

การสังเคราะห์และการศึกษาสมบัติของวัสดุผสมซิงค์ออกไซด์/บิสมัทออกซีคลอไรด์
ที่มีความสามารถย่อยสลายสีโรดามีน บี ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
Synthesis and Characteristics of Zinc Oxide/Bismuth Oxychloride Composites
with Photocatalytic Rhodamine B Dye Degradation Capability

รัตนภรณ์ สมฤทธิ์¹ ธีระวิทย์ พลโคกกอง^{1*} วรุตม์ คุณสุทธิ¹ กัญญาณัฐ ปัญญา²
และ รัชชประภา ตราตไธสง²

Rattanaporn Somrit¹ Thirawit Phonkhokong^{1*} Warut Koonnasoot¹ Kanyanat Pattha²
and Ratchaprapa Tradthaisong²

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

²สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

¹Division of Physics, Faculty of Science, Buriram Rajabhat University

²Division of Physics, Faculty of Education, Buriram Rajabhat University

*E-mail: thirawit.pho@bru.ac.th

Received: Oct 17, 2023

Revised: Nov 14, 2023

Accepted: Nov 17, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์วัสดุผสมซิงค์ออกไซด์/บิสมัทออกซีคลอไรด์ (วัสดุผสม ZnO/BiOCl) ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 โดยน้ำหนัก และเพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ขึ้น รวมทั้งศึกษาความสามารถของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ขึ้นในการย่อยสลายสีโรดามีน บี ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง การสังเคราะห์วัสดุผสม ZnO/BiOCl ใช้วิธีการแผ่คลื่นไมโครเวฟ การศึกษาสมบัติของวัสดุผสม ZnO/BiOCl ที่สังเคราะห์ขึ้นใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมเมชัน (FESEM) เทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDX) เทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) และเทคนิคการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) ส่วนการย่อยสลายสีโรดามีน บี ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของวัสดุผสม ZnO/BiOCl ที่สังเคราะห์ขึ้นใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงแบบ UV-Vis spectrophotometer การวิเคราะห์วัสดุผสม ZnO/BiOCl ในทุกอัตราส่วนของ ZnO และ BiOCl ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบพีคการเลี้ยวเบนที่แสดงเฟสเอกซะโกนอลของซิงค์ออกไซด์และเตตระโกนอลของบิสมัทออกซีคลอไรด์ นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุผสมที่มีลักษณะเป็นแผ่น มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด เท่ากับ 581.48 ตารางเมตรต่อกรัม และมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีโรดามีน บี ดีที่สุด เท่ากับ 69.97 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 120 นาที ภายใต้สภาวะที่มีแสง

คำสำคัญ: วัสดุผสม ซิงค์ออกไซด์ บิสมัทออกซีคลอไรด์ การย่อยสลายด้วยกระบวนการเร่งด้วยแสง สีโรดามีน บี

Abstract

This research aimed to synthesize zinc oxide/bismuth oxychloride (ZnO/BiOCl) composites with ratios of 1:1, 1:2, and 2:1 by weight, to characterize the synthesized composites and to study photocatalytic rhodamine B dye degradation capability of the synthesized composites. The ZnO/BiOCl composites were synthesized by microwave radiation. Characterization of the synthesized ZnO/BiOCl composites were performed using X-ray diffraction (XRD), Field emission scanning electron microscope (FESEM), Energy dispersive X-ray analysis (EDX), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and Specific surface area analysis (BET). Photocatalytic degradation

of rhodamine B dye of the synthesized ZnO/BiOCl composites were conducted using UV-Vis spectrophotometer. XRD analysis of the ZnO/BiOCl composites with all ratios of ZnO and BiOCl demonstrated diffraction peaks showing the hexagonal phase of zinc oxide and the tetragonal phase of bismuth oxychloride. Furthermore, it was also found that the ZnO/BiOCl composite with a ratio of 1:1 by weight was a sheet-like composite material with the highest specific surface area of 581.48 square meters per gram and the best efficiency in degrading rhodamine B dye of 69.97 percent in 120 minutes under light condition.

