

การศึกษาผลของการเติมร่วมไอออนไนโอเบียมและแทนทาลัมในวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน
ไทเทเนียมไดออกไซด์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์
Study of the Effect of Cobalt-Doped Niobium and Tantalum Ions on Electron-
Transporting Layers of TiO_2 for Perovskite Solar Cells

ศุภกิตต์ นิลขาว¹ ดวงมณี วงรัตน์ไพศาล² พิพัฒน์ เรือนคำ² และอักรินทร์ อินทนิเวศน์^{1*}
Supakit Nilkha¹ Duangmanee Wongratanaphisan² Pipat Ruankham² and Akarin Intaniwet^{1*}

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

² ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

¹ School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

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

*Corresponding author: Tel.: 088-2687904 E-mail address: a.intaniwet@hotmail.co.th

Received: 13 March 2023, Revised: 21 April 2023, Accepted: 28 April 2023, Published online: 30 December 2023

Abstract

Perovskite solar cells represent a promising third-generation solar cell technology, and they have attracted considerable interest for their potential to compete with Si PV technology. Currently, perovskite solar cells (PSCs) using Titanium dioxide (TiO_2) as the electron-transporting material (ETM) have gained particular interest. However, an issue occurs at the junction between the ETMs and the perovskite layer due to charge transfer. Also, high temperature is required in the fabrication process of the electron-transporting layers. The addition of metal ions such as Niobium (Nb^{5+}) and Tantalum (Ta^{5+}) to replace Titanium (Ti^{4+}) can potentially solve these problems. Co-doping of the ETMs material from TiO_2 is therefore a viable idea to reduce such problems and increase the efficiency of solar cells. Therefore, this study investigates various co-doping ratios of Niobium and Tantalum in Titanium dioxide. The results reveal that the ratio of 3Nb:2Ta-doped TiO_2 is the most suitable choice for the electron-transporting layer. The power conversion efficiency (PCE) of perovskite solar cell that employed such electron transporting material was as high as 11.05% (3Nb:2Ta doped- TiO_2), which is 9.71% higher than that of Pure- TiO_2 . To gain further insights into the material's properties, X-ray diffraction analysis and UV-visible spectroscopy were employed, providing valuable information on its physical and optical characteristics.

Keywords: Low-temperature, Co-doped, TiO_2 , perovskite solar cells

บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์ถือว่าเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 3 และได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาพัฒนาเพื่อให้ได้ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้า ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน (ETLs) เป็น TiO_2 กำลังได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่อง แต่มีปัญหาในเรื่องการถ่ายโอนประจุบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นนำอิเล็กตรอนและชั้นเพอร์อฟสไกต์และต้องใช้อุณหภูมิที่สูงในกระบวนการการสร้างวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน การเติมไอออนของธาตุโลหะอย่างไนโอเบียม(Nb^{5+}) และแทนทาลัม(Ta^{5+}) เข้าไปแทนที่ไทเทเนียม(Ti^{4+}) สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้อย่างดี การเติมร่วมในวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน TiO_2 จึงเป็นแนวคิดที่มีความเป็นไปได้ในการลดปัญหาดังกล่าวและเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ การศึกษาที่อัตราส่วนการเติมร่วมที่แตกต่างกัน พบว่าที่อัตราส่วน 3Nb:2Ta Doped TiO_2 คือสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) สูงถึง 11.05% ซึ่งมากกว่า Pure- TiO_2 9.71% นอกจากนี้ยังศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) ศึกษาคุณสมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometer และการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์

คำสำคัญ: อุณหภูมิต่ำ การเติมร่วม ไทเทเนียมไดออกไซด์ เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์

บทนำ

เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมีหลากหลายรูปแบบ ปัจจุบันในประเทศไทยเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์นับว่ามีสัดส่วนในการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุดในบรรดาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน [1] เซลล์แสงอาทิตย์ถือว่าเป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์สำคัญในการผลิตไฟฟ้า การคิดค้นและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ในหลายรูปแบบเมื่อจำแนกตามประเภท เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์นับเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มวัสดุรูปแบบใหม่ ประกอบด้วยวัสดุชั้นนำไฟฟ้าทั้งด้านบน (Front electrode) และด้านล่าง (Back electrode) เซลล์แสงอาทิตย์ มีชั้นวัสดุเพอร์อฟสไกต์ (Perovskite layer) เป็นวัสดุชั้นดูดซับแสงเพื่อกระตุ้นการเคลื่อนของอิเล็กตรอนและโฮลผ่านไปยังวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน (Electron Transporter layer) และวัสดุชั้นนำโฮล (Hole transporter layer)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์ได้มีการประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 2008 โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 3.8% [2] ต่อมาได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยการพัฒนาหลายวิธีเช่น การปรับปรุงโครงสร้างผลึกของวัสดุชั้นดูดซับแสง [3] การพัฒนาโครงสร้างผลึกของชั้นนำอิเล็กตรอน [4] และนำโฮล [5] นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาชั้นนำไฟฟ้าหลังเซลล์แสงอาทิตย์ [6] รวมทั้งยังมีการปรับเปลี่ยนวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนไม่ว่าจะเป็น ไทเทเนียมไดออกไซด์ [7] ซิงค์ไดออกไซด์ [8] นอกจากนี้ยังมีการเติมโลหะกลุ่มทรานซิชันอันได้แก่ ทังสเตน ฯลฯ เข้าไปในวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ [9] ทั้งหมดนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) โดยมากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์นิยมใช้วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แต่วัสดุดังกล่าวยังมีปัญหาในหลายเรื่อง ไม่ว่าจะเป็นการที่ต้องเตรียมในอุณหภูมิสูงทำให้เกิดความยุ่งยากในกระบวนการสร้างวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิด (V_{oc}) ที่ไม่มากพอ [10] เกิดช่องว่างบริเวณพื้นผิวของชั้นดูดซับแสงอันเนื่องมาจากการบวมการเผาเพื่อสร้างผลึก [11] และการเกิดฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ในการตรวจวัดประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า [12] ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการเติมไอออนของธาตุโลหะทรานซิชัน ในปัจจุบันการเติมไอออนโลหะทรานซิชันนิยมทำกันมากกับวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ ในบางงานวิจัยมีการเติมร่วม (Co-doped) ของไอออนโลหะทรานซิชัน [13] ทั้งนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมร่วมในวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์ยังไม่เป็นที่นิยมมากจึงมีความน่าสนใจในการศึกษา โดยธาตุโลหะทรานซิชันที่ถูกนำมาเติมและมีความโดดเด่นในเรื่องของการแก้ไขปัญหาของไทเทเนียมไดออกไซด์และยังทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นได้แก่ธาตุไนโอเบียม และแทนทาลัม เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนช่องว่างระดับพลังงานของชั้นนำอิเล็กตรอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนประจุทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าดีขึ้น [14, 15] และรัศมีไอออนของไนโอเบียมและแทนทาลัมอยู่ที่ 0.64 Å และที่ไทเทเนียมอยู่ที่ 0.605 Å ซึ่งมีความใกล้เคียงกันทำให้ไนโอเบียมและแทนทาลัมสามารถแทนที่ตำแหน่งของไทเทเนียมได้

