

ผลของโหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อคุณภาพของภาพถ่าย  
และการวิเคราะห์ธาตุในวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์  
Effects of Operating Modes and Electric Potential  
Difference on Image Quality and Elemental Analysis of  
Zinc Oxide Nanomaterials

ณิชชา อารุณโรจน์<sup>1\*</sup> และธีรศักดิ์ เทียรธีรดิษฐ์<sup>2</sup>  
Nidcha Aroonrote<sup>1\*</sup> and Teerasak Thianthiradait<sup>2</sup>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเลือกโหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (field emission scanning electron microscope: FESEM) ร่วมกับการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานหรือการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (energy dispersive X-ray spectroscopy: EDS) โดยประเมินผลของโหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อคุณภาพของภาพถ่ายตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์และผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ผลการศึกษาพบว่าโหมดการทำงาน GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ ให้ภาพที่มีความคมชัดและสามารถแสดงรายละเอียดพื้นผิวของวัสดุได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับโหมด SEM และความต่างศักย์ไฟฟ้าในระดับอื่น ๆ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS แสดงให้เห็นการกระจายตัวของธาตุสังกะสี (Zn) และออกซิเจน (O) อย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิววัสดุ โดยการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแบบอะนาไลเซอร์ (analyzer method) และวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบจุดและการระบุชนิดธาตุ (point & ID method) พบว่าปริมาณธาตุสังกะสีและออกซิเจนที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกโหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการเพิ่มคุณภาพของภาพและความถูกต้องของการวิเคราะห์ธาตุในงานวิจัยด้านวัสดุนาโน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและพัฒนาวัสดุในอนาคตได้

<sup>1</sup> ศูนย์วิทยการขั้นสูงด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรมเคมี อาหาร และการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>2</sup> โรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาการศึกษา

<sup>1</sup> Center for Advanced Studies in Nanotechnology for Chemical, Food and Agricultural Industries, Kasetsart University

<sup>2</sup> Kasetsart University Laboratory School, Center for Educational Research and Development

\* Corresponding author e-mail: nidcha.a@ku.ac.th

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2026.v45i1.266316>

Received: 13 February 2025, Revised: 2 April 2025, Accepted: 18 April 2025

**คำสำคัญ:** วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน

### Abstract

This research focuses on selecting the optimal operating mode and accelerating voltage for the analysis of zinc oxide (ZnO) nanomaterials using a Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) combined with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). The effects of operating mode and accelerating voltage on image quality and elemental analysis were evaluated. The results showed that the GB-HIGH mode at an accelerating voltage of 2 kV produced the sharpest images and revealed the most detailed surface morphology compared with the SEM mode and other accelerating voltages. In addition, EDS analysis indicated a uniform distribution of zinc (Zn) and oxygen (O) on the material surface. A comparison between the Analyzer method and the Point & ID method for elemental quantification revealed similar Zn and O contents, consistent with the characteristics of ZnO nanomaterials. These results highlight the importance of selecting appropriate operating parameters to enhance image quality and improve the accuracy of elemental analysis in nanomaterial research, and they can be applied to future materials research and development.

**Keywords:** Zinc oxide nanomaterials, Field emission scanning electron microscope, Energy dispersive x-ray spectroscopy

### บทนำ

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide (ZnO) nanomaterials) เป็นสารประกอบที่พบเห็นได้ในธรรมชาติ มีคุณสมบัติพิเศษทางแสง (Mandal *et al.*, 2022) ไม่ละลายน้ำ (Ahmed *et al.*, 2021) มีความสามารถในการป้องกันและยับยั้งแบคทีเรีย (Porrawatkul *et al.*, 2023) ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ ด้านเวชสำอางและผลิตภัณฑ์กันแดดได้มีการนำอนุภาคมาเป็นส่วนผสม เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันรังสียูวีเอและยูวีบี (Porrawatkul *et al.*, 2024) ทั้งนี้ยังมีการประยุกต์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายมลพิษในน้ำเสียด้วยกระบวนการกระตุ้นด้วยแสง (Chaisorn *et al.*, 2023) นอกจากนี้ในด้านอุตสาหกรรมอาหารสัตว์และยา ก็ได้นำอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มอัตราการดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ส่วนในด้านเกษตรกรรมก็มีการนำอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มาใช้ประโยชน์เป็นจำนวนมาก เช่น การนำอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มาฉีดพ่นต้นมะนาว การศึกษาผลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อการงอกของเมล็ดพันธุ์ (ชีวะ และคณะ, 2561) ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กันอย่างแพร่หลาย จึงทำให้มีการศึกษาวิจัยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

ในหลายด้าน ซึ่งงานวิจัยและการพัฒนาทางด้านวัสดุศาสตร์มีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบหรือโครงสร้างของวัสดุด้วยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (field emission scanning electron microscope: FESEM) (Kumar *et al.*, 2013)

โดยเทคนิคทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนับว่าเป็นเทคนิคที่สำคัญและได้รับความนิยม เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลพื้นฐานโครงสร้าง พื้นผิว หรือรูปร่างของวัสดุอย่างชัดเจนที่กำลังขยายสูง รวมไปถึงสามารถวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานหรือการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (energy dispersive x-ray spectroscopy: EDS) (Newbury and Ritchie, 2013) นอกเหนือไปจากนั้นการใช้โหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้าในการถ่ายภาพก็มีความสำคัญยิ่ง เพื่อให้ได้ภาพพื้นผิวที่มีความคมชัด เห็นรายละเอียดพื้นผิวที่ดีที่สุด และสามารถบันทึกภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ดลฤดี, 2563) เนื่องจากในการวิเคราะห์ตัวอย่างอาจต้องใช้เวลามากในการปรับหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพ โดยเฉพาะวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นตัวอย่างที่ต้องมีการถ่ายภาพและวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ซึ่งการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการวิเคราะห์ ลดระยะเวลาในการดำเนินงาน และช่วยลดต้นทุนในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาผลของการใช้โหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อคุณภาพของภาพถ่ายของตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชันร่วมกับการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานเพื่อประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. วัสดุ

ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งจัดซื้อจากวิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### 2. เครื่องมือ

