

อิทธิพลของสัดส่วนการเติมไนโอเบียม และแทนทาลัม ในชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์rontอ
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2566

อิทธิพลของสัดส่วนการเติมไนโอเบียม และแทนทาลัม ในชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์rontอ
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
สำนักบริหารและพัฒนานิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

อิทธิพลของสัดส่วนการเติมไนโอเบียม และแทนทาลัม ในชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ต่อ
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

ศุภกิตต์ นิลขาว

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นริญศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	อิทธิพลของสัดส่วนการเติมไนโอเบียม และแทนทาลัม ในชั้นนำ อิเล็กทรอนิกส์ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์
ชื่อผู้เขียน	นายศุภกิตติ์ นิลขาว
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์

บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ (PSCs) ได้รับการพัฒนาและเป็นที่สนใจของกลุ่มนักวิจัยมากขึ้นโดยมีความพยายามในการเพิ่มประสิทธิภาพ และการพัฒนาเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยได้เลือกแนวทางในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ (ETLs) ด้วยการเติมร่วมไอออนธาตุโลหะอย่างไนโอเบียม (Nb^{5+}) และแทนทาลัม (Ta^{5+}) โดยที่กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะทำที่อุณหภูมิทั้งหมดของกระบวนการที่ไม่เกิน 150°C ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิที่ต่ำ นอกจากนั้นการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นี้ใช้วิธีการหมุนเคลือบซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและต้นทุนต่ำ ในการสร้างเซลล์ได้ทำการศึกษาผลของการเติมไนโอเบียม และแทนทาลัมที่สัดส่วน 5%Nb และ 5%Ta สำหรับการเติมแบบปกติ นอกจากนั้นยังทำการเติมสารทั้งสองชนิดรวมที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta และ 2%Nb:3%Ta โดยจะทำการเปรียบเทียบกับเซลล์อ้างอิงที่ใช้ Pure- TiO_2 จากการศึกษาพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 11.05% ซึ่งมากกว่าเซลล์อ้างอิง ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 9.71% นอกจากนั้นพบว่าการเติมไนโอเบียม และแทนทาลัมสามารถช่วยในกระบวนการหมุนเคลือบวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนั้นการเติมร่วมของไนโอเบียมและแทนทาลัมยังลดช่องว่างระดับพลังงานให้เหมาะสมลดข้อบกพร่องบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์และเพอร์รอฟสไกต์ได้ และยังสามารถเพิ่มการถ่ายโอนประจุผ่านชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย นอกจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการจำลองการนำเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ไปใช้งานจริงเป็นเวลา 1 ปี พบว่าสามารถผลิตไฟฟ้าได้ถึง 234.25 MWh/year

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์, การเติมร่วม, ไนโอเบียม, แทนทาลัม

Title	EFFECT OF DOPING RATIO OF NIOBIUM AND TANTALUM IN THE ELECTON TRANSPORTING LAYER UPON THE EFFICIENCY OF PEROVSKITE SOLAR CELL
Author	Mr. SUPAKIT NILKHAO
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Associate Professor Dr. Akarin Intaniwet

ABSTRACT

Perovskite solar cells (PSCs) have garnered significant interest among researchers due to their potential to offer high efficiency at a low cost. In this study, the focus is on optimizing the efficiency of PSCs using titanium dioxide (TiO_2) as electron transport layers (ETLs) by co-doping niobium (Nb^{5+}) and tantalum (Ta^{5+}) metal ions. The solar cell fabrication process takes place at a low temperature, not exceeding 150°C . Additionally, the fabrication of these solar cells uses a simple and cost-effective spin-coating method. The researchers investigated the effect of adding 5% Nb and 5% Ta to the cells, as well as co-doping 3% Nb:2% Ta and 2% Nb:3% Ta with Pure- TiO_2 used as the reference proportion. The results showed that solar cells with 3% Nb:2% Ta achieved the highest efficiency of 11.05%, which was higher than that of Pure- TiO_2 solar cells, which only achieved an efficiency of 9.71%. The addition of Nb and Ta helped to improve the ETLs material, and co-doping of these metals optimized the energy gap. This process can reduce defects at the junction between the ETLs and the perovskite and enhance charge transfer through the ETLs. In addition, the researchers simulated the operation of the PSCs for one year, which resulted in an estimated energy production of 234.25 MWh/year of electricity.

Keywords : PSCs, Titanium dioxide, Co-Doped, Low-Temperature, Nb and Ta

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีอาจสำเร็จลุล่วงได้ดี ถ้ามิได้รับการสนับสนุนช่วยเหลือจากผู้อุปการะหลายท่าน ทางผู้วิจัยทราบถึงความกรุณาอย่างสูงจึงขอขอบพระคุณผู้ให้การสนับสนุนอันประกอบไปด้วย

โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนที่ได้ทำการสนับสนุนทุนการศึกษาในระดับชั้นบัณฑิตศึกษาและงบประมาณสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาในการดำเนินงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีคณะท่านรองศาสตราจารย์ ดร.ดวงมณี ว่องรัตนะไพศาล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ เรือนคำ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือ รวมถึงคำปรึกษาและความรู้ที่เป็นประโยชน์อย่างสูง รวมถึงกลุ่มเจ้าหน้าที่นักวิจัย ดร.ชวลิต ภูมณี น.ส.วรพรหม พัชรรัชกร น.ส.ณัฐชา คำบุญเกิด และอีกหลายท่าน ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือเป็นอย่างดีโดยตลอด

ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์ ที่ได้สละเวลาให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษาหลักของงานวิจัยนี้ นอกจากนั้นท่านยังได้ให้คำแนะนำคำปรึกษา แนวคิดความรู้มากมายในการดำเนินงานวิจัยอันเป็นประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัย นอกจากนั้นยังมีท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี และท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร ที่ได้คอยมอบคำแนะนำคำปรึกษา เกี่ยวกับงานวิจัยนี้เพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จราบรื่นมาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ทั้งนี้ขอขอบคุณทุกๆ ท่านโดยรอบที่คอยรับฟัง ช่วยเหลือ แก้ไขปัญหาพร้อมให้คำปรึกษามาเป็นอย่างดีและให้การสนับสนุนสม่ำเสมอมาโดยตลอด ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ศุภกิตต์ นิลขาว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	6
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร.....	8
2.1. วัสดุเพอร์รอฟสไกต์.....	8
2.2. เซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.3. เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	10
2.3.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	10
2.4. สมบัติพื้นฐานของไนโอเบียม และแทนทาลัม.....	12
2.5. สมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	13
2.6. เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	14

2.6.1	เทคนิคการหมุนเคลือบ.....	14
2.6.2	เทคนิคการเคลือบด้วยไอระเหย	16
2.6.3	เทคนิคการสปัตเตอร์ริง	17
2.7.	การตรวจวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	17
2.7.1	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	18
2.7.2	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์	19
2.7.3	การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	20
2.7.4	การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์	21
2.8.	ตรวจสอบเอกสาร	23
บทที่ 3	วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย	42
3.1	สารเคมี.....	42
3.2	วัสดุ และอุปกรณ์.....	45
3.3	วิธีดำเนินการ	47
3.4	การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์	49
3.4.1	การเตรียมกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า	49
3.4.2	การสร้างฟิล์มชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์.....	50
3.4.2.1	การสังเคราะห์วัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์	50
3.4.2.2	การสร้างชั้นฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์	52
3.4.3	การสร้างชั้นเพอร์รอฟสไกต์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.....	52
3.4.3.1	การเตรียมสารละลายเพอร์รอฟสไกต์	52
3.4.3.2	การเคลือบวัสดุเพอร์รอฟสไกต์.....	53
3.4.4	การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	54
3.4.5	การสร้างวัสดุชั้นนำโฮล	54
3.4.6	การสร้างชั้นนำไฟฟ้าด้านหลังด้วยฟิล์มคาร์บอน	54

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	55
3.5.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์.....	55
3.5.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	55
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	56
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมของไนโอเบียมและ แทนทาลัมในชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์	56
4.1.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ (J-V curve)	56
4.1.2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของวัสดุชั้น นำอิเล็กทรอนิกส์ (J-V characteristics).....	59
4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีการเชื่อม ของไนโอเบียมและแทนทาลัมในชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์	61
4.2.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD).....	61
4.2.2 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM).....	62
4.2.2.1 การวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์	62
4.2.2.2 ภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	64
4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีการเชื่อมของ ไนโอเบียมและแทนทาลัมในชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์	66
4.3.1 วิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy.....	66
4.3.2 วิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วย Photoluminescence	69
4.4 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์	70
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย.....	73
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74

ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ.....	75
ภาคผนวก ข ผลงานทางวิชาการที่เผยแพร่.....	83
บรรณานุกรม.....	91
ประวัติผู้วิจัย.....	97



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่สัดส่วนการเติมต่างๆ	24
ตารางที่ 2 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนเป็น Ta-Doped TiO ₂	25
ตารางที่ 3 ข้อมูลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่าง Undoped TiO ₂ กับ 3%Nb-Doped TiO ₂	27
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนได้แก่ TiO ₂ , SnO ₂ และ TiO ₂ -SnO ₂	29
ตารางที่ 5 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนเป็น Mg-TiO ₂ ที่ปริมาณการเติมต่างๆ	33
ตารางที่ 6 ข้อมูลจากการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	35
ตารางที่ 7 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์	38
ตารางที่ 8 สารเคมี	42
ตารางที่ 9 วัสดุและอุปกรณ์	45
ตารางที่ 10 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	57
ตารางที่ 11 ค่าความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน	60
ตารางที่ 12 ข้อมูลมุม 2Theta ของระนาบ (101).....	62
ตารางที่ 13 เส้นผ่านศูนย์กลางเกรนของวัสดุเพอร์รอฟสไกต์.....	63
ตารางที่ 14 ระดับช่องว่างพลังงานของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน	68
ตารางที่ 15 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	72

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การจำแนกประเภทตามเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์.....	2
ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ.....	3
ภาพที่ 3 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์	4
ภาพที่ 4 แผนภาพแสดงระดับพลังงานของวัสดุเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	5
ภาพที่ 5 โครงสร้างโมเลกุลวัสดุเพอร์รอฟสไกต์.....	8
ภาพที่ 6 การเกิดพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	10
ภาพที่ 7 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	12
ภาพที่ 8 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ Body-center Cubic	12
ภาพที่ 9 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบออร์โทโรมบิก	13
ภาพที่ 10 การหมุนเคลือบแบบจิ้งหะเดี่ยว	15
ภาพที่ 11 (a) การหมุนเคลือบแบบสองจิ้งหะด้วยวิธีการหยด 2 ครั้ง และ (b) การหมุนเคลือบแบบสองจิ้งหะด้วยการหยดแล้วแช่สารละลาย	16
ภาพที่ 12 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางด้วยไอระเหย	16
ภาพที่ 13 กระบวนการเคลือบด้วยเทคนิคการสปัตเตอร์ริง	17
ภาพที่ 14 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	18
ภาพที่ 15 เครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุด้วยรังสีเอ็กซ์.....	19
ภาพที่ 16 (a) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและ (b) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด.....	20
ภาพที่ 17 เครื่องตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง.....	20
ภาพที่ 18 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์.....	21
ภาพที่ 19 ตัวอย่างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า.....	22

ภาพที่ 20 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ เพอร์
รอฟสไกต์ 23

ภาพที่ 21 แสดงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ 24

ภาพที่ 22 แสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายสำหรับชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ เพอร์
รอฟสไกต์ 26

ภาพที่ 23 แผนภาพ J-V Curve ของการเติมไนโอเบียมในชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์... 26

ภาพที่ 24 ภาพจาก AFM แสดงให้เห็นถึงความขรุขระของพื้นผิวชั้นนำอิเล็กตรอนเมื่อ (a) Undoped
SnO₂ และ (b) Nb-Doped SnO₂ 27

ภาพที่ 25 แผนภาพ I-V Curves ระหว่าง SnO₂ กับ 0.5%Nb-SnO₂ ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ เพอร์
รอฟสไกต์ 28

ภาพที่ 26 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นอิเล็กตรอนเป็น TiO₂-SnO₂..... 28

ภาพที่ 27 ระดับชั้นพลังงานของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนได้แก่ TiO₂ SnO₂ และ TiO₂-SnO₂..... 29

ภาพที่ 28 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่ผ่านการเตรียมสารละลายวัสดุชั้นนำ
อิเล็กตรอนด้วยเทคนิค Low temperature process 30

ภาพที่ 29 ผลวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่ผ่านการ
ปรับปรุงด้วยการเติมสารประกอบได้แก่ (a,e) TiO₂, (b,f) TiO₂:TOPD, (c,g) TiO₂:TOPD/C₆₀-ETA
และ (d,h) TiO₂:TOPD/PC₆₀BM 31

ภาพที่ 30 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนเป็น Mg-TiO₂.. 32

ภาพที่ 31 แผนภาพแสดงผลวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์..... 32

ภาพที่ 32 (a) โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ (b) แผนภาพระดับพลังงานของเซลล์
แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ 33

ภาพที่ 33 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ เพอร์
รอฟสไกต์ที่ใช้ชั้นนำอิเล็กตรอนเป็น (a) SC-TiO₂ และ (b) TO-TiO₂..... 34

ภาพที่ 34 ลักษณะพื้นผิวชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์จากกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอน 36

ภาพที่ 35 แผนภาพแสดงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนเป็น Nb-doped TiO ₂	36
ภาพที่ 36 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ 0%, 0.5%, 1%, 2.5% และ 5% Al-TiO ₂	37
ภาพที่ 37 แผนภาพการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (a) แบบสีย้อมไวแสง และ (b) แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	38
ภาพที่ 38 แผนภาพแสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	48
ภาพที่ 39 กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (FTO) ที่ผ่านการทำความสะอาด.....	49
ภาพที่ 40 โครงสร้างกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า.....	50
ภาพที่ 41 สารละลาย NbCl ₅ และ TaCl ₅	50
ภาพที่ 42 สารละลาย B จากการสังเคราะห์วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน.....	51
ภาพที่ 43 วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน TiO ₂ Nanoparticles.....	51
ภาพที่ 44 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการหุ้มเคลือบวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน.....	52
ภาพที่ 45 สารละลายวัสดุเพอร์รอฟสไกต์.....	53
ภาพที่ 46 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการหุ้มเคลือบวัสดุชั้นเพอร์รอฟสไกต์.....	53
ภาพที่ 47 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	54
ภาพที่ 48 เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	55
ภาพที่ 49 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า.....	57
ภาพที่ 50 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์.....	58
ภาพที่ 51 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน.....	60
ภาพที่ 52 (a) ผล XRD ของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่มุม 2Theta ตั้งแต่ 10°-80° (b) ผล XRD ที่ระนาบ (101).....	62
ภาพที่ 53 ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) Pure-TiO ₂ , (b) 5%Nb Doped-TiO ₂ , (c) 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO ₂ , (d) 2%Nb:3%Ta Co-doped TiO ₂ และ(e) 5%Ta Doped-TiO ₂	64

ภาพที่ 54 ภาพตัดขวางถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a-b)Pure-TiO ₂ และ (c-d) 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO ₂	66
ภาพที่ 55 (a) คุณสมบัติการส่องผ่านแสง (b) คุณสมบัติการดูดกลืนแสง ของชั้นฟิล์มวัสดุนำอิเล็กตรอน FTO/ETLs	67
ภาพที่ 56 Tauc's plot ของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน	68
ภาพที่ 57 การวิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วยเทคนิค Photoluminescence.....	69
ภาพที่ 58 ภาพถ่ายดาวเทียมจาก Google Earth	70
ภาพที่ 59 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	71



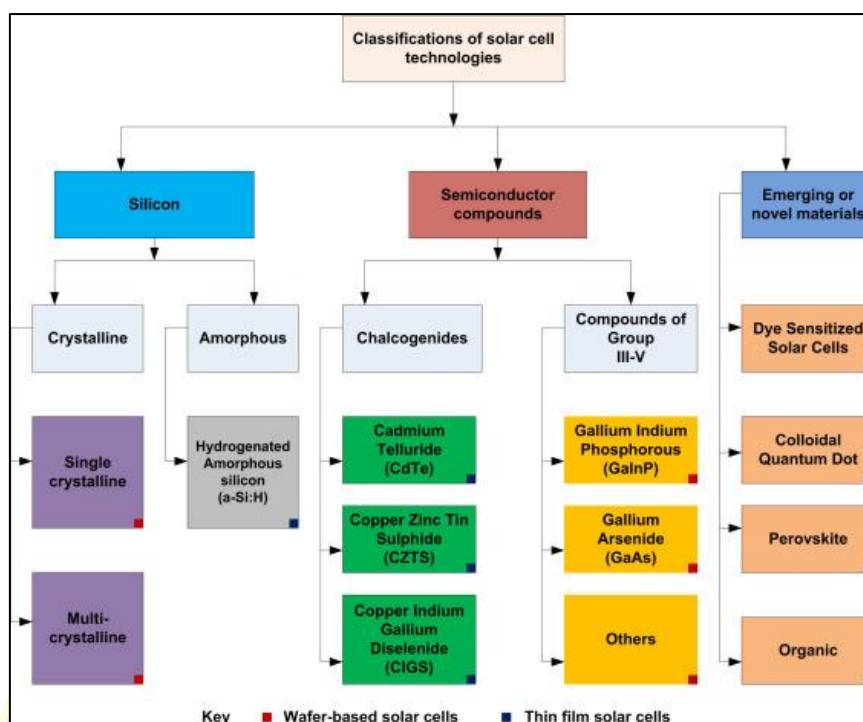
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้กำลังได้รับความนิยมและได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐเป็นอย่างมาก นโยบายในการพัฒนาระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกจากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกพ.ศ.2561-2580 (AEDP2018) ซึ่งมีเป้าหมายเพิ่มกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก เพิ่มศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทนร่วมการผลิตไฟฟ้าเดิมให้เพียงพอต่อความต้องการโดยให้มีสัดส่วนจากแผน AEDP2015 เดิม 10.04% ของความต้องการไฟฟ้าทั้งหมดเป็น 34.23% ในปี พ.ศ.2580 โดยแบ่งออกเป็นพลังงานแสงอาทิตย์ภาคพื้นดิน 9,290 MW และพลังงานแสงอาทิตย์ทุ่นลอยน้ำร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำ 2,725 MW ภายในปีพ.ศ.2580 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2562) ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นับเป็นที่น่าสนใจอย่างมากในปัจจุบัน ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวมีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง

แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์เชื่อมต่อกันที่สามารถรับพลังงานแสงอาทิตย์และสามารถเปลี่ยนออกมาเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงได้ ซึ่งจะสามารถนำไฟฟ้าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไปกักเก็บหรือนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ ในปัจจุบันเทคโนโลยีการเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท โดยถูกแบ่งออกจากวัสดุดูดซับแสง ดังภาพที่ 1 (Ibn-Mohammed et al., 2017) ซึ่งประกอบไปด้วยเทคโนโลยีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทซิลิกอน โดยจะแบ่งแยกออกไปเป็นแบบโครงสร้างแบบผลึกเดี่ยว ผลึกรวม และแบบฟิล์มบาง ประเภทที่สองจะเป็นเทคโนโลยีในกลุ่มที่ผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำที่ไม่ใช่ซิลิกอนซึ่งจะมีสมบัติเด่นในเรื่องความบางของตัวเซลล์ แต่มีข้อเสียในเรื่องประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าที่ต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากผลึกซิลิกอน เทคโนโลยีประเภทที่สามเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่เน้นพัฒนาต่อยอดจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางด้วยวัสดุดูดซับแสง ซึ่งได้รับความสนใจ และถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Dye Sensitized Solar Cells) (Qin et al., 2023) เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบควอนตัมดอท (Quantum Dot Solar Cells) (Huang et al., 2023) เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบสารอินทรีย์ (Organic Solar Cells) (Sun et al., 2023) และเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์ (Perovskite Solar Cells) (Prathan et al., 2020)

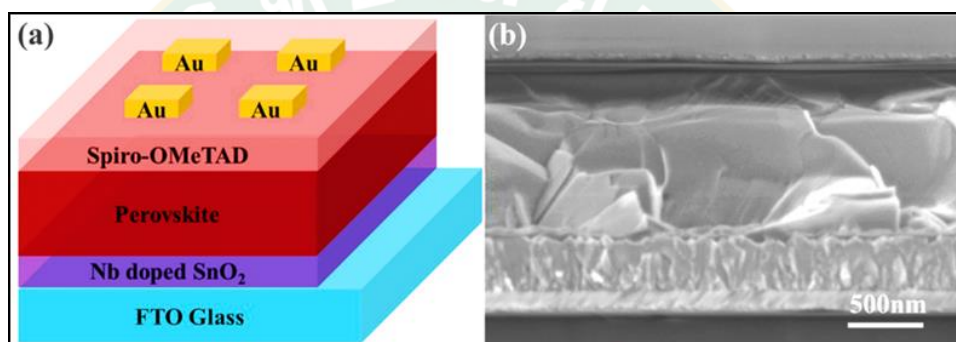


ภาพที่ 1 การจำแนกประเภทตามเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.095>

ในปี ค.ศ. 2010 ได้มีการรายงานถึงประสิทธิภาพจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์ที่สามารถทำได้ถึง 3.8% (Kojima et al., 2009) ภายหลังจากการรายงาน เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์จึงเป็นที่น่าสนใจ จึงมีการพัฒนาในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าขึ้นอย่างรวดเร็ว ในปี ค.ศ.2021 ได้มีการพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์ให้มีประสิทธิภาพสูงถึง 21.7% (Ma et al., 2020) แสดงดังภาพที่ 2 เหตุที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์ได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างรวดเร็ว อาจเป็นเพราะสารเพอร์ออฟสไกต์มีมากกว่า 100 ชนิด จึงมีความน่าสนใจและค้นคว้าเพื่อพัฒนาอีกมากมาย และด้วยสมบัติของสารกึ่งตัวนำทำให้สารที่มีโครงสร้างเพอร์ออฟสไกต์มีค่าการดูดซับแสงที่ดีในความหนาที่น้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน และด้วยเทคโนโลยีในการผลิตที่สามารถทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์ผลิตขึ้นมาได้ง่ายขึ้น เนื่องจากความบางของเซลล์จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับหลากหลายประเภทงานพื้นผิวต่างๆ เช่น พื้นผิวอาคาร พื้นผิวยานพาหนะที่ต้องการน้ำหนักที่เบา และมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าแบบซิลิกอน จึงได้รับความนิยมและมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว

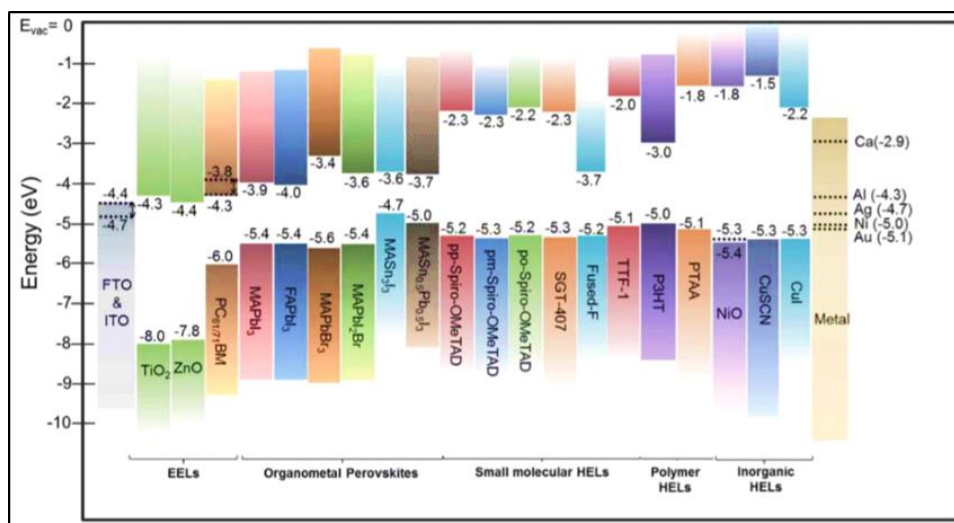
เซลล์แสงอาทิตย์เพอร์ออฟสไกต์มีลักษณะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้น ๆ ซึ่งแต่ละชั้นมีหน้าที่แตกต่างกัน ได้แก่ ชั้นชั้นนำประจุลบ (Upper Electrode) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้นนำอิเล็กตรอน (Electron transporting layer) ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของอิเล็กตรอนเพื่อผ่านไปยังชั้นนำประจุลบโดยชั้นนี้จะมีคุณสมบัติสกัดกั้นโฮลไม่ให้เคลื่อนที่ผ่าน ชั้นเพอร์ออฟสไกต์ (Perovskite layer) ทำหน้าที่เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นมา ชั้นนำโฮล (Hole Transporting Layer) ทำหน้าที่ตรงกันข้ามกับชั้นนำอิเล็กตรอนโดยชั้นนี้จะยอมให้โฮลเคลื่อนผ่าน แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนเคลื่อนผ่าน สุดท้ายคือชั้นชั้นนำประจุบวก (Back Electrode) ทำหน้าที่เพื่อให้ประจุบวกไหลผ่านออกจากตัวเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ครบวงจรแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์

ที่มา : <https://doi.org/10.1021/acsami.6b13362>

ในด้านการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ช่องว่างระดับพลังงานของสารเพอร์ออฟสไกต์ ช่องว่างระดับพลังงานของวัสดุที่นำมาทำเป็นชั้นนำอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งมีผลต่อการถ่ายเทอิเล็กตรอนอิสระและโฮล รวมถึงคุณภาพของรอยต่อชั้นวัสดุในแต่ละชั้นภายในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งหมดนี้มีผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น เมื่อพิจารณาถึงแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์ออฟสไกต์จะพบว่ามียุหลายแนวทางด้วยกัน เช่น แนวทางในการพัฒนาผ่านการเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสงอาทิตย์ เพื่อที่จะให้ได้ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ถ่ายเทไปยังสารกึ่งตัวนำสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด โดยในแนวทางนี้สามารถทำได้หลายวิธีเช่น การปรับปรุงสารเพอร์ออฟสไกต์ดูดกลืนแสงด้วยการปรับเปลี่ยนอะตอมในโครงสร้างเพอร์ออฟสไกต์ โดยนิยมทำการเปลี่ยนโมเลกุลของตำแหน่ง B-site เพื่อสร้างช่องว่างระดับพลังงานที่เหมาะสม ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น (Xu et al., 2017) การปรับปรุงชั้นนำอิเล็กตรอนด้วย



ภาพที่ 4 แผนภาพแสดงระดับพลังงานของวัสดุเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

ที่มา : <https://doi.org/10.3390/en9110861>

การเติมโลหะทรานซิชันหมู่ 5 เพื่อให้ไอเล็กตรอนอิสระ และยังมีผลต่อช่องว่างระดับพลังงานของชั้นนำไอเล็กตรอนทำให้เกิดรอยต่อระดับพลังงานที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ของไอเล็กตรอนอิสระ เป็นผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์เพิ่มขึ้น (Song et al., 2017) และการปรับปรุงพื้นผิวของชั้นเพอร์รอฟสไกต์ด้วยการปรับปรุงขั้นตอนการเคลือบเพื่อลดช่องว่างบริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุให้น้อยที่สุด (Shi et al., 2017) เป็นต้นวิธีการปรับปรุงชั้นนำไอเล็กตรอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในต้นทุนที่ไม่สูงมากนัก จากการศึกษาได้มีการนำโลหะจากสารประกอบโลหะคลอไรด์ เช่น ไนโอเบียมจากไนโอเบียมคลอไรด์ (NbCl_5) แทนทาลัมจากแทนทาลัมคลอไรด์ (TaCl_5) ดีบุก (SnCl_4) และทังสเตน (WCl_6) เป็นต้น เติมในชั้นวัสดุนำไอเล็กตรอนเช่น TiO_2 , SnO_2 และ ZnO เป็นต้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้น (Liang et al., 2017) จากการศึกษาการเติมสารประกอบเข้าไปในชั้นนำไอเล็กตรอนพบมีเพียงการเติมแบบเติมเพียงชนิดเดียว (Ren et al., 2017) และยังพบกรณีการเติมสารประกอบแบบเติมคู่ (Co-doped) ไปยังชั้นนำไอเล็กตรอนน้อยมาก ทั้งนี้ยังมีสารประกอบจำนวนมากที่สามารถเติมไปในชั้นนำไอเล็กตรอนและทำให้ช่องว่างระดับพลังงานของวัสดุชั้นนำไอเล็กตรอนดังกล่าวเปลี่ยนแปลง ย่อมมีผลโดยตรงกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นการเติมสารประกอบแบบเติมคู่จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการเติมสารประกอบในชั้นนำไอเล็กตรอน

สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาชั้นนำไอเล็กตรอนโดยใช้การเติมสารประกอบโลหะคลอไรด์แบบเติมร่วม (Co-Doped) ในชั้นนำไอเล็กตรอนที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นวัสดุชั้นนำไอเล็กตรอน จากการศึกษางานวิจัย (Song et al., 2017) และ (Ranjan et al., 2018)