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเติมไอออนร่วมกันระหว่างไนโอเบียมและแทนทาลัมเข้าในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนการเติม 5%Nb-doped Nb:Ta Co-Doped และ 5%Ta-Doped เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์จากผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติแสงเมื่อทำการเติมร่วม รวมถึงผลคุณสมบัติทางไฟฟ้าของการเติมร่วมที่สัดส่วนต่าง ๆ นอกจากนี้ยังนำเสนอการจำลองผลผลิตพลังงานไฟฟ้าจากค่าประสิทธิภาพเมื่อนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมสารละลายวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์

สารละลายวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ TiO_2 ถูกเตรียมจากไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (TiCl_4) ในรูปแบบของเหลว จากนั้นนำไปหยดใส่เอทานอลลงที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน หมุนกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 10 min. เรียกสารละลายนี้ว่า “สารละลาย A” (สำหรับสัดส่วน Pure- TiO_2) ไนโอเบียมเพนตะคลอไรด์ (Nb_5Cl) และแทนทาลัมเพนตะคลอไรด์ (Ta_5Cl) ในรูปผงถูกนำไปละลายในเอทานอลความบริสุทธิ์สูง โดยสารละลายไนโอเบียมและแทนทาลัมจะถูกหยดใส่ร่วมกับ TiCl_4 ในขั้นตอนนี้ในปริมาณสัดส่วนการเติม (5%Nb Doped TiO_2 , 5%Ta Doped- TiO_2 , 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO_2 , 2%Nb:3%Ta Co-doped TiO_2) จากนั้นใส่สารละลาย A ลงในเบนซินแอลกอฮอล์ (Benzyl alcohol) ปริมาตร 40 ml. ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 4.30 hr. จะเรียกสารละลายนี้ว่า “สารละลาย B” นำสารละลาย B ผสมกับไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether) ในอัตราส่วน 1.5:13.5 ml. นำไปหมุนแยกสสารที่ความเร็วการหมุน 4,000 rpm เป็นเวลา 10 min. จากนั้นนำตะกอนที่ได้จากการหมุนแยกสสารผสมกับเอทานอลความบริสุทธิ์สูงให้เข้ากันด้วยเครื่องสั่นอัลตราโซนิกเป็นเวลา 2 hr. ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50°C จะได้สารละลาย “ TiO_2 NPs” สุดท้ายนำสารละลาย TiO_2 NPs ผสมกับ TIPD ด้วยอัตราส่วน 2:14 (ml:μl) เก็บไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 24 hr. ทำการสันอนุภาคด้วยเครื่องสั่นอัลตราโซนิกก่อนนำมาใช้งาน จากการศึกษาพบว่า TiO_2 NPs ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์พบว่าเป็น Anatase- TiO_2 ที่มีโครงสร้างแบบ Tetragonal [16]

2. การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

ทำความสะอาดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (FTO) ด้วยสารทำความสะอาดด้วยสารทำความสะอาด (Alconox) อะซิโตน (Acetone) แอลกอฮอล์ (Alcohol) และไอโซโพรพานอล (IPA) ด้วยเครื่องสั่นความถี่อัลตราโซนิกและทำความสะอาดด้วย UV-Ozone จากนั้นหมุนเคลือบสารละลายวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ปริมาณ 70 μl. หมุนด้วยความเร็ว 1,500 rpm เป็นเวลา 40 วินาทีนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 30 min. จากนั้นเตรียมสารละลายเพอร์รอฟสไกต์ $\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$ เตรียมโดย CsI 25 mg, FAI 97.9 mg, PbBr_2 63.3 mg และ PbI_2 248.7 mg. ละลายใน DMF และ DMSO ในปริมาณ 425 μl และ 95 μl ตามลำดับ นำสารละลายเพอร์รอฟสไกต์หมุนเคลือบชั้น ETL ด้วยความเร็ว 1,000 rpm 13 วินาที จากนั้นเพิ่มความเร็วเป็น 4,000 rpm 30 วินาที ในช่วง 5 วินาที สุดท้ายทำการหยด Anisole 180 μl จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 15 min. เพื่อให้สารเพอร์รอฟสไกต์เปลี่ยนสภาพเป็นชั้นฟิล์มบางต่อมาสร้างวัสดุชั้นนำโฮลโดยใช้การหมุนเคลือบด้วยสารละลาย Spiro-OMeTAD ปริมาณ 50 μl และหมุนเคลือบด้วยความเร็ว 3,000 rpm 30 วินาที ในขั้นตอนสุดท้ายการทำขั้วอิเล็กโทรดด้วยฟิล์มคาร์บอน โดยใช้แผ่นฟิล์มคาร์บอนกดอัดลงบนชั้นฟิล์ม HTL ด้วยแรงอัด 6 bar โดยที่ให้ความร้อนที่ 50°C จะได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่พร้อมนำไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ

3. วัสดุสำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า Fluorine Doped Tin Oxide (FTO) ที่มีความต้านทานประมาณ $7-14 \Omega/\text{mm}^2$, ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (TiCl_4) (MERCK), ไนโอเบียมเพนตะคลอไรด์ (Nb_5Cl) ($\geq 99.9\%$ trace metals basis, Sigma-Aldrich), แทนทาลัมเพนตะคลอไรด์ (Ta_5Cl) (99.8% trace metals basis, Sigma-Aldrich), Titanium diisopropoxide bis(acetylacetonate) (TIPD) (75 wt. % in isopropanol, Sigma-Aldrich), PbI_2 (99%, Sigma-Aldrich) CsI (99.999% trace metals basis, Sigma-Aldrich), Lead(II) Bromide (PbBr_2) ($\geq 98\%$, Sigma-Aldrich), Formamidinium iodide (FAI) ($>99.99\%$, Greatcellsolar Materials), N,N-Dimethylformamide (DMF)

(anhydrous, 99.8%, Sigma-Aldrich), Dimethyl sulfoxide (DMSO) (anhydrous, ≥99.9%, Sigma-Aldrich) และ Spiro-OMeTAD

4. การทดสอบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

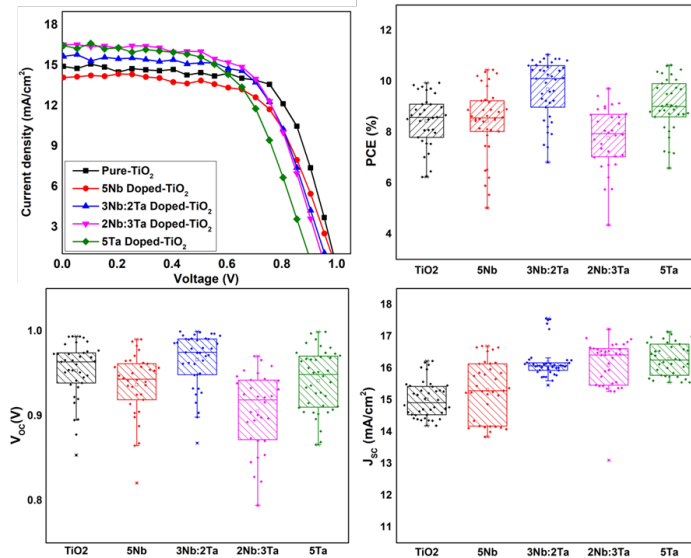
ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเพื่อศึกษาผลของการเติมและเติมร่วมของไนโอเบียมและแทนทาลัมไปแทนที่ไทเทเนียมในโครงสร้าง รวมทั้งสามารถยืนยันความสำเร็จในการเติมโดยดูจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ทำการตรวจสอบที่มุม 20° - 80° (Rigaku, miniFlex II) วิเคราะห์คุณสมบัติการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectroscopy) ที่ช่วงความยาวคลื่น 200-1,000 nm (Varian, Cary 500) ในขั้นตอนการตรวจวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ชุดทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ AM 1.5 และทดสอบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V Curve)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่ถูกเติมไนโอเบียมและแทนทาลัมเข้าไปในชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการเติมในอุณหภูมิต่ำ ($<150^{\circ}\text{C}$) ซึ่งมีกระบวนการง่ายต่อการสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ได้ข้อมูลคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยมีการวิเคราะห์ดังภาพที่ 1 เมื่อนำข้อมูลของทุกสัดส่วนมาวิเคราะห์จากตารางที่ 1 จากข้อมูลพบว่า Pure-TiO₂ มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 8.67% มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเฉลี่ย 15.02 mA/cm^2 มีค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเฉลี่ย 0.94 V และมีค่าฟิลแฟกเตอร์เฉลี่ย 60.98% ในขณะที่เมื่อทำการเติมไอออนของไนโอเบียมที่สัดส่วน 5%Nb Doped-TiO₂ สามารถให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและค่าฟิลแฟกเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 8.91%, 14.91 mA/cm^2 , 0.97 V และ 61.75% ตามลำดับ และเมื่อทำการเติมไอออนของแทนทาลัมที่สัดส่วน 5%Ta Doped-TiO₂ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 9.89% ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเฉลี่ย 16.41 mA/cm^2 ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเฉลี่ย 0.97 V และค่าฟิลแฟกเตอร์เฉลี่ยมีค่า 62.50% เมื่อทำการเติมร่วมที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ ได้แสดงผลประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่สุด 10.37% รวมถึงตัวแปรอื่นๆ อาทิ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเฉลี่ย 16.21 mA/cm^2 ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเฉลี่ย 0.99 V และค่าฟิลแฟกเตอร์เฉลี่ย 64.81% สังเกตจากข้อมูลพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลดลงที่สัดส่วน 5%Nb Doped-TiO₂ มีค่าน้อย อาจเป็นเพราะการเพิ่มไอออนของไนโอเบียมที่มากเกินไปจนเกิดความเหมาะสมจนเกิดขัดขวางการถ่ายโอนประจุ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [17] ที่แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนที่เหมาะสมกับการเติมไนโอเบียมคือ 0.3% ซึ่งสอดคล้องในงานวิจัยนี้ที่สัดส่วน 3%Nb Doped-TiO₂ และจากผลความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์สังเกตเห็นได้ว่าที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ ที่ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำกว่าสัดส่วน 2%Nb:3%Ta Co-doped TiO₂ และ 5%Ta Doped-TiO₂ แต่กลับให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดด้วยสาเหตุค่าความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีตัวแปรคือ R_s และ R_{sh} เนื่องจาก 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ มีค่า R_s ที่ต่ำถึง $12.65 \Omega\cdot\text{cm}^2$ เป็นเหตุให้ไม่เกิดการสูญเสียกระแสให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ และ R_{sh} ที่สูงถึง $9,260 \Omega\cdot\text{cm}^2$ ซึ่งเป็นค่าที่สูงทำให้ไม่เกิดการไหลกลับของกระแสภายในเซลล์ เป็นเหตุผลที่ทำให้ถึงสัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ จะมีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรน้อยกว่าแต่กลับมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูง ซึ่งถือว่าเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่มีพื้นฐานเป็น Pure-TiO₂ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

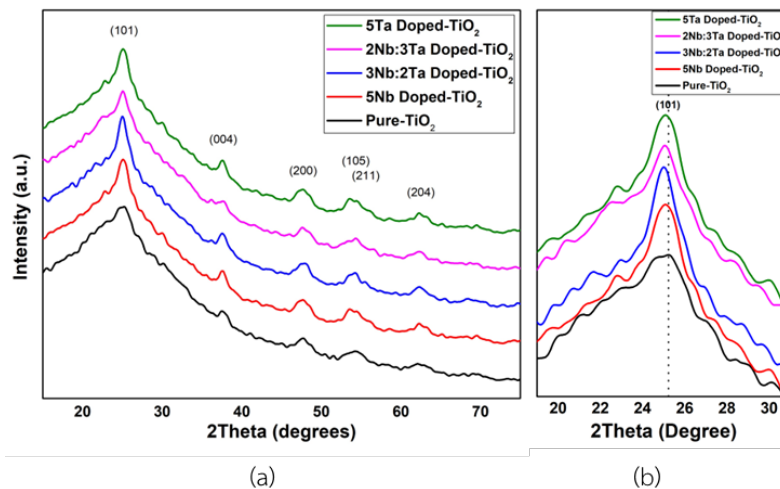
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

วัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์	PCE Average (%)	FF (%)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	R _{sh} (Ω·cm ²)	R _s (Ω·cm ²)
Pure-TiO ₂	8.65	60.98	15.02	0.94	8,340.6	16.41
5Nb Doped-TiO ₂	8.91	61.75	14.91	0.97	3,307.8	14.41
3Nb:2Ta Co-doped TiO ₂	10.37	64.81	16.21	0.99	9,260.11	12.65
2Nb:3Ta Co-doped TiO ₂	8.81	57.62	16.31	0.94	1,246.01	17.51
5Ta Doped-TiO ₂	9.89	62.50	16.41	0.96	2,893.28	12.67



