

วัสดุประกอบ Fe_3O_4 ร่วมถ่านกัมมันต์สำหรับขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดที่ปราศจากแพลทินัม สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

Fe_3O_4 -Activated Carbon Composites as a Pt-free Counter Electrode

Materials for Dye-Sensitized Solar Cell

ยุวดี ประภาวสิทธิ์ (Yuwadee Prapawasit)* ภูรินัฐ เหมนิล (Phurinat Hemnil)*

ดร.วรินทร์ไพ เศรษฐ์ธณบุตร (Dr.Varinrumpai Seithtanabutara)^{1**}

(Received: April 18, 2023; Revised: June 12, 2023; Accepted: June 13, 2023)

บทคัดย่อ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงได้รับความสนใจเนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้วัสดุประกอบถ่านกัมมันต์ร่วมกับแมกนีไทต์เป็นขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด โดยได้ทำการสังเคราะห์แมกนีไทต์ด้วยวิธีตกตะกอนร่วมความร้อน จากนั้นจะถ่วงน้ำหนักมาผสมกับถ่านกัมมันต์ในสัดส่วนโดยน้ำหนักที่หนึ่งต่อหนึ่ง วัสดุที่เตรียมได้จะถูกตรวจสอบคุณลักษณะต่างๆด้วยเครื่อง XRD, SEM/EDX, BET, FTIR, UV-VIS พบว่า แมกนีไทต์ที่สังเคราะห์ได้นี้มีความสามารถในการดูดกลืนแสงทั้งในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงแสงที่ตามองเห็น มีค่าแถบช่องว่างของพลังงานเท่ากับ 2.23 eV การใช้วัสดุประกอบถ่านกัมมันต์ร่วมกับแมกนีไทต์เป็นขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์เท่ากับ 2.32% ซึ่งมากกว่าการใช้แพลทินัมที่ให้ค่า 2.20% วัสดุประกอบถ่านกัมมันต์ร่วมกับแมกนีไทต์จึงเป็นวัสดุทางเลือกวัสดุทดแทนการใช้แพลทินัม เนื่องจากมีราคาถูก สังเคราะห์ได้ง่าย โดยสามารถนำไปพัฒนาต่อในการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของแมกนีไทต์ต่อถ่านกัมมันต์ให้มีประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงดีขึ้นได้

ABSTRACT

Solar energy is a renewable alternative that is favorable to the environment. Due to their lower manufacturing costs than silicon solar cells, dye-sensitized solar cells (DSSC) have attracted attention. This study aimed to determine the efficiency of DSSC using activated carbon (AC) composite material combined with magnetite (Fe_3O_4) as the counter electrode (CE). Co-precipitation was used to synthesize magnetite, which was then mixed with AC in a 1:1 weight ratio. The material was characterized using XRD, SEM/EDX, BET, FTIR, and UV-VIS. It has been observed that synthesized magnetite has the ability to absorb both ultraviolet and visible light with a band gap energy of 2.23 eV. Using an activated carbon composite with magnetite composite (Fe_3O_4 -AC) as a CE resulted in a cell efficiency of 2.32%, which was higher than when platinum (Pt) was used, which resulted in only 2.20%. Because it is inexpensive and simple to synthesize, activated carbon composite material with magnetite can serve as a substitute for Pt. It can be further developed to alter the ratio of Fe_3O_4 to AC to improve DSSC performance.

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง วัสดุประกอบถ่านกัมมันต์แมกนีไทต์ ขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด

Keywords: DSSC, Fe_3O_4 -AC composite, CE

¹Corresponding author: tmallicka@kku.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Student, Master of Engineering, Program in Energy Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

บทนำ

ปัจจุบันวิกฤตด้านพลังงานเกิดขึ้นทั่วโลกเนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณลดลงและการผลิตพลังงานแบบดั้งเดิมยังคงใช้งานอย่างแพร่หลายเพื่อตอบสนองความต้องการด้านการใช้เทคโนโลยีและการดำรงชีวิต ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อแก้ปัญหาเสถียรภาพทางด้านพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้ลดลง การเลือกใช้พลังงานหมุนเวียนมาผลิตไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ในบรรดาแหล่งพลังงานหมุนเวียนทั้งหมด การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้รับความสนใจมากขึ้นโดยเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells: DSSC) เนื่องจากมีความเสถียรในการใช้สำหรับสภาพอากาศในเขตร้อน ต้นทุนต่ำ ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ ไม่ต้องบำรุงรักษา และไม่ต้องใช้พื้นที่เฉพาะสำหรับการติดตั้ง ไม่เหมือนกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน [1-2] DSSC สามารถใช้ทดแทนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนทั่วไปเนื่องจากสามารถติดตั้งในอาคารเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้แสงสว่างในห้อง [3] ซึ่ง DSSC มีองค์ประกอบหลักคือ กระจกนำไฟฟ้า ขั้วโฟโตอิเล็กโทรด (Photoelectrode: PE) สีย้อมไวแสง (Dye sensitized) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และ ขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (Counter electrode: CE) ซึ่งหลักการทำงานคือ เมื่อแสงส่องกระทบ PE แสงจะกระตุ้นอิเล็กตรอนในสีย้อมให้เคลื่อนที่ไปยังโลหะกึ่งตัวนำของ PE และเคลื่อนที่ไปยังกระจกนำไฟฟ้า เมื่อต่อครบวงจรอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังกระจกด้าน CE และเคลื่อนที่ไปยังแพลทินัม (Platinum: Pt) และอิเล็กโทรไลต์จะทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนกลับไปสู่อิเล็กโทรด ซึ่งกลไกจะดำเนินไปเรื่อยๆ เมื่อมีแสงมาตกกระทบ [4]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าแมกนีไทต์ (Magnetite: Fe_3O_4) ที่เป็นวัสดุทรานซิชัน มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก ที่มีความสามารถในการส่งถ่ายอิเล็กตรอนได้ และยังมีแถบช่องว่างพลังงานแคบทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ง่าย สามารถเตรียมได้ง่าย ต้นทุนต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ทั้งยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst) ในกระบวนการต่างๆ และเหมาะสมแก่การนำมาใช้เป็น CE เนื่องจากให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด (8.56%) ซึ่งสูงกว่าค่า Pt ที่นิยมใช้เป็น CE (7.57%) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าสูง ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการแทนที่ CE ที่ใช้ Pt แบบเดิมใน DSSC [5] วัสดุ Fe_3O_4 ถูกสังเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น ไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal) โซลโวเทอร์มัล (Solvothermal) การสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition) โซลเจล (Sol-gel) และการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) เป็นต้น ดังเช่น ได้มีการสังเคราะห์ Fe_3O_4 ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล จากรายงาน Fe_3O_4 มีช่องว่างของแถบพลังงานที่ค่อนข้างแคบ (~1.6 eV) ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นจุดที่มีการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนอีกครั้ง และอาจส่งผลให้ปฏิกิริยาลดลงได้ [6] ดังนั้น Fe_3O_4 จึงไม่สามารถใช้ตัวพาประจุสำหรับการรับส่งอิเล็กตรอนที่พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาในระหว่างปฏิกิริยาเชิงแสง นอกจากนี้ ยังได้มีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานำไฟฟ้า Fe_3O_4 ที่มีโครงสร้างพิเศษแบบแผ่นรูพรุนขนาดกลาง และ แบบดอกไม้วุ้นรูพรุนหลุมขนาดกลาง เพื่อใช้เป็น CE สำหรับ DSSC พบว่า ได้ค่าประสิทธิภาพเป็น 6.39% และ 8.83% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าการใช้ Pt ที่ให้ค่าเป็น 7.86% [7]