ที่ได้ทำการศึกษาผลการเติมไนโอเบียม (Nb^{5+}) และแทนทาลัม (Ta^{5+}) ในไทเทเนียมไดออกไซด์บริเวณชั้นนำอิเล็กตรอนพบว่าสารที่เติมลงไปส่งผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น และสามารถลดการเกิดฮิสเทอรีซิสลง เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สาร TiO_2 ที่ไม่ผ่านการเติมสารใด จากการค้นหาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ารายงานการสร้างชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์ออฟสไกด์ที่นำสารทั้ง 2 ชนิดมาทำการเติมพร้อมกันโดยเป็นส่วนต่อกันยังไม่ได้รับความสนใจมากนักและการเติมไอออนโลหะไปในชั้นนำอิเล็กตรอนสามารถเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านของอิเล็กตรอนได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจสร้างชั้นนำอิเล็กตรอนจากการเติมไอออนของไนโอเบียมและแทนทาลัมโดยมีส่วนต่อกัน ซึ่งสารประกอบโลหะคลอไรด์ทั้ง 2 ชนิดจะถูกนำมาผ่านกระบวนการให้เหลือเพียงอะตอมโลหะของธาตุทั้ง 2 ชนิด โดยโลหะทั้ง 2 ชนิดสามารถแทนที่ในโครงสร้างของไทเทเนียมได้เนื่องจากมีรัศมีไอออนที่ใกล้เคียงกันในโครงสร้างของ TiO_2 ซึ่งเป็นวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนบนเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกด์โครงสร้างธรรมดา (Normal structure) ที่มี FTO เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหน้ามี $Cs_{0.17}FA_{0.83}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})_3$ เป็นวัสดุเพอร์ออฟสไกด์ และมีชั้นนำโฮลเป็น Spiro-OMeTAD ซึ่งมีระดับพลังงานที่เหมาะสมกัน (Elumalai et al., 2016) เปรียบเทียบได้จากแผนภาพความสัมพันธ์ระดับพลังงาน (ภาพที่ 4) ทำให้คาดการณ์ความเป็นไปได้ของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกด์ ที่มีประสิทธิภาพสูงได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสัดส่วนการเติมธาตุโลหะไนโอเบียม และแทนทาลัม ในชั้นนำอิเล็กตรอนที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกด์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. สร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกด์ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้โครงสร้างเซลล์แบบปกติ (Normal structure) ขนาด $2.0 \times 2.5 \text{ cm}^2$
2. ใช้เทคนิคการสร้างชั้นนำอิเล็กตรอน ชั้นเพอร์ออฟสไกด์ และชั้นนำโฮลด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ spin coating
3. ใช้การเติมไอออนของธาตุทรานซิชันไนโอเบียมและแทนทาลัม สำหรับสร้างเป็นชั้นนำอิเล็กตรอนจากไทเทเนียมไดออกไซด์
4. เตรียมอนุภาคนาโนของ $Nb-TiO_2$ $Ta-TiO_2$ และ $Nb:Ta-TiO_2$ จากสารละลายคลอไรด์ ได้แก่ $NbCl_5$ และ $TaCl_5$
5. ปรับสัดส่วนการเติมระหว่าง $NbCl_5$ และ $TaCl_5$ กับ TiO_5 ไม่น้อยกว่า 5 สัดส่วนการเติม

6. ตรวจสอบโครงสร้างผลึก และชนิดวัสดุของชั้นนำอิเล็กตรอน ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction)

7. ตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ ลักษณะสัณฐานวิทยา และภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ เพื่อดูความหนาแต่ละชั้นของตัวเซลล์ ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy)

8. ตรวจสอบคุณการดูดกลืนแสงของชั้นฟิล์มเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrophotometer)

9. ทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ภายใต้แสงเทียมที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงกระบวนการผลิตและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์
2. สามารถพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์จากการปรับปรุงชั้นนำอิเล็กตรอนด้วยการเติมโลหะแบบ 2 ชนิด ได้แก่ ไนโอเบียม และแทนทาลัม โดยเติมแบบสัดส่วนต่อกันได้

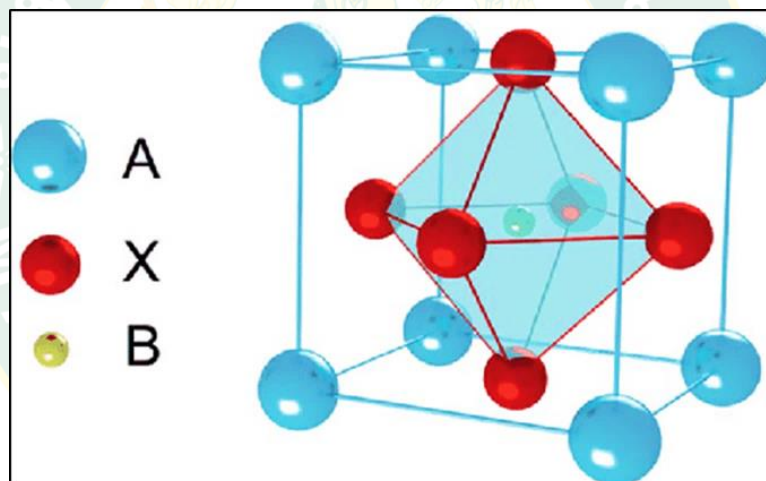
บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. วัสดุเพอร์รอฟสไกต์

วัสดุเพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) คือวัสดุที่เป็นสารประกอบระหว่างตะกั่วที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งมีสูตรโครงสร้างแบบกว้าง ๆ ลักษณะของโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์มีพื้นฐานมาจากหน่วยเซลล์แบบ cubic closed packing สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสูตรโครงสร้าง ABX_3 จะบอกธาตุที่อยู่ในตำแหน่งนั้น โดยที่ตำแหน่ง A คือสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่มีประจุบวก ซึ่งมีหน้าที่สามารถดุลประจุในโมเลกุลให้สมดุลได้ ตำแหน่ง B คือตำแหน่งของสารตัวนำมีประจุบวก และตำแหน่ง X จะแทนที่โมเลกุลที่มีประจุลบภาพที่ 5 เป็นต้น



ภาพที่ 5 โครงสร้างโมเลกุลวัสดุเพอร์รอฟสไกต์

ที่มา : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/EE/C5EE02194D>

ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์สามารถสังเคราะห์วัสดุเพอร์รอฟสไกต์ขึ้นมาได้มากกว่า 100 ชนิด ในด้านพลังงานได้มีการนำวัสดุเพอร์รอฟสไกต์นี้มาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะด้วยสมบัติของการดูดกลืนแสงที่ดี สามารถสังเคราะห์ขึ้นมาได้ง่าย สามารถปรับแต่งระดับพลังงานของวัสดุซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงได้ถูกนำมาวิจัยและพัฒนาต่อยอดอย่างกว้างขวาง

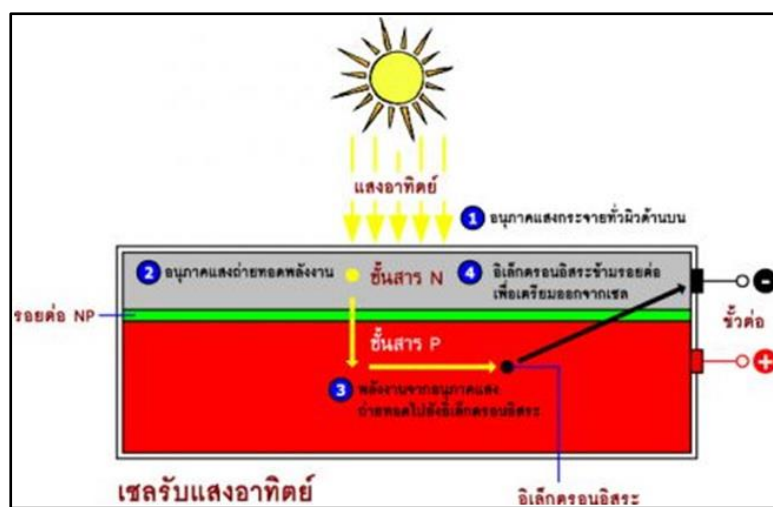
2.2. เซลล์แสงอาทิตย์

2.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดมาผ่านกระบวนการสังเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตตอบสนองต่อเทคโนโลยีพลังงานทดแทน และพื้นที่ที่แสงตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ รังสีของแสงที่มีพลังงานของอนุภาคคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่า โฟตอน จะถ่ายโอนพลังงานให้กับประจุอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลมีพลังงานเพียงพอที่จะเคลื่อนที่ได้อิสระ ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลอิสระเคลื่อนที่ เมื่อครบวงจรจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามากที่สุดในช่วงกลางวัน ซึ่งเหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาลดปัญหาการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงในช่วงกลางวัน

2.2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ คือการใช้สมบัติวัสดุเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง แสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีพลังงานมากกระทบกับสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการถ่ายทอดพลังงานกันระหว่างพลังงานจากแสงอาทิตย์จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) กระแสไฟฟ้างกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้ในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรง สารกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) เป็นสารที่สามารถนำอิเล็กตรอนได้ และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำโฮล เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิดนี้มาเชื่อมต่อกันทำให้เกิดรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (P-N Junction) เมื่อได้รับการกระตุ้นจากพลังงานแสงอาทิตย์มากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งต่อมาจะถูกแยกให้เนอิสระจากกันโดยใช้สนามไฟฟ้าจากรอยต่อพี - เอ็น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นเอ็นไปยังขั้วไฟฟ้าด้านหน้าและโฮลเคลื่อนผ่านชั้นพีไปยังขั้วไฟฟ้าด้านหลัง เมื่อทำการเชื่อมต่อขั้วให้ครบวงจรจะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การเกิดพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา : <http://www.diy-solarcell.com>

2.3. เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์

เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์ (Perovskite Solar Cells) ถูกสร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบหนึ่งที่มีสมบัติการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดี และมีสมบัติที่ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะฉะนั้นเป็นผลทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น จึงได้มีการนำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง

2.3.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์

เมื่อทำการแบ่งแยกเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์ตามโครงสร้างของเซลล์จะสามารถแบ่งออกได้ 2 โครงสร้าง แสดงดังภาพที่ 7 ได้แก่

1) โครงสร้างแบบธรรมดา (Normal Structure) มีส่วนประกอบดังนี้

- กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (Back electrode, Cathod) ทำหน้าที่เป็นขั้วทางไฟฟ้าทำจาก FTO หรือ ITO เป็นต้น

- วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน (Electron transporting layer, ETL) ทำหน้าที่เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งสามารถเลือกผ่านได้เฉพาะอิเล็กตรอนอิสระจากชั้นเพอร์อฟสไกต์ และยังเป็นชั้นที่ป้องกันการสัมผัสกันระหว่างขั้วตัวนำและชั้นเพอร์อฟสไกต์ โดยใช้สาร TiO_2 SnO_2 และ ZnO นำมาทำชั้นนำอิเล็กตรอน

- วัสดุชั้นเพอร์อฟสไกต์ (Perovskite layer) ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสง และสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น โดยทำมาจาก MAPbI_3 FAPbI_3 MAPbBr_3 หรือ MASnI_3

- วัสดุชั้นนำโฮล (Hole transporting layer, HTL) ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่สามารถเลือกผ่านได้เฉพาะโฮลอิสระที่ถูกสร้างจากชั้นเพอร์รอฟสไกต์ และยังเป็นตัวกลางที่นำโฮลไปยังขั้วทางไฟฟ้า โดยทำมาจากสาร Spiro-OMeTAD P3HT หรือ PTAA เป็นต้น

- ขั้วไฟฟ้าด้านหน้า (Front electrode) เป็นด้านที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นขั้วโลหะที่รับเฉพาะไอออนบวกที่ได้เกิดกระแสโฮลอิสระภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ก่อเป็นวงจรกระแสไฟฟ้า โดยสมบรูณ์นิยมใช้ อะลูมิเนียม เงิน นิกเกิล หรือ ทองคำ ในการสร้างขั้วไฟฟ้า

เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์โครงสร้างแบบธรรมดา มีข้อดีในด้านการประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดี แต่มีข้อด้อยในเรื่องความเสถียรในการสร้างพลังงานไฟฟ้าของเซลล์

2) โครงสร้างแบบกลับ (Inverted Structure) มีส่วนประกอบดังนี้

- กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า เป็นกระจก (Glass) ที่ทำการเคลือบด้วยโลหะนำไฟฟ้าขั้วแอโนด (Anode) ทำหน้าที่รับไอออนบวกที่ได้จากโฮลอิสระ

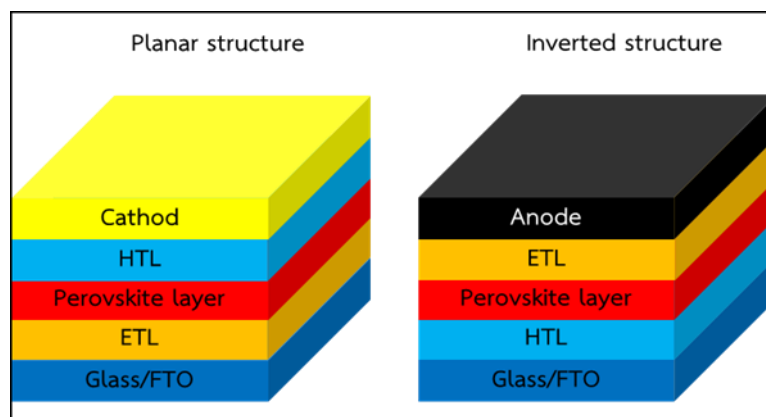
- วัสดุชั้นนำโฮล ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่สามารถเลือกผ่านได้เฉพาะโฮลอิสระที่ถูกสร้างจากชั้นเพอร์รอฟสไกต์ และยังเป็นตัวกลางที่นำโฮลไปยังขั้วทางไฟฟ้า

- วัสดุชั้นเพอร์รอฟสไกต์ ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสง และปลดปล่อยคู่อิเล็กตรอนและโฮลอิสระ

- วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน ทำหน้าที่เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งสามารถเลือกผ่านได้เฉพาะอิเล็กตรอนอิสระจากชั้นเพอร์รอฟสไกต์ และยังเป็นชั้นที่ป้องกันการสัมผัสกันระหว่างขั้วตัวนำและชั้นเพอร์รอฟสไกต์

- ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง เป็นฝั่งที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นขั้วโลหะที่รับเฉพาะไอออนลบที่ได้เกิดกระแสอิเล็กตรอนอิสระภายในเซลล์แสงอาทิตย์ รวมเป็นวงจรกระแสไฟฟ้าโดยสมบรูณ์

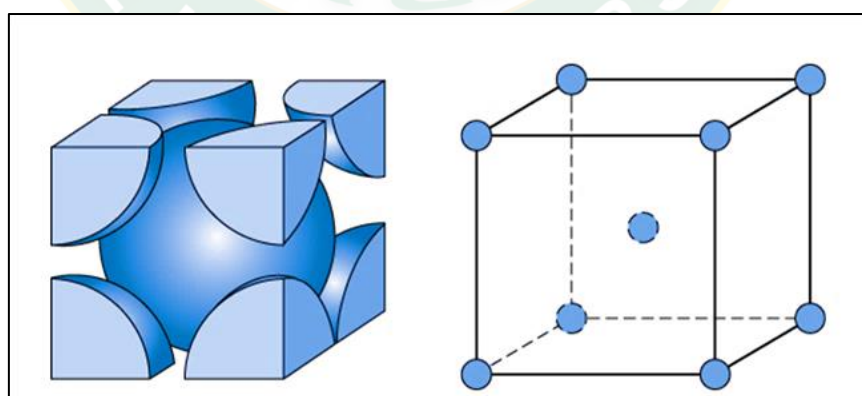
เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์โครงสร้างแบบกลับนี้ อาจจะทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ไม่ดีมากนักเมื่อเทียบกับแบบธรรมดา แต่มีจุดเด่นความเสถียรในการสร้างพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ที่ดีกว่าแบบธรรมดา



ภาพที่ 7 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

2.4. สมบัติพื้นฐานของไนโอเบียม และแทนทาลัม

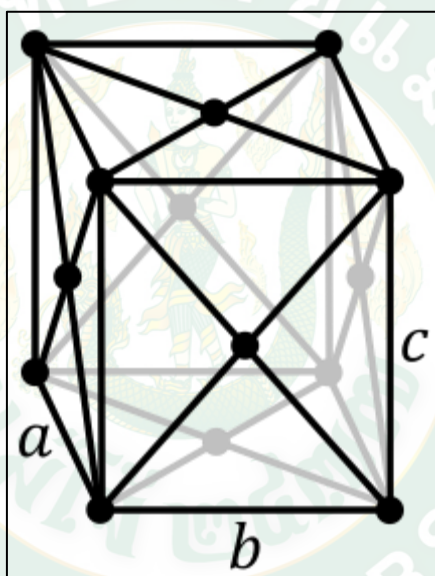
ไนโอเบียม (Niobium) จัดอยู่ในกลุ่มธาตุโลหะทรานซิชัน มีสัญลักษณ์คือ Nb มีเลขอะตอมคือ 41 มีลักษณะเป็นของแข็งสีเทา มันวาว มีลักษณะการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ (Khan et al.) $4d^4, 5s^1$ มีความหนาแน่น 8.57 g/cm^3 มีค่าความต้านทานไฟฟ้า $152 \text{ n}\Omega\text{-m}$ ที่อุณหภูมิ 0°C มีโครงสร้างผลึกแบบ Body-center Cubic ดังภาพที่ 8 และมีรัศมีไอออนของ Nb^{5+} ประมาณ 0.64 \AA ในการนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ โดยการนำไนโอเบียมเติมร่วมกับวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน TiO_2 ทำให้มีแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 2.83 eV (Liang et al., 2017) ซึ่งเหมาะสมกับการดูดกลืนพลังงานสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ และมีสมบัติการนำไฟฟ้าแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์



ภาพที่ 8 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ Body-center Cubic

ที่มา : <https://www.e-education.psu.edu/matse81/node/2132>

แทนทาลัม (Tantalum) เป็นธาตุโลหะทรานซิชัน มีเลขอะตอมที่ 73 มีสัญลักษณ์คือ Ta มีสถานะเป็นของแข็งลักษณะ สีน้ำเงินเทา มีความแข็งและเหนียว ทนต่อการกัดกร่อน และไม่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150°C มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก ดังภาพที่ 9 มีความหนาแน่นประมาณ 16.69 g/cm^3 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าประมาณ $131\text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ ที่อุณหภูมิ 20°C มีรัศมีไอออนของ Ta^{5+} ประมาณ 0.64 \AA แทนทาลัมเมื่อทำการเติมร่วมกับวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ TiO_2 ทำให้มีแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 3.47 eV (Ranjan et al., 2018) ซึ่งมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์โครงสร้างแบบปกติ เนื่องจากแทนทาลัมมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่ดี จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้านทั้งทางการแพทย์ ด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงอุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก เป็นต้น



ภาพที่ 9 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก

ที่มา : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orthorhombic-face-centered.svg>

2.5. สมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) ถือเป็นสารประกอบของโลหะไทเทเนียมซึ่งสามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ โดยทั่วไปไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง อาทิ อุตสาหกรรมสีทาภายนอกอาคาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอางเนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถหักเหและสะท้อนรังสียูวีที่เป็นพิษต่อผิวหนังได้ดี อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในการผลิตตัวเก็บประจุ และอุตสาหกรรมวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำเพื่อผลิตไฟฟ้าเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะสามารถแบ่งตามโครงสร้างผลึกออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบรูไทล์ (Rutile) ไทเทเนียมไดออกไซด์ทั่วไปมักพบในรูปแบบนี้ ซึ่งจะมีโครงสร้างแบบเทตระโกนัล (Tetragonal) ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์รูปแบบนี้จะมีความเสถียรสูงมาก มีความหนาแน่นประมาณ 4.250 g/cm^3

และมีช่องว่างพลังงาน (E_g) ประมาณ 3.1 eV (Linsebigler et al., 1995) ถัดมาเป็นรูปแบบอนาเทส (Anatase) ซึ่งจะพบได้น้อยรองลงมาจากแบบรูไทล์ โดยมีโครงสร้างแบบเททระโกนัล เมื่อได้รับความร้อนมากกว่า 915°C จะเปลี่ยนรูปแบบเป็นรูไทล์ โดยมีความหนาแน่นประมาณ 3.894 g/cm³ และช่องว่างพลังงาน (E_g) ประมาณ 3.3 eV สุดท้ายคือรูปแบบที่พบได้น้อยที่สุดคือ บรูคไคท์ (Brookite) ซึ่งจะมีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อแปรเปลี่ยนเป็นรูปแบบรูไทล์ได้เมื่อได้รับความร้อนที่ 750°C

สำหรับการพัฒนาอนุภาคระดับนาโนของวัสดุ TiO₂ ในปัจจุบันได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางเพื่อพัฒนาวัสดุ TiO₂ เพื่อตอบสนองต่อการนำมาใช้งานในด้านต่างๆ มากยิ่งขึ้น ไม่เพียงแต่นวัตกรรมในการลดขนาดอนุภาคของ TiO₂ ให้มีขนาดเล็กลง การพัฒนาของกระบวนการ วิธีการสังเคราะห์ที่ถูกต้องคิดค้นขึ้นมากมายหลากหลายวิธีเช่น การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ Sol-Gel การสังเคราะห์ด้วยไอระเหยเคมี (Chemical Vapor Deposition) เป็นต้น (Chen and Mao, 2007) การพัฒนาที่ก้าวหน้าทำให้เกิดนวัตกรรม เทคโนโลยีมากมายรวมถึงเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติทางแสงที่สามารถดูดกลืนแสงยูวีค่อนข้างสูงและมีช่องว่างระดับพลังงานประมาณ 3.0 eV ซึ่งเหมาะสมในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบกับไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเสถียร ไม่เป็นพิษ และมีต้นทุนที่ต่ำ จึงทำให้เป็นตัวเลือกในการนำมาพัฒนา

2.6. เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์

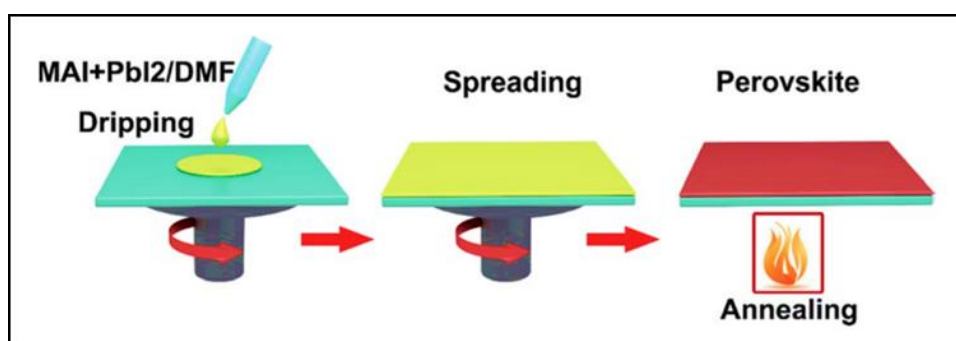
ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์จากฟิล์มบางระดับห้องปฏิบัติการนั้นสามารถสร้างขึ้นได้จากหลายเทคนิคการเตรียม ซึ่งในแต่ละเทคนิคย่อมได้มาซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์ โดยการเคลือบเพื่อสร้างชั้นฟิล์มบางนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น การหมุนเคลือบ การเคลือบด้วยไอระเหย และการสปัตเตอร์ริง เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1 เทคนิคการหมุนเคลือบ

เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบหมุนเคลือบ (Spin coating) เป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางที่ได้รับความนิยมมากในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะด้วยกระบวนการที่ง่าย สามารถกำหนดความหนาของชั้นฟิล์มบางได้ และค่อนข้างมีความสม่ำเสมอของพื้นผิวฟิล์มบาง แต่เทคนิคนี้ก็มีข้อกำหนดคือ สารเคลือบผิวต้องอยู่ในรูปของเหลวเท่านั้น จึงสามารถหมุนเคลือบไปบนพื้นผิวชิ้นงานได้ อีกทั้งปริมาณสารเคลือบที่ใช้ในการเคลือบเป็นปริมาณมาก เพราะในขณะที่ทำการหมุนสารของเหลวจะหลุดออกไปนอกชิ้นงานเป็นปริมาณมาก (Chen et al., 2018) โดยเทคนิคการหมุนเคลือบได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1) การหมุนเคลือบแบบจิ้งหะเดียว

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ด้วยการหมุนเคลือบแบบจิ้งหะเดียว (One-step spin-coating method, OSM) อย่างที่ได้กล่าวมาข้างต้นในหัวข้อเทคนิคการหมุนเคลือบว่าการเคลือบแบบหมุนเคลือบจะทำได้จากสารที่เป็นของเหลวเท่านั้น การหมุนเคลือบแบบจิ้งหะเดียวจะทำการหมุนเคลือบจากสารละลายที่ทำการเตรียมไว้สำหรับทำการเคลือบ จากนั้นทำการหมุนเคลือบตามที่ได้กำหนดไว้ จากนั้นนำไปให้ความร้อนเพื่อก่อเป็นชั้นฟิล์มบาง แสดงดังภาพที่ 10

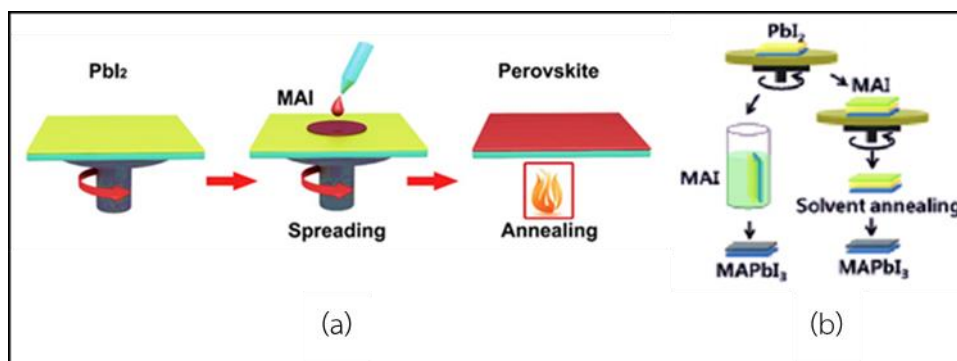


ภาพที่ 10 การหมุนเคลือบแบบจิ้งหะเดียว

ที่มา : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ra/c8ra00384>

2) การหมุนเคลือบแบบสองจิ้งหะ

การหมุนเคลือบแบบสองจิ้งหะ (Double step or deposition method, DSM) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 วิธี ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการหมุนเคลือบแบบจิ้งหะเดียว โดยมีความแตกต่างคือ ขั้นตอนการใส่สารละลายเคลือบ การเคลือบแบบสองจิ้งหะจะใส่สารละลาย 2 ครั้ง วิธีแรกทำได้โดยครั้งแรกให้หยดสารละลายชนิดที่ 1 แล้วทำการหมุนเคลือบ ต่อมาทำการหยดสารละลายชนิดที่ 2 จากนั้นทำการหมุนเคลือบ เมื่อทำการหมุนเคลือบแล้วให้นำชิ้นงานที่ผ่านการหมุนเคลือบสำเร็จแล้วนำไปให้ความร้อนเพื่อนสร้างชั้นฟิล์มบาง แสดงดังภาพที่ 11 (a) และวิธีที่สอง ทำได้โดยการหยดสารละลายชนิดที่ 1 แล้วทำการหมุนเคลือบ จากนั้นให้นำไปแช่ในสารละลายชนิดที่ 2 จากนั้นนำไปให้ความร้อนเพื่อสร้างชั้นฟิล์มบาง แสดงดังภาพที่ 11 (b)

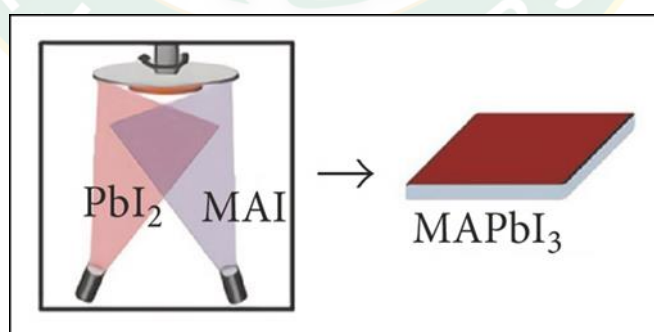


ภาพที่ 11 (a) การหมุนเคลือบแบบสองจังหวะด้วยวิธีการหยด 2 ครั้ง และ (b) การหมุนเคลือบแบบสองจังหวะด้วยการหยดแล้วแช่สารละลาย

ที่มา : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ra/c8ra00384j>

2.6.2 เทคนิคการเคลือบด้วยไอระเหย

การเคลือบสารละลายด้วยการใช้ไอระเหย (Vapor deposition, VD) (ภาพที่ 12) จากสารนำเคลือบโดยอาศัยหลักการระเหยเป็นไอของสารระเหยขึ้นไปควบแน่นบริเวณวัตถุเป้าหมาย การระเหยสามารถสร้างได้จากการใช้พลังงานกระตุ้นสารนำเคลือบที่มีสถานะเป็นของแข็ง แหล่งพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นสามารถใช้เป็นพลังงานจากรังสีเอ็กซ์ ความร้อน หรือเลเซอร์ เป็นต้น เพื่อกระตุ้นให้โมเลกุลของสารนำเคลือบสลายพันธะภายใน และระเหยเป็นไอสารเคลือบระเหยไปยังวัตถุเป้าหมายที่ต้องการเคลือบ วิธีการเคลือบแบบนี้มีข้อดีที่สามารถควบคุมความเรียบของพื้นผิว และปริมาณไอที่จะนำไปเคลือบได้ แต่ด้วยการใช้งานต้องใช้เครื่องมือที่มีความเฉพาะและต้นทุนในการสร้างชั้นฟิล์มสูง จึงไม่เป็นที่นิยมมาก