ภาพที่ 1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

เพื่อทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกในทุคตัดส่วนเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ดังภาพที่ 2 พบว่าพีคส่วนใหญ่เป็นพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบอนาเทส เมื่อพิจารณาที่มุม 25.25° ซึ่งเป็นระนาบ 101 จากผลตารางที่ 2 มีการเคลื่อนที่เล็กน้อยของพีคเนื่องจากการรบกวนไอออนโลหะของไนโอเบียมและแทนทาลัมมีขนาด 0.64 \AA ซึ่งมีขนาดมากกว่ารัศมีไอออนของไทเทเนียมซึ่งมีค่า 0.605 \AA เป็นผลทำให้ที่ระนาบ 101 มีการเคลื่อนที่เล็กน้อยไปยังมุมน้อยลงจาก 25.31° (Pure-TiO₂) ไปยัง 25.01° (3%Nb:2%Ta-Doped) เนื่องจากรัศมีไอออนมีผลต่อระยะห่างระหว่างแลคทิต [18] และยังสามารถสังเกตได้ว่าลักษณะของระนาบ 101 ที่สัดส่วน 3Nb:2Ta Doped TiO₂ มีลักษณะเรียวแหลมและมีความเข้มที่สูงกว่าสัดส่วนอื่น ๆ สามารถบ่งชี้ได้ถึงความเป็นผลึกที่ดีซึ่งเป็นผลดีต่อคุณสมบัติการถ่ายโอนประจุในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นนำอิเล็กตรอนและชั้นเพอรอฟสไกต์



ภาพที่ 2 (a) ผลวิเคราะห์ XRD ของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนตั้งแต่มุม 10° - 80° และ (b) ระนาบ 101

ตารางที่ 2 ข้อมูลผล XRD วิเคราะห์มุม 2Theta ของระนาบ 101

วัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์	2Theta (Degree)
Pure-TiO ₂	25.31
5%Nb Doped-TiO ₂	25.12
3Nb:2Ta Co-Doped TiO ₂	25.01
2Nb:3Ta Co-Doped TiO ₂	25.09
5%Ta Doped-TiO ₂	25.08

เมื่อทำการวิเคราะห์ถึง lattice parameter ของวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ทุกสัดส่วน ซึ่งการวิเคราะห์ได้ใช้ Gauss's function ในการหามุม 2Theta เพื่อทราบถึงค่า d-spacing โดยใช้สมการของ Bragg's Law ดังสมการที่ (1) จากนั้นทำการหาค่า Lattice constant เพื่อทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างแลคทิส เนื่องจากเป็นผลึก Anatase-TiO₂ ทำให้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Tetragonal ซึ่งมีคุณสมบัติที่เวกเตอร์แลคทิสของเวกเตอร์ a และ b มีค่าเท่ากันและไม่เท่ากับเวกเตอร์ c โดยคำนวณที่ระนาบ (200) และ (004) โดยใช้สมการที่ (2) จากการวิเคราะห์ตารางที่ 3 จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อทำการเติมไนโอเบียมที่สัดส่วน 5%Nb Doped-TiO₂ และ 5%Ta Doped-TiO₂ พบว่า Lattice constant ของเวกเตอร์ a และ b มีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงเป็น 1.0474 Å จาก 1.0478 Å (Pure-TiO₂) และเวกเตอร์ c มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 9.5762 Å จาก 9.5650 Å (Pure-TiO₂) และการเติมร่วมที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-Doped TiO₂ สามารถสังเกตได้ว่าขนาดของเวกเตอร์ a และ b มีขนาดลดลงเมื่อเทียบกับ Pure-TiO₂ จาก 1.0478 Å เป็น 1.0477 Å ตามลำดับ รวมถึงขนาดเวกเตอร์ c ที่เพิ่มเป็น 9.5750 Å จาก 9.5650 Å (Pure-TiO₂) และที่การเติมร่วมที่สัดส่วน 2%Nb:3%Ta Co-Doped TiO₂ มีขนาดเวกเตอร์ a, b และ c ที่มากที่สุดคือ 1.0505 Å, 1.0505 Å และ 9.5978 Å ตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างผลึกแบบ tetragonal ของ TiO₂ ซึ่งสามารถยืนยันได้ถึงโครงสร้างผลึกของวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ได้ว่าเป็น Anatase-TiO₂

Bragg's Law

$$2d(\sin \theta) = n\lambda \quad (1)$$

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก(d-spacing) (Å)

θ คือ มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (°)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (1.5406 Å)

สมการ Lattice constant (Å)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2)$$

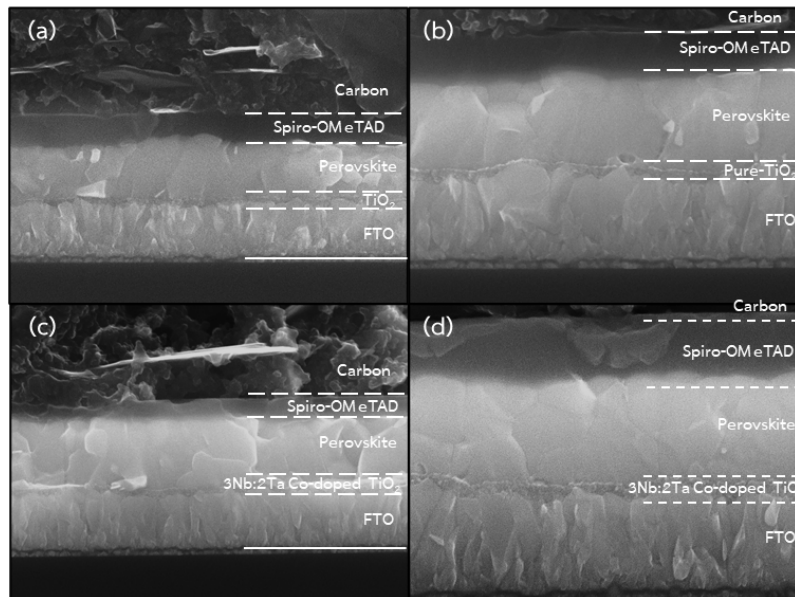
d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d-spacing) (Å)

h, k และ l คือ ระนาบของผลึก

a และ c คือ Lattice constant (Å)

ตารางที่ 3 ข้อมูลการวิเคราะห์ Lattice parameter ของชั้นนำอิเล็กตรอน

วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน	Lattice parameter		
	a Lattice constant (Å)	b Lattice constant (Å)	c Lattice constant (Å)
Pure-TiO ₂	1.0478	1.0478	9.5650
5%Nb Doped-TiO ₂	1.0474	1.0474	9.5762
3Nb:2Ta Co-Doped TiO ₂	1.0477	1.0477	9.5750
2Nb:3Ta Co-Doped TiO ₂	1.0505	1.0505	9.5978
5%Ta Doped-TiO ₂	1.0474	1.0474	9.5762