Keywords: Composite, Zinc oxide, Bismuth oxychloride, Photocatalytic degradation, Rhodamine B dye

1. บทนำ

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง หรือกระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic process) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ดีที่สุดในการใช้วัตถุกึ่งตัวนำในการแก้ปัญหาที่น้ำเสีย ซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำ ความเป็นอยู่ของประชาชนและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของประชากรและการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร [1], [2] โดยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เป็นวัสดุกึ่งตัวนำในกลุ่มโลหะออกไซด์ที่มีช่องว่างพลังงานกว้างเท่ากับ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ (Electron volt) พลังงานยึดเหนี่ยวคู่อิเล็กตรอนโฮล (Electron-hole pair) สูงสังเคราะห์ได้หลายวิธี และสามารถเติมสารเจือเพื่อปรับโครงสร้างระดับจุลภาค และโครงสร้างแถบพลังงานให้ได้สมบัติตามที่ต้องการได้ นอกจากนี้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ยังถูกจัดว่าเป็นสารชนิด GRAS (Generally Recognized as Safe) ซึ่งมีความปลอดภัยต่อร่างกายมนุษย์จึงได้รับความสนใจอย่างมาก [3] มีรายงานการนำอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst) ในการย่อยสลายมลพิษทางน้ำด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [4] นอกจากนี้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแล้ว พลังงานแสง ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอน (Photon) ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มากจะทำให้พื้นที่ผิวของการดูดซับเพิ่มขึ้น [5] มีงานวิจัยกล่าวว่าการก่อตัวของเฮเทอโรจังก์ชันคอมโพสิต (Heterojunction composite) หรือวัสดุผสมระหว่างบิสมัทออกซีคลอไรด์ (Bismuth oxychloride, BiOCl) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และซิงค์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารชนิด n ส่งผลให้มีการปรับปรุงการแยกอิเล็กตรอนและโฮล โดยอัตราส่วนระหว่าง BiOCl/ZnO มีผลต่อสัณฐานที่มีรูปร่างเป็นแผ่นนาโน และพื้นที่ผิวของ

วัสดุผสม ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ [1], [6]-[10]

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์วัสดุผสมซิงค์ออกไซด์/บิสมัทออกซีคลอไรด์ (วัสดุผสม ZnO/BiOCl) ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 โดยน้ำหนัก และเพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ขึ้น รวมทั้งศึกษาความสามารถของวัสดุผสมที่สังเคราะห์ขึ้นในการย่อยสลายสีโรดามีน บี ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. การสังเคราะห์วัสดุผสม ZnO/BiOCl

การเตรียมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ใช้วิธีการแผ่นคลื่นไมโครเวฟ ใช้กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที ตามวิธีการของ Somrit et al. [11] สำหรับการเตรียมบิสมัทออกซีคลอไรด์ (BiOCl) ใช้บิสมัทไนเตรท ความบริสุทธิ์ 98% (Bismuth (III) nitrate pentahydrate 98 %) ปริมาตร 0.100 กรัม และโพแทสเซียมคลอไรด์ ความบริสุทธิ์ 99.5% (Potassium chloride 99.5%) ปริมาตร 0.050 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร กวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็กอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 60 นาที หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เพื่อปรับค่า pH จนมีค่าเท่ากับ 8 นำสารเข้าเครื่องไมโครเวฟปรับกำลังไฟฟ้าไปที่ 450 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นกรอง และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และเอทานอล (Ethanol) ทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นำไปบดละเอียดจะได้บิสมัทออกซีคลอไรด์ (Bismuth oxychloride) [12] การเตรียม วัสดุผสม ZnO/BiOCl ทำโดยผสมซิงค์ออกไซด์กับบิสมัทออกซีคลอไรด์ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 โดยน้ำหนัก

2.2. การตรวจสอบสมบัติของวัสดุผสม ZnO/BiOCl

การตรวจสอบสมบัติของวัสดุผสม ZnO/BiOCl ที่สังเคราะห์ขึ้นใช้วิธีต่าง ๆ ดังนี้ ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) โดยใช้เครื่องยี่ห้อ BRUKER รุ่น D8 Advance กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมมิสชัน (Field emission scanning electron microscope, FESEM) โดยใช้เครื่องยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-7800F วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) โดยใช้เครื่องยี่ห้อ Perkin Elmer วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะตามวิธีการของ Brunauer-Emmett Teller (BET) ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน Model NOVA-e ยี่ห้อ Quantachrome วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy dispersive X-ray analysis, EDX) และทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยทดสอบการย่อยสลายสีโรดามีน บี ภายใต้สภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง (Light and dark conditions) โดยในสภาวะที่มีแสงใช้หลอดแสงอาทิตย์จำลองที่มีกำลังไฟฟ้า 35 วัตต์ และวัดปริมาณสีโรดามีน บี ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงแบบ UV-Vis spectrophotometer โดยเก็บตัวอย่างสีโรดามีน บี มาวัดปริมาณทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 30 นาที สำหรับการทดลองในสภาวะที่ไม่มีแสง และทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 120 นาที สำหรับการทดลองในสภาวะที่มีแสง

