

บทความวิจัย (Research Article)

การศึกษาสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมจากขมิ้น
Performance investigation of dye-sensitized solar cells using
Curcuma longa-derived dye

ทิพย์วรรณ รุ่งสว่าง¹, สุชีวัน กรอบทอง¹, กฤษฎา โส่งสิทธิ์²,
สุภาพ ชูพันธ์², สุทธิพนธ์ วงศ์ฤกษ์ดี^{1*}

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและวัสดุศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

² ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Tipawan Rungsawang¹, Sucheewan Krobthong¹, Kritsada Hongsith²,
Supab Choopun², Sutthipoj Wongrerkdee^{1*}

¹ Department of Physical and Material Sciences, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140, Thailand

² Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiangmai 50200, Thailand

* Corresponding author

E-mail address: sutthipoj.s@ku.ac.th

Received: 07/02/2026; Revised: 23/03/2026; Accepted: 23/03/2026

คำสำคัญ

เซลล์แสงอาทิตย์
สีย้อมธรรมชาติ
ขมิ้น
เจอร์คูมินออกไซด์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells; DSSCs) ที่ใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากขมิ้นซึ่งมีสารสำคัญในกลุ่มเคอร์คูมินอยด์เป็นตัวดูดกลืนแสงโดยสกัดด้วยเอทานอลและกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 820 rpm เป็นเวลา 30 นาที อุณหภูมิ 25 °C จากนั้นเตรียมโพโตอิเล็กโทรดจากผงซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าและย้อมด้วยสารสกัดขมิ้น นำโพโตอิเล็กโทรดที่ย้อมสีมาประกอบกับแคโทดอิเล็กโทรดแพลทินัมเพื่อสร้างเซลล์ DSSCs เมื่อตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโตรสโกปีพบพีคการดูดกลืนที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 420 nm ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานแบบ $\pi \rightarrow \pi^*$ ของโครงสร้างคอนจูเกตในโมเลกุลเคอร์คูมิน จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีพบหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลซึ่งช่วยเสริมการยึดเกาะของสีย้อมกับพื้นผิว ZnO ผลการทดสอบเซลล์ DSSCs พบว่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรเท่ากับ $1.02 \pm 0.22 \text{ mA/cm}^2$ ค่าความต่างศักย์วงจเปิดเท่ากับ $0.35 \pm 0.01 \text{ V}$ และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ $0.13 \pm 0.04 \%$

แม้ว่าประสิทธิภาพของเซลล์ DSSCs จะอยู่ในระดับต่ำ แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสี
 ย้อมจากขมิ้นมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นสีย้อมธรรมชาติสำหรับ DSSCs และสามารถ
 พิจารณาเป็นแนวทางในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้

KEYWORDS

Solar cells
 Natural dyes
 Curcuma longa
 Curcuminoids

ABSTRACT

This work investigates the development of dye-sensitized solar cells (DSSCs) using a natural dye extracted from *Curcuma longa* powder in ethanol and magnetic stirring at 820 rpm for 30 minutes at 25 °C. A photoelectrode was then prepared from zinc oxide (ZnO) coating onto conductive glass and immersing in the extract dye. The dye-sensitized photoelectrode was assembled with a platinum counter electrode to fabricate the DSSCs. Optical characterization of the turmeric solution using ultraviolet-visible spectroscopy showed the absorption peak at 420 nm corresponding to the $\pi \rightarrow \pi^*$ electronic transition within the conjugated structure of curcumin molecules. Functional group analysis by Fourier transform infrared spectroscopy indicated the presence of hydroxyl and carbonyl groups, which enhance the anchoring of dye molecules onto ZnO surfaces. Photovoltaic test of the DSSCs showed the short-circuit current density and open-circuit voltage of $1.02 \pm 0.22 \text{ mA/cm}^2$ and $0.35 \pm 0.01 \text{ V}$, respectively, resulting in the power conversion efficiency of $0.13 \pm 0.04\%$. Although a low PCE was observed, the photovoltaic results demonstrate that turmeric-derived dye exhibits potential as a natural sensitizer for DSSC applications and may serve as a promising approach toward the development of low-cost and environmentally friendly solar cells.

1. บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells; DSSCs) ทำงานบนหลักการของการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากสีย้อมไวแสง (sensitizer) เมื่อได้รับพลังงานแสง แล้วถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่มักใช้เป็นชั้นโพโตอิเล็กโทรด (Grätzel, 2003) เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) หรือไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) กระบวนการนี้ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญคือ การยึดเกาะของสีย้อมกับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ผ่านพันธะเคมีและแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิต

สีย้อมไวแสง (Dye-sensitizer) เป็นองค์ประกอบหลักที่มีบทบาทโดยตรงต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ DSSCs โดยสีย้อมเชิงพาณิชย์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมักเป็นสีย้อมโลหะเชิงซ้อน เช่น สีย้อมที่มีรูทีเนียม (Ru-based complexes) ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงในการดูดกลืนแสงและถ่ายโอนอิเล็กตรอน อย่างไรก็ตามสีย้อมดังกล่าวมีข้อจำกัดด้านต้นทุนที่สูง ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และกระบวนการสังเคราะห์ที่ซับซ้อน ส่งผลให้เกิดความสนใจในการพัฒนาสีย้อมทางเลือกจากธรรมชาติ (Natural dyes) ซึ่งมีข้อดีด้านความปลอดภัยในการหา ต้นทุนต่ำ ความปลอดภัย และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยสีย้อมจากพืชหลายชนิดประกอบด้วยสารในกลุ่มโพลีฟีนอล แอนโทไซยานิน (Anthocyanins) (Calogero & Marco, 2008) และเคอร์คูมินอยด์ (Curcuminoids) (Sajan et al., 2011) ซึ่งมีโครงสร้างคอนจูเกตที่เหมาะสมต่อการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ และสามารถทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่สารกึ่งตัวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ สีย้อมที่เหมาะสมสำหรับ DSSC จำเป็นต้องมีหมู่

