

การสังเคราะห์วัสดุ $g-C_3N_4-Fe_2O_3-Ag/AgCl$ คอมโพสิต สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการ
สลายยาปฏิชีวนะในน้ำเสียด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

Synthesis of $g-C_3N_4-Fe_2O_3-Ag/AgCl$ composite as the catalyst for antibiotic degradation
from wastewater using photocatalytic process

กานต์ก้อแก้ว ภิรมย์รักษ์ สิงหา ไชยเวช

กนกรัตน์ สิงห์น้อย¹ ณิชภา รัตนโกมล² ประวิทย์ เนื่องมัจฉา²

¹โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย นครศรีธรรมราช ตำบลบางจาก อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80330

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ตำบลท่าวี อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280

*อีเมล: 6706343@pccnst.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบคอมโพสิต $g-C_3N_4-Fe_2O_3-Ag/AgCl$ และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสลายยาปฏิชีวนะที่ปนเปื้อนในน้ำเสียด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยใช้ Ofloxacin เป็นตัวแทนของยาปฏิชีวนะ ภายใต้การฉายแสงขาว โดยได้วิเคราะห์เฟสองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก ลักษณะสัณฐาน องค์ประกอบธาตุรวมกับการกระจายตัวของธาตุ และหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค XRD, SEM, EDS, EDS-mapping และ FTIR ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของ Ofloxacin ที่ 5 mg/L ใช้ปริมาณตัวเร่ง 0.08 g ร่วมกับการกระตุ้นด้วยแสงวิสิเบิล 130 W สามารถสลาย Ofloxacin ได้ 80.53% ภายในระยะเวลา 90 นาที ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวจึงนำไปศึกษาประสิทธิภาพการสลายยาปฏิชีวนะชนิดต่าง ๆ พบว่าประสิทธิภาพการสลายตัวยาปฏิชีวนะที่สูงที่สุดคือ Ofloxacin ที่ร้อยละการย่อยสลาย 80.53 รองลงมาคือ Amoxicillin, Sulfamethoxazole, Tetracycline และ Carbamazepine ที่ร้อยละการย่อยสลาย 79.32, 59.74, 49.16 และ 19.75 ตามลำดับ และศึกษาเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ $g-C_3N_4-Fe_2O_3-Ag/AgCl$, Fe_2O_3 , $g-C_3N_4$ และ $Ag/AgCl$ พบว่าค่าคงที่อัตราปรากฏ (k_{app}) เท่ากับ 0.0136 min^{-1} , 0.0106 min^{-1} , 0.0089 min^{-1} และ 0.0079 min^{-1} ตามลำดับ ซึ่ง $g-C_3N_4-Fe_2O_3-Ag/AgCl$ ให้ค่าคงที่อัตราปรากฏ (k_{app}) สูงสุด แสดงถึงประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเดี่ยวทุกชนิด แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการแยกประจุและการเร่งปฏิกิริยาที่เหนือกว่า จึงมีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนยาปฏิชีวนะอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

คำสำคัญ: $g-C_3N_4-Fe_2O_3-Ag/AgCl$, การย่อยสลาย, ยาปฏิชีวนะ, กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง, น้ำเสีย

บทนำ

น้ำเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญยิ่งต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ทั้งในด้านการอุปโภคบริโภค ภาคอุตสาหกรรม และเกษตรกรรม (Cuerda-Correa et al., 2020) ในปัจจุบันน้ำกำลังเผชิญกับวิกฤตจากการปนเปื้อนอันเนื่องมาจากกิจกรรมของมนุษย์และกระบวนการทางธรรมชาติในช่วง 3 ทศวรรษที่ผ่านมา (Lakshmi & Reddy, 2017) ซึ่งยาปฏิชีวนะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสีย ที่สามารถ

