

มุมในการจุ่มซีเซียมโบรไมด์ที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพ
ซีเซียมเลดโบรไมด์เพอรอฟสไกต์โซลาร์เซลล์

Effect of Angle for Cesium Bromide Dipping on Efficiency of
Cesium Led Bromide Perovskite Solar Cells

วัลลภ หอมระหัด^{1*} จุฑานันท์ ขานวงศ์² ธริยา เสนากลาง² ธีระวิทย์ พลโคกก่อง¹
ปฐพงษ์ เทียมตริ² และ ภัทรพงษ์ ขำคม²

Vallop Homrahad^{1*}, Juthanan Khanwong², Thariya Sensklang²,
Thirawit Phonkhokkong¹, Patthaphong Thiamtri², and Phattharaphong Khamkhom²

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์¹

Faculty of Science, Buriram Rajabhat University¹

คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์²

Faculty of Education, Buriram Rajabhat University²

Email: Vallop.hr@bru.ac.th

Received : March 13, 2023

Revised : May 31, 2023

Accepted : June 2, 2023

บทคัดย่อ

ฟิล์มซีเซียมเลดโบรไมด์ (CsPbBr_3) เพอรอฟสไกต์ถูกเคลือบลงบนพื้นผิวนำไฟฟ้า F-SnO_2 (FTO) โดยใช้วิธีการสองขั้นตอน ฟิล์มเลดโบรไมด์ (PbBr_2) ถูกเคลือบบนพื้นผิว FTO เป็นครั้งแรกโดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง จึงเข้าสู่กระบวนการจุ่มซีเซียมโบรไมด์ (CsBr) ที่มุม 0 45 90 135 และ 180 องศา ตามลำดับ ใช้เวลาในการจุ่ม 20 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเผาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าฟิล์มบางจะมีการเกิดระนาบของ CsPbBr_3 ตรงกันที่ (100) (110) และ (200) มีการจัดโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง (JCPDS เลขที่ 00-018-0364) แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้มุมองศามากขึ้น ทำให้ความเข้มของสัญญาณการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของพีคสูงขึ้น การวิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวและความหนาของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยสารมีการเกาะตัวกันเป็นขนาดเกรนแตกต่างกันและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเมื่อมีการเพิ่มมุมในการจุ่ม CsBr มากขึ้น มีช่องว่างของแถบพลังงาน 2.3 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (PCE) สูงสุดอยู่ที่ 2.04 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: การจุ่ม ซีเซียมโบรไมด์ เพอรอฟสไกต์โซลาร์เซลล์ ซีเซียมเลดโบรไมด์

ABSTRACT

Cesium lead bromide (CsPbBr_3) perovskite films were coated onto an F-SnO₂(FTO) conductive substrate using a two-step method. In the first step, lead bromide films (PbBr_2) were coated onto the FTO substrate via a spin coating technique. In the second step, CsBr was dipped onto the lead bromide films at varying angles of 0°, 45°, 90°, 135°, and 180° at 50°C for 20 minutes, followed by annealing at 150°C. X-Ray Diffraction (XRD) analysis revealed that the thin films have (100), (110), and (200) planes of CsPbBr_3 , corresponding to monoclinic crystal structures that agree with the reference database (JCPDS, No. 00-018-0364). The intensity of the XRD signal at the peak increased with a greater degree of angle. The surface morphology and thickness of the CsPbBr_3 films were characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM). Agglomeration of different grain sizes evenly distributed was observed as the dipping angle of CsPbBr_3 increased. The energy bandgap of the CsPbBr_3 films was about 2.3 eV. The highest power conversion efficiency of 2.04% was achieved.

Keywords: Dipping, Cesium Bromide, Perovskite solar cells, Cesium Lead Bromide

บทนำ

ปัจจุบันมีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งที่เป็นที่สนใจอย่างมาก คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (Perovskite solar cell) ในปี ค.ศ. 2018 นักวิจัยได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบ Perovskite ซึ่งให้ประสิทธิภาพถึง 28.0 เปอร์เซ็นต์ ได้รับการรับรองโดย National Renewable Energy Laboratory (NREL) ถือเป็นสถิติใหม่ในวงการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทผลึกเดี่ยว (Chris Case. et al, 2019) ประกอบกับการมีข้อดีในการสังเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยาก และกระบวนการสร้างมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ยังมีความทนทานและความปลอดภัย ทำให้ทางนักวิจัยยังต้องมีการพัฒนาโซลาร์เซลล์ชนิดนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ด้วยกระบวนการจุ่ม (Dip-coating) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการสร้างชั้นฟิล์มของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (Jainjun Zhang et al, 2017) วิธีการจุ่มในการเตรียมชั้นไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แบบบางมาก 5-50 นาโนเมตร ติดกับชั้นกระจกนำไฟฟ้าหลังจากไปรวมต่อกับชั้นอื่น ๆ จนเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์และ

