

การพัฒนาชีวไฟฟ้าทั้งสแตนด์เอโลนเพื่อผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการไฟฟ้าเคมีเชิงแสง

กัลยา ทองมาก¹, ธีระ บุตรบุรี², จักรพล พันธุ์วงศ์ภักดี¹, ศุภศิลา ทวีศักดิ์³, และ เพียงใจ พิระเกียรติขจร^{1*}

¹คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม

²ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ 111 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี

³คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี

* Corresponding author: piangjai.pee@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

พลังงานไฮโดรเจนจัดเป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนที่มีประสิทธิภาพและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ สามารถผลิตด้วยปฏิกิริยาการแยกโมเลกุลน้ำในกระบวนการไฟฟ้าเคมีเชิงแสง โดยอาศัยสารกึ่งตัวนำและแสง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ชีวไฟฟ้าฟิล์มบางนาโนทั้งสแตนด์เอโลน (WO_3) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล เพื่อผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการไฟฟ้าเคมีเชิงแสง และศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน โดยกำหนดอุณหภูมิ 120 150 และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ต่างๆ จากการศึกษาพบว่าฟิล์มบางนาโน WO_3 มีโครงสร้างแบบ 2 มิติ ลักษณะรูปร่างเป็นนาโนเพลท (Nanoplate) และโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก (Monoclinic) แสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 475 นาโนเมตร นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในสังเคราะห์ฟิล์มบางแตกต่างกันส่งผลต่อโครงสร้างผลึกและความสามารถในการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง WO_3 จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยชีวไฟฟ้า WO_3 ที่อุณหภูมิ 120 °C แสดงค่ากระแสไฟฟ้ามากที่สุด ประมาณค่าได้ 2.82 mA/cm² ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมซัลเฟต 0.5M ภายใต้ความเข้มแสง AM 1.5G (100 mW/cm²) เนื่องจากให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด และแสดงโครงสร้างผลึกที่ดี เกิดการแยกกันของอิเล็กตรอนและโฮลได้ดี ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของน้ำและผลิตไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการเตรียมชีวไฟฟ้าฟิล์มบาง WO_3 ที่ได้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนในปฏิกิริยาการแยกโมเลกุลน้ำในกระบวนการไฟฟ้าเคมีเชิงแสง ด้วยวิธีการสังเคราะห์ที่ง่าย ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : ไฮโดรเจน / พลังงานทดแทน / ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเชิงแสง / ทั้งสแตนด์เอโลน / ไฮโดรเทอร์มอล

Development of Tungsten Oxide Photoelectrode for Hydrogen Production in Photoelectrochemical Process

Kanlaya Thongmak¹, Teera Butburee², Supphasin Thaweesak³, Jakkapon Phanthuwongpakdee¹, and Piangjai Peerakiatkhajohn^{1*}

¹ Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Nakhon Pathom, Thailand.

² National Nanotechnology Center (NANOTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani, Thailand.

³ Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand.

* Corresponding author: piangjai.pee@mahidol.ac.th

Abstract

Hydrogen energy is an efficient renewable fuel that helps reduce greenhouse gas emissions. It can be produced through the photoelectrochemical (PEC) water-splitting reaction using semiconductors and light. This study aims to synthesize tungsten oxide (WO₃) nanostructured thin film photoelectrodes via the hydrothermal method for hydrogen production. The influence of synthesis temperatures at 120, 150, and 180 °C for 12 hours was investigated. The physical and chemical properties of the WO₃ thin films were characterized using analytical techniques. The results revealed that the WO₃ thin films exhibited a two-dimensional nanoplate morphology with a monoclinic crystal structure and showed a light absorption edge at 475 nm. It was found that the different temperature effected on the crystallinity structure and optical property of photoelectrode, leading to different current density values. The WO₃ photoelectrode synthesized at 120 °C exhibited the highest current density, approximately 2.82 mA/cm² in a 0.5 M sodium sulfate electrolyte solution under AM 1.5G illumination (100 mW/cm²). This photoelectrode showed optimal optical absorption and favorable crystallinity, promoting effective electron-hole separation and enhancing water redox reactions for efficient hydrogen production. Thus, temperature is a crucial factor in the synthesis of WO₃ thin film photoelectrodes, which can be practically applied for hydrogen generation through photoelectrochemical water splitting using a simple, low-cost, and environmentally friendly method.