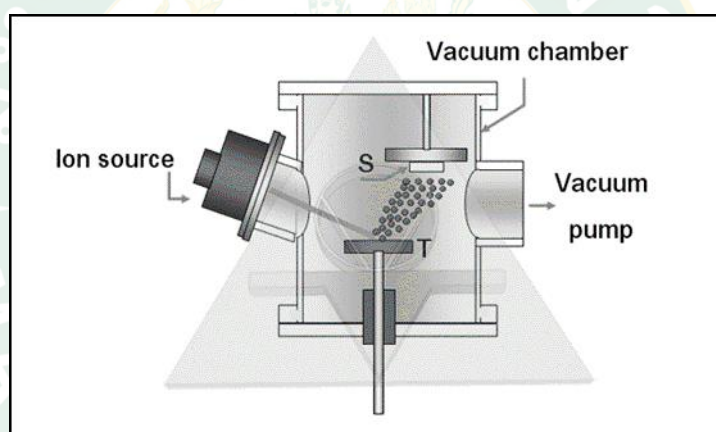


ภาพที่ 12 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางด้วยไอระเหย

ที่มา : <https://doi.org/10.1155/2018/8148072>

2.6.3 เทคนิคการสปัตเตอริง

การเคลือบผิววัสดุด้วยเทคนิคการเคลือบแบบสปัตเตอริง (Sputtering) จะมีความคล้ายกับการสร้างชั้นฟิล์มบางด้วยวิธีการเคลือบด้วยไอระเหย โดยจะอาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนที่มีพลังงานและความเร็วเข้าไปกระทบกับอะตอมเป้าหมาย ซึ่งเป็นของแข็งจนทำให้เกิดการกระเจิงออกของอะตอมเป้าหมายทำให้ไอออนพุ่งชนสูญเสียพลังงานและเข้าแทนที่อะตอมเป้าหมายที่หลุดออกไปเมื่ออะตอมเป้าหมายที่ได้รับพลังงานจากไอออนที่เข้าชนเกิดการกระเจิงออกไปก่อตัวบนผิววัสดุที่ต้องการเคลือบ โดยการเคลื่อนที่ของอะตอมเป้าหมายที่หลุดออกมาจะถูกสนามแม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมทิศทางเคลื่อนที่แสดงดังภาพที่ 13 เพื่อให้มั่นใจได้ว่าอะตอมดังกล่าวจะเข้าไปก่อตัวที่ผิววัสดุนั้น การเคลือบด้วยเทคนิคการสปัตเตอริงทั้งหมดต้องทำในสภาวะแวดล้อมสุญญากาศที่มีความดันไม่เกิน 1 μbar ฟิล์มที่ได้จากเทคนิคการสปัตเตอริงจะมีผิวที่ราบเรียบ ทำให้เป็นที่นิยมในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์



ภาพที่ 13 กระบวนการเคลือบด้วยเทคนิคการสปัตเตอริง

ที่มา : http://www.vtsun.com/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=9&lang=th

2.7. การตรวจวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

ในการทดลองวิจัยเพื่อพัฒนาจำเป็นต้องมีการตรวจวิเคราะห์วัดผลของตัวอย่างผลิตภัณฑ์เพื่อประเมินประสิทธิภาพ และคุณภาพของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไว้ศึกษาถึงข้อดีและข้อด้อยของการพัฒนาในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ก็เช่นกัน การตรวจวัดจะมีทั้งด้านกายภาพและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยผ่านการวิเคราะห์ในสมบัติต่างๆ ของเซลล์ เช่น สมบัติในการดูดกลืนแสง สมบัติทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ ลักษณะทางกายภาพทั้งด้านโครงสร้างผลึกของเซลล์ และด้านโครงสร้างทางจุลภาคของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการศึกษาเหล่านี้จะสามารถชี้วัดถึงข้อดีและข้อด้อยของเซลล์ได้

2.7.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเซลล์ และการตรวจสอบถึงชนิดวัสดุฟิล์มบางที่ทำการเคลือบบนเซลล์สามารถทำได้ 2 วิธีได้แก่

1) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) เครื่องมีลักษณะดังภาพที่ 14 เป็นเทคนิคการนำรังสีเอ็กซ์มาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์และระบุถึงชนิดของสารประกอบโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างทั้งในเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะอาศัยการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบกับตัวอย่างสาร ภายหลังจากกระทบระหว่างรังสีเอ็กซ์กับอะตอมของสารประกอบจะเกิดการสะท้อนที่มุมที่แตกต่างกัน โดยจะมีหัวรับรังสีเอ็กซ์ (Detector) ที่ได้จากการสะท้อน ทำให้ทราบถึงองค์ประกอบสารประกอบ ลักษณะโครงสร้างผลึก ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึกของชิ้นงาน สามารถตรวจวัดได้ถึงระดับนาโนเมตร จาก การวิเคราะห์เรายังสามารถหาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างสารได้ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จึงเป็นที่นิยมในการตรวจวัดชิ้นงาน

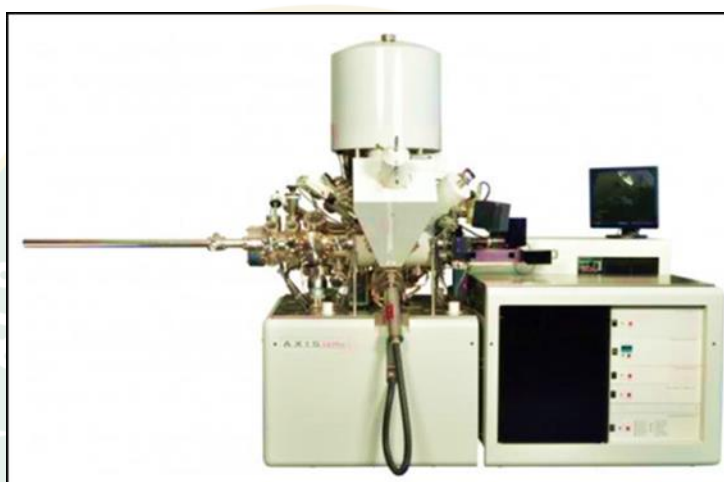


ภาพที่ 14 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ที่มา : งานบริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (ประเทศไทย)

2) เครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุ

เครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุ เป็นการใช้สมบัติของรังสีเอกซ์ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นทั้งสารประกอบอินทรีย์ อนินทรีย์ หรือสารสถานะของแข็งอื่นๆ โดยเทคนิคการวิเคราะห์ผิววัสดุจากรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron spectroscopy) นี้ทำให้ทราบถึงสมบัติทางเคมีที่ระดับพื้นผิวของวัสดุทั้ง ชนิดและธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี พันธะทางเคมี และสภาพทางเคมีของผิววัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการถูกระตุ้นด้วยความร้อน สารเคมี ฯลฯ เป็นต้น โดยมีลักษณะเครื่องมือแสดงดังภาพที่ 15

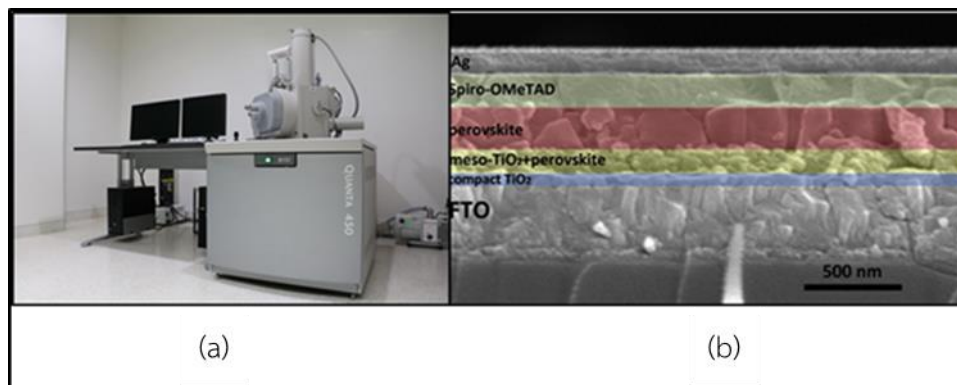


ภาพที่ 15 เครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุด้วยรังสีเอกซ์

ที่มา : <https://www.researchgate.net/figure/Kratos-AXIS-Ultra-DLD-spectrometer>

2.7.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวชั้นฟิล์มบางภายหลังทำการเคลือบ ทั้งในด้านความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง และความหนาของชั้นฟิล์มบาง เป็นต้น การทดลองสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) มีลักษณะแสดงดังภาพที่ 16 (a) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะอาศัยหลักการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนเมื่อตกกระทบบนพื้นผิววัสดุ ซึ่งจะมีตัวรับรังสีอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบ และเก็บข้อมูลออกมาในรูปความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบในแต่ละส่วนพื้นที่ แล้วนำมาสร้างเป็นข้อมูลภาพแสดงให้เห็นออกมาดังภาพที่ 16 (b) การสังเกตสภาวะพื้นผิวด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีข้อดี คือภาพที่เห็นได้จะมีความละเอียดและชัดเจน มีกำลังขยายสูงถึง 500,000 เท่า และมีการเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการตรวจไม่ยุ่งยากมากนัก



ภาพที่ 16 (a) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและ (b) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา : งานบริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (ประเทศไทย)

2.7.3 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อเซลล์มีการดูดกลืนแสงเพื่อนำพลังงานจากแสงไปกระตุ้นชั้นเพอร์รอฟสไกต์เพื่อก่อให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮลอิสระจนกระทั่งเกิดกระแสไฟฟ้าตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ การตรวจวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีความสำคัญโดยใช้เครื่องมือตรวจวัดคือ เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrophotometer) ซึ่งสามารถตรวจวัดความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถตรวจวัดได้ทั้งสารที่มีสถานะ ของแข็งและของเหลว สามารถตรวจวัดแสงที่มีความยาวคลื่น 190 – 1,100 nm ลักษณะเครื่องมือแสงดังภาพที่ 17



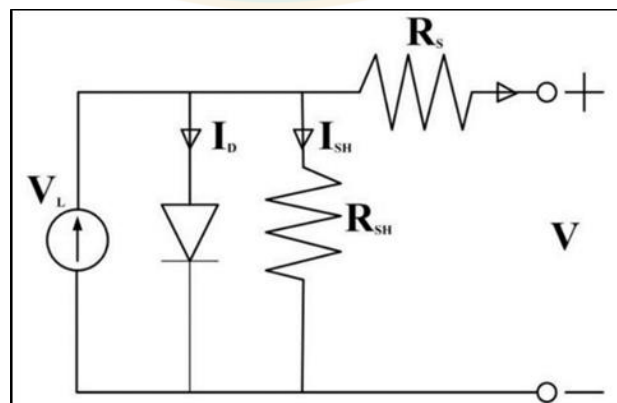
ภาพที่ 17 เครื่องตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง

ที่มา : ศูนย์นวัตกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.7.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากหน้าที่หลักของเซลล์แสงอาทิตย์คือเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า การตรวจวัดวิเคราะห์ถึงสมบัติด้านไฟฟ้าของเซลล์จึงมีความสำคัญ เพื่อเป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าจากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 18 ภายในเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อต่อเข้ากับโหลด กระแสที่ส่งออก (I_{OUT}) จะถูกควบคุมจากความต้านทานภายในเซลล์ โดยภายในเซลล์ได้มีการสูญเสียกระแสโฟโต (I_L) ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแสงอาทิตย์ ให้ความต้านทานภายในเซลล์ ความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานที่เกิดจากรอยต่อ P-N เรียกว่า ความต้านทานชนิด (R_{sh}) ซึ่งความต้านทานแต่ละตัวเมื่อมีค่าความต้านทานสูงจะมีผลต่อกระแสไฟฟ้าโฟโต ซึ่งจากวงจรสมมูลจะเห็นได้ว่าตัวต้านทานชนิดได้ต่อแบบขนานกับแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าโฟโต เมื่อเกิดการไหลของกระแสในวงจร กระแสไฟฟ้าโฟโตจะสูญเสียไปยังตัวต้านทานชนิด ในกรณีตัวต้านทานชนิดมีความต้านทานต่ำจะส่งผลให้กระแสไหลวนกลับทำให้กระแสไม่สามารถส่งออกไปภายนอกเซลล์ได้ในทางกลับกันตัวต้านทานอนุกรมเป็นตัวต้านทานที่อยู่บนทางไหลกระแสก่อนออกจากเซลล์ ในกรณีที่ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่ามากจะส่งผลให้กระแสไหลออกสู่ภายนอกเซลล์ลดลง ดังนั้นการที่เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพที่ดีควรมีความต้านทานชนิดที่สูงเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแส และควรมีความต้านทานอนุกรมที่ต่ำเพื่อให้การไหลของกระแสไฟฟ้าออกสู่ภายนอกเซลล์เพิ่มขึ้น การศึกษาถึงความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีความเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น ซึ่งค่าความต้านทานชนิดและความต้านทานอนุกรมที่มีค่ามากส่งผลให้เกิดการสูญเสียของกระแสไฟฟ้าโฟโต (I_L) หรือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{SC}) จึงมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ที่ผลิตไฟฟ้าได้ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าภายในวงจรสมมูลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1

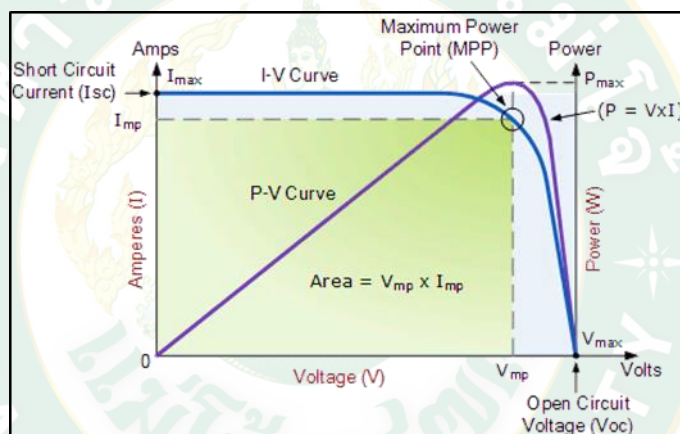
$$I_{OUT} = I_L - I_{SH} - I_S \quad \text{สมการที่ 1}$$



ภาพที่ 18 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา : เอกสารการประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ กระทรวงพลังงาน

สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V characteristics) ซึ่งจะแสดงชุดข้อมูลของ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short-circuit current, I_{SC}) แรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิด (Open-circuit voltage, V_{OC}) กำลังไฟฟ้าทางทฤษฎี (Theoretical power, P_T) กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power, P_{MAX}) ความต้านทานชั้ด (R_{SH}) จากอัตราส่วนของแรงดันต่อกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ความเข้มแสงอาทิตย์ (Sunlight intensity, I_{SUN}) และพื้นที่รับแสงอาทิตย์ (Sunlight area, A_{SUN}) โดยจะแสงออกมาเป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 19 ในการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถดูได้จากค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor, FF) และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (Power conversion efficiency, PCE)



ภาพที่ 19 ตัวอย่างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า

ที่มา : <http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/solar-cell-i-v-characteristic.html>

คำนวณหาค่าพลังงานสูงสุด (P_{MAX}) จากสมการที่ 2

$$P_{MAX} = I_{MAX} V_{MAX} \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ I_{MAX} คือ ค่ากระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
 V_{MAX} คือ ค่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

คำนวณหาค่าพลังงานทฤษฎี (Ranjan et al.) จากสมการที่ 3

$$P_T = I_{sc} V_{oc} \quad \text{สมการที่ 3}$$

คำนวณหาค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF) จากสมการที่ 4

$$FF = \frac{P_{MAX}}{P_T} \quad \text{สมการที่ 4}$$

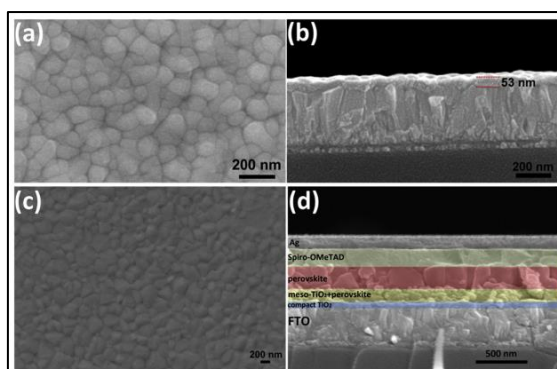
คำนวณหาค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) จากสมการที่ 5

$$PCE = \frac{P_{MAX}}{I_{SUN} A_{SUN}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 5}$$

2.8. ตรวจสอบเอกสาร

การทำวิจัยในหัวข้อการปรับปรุงชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์ มีผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ วัสดุของเซลล์ วิธีการการสร้างเซลล์ และสารประกอบที่มีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพ รวมถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังต่อไปนี้

J.Song และ S.P. Li และคณะ ได้ทำการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์ที่มีโครงสร้างแบบปกติด้วยการปรับปรุงวัสดุ TiO_2 ที่เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ $NbCl_5$ และ $TaCl_5$ ที่สัดส่วนการเติม 1%, 3% และ 5% โดยมวลอะตอม การเตรียมวัสดุชั้นฟิล์ม $Nb-TiO_2$ และ $Ta-TiO_2$ ซึ่งคล้ายกันด้วยการเตรียมสารละลาย โดยนำ $NbCl_5$ และ $TaCl_5$ ละลายใน Titanium diisopropoxide bis(acetylacetonate) และ Isopropanol จากนั้นทำการเคลือบลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (FTO) ด้วยเทคนิค Spray pyrolysis ที่อุณหภูมิห้อง และนำชิ้นงานที่ทำการพ่นเคลือบไปให้ความร้อนที่ $450^\circ C$ เป็นเวลา 1 h. ในเตาเผาความร้อนสูง จะได้วัสดุชั้นฟิล์มนำอิเล็กทรอนิกส์ $Nb/Ta-TiO_2$ สำหรับใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์ที่มีโครงสร้างดังภาพที่ 20



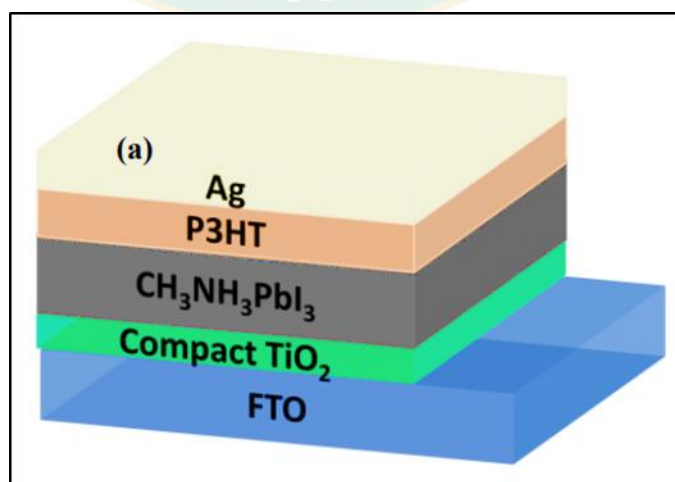
ภาพที่ 20 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์

โดยที่สัดส่วนการเติมของ Nb และ Ta มีผลเพิ่มประสิทธิภาพมากที่สุดคือ 3%Nb-TiO₂ และ 5%Ta-TiO₂ ซึ่งให้ประสิทธิภาพได้สูงสุดที่ 14.29% และ 14.41% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ ถูกใช้ เป็น TiO₂ ที่มีประสิทธิภาพ 13.66% แสดงดังตารางที่ 1 (Song et al., 2017)

ตารางที่ 1 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่สัดส่วนการเติมต่างๆ

Compact layer	Scan	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA·cm ⁻²)	FF	PCE (%)
TiO ₂	Reverse	1.02	18.76	0.71	13.66
	Forward	0.99	18.61	0.61	11.15
1% Ta-Doped TiO ₂	Reverse	1.01	19.01	0.71	13.59
3% Ta-Doped TiO ₂	Reverse	1.03	19.21	0.73	14.41
	Forward	1.00	19.05	0.70	13.29
5% Ta-Doped TiO ₂	Reverse	1.01	19.40	0.73	14.31
1% Nb-Doped TiO ₂	Reverse	1.03	19.04	0.72	14.10
3% Nb-Doped TiO ₂	Reverse	1.02	19.07	0.73	14.21
5% Nb-Doped TiO ₂	Reverse	1.02	19.26	0.73	14.29
	Forward	1.00	19.12	0.68	12.96

Rahul Ranjan และคณะ ได้ทำการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ ที่มีโครงสร้างเซลล์แบบปกติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทำการปรับปรุงที่วัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์เติมที่ใช้ TiO₂ ด้วยการเติมแทนทาลัมอีทอกไซด์ (Tantalum(V) ethoxide) ที่สัดส่วนความเข้มข้น 1%, 3% และ 5% โดยมวล เป็นต้น โดยมีโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 แสดงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

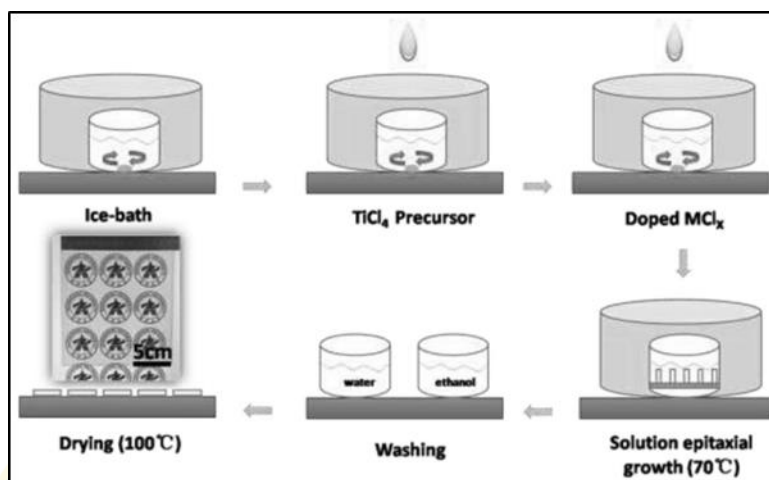
ภายหลังการเคลือบวัสดุชั้นฟิล์ม Ta-Doped TiO₂ เมื่อทำการตรวจวัดด้วย Kelvin probe force microscope (KPFM) ทำให้ทราบถึงระดับพลังงานเฟอร์มิของผิววัสดุ จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นในการเติมที่ 3.0% Ta-Doped TiO₂ สามารถลดระดับพลังงานเฟอร์มิของชั้นนำอิเล็กตรอนเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการเติมแทนทาลัมจาก -4.9 eV เป็น -5.04 eV จากการลดลงของระดับพลังงานเฟอร์มิเป็นผลให้ระดับพลังงานแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ลดลงเช่นกัน ซึ่งเป็นผลดีสำหรับชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ ทำให้เซลล์สามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนผ่านชั้นนำอิเล็กตรอนได้ง่ายขึ้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 4.86% เป็น 6.81% แสดงดังตารางที่ 2 (Ranjan et al., 2018)

ตารางที่ 2 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนเป็น Ta-Doped TiO₂

Ta Doping (mol%)	J _{sc} (mA·cm ⁻²)	V _{oc} (V)	FF	PCE (%)	R _s (Ωcm ²)	R _{sh} (Ωcm ²)
Forward sweep direction						
Pure TiO ₂	18.40±1.5	0.85±0.05	0.32±0.04	4.86±0.83	48.3±19.3	108.1±33.6
1.0 mol%	18.93±2.7	0.83±0.04	0.30±0.04	4.80±0.92	29.1±2.70	105.2±19.6
3.0 mol%	20.06±1.7	0.83±0.05	0.41±0.05	6.81±1.99	18.5±2.80	220.0±65.3
5.0 mol%	19.20±2.1	0.75±0.06	0.32±0.07	4.50±1.33	23.3±1.50	150.2±70.1
Reverse sweep direction						
Pure TiO ₂	20.40±1.4	0.91±0.06	0.36±0.04	6.63±0.54	45.7±2.80	164.0±44.8
1.0 mol%	22.60±1.2	0.85±0.03	0.35±0.05	6.40±0.47	25.6±3.10	131.3±32.7
3.0 mol%	22.10±1.2	0.85±0.04	0.42±0.04	8.17±0.97	17.4±2.30	276.6±81.6
5.0 mol%	21.60±2.6	0.80±0.05	0.37±0.07	6.24±0.76	19.6±1.40	229.2±30.3

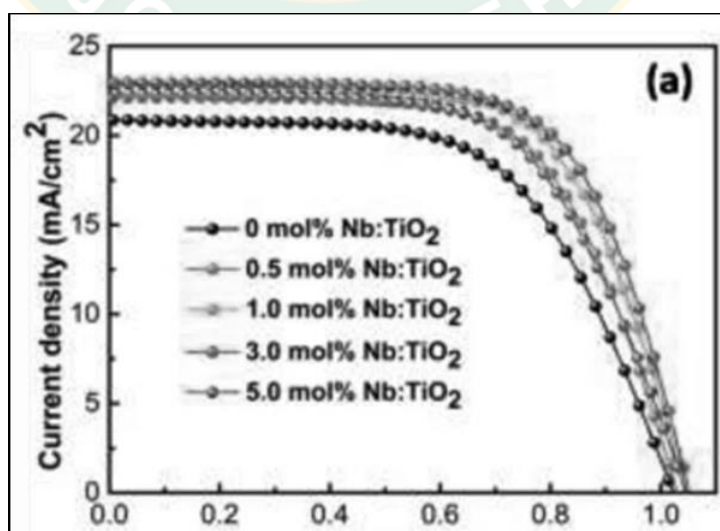
Chao Liang และคณะ ได้ทำการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีโครงสร้างแบบปกติ โดยทำการปรับปรุงวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนโดยใช้สารประกอบคลอไรด์ ได้แก่ แทนทาลัม, ทังสแตน, สังกะสี และไนโอเบียม เป็นต้น เพื่อหาสารประกอบ และความเข้มข้นของสารที่เหมาะสมสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าว วัสดุกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าเป็น Fluorine-doped Tin Oxide (FTO) วัสดุเพอร์รอฟสไกต์เป็น MAPbI₃ ชั้นนำโฮลเป็น Spiro-OMeTAD โดยใช้การเทคนิคเตรียมสารละลายสำหรับเคลือบด้วยวิธีการหมุนเคลือบแบบอุณหภูมิต่ำ (Low-Temperature Process) เริ่มจากการนำ TiCl₄ ผสมกับสารประกอบคลอไรด์

สำหรับเติมในภาชนะใส่น้ำแข็งเพื่อลดอุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา ทำให้ได้สารละลายสำหรับเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 แสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายสำหรับชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

เมื่อทำการเคลือบสารละลายวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 23 จากรูปให้เห็นว่าสารประกอบคลอไรด์ที่มีผลทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ดังกล่าวมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นคือ ไนโอเบียมที่มีความเข้มข้น 3% โดยมวล เมื่อทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพจากข้อมูลแผนภาพ J-V Curve ได้ทำการเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพระหว่าง Undoped TiO_2 กับ 3%Nb- TiO_2 ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 7.26% เป็น 15.19% ตามลำดับ แสดงตารางที่ 3 (Liang et al., 2017)

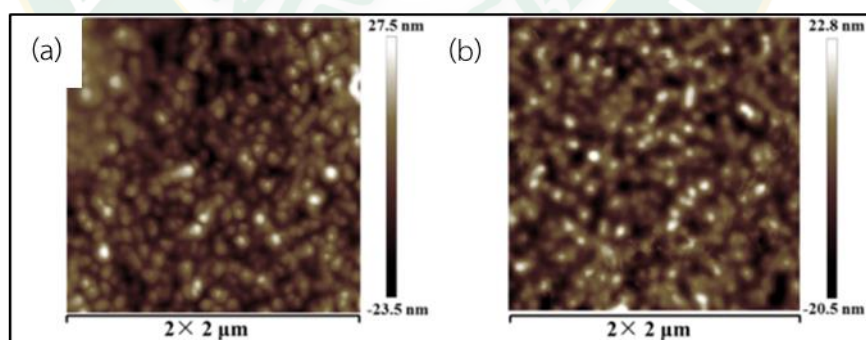


ภาพที่ 23 แผนภาพ J-V Curve ของการเติมไนโอเบียมในชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 3 ข้อมูลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่าง Undoped TiO₂ กับ 3%Nb-Doped TiO₂

Scan	Nb (%)	J _{SC} (mA·cm ⁻²)	V _{OC} (V)	FF (%)	PCE (%)
forward	0	20.10	0.81	44.79	7.26
reverse	0	20.87	1.02	60.09	12.82
forward	3.0	22.80	1.04	64.34	15.19
reverse	3.0	22.90	1.05	66.96	16.12

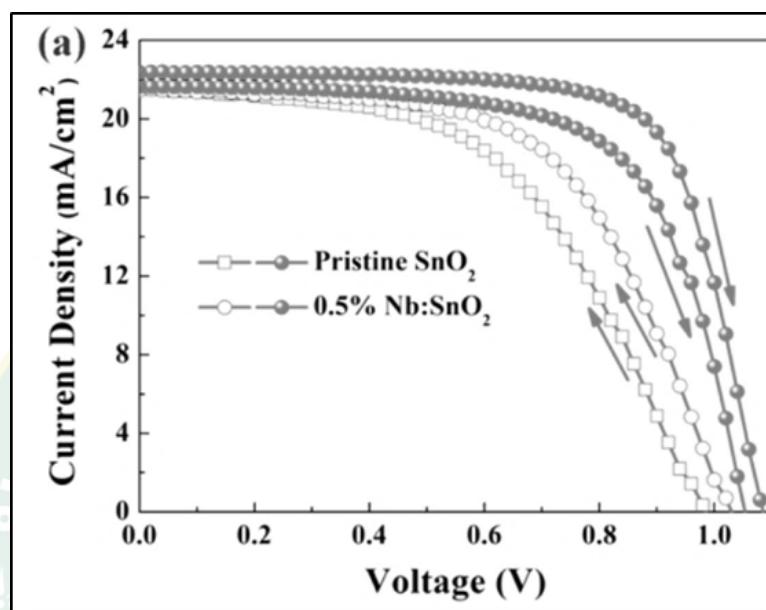
Xiaodong Ren และคณะ ได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีโครงสร้างแบบปกติ โดยมีวัสดุกระจกเคลือบสารถานาไฟฟ้า (FTO) วัสดุชั้นเพอร์รอฟสไกต์เป็น (FAPbI₃)_{0.85}(MAPbBr₃)_{0.15} วัสดุชั้นนำโฮลเป็น Spiro-OMeTAD ผู้วิจัยได้เลือกทำการปรับปรุงชั้นนำอิเล็กตรอน ซึ่งมีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนเป็น Tin (II) Oxide (SnO₂) โดยการเติมสารประกอบคือ Niobium ethoxide ในการเติมที่สัดส่วนการเติม 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00% และ 2.00% ของปริมาณสารทั้งหมด จากการเติมในโอเปียมเมื่อทำการวิเคราะห์ผิวโครงสร้างวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน พบว่าการภายหลังการเติมทำให้พื้นผิวของชั้นนำอิเล็กตรอนมีความเรียบขึ้น ดังภาพที่ 24 ซึ่งเป็นแนวโน้มที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากผิวหน้าของชั้นนำอิเล็กตรอนและชั้นเพอร์รอฟสไกต์ของเซลล์มีพื้นที่สัมผัสกันมากขึ้น จึงทำให้มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ดีขึ้น อาจเป็นผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นี้เพิ่มมากขึ้นไปด้วย