ปนเปื้อนได้ทั้งในน้ำผิวดิน น้ำบาดาล น้ำดื่ม และตะกอนในแหล่งน้ำ โดยมีแหล่งกำเนิดหลักจากกิจกรรมทางการแพทย์ อุตสาหกรรมยา ปศุสัตว์ เกษตรกรรม การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และการถูกขับออกจากร่างกาย เนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายโมเลกุลของยาปฏิชีวนะได้ทั้งหมด ยาปฏิชีวนะจึงสะสมในสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง (Gomes, 2022) การปนเปื้อนของยาปฏิชีวนะในแหล่งน้ำจะก่อให้เกิดเชื้อดื้อยา ซึ่งเป็นหนึ่งในภัยคุกคามต่อสุขภาพ

มนุษย์โดยองค์การอนามัยโลก (Wilkinson et al., 2022) กระบวนการดั้งเดิมที่ใช้ในการสลายยาปฏิชีวนะได้แก่ กระบวนการตกตะกอนแรง หรือระบบจานหมุนชีวภาพ ซึ่งไม่มีประสิทธิภาพมากพอในการกำจัดโมเลกุลของยาปฏิชีวนะ เนื่องจากความซับซ้อนของโครงสร้างโมเลกุล (Javed et al., 2025) ปัจจุบันเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงในการสลายสารกลุ่มยาและเวชภัณฑ์ คือ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ได้แก่ กระบวนการเฟนตัน (Fenton Process) โอโซนเนชัน (Ozonation Process) โซโนไลซิส (Sonolysis Process) และกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysis) ซึ่งกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีความโดดเด่นในการกำจัดมลพิษโดยใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระ ลดการใช้สารเคมี เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีต้นทุนต่ำ (Amanda et al., 2025)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมนำมาใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ TiO_2 และ ZnO แต่ข้อจำกัดคือมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่กว้าง (Junaid et al., 2023) ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องใช้แสงช่วงอัลตราไวโอเลตในการกระตุ้น ซึ่งมีอยู่เพียง 5% ของปริมาณแสงในธรรมชาติ ในทางกลับกัน ปริมาณแสงขาวพบในแสงธรรมชาติมากถึง 45% ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงมีเป้าหมายในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงให้มีแถบพลังงานที่แคบลง เพื่อลดอัตราการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนและโฮล ด้วย $\text{g-C}_3\text{N}_4$ และ Ag/AgCl และเพิ่มประสิทธิภาพการสลายของยาปฏิชีวนะ นอกจากนี้ การมีองค์ประกอบของ Fe_2O_3 อยู่ในโครงสร้าง จะช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติแม่เหล็ก อีกทั้งยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีช่วงพลังงานกระตุ้นต่ำซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายยาปฏิชีวนะ สามารถแยกออกจากระบบบำบัดได้ง่ายด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก ช่วยแก้ปัญหาการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาหลังใช้งาน

วิธีการดำเนินงาน

การทดลองที่ 1 การสังเคราะห์ $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Ag/AgCl}$

การทดลองที่ 1.1 เตรียม $\text{g-C}_3\text{N}_4$ โดยนำยูเรีย 20 กรัมมาอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 520°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเผาต่ออีก 4 ชั่วโมง แล้วนำมาบดเป็นผงละเอียดและชั่งน้ำหนัก

การทดลองที่ 1.2 เตรียม Fe_2O_3 โดยการเตรียมสารละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วนโมล 2:1 ละลายในน้ำกลั่นปราศจากไอออน บันทวนที่อุณหภูมิ 60°C ความเร็ว 400 rpm แล้วหยด NH_4OH (28–30%) จนเกิดตะกอนที่ pH 8 จากนั้นนำไปเข้าเครื่องล้างอัลตราโซนิก 30 นาที จากนั้นกรองและล้างจนเป็นกลาง อบที่ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก

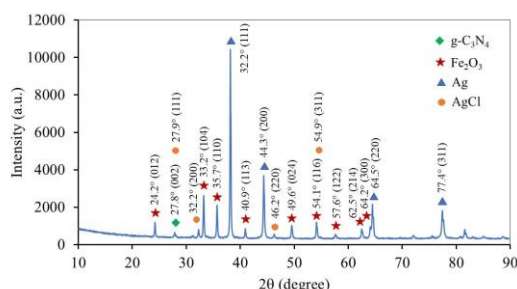
การทดลองที่ 1.3 คอมโพสิต $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Ag/AgCl}$ โดยผสมสารละลาย AgNO_3 0.1 M กับ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ และ Fe_2O_3 บันทวนที่อุณหภูมิ 80°C ระเหยแห้งโดยการอบที่ 105°C เป็นเวลา 120 นาที และเผาที่ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำวัสดุที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติด้วยเทคนิค XRD, SEM, EDS, EDS-mapping และ FTIR