2.1 เครื่องเคลือบผิวตัวอย่าง (sputter coater) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JFC-1600 Auto Fine Coater

2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM7600F

2.3 เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) ยี่ห้อ OXFORD รุ่น Xmax50

### 3. วิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์

นำตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นผงโรยกระจายอย่างสม่ำเสมอบนแท่นยึดตัวอย่าง (sample stub) ที่ติดตั้งด้วย เทปคาร์บอน (carbon tape) เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะและลดการเคลื่อนตัวของผงตัวอย่างระหว่างการวิเคราะห์ จากนั้นใช้ลูกยางเป่าลมเพื่อกำจัดผงส่วนเกินที่ไม่ยึดติดบนเทปคาร์บอนออกให้หมด

### 3.2 การถ่ายภาพตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบแพลทินัม

นำตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.1 (ตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบแพลทินัม) ไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน โดยควบคุมให้ถ่ายภาพ ตำแหน่งเดียวกัน และกำหนดกำลังขยายที่ใช้ในการถ่ายภาพ จำนวน 2 ระดับ ได้แก่ 50,000× และ 100,000× โดยทดสอบโหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้า (accelerating voltage) ตามเงื่อนไขดังนี้

- 1) โหมดการทำงาน GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 กิโลโวลต์
- 2) โหมดการทำงาน GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์
- 3) โหมดการทำงาน SEM ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์
- 4) โหมดการทำงาน SEM ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์
- 5) โหมดการทำงาน SEM ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์

### 3.3 การเปรียบเทียบภาพของตัวอย่างที่เคลือบแพลทินัม

ทำการเปรียบเทียบภาพตัวอย่างที่เคลือบแพลทินัม ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับข้อ 3.2 โดยเน้นการเปรียบเทียบในกำลังขยาย 100,000× ภายใต้โหมดการทำงาน GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 และ 2 กิโลโวลต์ กับโหมดการทำงาน SEM ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.5 และ 15 กิโลโวลต์

### 3.4 การเคลือบผิวตัวอย่างด้วยแพลทินัม

นำตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.1 เข้าเครื่องเคลือบผิวตัวอย่าง เพื่อเคลือบผิวด้วยแพลทินัม (Pt) สำหรับเพิ่มการนำไฟฟ้าบนพื้นผิวตัวอย่าง (Syed, 2017) เพื่อเคลือบผิวด้วยแพลทินัม สำหรับเพิ่มการนำไฟฟ้าบนพื้นผิวตัวอย่าง 10 มิลลิแอมป์ เป็นเวลา 120 วินาที จากนั้นนำตัวอย่างที่เคลือบแล้วไปถ่ายภาพและเปรียบเทียบผลเช่นเดียวกับข้อ 3.2

### 3.5 การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน

- 1) การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (elemental mapping) เพื่อประเมินการกระจายตัวของธาตุนบนพื้นผิวตัวอย่างเชิงพื้นที่ โดยเน้นธาตุหลัก ได้แก่ สังกะสี (Zn) และออกซิเจน (O)
- 2) การวิเคราะห์เชิงปริมาณและการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุระหว่างวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแบบอะนาลิเซอร์ (analyzer method) และวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบจุดและการระบุชนิดธาตุ (point & ID method)

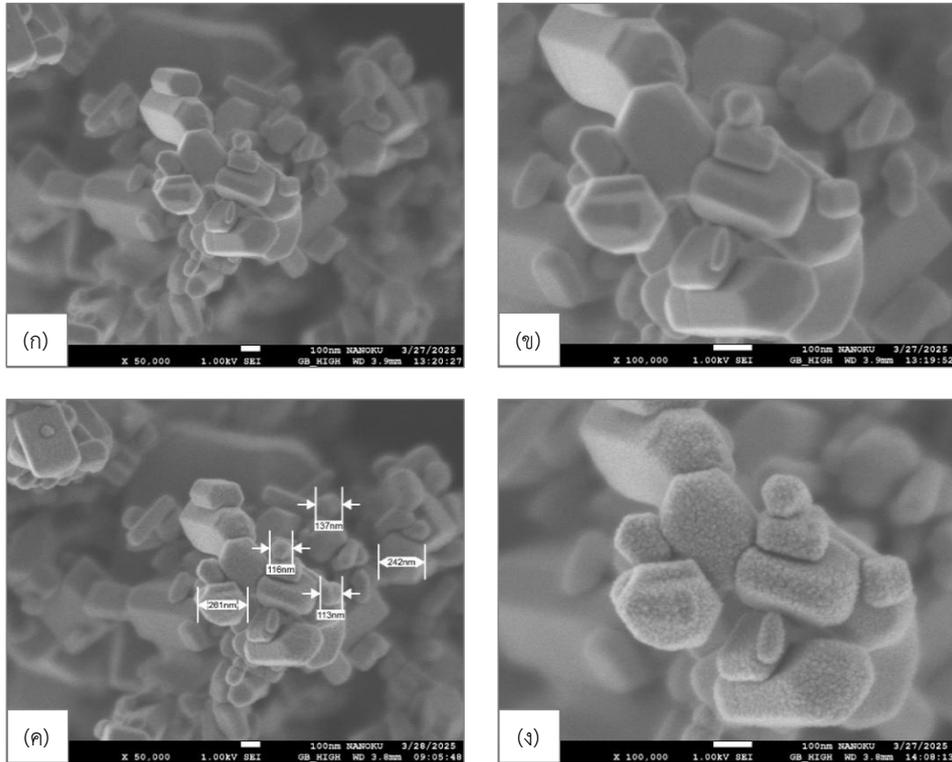
## ผลการวิจัย

1. ภาพถ่ายตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชันที่โหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ

#### 1.1 โหมดการทำงาน GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 กิโลโวลต์

ผลการถ่ายภาพตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน ภายใต้โหมดการทำงาน GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 กิโลโวลต์ พบว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบแพลทินัมแสดงลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระ แต่รายละเอียดของพื้นผิวยังปรากฏไม่ชัดเจน ในขณะที่ตัวอย่างที่เคลือบแพลทินัมสามารถสังเกตรายละเอียดของความขรุขระบนพื้นผิวได้ชัดเจนมากขึ้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นผลของการเคลือบผิวต่อการเพิ่มการนำไฟฟ้าและลดการสะสมประจุบนพื้นผิวตัวอย่าง ส่งผลให้คุณภาพของภาพถ่ายดีขึ้น