วัสดุคาร์บอนเป็นวัสดุที่ช่วยส่งเสริมความว่องไวให้กับขั้วได้ เพราะคาร์บอนที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า มีโครงสร้างเป็นแกรไฟต์ มีลักษณะเป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวในการบรรจุอิเล็กตรอนได้มาก เมื่อเก็บอิเล็กตรอนได้เยอะก็ส่งผลให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้มีรายงานการเตรียมถ่านกัมมันต์ (Activated carbon: AC) ต่างๆ ได้แก่ AC จากกะลามะพร้าว AC จากไม้สน และ AC จากถ่านหิน เพื่อใช้เป็น CE สำหรับ DSSC ทดแทนการใช้ Pt พบว่า การใช้ Pt เป็น CE ให้ค่าประสิทธิภาพเป็น 7.2% ในขณะที่การใช้ CE เป็น AC จากถ่านหิน จะให้ค่าประสิทธิภาพที่ต่ำเป็น 4.17% การใช้ CE เป็น AC จากไม้สน และ AC จากกะลามะพร้าว จะให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงขึ้นเป็น 6.21% และ 5.90% ตามลำดับ [8] นอกจากนี้ จากการเตรียม AC จากกะลามะพร้าวที่กระตุ้นด้วย K_2CO_3 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ในเอทานอลที่สัดส่วน โดยน้ำหนักของ AC จากกะลามะพร้าว: $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ที่สัดส่วน

ต่างๆ เมื่อนำมาใช้เป็น CE สำหรับ DSSC พบว่า การใช้สัดส่วน AC จากกะลามะพร้าว: $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ เป็น 4:1 จะให้ประสิทธิภาพ DSSC สูงกว่าสัดส่วนอื่นๆ เป็น 1.24% [9] จากการผลิต AC จากกะลามะพร้าว ด้วยการเผากะลามะพร้าวที่ 900 °C พบว่าการใช้ CE เป็น AC จากกะลามะพร้าว ให้ค่าประสิทธิภาพสูงถึง 7.85% [10] มากกว่าวัสดุ AC อื่นๆ ที่เคยรายงานมา และยังมีรายงานการเตรียมวัสดุประกอบ AC รวมไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับการใช้เป็น CE ของ DSSC ทดแทนการใช้ Pt พบว่า ประสิทธิภาพของ DSSC ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ AC ที่ใช้ ทั้งนี้ ปริมาณที่เหมาะสมคือ 10% จะให้ ค่าประสิทธิภาพ DSSC เป็น 6.04% ซึ่งมีค่าเทียบเท่าการใช้ Pt เป็น CE ที่ให้ค่าประสิทธิภาพของ DSSC เป็น 7.0% [11]

ดังนั้นจึงได้มีการเตรียมวัสดุประกอบรวม Fe_3O_4 กับวัสดุคาร์บอนเพื่อใช้เป็น CE ของ DSSC เป็นการส่งเสริมประสิทธิภาพการแปลงผันแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีขึ้น ซึ่งมีหลายเทคนิคที่ใช้ ได้แก่ การผสมเชิงกล (Mechanical mixing) โซลเจล (Sol-gel) การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) การดูดซับทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic adsorption) การปั่นด้วยไฟฟ้า (Electrospinning) การสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition) การผสมแบบแห้ง (Dry mixing) การผสมแบบเปียก (Wet mixing) ดังเช่น การเตรียมวัสดุประกอบ Fe_3O_4 -คาร์บอนแบล็ค (Carbon black: CB) ที่สัดส่วนต่างๆ โดยน้ำหนัก (1:1 1:2 และ 2:1) เพื่อใช้เป็น CE แทน Pt พบว่า การใช้วัสดุประกอบนี้ที่มีสัดส่วนของ Fe_3O_4 -CB เป็น 1:2 ให้ประสิทธิภาพดีสุดเป็น 6.1% ในขณะที่ การใช้วัสดุ Pt ให้ประสิทธิภาพเพียง 4.1% [12] วัสดุประกอบ Fe_3O_4 -rGO (reduced graphite oxide) ถูกนำมาใช้เป็น CE สำหรับ DSSC โดยใช้ SnO_2 - TiO_2 เป็น PE พบว่า จะให้ค่าประสิทธิภาพเป็น 1.96% [13] ในทำนองเดียวกัน จากการใช้วัสดุประกอบ Fe_3O_4 @N-rGO เป็น CE สำหรับ DSSC พบว่า ได้ค่าประสิทธิภาพสูงถึง 8.18% ซึ่งมีค่ามากกว่าการใช้ Pt ที่ให้ค่า 7.17% และการใช้ Fe_3O_4 ที่ให้ค่าเพียง 6.85% [7]

แต่ในการศึกษาปัจจุบันได้เลือกใช้ AC มีโครงสร้างรูพรุนที่ดีที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามสภาวะกระบวนการและผลิตได้จากวัสดุประเภทคาร์บอนที่เป็นภาคเกษตรกรรม ที่ถึงแม้ AC จะมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่า CB แต่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่าทำให้มีความสามารถในการรองรับ Fe_3O_4 และดูดซับอิเล็กโทรไลต์ได้ดีกว่า ดังนั้น จึงเลือกใช้สัดส่วน Fe_3O_4 -AC ที่ 1:1 เพื่อประเมินประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของ DSSC เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาวัสดุขั้ว CE ที่ใช้ AC เป็นวัสดุรวม ซึ่งไม่เคยมีรายงานก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการใช้วัสดุประกอบ Fe_3O_4 -AC นี้เป็นวัสดุขั้ว CE ของ DSSC ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ Fe_3O_4 ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมเพราะ เป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน สามารถควบคุมสภาวะกระบวนการได้ง่าย ใช้ระยะเวลาสั้น และประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับวิธีอื่น แล้วจึงได้เตรียมเป็นวัสดุประกอบร่วมกับ AC ด้วยวิธีผสมแบบเปียก เนื่องจากต้องการควบคุมปริมาณสัดส่วนผสมระหว่าง Fe_3O_4 ต่อ AC ให้แม่นยำ โดยใช้เทคนิค sonication ช่วยในการกวน เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุขั้ว CE ของ DSSC

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อสังเคราะห์ Fe_3O_4 ด้วยวิธีตกตะกอนร่วมความร้อนและเตรียมวัสดุประกอบ Fe_3O_4 -AC สำหรับประยุกต์ใช้เป็นขั้ว CE ของ DSSC พร้อมทั้งตรวจสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

วิธีการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ เฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ไอร์รอน (II) คลอไรด์เตตระไฮเดรต ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) กระจกนำไฟฟ้า (Fluorine-doped tin oxide: FTO) ไทเทเนียมดีสเพอร์ซัน (TiO_2 paste) อิเล็กโทรไลต์ (EL-HPE high performance electrolyte) และ สีย้อมมาตรฐาน N-719 ได้จัดซื้อจากห้างหุ้นส่วนจำกัดพายนชาย

ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เอทานอล (C₂H₅OH) AC เชิงการค้า ได้จัดซื้อจากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอส พี ไซน์