Keywords: Hydrogen / Renewable energy / Photoelectrochemical process / Tungsten oxide / Hydrothermal

1. บทนำ

เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานหลักของโลกเนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานสูง อย่างไรก็ตาม การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน [1] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยแหล่งพลังงานทดแทนมีบทบาทสำคัญในการบรรลุเป้าหมายการปล่อยมลพิษสุทธิเป็นศูนย์และความเป็นกลางทางคาร์บอน ทำให้จำเป็นต้องมีนวัตกรรมและพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนเพิ่มเติม ซึ่งถือเป็นแนวทางที่สำคัญที่สุดแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน [2, 3] พลังงานไฮโดรเจนจัดเป็นเชื้อเพลิงสะอาดที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูง มีแนวโน้มว่าในอนาคตจะเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่สำคัญมาก โดยมีค่าพลังงานสูงกว่าพลังงานเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนถึง 2.5 เท่า การเผาไหม้ไม่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก [4] จากการศึกษาพบว่ากระบวนการอิเล็กโทรไลซิสของน้ำนั้นเกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้สารกึ่งตัวนำและพลังงานแสงอาทิตย์ในการแยกโมเลกุลของน้ำ (solar water splitting) โดยการสร้างกระบวนการไฟฟ้าเคมีเชิงแสง (PEC) เพื่อผลิตพลังงานไฮโดรเจน เทคนิคนี้กำลังได้รับความสนใจในการผลิตพลังงานไฮโดรเจน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ ไม่ซับซ้อน มีต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [5]

ทังสเตนออกไซด์ (Tungsten oxide, WO_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตัวหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำมาใช้ในกระบวนการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเชิงแสง เนื่องจากมีคุณสมบัติการดูดกลืนในช่วงแสงที่ตามองเห็น มีช่องว่างแถบพลังงาน อยู่ที่ 2.6 - 3.0 eV รวมถึงมีความสามารถในการออกซิไดซ์ดีและราคาถูก [6] อีกทั้งจากงานวิจัยของ Tehrani et al. (2020) ได้ระบุว่า WO_3 สามารถควบคุมการเปลี่ยนทางสัณฐานวิทยา ความเป็นผลึก และคุณสมบัติทางแสงได้ด้วยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในกระบวนการกวนไฮโดรเทอร์มอล ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา และการใช้สารตั้งต้น [7] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา WO_3 ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล และศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WO_3 ในกระบวนการกวนไฮโดรเทอร์มอล ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เชิงแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้หรือพัฒนาต่อยอดในด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมต่อไปได้

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา WO_3 ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลอย่างง่าย
2. เพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา WO_3 ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการไฟฟ้าเคมีเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา WO_3

3. ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา WO_3 ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลอย่างง่ายเพื่อผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการไฟฟ้าเคมี เชิงแสงอย่างมีประสิทธิภาพ ที่ง่าย ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา WO_3 ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล โดยกำหนดอุณหภูมิ 120 150 และ 180 องศาเซลเซียส
2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา WO_3
3. ทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการไฟฟ้าเคมีเชิงแสง เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงของเวลาและศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

4. วิธีการศึกษา

4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา WO_3 ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

เตรียมสารละลายตั้งต้นทังสเตนออกไซด์ โดยละลายโซเดียมทังสเตตไดไฮดรอต ($Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$) 0.1 กรัม ในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร และเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ปริมาณ 2 มิลลิลิตร ค่อย ๆ หยดลงในสารละลาย และกวนผสมเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเติมกรดซัลฟูริก 0.2 กรัม ในน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร กวนผสมเป็นเวลา 20 นาที เมื่อกวนสารละลาย

