

Received: May 23, 2024; Revised: March 19, 2025; Accepted: May 22, 2025

## ศักยภาพของนาโนซิงค์ออกไซด์และสารสกัดหยาบสมุนไพรในการยับยั้งเชื้อรา

*Pseudoperonospora cubensis*The potential of nano-zinc oxide and crude herbal extracts for inhibition of  
*Pseudoperonospora cubensis*วรุตม์ คุณสุทธิ<sup>1</sup> รัตนาภรณ์ สมฤทธิ์<sup>1\*</sup> อธิระวิทย์ พลโคกก่อง<sup>1</sup> จตุพัฒน์ สมป์ปิโต<sup>2</sup> กิตติธร นองสี<sup>3</sup>  
สุรัชชัย บุญเศษ<sup>3</sup> วิริญญา สวนมัวมี<sup>3</sup> และแสงดาว ชัยสุวรรณ<sup>3</sup>Warut Koonasoot<sup>1</sup> Rattanaporn Somrit<sup>1\*</sup> Thirawit Phonkhokkong<sup>1</sup> Jatupat Samappito<sup>2</sup>  
Kittitorn Nongsee<sup>3</sup> Surachai Boones<sup>3</sup> Wiranya Suanmuamued<sup>3</sup>  
and Saengdaw Chaisuwan<sup>3</sup><sup>1</sup>คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์<sup>1</sup>Faculty of Science, Buriram Rajabhat University, Buriram Province<sup>2</sup>คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์<sup>2</sup>Faculty of Agricultural Technology, Buriram Rajabhat University, Buriram Province<sup>3</sup>คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์<sup>3</sup>Faculty of Education, Buriram Rajabhat University, Buriram Province<sup>\*</sup>Corresponding Author E-mail Address : rattanaphom.sr@bru.ac.th

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์และศึกษาฤทธิ์การยับยั้งเชื้อรา *Pseudoperonospora cubensis* สาเหตุโรคราน้ำค้างในเมล่อน ซึ่งเป็นเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อผลผลิตด้วยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้อนุภาคนาโนขนาด 300 และ 500 นาโนเมตร และสารสกัดหยาบสมุนไพร 4 ชนิด คือ กระเทียม ข่า ขมิ้นชัน และกระชาย ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมเมชัน (FESEM) สเปกโตรสโกปีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDX) เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) และเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโตรสโกปี (UV-Vis) แสดงให้เห็นว่านาโนซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ทไซต์ มีรูปร่างแบบแผ่นขนาดเฉลี่ย  $32.02 \pm 4.06$  และ  $48.18 \pm 10.02$  นาโนเมตร ตามลำดับ สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้  $63.09 \pm 0.18$  และ  $59.73 \pm 1.40$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สารสกัดหยาบกระชายมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดสมุนไพรชนิดอื่น โดยสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้  $55.57 \pm 2.11$  เปอร์เซ็นต์ และนาโนซิงค์ออกไซด์ที่อนุภาคนาโน 300 นาโนเมตร ร่วมกับสารสกัดหยาบจากกระชายอัตราส่วน 1:5 ที่ความเข้มข้น 3,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้  $81.74 \pm 1.12$  เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนร่วมกับการใช้สารสกัดหยาบจากกระชายช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคราน้ำค้างในเมล่อนได้มากขึ้น

คำสำคัญ: โรคราน้ำค้าง การยับยั้งเชื้อรา นาโนซิงค์ออกไซด์ สารสกัดหยาบจากสมุนไพร

## Abstract

This research aimed to synthesize and study the antifungal activity against *Pseudoperonospora cubensis*, the cause of downy mildew in melons, which significantly damages the yield, using nano zinc oxide calcined at 300°C and 500°C and four types of crude herbal extracts: garlic, galangal, turmeric, and fingerroot. Results of the specific characteristics analysis of nano zinc oxide using X-ray diffraction (XRD), field emission scanning electron microscopy (FESEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis) techniques were provided. It was shown that nano zinc oxide has a hexagonal wurtzite crystal structure, with an average particle size of  $32.02 \pm 4.06$  and  $48.18 \pm 10.02$  nm, respectively. The antifungal activity showed that nano zinc oxide inhibited fungal growth by  $63.09 \pm 0.18\%$  and  $59.73 \pm 1.40\%$ , respectively. Among the crude plant extracts, the fingerroot extract exhibited the highest antifungal efficacy, inhibiting fungal growth by  $55.57 \pm 2.11\%$ . The combination of nano zinc oxide calcined at 300°C and fingerroot extract at a ratio of 1:5 with a concentration of 3,000  $\mu\text{g/mL}$  inhibited fungal growth by  $81.74 \pm 1.12\%$ . These findings demonstrate that synthesizing nano zinc oxide combined with fingerroot extract significantly enhances the inhibition of *Pseudoperonospora cubensis*, providing a promising approach for controlling downy mildew in melons

**Keywords:** Downy mildew, Antifungal activity, Zinc oxide nanoparticles, Crude herbal extracts

## บทนำ

โรคราน้ำค้าง (Downy mildew) จัดเป็นโรคพืชร้ายแรงอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดความเสียหายในเมล่อน ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ มีแนวโน้มความต้องการของตลาดสูงและให้ผลตอบแทนสูง มีสาเหตุมาจากเชื้อรา *Pseudoperonospora cubensis* (Wonglom et al., 2020) อาการของโรคส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นเหลืองบนใบทำให้การสังเคราะห์แสงของพืชลดลงและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลโดยเริ่มเปลี่ยนจากกลางแผลออกไป หากความชื้นในอากาศสูง ใต้ใบบริเวณจุดแผลจะพบเส้นใยและสปอร์สาเหตุโรคเป็นขุยๆ ผงสีเทา เมล่อนที่เกิดโรครุนแรงจะทำให้ใบแห้งและอาจตายได้ หากเกิดช่วงระยะให้ผลผลิตจะทำให้ผลเมล่อนเจริญไม่เต็มที่และคุณภาพลดลง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องศึกษาเพื่อหาวิธีการยับยั้งการเกิดโรคแทนการใช้สารเคมี เนื่องจากพืชตกค้างจากสารเคมีเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและก่อให้เกิดการดื้อยาของเชื้อที่เป็นสาเหตุโรคได้ (Mekkamol et al., 2016) สารสกัดจากพืชจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการกำจัดโรคพืชแบบชีววิธี ซึ่งจากรายงานวิจัยพบว่า สารสกัดจากกระชาย ขมิ้นชัน หัวหัวหมู สับเสือตอ ว่านอัคคีทวาร เปลือกมังคุด เม็ดมะขุม และไพลสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Phytophthora palmivora* (Thamsatit et al., 2023) สะเดาไทย ชะพลู และขิง ในการยับยั้งเชื้อรา *Phytophthora parasitica* (Chuenchan et al., 2022) ข่า กระเทียม และตะไคร้สามารถยับยั้งเชื้อรา *Colletotrichum sp.* สาเหตุโรคแอนแทรกโนสของมะม่วง (Sutthisa et al., 2014) สารสกัดกระชายขาวพบสารฟุกุซเคนมี ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ คูมาริน ซาโปนิน แทนนิน เทอร์ปีนอยด์และคาร์ดิแอกไกลโคไซด์ และสารสกัดกระชายขาวมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Boonnaum et al., 2021) โดยน้ำมันกระชายทำให้รา *C. capsici* isolate 170, *Dothiorella sp.* และ *Pythium aphanidermatum* ไม่สามารถเจริญได้ (Farungsang et al., 2005) นอกจากนี้ยังมีการใช้อนุภาคนาโนซึ่งออกไซด์ที่มีสมบัติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly) และมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายประการ เช่น บทบาทในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสง (Photocatalytic) และคุณสมบัติต้านจุลชีพ (Antimicrobial) ควบคุมโรคพืชจากเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา เช่น *C. albicans* และ *A. brasiliensis* (Asmat-Campos et al., 2024) *Streptococcus mutans*, *Clostridium bsonum*, *Arthrogrophis cuboida*, *Arthrogrophis cuboida*, *Aspergillus fumigatus* และ *Aspergillus niger* (Ahmad & Kalra, 2020) โรคผลเน่าของส้มโอ (Ali et al., 2022) เชื้อราสาเหตุการเน่าเสียของผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวจำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *Aspergillus niger*, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Lasiodiplodia theobromae* และ *Rhizopus*