PCE มากขึ้นกว่าแบบไม่มี TiO_2 จากเดิม 5.5 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มไปเป็นประมาณ 8.6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแทรกชั้น TiO_2 เข้าไป (Muhammad Masood et al, 2017) ในปีเดียวกันนั้นเอง Muhammad Adnan ได้ใช้เทคนิคการจุ่มสารละลายน้ำตะกั่วเข้าไปจุ่มในทุกชั้นของเพอรอฟสไกต์ เมื่อทุกลำดับชั้นในการจุ่มถูกควบคุมให้เป็นไปตามวิธี จะมีแผ่นฟิล์มที่มีประสิทธิภาพโดดเด่นที่สุดอยู่ที่ 12.41 เปอร์เซ็นต์ (Muhammad Adnan et al, 2018) ภายใต้ความเข้มแสงในเงื่อนไขปกติ (AM 1.5, 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) ในขั้นตอนการสร้างเพอรอฟสไกต์ ในช่วงการปลูกฟิล์ม CsBr นั้นจำเป็นต้องมีการใช้เทคนิคการจุ่มเพื่อให้เกิดเป็นชั้น CsPbBr_3 แต่การจุ่มนั้นมีการให้ความร้อน ดังนั้น ในแต่ละตำแหน่งจะมีความร้อนไม่เท่ากันและการวางกระจกสามารถวางได้อย่างเป็นอิสระ การจุ่มเตรียมฟิล์มเพอรอฟสไกต์ CsPbBr_3 บนชั้น TiO_2 วิธีการนี้ พบว่าช่วยยับยั้งการสลายตัวของชั้นฟิล์มสารตั้งต้นส่งผลให้เพอรอฟสไกต์ CsPbBr_3 มีเกรนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีคุณภาพสูง ฟิล์มหลังจากการจุ่มจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเพอรอฟสไกต์ CsPbBr_3 ในการสร้างชั้นฟิล์มของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ และในการจุ่มจะใช้การจุ่มแบบคว่ำหน้าลง (faced-down-dipping) ซึ่งการจุ่มแบบนี้พบว่ามียอตรา PCE อยู่ที่ 5.86 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้การจุ่มสองวิธีคือการจุ่มแบบหงายหน้า (face-up) และการจุ่มแบบคว่ำหน้า (face-down) ในระหว่างกระบวนการจุ่มแบบหงายหน้าเราพบว่าฟิล์ม CsPbBr_3 นั้นง่ายต่อการย่อยสลายและฟิล์มสีเหลืองค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นไม่มีสีในเวลาอันสั้น ผลที่ได้หมายความว่าฟิล์มที่ได้จากการจุ่มแบบหงายหน้าขึ้นเป็นกระบวนการที่ไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของฟิล์มสารตั้งต้น (Pengpeng Teng et al, 2018) โดยกระบวนการจุ่มนั้นมีการให้ความร้อนซึ่งความร้อนในแต่ละตำแหน่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาของการจุ่ม (Dipping) ของ CsBr ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเพอรอฟสไกต์ CsPbBr_3 โดยใช้มุมในการจุ่มอยู่ที่ 0 45 90 135 และ 180 องศา ตามลำดับ เพื่อศึกษาการจุ่ม CsBr ที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ CsPbBr_3 และเพื่อศึกษาคูณสมบัติเฉพาะของเพอรอฟสไกต์ CsPbBr_3

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษามุมในการจุ่ม CsBr ที่มีผลต่อ CsPbBr_3 เพอรอฟสไกต์โซลาร์เซลล์
2. วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD) ศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของเพอรอฟสไกต์ CsPbBr_3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสาร (UV-Vis Spectrophotometer)
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ CsPbBr_3 ชนิดเพอรอฟสไกต์

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจุ่ม (Dipping) เป็นวิธีการหนึ่งของการประยุกต์ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางโดยอาศัยหลักการเคลือบสารละลายบนพื้นผิวอย่างช้า ๆ ซึ่งต้องมีการควบคุมความเร็วให้คงที่ เพื่อให้ผิวของวัสดุมีความเรียบสม่ำเสมอและความหนาของฟิล์มน้อย หากต้องการฟิล์มที่มีความหนาน้อยให้ใช้ความเร็วใน