การทดลองที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพและหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยา

นำตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Ag/AgCl}$ มาศึกษาประสิทธิภาพในการสลายยาปฏิชีวนะด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยศึกษาผลของระยะเวลาการฉายแสง ความเข้มข้นของยาปฏิชีวนะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มแสง พร้อมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายของยาปฏิชีวนะแต่ละชนิด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุคอมโพสิตกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเดี่ยว โดยวิเคราะห์ความเข้มข้นของยาปฏิชีวนะด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer และคำนวณประสิทธิภาพการย่อยสลายรวมถึงค่าคงที่อัตราปรากฏ (k_{app})

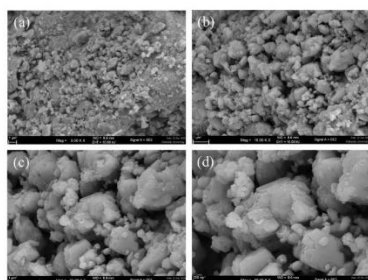
ผลและอภิปรายผล

ผลการทดลองตอนที่ 1

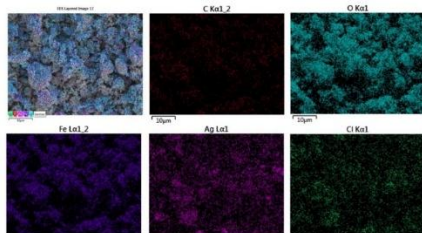


รูปที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

พบฟิสิกการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 24.2° , 32.2° , 35.7° , 40.9° , 49.5° , 54.1° , 57.6° , 62.5° และ 64.5° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึกของ Fe_2O_3 สำหรับ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ พบฟิสิกที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 27.8° ซึ่งเป็นระนาบ (002) ของ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ แสดงถึงโครงสร้างที่เรียงตัวคล้ายกราฟิต ส่วนฟิสิกที่ตำแหน่งประมาณ 27.9° , 32.2° , 46.2° , 54.9° และ 57.6° เป็นระนาบผลึกของ AgCl และพบฟิสิกที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 32.2° , 44.3° , 54.9° , 64.3° และ 77.4° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึกของ Ag

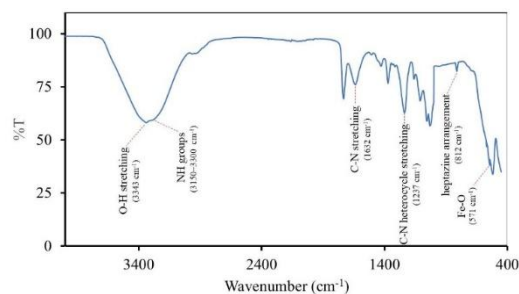


รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายจาก SEM ของ $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Ag/AgCl}$ ที่กำลังขยาย 5,000 $\times$, 10,000 $\times$, 20,000 $\times$ และ 30,000 $\times$



รูปที่ 3 แสดงการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบกำลังขยาย (สเกล 10 μm)

แสดงองค์ประกอบธาตุ ได้แก่ Fe ร้อยละ 63.3, O ร้อยละ 18.3, Ag ร้อยละ 13.4, C ร้อยละ 3.4 และ Cl ร้อยละ 1.7 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าธาตุมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและเกิดการ