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

3.1. สมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุผสม ZnO/BiOCl

จากการศึกษาวัสดุผสม ZnO/BiOCl ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุผสม ZnO/BiOCl ที่สังเคราะห์ขึ้นในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 โดยน้ำหนัก ดังแสดงใน Figure 1 โดยในรูปดังกล่าวปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่แสดงเฟสเฮกซะโกนอล (Hexagonal phase) หรือเวิร์ตไซต์ (Wurtzite) ของซิงค์ออกไซด์ โดยปรากฏพีคการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งมุม 2 θ สอดคล้องกับการเลี้ยวเบนจากระนาบ (100) (002) (101) (102) (110) (103) และ (112) สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 01-079-0205 [13] และรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในระนาบ (002) (101) (111) และ (200) ที่สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 01-073-2060 [8], [14] ซึ่งให้

เห็นว่าเป็นบิสมาทออกไซด์คลอไรด์ที่มีโครงสร้างผลึกในระบบเตตระโกนอล (Tetragonal phase) พบว่าความเข้มของพีคบิสมาทออกไซด์คลอไรด์ที่ตำแหน่งมุม 2 θ เท่ากับ 32 องศา ในระนาบ (111) ลดลงตามสัดส่วนของบิสมาทออกไซด์คลอไรด์ที่ลดลง แสดงให้เห็นว่าสามารถเตรียมวัสดุผสม ZnO/BiOCl ได้ [8]

3.2. ลักษณะทางสัญญาณ องค์ประกอบของธาตุ และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุผสม ZnO/BiOCl

ผลการศึกษาวัสดุผสม ZnO/BiOCl ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมมิสชัน (Field emission scanning electron microscope, FESEM) ให้ผลดังแสดงใน Figure 2 โดยในรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงรูปร่างที่เป็นแผ่นและรูปทรงแท่งที่ปะปนกัน แสดงสัญญาณจุลภาคที่ไม่สม่ำเสมอ โดยวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 โดยน้ำหนัก มีขนาดเท่ากับ 29.96 \pm 4.78, 31.09 \pm 6.50 และ 32.47 \pm 4.50 นาโนเมตร ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะตามวิธีการของ Brunauer-Emmett Teller (BET) พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก มีค่าสูงที่สุด รองลงมาเป็นวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 2:1 และ 1:2 โดยน้ำหนัก โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 581.48, 121.83 และ 61.81 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy dispersive X-ray analysis, EDX) พบว่าวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 โดยน้ำหนัก มีธาตุองค์ประกอบที่พบ คือ สังกะสี ออกซิเจน บิสมาท และคลอรีน โดยมีธาตุต่าง ๆ เหล่านี้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ใน Figure 3 แสดงผลของการศึกษาวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค EDX ซึ่งพบการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของธาตุองค์ประกอบ ซึ่งได้แก่ สังกะสี (3A) ออกซิเจน (3B) บิสมาท (3C) และคลอรีน (3D)

3.3. หมู่ฟังก์ชันของวัสดุผสม ZnO/BiOCl

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 4000-400 cm^{-1} ได้สเปกตรัมดังแสดงใน Figure 4 โดยตำแหน่งพีค 3448 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบยืด (Stretching) ของพันธะ O-H ตำแหน่งพีค 1381, 1735 และ 846 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบยืดของ

พันธะ C=O [15], [16] ตำแหน่งพิก 568 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ Zn-O [17] ตำแหน่งพิก 1155 cm^{-1} เป็นพิกของพันธะ Bi-Cl ตำแหน่งพิก 1633 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบงอ (Bending) ของพันธะ O-H ที่เป็นหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) [18] ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดความชื้นของซิงค์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุผสม [19] นอกจากนี้ก็ยังพบว่าวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1

โดยน้ำหนัก มีพิกสูง ที่ตำแหน่ง 1381 และ 846 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของพันธะ C=O จากรายงานที่ผ่านมาพบว่าพันธะดังกล่าวมีส่วนเกี่ยวข้องกับการดูดซับสารบนพื้นผิวของวัสดุผสม ซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการย่อยสลายสารด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [20] สมบัติดังกล่าวของวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก อาจช่วยส่งเสริมการย่อยสลายสารด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