ฟังก์ชันที่สามารถประสานกับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำชนิดโลหะออกไซด์ เช่น ZnO โดยหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$), คาร์บอนิล ($-C=O$) และคาร์บอกซิลิก ($-COOH$) สามารถเกิดพันธะประสานกับไอออน Zn^{2+} บนพื้นผิว ทำให้สีย้อมยึดเกาะได้อย่างมั่นคงและมีเสถียรภาพสูง การยึดเกาะที่มีประสิทธิภาพไม่เพียงช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและลดการหลุดลอกของสีย้อมเท่านั้น แต่ยังเอื้อต่อการถ่ายโอนอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่องจากสีย้อมไปยังแถบนำไฟฟ้า (Conduction band; CB) ของ ZnO ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (Short-circuit current density; J_{sc}) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Power conversion efficiency; PCE) ของ DSSCs เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งประสิทธิภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม ชนิดและจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ยึดเกาะ รวมถึงความหนาแน่นและความสม่ำเสมอของฟิล์มสีย้อมบนพื้นผิวสารกึ่งตัวนำ

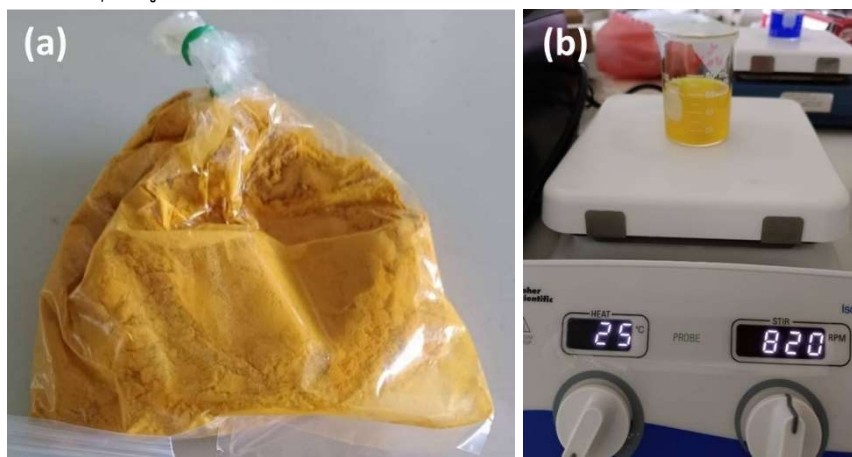
ขมิ้น (*Curcuma longa*) เป็นแหล่งสีย้อมธรรมชาติที่มีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ใน DSSCs เนื่องจากมีสารสำคัญในกลุ่มเคอร์คูมินอยด์โดยเฉพาะเคอร์คูมิน (Curcumin) ซึ่งมีโครงสร้างระบบคอนจูเกตพาย (π -conjugated system) ช่วยเสริมการดูดกลืนโฟตอนในย่านแสงที่มองเห็นได้ และเอื้อต่อการเกิดสถานะกระตุ้นที่สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังสารกึ่งตัวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Sharma et al., 2023) นอกจากนี้ โมเลกุลของเคอร์คูมินยังประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันสำคัญ ได้แก่ $-OH$ และ $-C=O$ ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นหมู่ยึดเกาะ (Anchoring groups) โดยเกิดการประสานกับตำแหน่ง Zn^{2+} บนพื้นผิวของอนุภาค ZnO (Moussawi & Patra, 2016) ส่งผลให้เกิดการดูดซับสีย้อมบนผิวที่เพิ่มขึ้น ลดการชะล้างหรือการหลุดลอกของสีย้อมในระหว่างการทำงานของ DSSCs และเพิ่มความหนาแน่นของโมเลกุลสีย้อมครอบคลุมพื้นผิว ซึ่งจะช่วยเสริมกลไกการฉีดอิเล็กตรอน (electron injection) จากสีย้อมเข้าสู่ CB ของ ZnO พร้อมทั้งเพิ่มอัตราการขนส่งประจุต่อเนื่อง ส่งผลให้ค่า J_{sc} เพิ่มขึ้นและนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ DSSC นอกจากนี้เคอร์คูมินมีช่วงการดูดกลืนแสงที่เด่นในช่วงประมาณ 410-430 nm (Mardiyati et al., 2023) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานแสงอาทิตย์ในย่านแสงที่มองเห็นได้ ทำให้สามารถทำหน้าที่เป็นตัวรับแสง (Light harvester) สำหรับ DSSC ได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพัฒนา DSSCs โดยใช้สีย้อมธรรมชาติจากขมิ้น เพื่อค้นหาและสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้สารสกัดจากวัสดุธรรมชาติเพื่อพัฒนาเซลล์ DSSCs ต้นทุนต่ำ รวมทั้งเสนอแนวทางการใช้สารธรรมชาติที่มีอยู่มากในประเทศเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มเพื่อการส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีที่ยั่งยืน