*stolonifera* โดยนาโนซิงค์ออกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำลายผนังเซลล์ของเชื้อรา โดยการปลดปล่อยไอออน  $Zn^{2+}$  ซึ่งไอออนเหล่านี้สามารถเข้าสู่เซลล์ของเชื้อราและรบกวนกระบวนการทางชีวเคมีที่จำเป็นสำหรับการเติบโตและการอยู่รอดของเชื้อรา (Sakayaroj et al., 2022) การสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีไฮโดรเทอร์มอล วิธีการตกตะกอน วิธีการระเหยแห้ง และวิธีการโซลเจล โดยวิธีการโซลเจลเป็นวิธีการที่ได้สารขนาดเล็กและมีความบริสุทธิ์สูง สามารถสังเคราะห์ได้ง่าย (Sangchay & Ubolchollakhat, 2016)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์และศึกษาฤทธิ์การยับยั้งเชื้อรา *Pseudoperonospora cubensis* ของนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้อุณหภูมิเคลือบ 300 และ 500 องศาเซลเซียส และสารสกัดหยาบสมุนไพร 4 ชนิด คือ กระเทียม ข่า ขมิ้นชัน และกระชาย เพื่อเป็นข้อมูลในการส่งเสริมสมุนไพรมาพัฒนางานด้านเกษตรกรรม ลดหรือควบคุมการเกิดโรคจากเชื้อราที่จะก่อให้เกิดความเสียหายในพืช การปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม และทดแทนเคมีเกษตรในปัจจุบันซึ่งมีราคาแพงและมีผลข้างเคียงค่อนข้างสูง

## วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

### การสังเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติเฉพาะของนาโนซิงค์ออกไซด์

นาโนซิงค์ออกไซด์ไฮดรต (AR grade 99.5% ยี่ห้อ KemAus บริษัท QR&C® ประเทศนิวซีแลนด์) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (AR grade 99.0% ยี่ห้อ RCI-Labscan บริษัท QR&C® ประเทศนิวซีแลนด์) ความเข้มข้น 0.8 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล คนสารละลายด้วย Magnetic stirrer ด้วยความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที จนครบ 45 นาที ที่อุณหภูมิห้อง กรองตะกอนแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง ก่อนนำตะกอนไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยตู้อบลมร้อน (รุ่น ED53 ยี่ห้อ BINDER ประเทศเยอรมนี) จากนั้นบดละเอียดด้วยโกรนบดสารแล้วนำไปเผาเคลือบในอากาศด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง (รุ่น CWF 12/23 ยี่ห้อ Carbolite) ที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ตามลำดับ ในบทความนี้ขอแทนนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส เป็น ZnO 300 และ ZnO 500 ตามลำดับ (Sangchay & Ubolchollakhat, 2016) (Figure 1) นำสารที่ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีด้วย X-ray Diffractometer (XRD) (รุ่น D8 Advance บริษัท Bruker ประเทศเยอรมัน) โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสี  $Cu K\alpha$  ( $\lambda = 1.5405$  อังสตรอม) วิเคราะห์ที่มุม  $2\theta$  ตั้งแต่ 20 ถึง 80 องศา คำนวณหาขนาดผลึกโดยใช้สมการเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) (Nasiri et al., 2023) Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) (รุ่น JSM-7800F บริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น) ทำการทดสอบโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าในการเร่งอิเล็กตรอนที่ 5 กิโลโวลต์ ใช้กำลังขยาย 30,000 เท่า วิเคราะห์ร่วมกับ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX), Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) (รุ่น Spectrum Two FT-IR Spectrometer บริษัท PerkinElmer Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา) วิเคราะห์ที่ความถี่ช่วง 4,000-400 ต่อเซนติเมตร และ UV-Vis spectrophotometer (รุ่น DR6000 บริษัท HACH ประเทศเยอรมนี) วิเคราะห์ที่ความยาวคลื่นช่วง 280-800 นาโนเมตร

### การเตรียมสารสกัดหยาบสมุนไพร

สมุนไพรที่นำมาศึกษา ได้แก่ กระเทียมไทย (Thai Garlic) เหง้าแก่ของข่า (Galangal) ขมิ้นชัน (Turmeric) และกระชาย (Fingerroot) ซื้อมาจากตลาดสดเทศบาลเมืองบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์ นำสมุนไพรสดมาล้างให้สะอาด หั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ อบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน (รุ่น ED53 ยี่ห้อ BINDER ประเทศเยอรมนี) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 10% dry basis) จากนั้นนำไปบดละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพร (รุ่น WF-20B ยี่ห้อ Thai grinder ประเทศไทย) จึงห่อด้วยผ้าขาวบางแล้วผูกให้แน่น นำไปใส่ในขวดโหลจากนั้นเติมตัวทำละลายเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ให้ท่วมสมุนไพร ปิดให้สนิทแช่ไว้เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (32-35 องศาเซลเซียส) โดยกวนตัวอย่างด้วยแท่งแก้วประมาณวันละ 1 นาที หลังจากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำของเหลวที่ได้ไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่อง Rotary Evaporator (รุ่น R-3001 ยี่ห้อ Greatwall ประเทศจีน) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จะได้สารสกัดที่มีลักษณะขุ่น

เหนียวหรือเรียกว่าสารสกัดหยาบและเก็บสารสกัดที่ได้ในขวดสีชาที่มีฝาปิดสนิทที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ (Kumlong & Kumpun, 2017)