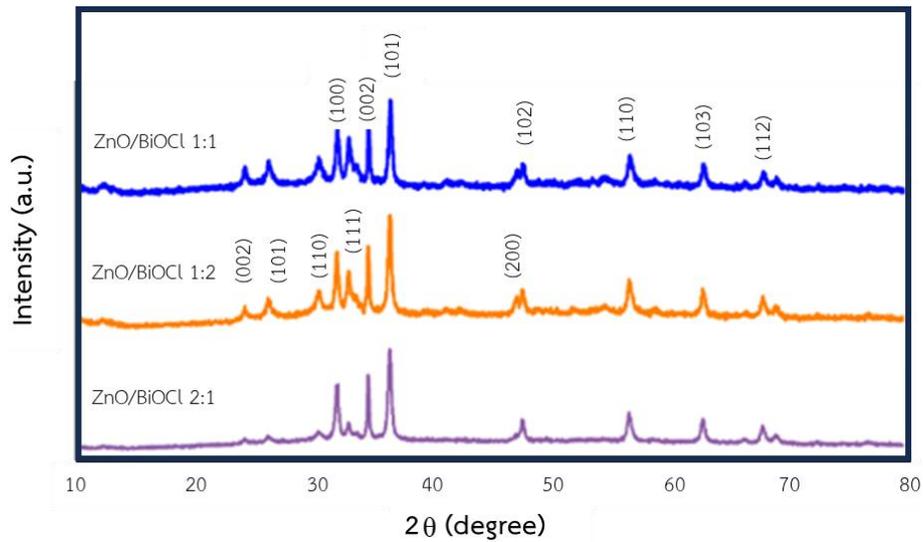


Figure 1 XRD analysis of ZnO/BiOCl composites with different ratios of ZnO and BiOCl

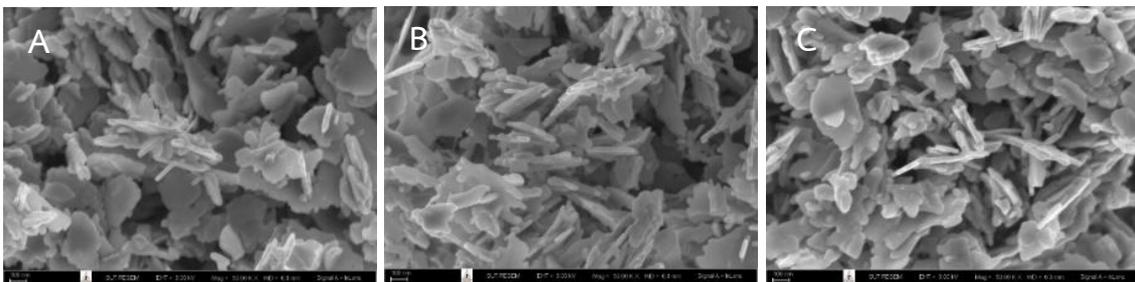


Figure 2 FESEM analysis of ZnO/BiOCl composites with ratios of ZnO and BiOCl of 1:1 (A), 1:2 (B) and 2:1 (C)

