal-based catalysts applied to hydrogen evolution from hydrolysis of boron hydrides,” *Small Struct.*, vol. 2, no. 7, Jul. 2021, Art. no. 2100013.
- [7] B. G. Gang, J. M. Kim, S. W. Choi, and J. H. Lee, “Transient behavior of proton exchange membrane fuel cells over a cobalt-phosphorous/nickel foam catalyst with sodium borohydride,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, no. 1, pp. 524-533, Jan. 2016.

- [8] K. W. Cho and H. S. Kwon, "Effects of electrodeposited Co and Co-P catalysts on the hydrogen generation properties from hydrolysis of alkaline sodium borohydride solution," *Catal. Today*, vol. 120, no. 3-4, pp. 298-304, Feb. 2007. doi: 10.1016/j.cattod.2006.09.012.
- [9] Y. Guo *et al.*, "Electrodeposited amorphous Co-P catalyst for hydrogen generation from hydrolysis of alkaline sodium borohydride solution," *J. Mol. Catal. A: Chem.*, vol. 378, pp. 273-278, Nov. 2013. doi: 10.1016/j.molcata.2013.06.019.
- [10] N. Bai *et al.*, "One-step electrodeposition of Co/CoP film on Ni foam for efficient hydrogen evolution in alkaline solution," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 8, no. 43, pp. 29419-29426, Nov. 2016. doi: 10.1021/acsami.6b09338.
- [11] Y. Wei *et al.*, "Preparation of three-dimensional nickel foam supported cobalt catalyst by electrodeposition and its process optimization," *Mater. Rep.*, vol. 32, no. 19, pp. 3304-3308, Oct. 2018. doi: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.19.006.
- [12] Y. Wei *et al.*, "Highly efficient and reactivated electrocatalyst of ruthenium electrodeposited on nickel foam for hydrogen evolution from NaBH<sub>4</sub> alkaline solution," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 43, no. 2, pp. 592-600, Jan. 2018. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.111.
- [13] H. Kim, T. H. Oh, and S. Kwon, "Simple catalyst bed sizing of a NaBH<sub>4</sub> hydrogen generator with fast startup for small unmanned aerial vehicles," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, no. 2, pp. 1018-1026, Jan. 2016. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.026.
- [14] B. G. Gang, "The selective zero emission power systems between NaBH<sub>4</sub>-based fuel cells and solar cells for UAVs," *Int. J. Aeronaut. Space Sci.*, vol. 21, no. 4, pp. 1017-1027, Dec. 2020. doi: 10.1007/s42405-020-00266-9.
- [15] C. Yao *et al.*, "Porous CoP@N/P co-doped carbon/CNTs nanocubes: In-situ autocatalytic synthesis and excellent performance as the anode for lithium-ion batteries," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 512, May 2020, Art. no. 145690. doi: 10.1016/j.apsusc.2020.145690.
- [16] T. H. Oh *et al.*, "Sodium borohydride hydrogen generator using CoP/Ni foam catalysts for 200 W proton exchange membrane fuel cell system," *Energy*, vol. 90, part 1, pp. 1163-1170, Oct. 2015. doi: 10.1016/j.energy.2015.06.072.
- [17] *UL-200W Fuel Cell Stack User Manual*, Horizon Fuel Cell Korea, Mar. 2017.