ภาพที่ 24 ภาพจาก AFM แสดงให้เห็นถึงความขรุขระของพื้นผิวชั้นนำอิเล็กตรอนเมื่อ (a) Undoped SnO₂ และ (b) Nb-Doped SnO₂

เมื่อได้นำชั้นนำอิเล็กตรอนประกอบเข้ากับชั้นวัสดุอื่น ๆ ทำให้ได้โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์เพื่อทำการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ (J-V Curve) ระหว่างชั้นนำอิเล็กตรอน SnO₂ กับ Nb-SnO₂ ที่สัดส่วนการเติม 0.25%, 0.50%, 0.75% และ 1.0% เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 25 จากการตรวจวัดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับชั้นนำ

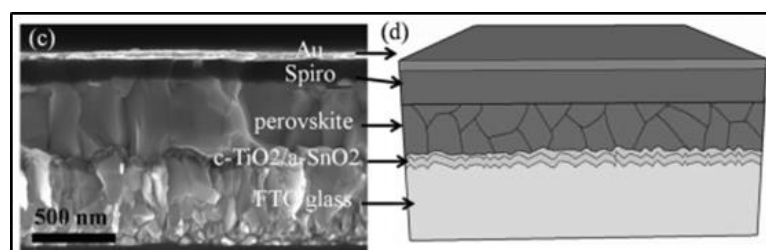
อิเล็กทรอนิกส์ของ SnO_2 กับ Nb-SnO_2 ทำให้ค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF) เพิ่มขึ้นจาก 0.659 เป็น 0.727 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นจาก 15.13% เป็น 17.57% เป็นข้อสรุปว่าการเติม 0.5% Nb-SnO_2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ (Ren et al., 2017)



ภาพที่ 25 แผนภาพ I-V Curves ระหว่าง SnO_2 กับ 0.5% Nb-SnO_2 ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

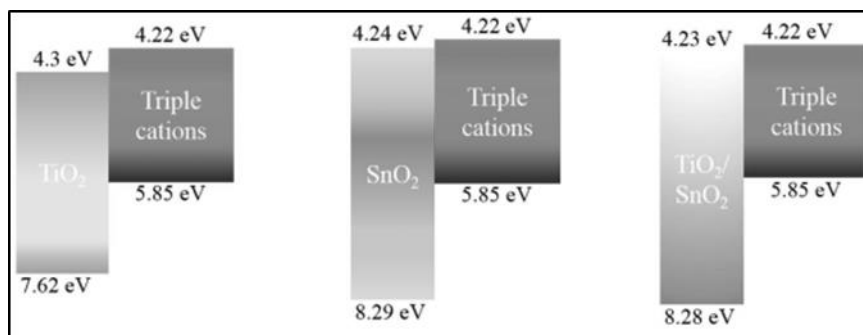
Mohammad Mahdi Tavakoli และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของการปรับปรุงชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ โดยทำการศึกษาผลของการปรับปรุงด้วยการนำวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ได้แก่ TiO_2 และ SnO_2 เดิมร่วมกันสร้างเป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อศึกษาถึงผลของการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์ จากการตรวจสอบโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเห็นได้ชัดถึงโครงสร้างชั้นฟิล์มต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์เป็น $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$

จากการตรวจวัดระดับพลังงานของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนด้วยเครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต และเครื่องวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง เพื่อวิเคราะห์ถึงระดับพลังงานเฟอร์มิและระดับชั้นพลังงานพื้น (Valence band) ของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน พบว่าช่วงระดับชั้นพลังงานของ TiO_2 , SnO_2 และ $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ อยู่ที่ 7.62-4.3, 8.29-4.24 และ 2.28-4.23 eV ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ระดับชั้นพลังงานของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนได้แก่ TiO_2 , SnO_2 และ $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$

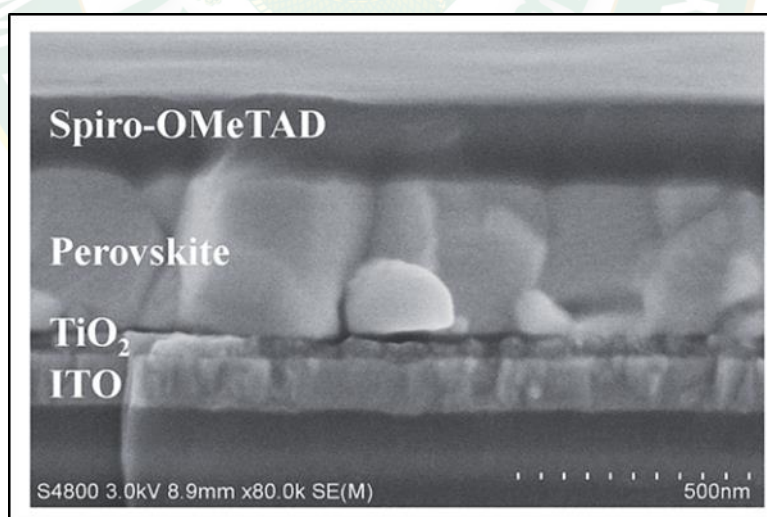
เมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ไปตรวจวัดถึงสมบัติทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับระหว่างวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่ 3 ชนิด ได้แก่ TiO_2 , SnO_2 และ $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ จากข้อมูลเปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน 3 ชนิด แสดงดังตารางที่ 4 จะสังเกตได้ว่าชั้นวัสดุนำอิเล็กตรอนทุกชนิดเกิดการฮิสเทอรีซิสไปจากการวัดแบบ Forward-Backward เพียงเล็กน้อย เมื่อทำการเติมร่วมระหว่าง $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ เกิดฮิสเทอรีซิสเพียง 1.35% และยังให้ผลประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดถึง 21.40% ถัดมาคือ SnO_2 และ TiO_2 ตามลำดับ (Tavakoli et al., 2018)

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนได้แก่ TiO_2 , SnO_2 และ $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$

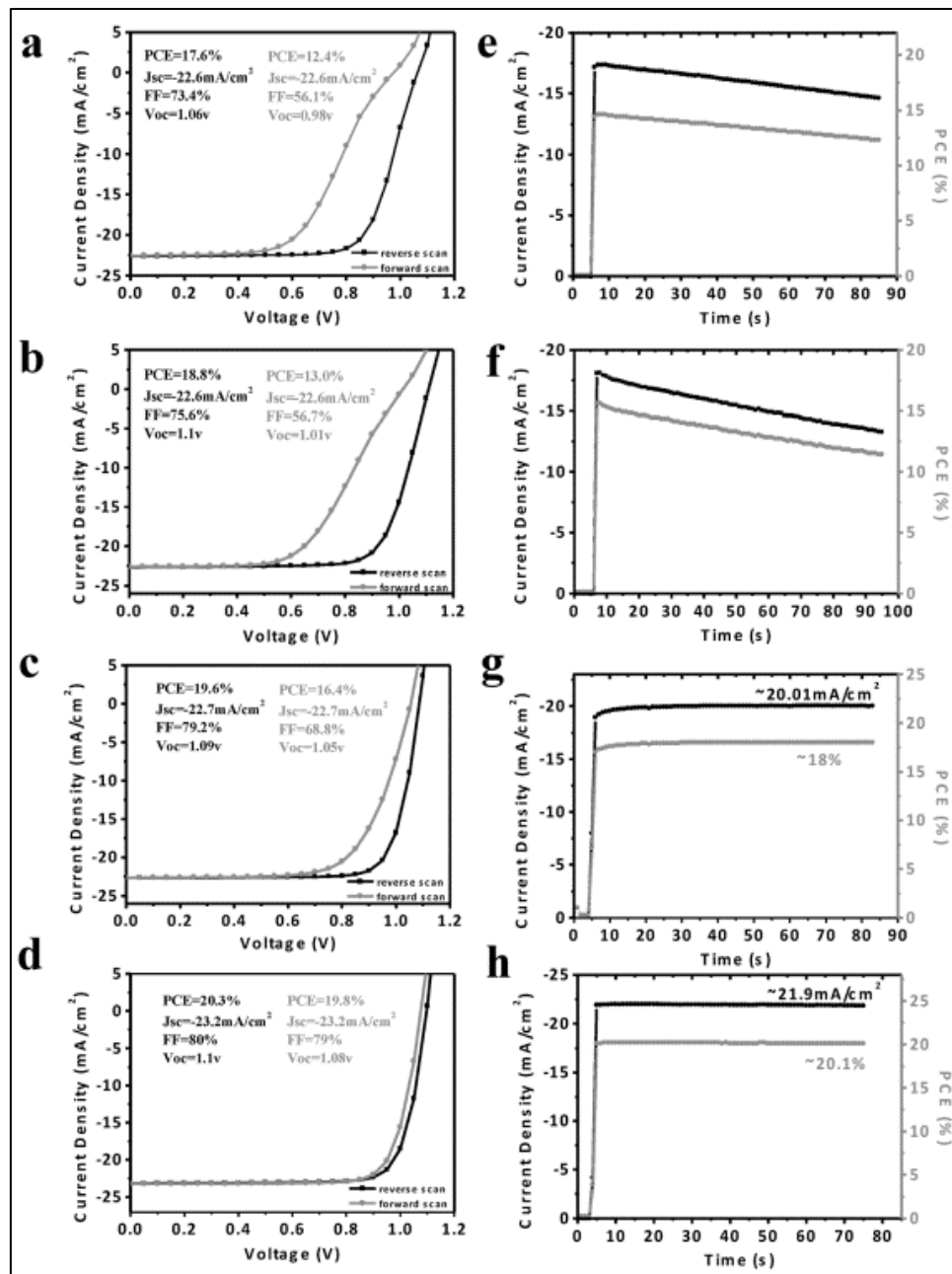
Sample	V_{oc} (V)	J_{sc} ($\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)	FF (%)	PCE (%)	Hysteresis index (%)	MPPT (%)
c- $\text{TiO}_2/\text{a-SnO}_2$ -Forward	1.164	23.78	76.2	21.11	1.35	21.23
c- $\text{TiO}_2/\text{a-SnO}_2$ -Backward	1.169	23.91	76.5	21.40		
a- SnO_2 -Forward	1.137	23.52	74.7	20.01	16.2	20.16
a- SnO_2 -Backward	1.142	23.45	75.8	20.34		
c- TiO_2 -Forward	1.112	22.43	74.6	18.65	3.51	18.62
c- TiO_2 -Backward	1.125	22.85	75.2	19.33		

Feilong Cai และคณะ ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพ และลดการเกิดฮีสเทอรีซิสของ ประสิทธิภาพในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีโครงสร้างแบบปกติ ด้วยการปรับปรุงทั้ง วิธีการเตรียมสารละลายวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน และปรับปรุงวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ โดยใช้ $TiCl_4$ เป็นพื้นฐานของสารตั้งต้นในการ ปรับปรุงวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน และได้นำ Titanium oxide bis (2,4-pentanedionate) (TOPSD), phenyl-C61-butyric acid methylester ($PC_{60}MB$) และ Ethanolamine (ETA) (C_{60} -ETA) เติมใน วัสดุ TiO_2 ด้วยเทคนิคการเตรียมสารละลายที่อุณหภูมิต่ำ ($<450^\circ C$) ซึ่งจะทำให้การเตรียมสารใน ภาชนะใส่น้ำแข็งเพื่อลดอุณหภูมิขณะสารทำปฏิกิริยา จากนั้นทำสารละลายที่เตรียมได้เคลือบลงบน วัสดุกระจกนำไฟฟ้า (ITO) ด้วยวิธีการหมุนเคลือบ เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะให้เห็นโครงสร้างดังภาพที่ 28

จากการเตรียมสารละลายสำหรับเป็นวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนด้วยเทคนิคการเตรียมที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่สมบูรณ์มาทำการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้า (ภาพที่ 29) ทำให้ทราบถึงผลของการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำการ เติมสารประกอบไปในชั้นนำอิเล็กตรอน TiO_2 ช่วยลดการเกิดฮีสเทอรีซิสได้ โดยการเติม TOPD/ $PC_{60}BM$ พบว่าลดการเกิด Hysteresis ได้มากที่สุด อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ถึง 20.3% (Cai et al., 2017)

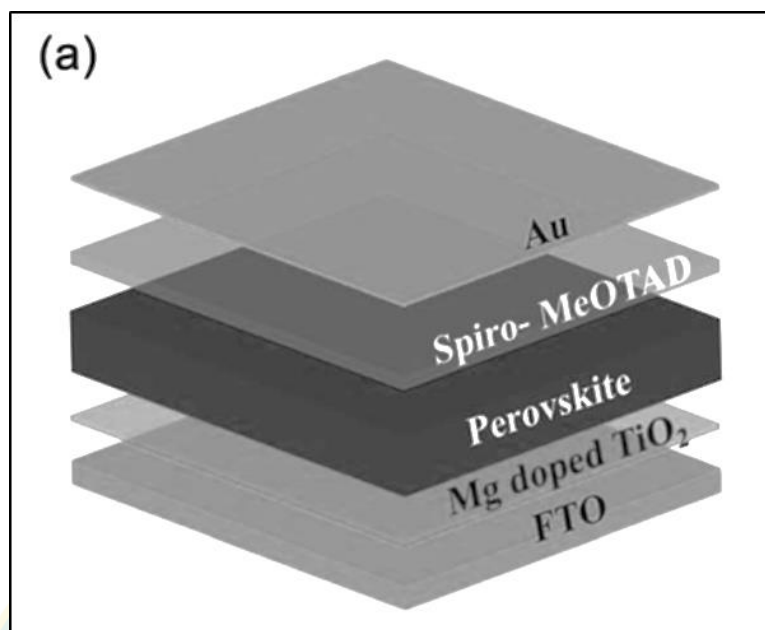


ภาพที่ 28 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่ผ่านการเตรียมสารละลายวัสดุชั้นนำ อิเล็กตรอนด้วยเทคนิค Low temperature process

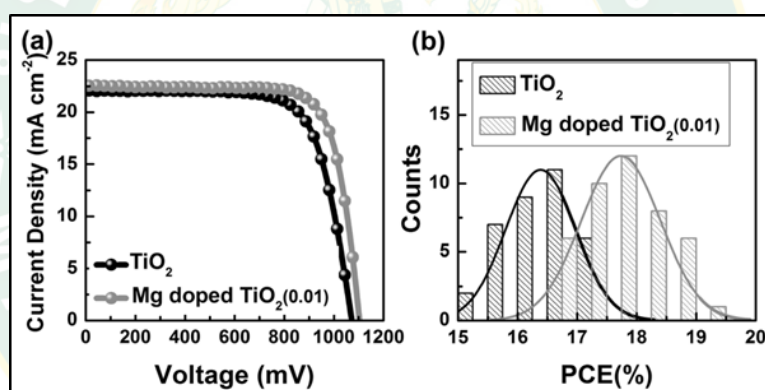


ภาพที่ 29 ผลวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่ผ่านการปรับปรุงด้วยการเติมสารประกอบได้แก่ (a,e) TiO₂, (b,f) TiO₂:TOPD, (c,g) TiO₂:TOPD/C₆₀-ETA และ (d,h) TiO₂:TOPD/PC₆₀BM

Huiyin Zhang และคณะ ได้ทำการปรับปรุงชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีโครงสร้างวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนเป็น TiO₂ วัสดุชั้นเพอร์รอฟสไกต์เป็น MAPbBr₂ และวัสดุชั้นนำโฮลเป็น Spiro-OMeTAD แสดงดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนเป็น Mg-TiO₂



ภาพที่ 31 แผนภาพแสดงผลวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

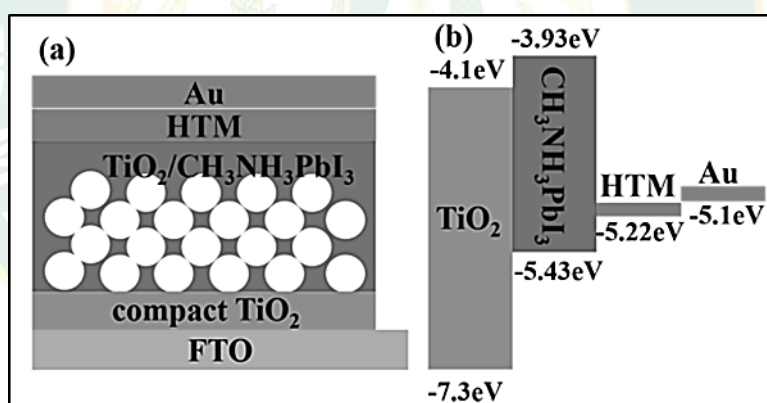
การปรับปรุงวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนทำโดยการเติม MgCl₂ ไปใน TiCl₄ ขณะทำการเตรียมสารละลายเพื่อทำการหมุนเคลือบลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (FTO) ที่ปริมาณการเติม 0, 0.0005, 0.01 และ 0.025 M เพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

จากการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่ผ่านการเติมแมกนีเซียม (Mg) ไปในวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน TiO₂ ให้ผลดังภาพที่ 31 จากข้อมูลตารางที่ 5 พบว่าที่ปริมาณการเติม 0.01 M ของ Mg-TiO₂ ให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 19.08% เมื่อเปรียบเทียบกับ TiO₂ ที่ให้เพียง 17.29% ซึ่งเป็นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับการนำสารประกอบโลหะคลอไรด์ MgCl₂ เติมลงใน TiCl₄ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ (Zhang et al., 2016)

ตารางที่ 5 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนเป็น Mg-TiO₂ ที่ปริมาณการเติมต่างๆ

ETL	J _{sc} (mA·cm ⁻²)	V _{oc} (V)	FF (%)	PCE (%)	
				Average	Max
TiO ₂	21.36±0.64	1.060±0.014	72.3±2.4	16.37±0.72	17.29
Mg-TiO ₂ (0.005)	21.46±0.81	1.073±0.017	73.4±1.7	16.89±0.71	17.75
Mg-TiO ₂ (0.01)	21.48±0.60	1.090±0.012	75.4±1.8	17.65±0.75	19.08
Mg-TiO ₂ (0.025)	21.22±0.58	1.080±0.013	74.6±1.8	17.10±0.79	18.24

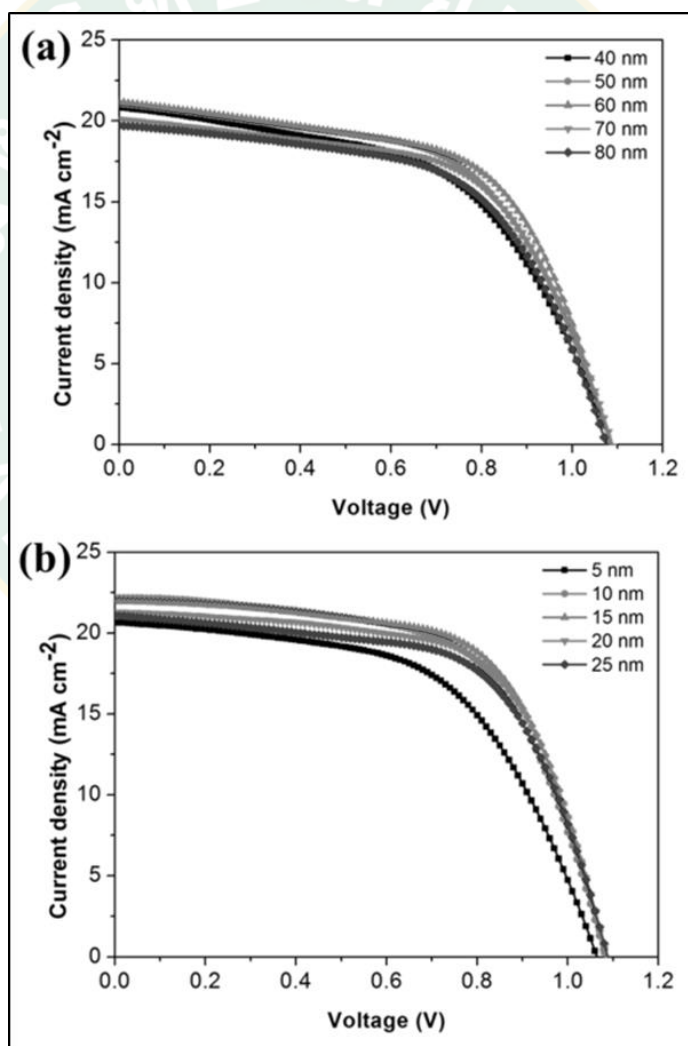
Weijun Ke และคณะ ได้ทำการปรับปรุงการสร้างชั้นฟิล์มของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีโครงสร้างแบบปกติ และมีวัสดุพื้นฐานเป็น TiO₂ โดยทำการเผา 2 รอบ (Two-step sintering Process) โดยทำการเผาอบแรกเพื่อทำการฉีกวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนกับกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (FTO) และเผาอบที่สองเพื่อสร้างชั้นรูพรุนของ TiO₂ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีโครงสร้างดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 (a) โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ (b) แผนภาพระดับพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการสร้างวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน 2 แบบคือการสร้างด้วยวิธีการหมุนเคลือบ (SC-TiO₂) และการสร้างวิธีปฏิกิริยาความร้อน (TO-TiO₂) ที่ความหนาแตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลของผลของความหนาชั้นนำอิเล็กตรอนที่ผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ โดยชั้นนำอิเล็กตรอนแบบ SC-TiO₂ ที่ได้ทำการศึกษาที่ความหนา 40, 50, 60, 70 และ 80 nm ส่วนชั้นนำอิเล็กตรอนแบบ TO-TiO₂ ได้ทำการศึกษามีความหนา 5, 10, 15, 20 และ 25 nm เป็นต้น จากแผนภาพการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า (ภาพที่ 31) เมื่อนำข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้ามาเปรียบเทียบดัง

ตารางที่ 6 และภาพที่ 33 จะเห็นได้ว่าการสร้างวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนแบบ TO-TiO₂ ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า และค่าฟิลแฟกเตอร์ที่สูงกว่าการสร้างเซลล์แบบ SC-TiO₂ และที่ความหนาของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างแบบ SC-TiO₂ ที่ความหนา 60 nm สามารถให้ประสิทธิภาพได้มากที่สุดถึง 13.47% ค่าฟิลแฟกเตอร์ที่ 0.58 และการสร้างวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนแบบ TO-TiO₂ ที่ความหนาชั้นวัสดุ 15 nm สามารถให้ค่าประสิทธิภาพได้สูงที่สุดถึง 15.07% และค่าฟิลแฟกเตอร์ที่ 0.63 (Ke et al., 2014)

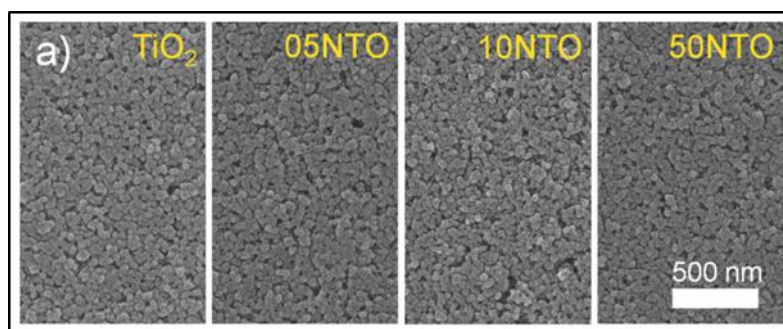


ภาพที่ 33 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์ที่ใช้ชั้นนำอิเล็กตรอนเป็น (a) SC-TiO₂ และ (b) TO-TiO₂

ตารางที่ 6 ข้อมูลจากการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

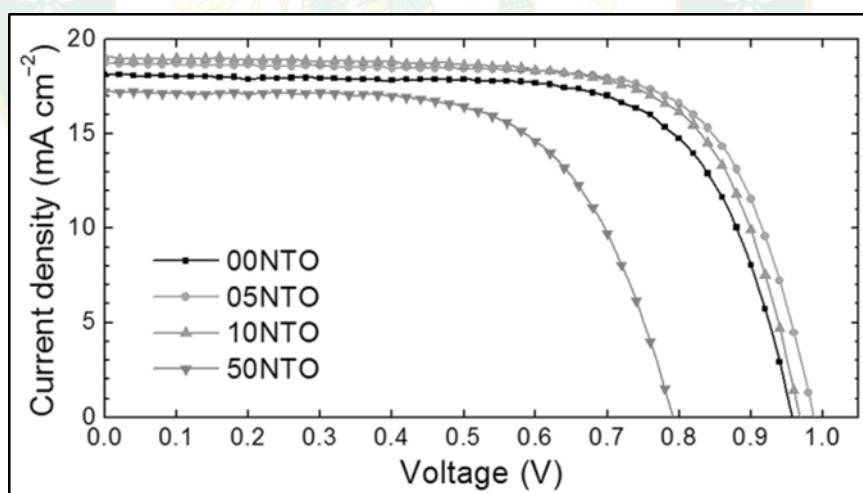
Sample	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA·cm ⁻²)	FF	PCE (%)	R _s (Ω·cm ²)
Base	0.96	18.01	0.44	7.60	6.29
40 nm SC-TiO ₂	1.09	20.83	0.53	12.04	5.49
50 nm SC-TiO ₂	1.09	21.08	0.56	12.97	4.86
60 nm SC-TiO ₂	1.09	21.16	0.58	13.47	3.97
70 nm SC-TiO ₂	1.09	20.11	0.58	12.80	4.29
80 nm SC-TiO ₂	1.08	19.72	0.57	12.20	4.67
5 nm TO-TiO ₂	1.07	20.66	0.56	12.29	5.17
10 nm TO-TiO ₂	1.09	22.19	0.60	14.59	4.32
15 nm TO-TiO ₂	1.09	21.97	0.63	15.07	3.57
20 nm TO-TiO ₂	1.09	21.30	0.64	14.76	3.76
25 nm TO-TiO ₂	1.09	21.10	0.62	14.15	4.08

Dong Hoe Kim และคณะ ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเติม Niobium (V) ethoxide ในวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่มี TiO₂ เป็นวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ ที่มีวัสดุเพอร์รอฟสไกต์เป็น MAPbI₃ เพื่อศึกษาถึงผลของการเติมที่มีต่อขนาดของอนุภาคในชั้นโครงสร้างวัสดุนำอิเล็กตรอน ระดับชั้นพลังงานของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน และสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าว โดยเลือกเติม Niobium (V) ethoxide ที่ปริมาณการเติม 0, 0.5, 1.0 และ 5.0 โดยอะตอมของไนโอเบียม จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ภาพที่ 34) พบว่าที่ปริมาณการเติม 10NTO จะมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุดประมาณ 32 nm เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมที่ 50NTO พบว่าขนาดของอนุภาคลดลงอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 34 ลักษณะพื้นผิวชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

เมื่อนำวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่ผ่านการเติมในปริมาณการเติมต่าง ๆ วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า (ภาพที่ 35) พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณการเติมไนโอเบียมที่ 05NTO จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์สูงถึง 13.4% และให้ค่าฟิลแฟกเตอร์สูงถึง 0.723 ทำให้เห็นได้ว่าเมื่อทำการเติมสารประกอบคลอไรด์ลงในชั้นนำอิเล็กตรอนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ถ้าทำการเติมมาก จะทำให้เกิดการยับยั้งอิเล็กตรอนที่จะผ่านวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นผลให้ประสิทธิภาพลดลง (Kim et al., 2015)

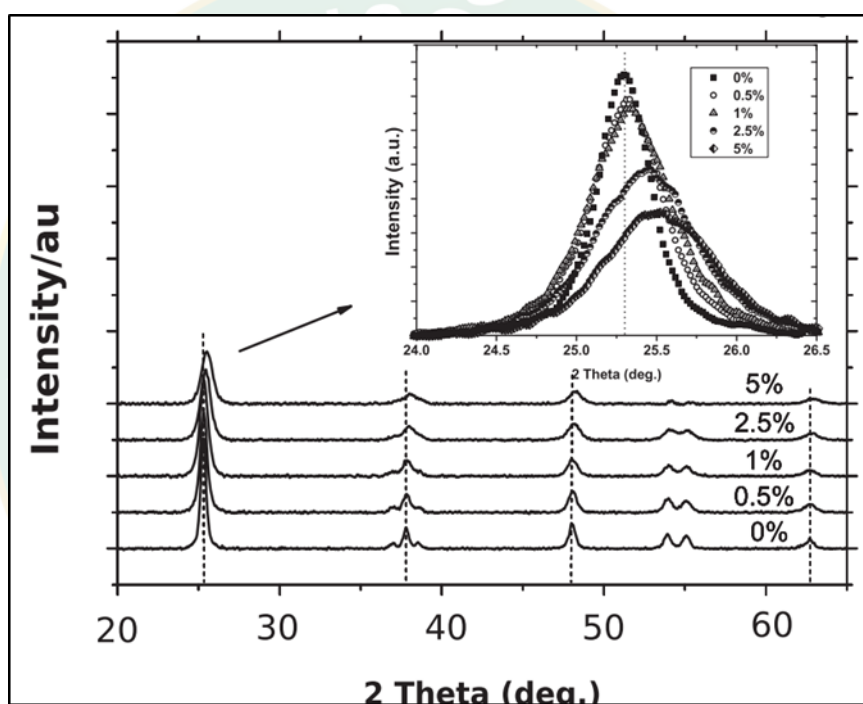


ภาพที่ 35 แผนภาพแสดงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนเป็น Nb-doped TiO₂

Sandeep K. Pathak และคณะ ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงและแบบเพอร์รอฟสไกต์ ด้วยการเติมอะลูมิเนียม (Pathak et al.) ลงไปในชั้นของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งใช้ TiO₂ เป็นสารนำอิเล็กตรอนที่สัดส่วนการเติม 0, 0.5, 1, 2.5 และ 5 mol% จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก Al-TiO₂ (ภาพที่ 36) พบว่าภายหลังจากเติม