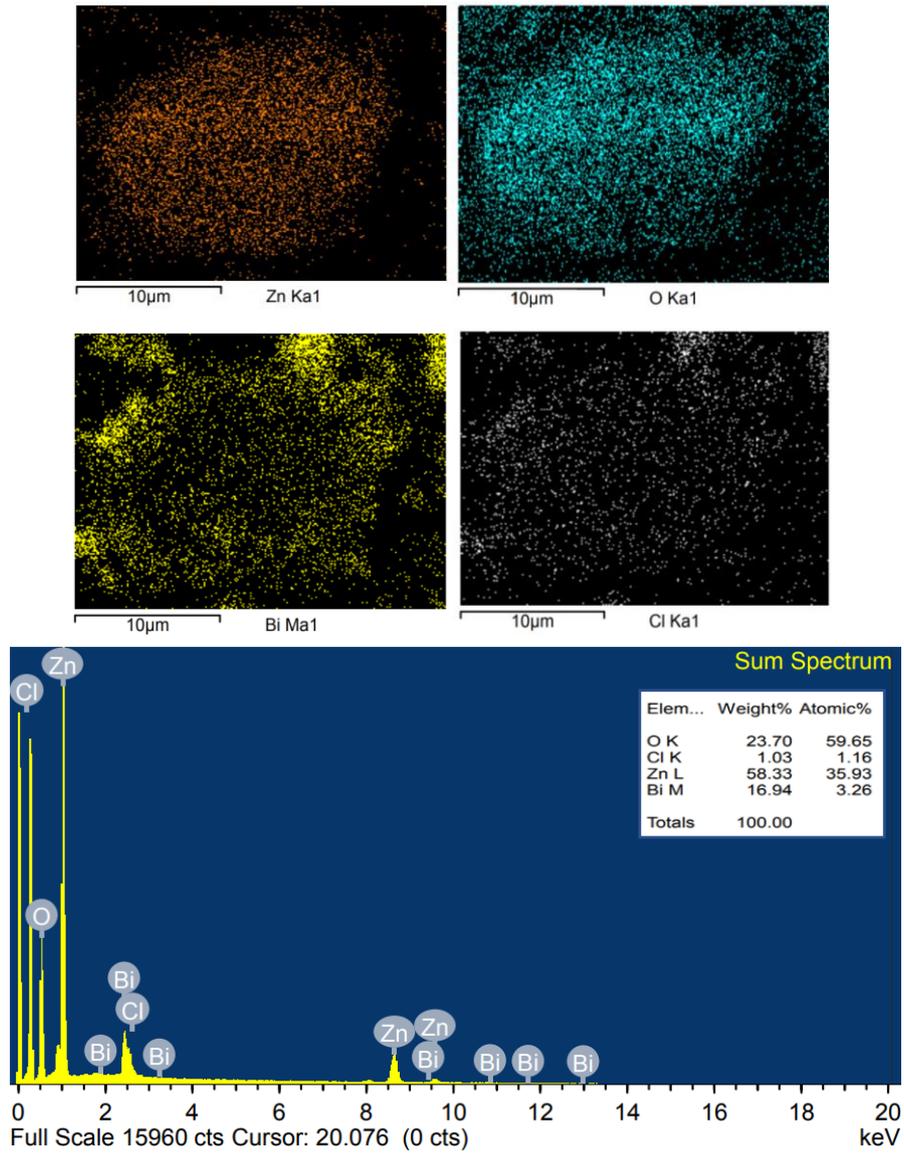


Figure 3 EDX elemental mapping and spectra of ZnO/BiOCl composite with 1:1 ratio of ZnO and BiOCl

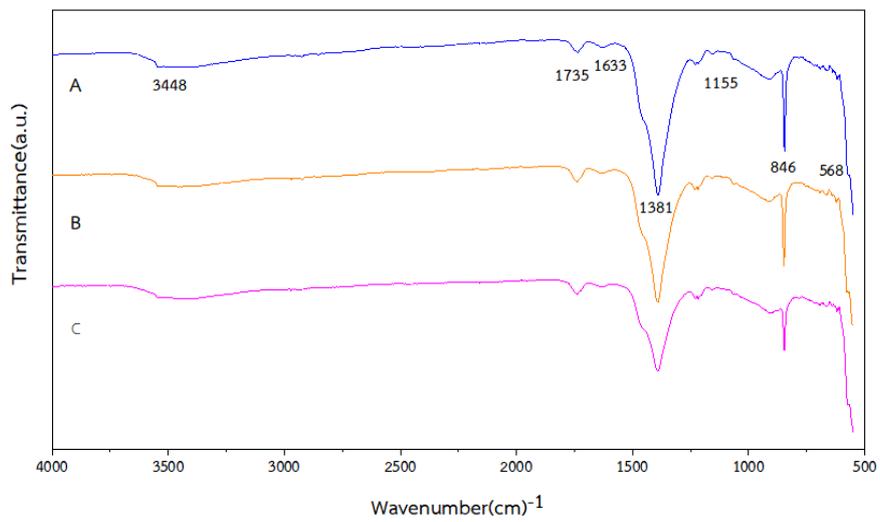


Figure 4 FTIR analysis of ZnO/BiOCl composites with ratios of ZnO and BiOCl of 1:1 (A), 1:2 (B) and 2:1 (C)

3.4. ความสามารถของวัสดุผสม ZnO/BiOCl ในการย่อยสลายสีโรดามีน บี ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

การทดสอบความสามารถของวัสดุผสม ZnO/BiOCl ในการย่อยสลายสีโรดามีน บี ภายใต้สภาวะที่มีแสง และไม่มีแสง (Light and dark conditions) แล้วเก็บตัวอย่างสีโรดามีน บี ทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 30 นาที สำหรับการทดลองในสภาวะที่มีแสง และทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 120 นาที สำหรับการทดลองในสภาวะที่ไม่มีแสง มาวัดปริมาณสีโรดามีน บี ที่คงเหลืออยู่ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงแบบ UV-Vis spectrophotometer ผลการทดสอบพบว่าวัสดุผสม ZnO/BiOCl ที่มีอัตราส่วนของ ZnO และ BiOCl ที่ต่างกันมีความสามารถในการย่อยสลายสีโรดามีน บี ได้ต่างกัน แต่สภาวะที่ทำให้วัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 โดยน้ำหนัก ย่อยสลายสีโรดามีน บี ได้ดีที่สุด คือ ในสภาวะที่ให้แสงเป็นเวลา 120 นาที โดยวัสดุผสม ZnO/BiOCl ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีโรดามีน บี ได้ดีที่สุดคือ วัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:2 และ 2:1 โดยน้ำหนัก โดยมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีโรดามีน บี เท่ากับ 10.94, 69.97 61.84 และ 63.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในสภาวะที่ให้แสงเป็นเวลา 120 นาที (Figure 5) ผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) ที่พบว่าวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ที่พบว่าวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก มีพีคสูง ที่ตำแหน่ง 1381 และ 846 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของพันธะ C=O สมบัติดังกล่าวของวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