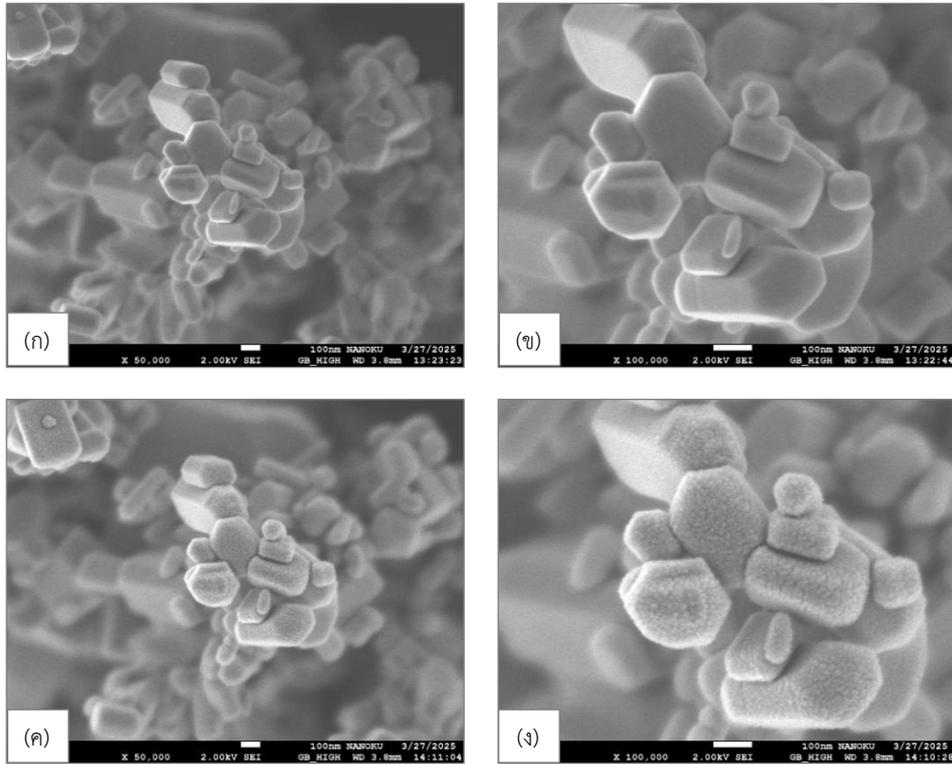
จากการสังเกตลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาค พบว่าอนุภาคมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 173 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามแม้จะใช้โหมด GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำ (1 กิโลโวลต์) ซึ่งเหมาะสำหรับการถ่ายภาพพื้นผิวของวัสดุนาโน แต่ภาพถ่ายที่ได้ภายใต้เงื่อนไขนี้ยังคงมีความคมชัดไม่เพียงพอ ดังภาพที่ 1



**ภาพที่ 1** ภาพถ่ายตัวอย่างวัสดุนาโนซึ่งคอกซ์ไดต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชันที่โหมดการทำงาน GB-HIGH และความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 กิโลโวลต์ เปรียบเทียบตัวอย่างที่ไม่เคลือบและเคลือบแพลทินัมภายใต้กำลังขยายต่างกัน ได้แก่ ไม่เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 50,000× (ก) ไม่เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 100,000× (ข) เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 50,000× (ค) และเคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 100,000× (ง)

## 1.2 โหมดการทำงาน GB-HIGH และความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์

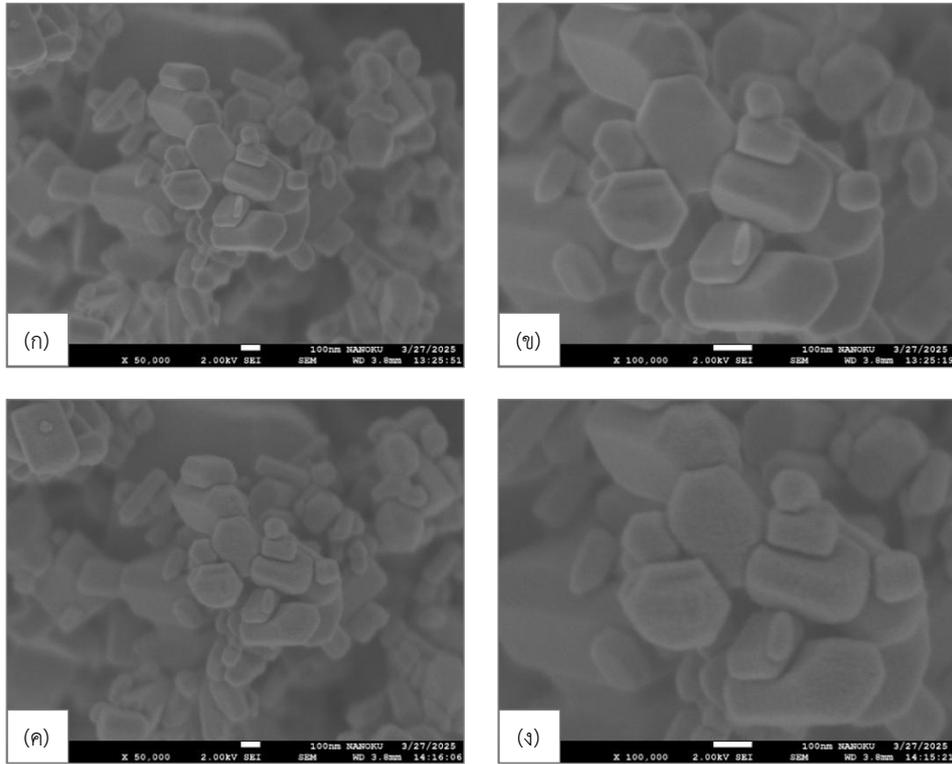
ผลการถ่ายภาพตัวอย่างวัสดุนาโนซึ่งคอกซ์ไดต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน ภายใต้โหมดการทำงาน GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ พบว่าตัวอย่างที่ไม่เคลือบแพลทินัมแสดงลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระ อย่างไรก็ตามรายละเอียดของพื้นผิวยังไม่ชัดเจนมากนัก ในขณะที่ตัวอย่างที่เคลือบแพลทินัมสามารถสังเกตรายละเอียดของพื้นผิวได้อย่างชัดเจน โดยพบลักษณะความขรุขระและขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตร ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ภาพถ่ายตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มอิมมersion ที่โหมดการทำงาน GB-HIGH และความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ เปรียบเทียบตัวอย่างที่ไม่เคลือบและเคลือบแพลทินัมภายใต้กำลังขยายต่างกัน ได้แก่ ไม่เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 50,000× (ก) ไม่เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 100,000× (ข) เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 50,000× (ค) และเคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 100,000× (ง)