เรียบร็อยนำมาเทใส่ในหม้อนึ่งความดันไอน้ำชนิดบุเทฟลอน (Teflon-lined stainless autoclave) ขนาด 50 มิลลิลิตร และวางแผ่นกระจกนำไฟฟ้า โดยวางแผ่นด้านนำไฟฟ้าให้สัมผัสสารละลายในหม้อนึ่งความดันไอน้ำชนิดบุเทฟลอน จากนั้นนำเข้าสู่ตู้อบและตั้งอุณหภูมิที่จะศึกษาที่ 120 150 และ 180 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำกระจกนำไฟฟ้า ออกมาล้างด้วยตัวทำละลายเอทานอล และน้ำกลั่น ทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะก๊าซออกซิเจน

4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของขี้ไฟฟ้า

ศึกษาลักษณะรูปร่าง ขนาด องค์ประกอบธาตุ หมู่ฟังก์ชันของขี้ไฟฟ้า โครงสร้างผลึก และการดูดกลืนแสง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDS) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (XRD) รามานสเปกโตรมิเตอร์ และเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis) ตามลำดับ

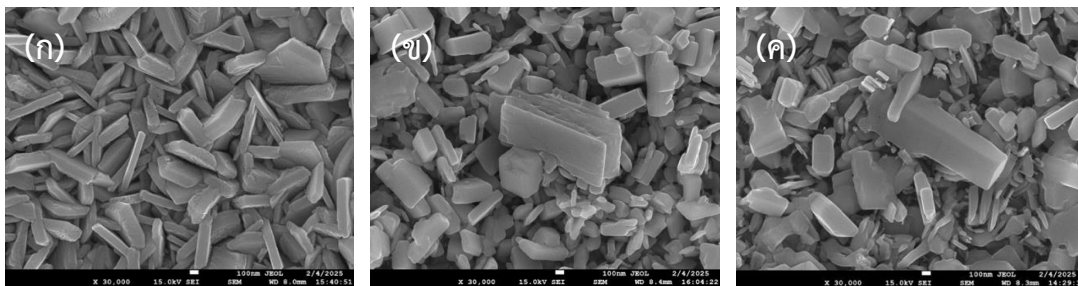
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการไฟฟ้าเคมีเชิงแสง

ทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบรูปตัวเอช (H-cell reactor) และวัดค่ากระแสไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงของเวลา (Current- Time, IT) ด้วยเครื่อง CHI Instruments โดยกำหนดให้ขี้ไฟฟ้าที่เตรียมเป็นขี้แอโนดแพลทินัม (Pt) เป็นขี้แคโทด และ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขี้อ้างอิง ภายใต้ความเข้มแสงที่ใช้ AM 1.5 หรือ 100 mW/cm²

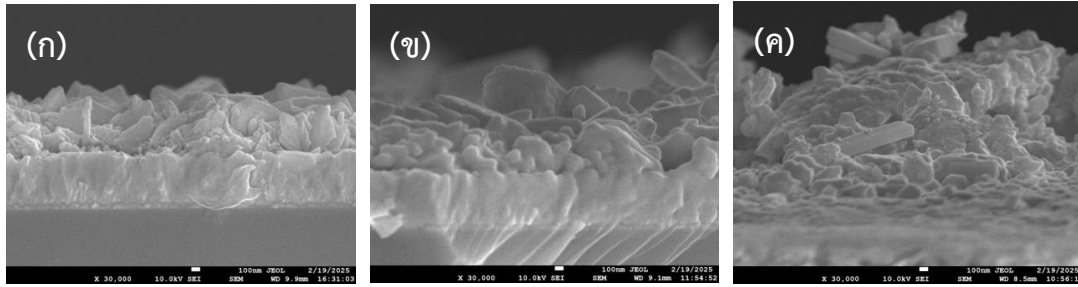
5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