การเคลือบแบบจุ่มเร็ว แต่ถ้าต้องการเคลือบแบบหนามากให้ใช้ความเร็วที่ช้าหรือจะทำการจุ่มหลาย ๆ ครั้งเพื่อเพิ่มความหนาให้กับฟิล์มได้ (เอกรัตน์ วงษ์แก้ว, 2557) เครื่อง SEM เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนปล่อยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) ออกมาอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (100 ถึง 30,000 อิเล็กตรอนโวลต์หรือมากกว่า) จากนั้นจะถูกดูดลงสู่ด้านล่างโดยแผ่นแอโนด (anode plate) ภายใต้ภาวะ ความดันสุญญากาศ 10^{-5} ถึง 10^{-7} ทอร์ (อัจฉราพร ศรีอ่อน, 2559) (X-ray diffractometer : XRD) เครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐานซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกการจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (คันศนีย์ รักไทยเจริญชีพ, 2558) UV-Vis ใช้ในวิเคราะห์สาร โดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วง Ultra violet (UV) และ Visible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า Spectrum (นเรศ โกฏทอง, 2556) เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีแสงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สารกึ่งตัวนำจะทำหน้าที่ในการดูดกลืนแสงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสม พลังงานที่ดูดกลืนไปจะถูกนำไปใช้ในการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำ จากนั้นสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่ในการแยกคู่อิเล็กตรอน และโฮลออกจากกันเป็นประจุอิสระ ซึ่งประจุเหล่านี้จะสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นของสารกึ่งตัวนำไปยังขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ (เอกพันธ์ ผัดศร, 2561) ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแสดงด้วยค่าต่าง ๆ ดังนี้ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage, V_{oc}) เป็นแรงดันไฟฟ้า เมื่อความต้านทานของวงจรสูงสุดและกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์จุดที่กราฟตัดแกนกระแสไฟฟ้าคือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current, J_{sc}) เป็นกระแสไฟฟ้า เมื่อความต้านทานของวงจรต่ำสุดหรือเท่ากับศูนย์และแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ ถ้าให้ P_{max} (Maximum power) และ J_{max} (Maximum current) คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดตามลำดับที่จะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (ศุภาวรุ โลหะเวช, 2559)

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{light}} \times 100\% \quad (1)$$

η คือประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (เปอร์เซ็นต์) FF คือฟิลล์แฟกเตอร์(เปอร์เซ็นต์) P_{light} คือผลรวมของกำลังที่แผ่รังสีตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ (มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) I_{sc} คือค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) เมื่อทดสอบเซลล์ภายใต้เงื่อนไข Air Mass 1.5 (AM 1.5)

วิธีการดำเนินการวิจัย

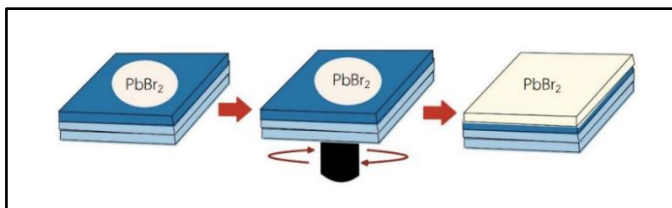
การสร้างโซลาร์เซลล์ชนิดเพอรอฟสไกต์โดยการเปลี่ยนมุมของการจุ่มของ CsBr ที่เหมาะสมสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของ CsPbBr₃ ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้

เครื่องมือการวิจัย

1. ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางของ TiO₂ แบบหนาแน่น (TiO₂-Blocking Layer) เตรียม FTO ด้วยขนาด 2.0 x 2.0 ตารางเซนติเมตร จากนั้นนำเอาระกจกที่ล้างแล้วทำการเคลือบสาร TiO₂-BL ลงบนผิวกระจก FTO วิธีการเคลือบแบบหมุน ด้วยเครื่อง Spin coater ตั้งค่าความเร็วในการหมุน 2 ครั้ง ครั้งแรก 2000 รอบต่อนาที ในเวลา 30 วินาที และครั้งที่สอง 4000 รอบต่อนาที ในเวลา 60 วินาที

2. ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มแบบมีรูพรุน TiO₂ (Mesoporous-TiO₂) นำเอาสาร TiO₂ paste (PST-18NP) จำนวน 1.654 กรัม มาเจือจางด้วยเอทานอล 6 มิลลิลิตรนำเอาวัสดุฐานรองที่เคลือบฟิล์ม TiO₂-Blocking Layer จากนั้นเคลือบฟิล์ม TiO₂ paste ด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุน โดยตั้งค่าความเร็วในการหมุนเท่ากับ 4000 รอบต่อนาที ใช้เวลา 60 วินาที นำไปวางบน hot plate เพื่อทำให้แห้ง แล้วนำขึ้นเตาเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นปล่อยให้กระจกเย็นตามอุณหภูมิห้อง ก็จะได้ชั้นฟิล์มแบบมีรูพรุน

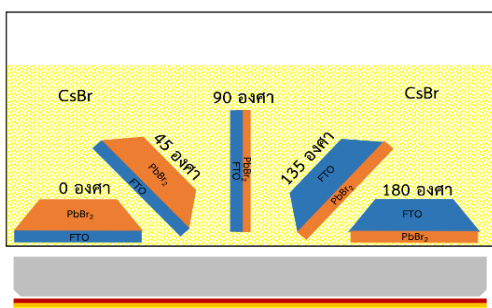
3. ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางของสาร PbBr₂ ทำการเคลือบฟิล์ม PbBr₂ ลงบนวัสดุฐานรอง Porous-TiO₂/TiO₂-BL/FTO ดังภาพประกอบ 1 ด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนด้วยเครื่อง Spin coater โดยนำชิ้นงานไปทำการสปินแบบ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 สปินที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 วินาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเร็วรอบการหมุนเป็น 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นนำขึ้นเตาเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นปล่อยให้กระจกเย็นตามอุณหภูมิห้อง