### 1.3 โหมดการทำงาน SEM และความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์

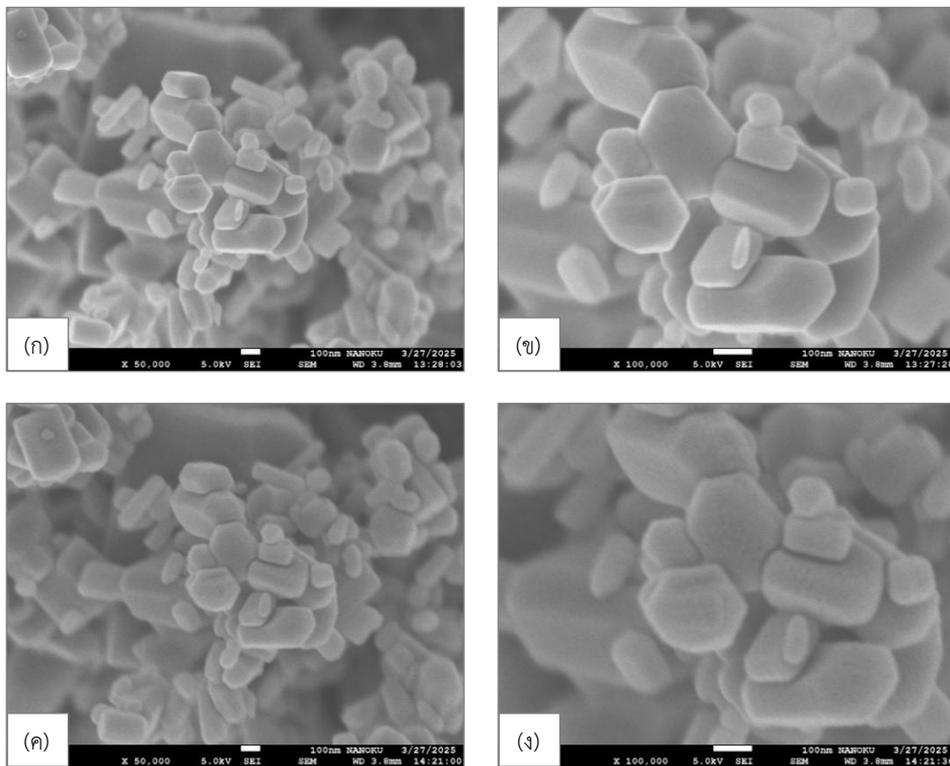
ผลการถ่ายภาพตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มอิมมersion ภายใต้โหมดการทำงาน SEM ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ พบว่าทั้งตัวอย่างที่ไม่เคลือบแพลทินัมและเคลือบแพลทินัม แสดงลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระ อย่างไรก็ตามภาพถ่ายยังมีความคมชัดต่ำและไม่สามารถแสดงรายละเอียดของพื้นผิวได้อย่างชัดเจน ดังภาพที่ 3



**ภาพที่ 3** ภาพถ่ายตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลต์อิมิสชันที่โหมมดการทำงาน SEM และความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ เปรียบเทียบตัวอย่างที่ไม่เคลือบและเคลือบแพลทินัมภายใต้กำลังขยายต่างกัน ได้แก่ ไม่เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 50,000× (ก) ไม่เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 100,000× (ข) เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 50,000× (ค) และเคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 100,000× (ง)

#### 1.4 โหมมดการทำงาน SEM และความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์

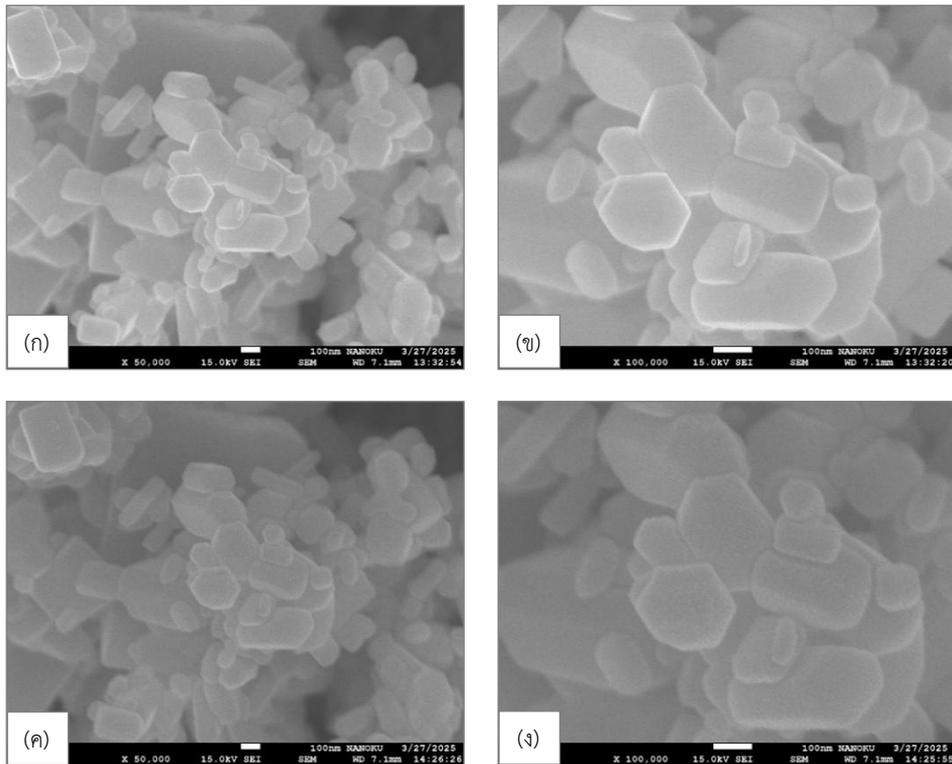
ผลการถ่ายภาพตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลต์อิมิสชัน ภายใต้โหมมดการทำงาน SEM ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ พบว่าภาพถ่ายที่กำลังขยาย 50,000× ทั้งในตัวอย่างที่ไม่เคลือบแพลทินัมและเคลือบแพลทินัม สามารถสังเกตพื้นผิวของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ในลักษณะค่อนข้างเรียบ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 100,000× โดยเฉพาะในตัวอย่างที่เคลือบแพลทินัม พบว่าสามารถสังเกตพื้นผิวที่มีความขรุขระได้บางส่วน ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ภาพถ่ายตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มอิมิสชันที่โหมดการทำงาน SEM และความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ เปรียบเทียบตัวอย่างที่ไม่เคลือบและเคลือบแพลทินัมภายใต้กำลังขยายต่างกัน ได้แก่ ไม่เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 50,000× (ก) ไม่เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 100,000× (ข) เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 50,000× (ค) และเคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 100,000× (ง)