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมสีย้อมไวแสงจากขมิ้น

นำผงขมิ้นสำเร็จรูปดังภาพที่ 1(a) ซึ่งซื้อจากร้านค้าในท้องถิ่น ปริมาณ 0.1 g ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 mL จากนั้นเติมเอทานอลปริมาตร 50 mL ใส่แท่งแม่เหล็กและปิดบีกเกอร์ด้วยพาราฟิล์ม แล้วนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กด้วยความเร็วรอบ 820 rpm เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 25 °C ดังภาพที่ 1(b) เพื่อให้ได้สารละลายสีย้อมจากขมิ้นที่พร้อมใช้งาน



ภาพที่ 1 (a) ผงขมิ้น (b) การเตรียมสารละลายขมิ้น

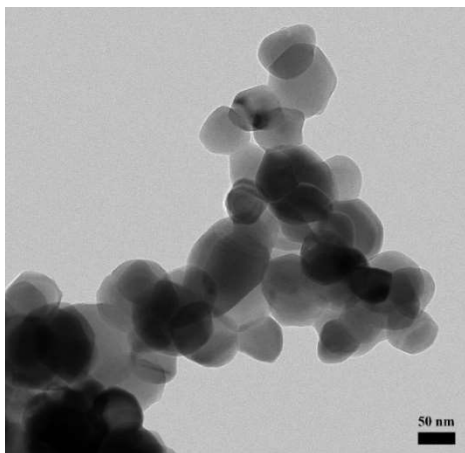
2.2 การเตรียมโฟโตอิเล็กโทรด

1) เตรียมแผ่นกระจกนำไฟฟ้า (F-doped SnO_2 ; FTO) ขนาด $2.0 \times 2.5 \text{ cm}^2$ ทำความสะอาดด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกในอะซิโตน (Acetone) น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water; DI water) และเอทานอล (Ethanol) อย่างละ 30 นาที ตามลำดับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนและคราบอินทรีย์บนพื้นผิว จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยลมร้อนและติดทับด้วยเทปกาวชนิดไม่เหนียวบนแผ่นกระจก โดยเว้นช่องตรงกลางขนาดประมาณ $0.5 \times 2.0 \text{ cm}^2$ เพื่อกำหนดพื้นที่สำหรับการเคลือบฟิล์ม ZnO ทั้งนี้ความหนาของฟิล์มจะควบคุมให้มีค่าใกล้เคียงกับความหนาของเทปกาวคือประมาณ $52 \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$

2) เตรียมสารเคลือบ ZnO โดยเตรียมสารละลาย 2-ethoxyethanol ในน้ำกลั่น (10% by weight) และกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเติมผง ZnO (ZnO powder) ในอัตราส่วน 4 กรัมต่อสารละลาย 2-ethoxyethanol ปริมาตร 10 mL และกวนต่ออีก 1 ชั่วโมงจนได้สารเคลือบ ZnO ที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทั้งนี้ตรวจสอบขนาดอนุภาค ZnO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope) ดังภาพที่ 2 และวัดขนาดอนุภาคโดยใช้ image-J software ได้ค่าเป็น $83.89 \pm 20.5 \text{ nm}$

3) นำสารแขวนลอย ZnO ที่เตรียมได้สกรีนลงบนแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่กำหนดพื้นที่ไว้ โดยควบคุมให้ฟิล์มมีความเรียบและหนาสม่ำเสมอ หลังจากปล่อยให้แห้งจึงลอกเทปกาวออก และนำแผ่นกระจก FTO ที่เคลือบด้วย ZnO ไปเผาที่อุณหภูมิ $400 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ฟิล์ม ZnO ที่เคลือบบนกระจก FTO

4) นำฟิล์ม ZnO วางใน Petri dish จากนั้นเติมสารละลายสีย้อมจากขมิ้นลงไปปริมาตร 40 mL แล้วปิดหุ้มด้วยพาราฟิล์มทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดแล้วนำฟิล์ม ZnO ที่ย้อมด้วยสารละลายขมิ้นมาล้างด้วยเมทานอลเพื่อชะตะกอนหรือสิ่งตกค้างออก โดยทำซ้ำกระบวนการย้อมด้วยสารละลายขมิ้นอีกครั้งเพื่อลดการรวมตัวหรือการเกาะกลุ่มของสีย้อม จากนั้นรอให้แห้งเพื่อนำไปประกอบเป็น DSSCs



ภาพที่ 2 อนุภาค ZnO ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดอนุภาค $83.89 \pm 20.50 \text{ nm}$

2.3 การเตรียมแคโทดรีเล็กโทรด

การเตรียมแคโทดรีเล็กโทรดด้วยแพลตินัม (Pt) โดยใช้สารละลาย Pt สำเร็จรูปปริมาตร $40 \text{ }\mu\text{L}$ หยดลงบนกระจก FTO ที่ติดทับด้วยเทปกาวชนิดไม่เหนียวที่เว้นพื้นที่สำหรับการเคลือบฟิล์ม Pt ขนาดประมาณ $0.5 \times 2.0 \text{ cm}^2$ รอให้แห้งและลอกเทปกาวออก จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ $550 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้แคโทดรีเล็กโทรดที่พร้อมนำไปใช้งาน