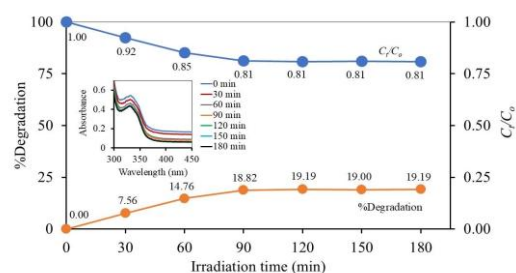


คอมโพสิตของตัวเร่งปฏิกิริยา

รูปที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ FTIR

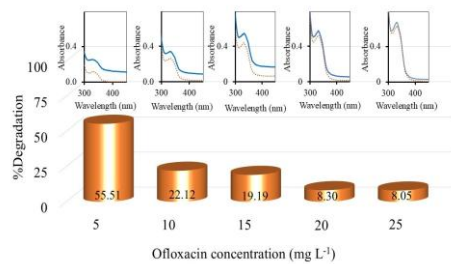
พบฟิสิกที่ 3343 cm^{-1} สัมพันธ์กับพันธะ O-H ฟิสิกช่วง $3150\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$ สัมพันธ์กับหมู่ N-H ฟิสิกที่ 1632 และ 1237 cm^{-1} เป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้าง $\text{g-C}_3\text{N}_4$ และฟิสิกที่ 571 cm^{-1} ยืนยันการมีอยู่ของ Fe_2O_3 ภายในวัสดุคอมโพสิต

ผลการทดลองตอนที่ 2



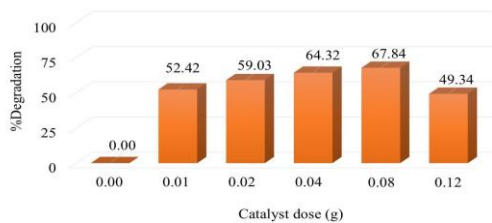
รูปที่ 5 แสดงผลการศึกษาผลของระยะเวลาต่อการสลายตัวของยาปฏิชีวนะ

พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือ 90 นาที โดยหลังจากนี้อัตราการย่อยสลายจะเริ่มคงที่เนื่องจากความสามารถในการสร้างอนุมูลอิสระลดลง



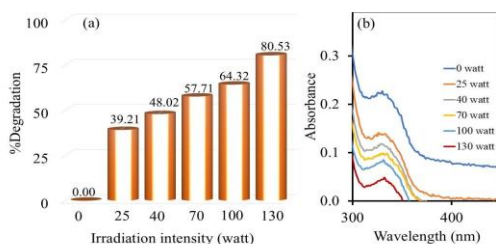
รูปที่ 6 แสดงผลการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นของยาปฏิชีวนะต่อการสลายตัวของยาปฏิชีวนะ

พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดคือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงสุดร้อยละ 55.51 โดยเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายจะลดลงเนื่องจากอนุมูลอิสระจะทำงานได้ปริมาณเท่าเดิม ในขณะที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจึงทำให้อัตราการย่อยสลายลดลง



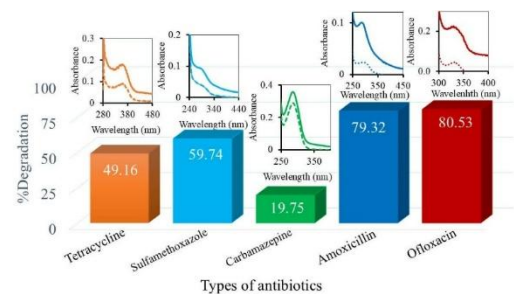
รูปที่ 7 แสดงผลการศึกษาค่าผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการสลายตัวของยาปฏิชีวนะ

พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา g-C₃N₄-Fe₂O₃-Ag/AgCl ที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.08 กรัม หากใช้มากกว่านี้ ประสิทธิภาพจะลดลงเนื่องจากตัวเร่งที่มากเกินไปทำให้เกิดความขุ่นและบดบังการส่องผ่านของแสง



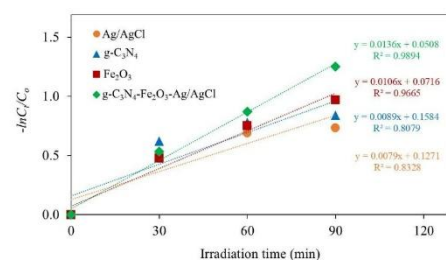
รูปที่ 8 แสดงผลการศึกษาค่าผลของความเข้มแสงต่อการสลายตัวของยาปฏิชีวนะ

พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง โดยที่ความเข้มแสง 130 วัตต์ให้ผลการย่อยสลายสูงสุดร้อยละ 80.53 เนื่องจากที่ความเข้มแสงมากขึ้นจะมีพลังงานแสงต่อหน่วยพื้นที่มากขึ้นจึงส่งผลให้การย่อยสลายสูงขึ้น



รูปที่ 9 แสดงผลของชนิดของยาปฏิชีวนะต่อการสลายตัวของยาปฏิชีวนะ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

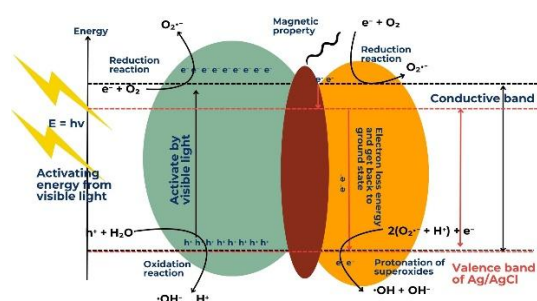
จากการทดลองพบว่า Ofloxacin มีอัตราการย่อยสลายสูงสุดเท่ากับ 80.53 % รองลงมาคือ Amoxicillin, Sulfamethoxazole, Tetracycline และ Carbamazepine ที่ร้อยละการย่อยสลาย 79.32, 59.74, 49.16 และ 19.75 ตามลำดับ



รูปที่ 10 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าคงที่อัตราปรากฏ (k_{app}) ของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ

จากผลการทดลอง g-C₃N₄-Fe₂O₃-Ag/AgCl มีประสิทธิภาพสูงกว่าวัสดุเดี่ยว เนื่องจากเกิดการร่อยต่อของวัสดุคอมโพสิต ทำให้อิเล็กตรอน (e⁻) มีการถ่ายโอนมากขึ้น และนานมากขึ้น พร้อมทั้งเกิดโฮล (h⁺) เยอะมากขึ้น ทำให้

มีประสิทธิภาพมากขึ้น และลดการกลับมารวมกันของอิเล็กตรอนและโฮล เมื่ออิเล็กตรอนถูกถ่ายโอนไปยังผิวตัวเร่ง จะทำปฏิกิริยากับ O_2 เกิดเป็น $O_2^{\cdot-}$ ขณะที่โฮลทำปฏิกิริยากับ H_2O หรือ OH^- เกิดเป็น $\cdot OH$ ส่งผลให้เกิดอนุมูลอิสระในปริมาณสูงและเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารปนเปื้อน นอกจากนี้ Ag ช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงผ่านปรากฏการณ์ Surface Plasmon Resonance (SPR) ส่วน Fe_2O_3 ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน จึงทำให้วัสดุคอมโพสิตมีประสิทธิภาพสูงกว่าวัสดุเดี่ยวแสดงดังภาพที่ 11



รูปที่ 11 แสดงกลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

สรุปผล

จากการศึกษาวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้ $g-C_3N_4$ ที่สังเคราะห์จากยูเรียมีลักษณะเป็นผงสีขาว ส่วน Fe_2O_3 มีลักษณะเป็นผงสีดำ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แสดงให้เห็นโครงสร้างแบบแผ่นชั้นของ $g-C_3N_4$ และการกระจายตัวของอนุภาคนาโน Fe_2O_3 และ $Ag/AgCl$ บนพื้นผิวอย่างสม่ำเสมอ ขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วย EDS แสดงองค์ประกอบของธาตุสำคัญ ได้แก่ Fe, O, Ag, C และ Cl และผลการวิเคราะห์ FTIR ยืนยันการเกิดหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของทั้ง $g-C_3N_4$ และ Fe_2O_3

การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุคอมโพสิตในการย่อยสลายยาปฏิชีวนะด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดังแสง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือระยะเวลาการฉายแสง 90 นาที ความเข้มข้นของยาปฏิชีวนะ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