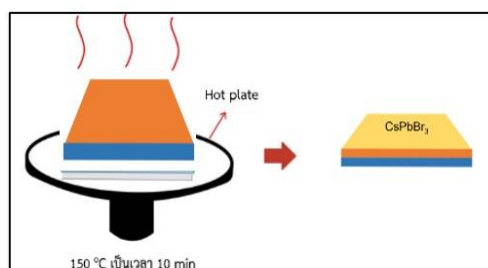
ภาพประกอบ 1 ภาพแสดงขั้นตอนการสปินสารของชั้น PbBr₂

4. ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางของสารเพอรอฟสไกต์ CsPbBr_3 เติริมสารละลาย CsBr ผสมกับ เมทานอล ความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เพื่อใช้เป็นสารละลายในการปลูกฟิล์มของ สาร CsPbBr_3 นำสารละลาย CsBr ที่ได้วางบน hot plate โดยตั้งอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นำกระจกทำการเคลือบฟิล์ม PbBr_2 มาจุ่มลงในสารละลาย CsBr ที่มีอุปกรณ์สำหรับการวางได้อย่างเหมาะสมตามมุม 0 45 90 135 และ 180 องศา เป็นเวลา 20 นาที ดังภาพประกอบ 2(ก) นำมาเผาที่ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ดังภาพประกอบ 2(ข) จากนั้นปล่อยให้กระจกมี อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

(ก)



(ข)



ภาพประกอบ 2 (ก) ภาพแสดงขั้นตอนการจุ่มในเจือจางของมุมองศาต่าง ๆ

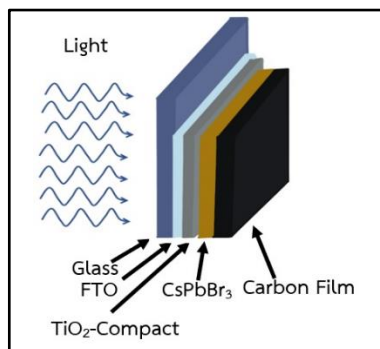
(ข) การเผาชั้น CsPbBr_3 ด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที

5. การทำขั้วแคโทดอีเล็กโทรด นำเอาสารคาร์บอนแบล็คจำนวน 5 กรัม ผสมกับสาร Poly Vinyl acetate (PVAc) จะละลายในตัวทำละลาย Ethyl acetate ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ผสมไปละลายในตัวทำละลาย Chlorobenzene ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$) ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ผสมคาร์บอนแบล็ค มาเคลือบลงบนชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ CsPbBr_3 ปล่อยให้แห้ง จากนั้นการปิดผนึกเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดเพอรอฟสไกต์ นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มาทำขั้วไฟฟ้าด้วยการบัดกรี หลังจากนั้นทำการปิดผนึก เซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อป้องกันไม่ให้ชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ทำปฏิกิริยากับอากาศและความชื้น โดยปิด ผนึกดังภาพประกอบ 3(ก) และโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ CsPbBr_3 ชนิดเพอรอฟสไกต์ ดังภาพประกอบ 3(ข)

(ก)



(ข)



ภาพประกอบ 3 (ก) ภาพแสดงแผ่นฟิล์มหลังการปาดคาร์บอนแบล็คโดยการทำซ้ำไฟฟ้า

(ข) โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์CsPbBr₃ชนิดเพอรอฟสไกต์

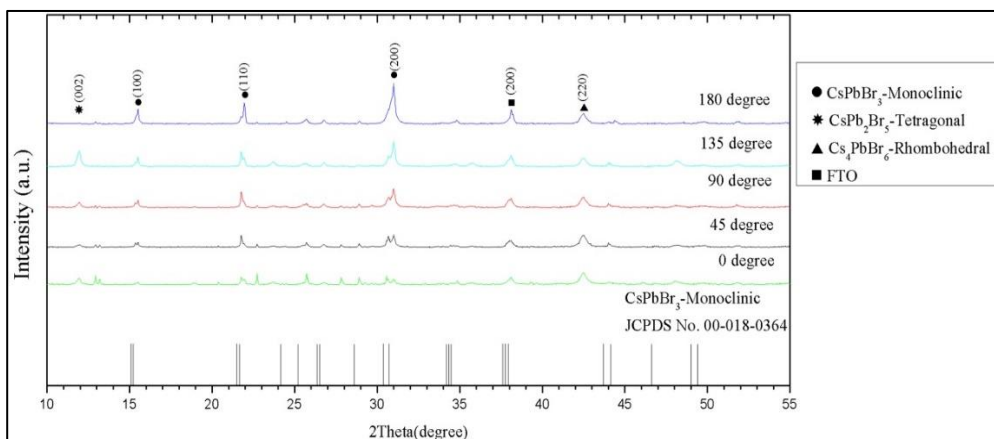
การวิเคราะห์ข้อมูล

ศึกษาการจุ่ม CsBr ที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพ CsPbBr₃ เพอรอฟสไกต์ที่มีคาร์บอนแบล็คเป็นขั้วแคโทดรีเอเล็กโทรด โดยใช้การจุ่มอยู่ที่ 0 45 90 135 และ 180 องศาตามลำดับ ผลการตรวจสอบเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ชนิด CsPbBr₃ ด้วยเทคนิค XRD ,SEM ,UV-vis และ Solar simulator ได้ผลดังนี้