2.4 การประกอบเซลล์ DSSCs และวัดประสิทธิภาพ

ประกอบเซลล์ DSSCs โดยนำโฟโตอิเล็กโทรดและแคโทดรีเล็กโทรดประกบเข้าด้วยกันโดยใช้แผ่นพาราฟิล์มเป็นแถบกันให้มีช่องว่างระหว่างโฟโตอิเล็กโทรดและแคโทดรีเล็กโทรด เป่าด้วยลมร้อนเพื่อละลายพาราฟิล์มให้โฟโตอิเล็กโทรดและแคโทดรีเล็กโทรดยึดติดกันเป็นเซลล์ DSSCs จากนั้นหยดสารอิเล็กโทรไลต์ชนิด EL-HPE Electrode ปริมาตร $30 \text{ }\mu\text{L}$ และทำการทดสอบประสิทธิภาพภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จำลอง (Solar Simulator, ABET) ความเข้มแสงขนาด 1000 W/m^2 พร้อมทำการบันทึก

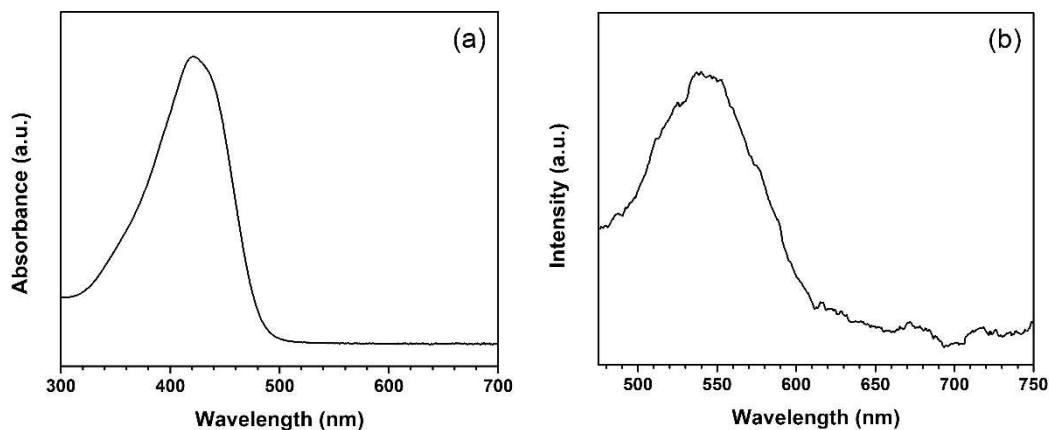
ค่าความหนาแน่นกระแส (Current density; J) เมื่อแปรค่าความต่างศักย์ (V) ในช่วง -0.1 ถึง 0.8 V ด้วยเครื่องวัดแหล่งจ่าย (Source Meter, KEITHLEY) โดยทำซ้ำ 3 ตัวอย่าง

2.5 การศึกษาลักษณะจำเพาะ

วิเคราะห์สีย้อมจากขมิ้นโดยนำสารละลายขมิ้นเจือจางให้เหมาะสมแล้วนำไปวัดสมบัติเชิงแสงประกอบด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล (Ultraviolet-visible spectrophotometer, Thermo Scientific BioMate 160; UV-Vis) เพื่อศึกษาช่วงความยาวคลื่นและลักษณะการดูดกลืนแสงของสีย้อมซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพในการดูดซับพลังงานแสงสำหรับการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ และการวัดการเรืองแสงด้วยเครื่องวัดการเรืองแสงสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ (Fluorescence spectrophotometer, Horiba Scientific FluoroMax+ Spectrofluorometer) โดยกระตุ้นตัวอย่างด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 405 nm เพื่อตรวจสอบลักษณะการเรืองแสงซึ่งสะท้อนพฤติกรรมการคายพลังงานของอิเล็กตรอน จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลและหมู่ฟังก์ชันของสารละลายขมิ้นด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy, PerkinElmer Scientific Spectrum Two; FTIR) โดยเปรียบเทียบผลการวัดจากผงสำเร็จรูปและสารละลายสีย้อมเพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน

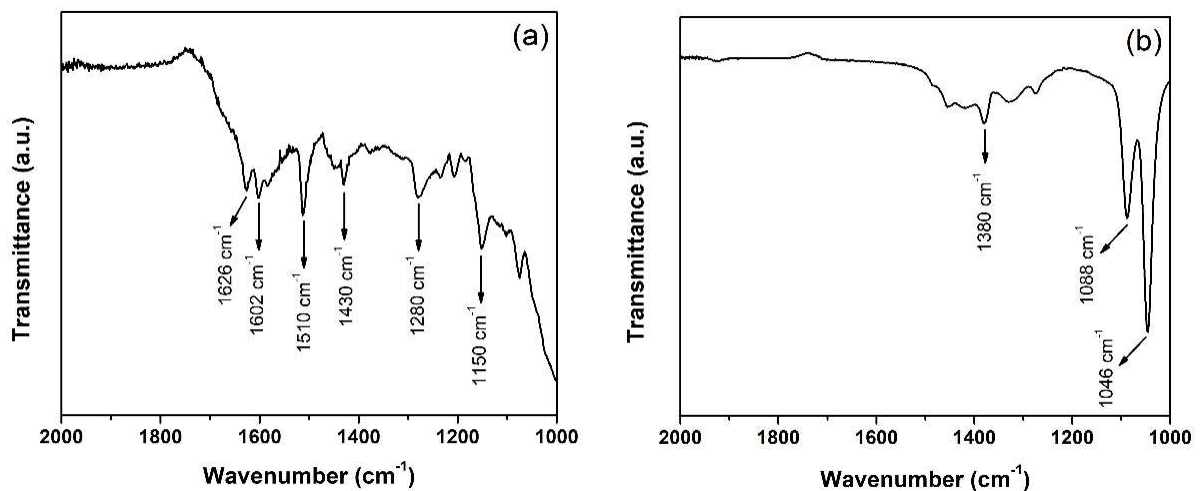
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นดังภาพที่ 3(a) พบพีกการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 420 nm ซึ่งเป็นพีกหลักที่อยู่ในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible region) โดยเป็นลักษณะเด่นของสารกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ (Gibbard, 2025) ที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานแบบ $\pi \rightarrow \pi^*$ ของระบบพันธะคู่คอนจูเกต (Conjugated double bonds) ภายในโครงสร้างของเคอร์คูมิน (Rani et al., 2020) แสดงให้เห็นว่าสีย้อมขมิ้นสามารถดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงแสงสีน้ำเงิน-ม่วงได้ จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นบ่งบอกถึงโครงสร้างโมเลกุลที่มีระบบคอนจูเกตและหมู่ฟังก์ชันที่เอื้อต่อการดูดกลืนแสงทั้งในย่านอัลตราไวโอเลตและแสงที่ตามองเห็นได้ แสดงให้เห็นว่าสีย้อมขมิ้นมีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็นสีย้อมธรรมชาติในเซลล์แสงอาทิตย์ DSSCs ได้ เมื่อพิจารณาสมบัติการเรืองแสงของสารละลายขมิ้นเมื่อกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 405 nm ดังภาพที่ 3(b) พบว่าการเรืองแสงเป็นแถบกว้างในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500–600 nm โดยมีความเข้มสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 540–550 nm (Ferreira et al., 2023; Melo et al., 2024) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ที่มีโครงสร้างคอนจูเกตแบบ $\pi \rightarrow \pi^*$ เมื่อถูกกระตุ้นจะทำให้อิเล็กตรอนถูกย้ายจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น เมื่อเกิดการกลับสู่สถานะพื้นจะปลดปล่อยโฟตอนในช่วงสีเขียว-เหลือง การเลื่อนของความยาวคลื่นจาก 405 nm ไปยังช่วง 540–550 nm บ่งบอกถึงการสูญเสียพลังงานเชิงความร้อนก่อนการคายพลังงานแบบเรืองแสงเพื่อกลับสู่สถานะพื้นของอิเล็กตรอน ซึ่งการคายพลังงานแบบนี้ช่วยให้อิเล็กตรอนถูกฉีดเข้าสู่แถบนำไฟฟ้าของ ZnO ด้วยแรงขับ (Driving force, ΔG_{inject}) (Wang et al., 2023) ได้ก่อนที่จะกลับไปสู่สถานะพื้นในโมเลกุลของขมิ้นเอง ซึ่งมีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้เป็นสีย้อมไวแสง



ภาพที่ 3 (a) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (b) สเปกตรัมการเรืองแสงของสารละลายขมิ้น

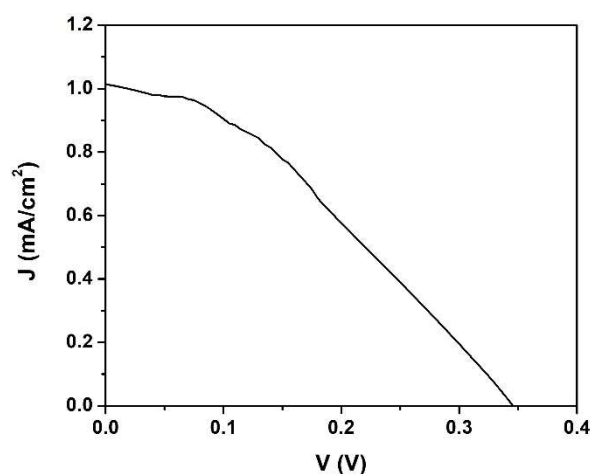
จากกราฟฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม (FTIR) ของผงขม้นดังภาพที่ 4(a) พบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในช่วงเลขคลื่น $2000\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ ประกอบด้วยพีคที่ตำแหน่ง 1626 cm^{-1} และ 1602 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นผานกันของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ และ $\text{C}=\text{C}$ ในโครงสร้างอะโรมาติกและพันธะคู่คอนจูเกตของสารกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ (Ciuca et al., 2023; Subhan et al., 2013) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของขม้น พีคที่ตำแหน่งประมาณ 1510 cm^{-1} บ่งชี้ถึงการสั่นของวงแหวนเบนซีน (aromatic ring stretching) ขณะที่พีคบริเวณ 1430 cm^{-1} สอดคล้องกับหมู่เมทิล นอกจากนี้พีคที่ประมาณ 1280 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ $\text{C}-\text{H}$ ซึ่งมีพบในหมู่ฟีนอลิก (phenolic group) และเมทอกซี ($-\text{OCH}_3$) ที่เป็นลักษณะเฉพาะของโมเลกุลเคอร์คูมิน ส่วนพีคที่ตำแหน่งประมาณ 1150 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ หรือ $\text{C}-\text{O}$ ซึ่งยืนยันการมีอยู่ของหมู่เอเทอร์และแอลกอฮอล์ในโครงสร้างของผงขม้นโดยรวม เมื่อทดสอบ FTIR ของสารละลายขม้นในเอทานอลตามภาพที่ 4(b) พบพีคที่ตำแหน่ง 1380 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ bending ของพันธะ $\text{C}-\text{H}$ ในหมู่เมทิลและเมทิลีน ($-\text{CH}_3$ และ $-\text{CH}_2-$) ซึ่งได้รับอิทธิพลจากทั้งโครงสร้างของสารเคอร์คูมินและเอทานอล ขณะที่พีคที่ตำแหน่ง 1088 cm^{-1} และ 1046 cm^{-1} มีความเข้มเด่นชัด ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของพันธะ $\text{C}-\text{O}$ stretching ของหมู่แอลกอฮอล์และเอเทอร์ โดยเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) ของเอทานอลและหมู่ฟีนอลิกในโครงสร้างของเคอร์คูมิน การปรากฏพีคที่ชัดเจนในช่วงเลขคลื่นต่ำกว่า 1200 cm^{-1} นี้บ่งบอกถึงพันธะไฮโดรเจนระหว่างสีย้อมขม้นกับเอทานอล ซึ่งหมู่ $\text{C}-\text{O}$ และ $-\text{OH}$ มีความสำคัญต่อการยึดเกาะของสีย้อมบนผิวสารกึ่งตัวนำ ZnO สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นเซลล์ DSSCs