#### 1.5 โหมดการทำงาน SEM และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์

ผลการถ่ายภาพตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มอิมิสชัน ภายใต้โหมดการทำงาน SEM ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ พบว่าทั้งตัวอย่างที่ไม่เคลือบแพลทินัมและเคลือบแพลทินัมแสดงลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ โดยภาพถ่ายที่ได้มีการแสดงรายละเอียดพื้นผิวดำ และให้ลักษณะภาพใกล้เคียงแบบสองมิติ (2D appearance) ดังภาพที่ 5

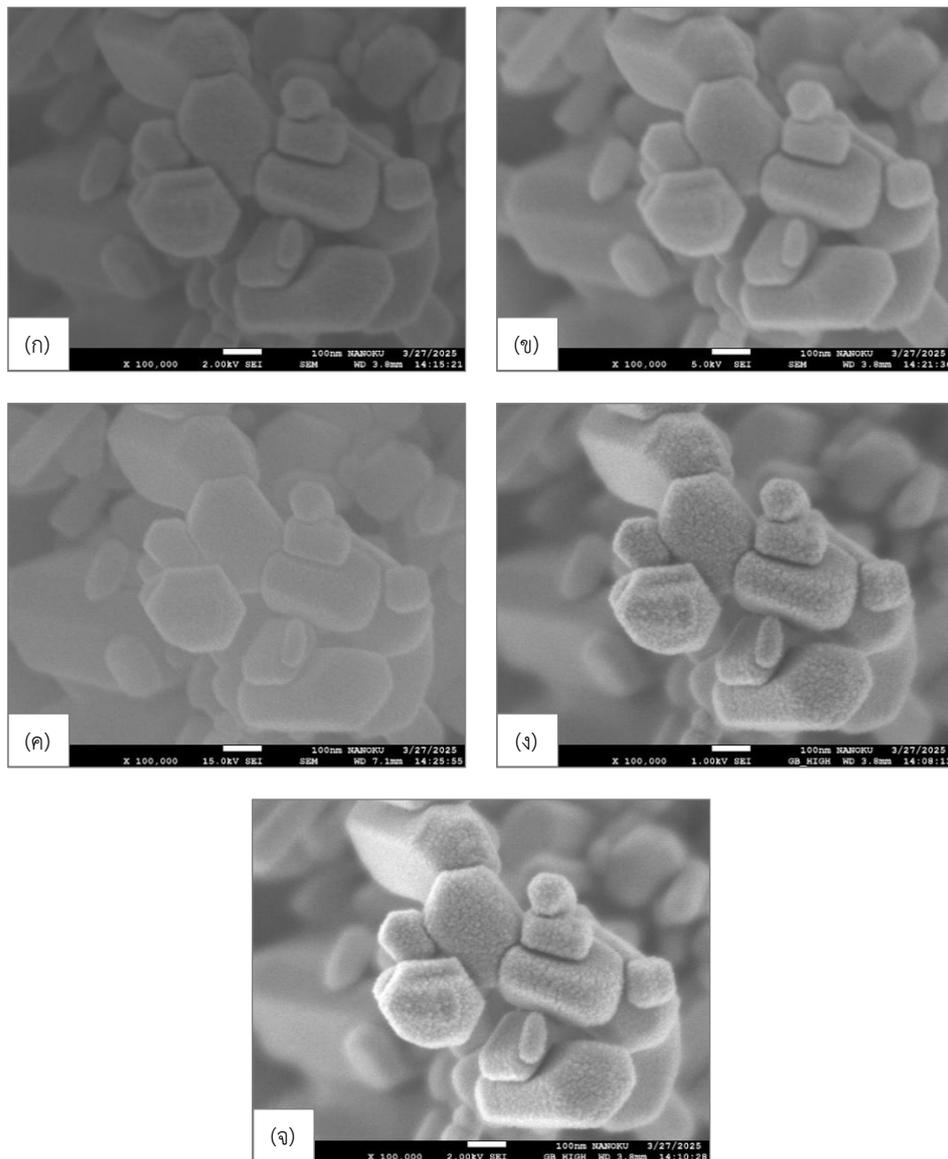


**ภาพที่ 5** ภาพถ่ายตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มอิมมersionที่โหมดการทำงาน SEM และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ เปรียบเทียบตัวอย่างที่ไม่เคลือบและเคลือบแพลทินัมภายใต้กำลังขยายต่างกัน ได้แก่ ไม่เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 50,000× (ก) ไม่เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 100,000× (ข) เคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 50,000× (ค) และเคลือบแพลทินัม กำลังขยาย 100,000× (ง)

1.6 การเปรียบเทียบภาพถ่ายของตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบแพลทินัมระหว่างโหมดการทำงาน GB-HIGH และ SEM