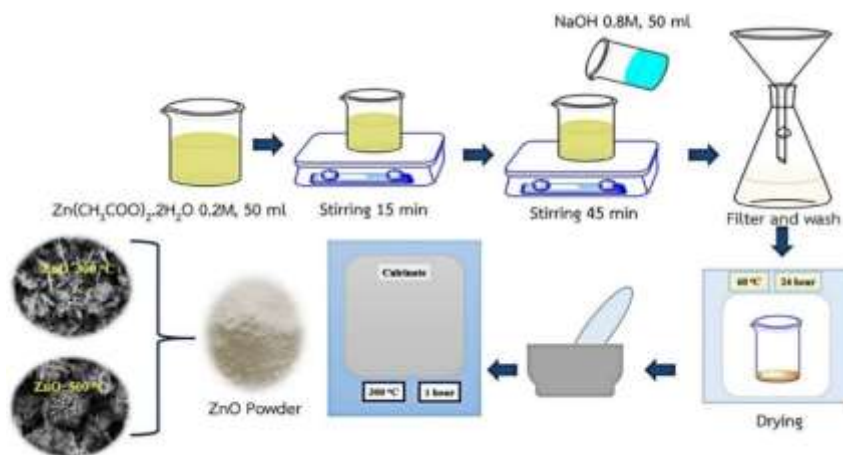


Figure 1 Schematic of ZnO synthesis

### การคัดแยกและทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา

เก็บตัวอย่างใบแมลงอนที่เป็นโรคราน้ำค้าง โดยใบแมลงอนจะมีลักษณะเป็นจุดเชื้อสีน้ำตาลหรือดำ นำมาแยกเชื้อด้วยวิธี Tissue transplanting เพื่อให้ได้เชื้อที่บริสุทธิ์ ตัดชิ้นส่วนรอยต่อระหว่างเนื้อเยื่อที่ติดกับเนื้อเยื่อที่เป็นโรคออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ทำความสะอาดผิวด้านนอกด้วยการแช่น้ำยาคลอโรกซ์ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 5 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นที่นึ่งฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Autoclave (รุ่น VB Series ยี่ห้อ Systec ประเทศเยอรมนี) และซับด้วยกระดาษฆ่าเชื้อ นำชิ้นเนื้อเยื่อไปวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร Potato Dextrose Agar (PDA) (ยี่ห้อ Hi-media ประเทศอินเดีย) บ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นตัดปลายเส้นใย (Hyphal tip) และวางลงบน PDA เพื่อนำไปเลี้ยงให้บริสุทธิ์อีกครั้ง การทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราด้วย Poisoned Food Technique (Wonglom et al., 2020) โดยใช้สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ (อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส) และสารสกัดสมุนไพรแต่ละชนิด ในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ให้ได้ความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิตร (ชุดทดลอง) เทใส่จานเพาะเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อ เมื่อผิวหน้าอาหารแห้ง จึงใช้ Cork borer เจาะบริเวณปลายเส้นใยบริเวณรอบโคโลนีของเชื้อราสาเหตุโรคที่เลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ที่มีอายุ 7 วัน (ชุดควบคุม) วางลงไปตรงกลางผิวหน้าอาหารในจานเพาะเชื้อชุดทดลอง โดยคว่ำด้านที่มีเชื้อราอยู่ทางด้านล่าง บ่มเชื้อไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 วัน ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ สังเกตการเจริญเติบโตและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราเปรียบเทียบกับจานเลี้ยงเชื้อชุดควบคุม (ไม่ผสมสมุนไพรและนาโนซิงค์ออกไซด์) และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา ดังต่อไปนี้ (Eq.1)  $A =$  ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราบนจานเลี้ยงเชื้อชุดควบคุม และ  $B =$  ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราบนจานเลี้ยงเชื้อชุดทดลอง (Sehawong et al., 2022)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

หลังจากนั้นเลือกสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้และสารสกัดสมุนไพรที่มีประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราสูงที่สุด นำมาผสมกันโดยใช้สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ต่อสารสกัดสมุนไพรในอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ให้ได้ความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิตร ศึกษาอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นเป็น 1:3 และ 1:5 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้น 3,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิตร และอัตราส่วน 1:7 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้น 3,000 และ 30,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิตร

### การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ CRD (Completely Random Design) ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปแบบของค่าเฉลี่ย  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean  $\pm$  SD) ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ได้จากแต่ละการศึกษาด้วย One-way ANOVA และ Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าความต่างทางสถิติจะถูกพิจารณาเมื่อ  $p < 0.05$

### ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

#### ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสี  $\text{Cu K}\alpha$  (Figure 2)

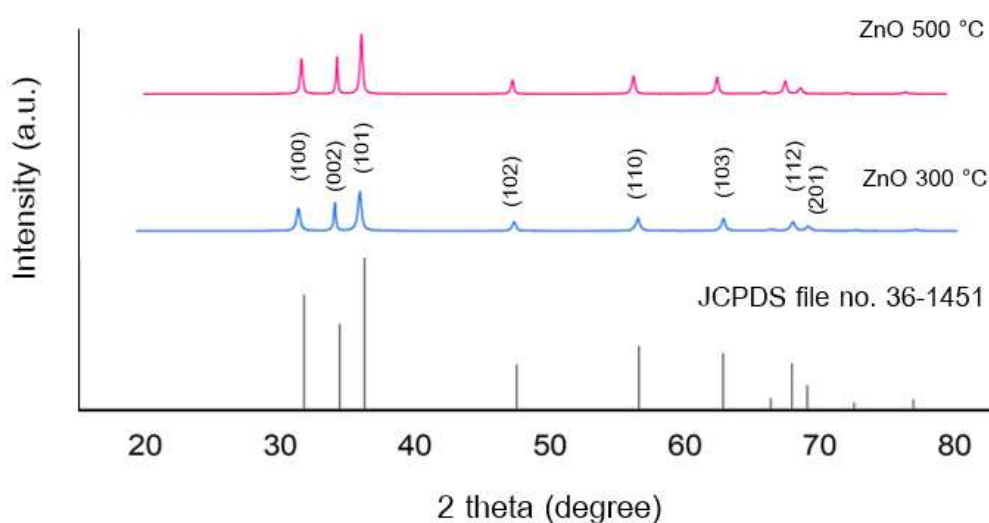


Figure 2 XRD spectra of calcine samples at 300°C and 500°C

สารตัวอย่างที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส ปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (100) (002) (101) (102) (110) (103) (112) และ (201) สอดคล้องกับฐานข้อมูลมาตรฐานของ JCPDS หมายเลข 36-1451 บ่งชี้ว่าเป็นซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเอกซะโกนอลเวิร์ทไซด์ (Hexagonal wurtzite) ในทุกตัวอย่าง สอดคล้องกับงานวิจัยของ De Peres et al. (2019) จาก Scherrer's equation (Eq.2)  $L$  = ขนาดผลึก (นาโนเมตร);  $\beta$  = ค่าความกว้างที่กึ่งกลางของพีคการเลี้ยวเบน (full width at half maximum; FWHM) (เรเดียน);  $\theta$  = มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (องศา);  $\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสี (นาโนเมตร)

$$\beta = \frac{K\lambda}{L \cos\theta} \quad (\text{Eq.2})$$

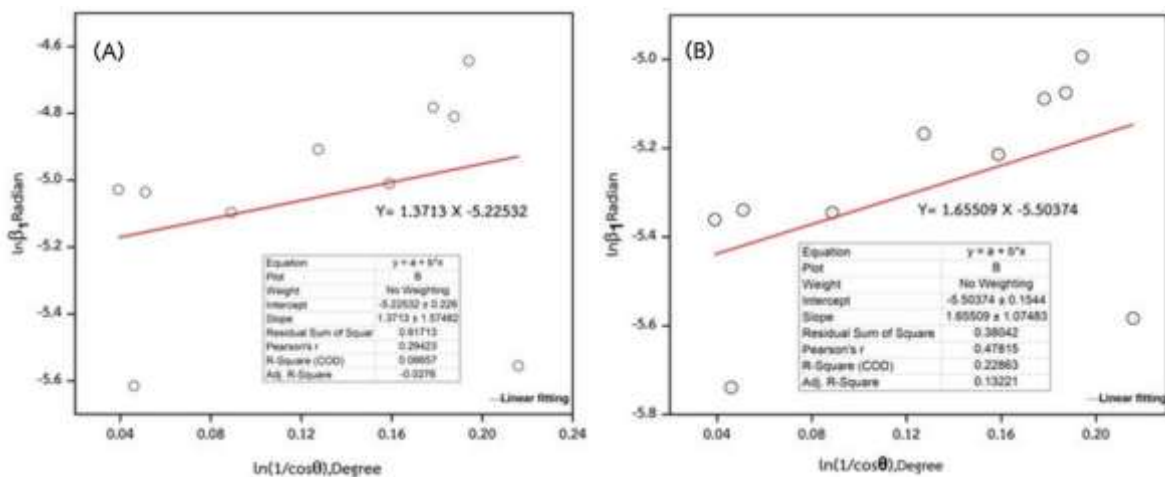
$$\ln \beta = \ln \frac{1}{\cos\theta} + \ln \frac{K\lambda}{L} \quad (\text{Eq.3})$$