Figure 6 แสดงสเปกตรัมของสีโรดามีน บี ที่ถูกย่อยสลายด้วยวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะที่มีแสง และไม่มีแสง จะเห็นได้ว่าความสูงของสเปกตรัมดังกล่าวจะต่ำสุดในสภาวะที่ให้แสงเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งในสภาวะดังกล่าวสีโรดามีน บี ถูกย่อยสลายโดยวัสดุผสมไปมากที่สุด

จากการวิเคราะห์จลนศาสตร์การย่อยสลายสีโรดามีน บี ด้วยวัสดุผสม ZnO/BiOCl พบว่าเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม Lagergren (Lagergren pseudo-first-order model) โดยพบว่าเมื่อใช้แบบจำลองดังกล่าวใน

การวิเคราะห์การย่อยสีโรดามีน บี ของวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 โดยน้ำหนัก เทียบกับการย่อยสลายสีโรดามีน บี เมื่อไม่มีวัสดุผสม ZnO/BiOCl ได้ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order rate constant, K) เท่ากับ 0.00734, 0.00605, 0.00638 และ $8.55534 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ และได้ค่าสัมประสิทธิ์ R^2 (Coefficient of Determination) เท่ากับ 0.92416, 0.91129, 0.86943 และ 0.86943 ตามลำดับ (Figure 7) ผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับการวิเคราะห์จลนศาสตร์การย่อยสลายสีเมทิล ออร์เรนจ์ (Methyl orange) ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) ที่เป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม Lagergren [21]

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์วัสดุผสม ZnO/BiOCl ที่มีอัตราส่วนของ ZnO ต่อ BiOCl เท่ากับ 1:1, 1:2 และ 2:1 โดยน้ำหนักได้ด้วยวิธีการแผ่คลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที จากการศึกษาสมบัติ และความสามารถในการย่อยสลายสีโรดามีน บี พบว่าวัสดุผสม ZnO/BiOCl อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุผสมที่มีลักษณะเป็นแผ่น มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด เท่ากับ 581.48 ตารางเมตรต่อกรัม และมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีโรดามีน บี ดีที่สุด เท่ากับ 69.97 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 120 นาที ภายใต้สภาวะที่มีแสง งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสม ZnO/BiOCl เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีวิธีการเตรียมที่ไม่ซับซ้อน และมีต้นทุนต่ำ

5. References

- [1] Yang, X. and et al. 2021. One-pot construction of robust BiOCl/ZnO p-n heterojunctions with semi-coherent interfaces toward improving charge separation for photodegradation enhancement. *Nanoscale Advances*. 3(16) : 4851-4857.
- [2] Sombatsri, S. and et al. 2017. Biosorption of rhodamine B dyes using modified water hyacinth roots. *RMUTP Research Journal*. 11(2): 59-68. (in Thai)