5.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของขี้ไฟฟ้าทั้งสแตนออกไซด์

5.1.1 การศึกษาโครงสร้างสัณฐาน และองค์ประกอบธาตุของขี้ไฟฟ้า WO₃ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (FE-SEM) จากการวิเคราะห์พบว่าขี้ไฟฟ้ามีลักษณะโครงสร้างนาโนเพลท (Nanoplate) แบบ 2 มิติ โดยรูปที่ 1 และ 2 แสดงโครงสร้างของขี้ไฟฟ้า WO₃ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 120 150 และ 180 °C ตามลำดับ พบว่าขี้ไฟฟ้า WO₃ ที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 120 °C มีลักษณะโครงสร้างที่มีขนาดเท่าๆ กัน เรียงตัวเป็นระเบียบ และมีความสม่ำเสมอ ในขณะที่ขี้ไฟฟ้า WO₃ ที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 150 และ 180 °C มีลักษณะโครงสร้างที่มีขนาดเล็กใหญ่ไม่เท่ากัน ไม่ค่อยมีความสม่ำเสมอ การวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์ขี้ไฟฟ้าด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลด้วยอุณหภูมิที่ต่างกันส่งผลให้เกิดลักษณะโครงสร้างสัณฐานที่แตกต่างกัน โดยการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 120 °C ให้โครงสร้างที่เรียงตัวเป็นระเบียบที่สุด

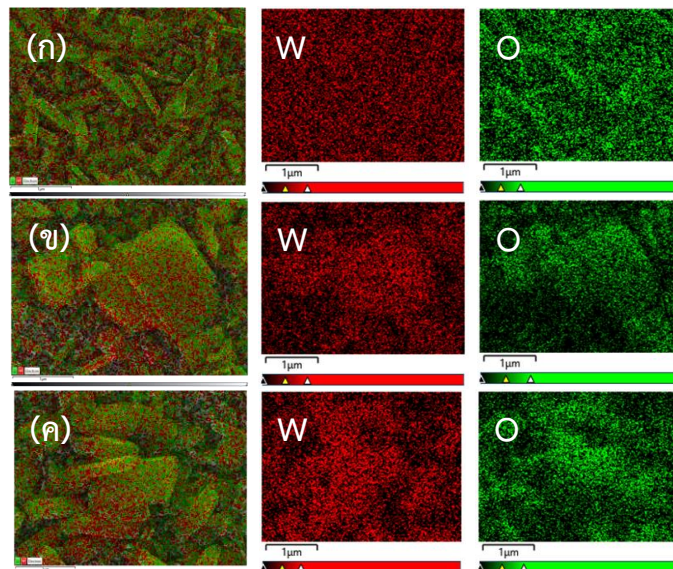


รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวของขี้ไฟฟ้า WO₃ สังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ก) อุณหภูมิ 120 °C (ข) อุณหภูมิ 150 °C (ค) อุณหภูมิ 180 °C (กำลังขยาย 30000 เท่า)

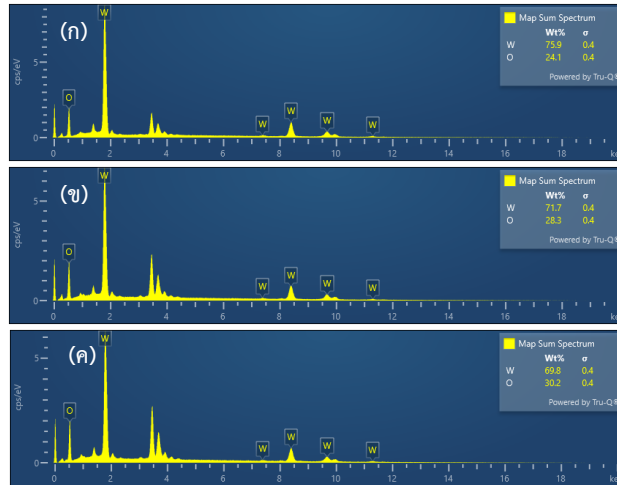


รูปที่ 2 ภาพตัดขวางของขั้วไฟฟ้า WO_3 สังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ก) อุณหภูมิ 120 °C (ข) อุณหภูมิ 150 °C (ค) อุณหภูมิ 180 °C (กำลังขยาย 30000 เท่า)