นำ (Eq.3) สร้างกราฟระหว่าง  $\ln \beta$  และ  $\ln (1/\cos(\theta))$  โดยนำจุดตัดแกน Y มาคำนวณหาขนาดผลึก (Nasiri et al., 2023) ด้วย (Eq.4)

$$e^{\text{จุดตัดแกน Y}} = \frac{K\lambda}{L} \quad (\text{Eq.4})$$

**Table 1** The required values extracted from X'Pert for calculating crystal size of ZnO at various calcination temperatures

ZnO 300 °C				ZnO 500 °C			
2θ (Degree)	β (FWHM) (Degree)	ln β (Radian)	ln (1/Cos (θ)) (Degree)	2θ (Degree)	β (FWHM) (Degree)	ln β (Radian)	ln (1/Cos (θ)) (Degree)
31.86	0.38	-5.0284	0.03916	31.81	0.27	-5.36121	0.03903
34.52	0.21	-5.6157	0.04608	34.46	0.18	-5.73917	0.04591
36.34	0.37	-5.0355	0.05115	36.29	0.28	-5.33929	0.05101
47.62	0.35	-5.0970	0.08895	47.57	0.27	-5.34555	0.08876
56.66	0.42	-4.9084	0.12757	56.62	0.33	-5.16764	0.12739
62.92	0.38	-5.0102	0.15899	62.88	0.31	-5.21466	0.15878
66.43	0.48	-4.7827	0.17838	66.40	0.35	-5.08847	0.17821
68.01	0.47	-4.8103	0.18755	67.97	0.36	-5.07550	0.18731
69.12	0.55	-4.6433	0.19415	69.11	0.39	-4.99397	0.19409
72.63	0.22	-5.5557	0.21595	72.59	0.22	-5.58316	0.21570

**Figure 3** The linear plot of the Modified Scherrer equation for ZnO calcined at 300 °C (A) and 500°C (B)

ซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ได้กราฟเชิงเส้นของสมการเชอร์เรอร์  $Y=1.3713X-5.22532$  และมีขนาดผลึก  $25.49 \pm 0.22$  นาโนเมตร และที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีสมการเส้นตรงเป็น  $Y=1.65509X-5.50374$  และมีขนาดผลึก  $33.67 \pm 0.15$  นาโนเมตร (Table 1 และ Figure 3) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิแคลไซน์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้มีค่าความกว้างที่กึ่งกลางของพีคการเลี้ยวเบน ( $\beta$ ) ลดลง และขนาดผลึกของนาโนซิงค์ออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น (Kenyota & Laokul, 2019)

### ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบธาตุ

ลักษณะสัณฐานวิทยาที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM) ที่ 30,000 เท่า ฮีสโตรแกรมการกระจายตัวและผลวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของนาโนซิงค์ออกไซด์