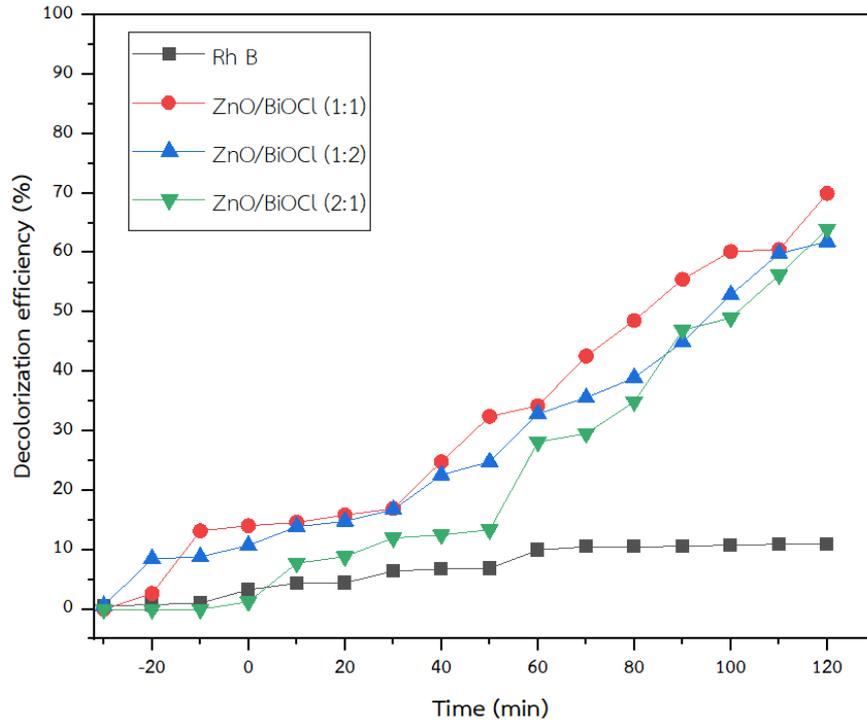


Figure 5 Photocatalytic activity of ZnO/BiOCl composites on the degradation of rhodamine B dye at different times under dark and light conditions

(In X-axis; -10 to -30 min = times in dark condition and 10 to 120 min = times in light condition)

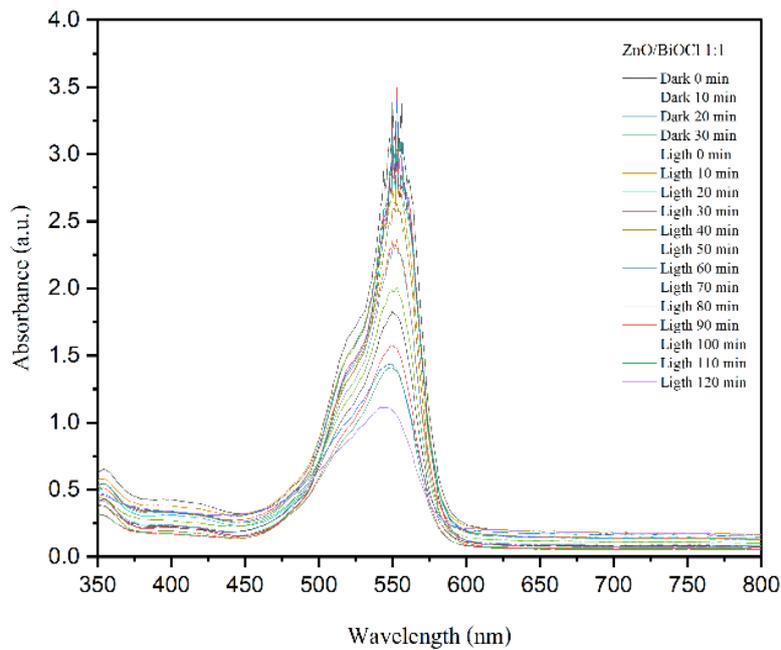


Figure 6 UV-Vis absorption spectra of rhodamine B dye after being degraded by ZnO/BiOCl (1:1) composite at different times under dark and light conditions

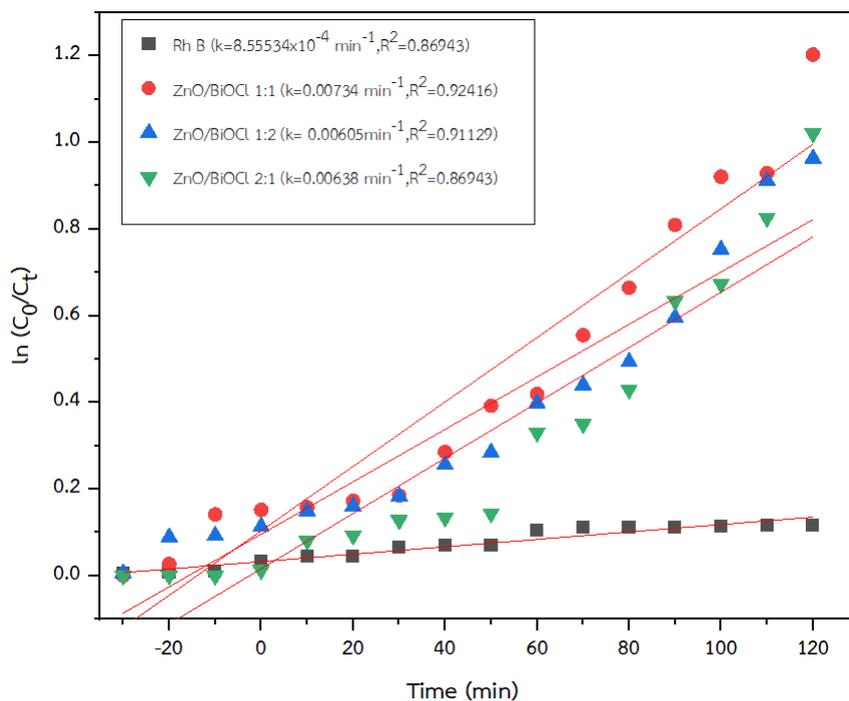


Figure 7 Plots for the Lagergren pseudo-first-order model (line plots) for the degradation of rhodamine B dye at different times under dark and light conditions