ผลการวิจัย

1. สมบัติทางโครงสร้างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม CsPbBr₃ เพอรอฟสไกต์โซลาร์เซลล์

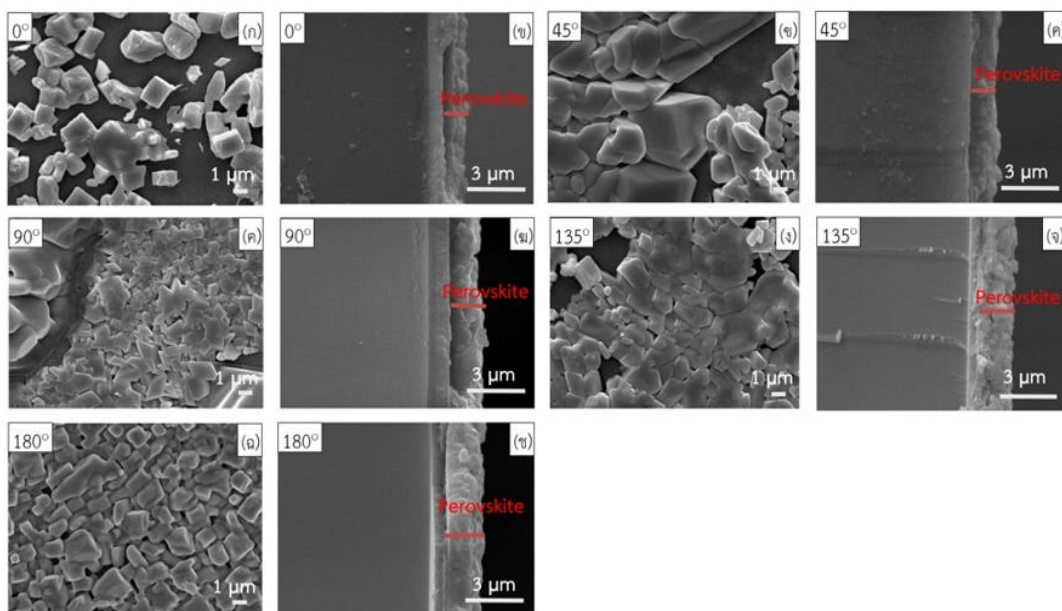
การจุ่ม CsBr ที่ 0 45 90 135 และ 180 องศา ดังภาพประกอบ 4 พบว่าฟิล์มบางจะมีการเกิดระนาบของ CsPbBr₃ ตรงกันที่ (100) (110) และ (200) ที่มีการจัดโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก (Monoclinic) โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง (JCPDS เลขที่ 00-018-0364) ที่มุม 2Theta ประมาณ 15.16 21.58 และ 30.67 องศา พบว่าฟิล์มที่จุ่ม CsBr มุม 180 องศา อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จะสังเกตเห็นว่าความสูงของพีคมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามมุมองศาที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าเมื่อใช้มุมองศามากขึ้นทำให้ความเข้มของสัญญาณการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (intensity) ของพีคสูงขึ้นและฟิล์มมีความเป็นผลึกสูงส่งผลต่อโครงสร้างผลึกและการจุ่มด้วย CsBr ในมุมองศาที่น้อยลงมีผลต่อความเป็นผลึกของฟิล์มบางที่ลดลง ค่าขนาดผลึก (crystallite size) อยู่ในระดับนาโนเมตร



ภาพประกอบ 4 แสดงภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม CsPbBr_3 เพอรอฟสไกต์โซลาร์เซลล์ ใช้มุมในการจุ่ม CsBr ที่ 0 45 90 135 และ 180 องศา

2. สมบัติทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม CsPbBr_3 ชนิดเพอรอฟสไกต์โซลาร์เซลล์