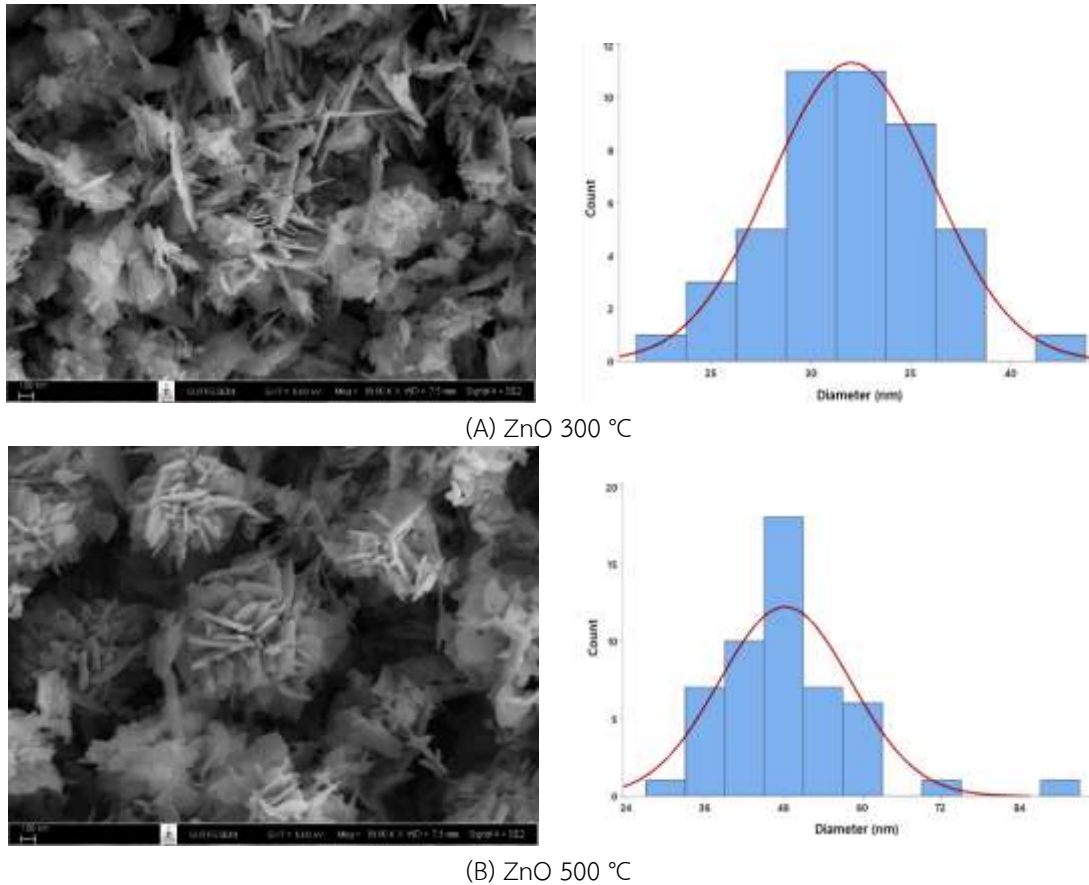


Figure 4 FESEM images and histograms of ZnO at various calcination temperatures

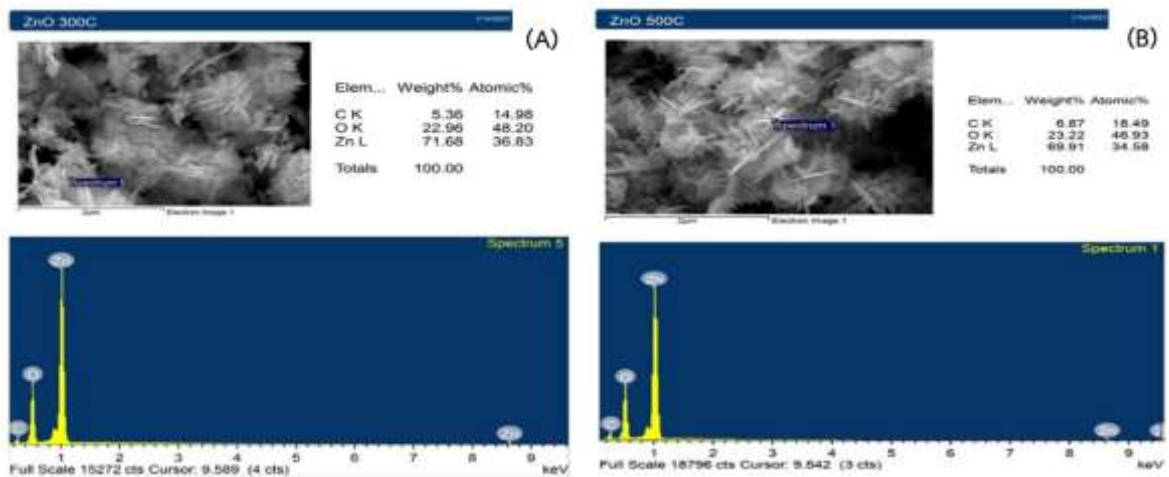


Figure 5 EDX spectra of ZnO calcined at 300 °C (A) and 500°C (B)

ซิงค์ออกไซด์มีรูปร่างแบนและเกิดการรวมตัวกันมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิแคลไซน์ที่เพิ่มขึ้น ขนาดแบนเฉลี่ยอยู่ในระดับนาโนเท่ากับ  $32.02 \pm 4.06$  และ  $48.18 \pm 10.02$  นาโนเมตร ตามลำดับ (Figure 4) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kenyota & Laokul (2019) ที่สังเคราะห์ทรงกลมกลวงซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่ใช้อุณหภูมิแคลไซน์เพิ่มขึ้น พบว่า พลังงานความร้อนที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการเติบโตของเกรนวัสดุ ทำให้เกรนของอนุภาคเดี่ยวบนเปลือกทรงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น สำหรับผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDX) ของนาโนซิงค์ออกไซด์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (Figure 5A) พบองค์ประกอบธาตุหลัก คือ ซิงค์ (Zn) ร้อยละ 71.68 โดยน้ำหนัก และออกซิเจน (O) ร้อยละ 22.96 โดย

น้ำหนัก โดยนาโนซิงค์ออกไซด์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (Figure 5B) พบองค์ประกอบธาตุหลัก คือ ซิงค์ (Zn) ร้อยละ 69.91 โดยน้ำหนัก และออกซิเจน (O) ร้อยละ 23.22 โดยน้ำหนัก

### ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

หมู่ฟังก์ชันของสารสำคัญในนาโนซิงค์ออกไซด์วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) ที่ช่วงเลขคลื่น 4000-400 ต่อเซนติเมตร

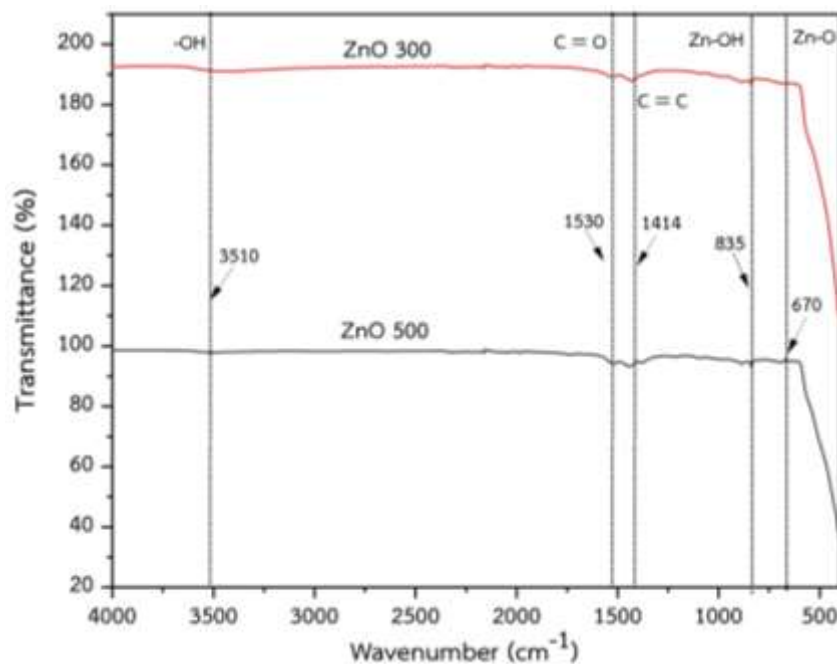


Figure 6 FTIR spectra of ZnO at various calcination temperatures

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR ในช่วงเลขคลื่น 4000-400 ต่อเซนติเมตร (Figure 6) พบตำแหน่งการสั่นแบบยืดของพันธะ C=C ที่เลขคลื่น 1414 ต่อเซนติเมตร ซึ่งอาจเกิดจากสารตั้งต้นอินทรีย์หรือสารประกอบคาร์บอนที่ยังไม่สลายตัวอย่างสมบูรณ์ (Bashir et al., 2022) ตำแหน่งการสั่นแบบยืดของพันธะ C=O ที่เลขคลื่น 1530 ต่อเซนติเมตร บ่งชี้ถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล ที่เลขคลื่น 3510 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นของพันธะ -OH (Hasany et al., 2020) ยืนยันการมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลเหล่านี้ มีคุณสมบัติในการต้านเชื้อรา (Somrit et al., 2023) ที่เลขคลื่น 670 และ 835 ต่อเซนติเมตร เป็นลักษณะเฉพาะของการสั่นแบบยืดของพันธะ Zn-O (Hasany et al., 2020) ซึ่งเป็นหลักฐานยืนยันการก่อตัวของโครงสร้างหลักของซิงค์ออกไซด์

### ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี พบว่า นาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส มีช่วงการดูดกลืนแสงที่มีลักษณะเหมือนกัน โดยมีการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 376 nm ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Navas et al. (2020) ทำการสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการตกตะกอน โดยมีการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 373 nm



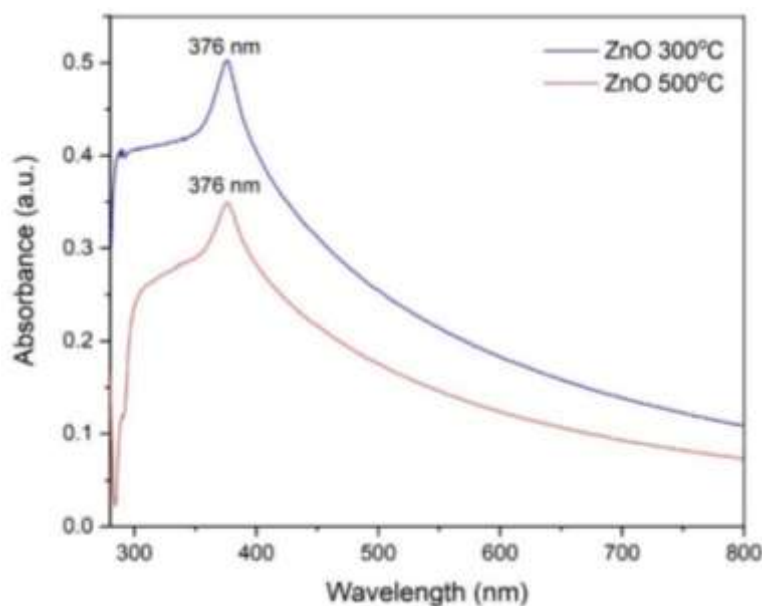


Figure 7 UV-vis spectrum of ZnO at various calcination temperatures

### ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรา

ผลทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเส้นใยเชื้อรา *Pseudoperonospora cubensis* ในเมล็ดอ่อนระยะเวลาในการทดลอง 4 วัน ด้วยนาโนซิงค์ออกไซด์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส และสารสกัดหยาบของกระเทียม ข่า ขมิ้นชัน กระชายในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ให้ความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เทียบกับชุดควบคุม (ไม่ผสมนาโนซิงค์ออกไซด์และสมุนไพร)