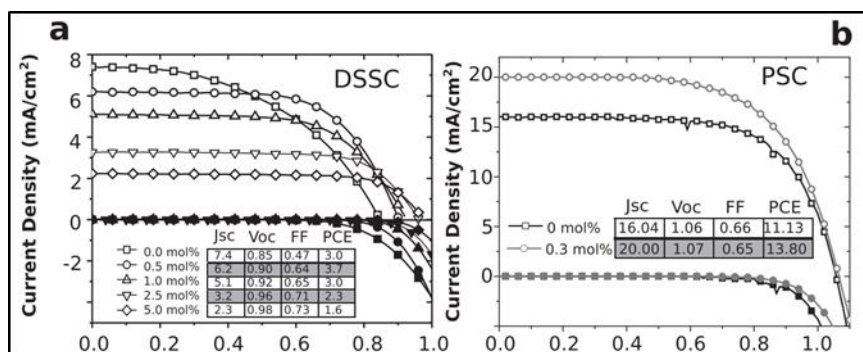
อะลูมิเนียมที่ปริมาณ 2.5% และ 5% ระนาบที่ (101), (211) และ (105) มีการเคลื่อนไปยังมุมระนาบที่มากขึ้น อันเนื่องจากการแทนที่ของอะลูมิเนียมในไทเทเนียม ทำให้รัศมีอะตอมเปลี่ยนแปลงจาก 0.61Å เป็น 0.53Å

จากการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีการเติมอะลูมิเนียมใน TiO_2 ที่ชั้นนำอิเล็กตรอนในสัดส่วนปริมาณการเติมได้แก่ 0, 0.5, 1, 2.5 และ 5 mol% จากแผนภาพและข้อมูลระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (ภาพที่ 37) พบว่าที่สัดส่วนปริมาณการเติม 0.5 mol% ให้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุดในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง มีประสิทธิภาพสูงถึง 3.7%



ภาพที่ 36 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ 0%, 0.5%, 1%, 2.5% และ 5% Al-TiO₂

จากนั้นเมื่อทำการเติมที่ปริมาณ 1, 2.5 และ 5 mol% พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงลดลงจาก 3.0%, 2.3% และ 1.6% ในแง่การเติมอะลูมิเนียมใน TiO_2 ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่ปริมาณการเติม 0.3 mol% พบว่าให้ประสิทธิภาพสูงถึง 13.80% เมื่อเปรียบเทียบกับ TiO_2 ที่มีประสิทธิภาพเพียง 11.13% (Pathak et al., 2014)



ภาพที่ 37 แผนภาพการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (a) แบบสีย้อมไวแสง และ (b) แบบเพอร์รอฟสไกต์

จากการศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ สามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

ลำดับ	ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางการประยุกต์
1.	J.Song และคณะ (2016)	ศึกษาผลของการเติมไนโอเบียมและแทนทาลัม ในชั้นนำ อิเล็กตรอนที่มี TiO ₂ เป็นวัสดุด้วยวิธีการ spray pyrolysis ที่อุณหภูมิ 450 °C เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สัดส่วน 1%, 3%, และ 5% ซึ่งผลการเติมสามารถพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์ได้	เทคนิคการเตรียมวัสดุชั้นนำ อิเล็กตรอนด้วยเทคนิค spray pyrolysis และการใช้สารตั้งต้นเป็น NbCl ₅ และ TaCl ₅ เป็นต้น
2.	Rahul Ranjan และคณะ (2018)	ผลของการเติม Tantalum ethoxide ในชั้นนำอิเล็กตรอนซึ่งมี TiO ₂ เป็นวัสดุ มี MAPbI ₃ เป็นชั้นดูดกลืนแสง และชั้นนำโฮลเป็น P3HT ทำการทดลองที่สัดส่วน 1%Ta, 3%Ta และ 5%Ta เป็นต้น ผลการทดลองชี้ชัดที่ 3%Ta ให้ประสิทธิภาพสูงสุด	การเลือกนำแทนทาลัมมาเติมในวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่มี TiO ₂ ที่ความเข้มข้น 3%Ta ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

ลำดับ	ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางการประยุกต์
3.	Chao Liang และคณะ (2017)	ศึกษาผลของการเติมสารประเภทโลหะคลอไรด์ ได้แก่ $NbCl_5$, $SnCl_4$, $TaCl_5$ และ WCl_4 ในชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่มี TiO_2 เป็นวัสดุและมีชั้นดูดกลืนแสงเป็น $MAPbI_3$ จากการศึกษาแสงให้เห็นว่า 3.0%Nb และ 1.0%Ta มีผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากระดับพลังงานของวัสดุภายในเซลล์เหมาะสม	การเตรียมสารละลายชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการเตรียมที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้สารประกอบคลอไรด์เป็นสารตั้งต้น
4.	Xiaodong Ran และคณะ (2016)	การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มี $(FAPbI_3)_{0.85}(MAPbBr_3)_{0.15}$ เป็นวัสดุเพอร์รอฟสไกต์ และมี Spiro-OMeTAD เป็นวัสดุชั้นนำโพลี การเติม Niobium ethoxide ในวัสดุ SnO_2 ที่เป็นวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ 0.5%Nb ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด เนื่องจาก	การเลือกนำ Niobium ethoxide ทำเตรียมสารละลายสำหรับเติมในวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่มี TiO_2 ที่ความเข้มข้น 0.5%Nb ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น
5.	Mohammad Mahdi Tavakoli และคณะ (2018)	ทำการเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้ในการทำชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ TiO_2 , SnO_2 และ TiO_2-SnO_2 เพื่อศึกษาถึงระดับพลังงานและผลประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเรียงลำดับวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ประสิทธิภาพจาก	จากการศึกษางานวิจัย สังเกตเห็นได้ถึงการศึกษาในระดับพลังงานของวัสดุแต่ละชนิดที่มีช่องว่างพลังงานต่างกัน ระดับพลังงานของ TiO_2 ที่อยู่ในช่วง 4.3–7.62 eV เป็นช่วงพลังงานที่เหมาะสมกับชั้นเพอร์รอฟสไกต์ $MAPbI_3$

ลำดับ	ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางการประยุกต์
		น้อยไปมากได้แก่ TiO_2 , SnO_2 และ $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ ให้ประสิทธิภาพได้ถึง 21.40%	
6.	Feilong Cai และคณะ (2017)	มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของ เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ด้วยการปรับปรุงทั้งด้านวัสดุ นำอิเล็คตรอน และการเตรียมสารละลายเพื่อนสร้างเป็นวัสดุชั้นนำอิเล็คตรอน โดยใช้เทคนิคการเตรียมสารละลายที่อุณหภูมิต่ำ	การเตรียมสารละลายสำหรับสร้างวัสดุชั้นนำอิเล็คตรอนด้วยเทคนิคการเตรียมสารที่อุณหภูมิต่ำ
7.	Huiyin Zhang และคณะ (2016)	การปรับปรุงชั้นนำอิเล็คตรอนของ เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ด้วยการเติมโลหะคลอไรด์ไปในวัสดุชั้นนำอิเล็คตรอน TiO_2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ โดยใช้ MgCl_2 ที่ ปริมาณ 0.005, 0.01 และ 0.025 เป็นต้น	การเติมสารประกอบโลหะคลอไรด์ไปในชั้นนำอิเล็คตรอนสามารถเพิ่มการถ่ายโอนอิเล็คตรอนอิสระได้มากขึ้นจึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น
8.	Weijun Ke และคณะ (2014)	ทำการศึกษาผลกระทบของเทคนิคการสร้างชั้นนำอิเล็คตรอนด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเคลือบ และแบบปฏิกิริยาความร้อน ร่วมกับความหนาของชั้นวัสดุนำอิเล็คที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์	เทคนิคการเคลือบวัสดุชั้นนำอิเล็คตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์แบบหมุนเคลือบ ซึ่งเป็นที่นิยม ความหนาของชั้นวัสดุที่เหมาะสมคือประมาณ 60 nm.
9.	Dong Hoe Kim และคณะ (2015)	ทำการศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการเติมสารประกอบคลอไรด์ในวัสดุชั้นนำอิเล็คตรอน ทั้งในกรณีสัดส่วนการเติมที่เหมาะสม และไม่	การเติมสารประกอบคลอไรด์ไปในชั้นวัสดุนำอิเล็คตรอน สามารถช่วยเพิ่มการส่งผ่านอิเล็คตรอนอิสระได้ในกรณีที่ปริมาณการเติมเหมาะสม

ลำดับ	ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางการประยุกต์
		เหมาะสมในการนำอิเล็กตรอนของ ชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์ แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์	มีฉะนั้นจะทำให้เกิดการยับยั้งการ เคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระแทน
10.	Sandeep K. Pathak และคณะ (2014)	ทำการปรับปรุงชั้นนำอิเล็กตรอน TiO ₂ ด้วยการเติม Aluminium isopropoxide ใน ปริมาณที่ เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งแบบย้อม ไวแสง และแบบเพอร์รอฟสไกต์	จากการศึกษางานวิจัย การเติม สารประกอบคลอไรด์ในชั้นนำ อิเล็กตรอน TiO ₂ ช่วยเพิ่มการ ส่งผ่านอิเล็กตรอนอิสระที่ได้จาก กระตุ้นจากวัสดุดูดกลืนแสง ส่งผล ให้ ประสิทธิภาพของเซลล์ แสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น



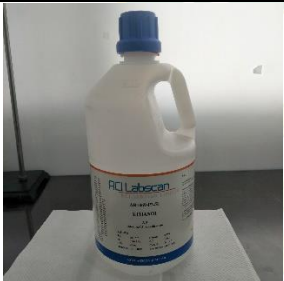
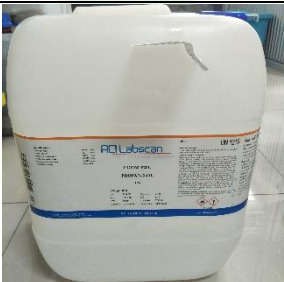
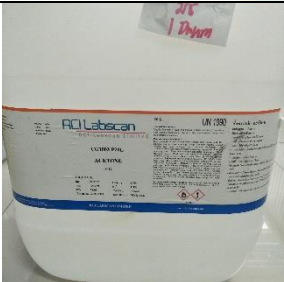

บทที่ 3







วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย



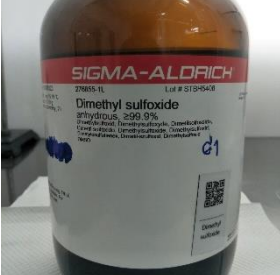



3.1 สารเคมี


การปรับปรุงชั้นนำอิเล็กตรอน และการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการหลายชนิด สารเคมีแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติจำเพาะที่แตกต่างกัน ผู้วิจัยควรทราบถึง ชื่อสารเคมี สูตรโมเลกุล คุณสมบัติของสารเคมี โดยการปรับปรุงชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์นี้ได้ใช้สารเคมีดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สารเคมี

สารเคมี	คุณสมบัติ
	ชื่อ : Ethyl alcohol สูตรโมเลกุล : C_2H_5OH มวลโมเลกุล : 46.07 g/mol จุดหลอมเหลว : $-114.10\text{ }^{\circ}C$ จุดเดือด : $78.20\text{ }^{\circ}C$
	ชื่อ : Isopropanol สูตรโมเลกุล : C_3H_8O มวลโมเลกุล : 60.10 g/mol จุดหลอมเหลว : $-87.90\text{ }^{\circ}C$ จุดเดือด : $82.30\text{ }^{\circ}C$
	ชื่อ : Acetone สูตรโมเลกุล : C_3H_6O มวลโมเลกุล : 58.08 g/mol จุดหลอมเหลว : $-94.90\text{ }^{\circ}C$ จุดเดือด : $56.08\text{ }^{\circ}C$
	ชื่อ : Titanium (IV) chloride สูตรโมเลกุล : $TiCl_4$ มวลโมเลกุล : 189.70 g/mol จุดหลอมเหลว : $-24.10\text{ }^{\circ}C$ จุดเดือด : $136.40\text{ }^{\circ}C$

สารเคมี	คุณสมบัติ
	<p>ชื่อ : Niobium (V) chloride สูตรโมเลกุล : NbCl_5 มวลโมเลกุล : 270.20 g/mol จุดหลอมเหลว : 204.70 °C จุดเดือด : 254.00 °C</p>
	<p>ชื่อ : Tantalum (V) Chloride สูตรโมเลกุล : TaCl_5 มวลโมเลกุล : 358.20 g/mol จุดหลอมเหลว : 217 °C จุดเดือด : 239.4 °C</p>
	<p>ชื่อ : Benzyl alcohol สูตรโมเลกุล : $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$ มวลโมเลกุล : 108.14 g/mol จุดหลอมเหลว : -15.2 °C จุดเดือด : 205.3 °C</p>
	<p>ชื่อ : Ether สูตรโมเลกุล : $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ มวลโมเลกุล : 74.12 g/mol จุดหลอมเหลว : -116.3 °C จุดเดือด : 34.6 °C</p>
	<p>ชื่อ : Titanium diisopropoxide bis(acetylacetonate)(TIPD) สูตรโมเลกุล : $\text{Ti}(\text{acac})_2\text{O}i\text{Pr}_2$ มวลโมเลกุล : 364.26 g/mol จุดเดือด : 85 °C</p>
	<p>ชื่อ : Lead (II) iodide สูตรโมเลกุล : PbI_2 มวลโมเลกุล : 461 g/mol จุดหลอมเหลว : 410 °C จุดเดือด : 872 °C</p>

สารเคมี	คุณสมบัติ
	<p>ชื่อ : Methylammonium iodide (MAI) สูตรโมเลกุล : CH_6IN มวลโมเลกุล : 158.97 g/mol จุดหลอมเหลว : 270-280 °C จุดเดือด : -</p>
	<p>ชื่อ : N,N-Dimethylformamide (DMF) สูตรโมเลกุล : $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$ มวลโมเลกุล : 73.09 g/mol จุดหลอมเหลว : -60.4 °C จุดเดือด : 152.8 °C</p>
	<p>ชื่อ : Dimethyl sulfoxide (DMSO) สูตรโมเลกุล : $\text{C}_2\text{H}_6\text{OS}$ มวลโมเลกุล : 78.14 g/mol จุดหลอมเหลว : 18.5 °C จุดเดือด : 189 °C</p>
	<p>ชื่อ : Cesium iodide สูตรโมเลกุล : CsI มวลโมเลกุล : 259.81 g/mol จุดหลอมเหลว : 632 °C จุดเดือด : 1,280 °C</p>
	<p>ชื่อ : Formamidinium iodide (FAI) สูตรโมเลกุล : IN_2CH_5 มวลโมเลกุล : 171.97 g/mol จุดหลอมเหลว : 235 °C</p>
	<p>ชื่อ : Lead(II) bromide สูตรโมเลกุล : PbBr_2 มวลโมเลกุล : 367 g/mol จุดหลอมเหลว : 370.6 °C จุดเดือด : 916 °C</p>

สารเคมี	คุณสมบัติ
	<p>ชื่อ : Spiro-OMeTAD</p> <p>สูตรโมเลกุล : $C_{81}H_{68}N_4O_8$</p> <p>มวลโมเลกุล : 1,225.4 g/mol</p> <p>จุดหลอมเหลว : 240 °C</p> <p>จุดเดือด : -</p>

3.2 วัสดุ และอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ในการสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ และอุปกรณ์ในการตรวจวัดและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าว ซึ่งรายละเอียดอุปกรณ์ได้ชี้แจงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 วัสดุและอุปกรณ์

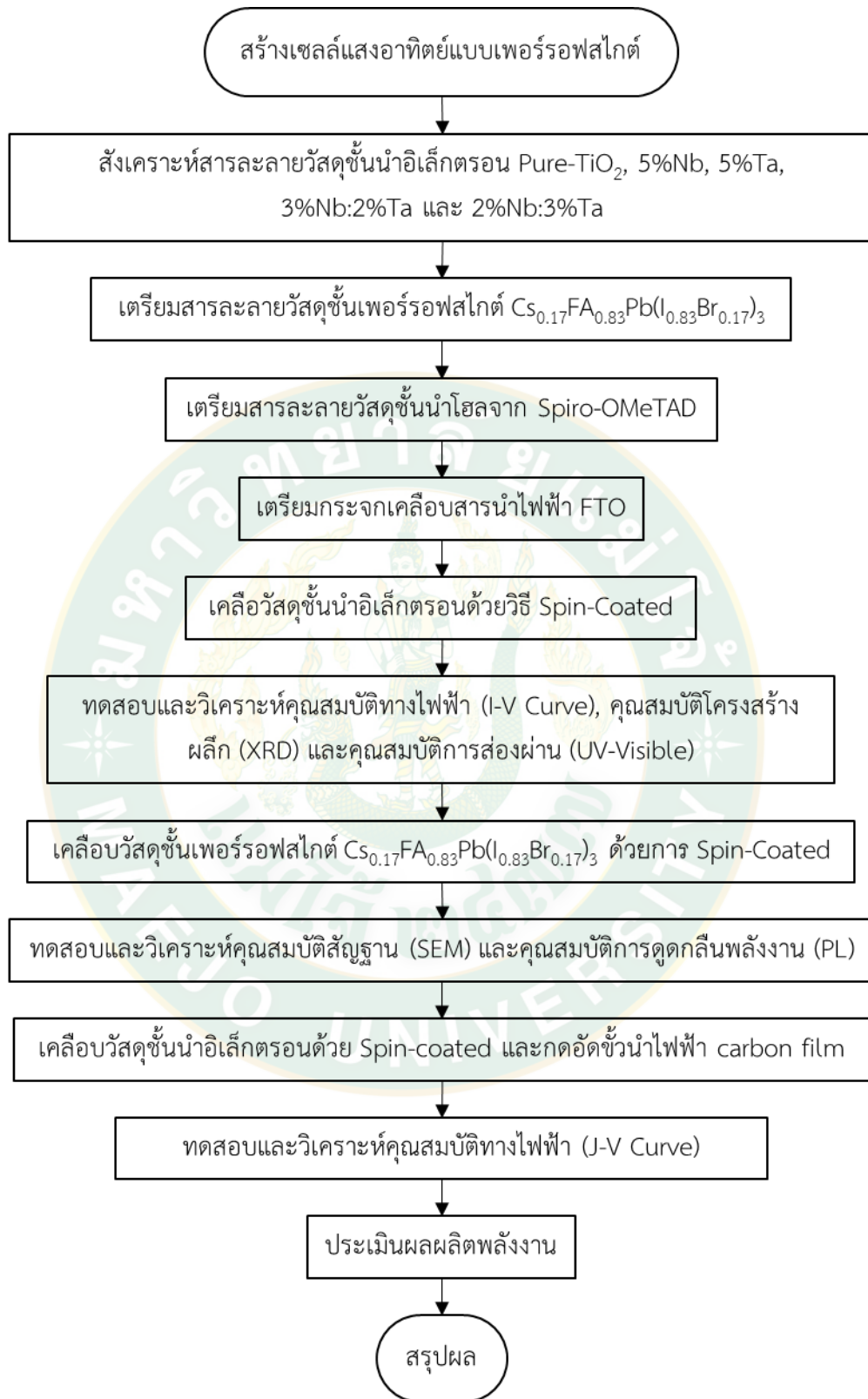
วัสดุและอุปกรณ์	คุณสมบัติ
	<p>แท่นตัดกระจกสำหรับห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ (Q-00X)</p> <p>- ใช้ในการตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (FTO)</p>
	<p>เครื่องล้างความถี่สูง (GRANBO GT0610)</p> <p>- ทำความสะอาดอุปกรณ์ต่างๆ</p> <p>- ใช้ในการผสมสารให้เข้ากันโดยใช้การสั่น</p> <p>- ทำความสะอาดกระจก FTO</p>
	<p>เครื่องดูด/จ่ายสารละลายอัตโนมัติ</p> <p>- ใช้สำหรับดูดสารละลายวัสดุลงบนกระจกเพื่อสร้างชั้นฟิล์มบาง</p>

วัสดุและอุปกรณ์	คุณสมบัติ
	<p>เครื่องกวนสารให้ความร้อน (C-MAG HS7)</p> <ul style="list-style-type: none"> - ให้ความร้อนแก่สารที่ทำการเตรียม - ใช้กวนสารที่ทำการเตรียมขึ้นเพื่อให้ผสมเข้ากัน
	<p>เครื่องหมุนเคลือบฟิล์ม (EZ4)</p> <ul style="list-style-type: none"> - ใช้สำหรับหมุนเคลือบสารละลายให้เป็นชั้นฟิล์มบางเคลือบบนวัสดุ
	<p>เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Rigaku MiniFlex II)</p> <ul style="list-style-type: none"> - วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสาร - วิเคราะห์สารบนชั้นฟิล์ม
	<p>กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy)</p> <ul style="list-style-type: none"> - ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชั้นฟิล์ม - ตรวจสอบถึงความหนาของชั้นฟิล์ม
	<p>เครื่องวัดค่าการส่องผ่านของแสงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงแสงสีขาวย (UV-Visible spectrophotometer)</p> <ul style="list-style-type: none"> - วัดค่าการดูดกลืนแสงของวัสดุชั้นเพอร์รอฟสไกต์ - วัดค่าการทะลุผ่านของแสงในชั้นนำอิเล็กตรอน
	<p>เครื่องวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ (Solar Analyzer)</p> <ul style="list-style-type: none"> - วัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์

3.3 วิธีดำเนินการ

การปรับปรุงชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การเตรียมวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าและประเมินผลผลิตพลังงานของเซลล์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 38



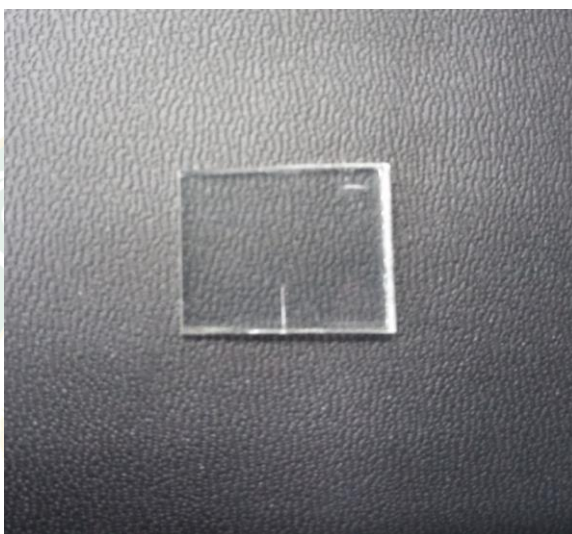


ภาพที่ 38 แผนภาพแสดงวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

3.4.1 การเตรียมกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า

ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ได้ใช้กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า(FTO) เป็นฐานรองสำหรับเคลือบชั้นนำอิเล็กตรอน ชั้นเพอร์รอฟสไกต์ ชั้นนำโฮล และชั้นนำไฟฟ้า ตามลำดับ โดยกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าจะมีโครงสร้างดังภาพที่ 40 ก่อนนำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้ามาใช้งานต้องมีการทำความสะอาดดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (FTO) ที่ผ่านการทำความสะอาด

1. ทำการวัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าให้มีขนาด $2.0 \times 2.5 \text{ cm}^2$
2. นำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าไปกรีดบนเครื่องตัดกระจก โดยกรีดด้านที่ไม่ได้เคลือบสารนำไฟฟ้า
3. นำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่ตัดแล้วล้างด้วยน้ำยาล้างจานเพื่อทำความสะอาดคราบต่าง ๆ ที่อาจปนเปื้อนมากจากการผลิต แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด
4. นำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าจัดเรียงในโถแก้วล้างกระจกสไลด์ ใส่สารละลาย Alconox จนท่วมแล้วปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไป Sonicate เป็นเวลา 15 min
5. เทสารละลาย Alconox ออกจนหมด จากนั้นใส่น้ำกลั่นจนท่วมแล้วปิดฝาให้สนิท นำไป Sonicate เป็นเวลา 15 min
6. เทน้ำกลั่นออกจนหมด จากนั้นใส่ Acetone จนท่วมแล้วปิดฝาให้สนิท นำไป Sonicate เป็นเวลา 15 min
7. เท Acetone ออกจนหมดจากนั้นใส่ Isopropanol จนท่วมแล้วปิดฝาให้สนิท นำไป Sonicate เป็นเวลา 15 min

8. นำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าไปวางไว้บน Hot plate ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 15 min
9. จากนั้นนำไปใส่ใน UV Ozone cleaner เปิดก๊าซออกซิเจน เป็นเวลา 1 min
10. ปิดก๊าซออกซิเจน จากนั้นเปิด UV lamp เป็นเวลา 30 min
11. ปิด UV lamp เปิดก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 10 min จากนั้นนำกระจกไปใช้งาน

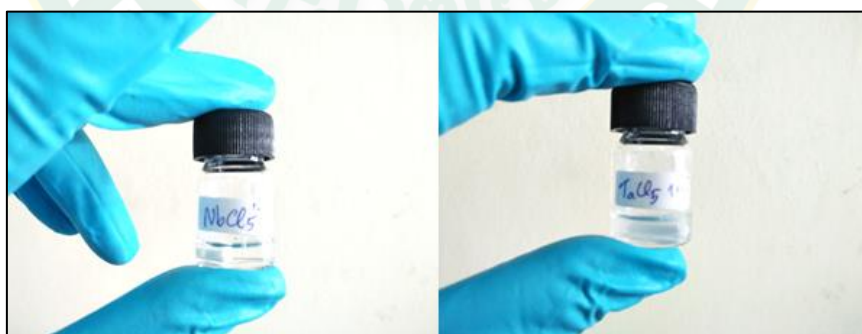


ภาพที่ 40 โครงสร้างกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า

3.4.2 การสร้างฟิล์มชั้นนำอิเล็กตรอน

3.4.2.1 การสังเคราะห์วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน

การสังเคราะห์วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนซึ่งจะอยู่ในรูปของสารละลาย TiO_2 , Nb-Doped TiO_2 , Ta=Doped TiO_2 และ Nb:Ta Co-Doped TiO_2 โดยจะเริ่มจากการเตรียมสารละลายไนโอเบียม และแทนทาลัมจาก NbCl_5 และ TaCl_5 ตามลำดับ ซึ่งสารเคมีดังกล่าวจะมาในรูปของแข็งแบบผง จำเป็นต้องทำละลาย Ethanol ความบริสุทธิ์สูง (High-purity Ethanol 99.9%) ในอัตราส่วน 35.38:1 และ 46.91:1 mg:ml ตามลำดับ จากนั้นทำการหมั่นกวนสารด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา มากกว่า 24 h. จนได้สารละลายไนโอเบียมคลอไรด์ และแทนทาลัมคลอไรด์ ดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 สารละลาย NbCl_5 และ TaCl_5

เมื่อทำการเตรียมสารละลาย NbCl_5 และ TaCl_5 แล้ว สารละลายดังกล่าวจะถูกนำมาผสมกับสารเคมีอื่นเพื่อทำการเตรียมเป็นสารละลาย TiO_2 , Nb-Doped TiO_2 , Ta=Doped TiO_2 และ Nb:Ta Co-Doped TiO_2 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการหยด TiCl_4 2.3 ml ลงใน Ethanol 8 ml ลงในบีกเกอร์ที่วางอยู่ในอ่างน้ำแข็งหมั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 min โดยจะเรียกสารละลายนี้ว่า “สารละลาย A”

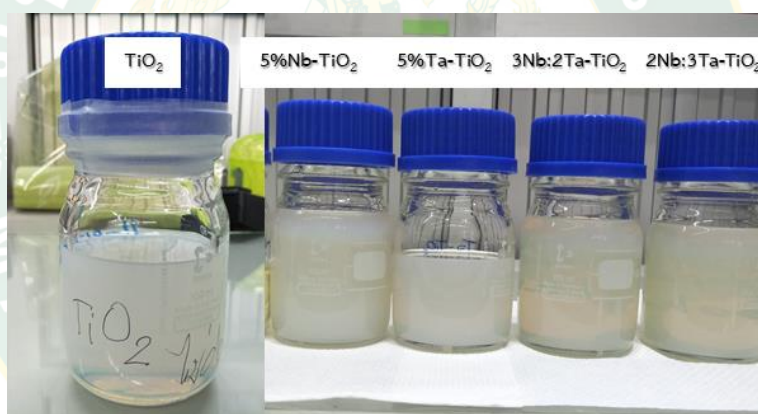
2. จากนั้นนำสารละลาย A ผสมเข้ากับ Benzyl Alcohol 40 ml ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 4.30 h. จากนั้นเก็บสารละลายไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 12 h. โดยจะเรียกสารละลายนี้ว่า “สารละลาย B” ดังภาพที่ 42

3. ตวงสารละลาย B 1.5 ml ผสมกับ Ether 13.5 ml ทำการเขย่าเพื่อให้สารละลายตกตะกอน นำไป Centrifuge ที่ 4,000 rpm เป็นเวลา 10 min จากนั้นเท Ether ออก

4. ใส่ Acetone 15 ml นำไป Centrifuge ที่ 4,000 rpm เป็นเวลา 10 min แล้วเท Acetone ทำแบบเดิมซ้ำ 2 ครั้ง

5. ใส่ Ethanol 4 ml นำไป Sonicate อย่างน้อย 2 h. ควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 50°C จะได้สารละลาย TiO₂ Nanoparticles (TiO₂ NPs)

6. ผสมสารละลาย TiO₂ NPs กับ TIPD (Titanium diisopropoxide bis(acetylacetonate)) อัตราส่วน 7:1 (μl:ml) เก็บตู้เย็น จากนั้นจะได้สารละลายวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์จาก Titanium dioxide Nanoparticles (TiO₂ NPs) ดังภาพที่ 43



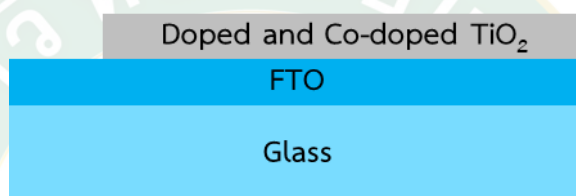
ภาพที่ 42 สารละลาย B จากการสังเคราะห์วัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 43 วัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ TiO₂ Nanoparticles

3.4.2.2 การสร้างชั้นฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์

1. ให้ความร้อนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าขนาด $2 \times 2.5 \text{ cm}^2$ ที่ผ่านการทำความสะอาดผิวหน้าด้วย UV Ozone cleaner วางบนแท่นของเครื่องหมุนเคลือบ
2. หยดสารละลายวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่วางบนเครื่องหมุนเคลือบด้วยปริมาณ $70 \mu\text{l}$
3. ทำการหมุนเคลือบด้วยความเร็ว $2,500 \text{ rpm}$ เป็นเวลา 40 sec
4. นำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 165°C เป็นเวลา 30 min จากนั้นสามารถนำไปเคลือบวัสดุชั้นดูดกลืนแสง (Perovskite layer) ทำให้ได้โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการหมุนเคลือบวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์