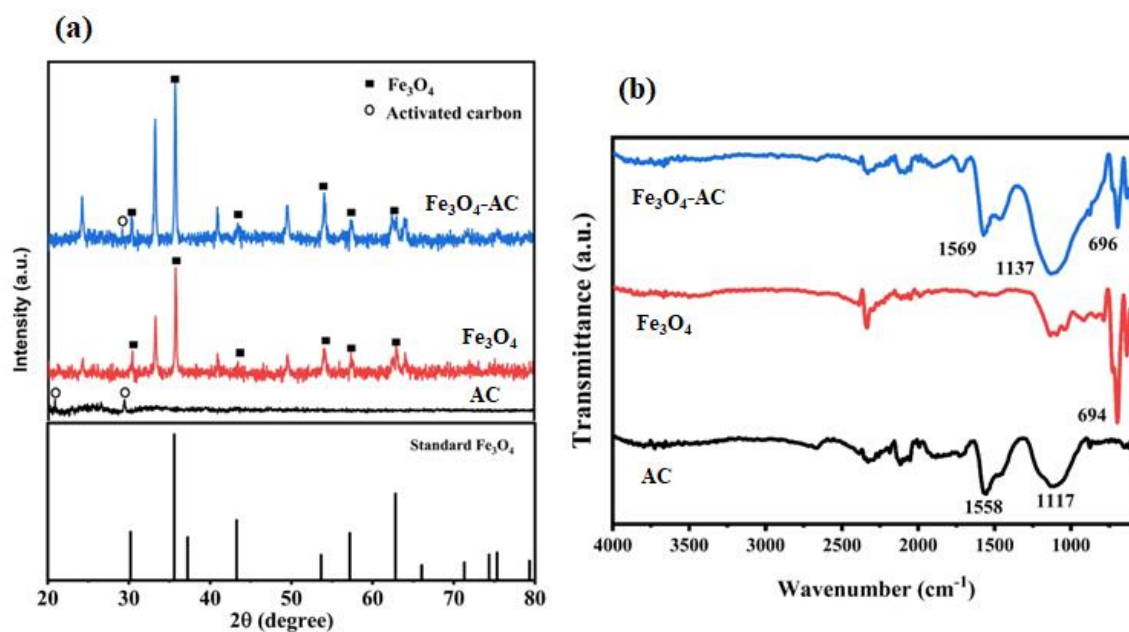
วิธีการตกตะกอนร่วมความร้อนถูกใช้ในการสังเคราะห์ Fe₃O₄ มีขั้นตอนเริ่มต้นด้วยนำสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต 1.622 กรัม และสารละลายไอร์ออน (II) คลอไรด์เตตระไฮเดรต 0.597 กรัม ละลายในน้ำกำจัดไอออน ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (24 มิลลิโมล/ลิตร) ผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ล้างด้วยเอทานอลและน้ำกำจัดไอออน (2-3 ครั้ง) และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ตะกอน Fe₃O₄ ที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ จากนั้นจำใช้เทคนิคการผสมแบบเปียกสำหรับเตรียมวัสดุประกอบ Fe₃O₄-AC ด้วยการผสม Fe₃O₄ กับ AC ในสัดส่วนโดยน้ำหนัก 1:1 กรัม ในเอทานอล ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ภายใต้คลื่นอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัสดุที่สังเคราะห์ได้จะถูกวิเคราะห์สมบัติโครงสร้างของผลึกด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ Panalytical รุ่น empyrean วิเคราะห์โครงสร้างเคมีของวัสดุด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ BRUKER รุ่น ALPHA-II วิเคราะห์โครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุด้วยเครื่อง Surface area and porosity analyzer (BET) ยี่ห้อ ASAP-2460 วิเคราะห์การดูดกลืนแสงและแถบช่องว่างของพลังงานด้วยเครื่อง UV – VIS – NIR Spectrophotometer (UV-VIS) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UV-3101PC วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของสาร (Morphology) และวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเชิงปริมาณด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-ray Techniques (SEM/EDX) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น SU3800 ซึ่งการวิเคราะห์ขนาดผลึก (Crystallite size) จากผลของ XRD สามารถคำนวณโดยใช้วิธีการของ Debye–Scherrer ดังความสัมพันธ์ $\gamma = K\lambda/\beta\cos\theta$ เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (1.5418 Å) β คือ ความกว้างเต็มที่สูงสุดครึ่งหนึ่ง (FWHM) ในหน่วยเรเดียน K คือ ปัจจัยรูปร่าง (ปกติคือ 0.89) และ θ คือ มุมแบรกก์

กระจกนำไฟฟ้าถูกนำมาตัดให้มีขนาด 2 × 3 ตารางเซนติเมตร จากนั้นด้านที่นำไฟฟ้าจะถูกเคลือบด้วย TiO₂ paste เพื่อใช้เป็นขั้ว PE ส่วนขั้ว CE จะเตรียมขึ้นสามชนิดคือโดยการเคลือบกระจกด้วยวัสดุ AC Fe₃O₄ และ Fe₃O₄-AC ในการเคลือบทั้งหมดนี้จะใช้เทคนิค Doctor blade (DB) จากนั้น กระจกที่เคลือบแล้วจะถูกนำไปอบที่ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นในการเตรียมขั้ว PE กระจกที่เคลือบที่ได้จะถูกนำไปแช่สีย้อมมาตรฐาน N-719 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ความเข้มข้นสีย้อมในเอทานอลเป็น 0.2 มิลลิโมลาร์ สำหรับการประกอบเซลล์ ขั้ว PE จะถูกประกบกับ CE โดยใช้พาราฟิล์มที่ตัดช่องตรงกลาง จากนั้นเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วหนีบด้วยคลิปให้แน่นทั้งสองด้าน จากนั้นวิเคราะห์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar simulator, AM1.5, 100 mW/cm²), โดยพื้นที่ทำงาน (Active area) เป็น 1 ตารางเซนติเมตร และคำนวณประสิทธิภาพได้จาก $\eta = V_{oc} \times I_{sc} \times FF / P_{in}$ เมื่อ V_{oc} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อทำการเปิดวงจร (V) I_{sc} คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเมื่อลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (mA/cm²) P_{in} คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (mW/cm²) และ FF คือ ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ ซึ่งค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (FF) คือ การวัดประสิทธิภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ส่งพลังงานไปยังแผงโซลาร์เซลล์ ว่าสามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานได้ดีมากน้อยเพียงใด เพื่อให้เข้าใจว่าแหล่งพลังงานนี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งคำนวณได้จาก $FF = V_{max} \times I_{max} / V_{oc} \times I_{sc}$ เมื่อ V_{max} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุด (V) I_{max} คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุด (mA/cm²)