Table 2. Percentage inhibition of *Pseudoperonospora cubensis* by zinc oxide nanoparticles and herbal extracts at 1,000 µg/mL concentration

Treatment	Mean colony diameter (cm)	Fungal inhibition (%)
Control	7.45 ± 0.16 <sup>f</sup>	-
ZnO 300	2.75 ± 0.05 <sup>a</sup>	63.09 ± 0.18 <sup>a</sup>
ZnO 500	3.00 ± 0.08 <sup>b</sup>	59.73 ± 1.40 <sup>a</sup>
Garlic	5.45 ± 0.07 <sup>d</sup>	26.85 ± 2.46 <sup>c</sup>
Galangal	6.48 ± 0.15 <sup>e</sup>	13.02 ± 3.80 <sup>d</sup>
Turmeric	5.50 ± 0.01 <sup>d</sup>	26.17 ± 1.42 <sup>c</sup>
Fingerroot	3.31 ± 0.09 <sup>c</sup>	55.57 ± 2.11 <sup>b</sup>

Note: Control treatment exhibited no fungal inhibition.

Letters a-f denote significant differences within columns at  $p \leq 0.05$  level

จากการทดลองแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรา *Pseudoperonospora cubensis* ของนาโนซิงค์ออกไซด์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส และสารสกัดกระเทียม ข่า ขมิ้นชัน กระชาย ที่ระดับความเข้มข้น 1000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (Table 2) พบว่า ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อรามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยนาโนซิงค์ออกไซด์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรามากที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราเท่ากับ

63.09±0.18 รองลงมาคือ ชิงค์ออกไซด์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และสารสกัดกระชาย สำหรับสารสกัดขมิ้นชัน และกระเทียมแสดงค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) และสารสกัดข่ามีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดสมุนไพรอื่น ๆ โดยนาโนชิงค์ออกไซด์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีขนาดเพลาตเล็กที่สุดและมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากทำให้มีประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ดี และส่งผลให้สัดส่วนของจำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณพื้นผิว (Surface) และผิวสัมผัส (Interfaces) ของอนุภาคมากขึ้น ซึ่งบริเวณผิวสัมผัสของวัสดุจะส่งผลต่อปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อเพิ่มขึ้น (Arciniegas-Grijalba et al., 2017) นอกจากนี้พบว่า นาโนชิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราสูงกว่าผลการใช้นาโนชิงค์ออกไซด์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผสมในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ที่ความเข้มข้น 4,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราเท่ากับ 41.26 (Somrit et al., 2023) โดยงานวิจัยของ Patitungkho & Patitungkho (2014) รายงานว่า กลไกการออกฤทธิ์ของอนุภาคนาโนเกิดจากการเข้าขัดขวางการสร้างเซลล์และกระบวนการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหายใจผลทำให้เซลล์ตายไปในที่สุด นอกจากนี้ยังมีรายงานอนุภาคชิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างนาโนสามารถดูดซับบนผนังเซลล์ของเชื้อรา แล้วแทรกผ่านเข้าสู่เซลล์ เมื่อสัมผัสกับไซโตพลาสซึมอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของไมโทคอนเดรีย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการผลิต Reactive oxygen species (ROS) โดย ROS และ  $Zn^{2+}$  ที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคนาโนชิงค์ออกไซด์อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับการแสดงออกของยีนที่สำคัญบางตัว (Sakayaroj et al., 2022) จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่านาโนชิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจลสามารถต้านเชื้อราสาเหตุโรคราน้ำค้างได้ โดยสารสกัดหยาดจากกระชายมีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรามากที่สุด รองลงมาเป็นสารสกัดหยาดจากกระเทียม ขมิ้นชัน ข่า โดยมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเท่ากับ 55.57 26.85 26.17 และ 13.02 ตามลำดับ Sehawong et al. (2022) พบว่า สารสกัดจากกระชายมีประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ที่เป็นสาเหตุของโรคห่อมเลื้อยในหอมแดงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดจากกระเทียม ข่า ขมิ้น และตะไคร้ (Farungsang et al., 2005) นอกจากนี้พบว่า สารสกัดหยาดจากกระชายที่สกัดได้ผสมในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ที่ความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราสูงกว่าผลการใช้สารสกัดหยาดจากขิง และพลผสมในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ที่ความเข้มข้น 4,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราเท่ากับ 29.93 และ 44.61 ตามลำดับ และสารสกัดหยาดจากกระชายที่สกัดได้มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราใกล้เคียงกับการใช้สารสกัดหยาดจากข่าที่ผสมในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ที่ความเข้มข้น 4,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราเท่ากับ 55.58 (Somrit et al., 2023)

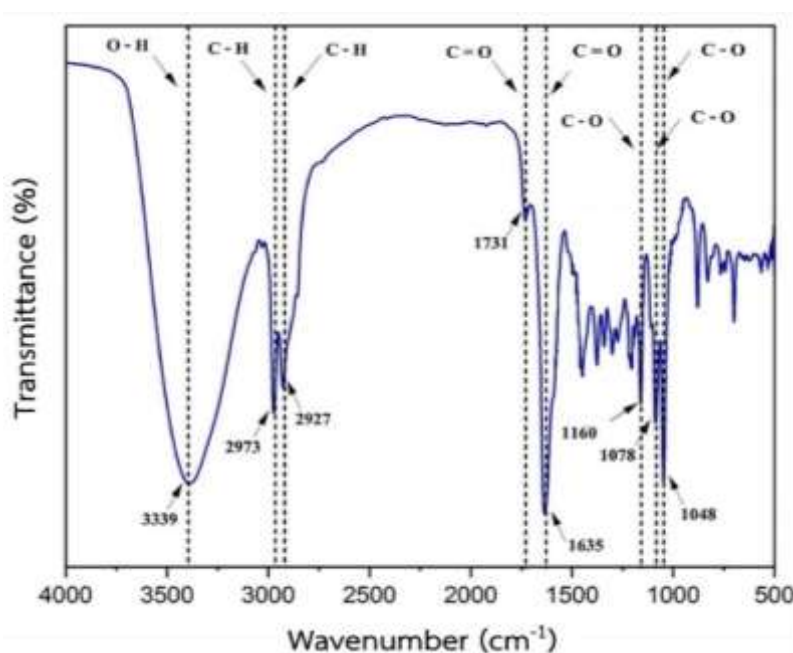










Figure 8 FTIR spectra of fingerroot extract





เมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารสำคัญในกระชายด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) ที่ช่วงเลขคลื่น 4000-500 ต่อเซนติเมตร (Figure 8) พบตำแหน่งของการสั่นของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H) ที่เลขคลื่น 3339 ต่อเซนติเมตร (Sarvalkar et al., 2024) ที่เลขคลื่น 2973 และ 2927 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นของพันธะ C-H เลขคลื่น 1731 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นของพันธะ C=O เลขคลื่น 1635 ต่อเซนติเมตร พบการสั่นของพันธะ C=C และเลขคลื่นในช่วง 1200-1000 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะ C-O (Kantong et al., 2022) เลขคลื่น 626 ต่อเซนติเมตร มีความสอดคล้องกับวงแหวนอะโรมาติก ช่วงเลขคลื่น 890-810 ต่อเซนติเมตร เป็นช่วงการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน CH ในวงแหวนอะโรมาติก และเลขคลื่น 1460 ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) (Machana et al., 2019) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าสารสกัดกระชายเป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Boonnaum et al., 2021) โดยฟลาโวนอยด์เป็นสารประกอบชีวภาพที่ออกฤทธิ์ต่อต้านเชื้อรา (Ali et al., 2022)

ทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราด้วยการนำนาโนซิงค์ออกไซด์แคปซูลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ผสมสารสกัดหยาดสมุนไพรที่มีประสิทธิภาพการยับยั้งสูงสุด คือ กระชาย ที่อัตราส่วน 1:1 1:3 1:5 และ 1:7 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

**Table 3** Fungal growth on PDA in control and treatment groups

Treatment	Fungal growth	Treatment	Fungal growth
Control		Fingerroot 1,000 ppm	
ZnO 300 1,000 ppm		ZnO+ Fingerroot (1:1) 1,000 ppm	
ZnO 500 1,000 ppm		ZnO+ Fingerroot (1:3) 1,000 ppm	
Garlic 1,000 ppm		ZnO+ Fingerroot (1:5) 3,000 ppm	

**Table 3** Fungal growth on PDA in control and treatment groups

Treatment	Fungal growth	Treatment	Fungal growth
Galangal 1,000 ppm		ZnO+ Fingerroot (1:7) 3,000 ppm	
Turmeric 1,000 ppm		ZnO+ Fingerroot (1:7) 30,000 ppm	

**Table 4** Inhibition efficacy of ZnO (300°C) and fingerroot extract against *Pseudoperonospora cubensis* at various ratios and concentrations

ZnO: Fingerroot ratio	Concentration of ZnO-Fingerroot mixture ( $\mu\text{g/mL}$ )	Mean colony diameter (cm)	Fungal inhibition (%)
1:1	1,000	$2.32 \pm 0.04^d$	$68.86 \pm 0.89^d$
1:3		$2.08 \pm 0.20^c$	$72.08 \pm 2.73^c$
1:5	3,000	$1.36 \pm 0.08^b$	$81.74 \pm 1.12^b$
1:7		$1.33 \pm 0.10^b$	$82.15 \pm 1.53^b$
1:7	30,000	$0.79 \pm 0.14^a$	$89.40 \pm 1.94^a$

**Note:** Letters a-e denote significant differences within columns at  $p \leq 0.05$  level

จากการทดลองแสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรา *Pseudoperonospora cubensis* ของนาโนซิงค์ออกไซด์แคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ร่วมกับสารสกัดจากกระชาย ที่อัตราส่วนและระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (Table 3-4) พบว่า ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อรามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยซิงค์ออกไซด์แคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ร่วมกับสารสกัดจากกระชาย อัตราส่วน 1:7 ที่ความเข้มข้น 30,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรามากที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราเท่ากับ  $89.40 \pm 1.94$  สำหรับอัตราส่วน 1:5 และ 1:7 ความเข้มข้น 3,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) รองลงมาคือ อัตราส่วน 1:3 และอัตราส่วน 1:1 ที่ความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ในการยับยั้งเชื้อราเท่ากับ  $72.08 \pm 2.73$  และ  $68.86 \pm 0.89$  ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วน 1:5 และ 1:7 ความเข้มข้น 3,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราและเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ดังนั้นการเลือกใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:5 ความเข้มข้น 3,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนนาโนซิงค์ออกไซด์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ร่วมกับสารสกัดจากกระชายไม่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราและเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อรา

## บทสรุป

การสังเคราะห์และศึกษาฤทธิ์การยับยั้งเชื้อรา *Pseudoperonospora cubensis* สาเหตุโรคราน้ำค้างในเมล่อน โดยใช้ นาโนซิงค์ออกไซด์อนุภาคนาโนแคโรไซด์ 300 และ 500 อนุภาคเซลเซียส และสารสกัดหยาบสมุนไพร 4 ชนิด คือ กระจับปี่ ข่า ขมิ้นชัน และกระชาย พบว่า ซิงค์ออกไซด์แคโรไซด์ที่อนุภาคนาโน 300 อนุภาคเซลเซียส มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรา *Pseudoperonospora cubensis* มากที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราเท่ากับ  $63.09 \pm 0.18$  และสารสกัดจากกระชาย ที่มีสารสำคัญทางพฤกษศาสตร์สามารถควบคุมการเจริญของเส้นใยเชื้อรา *Pseudoperonospora cubensis* ได้ดีเมื่อเทียบกับสมุนไพรชนิดอื่น มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราเท่ากับ  $55.57 \pm 2.11$  โดยนาโนซิงค์ออกไซด์แคโรไซด์ที่อนุภาคนาโน 300 อนุภาคเซลเซียส ร่วมกับสารสกัดจากกระชายอัตราส่วน 1:5 และ 1:7 ความเข้มข้น 3,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราและเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ดังนั้นการเลือกใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:5 ที่ความเข้มข้น 3,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนนาโนซิงค์ออกไซด์แคโรไซด์ที่อนุภาคนาโน 300 อนุภาคเซลเซียส ร่วมกับสารสกัดจากกระชายไม่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อราและเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อรา

## เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, W. & Kalra, D. (2020). Green synthesis, characterization and antimicrobial activities of ZnO nanoparticles using *Euphorbia hirta* leaf extract. *Journal of King Saud University-Science*, 32, 2358-2364. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.03.014>
- Ali, M., Wang, X., Haroon, U., Chaudhary, H. J., Kamal, A., Ali, Q., Saleem, M. H., Usman K., Alatawi, A., Ali, S. & Munis, M. F. H. (2022). Antifungal activity of zinc nitrate derived nano ZnO fungicide synthesized from *Trachyspermum ammi* to control fruit rot disease of grapefruit. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 233, 113311. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113311>
- Arciniegas-Grijalba, P. A., Patiño-Portela, M. C. & Rodríguez-Páez, J. (2017). ZnO nanoparticles (ZnO-NPs) and their antifungal activity against coffee fungus *Erythricium salmonicolor*. *Appl Nanosci*, 7, 225-241. <https://doi.org/10.1007/s13204-017-0561-3>
- Asmat-Campos, D., Rojas-Jaimes, J., Simbrón de la Cruz, M. & Montes de Oca-Vásquez, G. (2024). Enhanced antimicrobial efficacy of biogenic ZnO nanoparticles through UV-B activation: A novel approach for textile garment. *Heliyon*, 10, e25580. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25580>
- Bashir, S., Awan, M. S., Farrukh, M. A., Naidu, R., Khan S. A., Rafique, N., Ali, S., Hayat, I., Hussain, I. & Khan, M. Z. (2022). In-vivo (Albino Mice) and in-vitro assimilation and toxicity of zinc oxide nanoparticles in food materials. *International Journal of Nanomedicine*, 17, 4073-4085. <https://doi.org/10.2147/IJN.S372343>
- Boonnaum, P., Kabae, N., Hayeemasalaeh, R., Marde, W., Suwannarat, P., & Noipha, K. (2021). Phytochemical study, total phenolic, and antioxidant activity of *Boesenbergia pandurata* Holtt extract for the development of paper hand soap. *Research and Development Health System Journal*, 14(3), 152-165. <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/RDHSJ/article/view/253362> (In Thai)
- Chuenchan, W., Yooboriboon, S., & Boonsong, S. (2022). Efficiency of Herbal Crude Extracts to Against *Phytophthora parasitica*. *Journal of BSRU-Research and Development Institute*, 7(1), 243-252. (In Thai)