จากรูปที่ 3 และ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณและองค์ประกอบธาตุของขั้วไฟฟ้า WO_3 พบว่ามีองค์ประกอบธาตุหลักคือ ทังสแตน (W) และออกซิเจน (O) โดยมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt) ของธาตุ W มากกว่า O และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของธาตุมากที่สุดในขั้วไฟฟ้า WO_3 ที่อุณหภูมิ 120 °C สามารถยืนยันได้ว่าการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้า WO_3 ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบาง WO_3 ได้ด้วยวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน



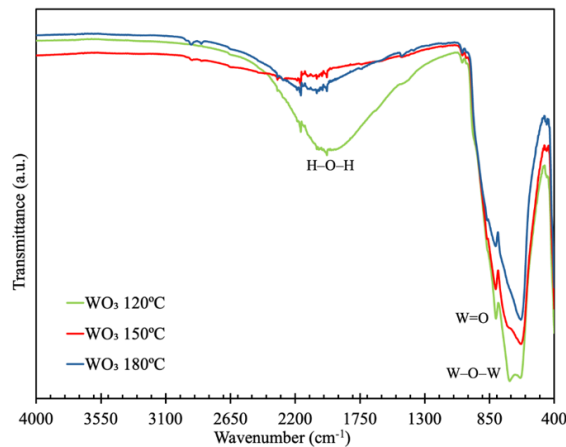
รูปที่ 3 องค์ประกอบธาตุของขั้วไฟฟ้า WO_3 (ก) อุณหภูมิ 120 °C (ข) อุณหภูมิ 150 °C (ค) อุณหภูมิ 180 °C



รูปที่ 4 สเปกตรัม EDS ของซั้วไฟฟ้า WO_3 สังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ก) อุณหภูมิ 120 °C (ข) อุณหภูมิ 150 °C (ค) อุณหภูมิ 180 °C

5.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของซั้วไฟฟ้า WO_3 ด้วยเครื่องเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR)

รูปที่ 5 แสดงผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของซั้วไฟฟ้า WO_3 พบว่า ซั้วไฟฟ้า WO_3 ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะพันธะของหมู่ฟังก์ชัน W-O-W และ W=O ในช่วงประมาณ $660 - 880 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่พบเป็นลักษณะเฉพาะของทั้งสแตนออกไซด์ โดยความคมชัดของแถบเหล่านี้สะท้อนถึงระดับของการเกิดพันธะที่เป็นระเบียบ จากกราฟจะเห็นได้ว่าซั้วไฟฟ้า WO_3 ที่อุณหภูมิ 120 °C ให้แถบการดูดกลืนที่ชัดเจนและเด่นชัดที่สุด แสดงถึงการเกิดพันธะที่เป็นระเบียบซึ่งจะทำให้จะมีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนที่มากกว่าตามมาด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Aldrees et al. (2023) [8]

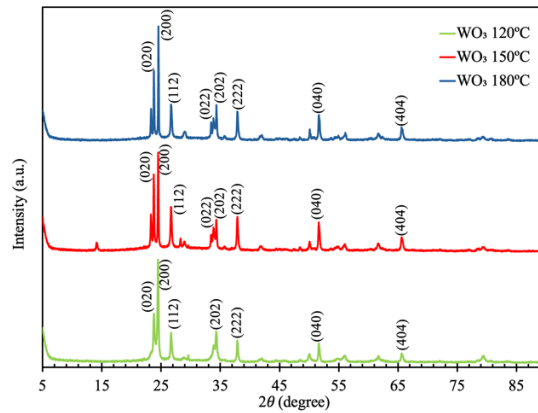


รูปที่ 5 สเปกตรัม FTIR ของซั้วไฟฟ้า WO_3 สังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