ผลการวิจัยและอภิปราย

ลักษณะโครงสร้างผลึก อณูฐานวิทยา องค์ประกอบของธาตุ และ โครงสร้างรูพรุน

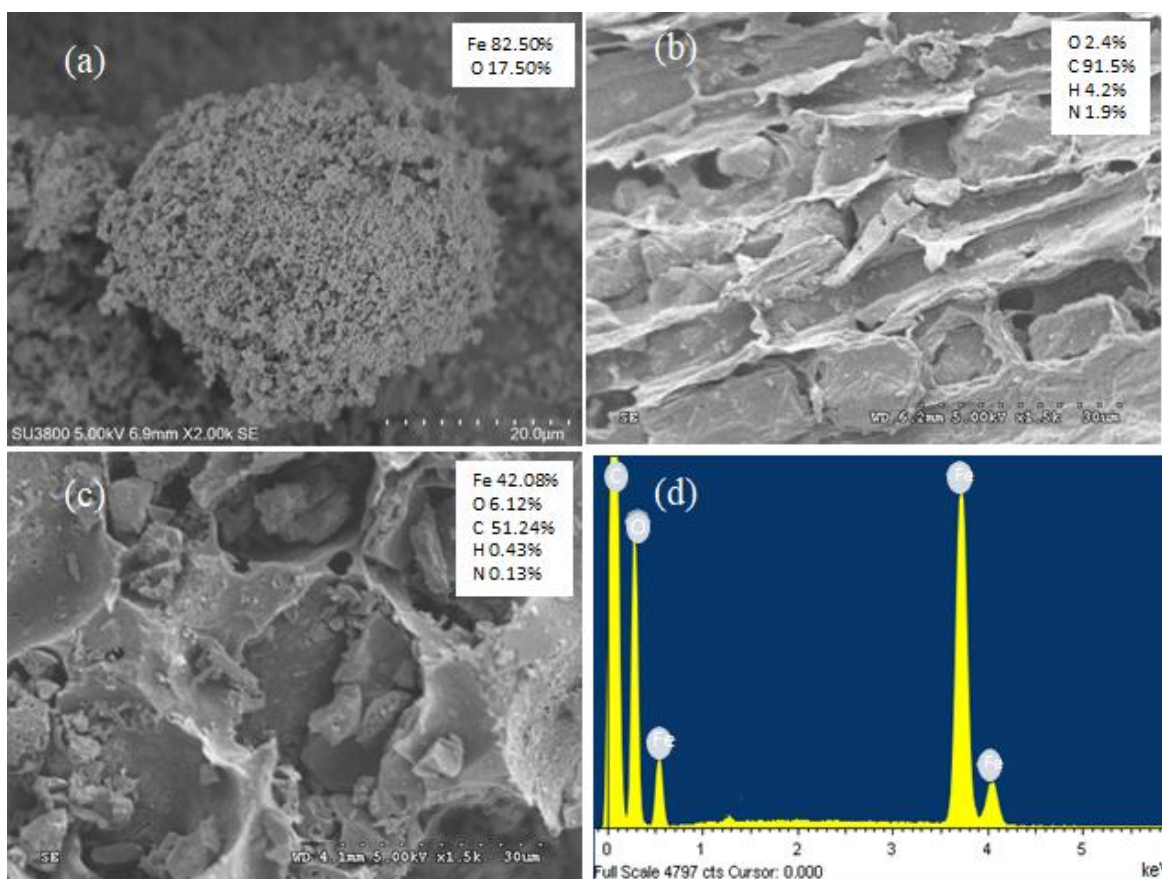
ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างผลึกของวัสดุแสดงดังภาพที่ 1(a) พบว่า AC มีความสูงของพิกที่ต่ำ ซึ่งบ่งบอกได้ว่ามีความผลึกน้อย โดยพบพิกที่มุม $2\theta = 20.83^\circ$ และ 29.25° ตามลำดับ บ่งบอกโครงสร้างอะมอร์ฟัส ส่วน Fe_3O_4 ที่สังเคราะห์ด้วยการตกตะกอนร่วมความร้อน พบโครงสร้างผลึกเดี่ยวสปิเนล (single crystal spinel structure) ที่คมชัดแสดงว่ามีความเป็นผลึกมากซึ่งสอดคล้องกับ JCPDS No. 19-0629 โดยมีพิกที่มุม $2\theta = 30.30^\circ, 35.68^\circ, 43.38^\circ, 54.09^\circ, 57.34^\circ$, และ 63.01° ซึ่งโครงสร้างผลึกที่ได้มีความสอดคล้องกับรายงานที่เกี่ยวข้อง [14] ในส่วนของ Fe_3O_4 -AC พบโครงสร้างผลึกของ Fe_3O_4 และโครงสร้างผลึกของ AC ในตำแหน่งพิกที่ตรงกัน ซึ่งให้เห็นว่าอนุภาค Fe_3O_4 ที่ปรากฏอยู่บนอนุภาคของ AC มีความเป็นผลึก โดยมีพิกที่มุม $2\theta = 29.12^\circ, 30.36^\circ, 35.76^\circ, 43.54^\circ, 54.15^\circ, 57.48^\circ$, และ 63.01° และจากภาพที่ 1(b) แสดง FTIR spectra ของ AC พบแถบกว้างที่ 1558 cm^{-1} เป็นกลุ่มฟังก์ชันของ C=O และแถบกว้างที่ 1117 cm^{-1} เป็นกลุ่มฟังก์ชันของ C-O ส่วน FTIR spectra ของ Fe_3O_4 แสดงแถบกว้างที่ 694 cm^{-1} เป็นกลุ่มฟังก์ชันของ Fe-O และ FTIR spectra ของ Fe_3O_4 -AC แสดงแถบกว้างที่ 1569 cm^{-1} เป็นกลุ่มฟังก์ชันของ C=O แถบกว้างที่ 1137 cm^{-1} เป็นกลุ่มฟังก์ชันของ C-O และแถบกว้างที่ 696 cm^{-1} เป็นกลุ่มฟังก์ชันของ Fe-O บ่งบอกได้ว่า Fe_3O_4 -AC มีกลุ่มฟังก์ชันของทั้งสองวัสดุรวมกัน



ภาพที่ 1 (a) โครงสร้างผลึกของวัสดุ และ (b) FTIR spectra ของวัสดุ

ลักษณะของอนุภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ของ Fe_3O_4 ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมความร้อน (ภาพที่ 2a) มีลักษณะของอนุภาคเป็นทรงกลมที่มีขนาดเล็กเกาะกันอยู่และมีลักษณะขนาดเล็กระดับนาโน และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ Fe_3O_4 ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมความร้อน พบองค์ประกอบของธาตุ Fe เป็น 82.5wt. และ O เป็น 17.5wt. ซึ่งคิดเป็นองค์ประกอบของธาตุ Fe เป็น 57.46%atom และ O เป็น 42.54%atom ซึ่งเมื่อคำนวณสัดส่วนสัดส่วนเชิงอะตอมของ Fe/O atomic ratio พบว่ามีค่า $= 57.46/42.54 = 1.35$ ซึ่งไม่สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนอะตอม Fe ต่อ O ที่ถูกต้องของสารประกอบ Fe_3O_4 ที่ควรมีค่า

