

การศึกษาปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์ผ่านเคมีสีเขียวโดยใช้สารสกัดใบฝรั่ง

Study on the Photocatalytic Activity of ZnO and Ag/ZnO Nanoparticles Synthesized via Green Chemistry using *Psidium guajava* L. Leaf Extract

ลดาวัลย์ คงศรีจันทร์¹, กนกวรรณ ภูมิวนิชกิจ^{2*}, สุพจน์ แสนสุข,² คอติเยาะ เสมะ² และ มะห์ซีลาตี เจ๊ะลีมา²
Ladawan Khongsichan¹, Kanokwan Phumivanichakit^{2*}, Supojanee Sansook²,
Coleyoh Sema² and Maseelatee Jaeleema²

(Received: 20 January 2025; Revised: 9 April 2025; Accepted: 28 June 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ตามหลักเคมีสีเขียวโดยใช้สารสกัดใบฝรั่ง ศึกษาองค์ประกอบของสารสกัดใบฝรั่งโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) พบว่ามีองค์ประกอบของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอนิล (-C=O) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบฟีนอลิกที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ มีค่าช่องว่างพลังงานของซิงค์ออกไซด์ 3.30 อิเล็กตรอนโวลต์ และค่าช่องว่างพลังงานของอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ 3.33 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเจืออนุภาคซิลเวอร์บนพื้นผิวซิงค์ออกไซด์ส่งผลให้ช่องว่างพลังงานสูงขึ้นและอนุภาคที่สังเคราะห์มีขนาดในระดับนาเมตรด้วย จากนั้นศึกษาปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ผ่านการสลายสีย้อมโรดามีน บี ภายใต้แสงยูวี เป็นเวลา 150 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของสีย้อมโรดามีน บี คือ 554 นาโนเมตร พบว่าซิงค์ออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีร้อยละการสลายสีย้อมต่ำสุดคือร้อยละ 24.36 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเป็น 900 องศาเซลเซียส มีร้อยละการสลายสีย้อมสูงขึ้นเป็นร้อยละ 49.45 ซึ่งสอดคล้องกับผลสเปกตรัมที่แสดงแถบการสั่นของ Zn-O เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาความเป็นผลึกของซิงค์ออกไซด์สูงขึ้น เมื่อนำซิงค์ออกไซด์หลังเผามาเจือด้วยซิลเวอร์โดยวิธีโพโตรดักชัน พบว่าส่งผลให้ ภาพในการสลายสีย้อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีการสลายสีย้อมร้อยละ 87.99 และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีการสลายสีย้อมสูงสุดคือร้อยละ

¹คณะสาธารณสุขศาสตร์และสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

¹Faculty of Public Health and Allied Health Sciences, Yala Rajabhat University

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

²Faculty of Science and Technology, Princess of Naradhiwas University

*Corresponding Author, E-mail: kanokwan.p@pnu.ac.th

97.90 ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลจากการเผาไหม้ร่วมกับการเจือซิลเวอร์บนพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ที่ทำให้ปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงมีประสิทธิภาพสูง

คำสำคัญ: สารสกัดใบฝรั่ง อนุภาคนาโนซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ ปฏิกิริยาเร่งเชิงแสง

Abstract

This study aimed to investigate the photocatalytic activity of ZnO and Ag/ZnO nanoparticles synthesized via green chemistry using guava (*Psidium guajava* Linn.) leaf extract. The composition of the guava leaf extract was analyzed using Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy, revealing the presence of hydroxyl (-OH) and carbonyl (-C=O) functional groups, indicative of phenolic compounds acting as reducing agents in the synthesis of ZnO nanoparticles. The photocatalytic activity of the synthesized ZnO and Ag/ZnO nanoparticles was evaluated through the degradation of Rhodamine B dye under UV light irradiation for 150 minutes, with absorbance measured at the dye's maximum wavelength of 554 nm. Results indicated that ZnO calcined at 400°C exhibited the lowest dye degradation efficiency at 24.36%, while increasing the calcination temperature to 900°C can be enhanced the degradation efficiency to 49.45%. This improvement correlates with FTIR spectra showing intensified Zn-O vibration bands, suggesting increased crystallinity of ZnO at higher calcination temperatures. Furthermore, Ag doping on the ZnO surface via photoreduction significantly enhanced photocatalytic performance; Ag/ZnO calcined at 400°C achieved 87.99% dye degradation, and at 900°C, the degradation efficiency reached 97.90%. These findings demonstrate the combined influence of calcination temperature and Ag doping on the surface of ZnO, leading to superior photocatalytic efficiency.

Keywords: *Psidium guajava* L. leaf extract, Ag/ZnO nanoparticles, Photocatalytic activity

บทนำ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อภาคเศรษฐกิจของประเทศไทยอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นแหล่งผลิตสินค้าเพื่อการส่งออกและการบริโภคในประเทศ อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมนี้มีศักยภาพที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก โดยเฉพาะจากกระบวนการฟอกย้อมที่ใช้น้ำปริมาณมากและปล่อยน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารเคมีออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ สีย้อมอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมเป็นหนึ่งใน

ปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำสาธารณะ ด้วยเหตุนี้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (photocatalysis) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษที่ยากต่อการย่อยสลาย เช่น สี ย้อมอินทรีย์ การใช้วัสดุที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่สามารถทำลายโครงสร้างของสารเหล่านี้ การใช้สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่แพร่หลายมี 2 ชนิด ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ ซิงค์ออกไซด์เนื่องจากเตรียมได้ง่าย ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ โดยในหลายปีมานี้นิยมสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ที่มีการเจือธาตุอื่นเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงให้ดียิ่งขึ้น โดยธาตุที่เจือมักมีคุณสมบัติในการส่งผ่านอิเล็กตรอนให้ดียิ่งขึ้น เช่น การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและคลอรีน ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น (Abu & Mohd, 2023) การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เจือด้วยซัลเฟอร์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในกระบวนการเร่งเชิงแสงสลายสีย้อมโรดามีน บี ซึ่งพบว่าส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น (Mirzaeifard et al., 2020)

ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (photocatalyst) ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพดี มีเสถียรภาพทางเคมี หาซื้อได้ง่ายในเชิงพาณิชย์ มีราคาไม่แพง และมีกระบวนการสังเคราะห์หลากหลายวิธี (Raza et al., 2023) แต่ซิงค์ออกไซด์ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญคือเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงาน (band gap) กว้าง (ประมาณ 3.37 eV) ส่งผลให้มีการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วของอิเล็กตรอน/โฮล (electron/hole recombination) ทำให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเกิดได้น้อยลง (Zhang et al., 2016) โลหะเงินเป็นโลหะที่นิยมเจือในซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากทำหน้าที่เป็นอ่างอิเล็กตรอน (e-sink) ช่วยในการกักเก็บและถ่ายโอนอิเล็กตรอน ลดการรวมกันของอิเล็กตรอน และโฮล เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงให้นานขึ้นทำให้การสลายสีย้อมเกิดได้ดียิ่งขึ้น (Hussain et al., 2024)