ทำการเปรียบเทียบภาพถ่ายของตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบแพลทินัม โดยกำหนดกำลังขยาย 100,000× ภายใต้โหมดการทำงาน GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 และ 2 กิโลโวลต์ และโหมดการทำงาน SEM ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2.5 และ 15 กิโลโวลต์ พบว่าการเคลือบแพลทินัมช่วยให้คุณภาพของภาพถ่ายมีความคมชัดมากกว่าตัวอย่างที่ไม่เคลือบ เนื่องจากวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์จัดเป็นวัสดุกิ่งตัวนำ (Habibi and Karimi, 2014) ซึ่งอาจเกิดการสะสมประจุบนพื้นผิวระหว่างการถ่ายภาพได้ จึงจำเป็นต้องเคลือบแพลทินัมเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าของพื้นผิวดังกล่าว

ผลการเปรียบเทียบระหว่างโหมดการทำงาน พบว่าภาพถ่ายที่ได้จากโหมด GB-HIGH สามารถแสดงรายละเอียดพื้นผิวและความขรุขระของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ได้อย่างชัดเจน ขณะที่ภาพถ่ายจากโหมด SEM ให้รายละเอียดพื้นผิวดูลดลงและเห็นความขรุขระได้ไม่ชัดเจน ทั้งนี้ภาพถ่ายภายใต้โหมด GB-HIGH มีความคมชัดและความสามารถในการแสดงสัญญาณวิวัฒนาการพื้นผิวดีกว่าโหมด SEM อย่างชัดเจน ดังภาพที่ 6

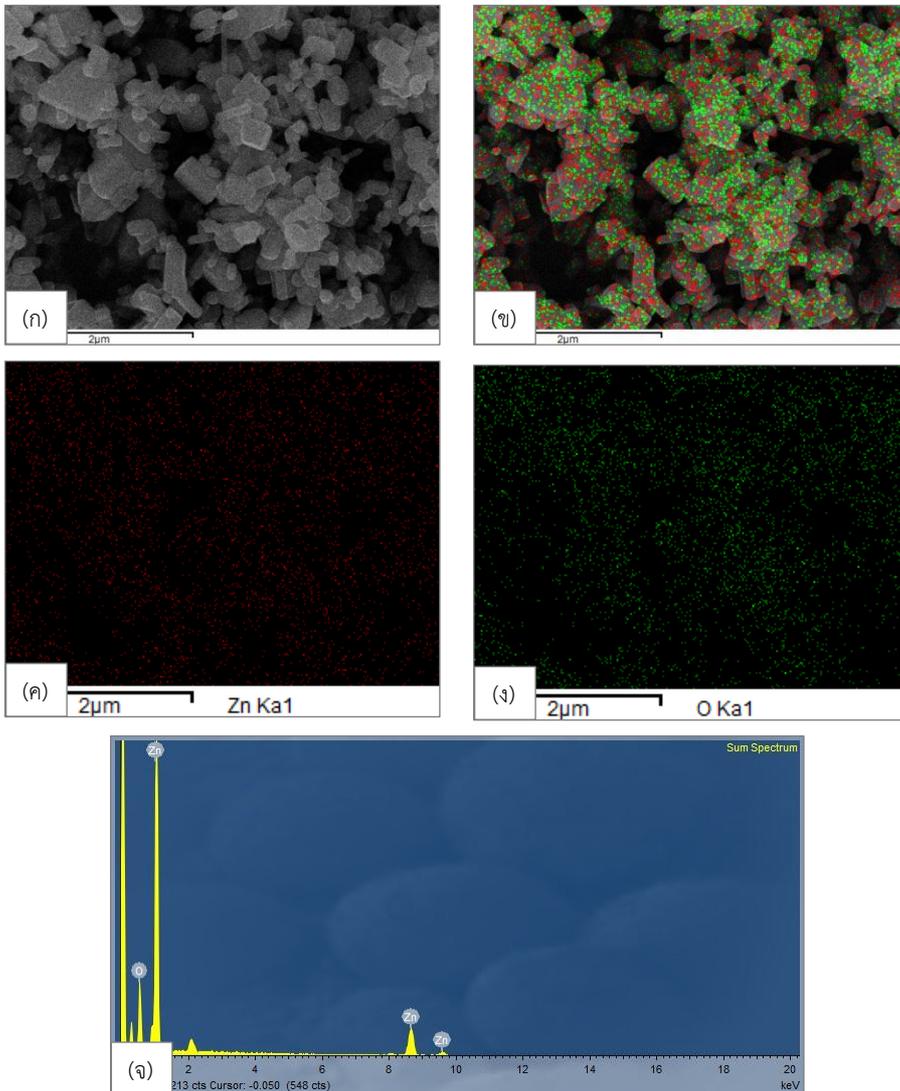


ภาพที่ 6 ภาพถ่ายตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบแพลทินัม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน ที่กำลังขยาย 100,000 $\times$  ภายใต้โหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน ได้แก่ โหมด SEM ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ (ก) โหมด SEM ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ (ข) โหมด SEM ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ (ค) โหมด GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 กิโลโวลต์ (ง) และโหมด GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ (จ)

## 2. การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน

### 2.1 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุของตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน พบว่าธาตุสังกะสี ซึ่งแสดงด้วยสีแดง และธาตุออกซิเจน ซึ่งแสดงด้วยสีเขียว มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของตัวอย่าง นอกจากนี้สเปกตรัม EDS ยังแสดงสัญญาณของธาตุสังกะสีและออกซิเจนอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 7



**ภาพที่ 7** การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุของตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ได้แก่ ภาพถ่ายตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ (ก) ภาพซ้อนการกระจายตัวของธาตุสังกะสี (สีแดง) และออกซิเจน (สีเขียว) บนภาพถ่ายตัวอย่าง (ข) แผนที่การกระจายตัวของธาตุสังกะสี (ค) แผนที่การกระจายตัวของธาตุออกซิเจน (ง) และสเปกตรัม EDS ของธาตุสังกะสีและออกซิเจน (จ)