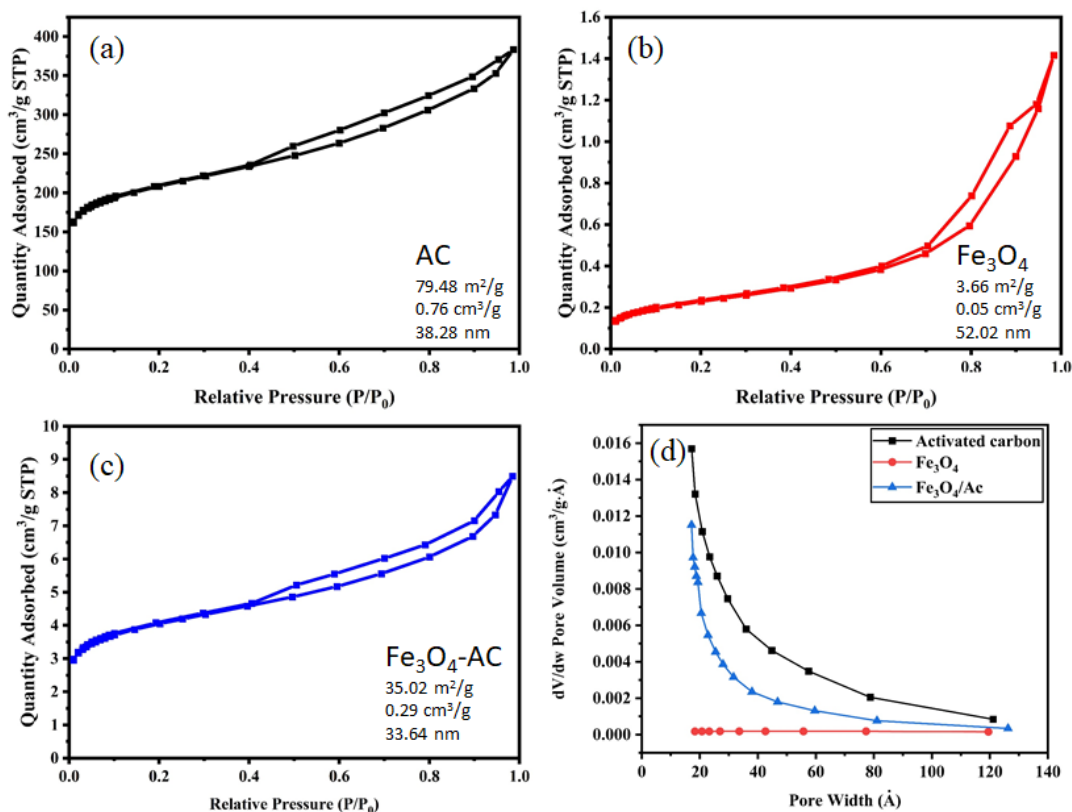
$=3/4=0.75$ อาจเป็นไปได้สำหรับอัตราส่วนอะตอม Fe ต่อ O ที่มากกว่า 1 ใน Fe_3O_4 คือการมีอยู่ของออกซิเจน (the presence of oxygen vacancies) หรืออะตอมเหล็กคั่นระหว่างหน้าภายในตาข่าย (interstitial iron atoms within the lattice) แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ XRD เป็นการยืนยันว่าโครงสร้างผลึก Fe_3O_4 ของวัสดุที่สังเคราะห์ได้ และยืนยันด้วยผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและพันธะภายในวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นหลักฐานเพิ่มเติมของเฟส Fe_3O_4 จากการวิเคราะห์ขนาดผลึก (Crystallite size) จากผลของ XRD สามารถคำนวณโดยใช้วิธีการของ Debye-Scherrer จะได้ขนาดผลึกของวัสดุ AC และ Fe_3O_4 เป็น 5.39 และ 23.56 nm ตามลำดับ ส่วนวัสดุประกอบ Fe_3O_4 -AC จะมีขนาดผลึกเป็น 27.09 nm เมื่อวิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1500 เท่าของ AC (ภาพที่ 2b) จะเห็นได้ว่ามี AC มีพื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนอยู่มาก และวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุพบ O เป็น 2.4%wt C เป็น 91.5%wt H เป็น 4.2%wt และ N เป็น 1.9%wt ส่วน Fe_3O_4 -AC ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (ภาพที่ 2c) จะเห็นได้ว่าวัสดุประกอบพบอนุภาคของ Fe_3O_4 เข้าไปแทรกอยู่ในรูพรุนหรือเกาะอยู่บนพื้นผิวของ AC และวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (ภาพที่ 2d) พบ Fe เป็น 42.08%wt O เป็น 6.12%wt C เป็น 51.24%wt H เป็น 0.43%wt และ N เป็น 0.13%wt



ภาพที่ 2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาค (a) Fe_3O_4 (b) AC (c) Fe_3O_4 -AC และ (d) EDX spectra ของ Fe_3O_4 -AC

จากไอโซเทอร์มของการดูดซับไนโตรเจนของวัสดุและ BJH pore size distribution แสดงดังภาพที่ 3 พบว่าเป็นไอโซเทอมแบบ IV ตาม IUPAC classification โดย AC มีความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนได้สูงกว่าวัสดุอื่น ซึ่งเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากและมีปริมาตรรูพรุนสูง ส่วน Fe_3O_4 มีพื้นที่ผิวของวัสดุน้อยกว่าวัสดุอื่น มีปริมาตรของรูพรุนต่ำและมีขนาดของรูพรุนใหญ่ ทำให้สามารถดูดซับไนโตรเจนได้น้อย และในส่วน of วัสดุ Fe_3O_4 -AC มีพื้นที่ผิวของ

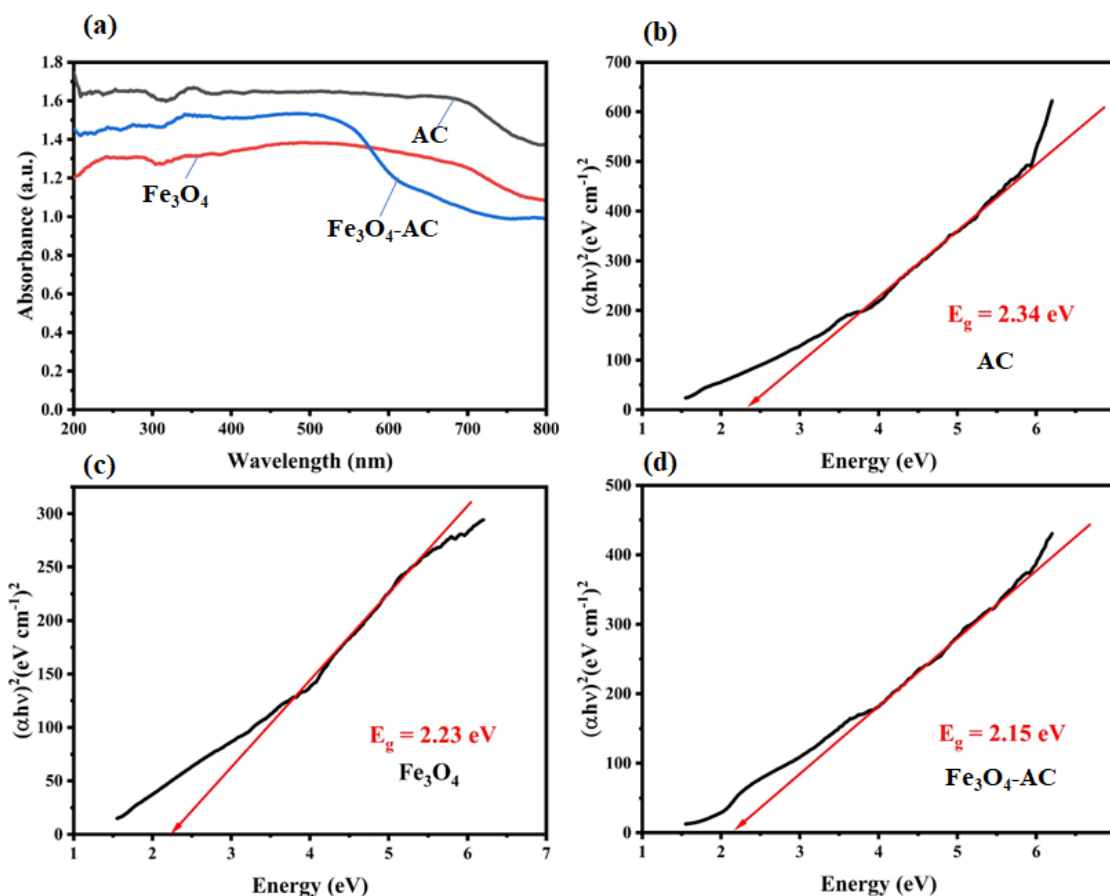
วัสดุที่มีปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุน มีค่ากึ่งกลางระหว่างทั้งสองวัสดุ ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนที่มากกว่า Fe_3O_4 แต่น้อยกว่า AC



ภาพที่ 3 ไอโซเทอร์มการดูดซับคายซับไนโตรเจนของวัสดุ (a) AC (b) Fe_3O_4 (c) $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC}$ และ (d) BJH pore size distribution