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถทำได้หลายวิธี โดยเฉพาะการสังเคราะห์ตามหลักเคมีสีเขียว (Green synthesis) ที่ใช้สารสกัดจากพืช เช่น ใช้สารสกัดจากสาหร่ายพวงกะโหลก (*Ceratophyllum demersum* L.) ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอมโพสิต Ag-ZnO/rGO และประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมโรดามีน บี (Kadhem & Alshamsi, 2023) การสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอมโพสิต Ag/ZnO-MMT จากสารสกัดใบตำแย (*Urtica dioica* L.) โดยสามารถเกิดประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีภายใต้แสงวิสิเบิล การสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอมโพสิต Ag-ZnO โดยสารสกัดจากใบชา (*Trigonella foenum-graecum* L.) มีคุณสมบัติต้านแบคทีเรีย ต้านเชื้อรา ต้านอนุมูลอิสระ และเป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาเชิงแสง (Noohpishah et al., 2020) โดยสารสกัดเหล่านี้มีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ ไฮดรอกซิล (-OH) คาร์บอนิล (C=O) กรดคาร์บอกซิลิก (-COOH) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และเป็นสารเพิ่มความเสถียรในกระบวนการสังเคราะห์ สารสกัดจากใบฝรั่งมีสารที่น่าสนใจหลายชนิด เช่น สารประกอบ Caryophyllene cineol Tannin Sesquiterpenoids และ Triterpenoid ซึ่งสารกลุ่มนี้สามารถให้อิเล็กตรอน จึงมีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนได้ เช่น ใช้สารสกัดจากใบฝรั่งเป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Sougandhi & Ramanaiah, 2020) การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Jeyasundari et al., 2017) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงของอนุภาคนาโน

ซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ผ่านเคมีสีเขียวโดยใช้สารสกัดใบฝรั่ง โดยศึกษาอิทธิพลที่มีต่อการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงผ่านการสลายสีย้อมโรดามีน บี

วัตถุประสงค์การทำวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ผ่านหลักเคมีสีเขียวโดยใช้สารสกัดจากใบฝรั่งและศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ
2. ศึกษาปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์จากการสลายสีย้อมโรดามีน บี

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์

- การเตรียมสารสกัดใบฝรั่ง ล้างทำความสะอาดใบฝรั่ง หั่นให้มีขนาดเล็กเป็นฝอย ปริมาณ 50 กรัม เติมน้ำกลั่นลงไป 200 มิลลิลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง กรองด้วยกระดาษกรอง และบรรจุในขวดรูปชมพู่ปิดด้วยฟลอยด์เก็บไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
- การเตรียมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ นำสารสกัดใบฝรั่งไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เติมซิงค์ไนเตรต เฮกซะไฮเดรต 5.0 กรัม จากนั้นให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร หยดลงในของผสมระหว่างสารสกัดใบฝรั่งและซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต นำไปรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ตะกอน นำมากรองด้วยกระดาษกรอง ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นจำนวน 3 ครั้ง ล้างด้วยเอทานอลจำนวน 1 ครั้ง อบตะกอนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นบดตะกอนให้ละเอียดและไปเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- การสังเคราะห์ซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ (Ag/ZnO) เตรียมซิงค์ออกไซด์จากสารสกัดใบฝรั่งและเผาที่ 400 หรือ 900 องศาเซลเซียส 0.2 กรัม เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร นำไปวางในเครื่องโซนิกเซนเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นหยด 0.012 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตรเก็บในที่มืด 30 นาที จากนั้นนำไปฉายแสง 1 ชั่วโมง เปิดหลอดไฟแบล็คไลท์ 3 หลอด (15 วัตต์ ยี่ห้อ Sylvania) ปฏิบัติทั้งหมดดำเนินการภายใต้สภาวะการคนสม่ำเสมอ นำตะกอนที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง ตามด้วยเอทานอล 1 ครั้ง นำไปกรอง จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำตะกอนที่ได้มาบดให้เป็นผงละเอียดบรรจุในซองซิปล็อคพลาสติกเก็บไว้ในที่ไม่มีแสงและความชื้น

2. ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์

ศึกษาองค์ประกอบของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์โดยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปี (UV – Vis Spectroscopy)

3. การศึกษาปฏิกิริยาเร่งเชิงแสง

ซิงค์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นที่สภาวะต่าง ๆ ปริมาณ 0.1 กรัม เติมสีย้อมที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-5} โมลต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ศึกษาการดูดซับสีย้อมในที่มืด 30 นาที เก็บสารละลายสีย้อม 4 มิลลิลิตร จากนั้นฉายแสงเปิดหลอดไฟแบล็คไลท์ 3 หลอด (15 วัตต์ ยี่ห้อ Sylvania) เก็บสารละลายสีย้อมครั้งละ 4 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาทีต่อเนื่องกัน 5 ครั้ง รวม 150 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมโรดามีน บี ที่ความยาวคลื่น 554 นาโนเมตร คำนวณหาร้อยละการสลายของสีย้อมจากสมการต่อไปนี้ (Zhang et al., 2020)

$$\text{Degradation (\%)} = [(C_0 - C_t)/C_0] \times 100 = [(A_0 - A_t)/A_0] \times 100$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมก่อนฉายแสง

C_t คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมหลังฉายแสง

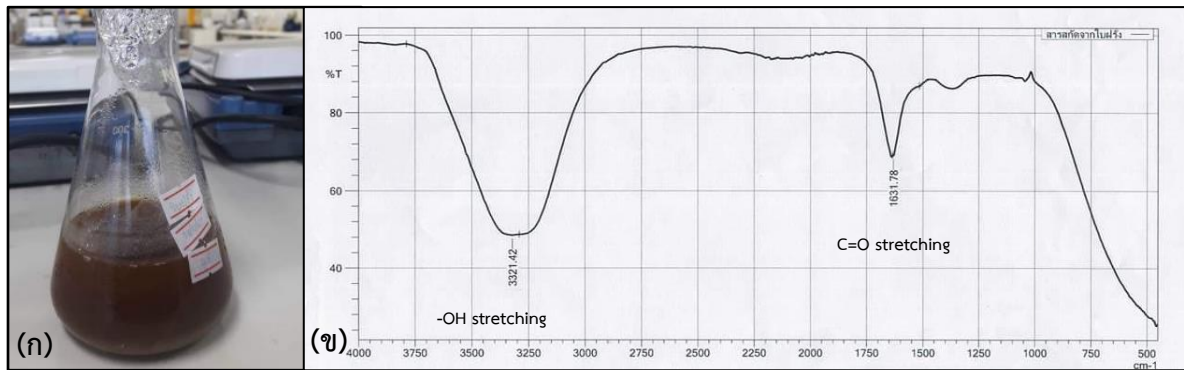
A_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมก่อนฉายแสง