## 2.2 การเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแบบอะนาไลเซอร์และวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบจุดและการระบุชนิดธาตุ พบว่าทั้งสองวิธีให้ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุสังกะสีและออกซิเจนใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 1) โดยตรวจพบปริมาณธาตุสังกะสีประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ และธาตุออกซิเจนประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Demissie *et al.* (2020) ที่รายงานการสังเคราะห์วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์จากใบพืชและพบปริมาณธาตุสังกะสี 59.43 เปอร์เซ็นต์ และธาตุออกซิเจน 40.57 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 1 ปริมาณธาตุบนพื้นผิวตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ	ปริมาณธาตุ (เปอร์เซ็นต์)	
	สังกะสี	ออกซิเจน
แบบอะนาไลเซอร์	45.44	54.56
แบบจุดและการระบุชนิดธาตุ	44.43	55.57

### การอภิปรายผลการวิจัย

โหมดการทำงาน GB-HIGH เป็นโหมดที่ใช้แรงดันไฟฟ้าลบที่แทนตัวอย่าง (negative sample bias) เพื่อช่วยลดพลังงานของอิเล็กตรอนขณะตกกระทบพื้นผิวตัวอย่าง ส่งผลให้พลังงานของลำอิเล็กตรอน ณ จุดตกกระทบ (landing energy) ลดลง ทำให้สามารถถ่ายภาพพื้นผิวได้คมชัดขึ้น และลดปัญหาการสะสมประจุไฟฟ้าบนตัวอย่าง โดยเฉพาะวัสดุที่นำไฟฟ้าต่ำหรือเป็นกึ่งตัวนำ ในขณะที่โหมดการทำงาน SEM เป็นการใช้อิเล็กตรอนพลังงานสูงยิงไปยังตัวอย่างโดยตรง ส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถเจาะลึกลงในวัสดุได้มากกว่า จึงอาจทำให้รายละเอียดเชิงพื้นผิวลดลงเมื่อเทียบกับโหมด GB-HIGH ทั้งนี้การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างโหมด GB-HIGH และ SEM แสดงดังตารางที่ 2 (JEOL Ltd., 2012)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของโหมดการทำงาน GB-HIGH และ SEM

คุณสมบัติ	โหมดการทำงาน	
	GB-HIGH	SEM
พลังงานลำอิเล็กตรอน	ต่ำ (อิเล็กตรอนโวลต์หลักร้อย-กิโลโวลต์ต่ำ)	สูง (1-30 กิโลโวลต์)
ความคมชัดของพื้นผิว	สูงกว่า	ต่ำกว่า
ปัญหาการชาร์จของตัวอย่าง	ลดลง	เกิดขึ้นได้ง่าย
ความลึกของการเจาะลำอิเล็กตรอน	ตื้นกว่า	ลึกกว่า

ผลการถ่ายภาพตัวอย่างวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน ภายใต้โหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าการเลือกโหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้ามีผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายและความสามารถในการแสดงรายละเอียดพื้นผิวของตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าภายใต้โหมด GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 กิโลโวลต์ ภาพถ่ายพื้นผิวมีความคมชัดไม่เพียงพอ ขณะที่เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 2 กิโลโวลต์ ภาพถ่ายสามารถแสดงรายละเอียดพื้นผิวได้ชัดเจนและมีความคมชัดสูงชันอย่างเด่นชัด เมื่อเปรียบเทียบกับโหมดการทำงาน SEM พบว่าแม้ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ ภาพถ่ายยังมีความคมชัดต่ำและแสดงรายละเอียดพื้นผิวได้ไม่ชัดเจน และเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 5 และ 15 กิโลโวลต์ รายละเอียดพื้นผิวของตัวอย่างลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินความเหมาะสมกับชนิดของตัวอย่าง ส่งผลให้ลำอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงและเกิดความเสียหายต่อพื้นผิว (beam damage) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากลักษณะการไหม้ของตัวอย่าง (burn) ดังนั้นการกำหนดความต่างศักย์ไฟฟ้าสำหรับการถ่ายภาพจึงควรมีการศึกษาหรือทดสอบเบื้องต้น เพื่อให้สามารถเลือกค่าที่เหมาะสมและลดความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายต่อวัสดุ (ยุพดี, 2567) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Stevens *et al.* (2009) ซึ่งได้รายงานการถ่ายภาพซีลิคาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 500 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ถึง 1.50 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) เพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างของคุณภาพภาพถ่ายเมื่อใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน และเสนอเป็นแนวทางในการถ่ายภาพวัสดุ SBA-16 และ FDU-16 ซึ่งสนับสนุนว่าการเลือกความต่างศักย์ไฟฟ้าในระดับต่ำถึงปานกลางมีความเหมาะสมต่อการถ่ายภาพวัสดุที่ต้องการรายละเอียดพื้นผิวระดับนาโน

การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยอาศัยการใช้ลำอิเล็กตรอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่าง ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะของธาตุ (characteristic X-rays) ซึ่งสามารถนำมาใช้ระบุชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างไม่ได้ การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุจะให้ผลลัพธ์เป็นภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุนับบริเวณพื้นที่ทำการตรวจวัด ซึ่งสามารถใช้ประเมินความสม่ำเสมอขององค์ประกอบธาตุนับพื้นผิวตัวอย่างได้ สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ผลการตรวจวัดจะถูกแสดงในรูปแบบสเปกตรัม EDS ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน Y คือ จำนวนสัญญาณของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้ (intensity หรือ counts) และแกน X คือ พลังงานของรังสีเอกซ์ในหน่วยกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) โดยพีก (peak) ที่ปรากฏในสเปกตรัม สามารถใช้บ่งชี้ชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างไม่ได้ และสามารถคำนวณออกมาเป็นสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของธาตุที่ตรวจพบในตัวอย่างไม่ได้ นอกจากนี้วิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบจุดและการระบุชนิดธาตุเป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำอิเล็กตรอนตกกระทบบังอยู่ที่ตำแหน่งเฉพาะบนพื้นผิวตัวอย่าง เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์ ณ จุดที่สนใจโดยตรง (ดลฤดี, 2562)

### สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาการถ่ายภาพวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน ภายใต้โหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน พบว่าโหมดการทำงาน GB-HIGH ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 กิโลโวลต์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ

การถ่ายภาพพื้นผิวของวัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากให้ภาพที่มีความคมชัดและสามารถแสดงรายละเอียดพื้นผิวได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอื่น