ความสามารถในการดูดกลืนแสงและประสิทธิภาพของ DSSC

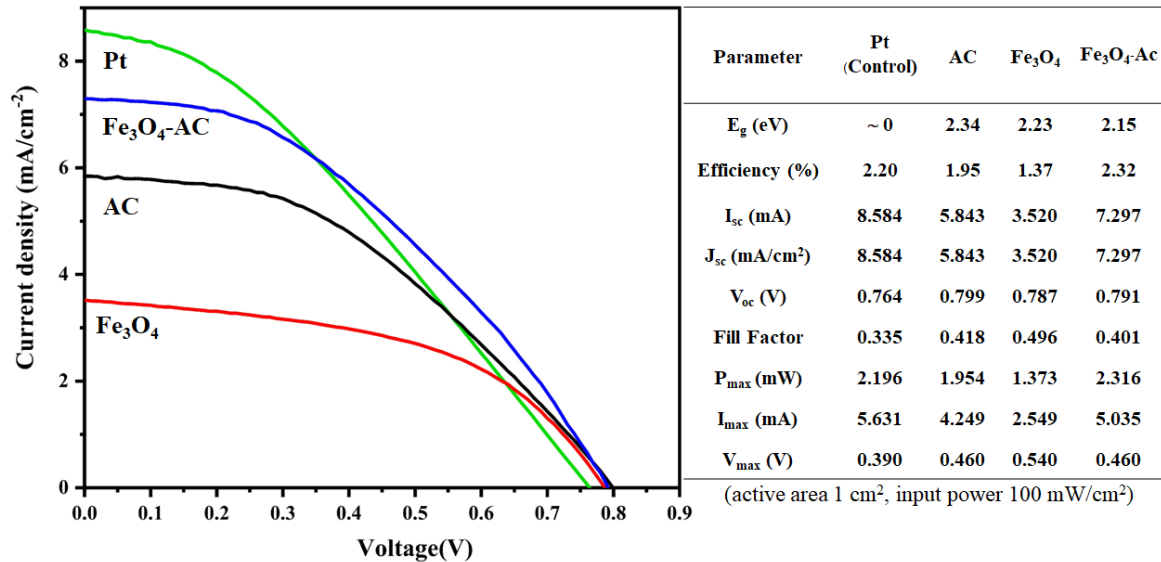
จากการวิเคราะห์ผลการดูดกลืนแสงของวัสดุ แสดงดังภาพที่ 4a พบว่า AC มีความสามารถในการดูดกลืนแสงมากกว่าวัสดุอื่น โดยสามารถดูดกลืนแสงได้ทั้งช่วงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet: UV) และช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible light) ส่วน Fe_3O_4 มีสามารถดูดกลืนแสงทั้งช่วง UV และช่วงแสงที่ตามองเห็น แต่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงต่ำกว่า AC ส่วน $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC}$ สามารถดูดกลืนแสงได้ทั้งสองช่วง แต่ช่วงแสงที่ตามองเห็นได้มีความสามารถในการดูดกลืนแสงลดลง เนื่องจากการผสม Fe_3O_4 และ AC ทำให้ได้ $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC}$ ซึ่งเป็น AC แม่เหล็กซึ่งสามารถดูดซับแสงในช่วงความยาวคลื่นที่หลากหลาย ทั้งนี้ส่วนประกอบของ AC ของวัสดุประกอบจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการดูดซับแสง ส่งเสริมการกระตุ้นของอิเล็กตรอนภายในวัสดุ การกระตุ้นนี้จะสร้างตัวพาประจุ เช่น อิเล็กตรอนและรูอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ในการตอบสนองต่อแสงที่ตามมา การถ่ายโอนประจุนี้จะปรับเปลี่ยนโครงสร้างแถบช่องว่างและระดับพลังงานทำให้แถบช่องว่างพลังงานของวัสดุประกอบมีค่าลดลง เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดีกว่า Fe_3O_4 และ AC ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ใช้ AC แม่เหล็กนี้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสำหรับการกำจัดมลพิษ ในรายงานนี้ $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC}$ จึงถูกเลือกใช้เป็น CE ของ DSSC



ภาพที่ 4 (a) ความสามารถในการดูดกลืนแสงของวัสดุและแถบช่องว่างพลังงาน (b) AC (c) Fe_3O_4 และ (d) $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC}$

จากการคำนวณค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy: E_g) ของวัสดุโดยใช้วิธี Tauc plot พบว่า AC (ภาพที่ 4b) มีช่องว่างของแถบพลังงานเท่ากับ 2.34 eV ซึ่งมากกว่า Fe_3O_4 (ภาพที่ 4c) มีช่องว่างของแถบพลังงานเท่ากับ 2.23 eV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ใกล้เคียงกัน [15] (ค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.22 eV) และ $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC}$ (ภาพที่ 4d) ให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานที่ต่ำกว่าทั้งสองวัสดุ โดยมีช่องว่างของแถบพลังงานเท่ากับ 2.15 eV แสดงได้ว่าวัสดุมีความว่องไวในปฏิกิริยา รายงานนี้ พบว่า ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC} < \text{Fe}_3\text{O}_4 < \text{AC}$ ซึ่ง CE ที่มีช่องว่างแถบพลังงานต่ำจะนำไปสู่ประสิทธิภาพ DSSC โดยรวมให้ดีขึ้นได้ เนื่องจาก จะช่วยลดการสูญเสียแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นการแตกต่างของพลังงานระหว่างแถบช่องว่างและศักย์รีดอกซ์ของอิเล็กโทรไลต์ จึงสามารถช่วยให้เกิดจลนพลศาสตร์ของการถ่ายโอนประจุที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นที่ขอบเขตรอยต่อของขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ (electrode-electrolyte interface) ซึ่งช่องว่างของแถบพลังงานที่ต่ำกว่าช่วยให้มั่นใจได้ถึงการจัดแนวที่ใกล้ชิดยิ่งขึ้นระหว่างระดับพลังงานของโมเลกุลสีย้อมและคูรีดอกซ์ของอิเล็กโทรไลต์จะทำให้สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากสีย้อมไปยังขั้ว CE ได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงช่วยลดการรวมตัวกันของประจุและเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนประจุโดยรวม นอกจากนี้ยังส่งเสริมให้มีค่า FF ของเซลล์สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อตรวจสอบประสิทธิภาพ DSSC ที่มีการใช้วัสดุเหล่านี้เป็นขั้ว CE พบว่าจะมีค่าเรียงลำดับจากมากไปน้อยเป็น $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC} > \text{AC} > \text{Fe}_3\text{O}_4$ ทั้งนี้ อาจเป็นสาเหตุจาก AC มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า Fe_3O_4 ทำให้มีความสามารถในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนอย่างมีประสิทธิภาพได้ดีกว่าที่ขอบเขตรอยต่อของขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ อีกทั้ง AC สามารถเร่งปฏิกิริยาที่รีดอกซ์ที่เกิดขึ้นที่แคโทดอิเล็กโทรดได้ดีกว่า ทำให้เกิดการสร้างสีย้อมออกซิไดซ์ขึ้นใหม่โดยการรับอิเล็กตรอนจากวงจรภายนอกได้รวดเร็วกว่านำไปสู่การเกิดใหม่ของสีย้อมที่เร็วขึ้นและ

ประสิทธิภาพโดยรวมที่สูงขึ้นนั่นเอง ยิ่งกว่านั้น AC มีพื้นที่ผิวสูงและโครงสร้างที่มีรูพรุนทำให้มีตำแหน่งที่ว่องไวจำนวนมากสำหรับปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นที่แคโทดรีดอกซ์โพลีเมอร์ พื้นที่ผิวและความพรุนที่เพิ่มขึ้นนี้ช่วยให้สามารถเข้าถึงสีย้อมได้ดีขึ้นและเพิ่มพื้นที่ผิวที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งนำไปสู่การถ่ายเทประจุและประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีขึ้น ดังนั้นวัสดุประกอบ $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC}$ จึงรวมข้อดีของทั้งสองวัสดุไว้ในการนำมาใช้กับ CE ที่มีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพ DSSC ของวัสดุ Pt, AC, Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC}$

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของ DSSC ที่ใช้ขั้ว CE ต่างกัน และ ขั้ว PE เป็น TiO_2