ภาพที่ 4 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) ผงขม้น (b) สารละลายขม้น

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 5 และตารางที่ 1 พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ DSSCs ให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) เท่ากับ $1.02 \pm 0.22\text{ mA/cm}^2$ และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) เท่ากับ $0.35 \pm 0.01\text{ V}$ แสดงให้เห็นว่าสีย้อมจากขม้นสามารถดูดกลืนแสงและผลิตประจุพาหะสำหรับเซลล์ DSSCs ได้ในระดับหนึ่ง โดยกลไกการทำงานของ DSSCs สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 6(a) ซึ่งเมื่อแสงตกกระทบบโมเลกุลของสีย้อม (Dye) อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากระดับพลังงานออร์บิทัลเชิงโมเลกุลที่ถูกครอบครองสูงสุด (Highest occupied molecular orbital: HOMO) ไปยังระดับพลังงานออร์บิทัลเชิงโมเลกุลว่างที่ถูกครอบครองต่ำสุด (Lowest unoccupied molecular orbital: LUMO) ทำให้โมเลกุลของสีย้อมอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) และถูกฉีดเข้าสู่ CB ของ ZnO ได้ จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างของ ZnO ไปยัง FTO และไหลผ่านวงจรภายนอกไปยังโหลด (Load) ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ในขณะเดียวกันโมเลกุลของสีย้อมที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะถูกรีดิวซ์กลับโดยไอออนไอโอดีน (I^-) ในอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์เป็นไตรไอโอดีน (I_3^-) ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปยังขั้ว Pt และรีดิวซ์กลับเป็น I^- เกิดวัฏจักรรีดอกซ์ของอิเล็กโทรไลต์อย่างต่อเนื่องและรักษาสมาดุลของประจุภายในเซลล์ DSSCs (Hasin & Kladkaew, 2019) โดยกลไกนี้สามารถอธิบายการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ด้วยวงจรสมมูล (Equivalent circuit) (Onah et al., 2024) ดังแสดงในภาพ 6(b) โดยเซลล์ DSSCs ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าเมื่อแสงตกกระทบบ

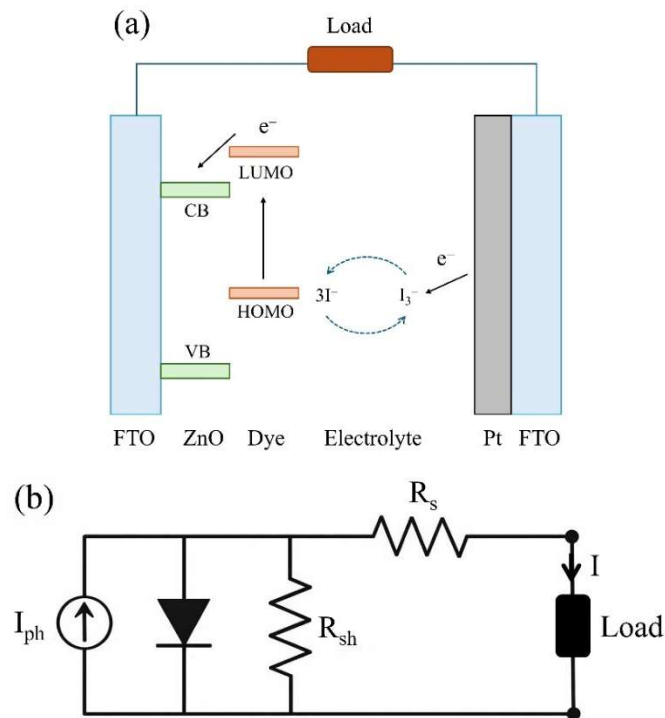
(Photocurrent source: I_{ph}) ซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแสงของสีย้อมและผลิตอิเล็กตรอน โดยกระแส I_{ph} ส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ในลักษณะคล้ายกระแสที่ไหลผ่านไดโอด (Diode) ซึ่งป้องกันกระบวนการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนกับโฮลภายในเซลล์ อย่างไรก็ตาม กระแส I_{ph} ที่ไหลออกไปสู่โหลดอาจมีค่าลดลงเนื่องจากการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนกับโฮลบางส่วนทำให้การสูญเสียพลังงานภายในอุปกรณ์ผ่านวงจรความต้านทานขั้วต่อ (Shunt resistance: R_{sh}) และกระแสจำนวนมากจะไหลสู่โหลดโดยมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนที่เป็นผลมาจากความต้านทานอนุกรม (Series resistance: R_s) ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าสู่โหลดภายนอก ทั้งนี้เมื่อพิจารณา J_{sc} และ V_{oc} จากการทดลองที่อยู่ในช่วงค่อนข้างต่ำบ่งชี้ว่าการฉีดอิเล็กตรอนจากสีย้อมซึมเข้าสู่แถบ CB ของสารกึ่งตัวนำ ZnO รวมถึงการเคลื่อนที่ของพาหะประจุภายในเซลล์ยังมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนี้ ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) เท่ากับ 0.36 ± 0.04 แสดงให้เห็นว่ากราฟ J-V ยังไม่เป็นอุดมคติ ซึ่งอาจเกิดจากการสูญเสียพลังงานภายในเซลล์อันเนื่องมาจากความต้านทานภายในระบบ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Power conversion efficiency; PCE) มีค่าเพียง $0.13 \pm 0.04\%$ เมื่อพิจารณา R_{sh} ที่มีค่าสูงถึง $1675 \pm 531 \Omega$ แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์อยู่ในระดับต่ำ (Sung et al., 2020) ขณะที่ค่า R_s ที่มีค่า $221 \pm 74 \Omega$ ยังอยู่ในระดับค่อนข้างสูง ซึ่งอาจเกิดจากความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นวัสดุ ทำให้การนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดหรือการแพร่ของอิเล็กโทรไลต์มีประสิทธิภาพลดลง ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าแม้เซลล์จะมีประสิทธิภาพต่ำแต่แสดงให้เห็นว่าสีย้อมจากขมิ้นสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดกลืนพลังงานและผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์ DSSCs ได้ ซึ่งประสิทธิภาพอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ใช้สีย้อมสกัดจากสารธรรมชาติชนิดอื่นดังตารางที่ 2 ทั้งนี้ในการพัฒนาขั้นต่อไปอาจจำเป็นต้องปรับปรุงวัสดุและกระบวนการเตรียม เช่น การเพิ่มการยึดเกาะของสีย้อม การลดความต้านทานภายใน และการปรับปรุงโครงสร้างของอิเล็กโทรด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต



ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ DSSCs

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ DSSCs

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
J_{sc}	1.02 ± 0.22	mA/cm^2
V_{oc}	0.35 ± 0.01	V
FF	0.36 ± 0.04	-
PCE	0.13 ± 0.04	%
R_s	221 ± 74	Ω
R_{sh}	1675 ± 531	Ω



ภาพที่ 6 (a) แผนภาพกลไกการทำงานของเซลล์ DSSCs และ (b) วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์ DSSCs ที่ใช้สีย้อมจากธรรมชาติ

แหล่งสีย้อมธรรมชาติ	สารละลายที่ใช้สกัด	ประสิทธิภาพ (%)	อ้างอิง
ผงขมิ้น	เอทานอล	0.13	งานวิจัยนี้
กลีบกุหลาบ	กรดซิตริก	1.53 – 2.61	Prajapat et al. (2025)
ผักโขม	เอทานอล	0.072	Cari et al. (2018)
ผักโขม	อะซิโตน	0.17	Ammar et al. (2019)
มะม่วง	เมทานอล	0.38	Ismail et al. (2018)

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้สาธิตการสกัดและประยุกต์ใช้สีย้อมธรรมชาติจากขมิ้นเป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์ DSSCs โดยผลการวิเคราะห์ UV-Vis ยืนยันว่าขมิ้นมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ โดยมีพีคการดูดกลืนแสงที่ 420 nm ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติทางโครงสร้างของสารเคอร์คูมินอยด์ที่มีระบบพันธะคู่คอนจูเกต การวิเคราะห์ FTIR แสดงให้เห็นการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันสำคัญ เช่น $-OH$ และ $-C=O$ ซึ่งเอื้อต่อการยึดเกาะบนพื้นผิว ZnO และสนับสนุนกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอน เมื่อทดสอบสมรรถนะของเซลล์พบว่า DSSCs ที่ใช้สีย้อมขมิ้นสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จริง แม้จะให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานค่อนข้างต่ำ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดด้านการฉีดอิเล็กตรอนและความต้านทานภายในเซลล์ อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแบบซีรี่ย์ที่สูงบ่งชี้ว่าการรั่วไหลของกระแสมีน้อย แสดงถึงศักยภาพของโครงสร้างเซลล์โดยรวม ดังนั้นผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสีย้อมจากขมิ้นเป็นวัสดุทางเลือกที่มีความเป็นไปได้สำหรับการพัฒนา DSSCs ต้นทุนต่ำในอนาคต ทั้งนี้อาจปรับปรุงด้านการยึดเกาะของสีย้อมเพื่อลดความต้านทานอนุกรมและยกระดับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ใช้งบประมาณการทํางานวิจัยโดยทุนวิจัยส่วนตัวและได้รับการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์วิจัยจากศูนย์วิจัยส่งเสริม และถ่ายทอดเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