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ในส่วนของการกระจายตัวของธาตุแสดงให้เห็นว่าธาตุสังกะสีและออกซิเจนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของตัวอย่าง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแบบอะนาไลเซอร์และวิธีการวิเคราะห์ธาตุแบบจุดและการระบุชนิดธาตุ พบว่าทั้งสองวิธีให้ผลใกล้เคียงกัน โดยตรวจพบปริมาณธาตุสังกะสีประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ และธาตุออกซิเจนประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกโหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการเพิ่มคุณภาพของภาพถ่าย รวมทั้งเพิ่มความถูกต้องของผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในงานวิจัยด้านวัสดุนาโน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยและพัฒนาวัสดุในอนาคตได้

### ข้อเสนอแนะ

1. ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน หากเป็นตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าหรือกึ่งนำไฟฟ้า ควรมีการเคลือบตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ เช่น การเคลือบตัวอย่างด้วยทอง หรือแพลทินัม เป็นต้น

2. การเลือกโหมดการทำงานและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเพิ่มคุณภาพของภาพ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการวิเคราะห์ ลดระยะเวลาในการดำเนินงาน และช่วยลดต้นทุนในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศูนย์วิทยาการขั้นสูงด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรมเคมี อาหาร และการเกษตร สถาบันวิทยาการขั้นสูงแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

### เอกสารอ้างอิง

ชีวะ ทศนา นิคม ผึ้งคำ สมยศ ศรีคงรักษ์ จันทนีย์ เพ็ชรไพบูลย์ และวิลาสินี เนินริมหนอง. (2561).

ผลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อการเจริญเติบโตของพริกหวาน. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, 21(3), 51-57.

ดลฤดี โตเย็น. (2562). *การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS)*. สืบค้นเมื่อ 15 กันยายน 2567, จาก: <https://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/2562/EDS.pdf>.

ดลฤดี โตเย็น. (2563). *การเตรียมตัวอย่างทางวัสดุศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด*. สืบค้นเมื่อ 15 กันยายน 2567, จาก: [https://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/2563/material\\_prep.pdf](https://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/2563/material_prep.pdf).

- ยุพดี เฝ้าพันธ์. (2567). *ประเด็นปัญหาที่พบบ่อยในการบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด*. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2567, จาก: [https://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/2567/jun/problemfromsem\\_savepic.pdf](https://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/2567/jun/problemfromsem_savepic.pdf).
- Ahmed, T., Wu, Z., Jiang, H., Luo, J., Noman, M., Shahid, M., Manzoor, I., Allemailem, K.S., Alrumaihi, F. and Li, B. (2021). Bioinspired green synthesis of zinc oxide nanoparticles from a native *Bacillus cereus* strain RNT6: Characterization and antibacterial activity against rice panicle blight pathogens *Burkholderia glumae* and *B. gladioli*. *Nanomaterial*, 11(4), 884, doi: <https://doi.org/10.3390/nano11040884>.
- Chaisorn, W., Nuengmatcha, P., Noypha, A., Pimsen, R., Porrawatkul, P., Kuyyogsuy, A., Thepchuay, Y., Srirachoen, P., Limchoowong, N., Chanthai, S. and Nuengmatcha, P. (2023). Adsorption-photocatalytic degradation abilities of  $\gamma$ -irradiated chitosan-ZnO-AgNP composite for organic dye removal and antibacterial activity. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 96840-96859, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29305-y>.
- Demissie, M.G., Sabir, F.K., Edossa, G.D. and Gonfa, B.A. (2020). Synthesis of zinc oxide nanoparticles using leaf extract of *Lippia adoensis* (Koseret) and evaluation of its antibacterial activity. *Journal of Chemistry*, 2020(1), 7459042, doi: <https://doi.org/10.1155/2020/7459042>.
- Habibi, M.H. and Karimi, B. (2014). Application of impregnation combustion method for fabrication of nanostructure CuO/ZnO composite oxide: XRD, FESEM, DRS, and FTIR study. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 1566-1570, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.07.048>.
- JEOL Ltd. (2012). *JSM-7600F field emission scanning electron microscope operation guide (Version ISM7600F-OG-1b)*. Tokyo: JEOL Ltd.
- Kumar, S.S., Venkateswarlu, P., Rao, V.R. and Rao, G.N. (2013). Synthesis, characterization and optical properties of zinc oxide nanoparticles. *International Nano Letters*, 3(1), 30, doi: <https://doi.org/10.1186/2228-5326-3-30>.
- Mandal, A.K., Katuwal, S., Tettey, F., Gupta, A., Bhattarai, S., Jaisi, S., Bhandari, D.P., Shah, A.K., Bhattarai, N. and Parajuli, N. (2022). Current research on zinc oxide nanoparticles: Synthesis, characterization, and biomedical application. *Nanomaterial*, 12(17), 3066, doi: <https://doi.org/10.3390/nano12173066>.
- Newbury, D.E. and Ritchie, N.W.M. (2013). Is scanning electron microscopy/energy dispersive x-ray spectrometry (SEM/EDS) quantitative?. *Scanning*, 35, 141-168, doi: <https://doi.org/10.1002/sca.21041>.

- Porrawatkul, P., Pimsen, R., Kuyyogsuy, A., Rattanaburi, P. and Nuengmatcha, P. (2024). Morphology-dependent photocatalytic performance of ZnO nanostructures in organic dye and antibiotic degradation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21, 7397-7414, doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05530-x>.
- Porrawatkul, P., Rattanaburi, P., Nuengmatcha, P., Kuyyogsuy, A. and Pimsen, R. (2023). Effect of Na and Al doping on ZnO nanoparticles for potential application in sunscreens. *Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology*, 240, 112668, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2023.112668>.
- Stevens, S.M., Jansson, K., Xiao, C., Asahina, S., Klingstedt, M., Grüner, D., Sakamoto, Y., Miyasaka, K., Cubillas, P., Brent, R., Han, L., Che, S., Ryoo, R., Zhao, D., Anderson, M.W., Schuth, F. and Terasaki, O. (2009). An appraisal of high resolution scanning electron microscopy applied to porous material. *JEOL News*, 44(1), 17-22.
- Syed, J. (2017). Scanning electron microscopy in oral research. *Journal of the Pakistan Dental Association*, 26(4), 189-195, doi: <https://doi.org/10.25301/JPDA.264.189>.