3.4.3 การสร้างชั้นเพอร์ออฟสไกต์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับการสร้างชั้นเพอร์ออฟสไกต์จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การเตรียมสารละลายเพอร์ออฟสไกต์ และการเคลือบวัสดุเพอร์ออฟสไกต์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.3.1 การเตรียมสารละลายเพอร์ออฟสไกต์

การสร้างชั้นเพอร์ออฟสไกต์ที่เป็น $\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$ โดยมีสารตั้งต้นเป็น Formamidinium iodide (FAI) Cesium iodide (CsI) Lead (II) Bromide (PbBr_2) Lead (II) iodide (PbI_2) ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็งแบบผง โดยมีตัวทำละลายเป็น N,N-Dimethyl-formamide (DMF) และ Dimethyl sulfoxide (DMSO) เป็นต้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

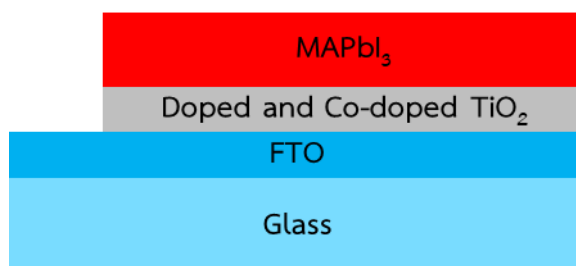
1. ชั่ง CsI 129.5 mg , FAI 97.9 mg , PbBr_2 63.3 mg และ PbI_2 248.7 mg ใส่ลงในขวดแก้วสำหรับผสมสาร
2. เติมตัวทำละลาย DMF $425 \mu\text{l}$ และ DMSO $95 \mu\text{l}$ ใส่ลงในขวดแก้วผสมสารที่ได้ทำการใส่สารตั้งต้น
3. จากนั้นนำไปหมุนกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 48 h . ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งสารทั้งหมดละลายเป็นของเหลวสีเหลืองใสดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 สารละลายวัสดุเพอร์รอฟสไกต์

3.4.3.2 การเคลือบวัสดุเพอร์รอฟสไกต์

ในขั้นตอนการสร้างชั้นฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์จะถูกหมุนเคลือบบนพื้นผิวชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้สารละลายวัสดุเพอร์รอฟสไกต์ที่ได้ถูกเตรียมไว้แล้ว (ภาพที่ 45) โดยเริ่มจากการนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการเคลือบวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ไปให้ความร้อนบน Hot plate เพื่อไล่ความชื้นออกจากพื้นผิวและชั้นฟิล์ม จากนั้นทำความสะอาดผิวหน้าฟิล์มด้วยแสงยูวี (UV Treatment) ขั้นตอนการหมุนเคลือบวัสดุชั้นเพอร์รอฟสไกต์จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกจะหยดสารละลายวัสดุเพอร์รอฟสไกต์ปริมาณ 70 μl หมุนความเร็วแรกที่ 1,000 rpm เป็นเวลา 13 sec จากนั้นจะถูกเร่งความเร็วการหมุนเป็น 4,000 rpm เป็นเวลา 30 sec ในช่วง 5 sec สุดท้ายของการหมุนจะทำการหยด Anisole ปริมาณ 180 μl จากนั้นนำชิ้นงานไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 15 min จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีโครงสร้างดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการหมุนเคลือบวัสดุชั้นเพอร์รอฟสไกต์

3.4.4 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์แบบปกติจำเป็นต้องมีชั้นวัสดุจำนวน 5 ชั้น ได้แก่ ชั้นกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ชั้นวัสดุนำอิเล็กทรอนิกส์อน ชั้นเพอร์รอฟสไกต์ ชั้นนำโฮล และชั้นขั้วนำไฟฟ้า จากหัวข้อ 3.4.1, 3.4.2 และ 3.4.3 ได้กล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมชั้นวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์อนและวัสดุชั้นเพอร์รอฟสไกต์ การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในขั้นตอนของการสร้างวัสดุชั้นนำโฮลจำเป็นต้องแบ่งออกเป็นการเตรียมสารละลาย

3.4.5 การสร้างวัสดุชั้นนำโฮล

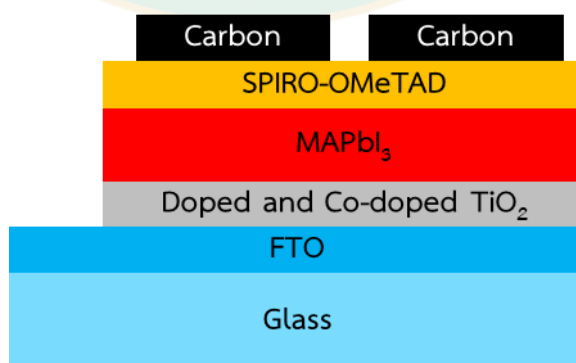
การสร้างวัสดุชั้นนำโฮลที่เลือกใช้เป็น Spiro-OMeTAD ที่มีช่องว่างระดับพลังงานประมาณ -3.1 eV. และมีระดับพลังงานแถบนำไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ -5.2 eV. มีการสังเคราะห์สารละลายวัสดุชั้นนำโฮล

1) การเตรียมสารละลายวัสดุชั้นนำโฮล สามารถทำได้โดยการใช้ Spiro-OMeTAD 28.92 mg ละลายใน Chlorobenzene ปริมาณ 400 μ l, 4-TBP 11.52 μ l และ Li-TFSI 7 μ l หมุนกวนด้วยแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิปกติเป็นเวลาอย่างน้อย 1 h.

2) การสร้างวัสดุชั้นนำโฮล ทำได้โดยการนำสารละลายวัสดุชั้นนำโฮลหมุนเคลือบลงบนชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบชั้นเพอร์รอฟสไกต์ที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 sec

3.4.6 การสร้างขั้วนำไฟฟ้าด้านหน้าด้วยฟิล์มคาร์บอน

ขั้วนำไฟฟ้าด้านหน้าจากฟิล์มคาร์บอนถูกเตรียมจากคาร์บอนในรูปแบบของเหลวชั้น (JELCON CH-8) ด้วยการนำไปทาบนผิวแก้วที่สะอาดด้วยเทคนิค Doctor-blading โดยมีความหนาประมาณ 3 mm. จากนั้นนำไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 2 h. และถูกทิ้งให้แห้งสนิทที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการติดขั้วนำไฟฟ้าด้วยฟิล์มคาร์บอนขนาดพื้นที่ 16 mm² กดอัดด้วยความดัน 6 bars เป็นเวลา 3 min ที่อุณหภูมิ 50°C จะได้โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์



ภาพที่ 48 เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

3.5.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกต้องเตรียมขึ้นด้วยพื้นฐานจากไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยมีการเติมธาตุไนโอเบียม (Nb^{5+}) และแทนทาลัม (Ta^{5+}) แบบการเติมคู่ (Co-doped) ซึ่งในกระบวนการการวิเคราะห์ทางกายภาพจะถูกแบ่งออกเป็น การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) (Rigaku MiniFlex II ; $\text{Cu K}\alpha=1.5418\text{\AA}$) โดยจะใช้มุมการวิเคราะห์ 2θ ตั้งแต่ $20^\circ-80^\circ$ เพื่อวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกของไทเทเนียม การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) (TESCAN Clara) โดยวิเคราะห์ถึงโครงสร้างและความหนาของชั้นฟิล์มวัสดุนำอิเล็กทรอนิกส์จากภาคตัดขวางของเซลล์ และวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติการส่องผ่านแสงของชั้นฟิล์มวัสดุนำอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณการทะลุผ่านของแสงความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) จนถึงช่วงแสงขาว (Visible light) (UV-Visible spectroscopy) (Varian Cary 50 UV-Visible Spectrophotometer) โดยใช้ FTO เป็น Baseline เพื่อทดสอบการปริมาณการส่องผ่านของแสงในชั้นฟิล์มวัสดุนำอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาช่องว่างระดับพลังงานของวัสดุนำอิเล็กทรอนิกส์

3.5.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยไนโอเบียมและแทนทาลัม เพื่อวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้ชุดทดสอบที่มีแหล่งกำเนิดแสงเป็น Solar Light XPS-400 ที่ให้ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ AM 1.5 ร่วมกับเครื่อง voltage source meter (Ossila X200) ทดสอบในห้องปรับอากาศความชื้นต่ำ

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

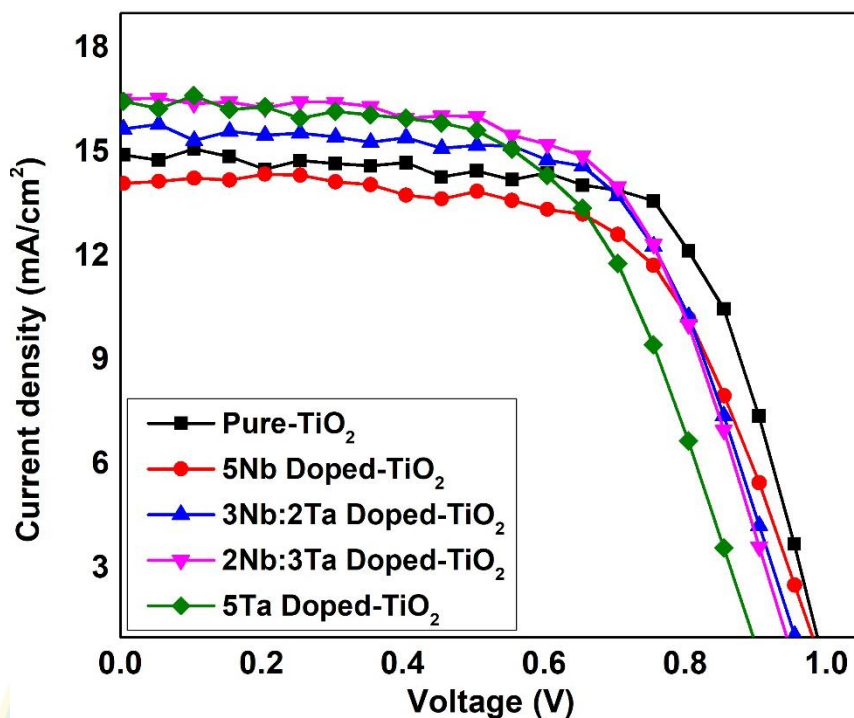
ในบทนี้จะเป็นส่วนการวิเคราะห์ผลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ซึ่งประกอบไปด้วย การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ถูกแบ่งออกเป็น การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน Nb:Ta Co-doped TiO₂ เพื่อทราบคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้า การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพถูกแบ่งออกเป็น การวิเคราะห์คุณสมบัติการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์และการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การวิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วยคุณสมบัติการส่องผ่านและดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน โดยรายละเอียดผลการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเจือร่วมของไนโอเบียมและแทนทาลัมในชั้นนำอิเล็กตรอนที่เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทดสอบได้ด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า สามารถบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) เพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (Power conversion efficiency ; PCE) ได้

4.1.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ (J-V curve)

เมื่อชั้นฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน Pure-TiO₂, Nb-Doped TiO₂, Ta-Doped TiO₂ และ Nb:Ta Co-Doped TiO₂ ผ่านการทดสอบคุณสมบัติการต้านทานทางไฟฟ้าแล้วได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยมีตัวแปรที่น่าสนใจได้แก่ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}) ค่าแรงดันไฟฟ้าสภาวะวงจรเปิด (V_{oc}) ค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF) ค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ (R_s) และค่าความต้านทานรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุชนิดพีและชั้นวัสดุชนิดเอ็นหรือที่เรียกว่าค่าความต้านทานชันด์ (R_{sh})

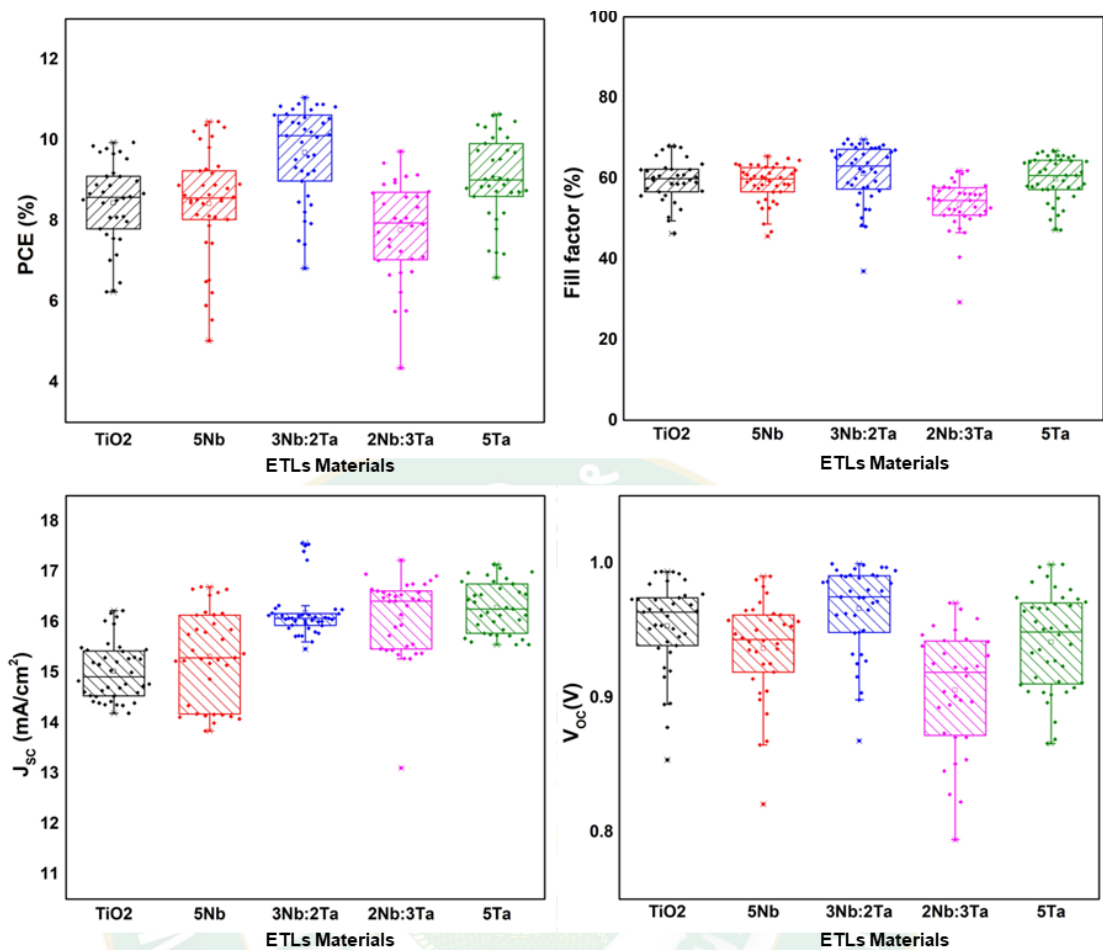


ภาพที่ 49 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า

ภาพที่ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้า (J-V Curve) จากภาพพบว่าเมื่อทำการเติมไอออนของไนโอเบียมหรือแทนทาลัมทุกสัดส่วน ส่งผลให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนอาจเป็นเพราะปริมาณการแทนที่ไอออนไทเทเนียมของไนโอเบียมและแทนทาลัมในปริมาณดังกล่าวช่วยเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกระแสอิเล็กตรอนผ่านวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน เมื่อวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะสามารถแสดงผลได้ในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน	PCE		FF (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	R_{sh} (Ω·cm ²)	R_s (Ω·cm ²)
	(Ave./max)	(%)					
Pure-TiO ₂	8.65/9.71	60.98	15.02	0.94	8,340.6	16.41	
5Nb Doped-TiO ₂	8.91/9.81	61.75	14.91	0.97	3,307.8	14.41	
3Nb:2Ta Co-doped TiO ₂	10.37/11.05	64.81	16.21	0.99	9,260.11	12.65	
2Nb:3Ta Co-doped TiO ₂	8.81/9.35	57.62	16.31	0.94	1,246.01	17.51	
5Ta Doped-TiO ₂	9.89/10.48	62.50	16.41	0.96	2,893.28	12.67	



ภาพที่ 50 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

จากภาพที่ 50 เมื่อนำข้อมูลของทุกสัดส่วนมาวิเคราะห์จากตารางที่ 10 พบว่า Pure-TiO₂ มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 8.67% มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเฉลี่ย 15.02 mA·cm² มีค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเฉลี่ย 0.94 V และมีค่าฟิลแฟกเตอร์เฉลี่ย 60.98% ในขณะที่เมื่อทำการเติมไอออนของไนโอเบียมที่สัดส่วน 5%Nb Doped-TiO₂ สามารถให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและค่าฟิลแฟกเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 8.91%, 14.91 mA/cm², 0.97 V และ 61.75% ตามลำดับ และเมื่อทำการเติมไอออนของแทนทาลัมที่สัดส่วน 5%Ta Doped-TiO₂ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 9.89% ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเฉลี่ย 16.41 mA·cm² ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเฉลี่ย 0.97 V และค่าฟิลแฟกเตอร์เฉลี่ยมีค่า 62.50% เมื่อทำการเติมรวมทั้งสัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ ได้แสดงผลประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ดีที่สุด 10.37% รวมถึงตัวแปรอื่นๆ อาทิ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเฉลี่ย 16.21 mA/cm² ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเฉลี่ย 0.99 V และค่าฟิลแฟกเตอร์เฉลี่ย 64.81% สังเกต

จากข้อมูลพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลดลงที่สัดส่วน 5%Nb Doped-TiO₂ มีค่าน้อย อาจเป็นเพราะเกิดการเติมไนโอเบียมที่มากเกินไปจนเกิดความเหมาะสมจนเกิดขัดขวางการถ่ายโอนประจุ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ(Li et al., 2019) ที่แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนที่เหมาะสมกับการเติมไนโอเบียมคือ 0.3% หรือประมาณ 3%Nb Doped-TiO₂ ในงานวิจัยนี้ 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} เนื่องด้วย 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ มีค่า R_s ที่ต่ำถึง 12.65 Ω·cm² เป็นเหตุให้ไม่เกิดการสูญเสียกระแสให้กับเซลล์แสงอาทิตย์และ R_{sh} ที่สูงถึง 9,260 Ω·cm² ซึ่งเป็นค่าที่สูงทำให้ไม่เกิดการไหลกลับของกระแสภายในเซลล์ เป็นเหตุผลที่ทำให้ถึงสัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ จะมีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรน้อยกว่าแต่กลับมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูง ซึ่งถือว่าเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่มีพื้นฐานเป็น TiO₂ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

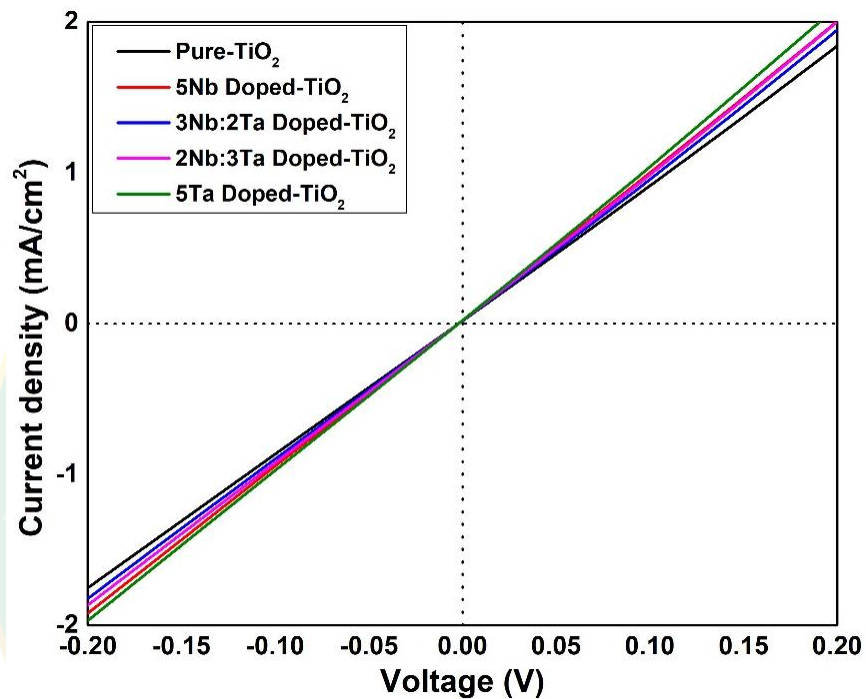
4.1.2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน (J-V characteristics)

เมื่อทำการหมุนเคลือบวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่มีปริมาณการเจือไนโอเบียมแทนทาลัมที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการติดชั้นนำไฟฟ้าด้วยแผ่นฟิล์มคาร์บอน โดยมีผลทดสอบคุณลักษณะของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V characteristics) ของฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน (ภาพที่ 51) โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะเป็นแผนภูมิเส้นตรงที่มีความแตกต่างกันไม่ชัดเจน แต่เมื่อทำการวิเคราะห์หาความต้านทานทางไฟฟ้า (R_{film}) ของชั้นฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนจากสมการกฎของโอห์ม (สมการที่ 6) ได้ข้อมูลดังตารางที่ 11 เห็นได้ว่าที่สัดส่วน Pure-TiO₂ มีค่าความต้านทานอยู่ประมาณ 98.77 Ω·cm² เมื่อทำการเติมไนโอเบียมในสัดส่วน 5%Nb Doped-TiO₂ ให้ค่าความต้านทานอยู่ประมาณ 89.20 Ω·cm² เมื่อเติมแทนทาลัมที่สัดส่วน 5%Ta Doped-TiO₂ พบว่าค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเป็น 111.14 Ω·cm² เมื่อทำการเติมร่วมที่ สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ พบว่าให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในชั้นฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่ต่ำที่สุดคือ 75.18 Ω·cm² ซึ่งการที่ชั้นฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่ค่าความต้านทานต่ำถือว่าเป็นแนวทางที่มีประโยชน์ในการถ่ายโอนประจุผ่านชั้นฟิล์มวัสดุ จากค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุชั้นฟิล์มที่ลดลงอาจเกิดจากการที่เติมไนโอเบียมและแทนทาลัมในสัดส่วนที่เหมาะสมทำให้โครงสร้างผลึกของ TiO₂ มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลให้ชั้นฟิล์มสามารถถ่ายโอนประจุได้ดีขึ้น

$$R_{\text{film}} = \frac{V}{J}$$

สมการที่ 6

เมื่อ V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V)
 J คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (mA/cm^2)
 R_{film} คือ ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า ($\text{k}\Omega\text{-cm}^2$)



ภาพที่ 51 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าของฟิล์มวัสดุ
 ชั้นนำอิเล็กตรอน

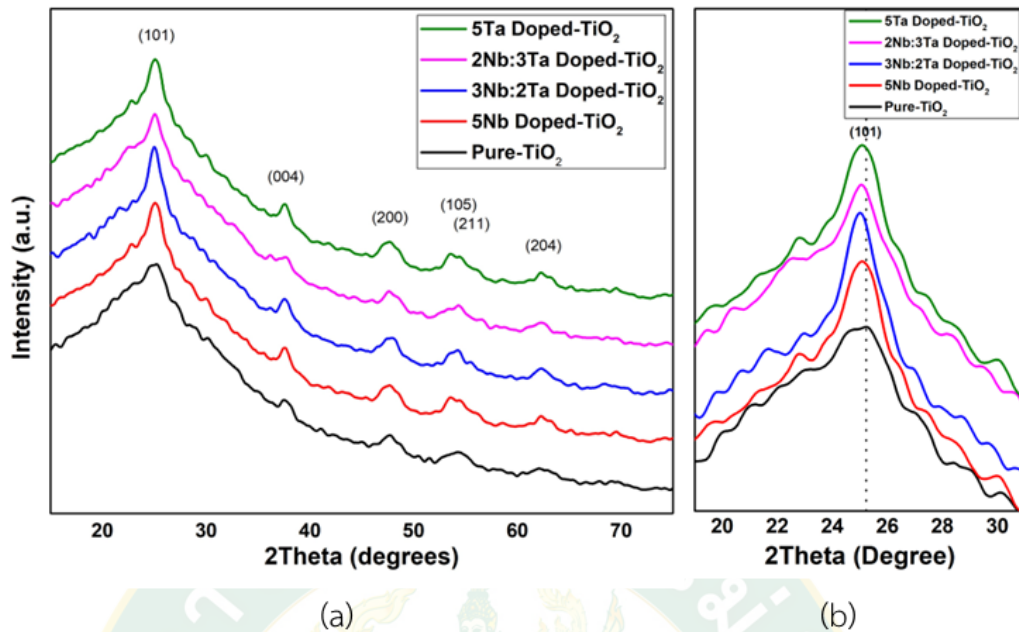
ตารางที่ 11 ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน

วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน	ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า ($\Omega\text{-cm}^2$)
Pure-TiO ₂	98.77
5%Nb Doped-TiO ₂	89.20
3%Nb:2%Ta Co-doped TiO ₂	75.18
2%Nb:3%Ta Co-doped TiO ₂	306.56
5%Ta Doped-TiO ₂	111.14

4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีการเจือร่วมของไนโอเบียมและแทนทาลัมในชั้นนำอิเล็กตรอนที่เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์

4.2.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงชนิดของสารประกอบ โครงสร้างผลึก และความสมบูรณ์ของผลึกที่อยู่ในสารตัวอย่าง เพื่อสามารถศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกในสารตัวอย่างได้ โดยการวิเคราะห์ฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน Pure-TiO₂, Nb-Doped TiO₂, Ta-Doped TiO₂ และ Nb:Ta Co-Doped TiO₂ ที่ถูกเตรียมขึ้นตามวิธีในหัวข้อ 3.4.2 การวิเคราะห์ที่มุม 2Theta เท่ากับ 10°-70° แสดงดังรูปที่ 52a เมื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล (Ref. Code: 01-070-0413) แสดงให้ทราบถึงเฟสแบบอนาเทส (Anatase) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) (He et al., 2019) ซึ่งจะมีโครงสร้างผลึกแบบทรงแทงอนัล (Tetragonal) พบว่าระนาบ (101) มีการเคลื่อนไปยังมุมที่ลดลงเนื่องจากการแทนที่ตำแหน่งของธาตุไทเทเนียม (Ti⁴⁺) ซึ่งมีรัศมีไอออนประมาณ 0.605 Å ด้วยธาตุไนโอเบียม (Nb⁵⁺) และธาตุแทนทาลัม (Ta⁵⁺) ซึ่งมีรัศมีไอออนประมาณ 0.64 Å ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างแลคทิตลดลงระนาบที่ (101) มีการเปลี่ยนแปลง (Zare Bidaki et al., 2022) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ระนาบ (101) มีมุม 2Theta ที่ลดลงแสดงดังตารางที่ 12 แสดงดังรูปที่ 52b ทั้งนี้การเคลื่อนที่ของพีค (101) นับว่าเป็นการยืนยันถึงความสำเร็จในการเติมไอออนของไนโอเบียมและแทนทาลัมไปยังชั้นฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน TiO₂ และที่ระนาบ (101) ของสัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ (เส้นสีน้ำเงิน) สามารถสังเกตเห็นลักษณะเส้นที่เรียวแหลมได้อย่างชัดเจน แสดงออกถึงลักษณะความเป็นผลึกที่สมบูรณ์มากขึ้นเมื่อมีการเติมคู่ของไนโอเบียมและแทนทาลัม การที่มีผลึกที่มีความสมบูรณ์นับเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่จะช่วยในการถ่ายโอนประจุผ่านชั้นนำอิเล็กตรอนได้ดี (Li et al., 2021) เป็นผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพที่ดี



ภาพที่ 52 (a) ผล XRD ของวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่มุม 2Theta ตั้งแต่ 10°-80° (b) ผล XRD ที่ระนาบ (101)

ตารางที่ 12 ข้อมูลมุม 2Theta ของระนาบ (101)

วัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนที่ระนาบ (101)	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

4.2.2 วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 50,000 เท่า เพื่อศึกษาถึงความแตกต่างของพื้นผิว ขนาดของเกรน ความหนาของชั้นฟิล์ม และเพื่อตรวจสอบถึงความบกพร่องของคุณสมบัติวัสดุเมื่อส่งผลแสดงให้เห็นบนพื้นผิว ซึ่งเป็นปัจจัยต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

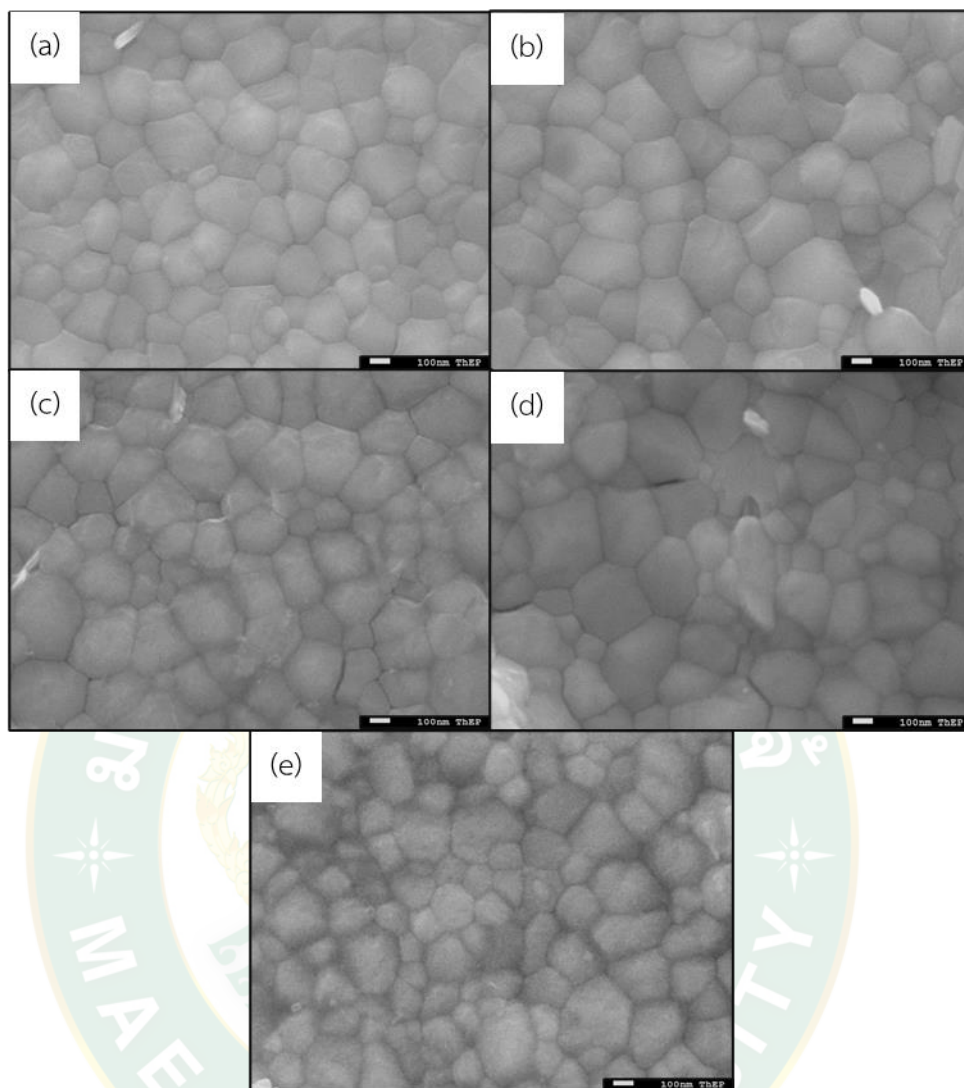
4.2.2.1 การวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์