CE	PE	เทคนิคการเคลือบ	สีย้อมไวแสง	ความเข้มข้นของสีย้อม	Active area (cm ²)	ประสิทธิภาพ	แหล่งอ้างอิง
AC กะลามะพร้าว	TiO_2	ไม่รายงาน	N-719	0.05 mM	1	1.24	[9]
Pt	TiO_2	SC	N-719	0.5 mM	0.25	4.10	[12]
CB	TiO_2	SC	N-719	0.5 mM	0.25	2.20	[12]
Fe_3O_4	TiO_2	SC	N-719	0.5 mM	0.25	2.10	[12]
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{/CB}$	TiO_2	SC	N-719	0.5 mM	0.25	6.10	[12]
Pt	TiO_2	DB	N-719	ไม่รายงาน	0.25	3.13	[12]
Pt	TiO_2 paste	DB	N-719	0.2 mM	1	2.20	รายงานนี้
AC	TiO_2 paste	DB	N-719	0.2 mM	1	1.95	รายงานนี้
Fe_3O_4	TiO_2 paste	DB	N-719	0.2 mM	1	1.37	รายงานนี้
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC}$	TiO_2 paste	DB	N-719	0.2 mM	1	2.32	รายงานนี้

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ DSSC ภายใต้ความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่า 100 mw/cm^2 โดย DSSC ใช้สีย้อมมาตรฐาน N-719 สารอิเล็กโทรไลต์ทางเคมี ใช้ TiO_2 เป็น PE และใช้ Pt, AC, Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC}$ เป็น CE จะได้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ดังภาพที่ 5 ซึ่งเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าลดลง จะเห็นได้ว่า การใช้ขั้ว CE ที่เป็น AC, Fe_3O_4 และ $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AC}$ จะให้ลักษณะเส้นโค้งคล้ายคลึงกัน ทำให้ได้ค่า V_{oc} ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเมื่อสภาวะเปิดวงจร และค่า I_{sc} หรือกระแส

สูงสุดเมื่อเกิดสภาวะลัดวงจร พบว่า ค่า I_{sc} สูงสุดเมื่อใช้ Pt เป็น CE รองลงมาคือ Fe_3O_4 -AC และ AC และ Fe_3O_4 ซึ่ง I_{sc} จะเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเซลล์ในทางกลับกัน ค่า V_{oc} ของ Fe_3O_4 -AC จะมีค่าสูงสุด ซึ่งจะส่งผลให้มีค่า กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) มากตามไปด้วย ดังนั้น จากข้อมูล I-V curve จะทำให้ทราบกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{max}) และกระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{max}) ดังรายละเอียดข้อมูลที่แจกแจงไว้ ซึ่งพบว่า Fe_3O_4 -AC ให้ค่า P_{max} สูงสุดเป็น 2.316 mW จากการคำนวณค่า FF ที่ได้ จะทำให้ทราบค่าประสิทธิภาพของ DSSC พบว่า Pt ที่ใช้เป็นวัสดุมาตรฐานสำหรับเป็น CE ใน DSSC มีประสิทธิภาพเท่ากับ 2.20% ส่วน AC มีค่าประสิทธิภาพต่ำกว่า Pt ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง โดยมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 1.95% ส่วน Fe_3O_4 ให้ประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ Pt ที่เป็นตัวอ้างอิง โดยมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 1.37% และ Fe_3O_4 -AC ที่มีค่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่มากกว่า Pt ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง โดยมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 2.32% ทั้งนี้ Fe_3O_4 -AC ให้ค่า P_{max} สูงสุดนั่นเอง

ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ DSSC ที่ใช้วัสดุต่างชนิดกันเป็น CE ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้ Pt เพราะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีแถบช่องว่างพลังงาน จึงมีความว่องไวในการรับส่งอิเล็กตรอนสูง เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันได้อย่างรวดเร็ว แต่มีราคาแพง ดังนั้น วัสดุ AC, Fe_3O_4 ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมความร้อน และวัสดุ Fe_3O_4 -AC จึงถูกนำมาใช้เป็น CE จากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่า ค่าแถบช่องว่างของพลังงานของวัสดุที่ใช้เป็น CE มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของ DSSC เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจสอบประสิทธิภาพของ DSSC จากการศึกษา พบว่า การใช้ Pt เป็น CE จะได้ประสิทธิภาพเซลล์เป็น 2.20% ซึ่งมีค่าต่ำกว่ารายงานที่ใกล้เคียงกัน [12-13] ซึ่งอาจเป็นอิทธิพลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมขั้วและการประกอบเซลล์ แต่เมื่อใช้วัสดุ AC เป็น CE จะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพเซลล์เป็น 1.95% ซึ่งต่ำกว่าการใช้วัสดุ Pt ที่ให้ค่า 2.20% เนื่องจาก AC มีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่สูง (2.34 eV) และมีการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่า Pt อย่างไรก็ตามค่าประสิทธิภาพที่ได้รายงานนี้มีค่าสูงกว่าการใช้ AC จากกะลามะพร้าว [9] แต่ก็ยังต่ำกว่าการใช้ CB [12] เมื่อใช้ Fe_3O_4 ที่สังเคราะห์ขึ้นในรายงานนี้จะให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์เท่ากับ 1.37% ซึ่งต่ำกว่าการใช้ CB [12] เพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน อาจจะเนื่องมาจากสมบัติด้านเคมีโครงสร้างของวัสดุที่สังเคราะห์ รวมไปถึงเทคนิคการเคลือบวัสดุลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ความเข้มข้นของสีย้อม พื้นที่ทำงานและกรรมวิธีการประกอบเซลล์ (cell assembly) นั่นเอง จะเห็นได้ว่า การใช้ Fe_3O_4 ให้ค่าต่ำกว่าการใช้ Pt เนื่องจาก Fe_3O_4 มีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่สูง (2.23 eV) เช่นเดียวกับ AC แต่ประสิทธิภาพที่ได้ยังคงต่ำกว่าการใช้วัสดุ AC เนื่องจากอิทธิพลของความสามารถในการนำไฟฟ้านั่นเอง ซึ่งผลการศึกษาข้อนี้สอดคล้องกับการใช้ CB [12] ให้ค่าประสิทธิภาพต่ำกว่าการใช้ Fe_3O_4 เช่นเดียวกัน

เมื่อใช้วัสดุ Fe_3O_4 -AC เป็น CE ในการศึกษาจะได้ค่าประสิทธิภาพเซลล์เพิ่มขึ้นเป็น 2.32% ซึ่งสูงกว่าการใช้การใช้ CB [12] บ่งบอกว่า วัสดุประกอบนี้มีความว่องไวสูงต่อปฏิกิริยารีดอกซ์ เนื่องมาจากวัสดุประกอบ Fe_3O_4 -AC มีค่าแถบช่องว่างที่ลดลง (2.15 eV) จึงส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนได้เร็วขึ้นและทำให้รับส่งอิเล็กตรอนได้ดีขึ้น อีกทั้งเป็นอิทธิพลของโครงสร้างรูพรุนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าสำหรับการรองรับอิเล็กตรอนทำให้เกิดอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้รวดเร็ว ดังนั้นวัสดุประกอบ Fe_3O_4 -AC จึงสามารถที่จะนำมาใช้ทดแทน Pt สำหรับการประยุกต์ใช้เป็น CE ได้ อย่างไรก็ตาม ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ ควรมีการพิจารณาเพิ่มเติมในปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สัดส่วนของวัสดุผสม เทคนิคการเตรียมขั้ว ชนิดของสีย้อมไวแสง ความเข้มข้นของสีย้อม ชนิดของอิเล็กโทรไลต์ พื้นที่ทำงานของเซลล์ และกรรมวิธีในการประกอบเซลล์ จากการศึกษาอิทธิพลของพื้นที่ทำงานต่อกระแสไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรด [16] พบว่า พื้นที่การทำงานที่ต่ำกว่าจะให้กระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าเพราะมีความต้านทานทางไฟฟ้าที่น้อยกว่า ซึ่งการเลือกพื้นที่ใช้งานควรขึ้นอยู่กับข้อกำหนดการวิจัยเฉพาะ ทรัพยากรที่มีอยู่ และความจำเป็นในการขยายขนาดในบริบทของโครงการ DSSC ซึ่งในงานวิจัยส่วนใหญ่แล้ว จะเลือกใช้พื้นที่การทำงานที่มีขนาดเล็ก เพราะสามารถดำเนินการทดสอบที่รวดเร็วขึ้น