0.08 กรัม และความเข้มแสง 130 วัตต์ ภายใต้สภาวะดังกล่าวสามารถย่อยสลายยาปฏิชีวนะ Ofloxacin ได้สูงสุดร้อยละ 80.53 โดยประสิทธิภาพลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของยาปฏิชีวนะหรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณมากเกินไป เนื่องจากเกิดการบดบังแสงและการสร้างอนุมูลอิสระไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ในทางกลับกัน การเพิ่มความเข้มแสงช่วยกระตุ้นการสร้างอนุมูลอิสระ ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายยาปฏิชีวนะ 5 ชนิดพบว่า Ofloxacin (80.53 %) และ Amoxicillin (79.32 %) มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงที่สุด รองลงมาคือ Sulfamethoxazole (59.74 %), Tetracycline (49.46%) และ Carbamazepine (19.75 %) ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าวัสดุคอมโพสิตมีความเหมาะสมต่อการกำจัดยาปฏิชีวนะบางกลุ่มที่มีโครงสร้างทางเคมีเอื้อต่อการถูกออกซิไดซ์ด้วยอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ การเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเดี่ยวพบว่า $g-C_3N_4-Fe_2O_3-Ag/AgCl$ มีค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาปรากฏ (k_{app}) สูงที่สุดที่ 0.0136 min^{-1} แสดงถึงอัตราการย่อยสลายที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ $g-C_3N_4$, Fe_2O_3 และ $Ag/AgCl$ เพียงชนิดเดียว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร. ประวิทย์ เนื่องมัจฉา และ นางณิชาภา รัตนโกมล อาจารย์คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Ai, C., Wu, S., Li, L., Lei, Y., & Shao, X. (2019). Novel magnetically separable $\gamma-Fe_2O_3/Ag/AgCl/g-C_3N_4$ composite for enhanced disinfection under visible light. *Colloids and Surfaces A*:



- Physicochemical and Engineering Aspects*, 583, Article 123981.
- Chakravorty, A., & Roy, S. (2024). A review of photocatalysis, basic principles, processes, and materials. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 8, Article 100155.
- Cuerda-Correa, E. M., Alexandre-Franco, M. F., & Fernández-González, C. (2020). Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water: An overview. *Water*, 12(1), Article 102.
- Javed, M. S., Nazir, M. A., Shafiq, Z., Ullah, S., Najam, T., Iqbal, R., Ismail, M. A., Tamang, T. L., & Shah, S. S. A. (2025). Advanced materials for photocatalytic removal of antibiotics from wastewater. *Journal of Alloys and Compounds*, 1010, Article 177926.
- Khyave, A. E., Mafigholami, R., Davood, A., Mahvi, A., & Salimi, L. (2025). Photocatalytic degradation of azithromycin and ceftriaxone using synthesized $\text{Ag/g-C}_3\text{N}_4/\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanocomposites in aqueous solution. *Scientific Reports*, 15, Article 18726.
- Porrawatkul, P., Pimsen, R., Kuyyogsuy, A., Rattanaburi, P., & Nuengmatcha, P. (2024). Morphology-dependent photocatalytic performance of ZnO nanostructures in organic dye and antibiotic degradation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(11), 7397–7414.
- Rajak, P., Ganguly, A., Dey, S., & Sen, K. (2025). Antibiotics in wastewater: Exploring the sources, links to antibiotic resistance, and strategies for their removal. *Cleaner Water*, 4, Article 100110.
- Sudarmono, Istiqomah, N. I., Cuana, R., Mahardhika, L. J., Chotimah, & Suharyadi, E. (2025). Photocatalytic reduction of aqueous hexavalent chromium using novel green-synthesized magnetite/chitosan nanocomposites employing Moringa oleifera leaf extract under UV irradiation. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17, Article 100565.
- Suzuki, S., Pradit, S., Manpetch, P., Tularak, P., & Nitiratsuwan, T. (2021). Contamination of antibiotics and sul and tet(M) genes in veterinary wastewater, river, and coastal sea in Thailand. *Science of The Total Environment*, 791, Article 148423.
- Ulwali, R. A., & Abbas, N. K. (2026). Green synthesis of $\text{Fe}_2\text{O}_3@\text{Ag}/\text{AgCl}$ core-shell nanoparticles with different AgNO_3 concentrations for enhanced photocatalytic degradation of methylene blue under UV irradiation. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 21(1), 195–205.



The 6th PCSHS Science Symposium 2026
"Driving the Future with Scientific Innovation"