ลักษณะพื้นฐานของฟิล์มวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน TiO₂ ที่ถูกเจือด้วยสัดส่วน Pure-TiO₂, 5%Nb-Doped TiO₂, 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂, 2%Nb:3%Ta Co-doped TiO₂

และ 5%Ta-Doped TiO₂ ที่ถูกหมุนเคลือบลงบน FTO ด้วยความเร็วการหมุนที่ 1,500 rpm เป็นเวลา 40 sec และทุกสัปดาห์ได้ถูกเคลือบด้วยชั้นเพอร์รอฟสไกต์ที่ความเร็วการหมุนที่ 1,000 rpm เป็นเวลา 13 sec จากนั้นเพิ่มความเร็วการหมุนเป็น 4,000 rpm เป็นเวลา 30 sec ทำให้ได้พื้นผิวชั้นฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ดังรูปที่ 53 ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า พบว่าลักษณะของเกรนที่อัตราส่วน Pure-TiO₂ (ภาพที่ 53a) มีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอโดยดูจากความเข้มของสีในแต่ละพื้นที่ผิวของชั้นฟิล์มเมื่อทำการวิเคราะห์ถึงขนาดเกรนของชั้นฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์แสดงดังตารางที่ 13 พบว่าที่สัปดาห์ดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 211.22 nm เมื่อทำการการเติมไอออนของไนโอเบียมและแทนทาลัมที่สัปดาห์ 5%Nb Doped-TiO₂ (ภาพที่ 53b) และ 5%Ta Doped-TiO₂ (ภาพที่ 53e) พบว่ามีว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเกรนประมาณ 230.67 nm และ 234.22 nm ตามลำดับ และเมื่อทำการเติมรวมไอออนของไนโอเบียมและแทนทาลัมที่สัปดาห์ 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ (ภาพที่ 53c) พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกรนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 236.84 nm ซึ่งสอดคล้องกับผลทางไฟฟ้าที่สัปดาห์ดังกล่าวให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุด (Wang et al., 2021) ทั้งนี้การแสดงออกทางกายภาพของพื้นผิววัสดุอาจไม่สามารถสรุปได้ถึงผลทางไฟฟ้าทั้งหมดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์จึงมีความจำเป็นต้องพิสูจน์ทราบทางคุณสมบัติทางแสงของเซลล์ด้วย

ตารางที่ 13 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

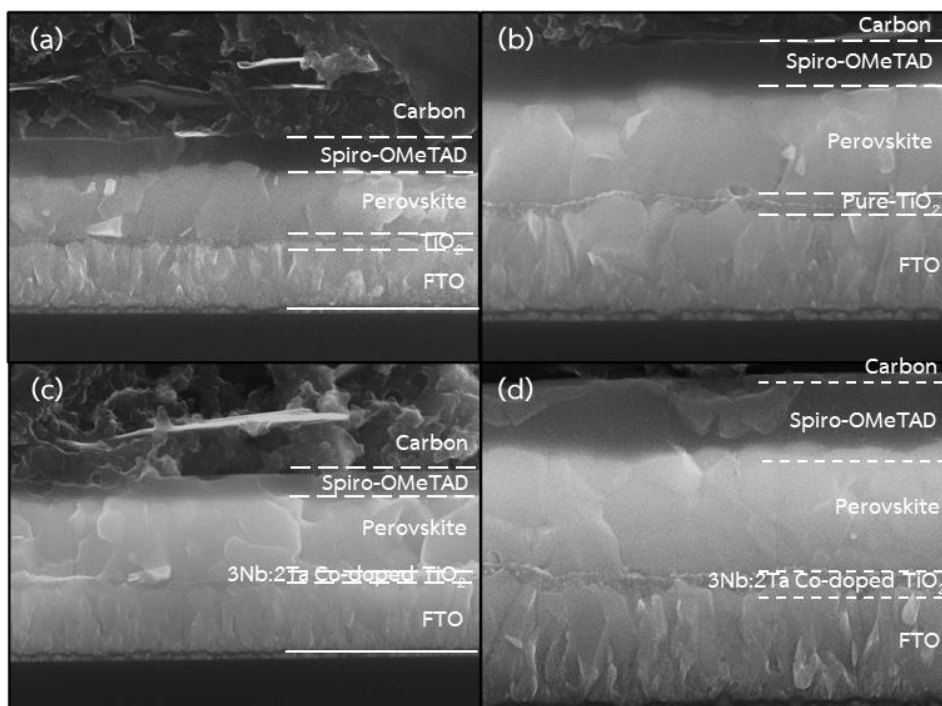


ภาพที่ 53 ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) Pure-TiO₂, (b) 5%Nb Doped-TiO₂, (c) 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂, (d) 2%Nb:3%Ta Co-doped TiO₂ และ(e) 5%Ta Doped-TiO₂

4.2.2.2 ภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

การวิเคราะห์ภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 30,000 และ 50,000 เท่า เพื่อศึกษาถึงความสมบูรณ์ของรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มและประเมินความหนาของชั้นฟิล์มเป็นผลมาจากเลือกเลิกใช้ความเร็วและเวลาในขั้นตอนการหมุนเคลือบวัสดุแต่ละชั้นซึ่งปัจจัยนี้มีผลต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังเป็นข้อมูลการยืนยันชั้นฟิล์มของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกเซลล์แสงอาทิตย์ที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ ซึ่งเป็นสัดส่วน

การเจือที่ส่งผลประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีที่สุด และเซลล์แสงอาทิตย์ที่สัดส่วน Pure-TiO₂ โดยเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองถูกหมุนเคลือบชั้นนำอิเล็กตรอนด้วยสารละลาย Pure-TiO₂ และ 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ ลงบน FTO ที่ความเร็ว 1,500 rpm เป็นเวลา 40 sec จากนั้นเคลือบชั้นเพอร์รอฟสไกต์ (Cs_{0.17}FA_{0.83}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})₃) ที่ความเร็ว 4,000 rpm เป็นเวลา 30 sec สุดท้ายหมุนเคลือบชั้นนำโฮล (Spiro-OMeTAD) ที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 sec ทำให้ได้ชั้นฟิล์มของเซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพที่ 54 ที่สัดส่วน Pure-TiO₂ (ภาพที่ 54a และ 54b) จะสังเกตเห็นได้ในบริเวณรอยเชื่อมต่อระหว่างชั้นวัสดุนำอิเล็กตรอนที่ทำการหมุนเคลือบลงบนชั้นสารนำไฟฟ้า (FTO) ที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ การเคลือบของสารละลายวัสดุไม่สามารถครอบคลุมได้อย่างทั่วถึง ซึ่งเป็นจุดบกพร่องทำให้เกิด trap current density ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลดลง ในทางกลับกันพบว่าสารละลายที่ ถูกเติมรวมด้วยไนโอเบียมและแทนทาลัมที่ สัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ (ภาพที่ 54c และภาพที่ 54d) สามารถครอบคลุมชั้น FTO ได้ดีกว่า อาจกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของไนโอเบียมและแทนทาลัมมีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณลักษณะสารละลายวัสดุให้สามารถเคลือบพื้นผิวได้ดียิ่งขึ้น และยังทำให้เพิ่มการถ่ายโอนประจุบริเวณรอยต่อระหว่าง FTO กับ ETLs เป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของสัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ ที่สูงกว่าสัดส่วน Pure-TiO₂ จากการวัดความหนาของชั้นฟิล์มแต่ละชั้นได้ความหนาดังต่อไปนี้ ชั้นนำอิเล็กตรอนของสัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ มีความหนาประมาณ 55.25 nm ชั้นเพอร์รอฟสไกต์ ซึ่งเป็นชั้นดูดซับแสงมีความหนาประมาณ 495.15 nm และสุดท้ายชั้นนำโฮลที่มีวัสดุเป็น Spiro-OMeTAD มีความหนาประมาณ 249.27 nm



ภาพที่ 54 ภาพตัดขวางถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a-b) Pure-TiO₂ และ (c-d) 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂

4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีการเจือรวมของไนโอเบียมและแทนทาลัมในชั้นนำอิเล็กตรอนที่เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์

4.3.1 วิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy

คุณสมบัติการส่องผ่านของแสงในชั้นนำอิเล็กตรอนเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ ถูกทดสอบด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy ทดสอบในช่วงความยาวคลื่น 200-1,000 nm โดยใช้อากาศเป็น Baseline จากภาพที่ 55a เห็นได้ว่าปริมาณแสงสามารถส่องผ่านได้ดีในความยาวคลื่นช่วง 300-700 nm ซึ่งจะผ่านชั้นนำอิเล็กตรอนเข้าสู่ชั้นเพอร์รอฟสไกต์ ซึ่งแสงสามารถส่องผ่านไปได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันโดยช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 350-500 nm แสงสามารถส่องผ่านชั้นนำอิเล็กตรอนไปได้มากกว่า 50% และที่ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 500-1,000 nm แสงสามารถส่องผ่านชั้นนำอิเล็กตรอนไปยังชั้นเพอร์รอฟสไกต์ได้มากกว่า 70% ของแสงตกกระทบ เมื่อทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการดูดกลืนแสงในภาพที่ 55b สังเกตได้ว่าทุกสัดส่วนมีความแตกต่างกันเล็กน้อยมาก แต่เมื่อนำผลวิเคราะห์การดูดกลืนแสงมาวิเคราะห์ระดับช่องว่างพลังงาน (Energy gap: E_g) (ภาพที่ 56) ที่มีลักษณะช่องว่างแบบ Direct band gap จากความสัมพันธ์ของ Tauc's plot method สมการที่ 7 โดยกำหนดให้แกน $y=(\alpha hv)^2$ และ $x= hv$ ทำให้เมื่อลากเส้นตัดกับแกนพลังงานโฟตอน (x-axis) ณ จุดตัดเส้นตรงสามารถประมาณได้ค่าช่องว่าง

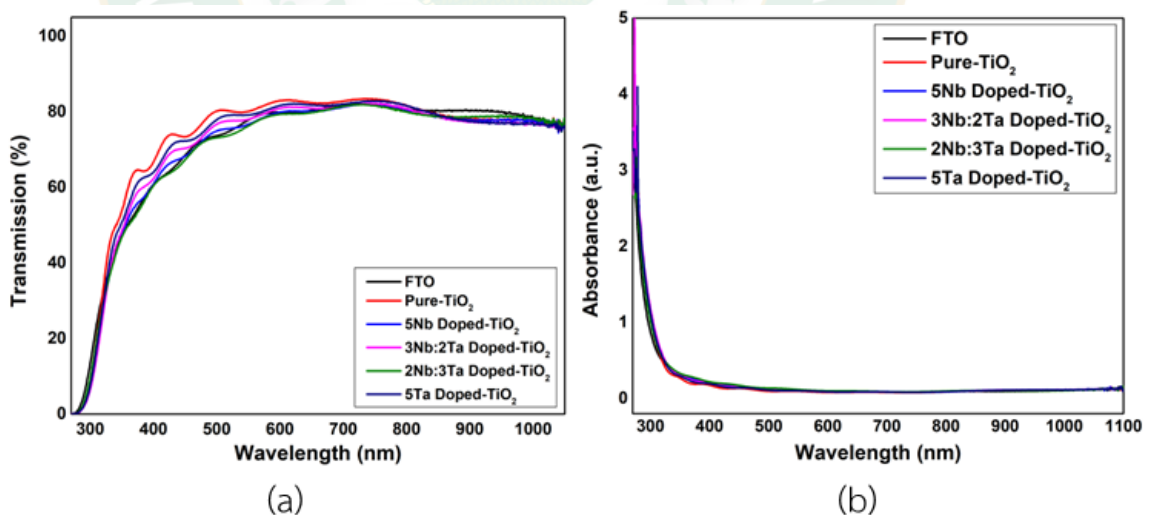
ระดับพลังงาน (ละครไทย, 2018) พบว่าเมื่อทำการเติมไนโอเบียมและแทนทาลัมลงไปชั้นนำอิเล็กตรอนทำให้ระดับช่องว่างพลังงานลดลง เป็นผลมาจากเกิดการสูญเสียไอออนของไนโอเบียม (Nb^{5+}) และแทนทาลัม (Ta^{5+}) ให้กับไทเทเนียม (Ti^{4+}) โดยที่สัดส่วนที่มีระดับช่องว่างพลังงานเหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์มากที่สุดคือ 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO_2 ซึ่งมีระดับช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 3.43 eV ซึ่งเป็นระดับช่องว่างที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนระหว่างชั้นวัสดุของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ (Chen et al., 2022) จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สามารถทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น

สมการความสัมพันธ์แบบ Tauc's plot

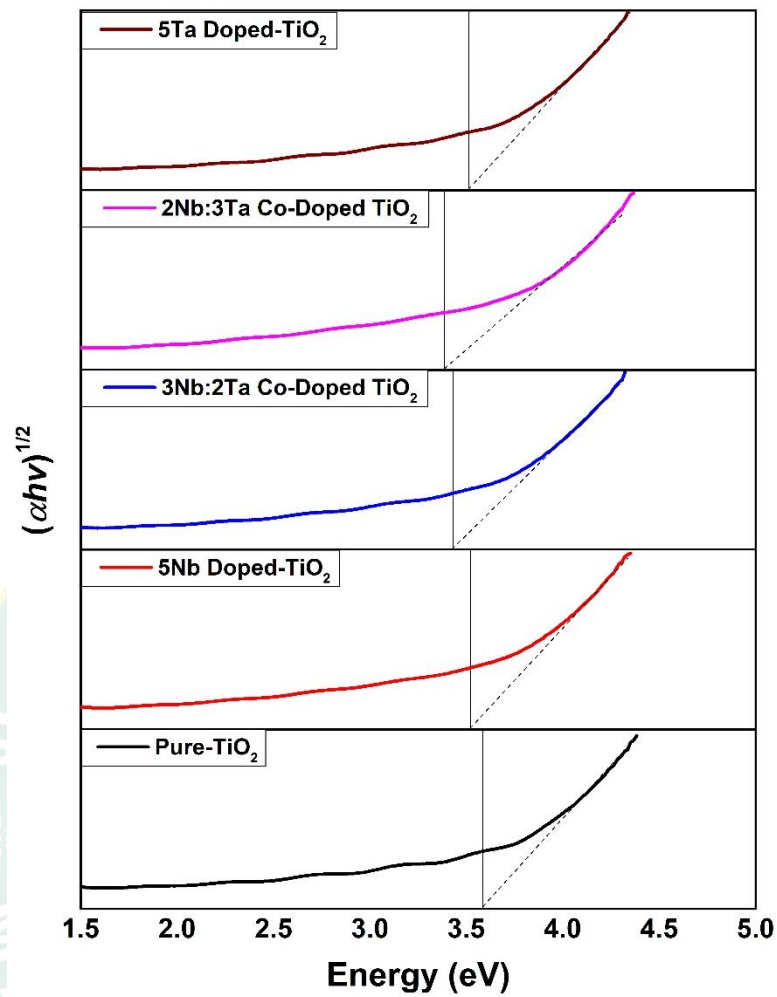
$$\alpha hv = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}}$$

สมการที่ 7

- เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient)
 h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (4.135×10^{-15} eV·s)
 ν คือ ความถี่ (s^{-1})
 A คือ ค่าคงที่การเปรียบเทียบ
 E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน (Energy band gap, eV)



ภาพที่ 55 (a) คุณสมบัติการส่องผ่านแสง (b) คุณสมบัติการดูดกลืนแสง ของชั้นฟิล์มวัสดุนำอิเล็กตรอน FTO/ETLs



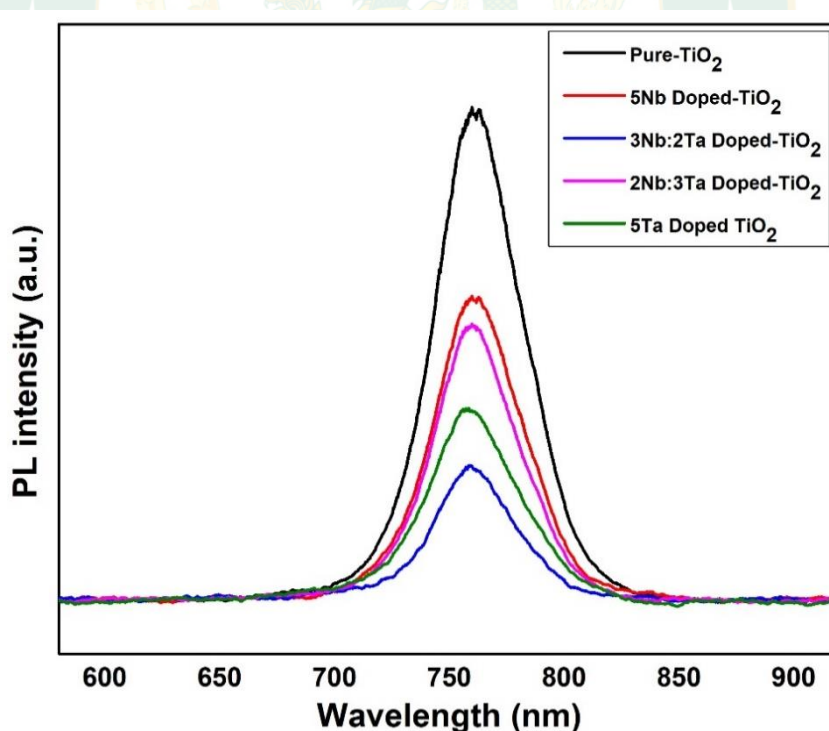
ภาพที่ 56 Tauc's plot ของวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 14 ระดับช่องว่างพลังงานของวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์

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

4.3.2 วิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วย Photoluminescence

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วย Photoluminescence spectrophotometer เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ที่มีผลต่อวัสดุชั้นเพอร์รอฟสไกต์และผลวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นถึงการยืนยันการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}) โดยการทดสอบใช้แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นเดียวที่มีความยาวคลื่น 532 nm เป็นตัวกระตุ้นอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นวาเลนซ์ เมื่ออิเล็กทรอนิกส์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสงเลเซอร์จนกระทั่งมีพลังงานมากกว่าช่องว่างระดับพลังงานทำให้ย้ายไปอยู่ในระดับชั้นนำไฟฟ้าที่ไม่มีความเสถียร อิเล็กทรอนิกส์คายพลังงานออกมาในรูปโฟตอนเพื่อลงมาอยู่ในระดับชั้นวาเลนซ์กระบวนการดังกล่าวจึงถูกเรียกว่า Photoluminescence เมื่อทำการตรวจวัดพบว่าที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO_2 มีความเข้ม Photoluminescence ต่ำที่สุด ซึ่งผลของ Photoluminescence สามารถอธิบายได้ถึงความสัมพันธ์ของบริเวณรอยต่อ P-N ที่มีความสมบูรณ์ จากผลการทดสอบ (ภาพที่ 57) เห็นได้ว่ารอยต่อระหว่างวัสดุชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์และชั้นเพอร์รอฟสไกต์ได้รับปรับปรุงการถ่ายโอนประจุ (Charge transfer) ได้ดีขึ้น (Abbasi et al., 2023) ซึ่งให้เห็นจากค่า V_{OC} มีค่าสูงที่สุดของ 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO_2



ภาพที่ 57 การวิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วยเทคนิค Photoluminescence

4.4 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

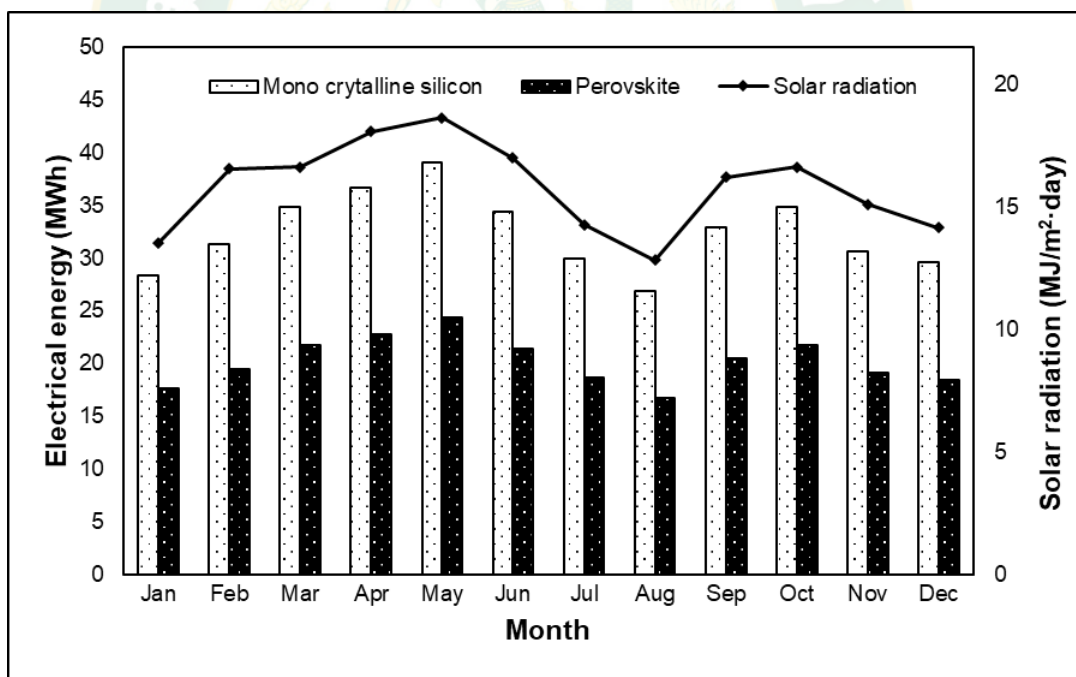
จากการที่ประสบความสำเร็จในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ด้วยการเติมร่วมไอออนของไนโอเบียมและแทนทาลัมในวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มจาก 8.65% (Pure-TiO₂) เป็น 10.37% (3%Nb:2%Nb Co-doped TiO₂) ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพที่สูงที่สุดที่สามารถทำได้ อนาคตหากมีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์มาปรับใช้กับสภาพแวดล้อมจริง ทางผู้วิจัยมีแนวคิดในการออกแบบและจำลองผลผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้ โดยทำการออกแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ให้มีกำลังผลิตไฟฟ้าใกล้เคียงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว ในการเปรียบเทียบระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองชนิดจะประเมินจากผลผลิตพลังงานไฟฟ้าใน 1 ปี ติดตั้งบนพื้นที่ขนาด 2,040.37 m² บริเวณศูนย์การเรียนรู้วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (ภาพที่ 58) โดยใช้ข้อมูลค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน พ.ศ. 2562 ณ สถานีตรวจวัดศูนย์บริการวิชาการที่ 7 จังหวัดเชียงใหม่ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2564) ซึ่งมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ที่ 15.785 MJ/m²·day



ภาพที่ 58 ภาพถ่ายดาวเทียมจาก Google Earth

แบบจำลองผลผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นี้ เลือกทดสอบเปรียบเทียบระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวขนาด 410 W (BQ Solar รุ่น BQ-144M-410W) ซึ่งมีขนาดแผง 1.002 m x 2.008 m คิดเป็นพื้นที่รับแสงขนาด 2.01 m² มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 410.04 W ที่กระแสไฟฟ้าสูงสุด 9.89 A และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 41.46 V และประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า 20.38% (BQ SolarTech Co., 2023) เปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์จากการออกแบบ ซึ่งต่อกันแบบขนาน 4,778 เซลล์ และต่อแบบอนุกรม 57 เซลล์ ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 453.29 W ที่กระแสไฟฟ้าสูงสุด 10.89 A และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 44.61 V โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์มีขนาดกว้าง

1.83 m x 2.39 m คิดเป็นพื้นที่รับแสงขนาด 4.36 m² ซึ่งใหญ่กว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวถึง 1.97 เท่า เมื่อทำการจำลองการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เบื้องต้น ถูกติดตั้งบนพื้นที่ขนาดกว้าง 29.72 m ยาว 66.56 m สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวโดยติดตั้งขนาน 9 string ในแต่ละ String อนุกรมกันทั้งหมด 66 แผง ซึ่งเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์โดยมีการติดตั้งแบบขนาน 9 string ในแต่ละ string อนุกรมกันทั้งหมด 36 แผง ทำให้มีพื้นที่รับแสงทั้งหมด 1,412.64 m² เมื่อนำข้อมูลการติดตั้งมาจำลองการผลิตไฟฟ้าจากข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ข้างต้น ทำให้ได้ข้อมูลผลผลิตไฟฟ้ารายปีเปรียบเทียบระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวและแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ดังภาพที่ 59 จากตารางที่ 15 พบว่าที่ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดในเดือนพฤษภาคมมีค่า 5.17 MJ/m²·day แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวสามารถผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 1,259.43 kWh/day และแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์สามารถผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 758.61 kWh/day ในระยะเวลา 1 ปี แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 389.44 MWh/year และแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 234.57 MWh/year



ภาพที่ 59 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 15 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

เดือน	ค่าความเข้มรังสี อาทิตย์ (MJ/m ² ·day)	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (MWh/month)	
		Mono crystalline Solar Cell panel	Perovskite Solar Cell Panel
มกราคม	13.530	28.38	17.09
กุมภาพันธ์	16.535	31.32	18.84
มีนาคม	16.611	34.84	20.99
เมษายน	18.054	36.64	22.04
พฤษภาคม	18.615	39.04	23.52
มิถุนายน	16.969	34.44	20.72
กรกฎาคม	14.256	29.90	18.01
สิงหาคม	12.816	26.88	16.19
กันยายน	16.203	32.89	19.81
ตุลาคม	16.616	34.85	20.99
พฤศจิกายน	15.087	30.62	18.44
ธันวาคม	14.128	29.63	17.85
ผลผลิตพลังงานไฟฟ้ารวม		389.44	234.27

จากข้อมูลการจำลองเห็นได้ชัดเจนถึงความแตกต่างเนื่องด้วยปัจจัยหลักของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีองค์ประกอบหลายส่วนอาทิ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ปริมาณแสงตกกระทบ รวมถึงประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละประเภท โดยจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูงกว่าแบบเพอร์รอฟสไกต์อยู่มากถึง 10.02% เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า การทดสอบนี้ชี้ให้เห็นถึงการเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหมาะสมกับการใช้งานในปัจจุบัน แต่ในอีกเหตุผลหนึ่งถ้าในอนาคตมีการพัฒนาประสิทธิภาพให้ดีขึ้น และพัฒนาการผลิตเป็นระดับอุตสาหกรรมในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีต้นทุนต่ำลงมาก และเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ถือเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายทำให้มีข้อดีกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวในเรื่องความบางและต้นทุนการผลิต

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นพื้นฐานวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนและมีชั้นนำไฟฟ้าเป็นคาร์บอน โดยการเติมไอออนธาตุโลหะได้แก่ ไนโอเบียมหรือแทนทาลัม เข้าไปยังโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วน 5% ของไทเทเนียมไดออกไซด์ และการเติมไอออนร่วมของไนโอเบียมและแทนทาลัมในอัตราส่วนร้อยละของ ไทเทเนียมไดออกไซด์:ไนโอเบียม:แทนทาลัม ได้แก่ 95:3:2 และ 95:2:3 เป็นต้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังประสบความสำเร็จในขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคระดับนาโน โดยสังเคราะห์ได้ด้วยที่อุณหภูมิกระบวนการไม่เกิน 150°C โดยมีผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นหลักฐานยืนยันการประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์

จากการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไม่เกิน 150°C เป็นเซลล์อ้างอิง พบว่ามีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 8.65% ที่แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเฉลี่ย 0.94 V และกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเฉลี่ย 15.02 mA/cm^2 เมื่อทำการเติมไอออนธาตุโลหะไนโอเบียม และแทนทาลัม ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์จะเพิ่มมาเป็น 9.81% และ 10.48% ตามลำดับ และเมื่อทำการเติมไอออนร่วมของไนโอเบียมและแทนทาลัมลงไปไนไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นเป็น 11.05% ที่สัดส่วนการเติม 3%Nb:2%Ta ในการวิเคราะห์ภาพตัดขวางของเซลล์พบว่าการเติมไนโอเบียมและแทนทาลัมยังสามารถช่วยให้การหมุนเคลือบครอบคลุมพื้นผิวได้ทั่วถึงลดการเกิดข้อบกพร่องบริเวณพื้นผิวรอยต่อระหว่างชั้นนำอิเล็กตรอนและชั้นเพอร์รอฟสไกต์ทำให้การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์เกิดได้ดีขึ้น ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงยังพบว่าการเติมดังกล่าวสามารถลดช่องว่างระดับพลังงานจาก 3.59 eV ในเซลล์อ้างอิงเป็น 3.43 eV ที่สัดส่วนการเติม 3%Nb:2%Ta ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนผ่านชั้นนำอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์อ้างอิง และในการวิเคราะห์ Photoluminescence พบว่าที่สัดส่วนการเติม 3%Nb:2%Ta ในไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่า PL Intensity ที่ต่ำ แสดงให้เห็นถึงรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนกับชั้นเพอร์รอฟสไกต์ที่มีประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้การถ่ายโอนประจุได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นผลให้ที่