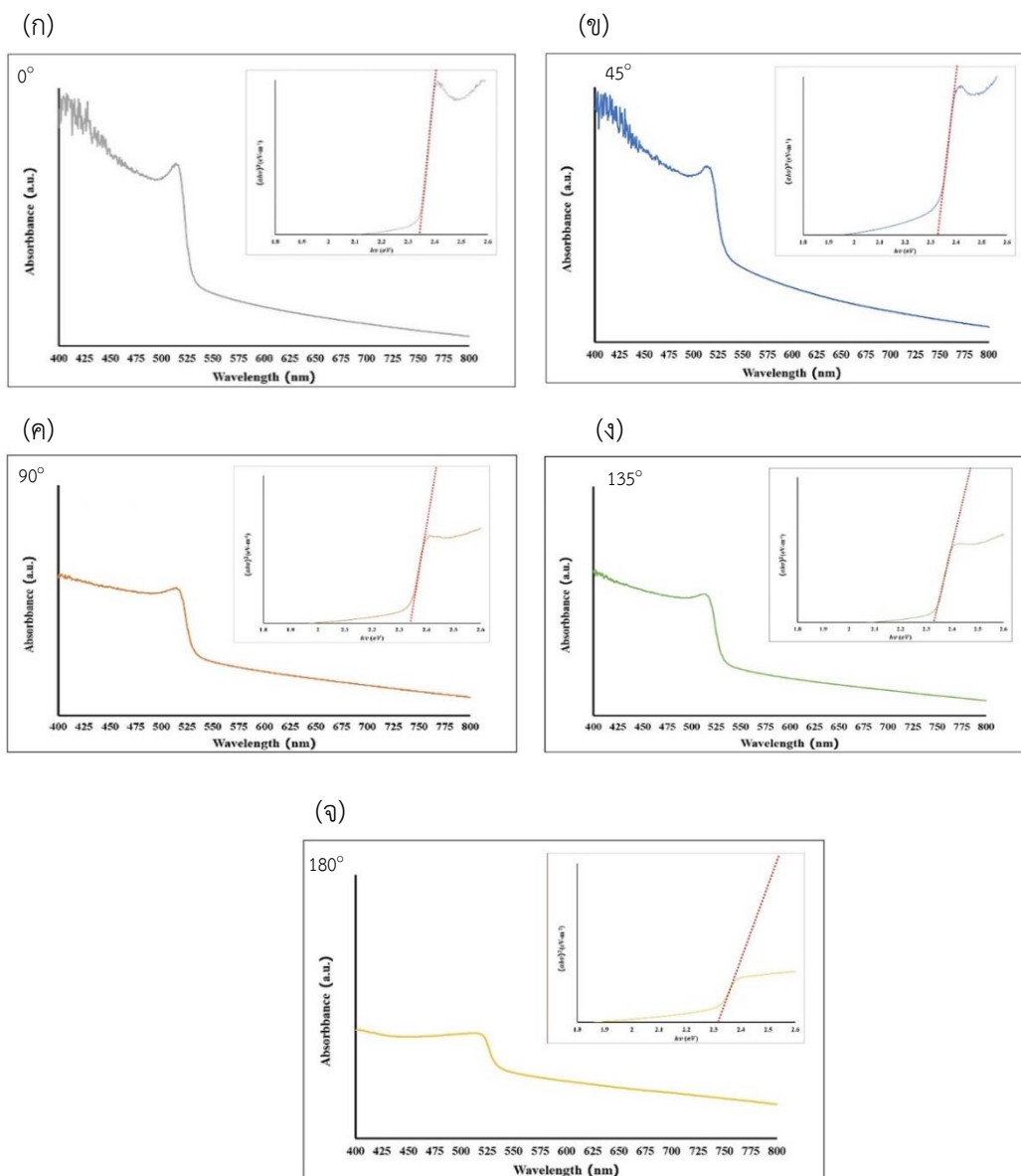
ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดผลที่ได้แสดงในภาพประกอบ 5 ซึ่งถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่ามีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม สารเกาะตัวกันเป็นขนาดเกรน (grain size) แตกต่างกันไป และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเมื่อมีการเพิ่มมุมในการจุ่ม CsBr มากขึ้น โดยตัวอย่างที่ 1 มุมในการจุ่ม CsBr ที่ 0 องศา มีขนาดใหญ่มากประมาณ 3.8 ไมโครเมตร และมีขนาดเล็กสุดประมาณ 0.25 ไมโครเมตร หนาประมาณ 1.1-1.3 ไมโครเมตร เนื่องจากการสลายตัวของผิวชั้นเพอรอฟสไกต์ ทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มลดลง ซึ่งส่งผลต่อขนาดเกรนและความหนาของฟิล์มที่เคลือบลดลงด้วย ดังภาพประกอบ 5(ก-ข) ส่วนตัวอย่างที่ 5 มุมในการจุ่ม CsBr ที่ 180 องศา มีขนาดใหญ่มากประมาณ 5.5 ไมโครเมตรและมีขนาดเล็กสุดประมาณ 0.77 ไมโครเมตร หนาประมาณ 1.6-1.8 ไมโครเมตร โดยมีการเรียงตัวของขนาดเกรนที่หนาแน่น เรียบ และมีขนาดเกรนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จึงให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด ดังภาพประกอบ 5(ฉ-ช) เพราะว่ามีมุมในการจุ่ม 180 องศา มีการจำกัดพื้นที่ของเหลวที่เหมาะสมและความร้อนในการจุ่ม CsBr ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีการเคลื่อนที่จากล่างขึ้นสู่ด้านบน ส่งผลให้ฟิล์ม CsPbBr_3 เพอรอฟสไกต์มีความสมบูรณ์ค่อนข้างสูง ส่วนฟิล์มเพอรอฟสไกต์ชนิด CsPbBr_3 ตัวอย่างที่ 4 มุมในการจุ่ม CsBr มุม 135 องศา มีการเรียงตัวของขนาดเกรนหนาแน่นน้อยกว่าตัวอย่างที่ 5 มุมในการจุ่ม CsBr มุม 180 องศา ดังภาพประกอบ 5(ง-จ) และตัวอย่างที่ 3, 2 และ 1 มุมในการจุ่ม CsBr มุม 90 45 และ 0 องศา ดังภาพประกอบ 5(ก-ฉ) มีเกรนที่ค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ



ภาพประกอบ 5 ภาพถ่าย (ก) (ข) (ค) (ง) (ฉ) พื้นผิวและ (ข) (ฅ) (ฉ) (จ) (ช) ความหนาของฟิล์ม CsPbBr₃ ชนิดเพอรอฟสไกต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มุมในการจุ่ม CsBr ที่ 0 45 90 135 และ 180 องศา ตามลำดับ

3. สมบัติทางแสงค่าดูดกลืนแสงบนช่วงความยาวคลื่นและช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (E_g) ของสารเพอรอฟสไกต์ชนิด CsPbBr₃ ที่มุมในการจุ่มของ CsBr 180 องศา

จะเห็นว่าแผ่นฟิล์มชนิด CsPbBr₃ เพอรอฟสไกต์ที่จุ่มด้วย CsBr ทำมุม 180 องศา มีค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 527 นาโนเมตรดังภาพประกอบ 6(ก-จ) และค่าช่องว่างระหว่างพลังงานอยู่ที่ประมาณ 2.3 อิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งสอดคล้องกับหลักการช่วงแถบช่องว่างระหว่างพลังงานของ CsPbBr₃ อยู่ในช่วง 1.9-3.0 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ อยู่ระหว่าง 400-700 นาโนเมตร



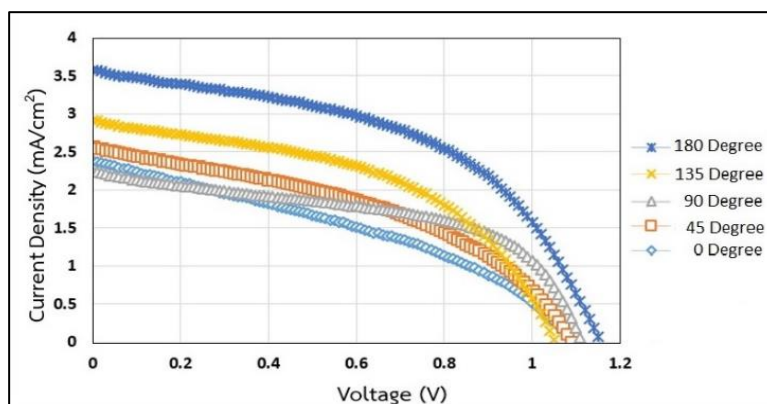
ภาพประกอบ 6 (ก-จ) ภาพแสดงค่าดูดกลืนแสงบนช่วงความยาวคลื่นของสาร CsPbBr_3 เพอรอฟสไกต์ และภาพแสดงค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของมุมในการจุ่ม CsBr ที่ 0 45 90 135 และ 180 องศา ตามลำดับ

4. ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ชนิด CsPbBr_3 มุมในการจุ่ม CsBr ในเงื่อนไขต่าง ๆ

ตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ของการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของฟิล์ม CsPbBr_3 เพอรอฟสไกต์โซลาร์เซลล์

Dipping angle (Degree)	I_{sc} (mA)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	Efficiency (%)
0	2.14	2.39	1.09	0.36	0.95
45	2.31	2.57	1.09	0.42	1.18
90	2.01	2.24	1.11	0.52	1.30
135	2.62	2.91	1.05	0.48	1.48
180	3.21	3.58	1.16	0.49	2.04

มุมของการจุ่ม CsBr 180 องศา ได้ค่ากระแส 3.21 มิลลิแอมแปร์ ความหนาแน่นกระแส 3.58 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.16 โวลต์ Fill Factor 0.49 เปอร์เซนต์และประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า 2.04 เปอร์เซนต์ ดังแสดงในตาราง 1 จะเห็นว่าแนวโน้มของค่าการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าจากมุมในการจุ่ม 0 องศาไปถึง 180 องศา แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเพอรอฟสไกต์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มองศาของมุมในการจุ่ม และมุมในการจุ่ม CsBr ที่ดีที่สุดคือมุม 180 องศา เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง มีการเคลื่อนที่จากระดับพลังงานที่สูงไปยังระดับพลังงานที่ต่ำได้อย่างเหมาะสม