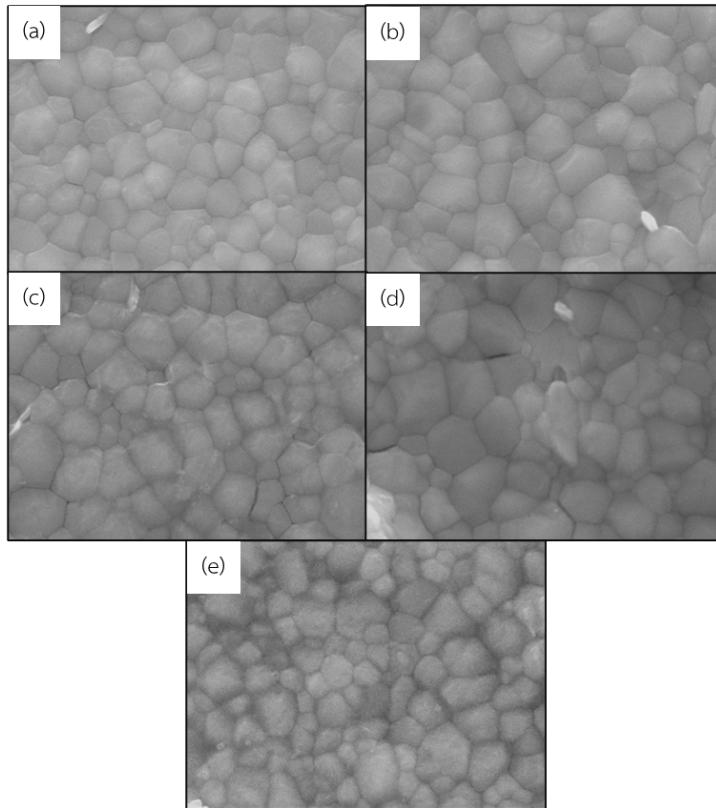
ภาพที่ 3 ภาพตัดขวางถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a-b) Pure-TiO₂ และ (c-b) 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂

จากภาพที่ 3 การวิเคราะห์ภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 30,000 และ 50,000 เท่า โดยเลือกนำเสนอความแตกต่างระหว่างวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่ไม่ผ่านการเติม (Pure-TiO₂) และการเติมร่วมที่สัดส่วน (3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂) เนื่องจากมีผลทางไฟฟ้าที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อศึกษาถึงความสมบูรณ์ของรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มและประเมินความหนาของชั้นฟิล์ม พบว่าที่สัดส่วน Pure-TiO₂ ภาพที่ 3a และ 3b จะสังเกตเห็นได้ในบริเวณรอยเชื่อมต่อระหว่างชั้นวัสดุนำอิเล็กตรอนที่ทำการหมุนเคลือบลงบนชั้นสารนำไฟฟ้า (FTO) ของภาพที่ 3a ที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ การเคลือบของสารละลายวัสดุไม่สามารถครอบคลุมได้อย่างทั่วถึง ซึ่งเป็นจุดบกพร่องทำให้เกิด trap current density ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรลดลงในทางกลับกันเห็นได้ว่าสารละลายไนโอเบียมและแทนทาลัมที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ สามารถครอบคลุมชั้น FTO ได้ดีกว่า อาจกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของไนโอเบียมและแทนทาลัมมีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของสารละลายวัสดุให้สามารถเคลือบพื้นผิวได้ดียิ่งขึ้น และยังทำให้เพิ่มการถ่ายโอนประจุบริเวณรอยต่อระหว่าง FTO กับ ETLs เป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรของสัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ ที่สูงกว่าสัดส่วน Pure-TiO₂ และจากการวัดความหนาของชั้นฟิล์มแต่ละชั้นได้ความหนาดังต่อไปนี้ ชั้นนำอิเล็กตรอน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ มีความหนาที่เหมาะสมประมาณ 55.25 nm ชั้นเพอร์ออฟสไกต์ ซึ่งเป็นชั้นเพอร์ออฟสไกต์มีความหนาประมาณ 495.15 nm และสุดท้ายชั้นนำโฮลที่มีวัสดุเป็น Spiro-OMeTAD มีความหนาประมาณ 249.27 nm

เมื่อทำการพิจารณาพื้นผิวชั้นเพอร์รอฟสไกต์จากภาพที่ 4 พบว่าลักษณะของเกรนที่อัตราส่วน Pure-TiO₂ มีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอโดยดูจากความเข้มของสีในแต่ละพื้นที่ผิวของชั้นฟิล์มเมื่อทำการวิเคราะห์ถึงขนาดเกรนของชั้นฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์แสดงดังตารางที่ 4 โดยคำนวณจากสมการที่ 3 พบว่า ที่สัดส่วนดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 211.22 nm เมื่อทำการเติมรวมไอออนของไนโอเบียมและแทนทาลัมพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกรนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 236.84 nm ซึ่งสอดคล้องกับผลทางไฟฟ้าที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุด [19] ทั้งนี้การแสดงออกทางกายภาพของพื้นผิววัสดุอาจไม่สามารถสรุปได้ถึงผลทางไฟฟ้าทั้งหมดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์จึงมีความจำเป็นต้องพิสูจน์ทราบทางคุณสมบัติทางแสงของเซลล์ด้วย

$$\text{Grain size (nm)} = 2\sqrt{\frac{A_{\text{Grain}}}{\pi}} \quad (3)$$

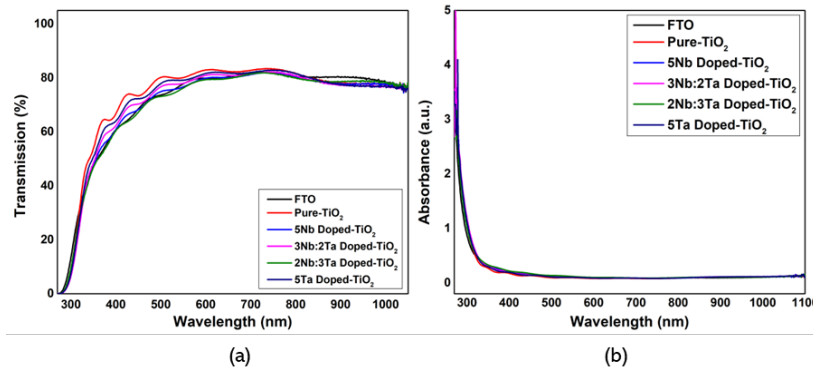
Grain size คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเกรน (nm)
 A_{Grain} คือ พื้นที่ของเกรน (nm²)
 π คือ ค่าคงที่ Pi มีค่าประมาณ (3.1415)



ภาพที่ 4 ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) Pure-TiO₂, (b) 5%Nb Doped-TiO₂, (c) 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂, (d) 2%Nb:3%Ta Co-doped TiO₂ และ(e) 5%Ta Doped-TiO₂