A_t คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมหลังฉายแสง

ผลการวิจัย

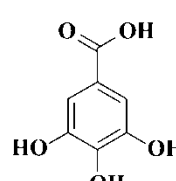
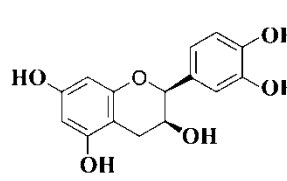
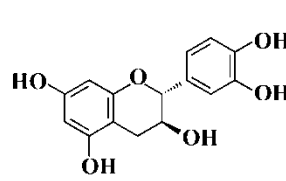
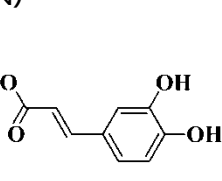
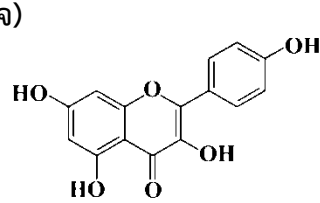
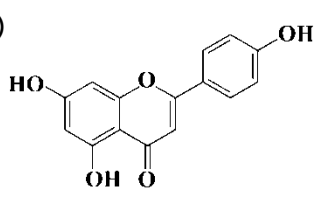
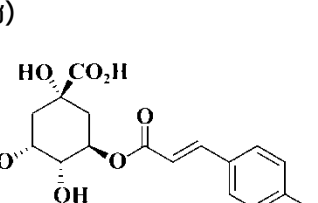
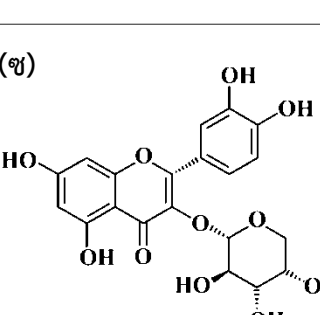
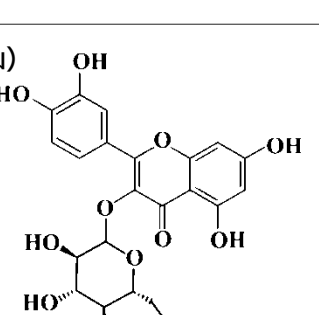
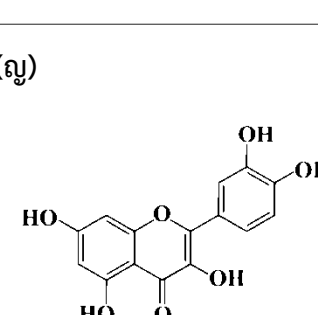
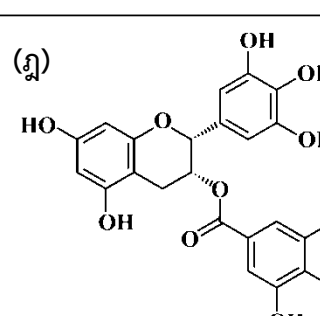
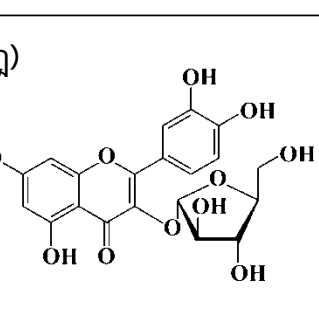
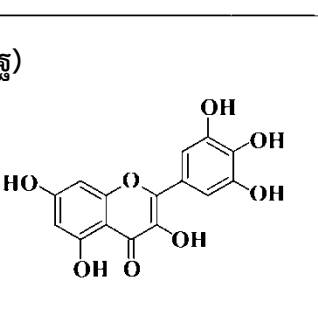
1. ผลการสกัดใบฝรั่งและคุณลักษณะเฉพาะของสารสกัด

สารสกัดจากใบฝรั่งที่ศึกษาสกัดโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย เนื่องจากสารสำคัญที่ใช้เป็นตัวรีดิวซ์เป็นสารที่มีขั้ว เช่น สารโพลีฟีนอลิก ได้แก่ ฟลาโวนอยด์และแทนนินซึ่งเป็นสารสำคัญที่ช่วยในการรีดิวซ์ไอออนโลหะให้กลายเป็นอนุภาคนาโน (Patil & Rane, 2020) สารสกัดที่ได้จากใบฝรั่งมีลักษณะเป็นสารละลายสีน้ำตาล เมื่อนำไปศึกษาด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของสารสกัดใบฝรั่งผ่านการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ในการตรวจสอบพันธะเคมี และ หมู่ฟังก์ชันในองค์ประกอบ พบว่าสเปกตรัมทั้งปรากฏพิคที่ช่วงเลขคลื่นตรงกัน ได้แก่ 3321.42 cm^{-1} และ 1631.78 cm^{-1} ที่เป็นแถบการยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และแถบการยืดของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ซึ่งพบในโครงสร้างของสารประกอบกลุ่มฟีนอลิก (Sougandhi & Ramanaiah, 2020) ลักษณะสารสกัดจากใบฝรั่ง และสเปกตรัม FTIR แสดงดังภาพที่ 1 (ก) และ (ข)