และการใช้วัสดุย่อยลงเพื่อการวัดที่แม่นยำและเชื่อถือได้ภายใต้ข้อจำกัดของอุปกรณ์และทรัพยากรการวัดที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม ในการนำไปใช้งานจริง พื้นที่ทำงานที่มากขึ้นจะทำให้ DSSC มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมดูดซับแสงที่ตกกระทบได้มากขึ้น การดูดกลืนแสงที่มากขึ้นทำให้จำนวนโมเลกุลของสีย้อมกระตุ้นสูงขึ้น และมีจำนวนอิเล็กตรอนที่สร้างขึ้นมากขึ้น ลดโอกาสในการรวมตัวกันของประจุไฟฟ้าใหม่และปรับปรุงประสิทธิภาพการเก็บประจุไฟฟ้า สิ่งนี้นำไปสู่การถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่สร้างขึ้นจากอิเล็กโทรดไปยังวงจรภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของอุปกรณ์สูงขึ้น

สรุปผลการวิจัย

จากการสังเคราะห์ วัสดุประกอบ Fe_3O_4 ร่วมกับ AC เพื่อใช้เป็น CE สำหรับ DSSC พบว่า Fe_3O_4 ที่สังเคราะห์จากวิธีการตกตะกอนร่วมมีลักษณะของอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดเล็ก ที่มีองค์ประกอบของ Fe (82.5%wt) และ O (12.5%wt) มีความสามารถในการดูดกลืนได้แสงทั้งช่วง UV และช่วงแสงที่ตามองเห็น มีค่าแถบช่องว่างของพลังงานเท่ากับ 2.23 eV และวัสดุประกอบ Fe_3O_4 -AC มีลักษณะการแทรกของ Fe_3O_4 ในรูพรุนของ AC มีองค์ประกอบของ Fe O และ C เป็น 42.08 6.12 และ 51.24%wt ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดกลืน พบว่า Fe_3O_4 -AC สามารถดูดกลืนแสงช่วง UV ได้มากกว่า Fe_3O_4 แต่จะมีความสามารถดูดกลืนช่วงแสงที่ตามองเห็นได้น้อยกว่า ซึ่ง Fe_3O_4 -AC จะมีแถบช่องว่างของพลังงานต่ำที่สั้นกว่าเป็น 2.15 eV และเมื่อนำมาใช้เป็น CE จะให้ DSSC ที่มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 2.32% ซึ่งมากกว่าการใช้ Pt ที่ให้ค่าประสิทธิภาพเพียง 2.20% ดังนั้น วัสดุประกอบ Fe_3O_4 -AC จึงเป็นวัสดุทางเลือกในการนำมาใช้วัสดุ Pt ที่มีราคาแพง สำหรับ CE ของ DSSC ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในการให้ทุนอุดหนุนและส่งเสริมการทำการศึกษาอิสระสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

เอกสารอ้างอิง

1. Karim NA, Mehmood U, Zahid HF, Asif T. Nanostructured photoanode and counter electrode materials for efficient Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). *Solar Energy*. 2019 Jun 1;185: 165-188.
2. Kumar DK, Křiz J, Bennett N, Chen B, Upadhyaya H, Reddy KR, Sadhu V. Functionalized metal oxide nanoparticles for efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs): A review. *Materials Science for Energy Technologies*. 2020 Jan 1;3: 472-481.
3. Alizadeh A, Roudgar-Amoli M, Bonyad-Shekalgourabi SM, Shariatnia Z, Mahmoudi M, Saadat F. Dye sensitized solar cells go beyond using perovskite and spinel inorganic materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022 Apr 1;157: 112047.
4. Saehana S. Small Scale DSSC Panels Design and Its Performance. In *Journal of Physics: Conference Series* 2018 Sep 1 (Vol. 1093, No. 1, p. 012034). IOP Publishing.

5. Xu H, Zhu G, Jin Z. Electron migration optimization through nanostructural control of hierarchical Fe_3O_4 based counter electrodes for high-performance dye-sensitized solar cells. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2020 Jul 15;869: 114214.
6. Channei D, Inceesungvorn B, Wetchakun N, Phanichphant S. Synthesis of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CeO}_2$ core-shell magnetic and their application as photocatalyst. *Journal of nanoscience and nanotechnology*. 2014 Oct 1;14(10): 7756-7762.
7. Wang W, Yao J, Li G. Dual-functional $\text{Fe}_3\text{O}_4@$ N-rGO catalyst as counter electrode with high performance in dye-sensitized solar cells. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2018 Aug 15;823:261-268.
8. Yoon CH, Chul SK, Ko HH, Yi S, Jeong SH. Enhanced performance of dye-sensitized solar cells with activated carbons. *J Nanosci Nanotechnol*. 2013 Dec;13(12): 7875-7879.
9. Loryuenyong V, Buasri A, Lerdvilainarit P, Manachevakulm K, Sompong S. Production of graphitic carbon-based nanocomposites from K_2CO_3 -activated coconut shells as counter electrodes for dye-sensitized solar-cell applications. *Journal of the Korean Physical Society*. 2016 Jan;68: 317-322.
10. Kumarasinghe KD, Kumara GR, Rajapakse RM, Liyanage DN, Tennakone K. Activated coconut shell charcoal based counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Organic electronics*. 2019 Aug 1;71: 93-97.
11. Mehmood U, Aslam HZ, Al-Sulaiman FA, Al-Ahmed A, Ahmed S, Malik MI, Younas M. Electrochemical impedance spectroscopy and photovoltaic analyses of dye-sensitized solar cells based on carbon/ TiO_2 composite counter electrode. *Journal of The Electrochemical Society*. 2016 Feb 17;163(5):H339.
12. Bagavathi M, Ramar A, Saraswathi R. Fe_3O_4 -carbon black nanocomposite as a highly efficient counter electrode material for dye-sensitized solar cell. *Ceramics International*. 2016 Aug 15;42(11): 13190-13198.
13. Qureshi AA, Javed S, Javed HM, Akram A, Jamshaid M, Shaheen A. Strategic design of Cu/TiO_2 -based photoanode and $\text{rGO}-\text{Fe}_3\text{O}_4$ -based counter electrode for optimized plasmonic dye-sensitized solar cells. *Optical Materials*. 2020 Nov 1;109:110267.
14. Dhumal J, Bandgar S, Zipare K, Shahane G. Fe_3O_4 ferrofluid nanoparticles: synthesis and rheological behavior. *Int J Mater Chem Phys*. 2015 Oct;1: 141-145.
15. Abadijah NM, Yuliantika D, Hariyanto YA, Saputro RE, Taufiq A, Soontaranon S. Nanostructure, band gap, and antibacterial activity of spinel $\text{Fe}_2\text{MO}_4/\text{OO}$ magnetic fluids. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2019 May 1 (Vol. 276, No. 1, p. 012064). IOP Publishing.
16. Sivapatarnkun J, Aiempnanakit K, Pudwat S. Effects of active area on UV detection by TiO_2 -sputtered films. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;47: 3487-3491.