ภาพประกอบ 7 กราฟ J-V แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้า

พบว่า V_{oc} และ J_{sc} มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนมุมในการจุ่มที่มีมุมมากขึ้นดังภาพประกอบ 7 เนื่องจากฟิล์ม $CsPbBr_3$ เพอรอฟสไกต์โซลาร์เซลล์ที่มีการดูดกลืนแสงได้เหมาะสมทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในระบบเซลล์ได้ดี จะเห็นได้ว่ามุมในการจุ่ม $CsBr$ ที่ 0 องศา มีค่า V_{oc} และ J_{sc} มีค่าต่ำที่สุดและมุมในการจุ่ม $CsBr$ ที่ 180 องศา มีค่า V_{oc} และ J_{sc} มีค่าสูงที่สุด V_{oc} ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.16 โวลต์ และ J_{sc} มีค่าเท่ากับ 3.58 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษามุมในการจุ่ม $CsBr$ ที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพ $CsPbBr_3$ เพอรอฟสไกต์ที่มีคาร์บอนแบล็คเป็นขั้วแคโทดอิเล็กโทรด โดยใช้มุมในการจุ่มอยู่ที่ 0 45 90 135 และ 180 องศาตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางจะมีการเกิดระนาบของ $CsPbBr_3$ ตรงกันที่ (100) (110) และ (200) ที่มีการจัดโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก โดยเปรียบเทียบจากฐานข้อมูลอ้างอิง (JCPDS เลขที่ 00-018-0364) ที่มุม 2Theta ประมาณ 15.16 21.58 และ 30.67 องศา โดยฟิล์มที่จุ่ม $CsBr$ มุม 180 องศา แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้มุมจุ่มมากขึ้น ทำให้ความเข้มของสัญญาณการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิสิกส์สูงขึ้น ฟิล์มมีความเป็นผลึกสูงส่งผลต่อโครงสร้างผลึก และฟิล์มบางที่จุ่มด้วย $CsBr$ ในมุมองศาที่น้อยลง มีผลต่อความเป็นเกรนของฟิล์มบางที่ลดลง ค่าขนาดเกรนอยู่ในระดับนาโนเมตร การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่ามีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยสารมีการเกาะตัวกันเป็นขนาดเกรนแตกต่างกัน และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เมื่อมีการเพิ่มมุมในการจุ่ม $CsBr$ มากขึ้น มุมในการจุ่ม $CsBr$ 180 องศา มีขนาดใหญ่ที่สุดประมาณ 5.5 ไมโครเมตร และมีขนาดเล็กสุดประมาณ 0.77 ไมโครเมตร หนาประมาณ 1.6-1.8 ไมโครเมตร โดยมีการเรียงตัวของเกรนที่หนาแน่นเรียบและมีขนาดเกรนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยมุม 135 90 45 และ 0 องศาในการจุ่ม $CsBr$ จะมีเกรนที่ค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ ซึ่ง $CsPbBr_3$ เพอรอฟสไกต์ที่จุ่มด้วย $CsBr$ ที่ทำมุม 180 องศา มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.3 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 2.04 เปอร์เซ็นต์

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งต่อไปควรศึกษาอัตราการเพิ่มสารอื่น ๆ ที่ช่วยให้ประสิทธิภาพของ $CsPbBr_3$ เพอรอฟสไกต์มีค่าสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- คฑาวุธ โลหะเวช. (2559). การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงด้วยอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีสะอาด. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- นเรศ โกฏทอง. (2556). การตรวจพิสูจน์เขม่าป็นบนเส้นผมโดยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- คันศนีย์ รักไทยเจริญชีพ. (2558). ประโยชน์จากเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในงานทดสอบวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์. *กรมวิทยาศาสตร์*, 63(197), 38-40.
- เอกพันธ์ ผัดศรี. (2561). วิเคราะห์ประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับสายส่งขนาด 300 kW. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เอกรัตน์ วงษ์แก้ว. (2557). การสังเคราะห์ฟิล์มโลหะออกไซด์ผสมเพื่อคุณสมบัติการกระตุ้นด้วยแสงสำหรับใช้ในงานกระจกไร้คราบ. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- อัจฉราพร ศรีอ่อน. (2559). หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง. *ห้องปฏิบัติการวัสดุทางการแพทย์หน่วยวิจัยวิศวกรรมชีวการแพทย์, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ*, 81, 77-80.
- Chris, C., Nicola, B. and Daniel, K. (2019). Industrial Insights into Perovskite Photovoltaics. *ACS Energy Lett*, 4(11), 2760–2762.
- Jainjun, Z., Like, Huang, C.L., Xiaoxiang, S., Rui. X., Yangyang, D., Jian, N., Hongkun, C., Juan, L., Ziyang, H. and Jianjun, Z. (2017). Efficient and hysteresis-less pseudo-planar heterojunction perovskite solar cells fabricated by a facile and solution-saving one-step dip-coating method. *Journal of Organic Electronics*, (40), 13-23.
- Muhammad, T.M., Christian, W., Jawad, S., Emil, R., Simon, S., Oskar, J.S., Paola, V., Ghufuran, H., Peter, D.L., Ronald, Ö. & Jan-Henrik, S. (2017). Impact of Film Thickness of Ultrathin Dip-Coated Compact TiO₂ Layers on the Performance of Mesoscopic Perovskite Solar Cells. *Journal of ACS Appl, Mater, Interfaces*, 9(21), 17906-17913.
- Pengpeng, T., Xiaopeng, H., Jiawei, L., Ya, X., Lei, K., Yangrunqian, W., Ying, Y. & Tao, Y. (2018). Elegant Face-Down Liquid-Space-Restricted Deposition

of CsPbBr₃ Fllms for Efficient Carbon-Based All-Inorganic Planar Perovskite Solar Cells. *Journal of ACS Appl. Mater. Interfaces*, 10(11), 9541-9546.