ภาพที่ 1 สารสกัดจากใบฝรั่ง (ก) และ (ข) สเปกตรัม FTIR ของสารสกัดจากใบฝรั่ง

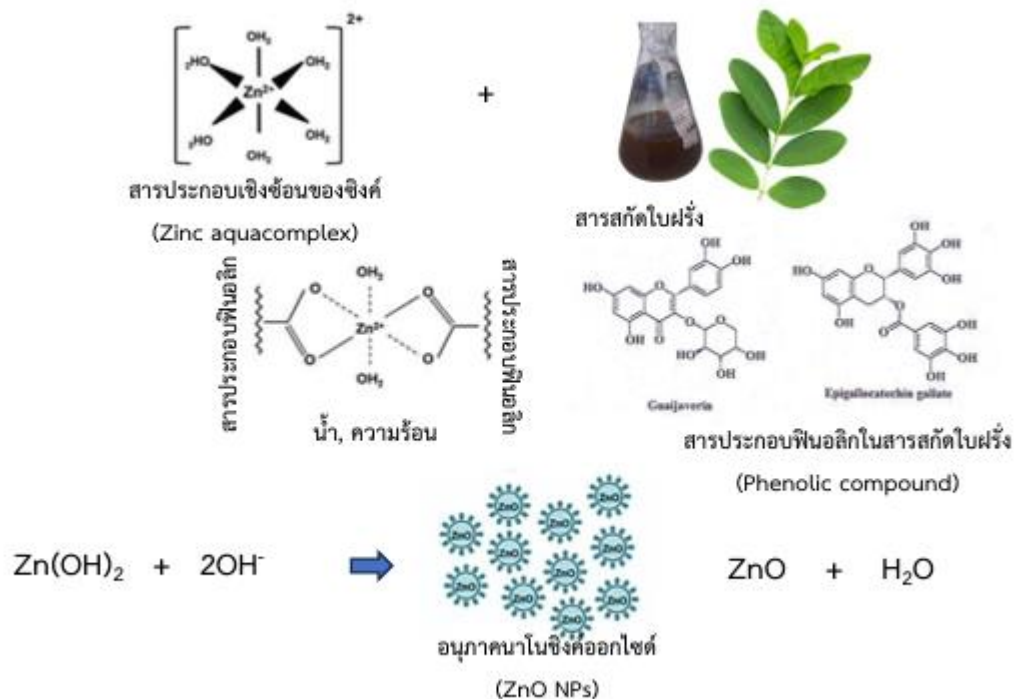
จากผลดังกล่าวสอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีจากสารสกัดใบฝรั่ง ที่ประกอบด้วยสารกลุ่มฟีนอลิก (Phenolic compound) เป็นจำนวนมาก ได้แก่ Gallic acid Epicatechin Catechin Caffeic acid Kaemfero Apiginin Guajadial Chlorogenic acid Guaijaverin Hyperine Epigallocatecin gallate Avicularin และ Myricetin (Changan et al., 2021) โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดจากใบฝรั่ง ดังแสดงในภาพที่ 2

(ก)  Gallic acid	(ข)  Epicatechin	(ค)  Catechin	(ง)  Caffeic acid
(จ)  Kaempferol	(ฉ)  Apigenin	(ช)  Chlorogenic acid	
(ซ)  Guajaverin	(ณ)  Hyperin	(ญ)  Quercetin	
(ฎ)  Epigallocatechin gallate	(ฏ)  Avicularin	(ฐ)  Myricetin	

ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของสารสกัดใบฝรั่ง (ก) Gallic acid (ข) Epicatechin (ค) Catechin (ง) Caffeic acid (จ) Kaempferol (ฉ) Apigenin (ช) Chlorogenic acid (ซ) Guajaverin (ณ) Hyperin (ญ) Epigallocatechin gallate (ฏ) Avicularin (ฐ) Myricetin

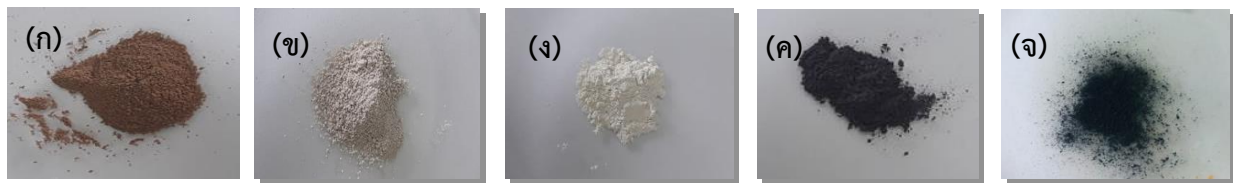
2. ลักษณะทางกายภาพและศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ตามหลักเคมีสีเขียวโดยใช้สารสกัดจากใบฝรั่งเป็นตัวรีดิวซ์ในกระบวนการตกตะกอน โดยมีกลไกในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Vittaya & Chalad, 2022) ดังภาพที่ 3



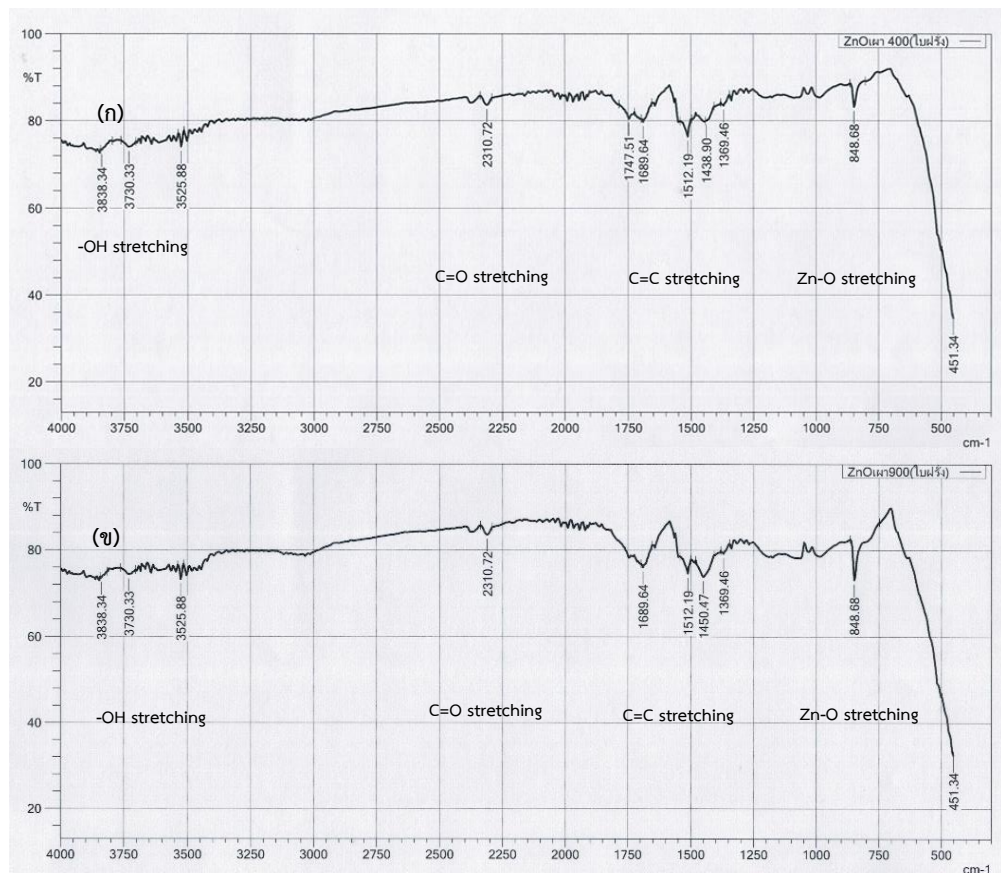
ภาพที่ 3 กลไกในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารสกัดใบฝรั่ง

ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเผาปรับปรุงที่อุณหภูมิ 400 และ 900 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ศึกษาอิทธิพลของสารเจือโดยเจือโลหะเงินด้วยวิธีโพโตรีดักชัน จากการทดลองพบว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารสกัดใบฝรั่งได้ตะกอนเป็นผงสีน้ำตาล หลังจากเผาที่ 400 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อน เมื่อเผาที่ 900 องศาเซลเซียส ได้ซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว ดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ จากลักษณะทางกายภาพพบว่าซิงค์ออกไซด์ก่อนเผามีองค์ประกอบจากสารสกัดใบฝรั่งเจือปนอยู่มาก เนื่องจากมีสีน้ำตาลเข้มเหมือนสารสกัดจากใบฝรั่ง เมื่อเผาที่ 400 องศาเซลเซียส สารอินทรีย์และองค์ประกอบถูกเผาทำให้สีอ่อนลงเป็นสีน้ำตาลอ่อน และลักษณะของซิงค์ออกไซด์เผาที่ 900 องศาเซลเซียสมีลักษณะเป็นผงสีขาวเหมือนซิงค์ออกไซด์ที่ขายตามท้องตลาด เมื่อนำซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการเผามาเจือด้วยซิลเวอร์โดยวิธีโพโตรีดักชัน คือการฉายแสงยูวีเพื่อรีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออนในสารละลายให้เป็นโลหะซิลเวอร์เคลือบบนพื้นผิวซิงค์ออกไซด์ทำให้เปลี่ยนเป็นผงสีเทาดำ ตามภาพที่ 4 (ง) และ (จ)

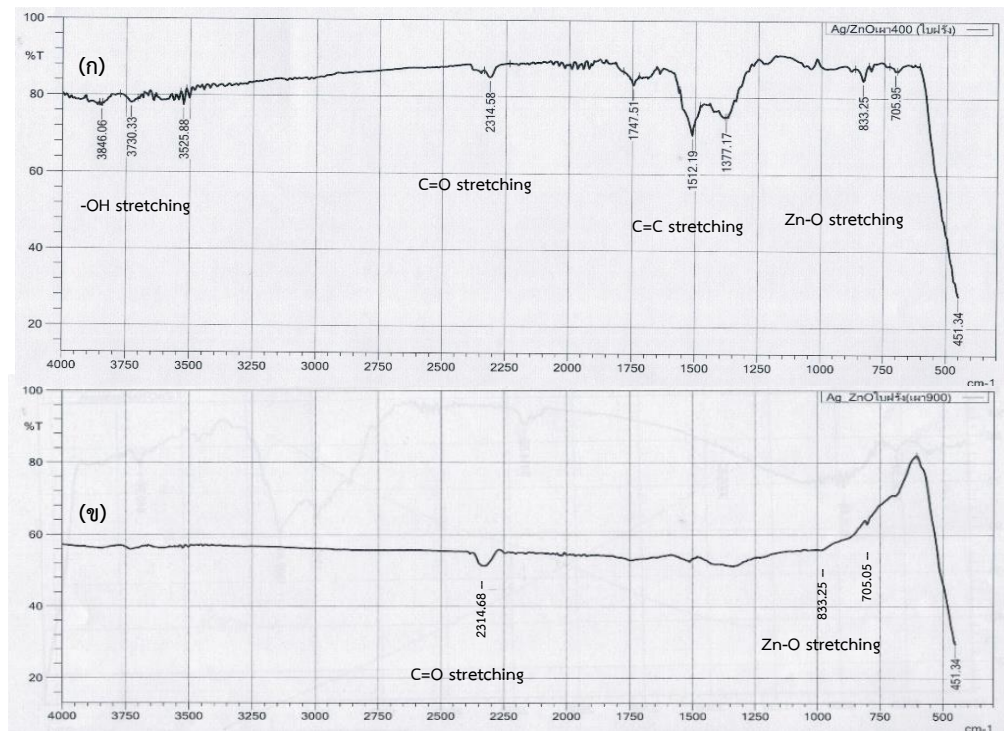


ภาพที่ 4 ผงซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากใบฝรั่ง (ก) ซิงค์ออกไซด์ก่อนเผา (ข) ซิงค์ออกไซด์เผาที่ 400 องศาเซลเซียส (ค) ซิงค์ออกไซด์เผาที่ 900 องศาเซลเซียส (ง) ซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์เผาที่ 400 องศาเซลเซียส (จ) ซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมจากซิงค์ออกไซด์เผาที่ 900 องศาเซลเซียส

การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์วิธีเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและองค์ประกอบของสารด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี โดยซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ประกอบด้วยซิงค์ออกไซด์เผาที่ 400 องศาเซลเซียส และซิงค์ออกไซด์เผาที่ 900 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 5 (ก) และ (ข) ปรากฏแถบการดูดกลืนที่เลขคลื่น 3838.34, 3737.33 และ 3525.88 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับแถบการดูดกลืนของวงแหวนฟีนอลซึ่งเป็นองค์ประกอบในสารสกัด แสดงพันธะ O-H (O-H stretching) ในช่วง 3735-3023 cm^{-1} จากหมู่ไฮดรอกซิลของโครงสร้างฟีนอลิกบนพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ การเลื่อนไปทางที่มีความยาวคลื่นมากขึ้นแสดงให้เห็นการเกิดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Kaningini et al., 2022) ที่ตำแหน่ง 2310.72 cm^{-1} สอดคล้องกับแถบการสั่นของ $\text{O}=\text{C}=\text{O}$ ซึ่งมาจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเผาปรับปรุง (Kumar et al., 2015) ที่ตำแหน่ง 1747.51 cm^{-1} และ 1689.64 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) ในสารประกอบคาร์บอนเนตที่ปนเปื้อนอยู่บนพื้นผิวซิงค์ออกไซด์ และแถบการสั่นที่สำคัญอยู่ในตำแหน่ง 848.68 และ 451.34 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นที่ยืนยันโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ โดยเป็นตำแหน่งที่เกิดพันธะของโลหะออกไซด์ Zn-O (Ochieng et al., 2015) เมื่อนำอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์มาเจือด้วยซิลเวอร์ ปรากฏสเปกตรัมที่ 3838.34, 3737.33 และ 3525.88 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์เผาที่ 400 องศาเซลเซียส ในขณะที่อนุภาคนาโนซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์เผาที่ 900 องศาเซลเซียส ไม่ปรากฏแถบการสั่นในช่วงนี้ แต่ปรากฏพีคที่ชัดเจนที่ตำแหน่ง 2310.72 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ $\text{O}=\text{C}=\text{O}$ ในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับบนผิวของซิงค์ออกไซด์จากกระบวนการเผานอกจากนั้นยังปรากฏแถบการสั่นที่สำคัญของ M-O-M และ M-O ซึ่งยืนยันในการเกิด Zn-O ของซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ (Shameli et al., 2017) ดังภาพที่ 6 (ก) และ (ข) โดยพีคที่ปรากฏของอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์จะมีความเข้มลดลงเมื่อเปรียบกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ไม่เจือซิลเวอร์เนื่องจากการก่อดัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์บนพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ (Nagaraju et., 2017)