(ln X-axis; -10 to -30 min = times in dark condition and 10 to 120 min = times in light condition)

- [3] Pirot, S. 2022. Preparation of zinc oxide nanoparticles for cancer treatment. **Journal of Engineering Technology Access**. 2(1): 22-34. (in Thai)
- [4] Bukhari, A. and et al. 2022. Catalytic degradation of MO and MB dyes under solar and uv light irradiation using ZnO fabricated using *Syzygium cumini* leaf extract. **Zeitschrift für Physikalische Chemie**. 236(5): 659-671.
- [5] Suthivatanakul, O. 2019. **Dye Wastewater Treatment by Photocatalytic Process Using TiO₂ Catalysts and Nanobubbles**. M.Eng. Thesis, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)
- [6] Jun-Qing, C. and et al. 2019. Study on highly efficient BiOCl/ZnO pn heterojunction: Synthesis, characterization and visible-light excited photocatalytic activity. **Journal of Molecular Structure**. 1183: 209-216.
- [7] Fu, Q. and et al. 2022. Constructing BiOCl/ZnO heterojunction from Bi-MOF for efficient photocatalytic degradation performance. **Inorganic Chemistry Communications**. 140: 109445.
- [8] Hong, J. and et al. 2022. Preparation of ZnO-BiOCl composite and its visible-light photocatalytic degradation of RhB. **Journal of Physics: Conference Series**. 2285: 1-5.

- [9] Liu, X. and et al. 2019. Facile Preparation of BiOCl/ZnO heterostructure with oxygen-rich vacancies and its enhanced photocatalytic performance. **ChemistrySelect**. 4(42): 12245-12251.
- [10] Zhang, Z. and et al. 2021. Synthesis of Ag loaded ZnO/BiOCl with high photocatalytic performance for the removal of antibiotic pollutants. **Crystals**. 11(8): 981.
- [11] Somrit, R. and et al. 2023. Effects of calcination temperature on physicochemical properties and antifungal activity of nano-zinc oxide prepared by sol-gel method. **Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University**. 25(1): 72-80. (in Thai)
- [12] Maisang, W. and et al. 2020. Microwave-assisted hydrothermal synthesis of BiOBr/ BiOCl flowerlike composites used for photocatalysis. **Research on Chemical Intermediates**. 46: 2117-2135.
- [13] Loka, C. and Lee, K.S. 2022. Enhanced visible-light-driven photocatalysis of Ag/Ag₂O/ZnO nanocomposite heterostructures. **Nanomaterials**. 12(15): 2528.
- [14] Mansor, E.S., Geioushy, R.A. and Fouad, O.A. 2021. PANI/BiOCl nanocomposite induced efficient visible-light photocatalytic activity. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**. 32: 1992-2000.
- [15] De Peres, M.L. and et al. 2019. Zinc oxide nanoparticles from microwave-assisted solvothermal process: Photocatalytic performance and use for wood protection against xylophagous fungus. **Nanomaterials and Nanotechnology**. 9: 1-8.
- [16] Lopez-Velazquez, K. and et al. 2021. Synthesis of Fe-BiOBr-N by microwave-assisted solvothermal method: Characterization and evaluation of its photocatalytic properties. **Materials Science in Semiconductor Processing**. 123: 105499.
- [17] Jayarambabu, N. and et al. 2014. Germination and growth characteristics of mungbean seeds (*Vigna radiata L.*) affected by synthesized zinc oxide nanoparticles. **International Journal of Current Engineering and Technology**. 4(1): 3411-3416.
- [18] Seddigi, Z.S. and et al. 2017. Facile synthesis of light harvesting semiconductor bismuth oxychloride nano photo-catalysts for efficient removal of hazardous organic pollutants. **PLoS One**. 12(2): 1-19.
- [19] Rohilla, S. and et al. 2021. Excellent UV-light triggered photocatalytic performance of ZnO.SiO₂ nanocomposite for water pollutant compound methyl orange dye. **Nanomaterials**. 11(10): 2548.
- [20] Ntuli, T.D. and et al. 2023. Improved adsorption and photocatalytic degradation of methyl orange by onion-like nanocarbon/TiO₂ nanocomposites. **Applied Sciences**. 13(8): 5125.
- [21] Nabavi, N., Peyda, M. and Sadeghi, G. 2017. The photocatalytic kinetics of the methyl orange degradation in the aqueous suspension of irradiated TiO₂. **Journal of Human, Environment and Health Promotion**. 2(3): 154-160.