5.1.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกของซั้วไฟฟ้า WO_3 ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (XRD)

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของซั้วไฟฟ้า WO_3 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าซั้วไฟฟ้า WO_3 ที่อุณหภูมิ 120 °C ให้ลักษณะพีคได้ชัดเจนที่สุด โดยมีพีคหลักปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 23.1° , 23.6° และ 24.3° ซึ่งสามารถสอดคล้องกับระนาบ (002), (020) และ (200) ตามเอกสารอ้างอิง JCPDS card no. 33-1387 ของ WO_3

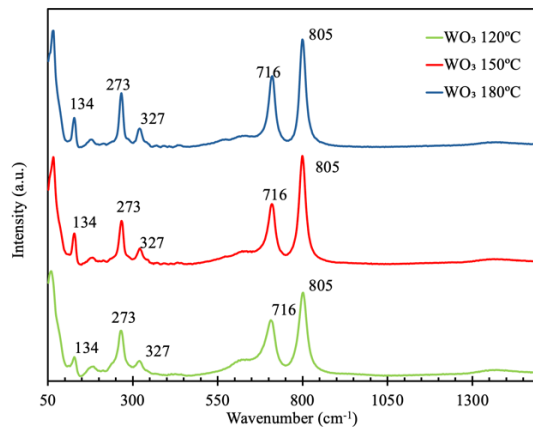
ในเฟสโมโนคลินิก ได้อย่างชัดเจนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Brüger et al. (2024) [9] นอกจากนี้ยังพบพีคอื่น ๆ ที่ 28.0° , 33.0° , 34.1° , 41.6° , และ 49.2° ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ WO_3 ในเฟสโมโนคลินิก ในขณะที่ซัฟไฟต์ WO_3 ที่อุณหภูมิ 150°C และ 180°C พบว่าพีคมีความกว้างมากขึ้นและความคมชัดลดลง บางพีคเริ่มมีการซ้อนทับกับพีคอื่นที่ไม่ตรงกับเฟสโมโนคลินิก ซึ่งอาจเกิดจากการเติบโตของผลึกที่เร็วเกินไป จนนำไปสู่การเกิดโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นที่อุณหภูมิ 120°C จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับการก่อตัวของเฟสโมโนคลินิก เนื่องจากให้ผลึกที่บริสุทธิ์ มีขนาดผลึกเหมาะสม และโครงสร้างผลึกเป็นระเบียบมากที่สุด



รูปที่ 6 โครงสร้างผลึกของซัฟไฟต์ WO_3 สังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ด้วยเทคนิค XRD

5.1.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกของซัฟไฟต์ WO_3 ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์

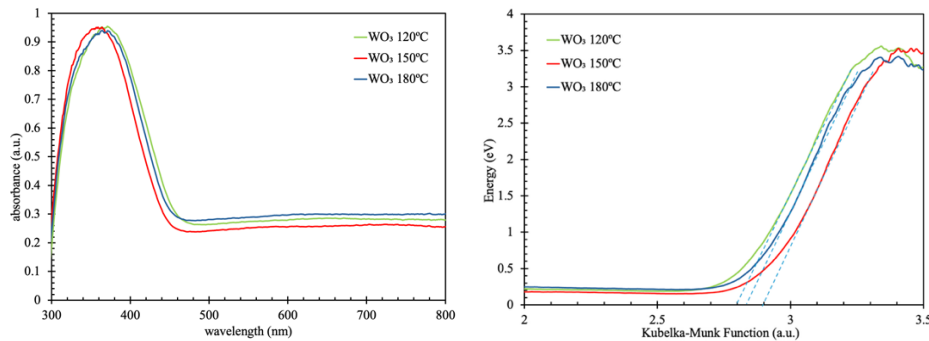
จากการวิเคราะห์พบว่าซัฟไฟต์ WO_3 มีสัญญาณรามานที่สามารถระบุได้ว่าเป็น WO_3 ในเฟสโมโนคลินิก โดยแถบการดูดกลืนหลักที่สำคัญปรากฏในช่วงประมาณ 134 , 273 , 325 , 716 และ 805 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับโหมดการสั่นของพันธะ W-O และ W=O ในโครงสร้างผลึกโมโนคลินิก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Escalante et al. (2021) [10] อย่างไรก็ตาม จากกราฟพบว่าซัฟไฟต์ WO_3 ที่อุณหภูมิ 120°C แสดงตำแหน่ง 805 cm^{-1} ที่ชัดเจน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะในเฟสโมโนคลินิก ในขณะที่ซัฟไฟต์ WO_3 ที่อุณหภูมิ 150°C และ 180°C มีแถบบางตำแหน่งเริ่มมีการขยายกว้าง ซึ่งบ่งชี้ถึงการลดลงของความเป็นระเบียบในโครงสร้างผลึก และอาจมีการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิ 120°C เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 7 โครงสร้างผลึกของซัฟไฟต์ WO_3 สังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ด้วยเทคนิค Raman