ภาพที่ 5 สเปกตรัม FTIR ของซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมจากสารสกัดใบฝรั่งเมื่อเผาที่ 400 และ 900 องศาเซลเซียส



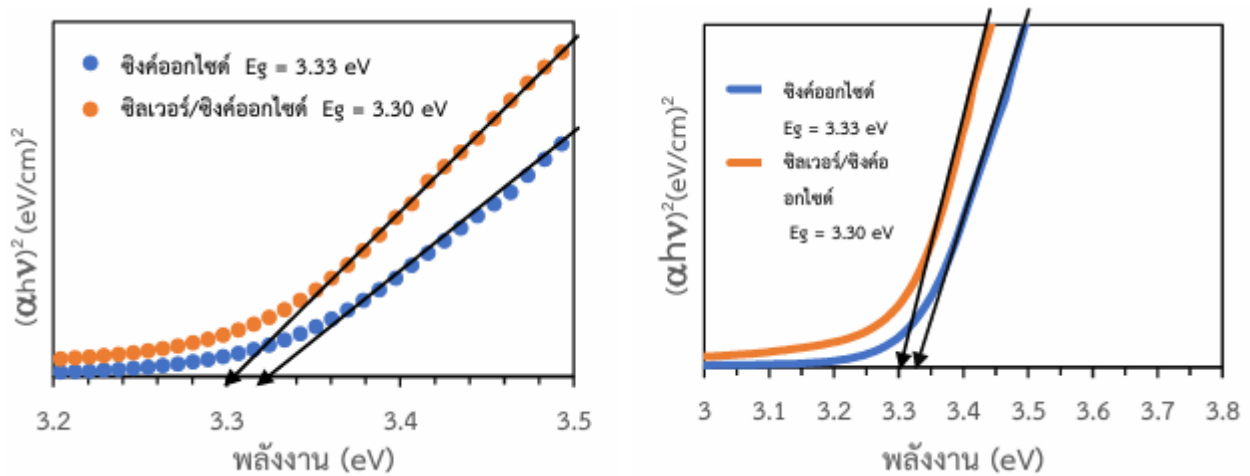
ภาพที่ 6 สเปกตรัม FTIR ของ (ก) ซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์เผาที่ 400 องศาเซลเซียส (ข) ซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์เผาที่ 900 องศาเซลเซียส

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n-type ที่มีช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ประมาณ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีพลังงานเอกซิตอนสูงถึง 60 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลต (UV) (Elias et al., 2021) การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ ได้ศึกษาช่องว่างพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปี การคำนวณช่องว่างพลังงานจากสเปกตรัมใช้วิธีการของ Tauc โดยการพล็อตกราฟ $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ และหาจุดตัดกับแกนพลังงานเพื่อหาค่าช่องว่างพลังงาน ดังสมการ

$$\alpha h\nu = A (h\nu - E_g)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของแข็ง h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ A คือ ค่าคงที่ ν คือ ค่าความถี่ของแสง n คือ ค่าดัชนีที่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของพาหะประจุ โดย $n = 2$ สำหรับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนโดยทางอ้อม (indirect transition) และ $n = 1/2$ สำหรับการเปลี่ยนแปลงโดยตรง (direct transition) สำหรับซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเวิร์ทไซด์ อิเล็กตรอนมีพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานแบบทางตรง โดยค่าช่องว่างพลังงานจากจุดตัดบนแกนพลังงาน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 7 พบว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์มีช่องว่างพลังงาน 3.33 อิเล็กตรอนโวลต์ และอนุภาคนาโนซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์มีช่องว่างพลังงาน 3.30 อิเล็กตรอนโวลต์ ขอบการดูดกลืนแสงเชิงแสง (optical absorption edge) แสดงการเลื่อนไปทางความยาวคลื่นยาวขึ้น หรือพลังงานต่ำลง (red-shift) เมื่อความเข้มข้นของการเจือด้วยซิลเวอร์เพิ่มขึ้น โดยการลดลงของค่าช่องว่างพลังงาน (band gap narrowing) ที่สังเกตได้นั้น เกิดจากการเจือของซิลเวอร์ ภายในโครงสร้างเซลล์ของซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Herzi et al., 2019) ขนาด

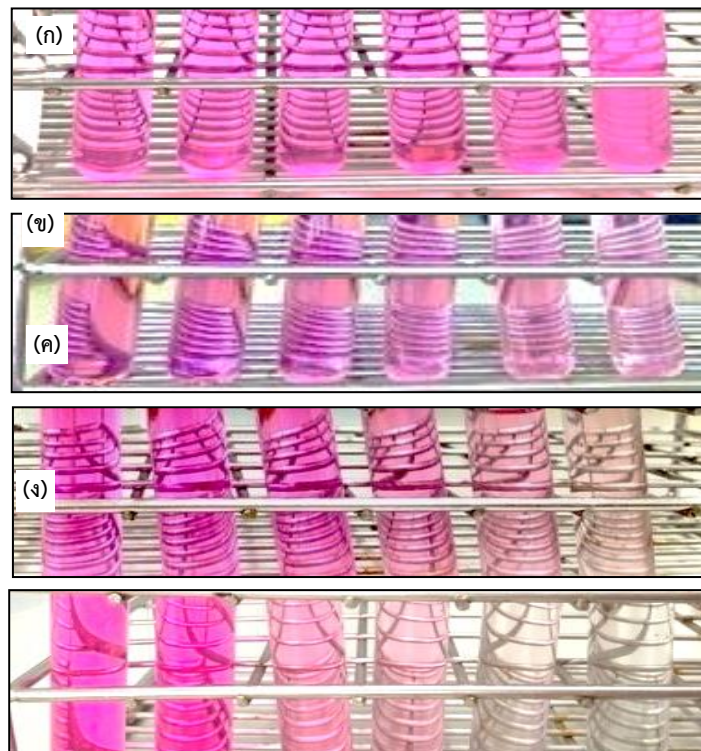
ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ลดลงถึงระดับนาโนเมตรจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าปรากฏการณ์ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์ (quantum confinement) ซึ่งทำให้ช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น



ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (eV) สำหรับคำนวณหาช่องว่างพลังงานของซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์

3. ผลการศึกษาปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงด้วยสีย้อมโรดามีน บี