ตารางที่ 4 เส้นผ่านศูนย์กลางเกรนของวัสดุเพอร์รอฟสไกต์

วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน	เส้นผ่านศูนย์กลางเกรน (nm)
Pure-TiO ₂	211.22
5%Nb Doped-TiO ₂	230.67
3Nb:2Ta Co-Doped TiO ₂	236.84
2Nb:3Ta Co-Doped TiO ₂	234.22
5%Ta Doped-TiO ₂	224.63



ภาพที่ 5 (a) ผลวิเคราะห์คุณสมบัติการส่องผ่านของแสง (b) ผลวิเคราะห์การดูดซับแสงของชั้นวัสดุ FTO/ETLs

จากภาพที่ 5 ซึ่งเป็นภาพแสดงผลการส่องผ่านและดูดกลืนของชั้นนำอิเล็กตรอนที่ถูกหมุนเคลือบลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (FTO) โดยใช้อากาศที่อุณหภูมิห้องเป็น baseline ทดสอบที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 270-1,100 nm จากภาพที่ 5a แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติการส่องผ่านของทุกสัดส่วนใกล้เคียงกัน และมีร้อยละการส่องผ่านประมาณ 80% มีค่าการส่องผ่านสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 550-815 nm โดยมีค่าการส่องผ่านสูงสุดประมาณ 76.34-83.57% ซึ่งถือว่าทุกสัดส่วนมีค่าการส่องผ่านที่สูงสามารถให้แสงอาทิตย์ส่องผ่านไปยังวัสดุชั้นเพอร์รอฟสไกต์ซึ่งเป็นชั้นดูดกลืนแสงได้ดี เมื่อนำค่าการส่องผ่านวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนทุกสัดส่วนมาหาค่าการดูดกลืนจากสมการ (4) จากภาพที่ 5b ผลที่ได้มีความสัมพันธ์กันกับค่าการส่องผ่าน และค่าการดูดกลืนของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน โดยคำนวณได้จากสมการ (5) สามารถนำไปหาช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน หรือ Energy gabs (E_g) ได้จากสมการ (6)

สมการร้อยละการส่องผ่าน Transmittance percentage (%T)

$$\%T = \frac{I}{I_0} \times 100 \quad (4)$$

- I คือ ความเข้มแสงที่ออกมาหลังจากผ่านตัวกลาง
- I₀ คือ ความเข้มแสงก่อนผ่านตัวกลาง

สมการการดูดกลืนของแสง Absorbance (A)

$$A = 2 - \log \%T \quad (5)$$

เมื่อนำผลการดูดกลืนของแสงในวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนมาวิเคราะห์ α หาช่องว่างระหว่างแถบพลังงานด้วยวิธี Tauc's plot ด้วยสมการ (4)

$$(\alpha hv)^{1/\gamma} = A(hv - E_g) \quad (6)$$

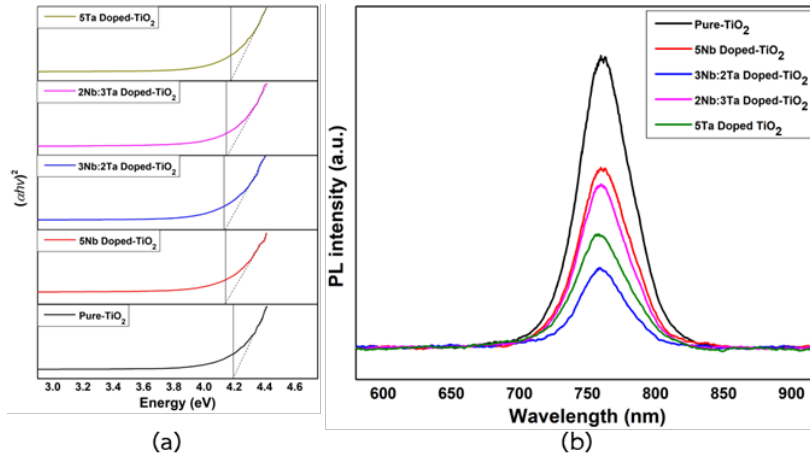
- α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
- h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (6.625×10^{-34} J·s)
- v คือ ความถี่ของโฟตอน
- γ คือ การเปลี่ยนสถานะทางอ้อมของอิเล็กตรอนตามธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 2
- A คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ
- E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน

จากความสัมพันธ์ของ Tauc's plot method โดยกำหนดให้แกน $y=(\alpha hv)^2$ และ $x=hv$ ทำให้เมื่อลากเส้นตัดกับแกนพลังงานโฟตอน (x-axis) ณ จุดตัดเส้นตรงสามารถประมาณได้ค่าช่องว่างระดับพลังงานดังภาพที่ 6a [20] ข้อมูลจากตารางที่ 5 เมื่อทำการเติมไนโอเบียมและแทนทาลัมลงไปชั้นนำอิเล็กตรอนทำให้ระดับช่องว่างพลังงานลดลงจาก 3.59 eV (Pure-TiO₂) โดยเมื่อทำการเติมที่สัดส่วน 5%Nb Doped-TiO₂ และ 5%Ta Doped-TiO₂ ระดับช่องว่างพลังงานลดลงเป็น 3.52 eV และ 3.51 eV ตามลำดับ และลดลงต่ำสุดที่สัดส่วนการเติมรวม 2%Nb:3%Ta Co-Doped TiO₂ มีค่า 3.38 eV ซึ่งถือว่าต่ำเกินไปจนทำให้เกิดปัญหาในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังชั้น FTO ทำให้ค่า V_{oc} มีค่าต่ำสุดในวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนทุกสัดส่วนที่ทำการเติมไอออนมีค่าที่ 0.96 V เป็นผลมาจากเกิดการสูญเสียไอออนของไนโอเบียม (Nb^{5+}) และแทนทาลัม (Ta^{5+}) ให้กับไทเทเนียม (Ti^{4+}) โดยที่สัดส่วนที่มีระดับช่องว่างพลังงานเหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์มากที่สุดคือ 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ ซึ่งมีระดับช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 3.43 eV ซึ่งเป็นระดับช่องว่างที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนระหว่างชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ [21] จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่แสดงถึงเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างชั้นเพอร์รอฟสไกต์ไปยังวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนได้เป็นอย่างดี จึงส่งผลให้ค่า V_{oc} ของสัดส่วนการเติมรวมดังกล่าวมีค่าสูงที่สุดถึง 0.99 V ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5 ระดับช่องว่างพลังงานของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน

วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน	Energy band gaps (eV)
Pure-TiO ₂	3.5870
5%Nb Doped-TiO ₂	3.5222
3Nb:2Ta Co-Doped TiO ₂	3.4284
2Nb:3Ta Co-Doped TiO ₂	3.3842
5%Ta Doped-TiO ₂	3.5125