5.1.5 การศึกษาการดูดกลืนแสงของชั้นไฟฟ้า WO₃ ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติการดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ของชั้นไฟฟ้า WO₃ พบว่าชั้นไฟฟ้า WO₃ ที่อุณหภูมิ 120 °C แสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (absorption edge) ประมาณ 475 นาโนเมตร และมีค่าช่องว่างพลังงานประมาณ 2.8 eV ซึ่งเป็นค่าระดับพลังงานที่ต่ำสุดเมื่อเทียบกับชั้นไฟฟ้าที่อุณหภูมิอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Aldrees et al. (2023) [8] ซึ่งค่าช่องว่างพลังงานที่แคบแสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบนำไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า อีกทั้งการที่ชั้นไฟฟ้า WO₃ ที่อุณหภูมิ 120 °C มีค่าช่องว่างพลังงานต่ำสุด ยังสะท้อนถึงการจัดเรียงผลึกหรือโครงสร้างภายในที่เอื้อต่อการเกิดกระบวนการทางแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

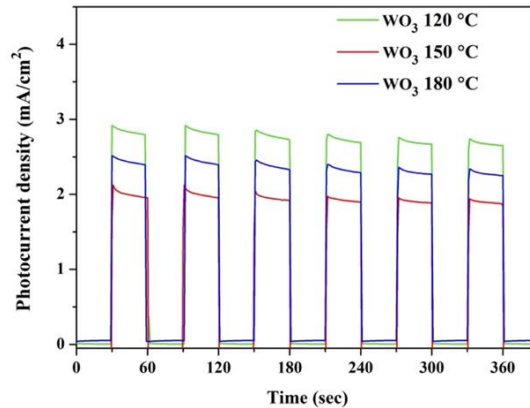


รูปที่ 8 ค่าการดูดกลืนของแสงและค่าแถบพลังงานของชั้นไฟฟ้า WO₃ สังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

5.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการไฟฟ้าเคมีเชิงแสง

จากรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Photocurrent Density) และเวลา เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการไฟฟ้าเคมีเชิงแสง โดยวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ตามการเปลี่ยนแปลงของเวลา (Current – time, IT) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมซัลเฟต 0.5 M ภายใต้ความเข้มแสง AM 1.5G (100 mW/cm²) โดย ชั้นไฟฟ้า WO₃ ที่อุณหภูมิ 120 °C แสดงค่ากระแสไฟฟ้ามากที่สุด ประมาณค่าได้ 2.82 mA/cm² รองลงมาคือชั้นไฟฟ้า WO₃ ที่อุณหภูมิ 180 °C และชั้นไฟฟ้า WO₃ ที่อุณหภูมิ 150 °C แสดงค่าประมาณ 2.40 และ 1.96 mA/cm² ตามลำดับ