- Ammar, A. M., Mohamed, H. S. H., Yousef, M. M. K., Abdel-Hafez, G. M., Hassanien, A. S., & Khalil, A. S. G. (2019). Dye-sensitized solar cells (DSSCs) based on extracted natural dyes. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 1867271. <https://doi.org/10.1155/2019/1867271>
- Calogero, G., & Marco, G. D. (2008). Red Sicilian orange and purple eggplant fruits as natural sensitizers for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(11), 1341-1346. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.05.007>
- Cari, C., Khairuddin, Septiawan, T. Y., Suciarmoko, P. M., Kurniawan, D., & Supriyanto, A. (2018). The preparation of natural dye for dye-sensitized solar cell (DSSC). *AIP Conference Proceedings*, 2014(1), 020106. <https://doi.org/10.1063/1.5054510>
- Ciuca, M. D., & Racovita, R. C. (2023). Curcumin: Overview of Extraction Methods, Health Benefits, and Encapsulation and Delivery Using Microemulsions and Nanoemulsions. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(10), 8874. <https://doi.org/10.3390/ijms24108874>
- Ferreira, J. R. M., Alves, M., Sousa, B., Vieira, S. I., Silva, A. M. S., Guieu, S., Cunha, Â., & Nunes da Silva, R. (2023). Curcumin-based molecular probes for fluorescence imaging of fungi. *Organic & Biomolecular Chemistry*, 21, 1531–1536. <https://doi.org/10.1039/D2OB01872A>
- Grätzel, M. (2003). Dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 4(2), 145-153. [https://doi.org/10.1016/S1389-5567\(03\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S1389-5567(03)00026-1)
- Gibbard, J. A. (2025). On the intrinsic stability of curcumin. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 27, 22698-22709. <https://doi.org/10.1039/D5CP02049B>
- Hasin, P., & Kladkaew, M. (2019). Economical dye-sensitized solar cells based on polypyrrole/multiwalled carbon nanotube@reduced graphene oxide nanoribbon counter electrode. *Defense Technology Academic Journal*, 1(3), 38–51.
- Ismail, M., Ludin, N. A., Hamid, N. H., Ibrahim, M. A., & Sopian, K. (2018). The effect of chenodeoxycholic acid (CDCA) in mangosteen (*Garcinia mangostana*) pericarps sensitizer for dye-sensitized solar cell (DSSC). *Journal of Physics: Conference Series*, 1083(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1083/1/012018>
- Mardiyati, Y., Fauza, A. N., Steven, S., Hansen, Shoimah, S. M., Rachman, O. A., Nuruddin, A., & Hidayat, R. (2023). Initial study of curcumin extraction from turmeric as an indicator for basic solution detector. *AIP Conference Proceedings*, 2538(1), 050004. <https://doi.org/10.1063/5.0115465>
- Melo, N. J., Soares, J. M., Dovigo, L. N., Carmona-Vargas, C., Aguiar, A. S. N., dos Passos, A. C., de Oliveira, K. T., Bagnato, V. S., Dias, L. D., & Inada, N. (2024). Photodynamic action of synthetic curcuminoids against *Staphylococcus aureus*: Experimental and computational evaluation. *Chemistry*, 6(4), 581–600. <https://doi.org/10.3390/chemistry6040036>
- Moussawi, R. N., & Patra, D. (2016). Modification of nanostructured ZnO surfaces with curcumin: fluorescence-based sensing for arsenic and improving arsenic removal by ZnO. *RSC Advances*, 6, 17256-17268. <https://doi.org/10.1039/C5RA20221C>

- Onah, E. H., Lethole, N. L., & Mukumba, P. (2024). Luminescent Materials for Dye-Sensitized Solar Cells: Advances and Directions. *Applied Sciences*, 14(20), 9202. <https://doi.org/10.3390/app14209202>
- Prajapat, K., Mahajan, U., Dhonde, M., Sahu, K., Sakthivel, P., Vyas, S., & Shirage, P. M. (2025). Anthocyanin-sensitized Cu-doped TiO₂ nanoparticles for efficient and sustainable dye-sensitized solar cells. *Materials Advances*, 6, 2371–2384. <https://doi.org/10.1039/D4MA01297F>
- Rani, S., Mishra, S., Sharma, M., Nandy, A., & Mozumdar, S. (2020). Solubility and stability enhancement of curcumin in Soluplus® polymeric micelles: a spectroscopic study. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 41(4), 523–536. <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1592687>
- Sajan, D., Joseph, L., Vijayan, N., & Karabacak. M. (2011). Natural bond orbital analysis, electronic structure, non-linear properties and vibrational spectral analysis of l-histidinium bromide monohydrate: A density functional theory. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 81(1), 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.05.052>
- Sharma, G., Dawo, C., Kumawat, U. K., Saini, S. K., Singhal, R. K., & Lal, C. (2023). Revealing the relaxation kinetics of curcumin based dye-sensitized solar cell. *Materials Science and Engineering: B*, 298, 116905. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116905>
- Subhan, M. A., Alam, K., Rahaman, M. S., Rahman, M. A., & Awal, R. (2013). Synthesis and Characterization of Metal Complexes Containing Curcumin (C₂₁H₂₀O₆) and Study of their Anti-microbial Activities and DNA-binding Properties. *Journal of Scientific Research*, 6(1), 97–109. <https://doi.org/10.3329/jsr.v6i1.15381>
- Sung, H. K., Lee, Y., Kim, W. H., Lee, S.-J., Sung, S.-J., Kim, D.-H., & Han, Y. S. (2020). Enhanced Power Conversion Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells by Band Edge Shift of TiO₂ Photoanode. *Molecules*, 25(7), 1502. <https://doi.org/10.3390/molecules25071502>
- Wang, X., Shen, C., Li, J., Zhang, M., & Song, P. (2023). Control and regulation of the performance of fullerene-based dye-sensitized solar cells with a D–D–A structure by external electric fields. *Nanoscale Advances*, 5, 3267–3278. <https://doi.org/10.1039/D3NA00115F>