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วยเทคนิค Photoluminescence เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่มีผลต่อวัสดุชั้นเฟอร์รอฟสไกต์และผลวิเคราะห์จากภาพที่ 6b เมื่อทำการตรวจวัดพบว่าที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ มีค่าความเข้ม Photoluminescence ต่ำที่สุด การที่ความเข้ม Photoluminescence ต่ำแสดงถึงชั้นเฟอร์รอฟสไกต์ที่ถูกกระตุ้นจากพลังงานโฟตอนและคายพลังงานออกมาได้ง่าย กล่าวคือสามารถแยกอิเล็กตรอนและโฮลได้ดี โดยมีปัจจัยมาจากการความสมบูรณ์ของรอยต่อเฟอร์รอฟสไกต์กับวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน แสดงออกถึงการถ่ายโอนประจุ (charge transfer) ได้ดีขึ้นส่งผลให้มีค่า J_{sc} ที่มากขึ้น [22] การเติมร่วมที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ มีค่า 16.21 mA/cm² ซึ่งมากกว่าสัดส่วน Pure-TiO₂ ที่มีค่า 15.02 mA/cm² ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้น

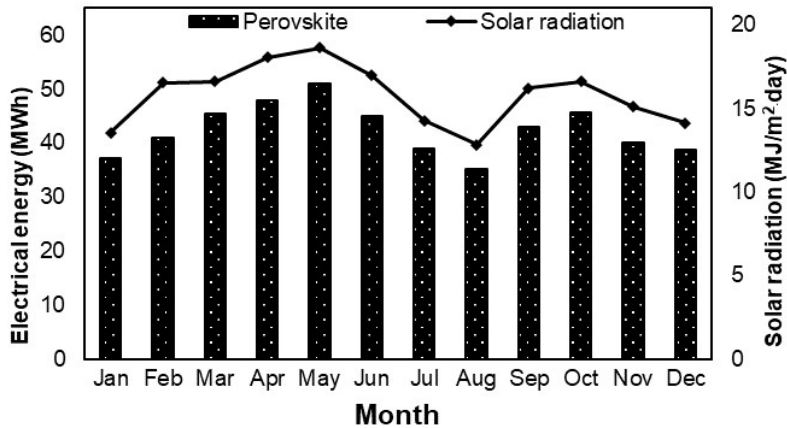


ภาพที่ 6 (a) Tauc's plot ของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน (b) การวิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วยเทคนิค Photoluminescence

ทางผู้วิจัยมีแนวคิดในการออกแบบการออกแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฟอร์รอฟสไกต์ เมื่อสังเกตจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ทำการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เดี่ยวจะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 26.10% เมื่อทำการสร้างเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิกอนเดี่ยวพบว่าปัจจัยทำให้ประสิทธิภาพลดลงมาอยู่ที่ 20.38% เป็นสมมติฐานได้ว่าในการประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีการสูญเสียประสิทธิภาพถึง 21.92% ในทำนองเดียวกันเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฟอร์รอฟสไกต์ที่มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 10.37% เมื่อประกอบเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฟอร์รอฟสไกต์จะทำให้มีประสิทธิภาพลดลงเหลือ 8.10% เมื่อทำการประเมินจากผลผลิตพลังงานไฟฟ้าใน 1 ปี บนพื้นที่ขนาด 1,000 m² บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยใช้ข้อมูลค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน พ.ศ. 2562 ณ สถานีตรวจวัดศูนย์บริการวิชาการที่ 7 จังหวัดเชียงใหม่ [23] จากการจำลองออกแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฟอร์รอฟสไกต์ซึ่งแต่ละเซลล์มีพื้นที่รับแสง 16 mm² จำเป็นต้องต่อกันแบบขนาน 4,778 Cell และต่อแบบอนุกรม 57 Cell ทำให้ได้กำลังไฟสูงสุดที่ 452.67 W ที่กระแสไฟสูงสุด 10.88 A และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 41.60 V โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฟอร์รอฟสไกต์มีขนาด 4.36 m² จากกราฟที่ 7 จำลองผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เบื้องต้นพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฟอร์รอฟสไกต์สามารถติดตั้งในพื้นที่ได้จำนวน 220 panel คิดเป็นพื้นที่รับแสงขนาด 959.2 m² จากตารางที่ 6 พบว่า ในแต่ละเดือนการผลิตพลังงานไฟฟ้าเป็นไปตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และใน 1 year แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฟอร์รอฟสไกต์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 126.73 MWh/year

ตารางที่ 6 ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

เดือน	ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (MJ/m ² ·day)	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (MWh/month)
มกราคม	13.530	9.05
กุมภาพันธ์	16.535	11.06
มีนาคม	16.611	11.11
เมษายน	18.054	12.08
พฤษภาคม	18.615	12.45
มิถุนายน	16.969	11.35
กรกฎาคม	14.256	9.54
สิงหาคม	12.816	8.57
กันยายน	16.203	10.84
ตุลาคม	16.616	11.12
พฤศจิกายน	15.087	10.09
ธันวาคม	14.128	9.45



ภาพที่ 7 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

สรุปผลการวิจัย

การเติมร่วมไอออนของไนโอเบียมและแทนทาลัมในวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยยืนยันด้วยการเคลื่อนที่ไปยังมุมที่ลดลงของระนาบ 101 โดยเปลี่ยนจากมุม 2θ ที่ 25.31° (Pure- TiO_2) เป็น 25.01° (3%Nb:2%Ta Co-doped TiO_2) เนื่องจากการลดลงของระยะห่างระหว่างแลตทิซในโครงสร้าง เนื่องจากรัศมีไอออนของไนโอเบียมและแทนทาลัมมีขนาดเล็กกว่า จากการวิเคราะห์ Lattice parameter พบว่าการเติมเดี่ยวและการเติมร่วมได้เพิ่มได้ทำให้ Lattice constant เปลี่ยนแปลงนับเป็นข้อพิสูจน์ในความสำเร็จในการเติมร่วมได้อีกนัยหนึ่ง นอกจากนั้นยังสามารถปรับปรุงระดับช่องว่างพลังงานของชั้นนำอิเล็กตรอนให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนผ่านได้อย่างง่ายด้วยการลดลงของช่องว่างระดับชั้นพลังงานที่เหมาะสมคือ 3.43 eV ใน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO_2 และส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเพิ่มขึ้นสูงถึง 0.99 V อีกทั้งการเติมร่วมไอออนของไนโอเบียมและแทนทาลัมยังส่งผลให้การหมุนเคลือบวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนบนพื้นผิว FTO ครอบคลุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผล Photoluminescence การเติมร่วมดังกล่าวสามารถช่วยให้รอยต่อระหว่างชั้นนำอิเล็กตรอนและชั้นเพอร์รอฟสไกต์ที่สมบูรณ์ซึ่งยืนยันได้จากค่าความเข้ม Photoluminescence ที่ต่ำที่สุดทำให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นสูงถึง 16.21 mA/cm^2 โดยผลของการเติมร่วมของไอออนไนโอเบียมและแทนทาลัมในวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนส่งเสริมให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO_2 เพิ่มขึ้นมาถึง 10.37% จาก 9.71% (Pure-