- De Peres, M. L., Delucis, R. A., Amico, S. C. & Gatto, D. A. (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.  
<https://doi.org/10.1177/1847980419876201>
- Farungsang, N., Jamkratoke, S., Rattanakreetakul, C., Farungsang, U., & Leksomboon, C. (2005, October). *Effects of fingerroot, ginger and tumeric extracts unfavourable for plant pathogenic fungi* [Paper presentation]. Thai biodiversity conference: Everything is interconnected, Nakhon Ratchasima, Thailand. (In Thai)
- Hasany, S. F., Hussain, S., Usman, Ali S. M., Abdul-Kadhim, W. & Amir, M. (2020). ZnO nanostructures: comparative synthetic and characterization studies. *Micro & Nano Letters*, 15(14), 972–976.  
<https://doi.org/10.1049/mnl.2019.0795>
- Kantong, P., Kome-ngam, M., & Rungrojchaipon, P. (2022). Catalytic Study of Calcium Silicate from Duck Eggshell for the Synthesis of Glycerol Carbonate from Glycerol and Urea. *Journal of Science Ladkrabang*, 31(1), 1–16. [https://li01.tci-thaijo.org/index.php/science\\_kmitl/article/view/245502](https://li01.tci-thaijo.org/index.php/science_kmitl/article/view/245502) (In Thai)
- Kenyota, N., & Laokul, P. (2019). Preparation of zinc oxide hollow spheres and their application as photoanode in dye sensitized solar cell. *Burapha Science Journal*, 24(3), 913-928.  
[https://science.buu.ac.th/ojs246\\_old/index.php/sci/article/view/2631](https://science.buu.ac.th/ojs246_old/index.php/sci/article/view/2631) (In Thai)
- Kumlong, S. & Kumpun, N. (2017). Inhibition of fungal growth on rubber sheet by herbal extracts. *RMUTI Journal Science and Technology*, 10(2), 107–118. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/96533> (In Thai)
- Machana, S., Thammanu, K., Weerapol, Y., Kunajet, S., Vongsak, B., & Pattaranich, C. (2019). *Investigation of physical and chemical characteristics of stingless bee honey in different locations and product development*. Burapha University. <http://dspace.lib.buu.ac.th/xmlui/handle/1234567890/3707>
- Mekkamol, S., Wichittrakulthavorn, K., & Suwanpornskul, R. (2016). Effects of potassium silicate in controlling powdery mildew and downy mildew of Japanese cucumber under plastic house and farmer's field conditions. *Journal of Agricultural Research and Communications*, 32(1), 51-59.  
<https://li01.tci-thaijo.org/index.php/joacmu/article/view/245584> (In Thai)
- Nasiri, S., Rabiei, M., Palevicius, A., Janusas, G., Vilkauskas, A., Nutalapati, V. & Monshi, A. (2023). Modified Scherrer equation to calculate crystal size by XRD with high accuracy, examples Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. *Nano Trends*, 3, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2023.100015>
- Navas, D., Ibañez, A., González, I., Palma J. L. & Dreyse, P. (2020). Controlled dispersion of ZnO nanoparticles produced by basic precipitation in solvothermal processes. *Heliyon*, 6, 1-9.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05821>
- Patitungkho, S. & Patitungkho, K. (2014). Synthesis and Biological Investigation of Nano-Organic and Nano-Organometallic Agents. *KKU Science Journal*, 42(3), 612-623. <https://search.asean-cites.org/article.html? b3BlbkFydGljbGUmaWQ9MTQyMzY2> (In Thai)

- Sakayaroj, S., Rugthaworn, P., Sukatta, U., Klinsuknon, K., Khacharat, L., Presunthian, N., & Thongkum, T. (2022, February 21-23). *The efficacy of green synthesized ZnO nanoparticles from Litchi peel on the growth of fungi causing postharvest decay of fruit* [Paper presentation]. Proceedings of 60<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference: Science, Engineering and Architecture, Agro-Industry, Natural Resources and Environment, Pathum Thani, Thailand. (In Thai)
- Sangchay, W. & Ubolchollakhat, K. (2016). Photocatalytic and antibacterial activity of ZnO powders prepared via sol-gel method. *KKU Engineering Journal*, 43(1), 21-25.  
<https://doi.org/10.14456/kkuenj.2016.4>
- Sarvankar, P. D., Kamble, S. S., Powar, P. S., Kakade, S. S., Jamadar, A. S., Thounaojam, P., Patil, M. S., Kalake, S. V., Nimbalkar, M. S. & Sharma, K. K. K. (2024). Synthesized rGO/f-MWCNT-architected 1-D ZnO nanocomposites for azo dyes adsorption, photocatalytic degradation, and biological applications. *Catalysis Communications*, 187, 106846. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2024.106846>
- Sehawong, W., Subepang, S., & Aroonluk, S. (2022). The efficacy of herbal extract to control onion twister disease caused by *Colletotrichum gloeosporioides* fungal pathogen. *YRU Journal of Science and Technology*, 7(2), 35–42. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/yrj/article/view/252261/174063>
- Somrit, R., Koonasoot, W., Phonkhokong, T., Tiemtree, P., Somame, S., & Saibut, S. (2023). Effect 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. [https://li01.tci-thaijo.org/index.php/sci\\_ubu/article/view/256020](https://li01.tci-thaijo.org/index.php/sci_ubu/article/view/256020) (In Thai)
- Sutthisa, W., Tapkhumram, P., Kanchanarat, W., & Arimastu, P. (2014). Efficiency of Thai medicinal plant extract to control *Colletotrichum* sp., a causal agent of mango anthracnose. *Khon Kaen Agricultural Journal*, 42(1), 665–670. <https://so06.tci-thaijo.org/index.php/rdibsru/article/view/255753> (In Thai)
- Thamsatit, W., Sukonthamut, S., & Thanaboripat, D. (2023). Screening of effective herbs for controlling *Phytophthora* sp. isolated from durian in Chanthaburi Province and Chumphon Province. *Journal of Science Ladkrabang*, 26(2), 1–14. [https://li01.tci-thaijo.org/index.php/science\\_kmit/article/view/107556/85111](https://li01.tci-thaijo.org/index.php/science_kmit/article/view/107556/85111) (In Thai)
- Wonglom, P., Daengsuwan, W., & Sanpapao, A. (2020). Occurrence and disease incidence of muskmelon diseases cultivated in polyhouse system in southern Thailand. *Khon Kaen Agricultural Journal*, 48(1), 1165-1172. [https://agkb.lib.ku.ac.th/kku/search\\_detail/result/401863](https://agkb.lib.ku.ac.th/kku/search_detail/result/401863) (In Thai)