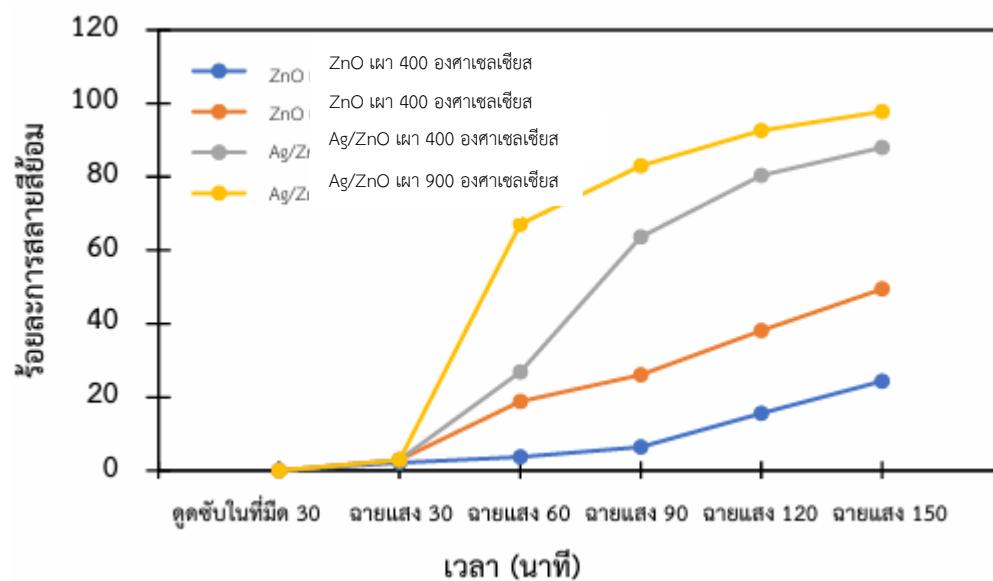
การศึกษาปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ผ่านการสลายสีย้อมโรดามีน บี ภายใต้แสงยูวี เป็นเวลา 150 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของสีย้อมโรดามีน บี คือ 554 นาโนเมตร พบว่าซิงค์ออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีร้อยละการสลายสีย้อมต่ำสุดคือร้อยละ 24.36 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาปรับปรุงเป็น 900 องศาเซลเซียส มีร้อยละการสลายสีย้อมสูงขึ้นเป็นร้อยละ 49.45 ซึ่งสอดคล้องกับผลสเปกตรัม FTIR ที่แสดงแถบการสั่นของ Zn-O เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์เผาที่ 400 องศาเซลเซียส จากผลของอุณหภูมิสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Etchevery et al. (2018) คือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาความเป็นผลึกของซิงค์ออกไซด์จะสูงขึ้น เมื่อนำซิงค์ออกไซด์หลังเผามาเจือด้วยซิลเวอร์โดยวิธีโพโตรีดักชัน พบว่าส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีการสลายสีย้อมเท่ากับร้อยละ 87.99 และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีการสลายสีย้อมสูงสุดเท่ากับร้อยละ 97.90 ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลจากการเผาพร้อมกับการเจือซิลเวอร์บนพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ สารละลายสีย้อมโรดามีน บีแต่ละสถานะแสดงดังภาพที่ 8 และกราฟร้อยละการสลายสีย้อมโรดามีน บี ในเวลา 150 นาที ดังภาพที่ 9



เวลาในการศึกษา

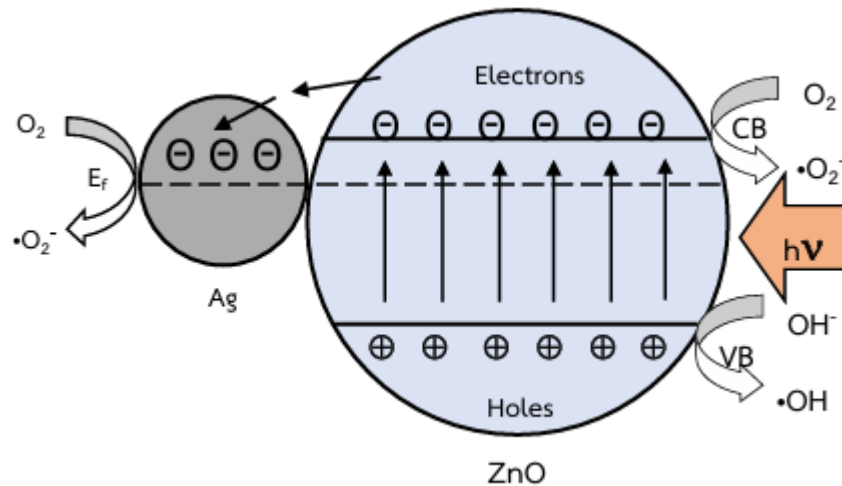
ชุดซ้ำที่มีด	ฉายแสง 30 นาที	ฉายแสง 30 นาที	ฉายแสง 60 นาที	ฉายแสง 90 นาที	ฉายแสง 120 นาที	ฉายแสง 150 นาที
(ก)						
(ข)						
(ค)						
(ง)						

ภาพที่ 8 สีย้อมโรดามีน บี ที่เกิดปฏิกิริยาเชิงแสง ภายใต้แสงยูวี (ก) ซิงค์ออกไซด์เผาที่ 400 องศาเซลเซียส (ข) ซิงค์ออกไซด์เผาที่ 900 องศาเซลเซียส (ค) ซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์เผาที่ 400 องศาเซลเซียส และ (ง) ซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์เผาที่ 900 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 9 ร้อยละการสลายสีย้อมของโรดามีน บี ภายใต้แสงยูวีในเวลา 150 นาที

ผลจากการเจือซิลเวอร์ส่งผลสำคัญให้ปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงเกิดได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์บนพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ช่วยลดการรวมกันระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole combination) อีกทั้งทำหน้าที่เป็นอ่างรับอิเล็กตรอน (e-sink) เพื่อเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงได้สูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงโดยใช้ซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสีย้อมโรดามีน บี ภายใต้แสงยูวี (Ziang et al., 2015)

ดังนั้นอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์สามารถสังเคราะห์ตามหลักเคมีสีเขียวคือใช้สารสกัดจากใบฝรั่งเป็นตัวรีดิวซ์และสารเพิ่มความเสถียรในการสังเคราะห์ที่ได้โดยอุณหภูมิในการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส ให้โลหะออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงโดยสลายสีย้อมโรดามีน บี ได้ดีกว่าเผาที่ 400 องศาเซลเซียส และเมื่อเจือซิลเวอร์โดยการนำไปซิงค์ออกไซด์ไปฉายแสงยูวี (photoreduction) ด้วยสารประกอบซิลเวอร์ทำให้ได้อนุภาคนาโนซิลเวอร์เกาะบนพื้นผิวซิงค์ออกไซด์และทำให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อุณหภูมิในการเผา และการเจือซิลเวอร์จึงมีอิทธิพลสำคัญต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงสลายสีย้อมโรดามีน บี ภายใต้แสงยูวี ดังนั้นการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิลเวอร์/ซิงค์ออกไซด์ผ่านกระบวนการเคมีสีเขียวโดยใช้สารสกัดจากใบฝรั่งจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากใช้สารสกัดจากธรรมชาติที่ปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้สารเคมี และช่วยลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้อนุภาคนาโนที่แล้วยังมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยม สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม ซึ่งช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ตามหลักเคมีสีเขียวโดยใช้สารสกัดจากพืชชนิดอื่น ๆ ที่สามารถใช้เป็นตัวรีดิวซ์ได้
2. ศึกษาปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงภายใต้สภาวะแสงวิสิเบิล
3. ศึกษาคุณสมบัติในการต้านจุลชีพเพื่อนำไปประยุกต์ใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการสุขาสุศาสตร์และสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ที่สนับสนุนและเอื้อเฟื้อสถานที่การทำงานวิจัย ส่งผลให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อ้างอิง