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิ 120 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนสูงกว่าอุณหภูมิ 150 °C และ 180 °C เนื่องจากมีโครงสร้างผลึกที่เรียงตัวดี มีพันธะโลหะออกไซด์ที่ชัดเจน และแสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ดีกว่า อุณหภูมิ 150 °C และ 180 °C และค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ที่น้อยที่สุด เกิดการแยกกันของอิเล็กตรอนและโฮลได้ดีขึ้น ยับยั้งการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนและโฮล ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของน้ำในกระบวนการ PEC ได้ดีขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tehrani et al. (2020) [7]



รูปที่ 9 IT-curve ของขั้วไฟฟ้า WO₃ สังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมซัลเฟต 0.5 M ภายใต้ความเข้มแสง AM1.5G (100 mW/cm²)

6. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาฟิล์มบาง WO₃ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ได้สำเร็จ โดยศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิแตกต่างกันที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการไฟฟ้าเคมีเชิงแสง โดยพบว่า ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้แสดงโครงสร้างนาโนแบบแผ่นสองมิติ (2D nanoplates) ที่เรียงตัวเป็นระเบียบ มีการกระจายขององค์ประกอบธาตุสม่ำเสมอ และมีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก รวมทั้งหมู่ฟังก์ชันของโลหะออกไซด์ ทั้งนี้อุณหภูมิ 120 °C เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมขั้วไฟฟ้า WO₃ ที่แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอื่น เนื่องจากมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น และค่าช่องว่างพลังงานที่แคบลง ส่งผลให้มีการแยกกันของอิเล็กตรอนที่ดีและเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของน้ำและผลิตไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิในการสังเคราะห์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติและความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนของฟิล์มบาง WO₃ ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีเชิงแสง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Saha P, Akash FA, Shovon SM, Monir MU, Ahmed MT, Khan MFH, et al. Grey, blue, and green hydrogen: A comprehensive review of production methods and prospects for zero-emission energy. *International Journal of Green Energy*. 2024;21(6):1383-97.
- [2] Osman AI, Chen L, Yang M, Msigwa G, Farghali M, Fawzy S, et al. Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2023;21(2):741-64.
- [3] Amin M, Shah HH, Fareed AG, Khan WU, Chung E, Zia A, et al. Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(77):33112-34.
- [4] Wu Y-H, Kuznetsov DA, Pflug NC, Fedorov A, Müller CR. Solar-driven valorisation of glycerol on BiVO₄ photoanodes: effect of co-catalyst and reaction media on reaction selectivity. *Journal of Materials Chemistry A*. 2021;9(10):6252-60.
- [5] Huang L-W, Vo T-G, Chiang C-Y. Converting glycerol aqueous solution to hydrogen energy and dihydroxyacetone by the BiVO₄ photoelectrochemical cell. *Electrochimica Acta*. 2019;322:134725.
- [6] Park E, Patil SS, Lee H, Kumbhar VS, Lee K. Photoelectrochemical H₂ evolution on WO₃/BiVO₄ enabled by single-crystalline TiO₂ overlayer modulations. *Nanoscale*. 2021;13(40):16932-41.
- [7] Tehrani FS, Ahmadian H, Aliannezhadi M. Hydrothermal synthesis and characterization of WO₃ nanostructures: Effect of reaction time. *Materials Research Express*. 2020;7(1):015911.
- [8] Aldrees A, Khan H, Alzahrani A, Dan'azumi S. Synthesis and characterization of tungsten trioxide (WO₃) as photocatalyst against wastewater pollutants. *Applied Water Science*. 2023;13(7):156.

- [9] Brüger A, Faflek G, Neumann-Spallart M. Identification of different WO₃ modifications in thin films for photocatalytic applications by peak shape analysis in high temperature XRD diffractometry. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2024;457:115879.
- [10] Escalante G, López R, Demesa FN, Villa-Sánchez G, Castrejón-Sánchez VH, Vivaldo de la Cruz I. Correlation between Raman spectra and color of tungsten trioxide (WO₃) thermally evaporated from a tungsten filament. *AIP Advances*. 2021;11(5):055103.