TiO₂) ถือว่าประสบความสำเร็จในการเติมร่วมไอออนของโลหะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีการจำลองการติดตั้งและผลิตพลังงานไฟฟ้าในพื้นที่ขนาด 1,000 m² ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ถึง 126.73 MWh/year

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนวิจัยแก่คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ ที่ให้การอนุเคราะห์สถานที่ในการวิจัย และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ ในการอนุเคราะห์เครื่องมือตรวจวัดสำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018). In: กระทรวงพลังงาน, editor.
- [2] Kojima A., Teshima K., Shirai Y., Miyasaka T. (2009). Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. **Journal of the American Chemical Society**. 131 (17), 6050-6051.
- [3] Xu F., Zhang T., Li G., Zhao Y. (2017). Synergetic Effect of Chloride Doping and CH₃NH₃PbCl₃ on CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x Perovskite-Based Solar Cells. **ChemSusChem**. 10 (11), 2365-2369.
- [4] Ren X., Yang D., Yang Z., Feng J., Zhu X., Niu J., et al. (2017). Solution-Processed Nb:SnO₂ Electron Transport Layer for Efficient Planar Perovskite Solar Cells. **ACS Applied Materials & Interfaces**. 9 (3), 2421-2429.
- [5] ปันล่า ร., อินทนิเวศน์ อ., ชูพันธ์ ส., เรือนคำ พ. (2020). การใช้ Cu₂O CuO และ PEDOT: PSS เป็นวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ สำหรับพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์. **Life Sciences and Environment Journal**. 21 (2), 374-384.
- [6] Abbasi S., Ruankham P., Passatorntaschakorn W., Khampa W., Musikpan W., Bhoomanee C., et al. (2023). A new single-step technique to fabricate transparent hydrophobic surfaces utilizable in perovskite solar cells. **Applied Surface Science**. 613, 155969.
- [7] Song J., Li S.P., Zhao Y.L., Yuan J., Zhu Y., Fang Y., et al. (2017). Performance enhancement of perovskite solar cells by doping TiO₂ blocking layer with group VB elements. **Journal of Alloys and Compounds**. 694, 1232-1238.
- [8] Wu Y., Song J., Wu X., Qiu C., Yin X., Hu L., et al. (2022). Highly efficient and stable ZnO-based perovskite solar cells enabled by a self-assembled monolayer as the interface linker. **Chemical Communications**. 58 (66), 9266-9269
- [9] Liang C., Li P., Zhang Y., Gu H., Cai Q., Liu X., et al. (2017). Mild solution-processed metal-doped TiO₂ compact layers for hysteresis-less and performance-enhanced perovskite solar cells. **Journal of Power Sources**. 372, 235-244.
- [10] Liu D., Li S., Zhang P., Wang Y., Zhang R., Sarvari H., et al. (2017). Efficient planar heterojunction perovskite solar cells with Li-doped compact TiO₂ layer. **Nano Energy**. 31, 462-468.
- [11] Ono L.K., Raga S.R., Remeika M., Winchester A.J., Gabe A., Qi Y. (2015). Pinhole-free hole transport layers significantly improve the stability of MAPbI₃-based perovskite solar cells under operating conditions. **Journal of Materials Chemistry A**. 3 (30), 15451-15456.
- [12] Chen B., Yang M., Priya S., Zhu K. (2016). Origin of J-V Hysteresis in Perovskite Solar Cells. **The Journal of Physical Chemistry Letters**. 7 (5), 905-917.

- [13] Khan M.I., Mukhtar A., Alwadai N., Irfan M., Haq I-u., Albalawi H., et al. (2022). Improving the Structural, Optical and Photovoltaic Properties of Sb- and Bi- Co-Doped MAPbBr₃ Perovskite Solar Cell. **Coatings [Internet]**. 12 (3), 386.
- [14] Kim D.H., Han G.S., Seong W.M., Lee J-W., Kim B.J., Park N-G., et al. (2015). Niobium Doping Effects on TiO₂ Mesoscopic Electron Transport Layer-Based Perovskite Solar Cells. **ChemSusChem**. 8 (14), 2392-2398.
- [15] Ranjan R., Prakash A., Singh A., Singh A., Garg A., Gupta R.K.. (2018), Effect of tantalum doping in a TiO₂ compact layer on the performance of planar spiro-OMeTAD free perovskite solar cells. **Journal of Materials Chemistry A**. 6 (3), 1037-1047.
- [16] Cai F., Yang L., Yan Y., Zhang J., Qin F., Liu D., et al. (2017). Eliminated hysteresis and stabilized power output over 20% in planar heterojunction perovskite solar cells by compositional and surface modifications to the low-temperature-processed TiO₂ layer. **Journal of Materials Chemistry A**. 5 (19), 9402-9411.
- [17] Li M., Zhao Y., Zhu L., Song J., Qiang Y. (2019). Performance enhancement of perovskite solar cells via Nb/Ta-doped TiO₂ mesoporous layers. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**. 30 (9), 9038-9044.
- [18] Zare Bidaki A., Abdizadeh H., Pourshaban E., Shadabroo M.S., Golobostanfard M.R. (2022). Comparing the planar and porous Nb-doped TiO₂ photoanode of triple cation perovskite solar cells. **Materials Science in Semiconductor Processing**. 138, 106259.
- [19] Wang H., Zhao C., Yin L., Li X., Tu X., Lim E.G., et al. (2021). W-doped TiO₂ as electron transport layer for high performance solution-processed perovskite solar cells. **Applied Surface Science**. 563, 150298.
- [20] ลครไทย อ. (2018). พิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมิเนียมที่เตรียมด้วยเทคนิครีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงโดยโหมดโลหะ โหมดทรานซิชัน และโหมดออกไซด์. **KKU Science Journal**. 47 (2), 327-338.
- [21] Chen K.T., Hsu C.H., Jiang S.C., Liang L.S., Gao P., Qiu Y., et al. (2022). Effect of Annealing Temperature on Tantalum-Doped TiO₂ as Electron Transport Layer in Perovskite Solar Cells. **IEEE Transactions on Electron Devices**. 69 (3), 1149-1154.
- [22] Abbasi S., Wang X., Tipparak P., Bhoonanee C., Ruankham P., Liu H, et al. (2023). Proper annealing process for a cost effective and superhydrophobic ambient-atmosphere fabricated perovskite solar cell. **Materials Science in Semiconductor Processing**. 155, 107241.
- [23] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ผลการตรวจวัดข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2562. งานพัฒนาฐานข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์และระบบเชื่อมโยงฐานข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของประเทศไทย: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน; 2564 สืบค้นเมื่อ 1 มีนาคม 2566, จาก <http://www.irradiancedata.dede.go.th:8080/report>.