- Abu, B. F., & Mohd, S. I. (2023). Synthesis of TiO₂ photocatalyst with tunable optical properties and exposed facet for textile wastewater treatment. *Results in Optics*, 13, 100545.
- Changan, S. S., Prajapat, R., Kumar, M., Saurabh, V., Sindhu, N., Shukla, P., & Amarowicz, R. (2021). Guava (*Psidium guajava* L.) Leaves: Nutritional Composition, Phytochemical Profile, and Health-Promoting Bioactivities. *Foods*, 10(4), 752.
- Elias, M., Uddin, M. N., Saha, J. K., Hossain, M. A., Sarker, D. R., Akter, S., Siddiquey, I. A., & Uddin, J. (2021). A highly efficient and stable photocatalyst; N-doped ZnO/CNT composite thin film synthesized via simple sol-gel drop coating method. *Molecules*, 26(5), 1470.
- Etcheverry, L. P., Flores, W. H., da Silva, D. L., & Moreira, E. C. (2018). Annealing Effects on the Structural and Optical Properties of ZnO Nanostructures. *Materials Research*, 21(2).
- Herzi, A., Sebais, M., Boudine, B., & Guerbous, L. (2019). Fabrication and Characterization of Highly Textured Thin Films of Undoped and Ag-Doped ZnO. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(7), 7008–7015.
- Hussain, A., Fiaz, S., Almohammed, A., & Waqar, A. (2024). Optimizing photocatalytic performance with Ag-doped ZnO nanoparticles: Synthesis and characterization. *Heliyon*, 10, e35725.
- Jeyasundari, J., Praba, P. S., Jacob, Y. B. A., Vasantha, V. S., & Shanmugaiah, V. (2017). Green Synthesis and Characterization of Zero Valent Iron Nanoparticles from the Leaf Extract of *Psidium guajava* Plant and Their Antibacterial Activity. *Chemical Science Review and Letters*, 6(22), 1244–1252.
- Kadhem, A. A., & Alshamsi, H. A. (2023). Biosynthesis of Ag-ZnO/rGO nanocomposites mediated *Ceratophyllum demersum* L. leaf extract for photocatalytic degradation of Rhodamine B under visible light. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Advance online publication.
- Kaningini, M. M., Azizi, S., & Mokrani, T. (2022). Effect of Optimized Precursor Concentration, Temperature, and Doping on Optical Properties of ZnO Nanoparticles Synthesized via a

- Green Route Using Bush Tea (*Athrixia phyllicoides* DC.) Leaf Extracts. *ACS Omega*, 7(9), 7856–7865.
- Kumar, M., Kumar, S., & Singh, R. (2015). Fabrication and properties of zinc oxide thin film prepared by sol-gel dip coating method. *Materials Science-Poland*, 33(2), 297–302.
- Mirzaeifard, Z., Shariatnia, Z., Jourshabani, M., & Rezaei, S. M. (2020). ZnO Photocatalyst revisited: Effective photocatalytic degradation of emerging contaminants using S-doped ZnO nanoparticles under visible light radiation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(36), 15894–15911.
- Nagaraju, G., Udayabhan, A., Shivaraj, A., Prashanth, S. A., Shastri, M., Yathish, K. V., Anupama, C., & Rangappa, D. (2017). Electrochemical heavy metal detection, photocatalytic, photoluminescence, biodiesel production and antibacterial activities of Ag–ZnO nanomaterial. *Materials Research Bulletin*, 94, 54–63.
- Noohpisheh, Z., Amiri, H., Farhadi, S., & Zaringhadam, P. (2020). Green synthesis of Ag-ZnO nanocomposites using *Trigonella foenum-graecum* leaf extract and their antibacterial, antifungal, antioxidant and photocatalytic properties. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 240, 118595.
- Ochieng, P. E., Iwuoha, E., Michira, I., Masikini, M., Ondiek, J., Githira, P., & Kamau, G. N. (2015). Green Route Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles Using *Spathodea campanulata*. *International Journal of BioChemiPhysics*, 23, 53–61.
- Patil, S. P., & Rane, P. M. (2020). *Psidium guajava* leaves assisted green synthesis of metallic nanoparticles: A review. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 9 (1), 60.
- Raza, W., Ahmad, K., Khan, R. A. & Kim, H. (2023). Ag decorated ZnO for enhanced photocatalytic H₂ generation and pollutant degradation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(75), 29071–29081.
- Shameli, K., Bin Ahmad, M., Zamanian, A., Sangpour, P., Shabanzadeh, P., & Abdollahi, Y. (2017). Biosynthesis of Ag, ZnO and bimetallic Ag/ZnO alloy nanoparticles by aqueous extract of oak fruit hull (Jaft) and investigation of photocatalytic activity of ZnO and bimetallic Ag/ZnO for degradation of basic violet 16. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(36), 1–12.
- Sougandhi, P. R., & Ramanaiah, S. (2020). Green synthesis and spectral characterization of silver nanoparticles from *Psidium guajava* leaf extract. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 50(12), 1290–1294.

- Vittaya, L., & Chalad, C. (2022). *Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles with the rhizome extract of Ampelocissus martini to inhibit pathogenic bacteria*. Rajamangala University of Technology Srivijaya.
- Zhang, D., Lv, S., and Luo, Z. (2020). A study on the photocatalytic degradation performance of a $[\text{KNbO}_3]_{0.9}\text{-}[\text{BaNi}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3\text{-}\delta]_{0.1}$ perovskite. *RSC Advances*, 10(3), 1275–1280.
- Zhang, X., Zhang, L., Xie, T., & Wang, D. (2015). Fabrication of porous 3D flower-like Ag/ZnO heterostructure composites with enhanced photocatalytic performance. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(1), 1234–1242.
- Zhang, X., Zhang, P., & Su, H. (2016). Synthesis and characterization of Ag–ZnO heterostructure for enhanced photocatalytic performance. *Applied Surface Science*, 387, 216–222.