สัดส่วนดังกล่าวมีแรงดันไฟฟ้าสถานะวงจรเปิดสูงถึง 0.99 V และกระแสไฟฟ้าลัดวงจรอยู่ที่ 16.21 mA/cm²

นอกจากนี้ทางผู้วิจัยได้นำแนวคิดการนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่สัดส่วน 3%Nb:2%Ta Co-doped TiO₂ มาประเมินผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะแวดล้อมจริงโดยการจำลองผลผลิตจากการติดตั้งบริเวณศูนย์การเรียนรู้วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ โดยจากค่ารังสีอาทิตย์อ้างอิงจากศูนย์บริการวิชาการที่ 7 จังหวัดเชียงใหม่ พิจารณาการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระยะเวลา 1 ปี (มกราคม-ธันวาคม) โดยใช้พื้นที่การติดตั้ง 2,040.37 m² พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 234.25 MWh/year

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้ถูกเตรียมจากไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (TiCl₄) ซึ่งไวต่อความชื้นจะทำให้เกิดไอระเหยเป็นกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งเป็นควินพิษ ต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ และในขั้นตอนการสังเคราะห์ต้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตามขั้นตอนที่กำหนดในหัวข้อ 3.4.2 อย่างเคร่งครัด

2. เนื่องจากในงานวิจัยนี้เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์มีความไวต่อความชื้นสูง ในขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ควรทำในสถานะความชื้นต่ำกว่า 20%RH เพื่อให้ประสิทธิภาพที่สูงและการเก็บรักษาเซลล์แสงอาทิตย์ควรเก็บในตู้ควบคุมความชื้นไม่เกิด 50%RH

3. เซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ฟิล์มคาร์บอนเป็นชั้นอิเล็กโทรด ถ้าสามารถในชั้นอิเล็กโทรดจากทองคำจะทำให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของทองคำมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าคาร์บอน



ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ

ก.1 การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย ($P_{\max, Ave}$)

พื้นที่รับแสง(A_{cell})	0.16	m^2
กระแสไฟฟ้าสูงสุด(I_{\max})	$= I_{sc} \times A_{cell}$	
ตำแหน่งที่ 1	2.2057	mA
ตำแหน่งที่ 2	2.1620	mA
ตำแหน่งที่ 3	2.3069	mA
ตำแหน่งที่ 4	2.1544	mA
ตำแหน่งที่ 5	2.4612	mA
ตำแหน่งที่ 6	2.0983	mA
ตำแหน่งที่ 7	2.3734	mA
ตำแหน่งที่ 8	2.4582	mA
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด(V_{\max})	$= V_{oc}$	
ตำแหน่งที่ 1	0.7551	V
ตำแหน่งที่ 2	0.7550	V
ตำแหน่งที่ 3	0.7550	V
ตำแหน่งที่ 4	0.8049	V
ตำแหน่งที่ 5	0.6547	V
ตำแหน่งที่ 6	0.7046	V
ตำแหน่งที่ 7	0.7046	V
ตำแหน่งที่ 8	0.7045	V
กำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{\max})	$= I_{\max} \times V_{\max}$	
ตำแหน่งที่ 1	0.7551	mW
ตำแหน่งที่ 2	0.7550	mW
ตำแหน่งที่ 3	0.7550	mW
ตำแหน่งที่ 4	0.8049	mW
ตำแหน่งที่ 5	0.6547	mW
ตำแหน่งที่ 6	0.7046	mW
ตำแหน่งที่ 7	0.7046	mW
ตำแหน่งที่ 8	0.7045	mW

$$\begin{aligned}
 \text{กระแสไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย}(I_{\max, \text{Ave}}) &= \frac{\text{ผลบวกกระแส}}{\text{จำนวนผลบวกกระแส}} \\
 &= \frac{18.2202}{8} \quad \text{mA} \\
 &= 2.28 \quad \text{mA}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{แรงดันไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย}(V_{\max, \text{Ave}}) &= \frac{\text{ผลบวกแรงดัน}}{\text{จำนวนผลบวกแรงดัน}} \\
 &= \frac{5.8385}{8} \quad \text{V} \\
 &= 0.73 \quad \text{V}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย}(P_{\max, \text{Ave}}) &= \frac{\text{ผลบวกกำลัง}}{\text{จำนวนผลบวกกำลัง}} \\
 &= \frac{13.2678}{8} \quad \text{mW} \\
 &= 1.66 \quad \text{mW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF)} &= \frac{P_{\max}}{P_t} \times 100 \\
 &= \frac{1.66(\text{mW})}{2.56(\text{mW})} \times 100 \quad \% \\
 &= 61.81 \quad \%
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไคต์

ETLS	PCE (%)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	R_{sh} ($\Omega\text{-cm}^2$)	R_s ($\Omega\text{-cm}^2$)	P_t (mW)	I_{max} (mA)	V_{max} (V)	P_m (mW)
Pure-TiO ₂	8.65/9.71	60.98	15.02	0.94	8,340.6	16.41	2.33	2.09	0.71	1.48
5Nb Doped-TiO ₂	8.91/9.81	61.75	14.91	0.97	3,307.8	14.41	2.30	2.06	0.69	1.43
3Nb:2Ta Co-doped TiO ₂	10.37/11.05	64.81	16.21	0.99	9,260.11	12.65	2.56	2.28	0.73	1.66
2Nb:3Ta Co-doped TiO ₂	8.81/9.35	57.62	16.31	0.94	1,246.01	17.51	2.44	2.20	0.64	1.41
5Ta Doped-TiO ₂	9.89/10.48	62.50	16.41	0.96	2,893.28	12.67	2.53	2.25	0.70	1.58

ก.2 คำนวณค่าความต้านทานวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอน

แรงดันไฟฟ้า(V_{film})

V

ความหนาแน่นกระแส(J_{film})

mA/cm^2

ความต้านทาน (R_{film})

$$= \frac{V_{\text{film}}}{J_{\text{film}}}$$

$\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$

ก.3 คำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกรน

พื้นที่เกรน(A_{Grain})

47,632.98

nm^2

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกรน(Grain size)

$$= 2 \sqrt{\frac{A_{\text{Grain}}}{\pi}}$$

$$= 2 \sqrt{\frac{47,632.98(\text{nm}^2)}{3.1429}}$$

= 236.84

nm

ก.4 คำนวณช่องว่างระดับพลังงาน

การเปลี่ยนร้อยละการส่องผ่านเป็นค่าการดูดกลืนของแสง

ร้อยละการส่องผ่านของแสง(%T) ที่ความยาวคลื่น 745.06

nm

= 82.3097

%

การหาค่าการดูดกลืนแสง

การดูดกลืนแสง(Absorbance)

$$= 2 - \log_{10}(\%T)$$

$$= 2 - \log_{10}(82.3097)$$

= 0.0845

(a.u.)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(Absorption coefficient), α

$$\alpha = \text{Absorbance} \cdot (4 \times 10^{-9})$$

$$= 2.14 \times 10^{-11}$$

การหาค่าพลังงานโฟตอน

$$\begin{aligned} \text{พลังงานโฟตอน}(E_{\text{photon}}) &= \frac{hc}{\lambda} \\ &= \frac{[4.13 \times 10^{-15}](\text{eV} \cdot \text{s}) \times [2.99 \times 10^8](\text{m} / \text{s}) \times 10^{-9}}{745.07(\text{m})} \\ &= 1.6403 \quad \text{eV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า } (\alpha h\nu)^2 &= [(2.14 \times 10^{-11})(1.6403)]^2 \\ &= 1.2266 \times 10^{-21} \end{aligned}$$

ทำการ plot ระหว่าง E_{photon} กับ $(\alpha h\nu)^2$ จะได้ตั้งแผนภาพที่ 56

ทำการลากเส้นตรง จะได้สมการเส้นตรง

$$\begin{aligned} y &= mx + c \\ \text{เมื่อค่า } x &= E_g \\ y &= (2.42 \times 10^{-17})(x) + (-1 \times 10^{-16}) \\ \text{หาจุดตัดแกน } x & E_g = \frac{1 \times 10^{-16}}{2.42 \times 10^{-17}} \\ \text{ดังนั้นช่องว่างระดับพลังงาน } & E_g = 4.1325 \quad \text{eV} \end{aligned}$$

ก.5 การจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

ข้อมูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์(A_{cell})	0.16	m^2
กระแสไฟฟ้าสูงสุด($I_{max, cell}$)	2.28	mA
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด($V_{max, cell}$)	0.73	V
ประสิทธิภาพเซลล์(PCE_{cell})	10.37	%

การจำลองการออกแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

เมื่อนำเซลล์มาต่อกับแบบ

อนุกรม	57	cells
ขนาน	4,778	cells
จะได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี		
พื้นที่รับแสง(A_{panel})	4.36	m^2
กระแสไฟฟ้าสูงสุด($I_{max, panel}$)	10.88	A
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด($V_{max, panel}$)	41.60	V
กำลังไฟฟ้าสูงสุด($P_{max, panel}$)	452.67	W
ประสิทธิภาพแผง(PCE_{panel})	10.39	%

ก.6 การคำนวณผลผลิตรายปีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

การเปลี่ยนหน่วยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จาก $MJ/m^2 \cdot day$ เป็น $kWh/m^2 \cdot day$

ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์(H) 18.615 $MJ/m^2 \cdot day$

$$\begin{aligned} \text{ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์(H)} &= \frac{18.615 \times 10^6 (J) \times 10^3}{3,600(s)(m^2)} \\ &= 5.1708 \quad kWh/m^2 \cdot day \end{aligned}$$

การคำนวณผลผลิตรายปี

พื้นที่ติดตั้ง($A_{install}$)	2,040.37	m^2
พื้นที่รับแสงทั้งหมด($A_{sun, Total}$)	1,412.64	m^2
ความเข้มแสงที่ STC (I_{SUN})	1,000	W/m^2
พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A_{panel})	4.36	m^2
ค่าฟิลแฟกเตอร์ของแผง (FF_{panel})	$= \frac{P_{max}}{P_t} \times 100$	%

ค่าฟิลแฟกเตอร์ของแผง (FF_{panel})	$= \frac{468.44(\text{W})}{555.59(\text{W})} \times 100$	%
	$= 84.34$	%
ประสิทธิภาพแผง (PCE_{panel})	$= \frac{P_{\text{max}}}{I_{\text{SUN}} A_{\text{Panel}}} \times 100$	%
ประสิทธิภาพแผง (PCE_{panel})	$= \frac{468.44(\text{W})}{1,000(\text{W} / \text{m}^2) \times 4.36(\text{m}^2)} \times 100$	%
	$= 10.73$	%
ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อวัน	$= H \times \frac{PCE}{100} \times A_{\text{sun, Total}}$	kWh/m ² -day
ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อวัน	$= [5.1708(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot \text{day}) \times 0.1073 \times 1,412.64(\text{m}^2)]$	
	$= 783.95$	kWh/day
ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อเดือน	$= \frac{783.95 \times 31}{1,000}$	MWh/month
(เดือนพฤษภาคม)	$= 24.30$	MWh/month
ผลรวมพลังงานที่ผลิตได้ต่อปี	$= 242.41$	MWh/year



ภาคผนวก ข
ผลงานทางวิชาการที่เผยแพร่



Synthesized of Niobium and Tantalum co-doped TiO₂ with Low-Temperature process for Electron Transporting Layers in Planar Perovskite Solar Cell

Supakit Nilkhao¹, Pipat Ruankham², Duangmanee Wongratanaphisan², Chawalit Bhoomanee², Akarin Intaniwet^{1*}

¹ School of renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand

² Department of Physics and Materials Science, faculty of science, Chiang Mai university 50200, Thailand

*Corresponding Author E-mail: a.intaniwet@hotmail.co.th

ABSTRACT

Currently, Perovskite solar cells are continuously improving in power generation efficiency, stability in power generation, green energy, and low cost. The perovskite solar cell based on titanium dioxide (TiO₂) electron transporting material is often prepared by a high-temperature process. This method has a difficult production, high cost, and danger. Generally, TiO₂ has low conductivity compared with ZnO and SnO₂ but TiO₂ has high stability better. Metal doping has the potential to improve the low conductivity of TiO₂ in particular. This study provides a method for preparing a TiO₂ electron transporting material with co-doped niobium (Nb) and tantalum (Ta) at low temperatures (<150 °C) to improve the electrical properties in perovskite solar cells based on the carbon electrode. The photovoltaic properties of perovskite solar cells with a 3:2 ratio of Nb:Ta doped-TiO₂ demonstrated the highest solar energy conversion efficiency of approximately 10.37 %. Aside from that, the crystalline structure was investigated using the x-ray diffraction (XRD) technique, and the optical properties were determined using ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy.

Keywords: TiO₂ nanoparticles, Nb-Ta co-doped TiO₂, low temperature process, carbon electrode

1. INTRODUCTION

Thin-film solar cell technology is currently attracting a lot of interest as a popular solar cell material. Because they have less spacing requirements and may be utilized on a variety of surfaces, they are a good choice for flexible solar cells [1]. Particularly noteworthy is the suggestion of new solar cells that lower the requirement for silicon solar cells.

The perovskite solar cell is a thin-film solar cell with high power conversion efficiency (PCE) [2] and power generation stability [3]. The structure of a perovskite solar cell is made up of an electrically conductive glass (F-doped SnO₂: FTO), an electron transporting layer (ETL) such as TiO₂ [4] or ZnO₂ [5], a light-absorbing material or active layer (perovskite), a hole transporting layer (HTL) such as Spiro-OMeTAD [6], and a conductive layer such as

Au [7], Ag. For the purposes of this study, TiO₂ was primarily used as an ETL. As a general rule, TiO₂ synthesis for ETL was accomplished through the use of titanium tetrachloride (TiCl₄) and hydrochloric acid (HCl) [8], which is a hazardous and time-consuming procedure. Additionally, this process requires the elimination of acid and the treatment of films at high temperatures [9].

This study focuses on the synthesis of TiO₂ nanoparticles for ETL using a low-temperature process that does not require the use of HCl acid [10]. Additional metal doping of TiO₂ nanoparticles was done to improve their electrical properties, as demonstrated by co-doped niobium [11] and tantalum [12]. The crystalline structure of the ETLs was determined using x-ray diffraction (XRD), and the optical property was determined using ultraviolet-



visible spectroscopy (UV-VIS). At the end of the process, the results of the perovskite solar cells were measured using the J-V formula.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Electron transporting layer preparation

Preparation of TiO_2 electron transporting material with co-doped niobium (Nb), tantalum (Ta), and niobium (Nb) in different ratios of Ti:Nb:Ta was done in the following ratios: 100:0:0, 95:5:0, and 95:0:5 by %mol. During the preparation stage, NbCl_5 and TaCl_5 solutions are dissolved in high-purity ethanol (99.9%) for more than 24 h in ratios of 35.38:1 and 46.91:1 (mg:mL).

TiO_2 NPs preparation, Solution A, 2.3 mL of titanium chloride (TiCl_4), and 8 mL of ethanol were mixed in an ice bath below 0°C for 10 min. The solution A from the first step was added to 40 ml of benzyl alcohol and heated at 80°C for 4.30 h. After that, the solution was kept at room temperature for 12 h, called solution B. Precipitate solution B with 1.5 mL of diethyl ether (13.5 mL) and centrifuge at 4,000 rpm for 10 minutes. They were then washed with acetone and centrifuged twice for 10 minutes at 4,000 rpm. After that, it was sonicated for 2 hours at a temperature below 50°C with 4 mL of ethanol, called TiO_2 NPs solution. Finally, 2 mL TiO_2 NPs was mixed with 14 μL TIPD and stored for 12 hours. After cleaning the FTO glass with Alconox detergent, acetone, alcohol, and IPA using an ultrasonicator for 15 min each, the FTOs were heated at 130°C for 15 minutes. Finally, for 30 min, it was cleaned with UV-ozone. The glass was spun for 40 s with 70 μL of solution at a spin speed of 1,500 rpm. The film was then heated for 30 min at a surface temperature of 150°C . Before preparing the perovskite layer, the resulting film was heated in UV ozone for 30 minutes.

2.2 Perovskite solar cell fabrication

Perovskite precursor solution sterilized for 48 h with CsI 29.5 mg, FAI 97.9 mg, PbBr_2 63.3 mg, and PbI_2 248.7 mg in 425 μL DMF and 95 μL DMSO. The precursor solution was dropped

onto the ETL and spun at 1,000 rpm for 13 s, then increased to 4,000 rpm for 30 seconds. Finally, at the last 5 seconds, antisolvent was replaced with 180 μL anisole. Heat the film at 100°C for 15 min.

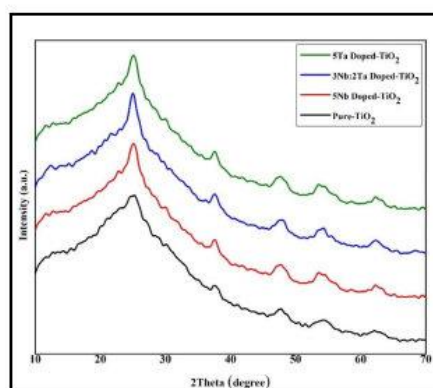


Figure 1 XRD Pattern of FTO/Pure- TiO_2 , 5Nb- TiO_2 , 3Nb:2Ta- TiO_2 and 5Ta- TiO_2 using ETL Perovskite solar cells

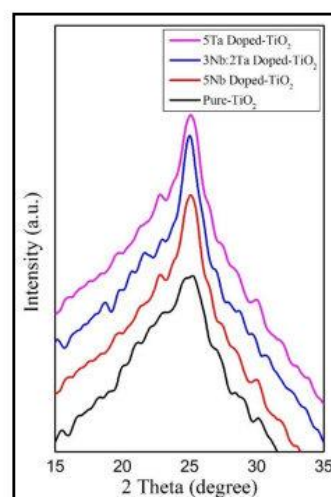


Figure 2 XRD Pattern peak (101) shift

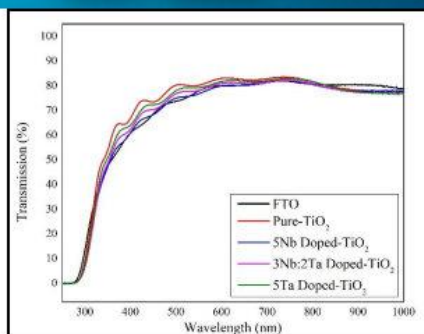


Figure 3 The light transmission of TiO₂, 5% Nb-TiO₂, 3% Ta-TiO₂, and 5% Ta-TiO₂ films on FTO glass using air as baseline

Table 1 XRD Pattern peak (101) shift

Ratio	2Theta (degree)
Pure-TiO ₂	25.25
5Nb Doped-TiO ₂	25.08
3Nb:2Ta Doped-TiO ₂	25.01
5Ta Doped-TiO ₂	25.06

HTL was then prepared with Spiro-OMeTAD dissolved in 400 μ L chlorobenzene, 4-TBP 11.52 μ L, and Li-TFSI 7 μ L. The coating was spun onto a perovskite layer at a volume of 50 μ L at 3,000 rpm for 30 s. Finally, the electrodes were compressed carbon film at 6 bars for 3 min at 50°C.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Physical properties

Figure 1 shows the XRD patterns of TiO₂ as an electron transport material (ETM) with different dopants. Based on the results, we discovered a sharp peak at 25.25 degrees for pure TiO₂ (black line). Because of the magnitude of the ion radius of niobium and tantalum, a peak shift is shown in table 1 (Ref. Code: 01-070-0413) after doping with 5% Nb-TiO₂, 3Nb:2Ta-TiO₂, and 5% Ta-TiO₂. The change in the crystal plane caused by the lattice distance contributed to the peak shifting to a smaller angle, as shown in Figure 2. The light transmission of those ETLs was measured with a UV-Vis spectrophotometer

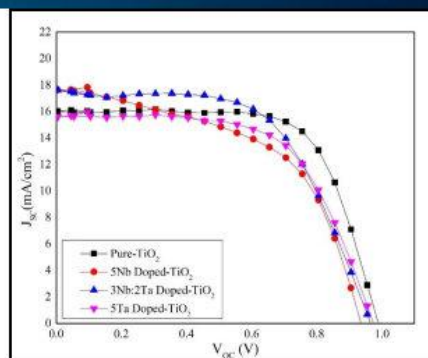


Figure 4 J-V Curve of Perovskite solar cells

Table 2 Energy gap of electron transmission layer thin film for Perovskite solar cell

Ratio	Energy gap (eV)
Pure-TiO ₂	3.62
5Nb Doped-TiO ₂	3.57
3Nb:2Ta Doped-TiO ₂	3.46
5Ta Doped-TiO ₂	3.51

at scanning wavelengths ranging from 200 to 1,000 nm. TiO₂, 5% Nb-TiO₂, 3% Ta-TiO₂, and 5% Ta-TiO₂ all have a similar proportion of transmission of nearly 80% shown in the Figure 3. This means that all ETLs absorb very little light. As shown in Table 2, the results also determined the energy gap (E_g) of ETLs. It can be seen that the 3Nb:2Ta Doped-TiO₂ has the lowest E_g value because the doped niobium Nb⁵⁺ ion loss with TiO₂ results in a smaller energy gap, which can improve electron mobility and thus increase the efficiency of PSCs.

3.2 Electrical properties

Table 3 shows the photovoltaic conversion efficiency (PCE). The average electrical value of PSCs with TiO₂ ETL are as follows: FF 63.22%, J_{sc} 15.04 mA/cm², V_{oc} 0.97 V. The average efficiency for Nb and Ta co-doping was 9.57% and 9.89%, respectively. J_{sc} were increased to 16.16 mA/cm² and 16.41 mA/cm²,



Respectively. Furthermore, Figures 4 and 5a-5d show that 3Nb:2Ta co-doped TiO_2 has the best electrical properties, with an average efficiency of 10.37%, J_{sc} 16.21 mA/cm^2 , and V_{oc} 0.99 V. According to the data, co-doping has an effect on the efficiency of perovskite solar cells with an ion-radius of Nb and Ta atom similar to that of Ti atom to improve electrical properties of TiO_2 .

4. CONCLUSIONS

With the optimization of Nb-doped TiO_2 , Ta-doped TiO_2 , and co-doped Nb and Ta, the ETMs were successfully synthesized at temperatures below 150°C . The XRD peak shift confirms the doping, as the peaks were shifted to smaller angle as Nb and Ta replaced Ti atoms. In fact, both Nb and Ta atom have a larger ion radius than Ti atom, resulting in a reduction in

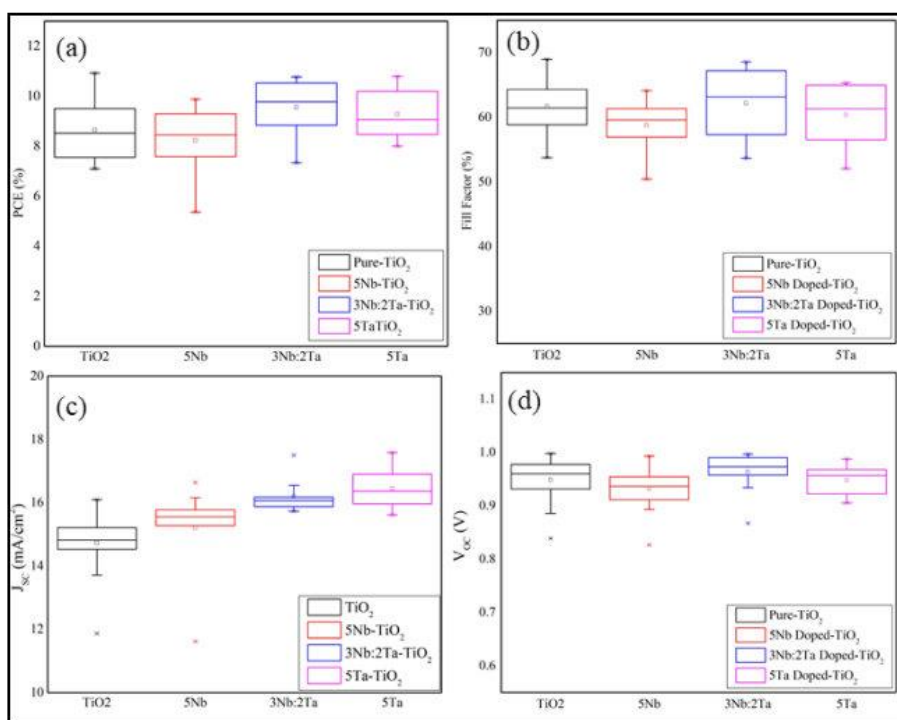


Figure 5 Result of Electrical properties for Perovskite solar cell

Table 3. Electrical properties for Perovskite solar cells

Ratio	PCE (%)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)
Pure- TiO_2	9.24 ± 1.01	63.22 ± 2.81	15.04 ± 0.29	-0.97 ± 0.03
5Nb Doped- TiO_2	8.92 ± 0.96	61.75 ± 2.74	14.91 ± 0.26	-0.96 ± 0.03
3Nb:2Ta Doped- TiO_2	10.37 ± 0.92	64.81 ± 5.86	16.21 ± 0.19	-0.99 ± 0.06
5Ta Doped TiO_2	8.81 ± 1.13	57.62 ± 4.77	16.31 ± 0.40	-0.94 ± 0.04



The distance between the lattices and an effect on the crystal structure's plane, expressed in plane (101), with less displacement at an angle. The efficiency of PSCs was improved by doping Nb and Ta compared to 3Nb:2Ta Doped-TiO₂ with PCE of 10.37% versus Pure-TiO₂ with PCE of 9.24%. This study demonstrates a powerful strategy for preparing low-temperature efficient TiO₂ for flexible PSCs

5. ACKNOWLEDGMENTS

The researcher would like to thank the School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, which supports scholarships and research grants for researchers. Thank you to solar cell Research laboratory (SCRL) Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai, the support for research sites. And thanks to the central tool center Chiang Mai University, Chiang Mai for supporting the measuring instruments for this research.

6. REFERENCES

- [1] 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.
- [2] Ren, X., Yang, D., Yang, Z., Feng, J., Zhu, X., Niu, J., Liu, Y., Zhao, W. & Liu, S. F. 2017. Solution-Processed Nb:SnO₂ Electron Transport Layer for Efficient Planar Perovskite Solar Cells. *American Chemical Society Applied Materials & Interfaces*, 9(3), 2421-2429.
- [3] Pathak, S. K., Abate, A., Ruckdeschel, P., Roose, B., Gödel, K. C., Vaynzof, Y., Santhala, A., Watanabe, S.-I., Hollman, D. J., Noel, N., Sepe, A., Wiesner, U., Friend, R., Snaith, H. J. & Steiner, U. 2014. Performance and Stability Enhancement of Dye-Sensitized and Perovskite Solar Cells by Al Doping of TiO₂. *Advanced Functional Materials*, 24(38), 6046-6055.
- [4] Shih-Hsuan Chena, Shun-Hsiang Chana, Yen-Tung Lina, Ming-Chung Wu. 2018 Enhanced power conversion efficiency of perovskite solar cells based on mesoscopic Ag-doped TiO₂ electron transport layer. *Applied Surface Science*, 469(2019), 18-26.
- [5] Md Arafat Mahmud, Naveen Kumar Elumalai, Mushfika Baishakhi Upama, Dian Hang, Kah Howe Chen, Matthew Wright, Cheng Xu, Faiazul Haque, Ashraf Uddin, Low temperature processed ZnO thin film as electron transport layer for efficient perovskite solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159(2017), 251-264
- [6] Jing ma, Zhenhua Lin, Xing Guo, Long Zhou, Jie Su, Chunfu Zhang, Zhou Yang, Jingjing Chang, Shengzhong Liu, Yua Hao, Low-Temperature Solution-Processed ZnO Electron Transport Layer for Highly Efficient and Stable Planar Perovskite Solar Cells with Efficiency Over 20%, *Sol. RRL*, 3(7), 1900096
- [7] Jacob Tse-Wei Wang, James M. Ball, Eva M. Barea, Antonio Abate, Jack A. Alexander-Webber, Jian Huang, † Michael Saliba, † Ivan Mora-Sero, Juan Bisquert, Henry J. Snaith, and Robin J. Nicholas, Low-Temperature Processed Electron Collection Layers of Graphene/TiO₂ Nanocomposites in Thin Film Perovskite Solar Cells, *Nano Lett*, 14(2014), 724-730
- [8] Liang, C., Li, P., Zhang, Y., Gu, H., Cai, Q., Liu, X., Wang, J., Wen, H. & Shao, G. 2017. Mild solution-processed metal-doped TiO₂ compact layers for hysteresisless and performance enhanced perovskite solar cells. *Journal of Power Sources*, 372(235-244).
- [9] Song, J., Li, S. P., Zhao, Y. L., Yuan, J., Zhu, Y., Fang, Y., Zhu, L., Gu, X. Q. & Qiang, Y. H. 2017. Performance enhancement of perovskite solar cells by



- doping TiO₂ blocking layer with group VB elements. *Journal of Alloys and Compounds*, 694(1232-1238).
- [10] Cai, F., Yang, L., Yan, Y., Zhang, J., Qin, F., Liu, D., Cheng, Y.-B., Zhou, Y. & Wang, T. 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.
- [11] Kim, D. H., Han, G. S., Seong, W. M., Lee, J.-W., Kim, B. J., Park, N.-G., Hong, K. S., Lee, S. & Jung, H. S. 2015. Niobium Doping Effects on TiO₂ Mesoscopic Electron Transport Layer-Based Perovskite Solar Cells. *ChemSusChem*, 8(14), 2392-2398.
- [12] 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

บรรณานุกรม

- Abbasi, S., Wang, X., Tipparak, P., Bhoomanee, C., Ruankham, P., Liu, H., Wongratanaphisan, D. & Shen, W. 2023. Proper annealing process for a cost effective and superhydrophobic ambient-atmosphere fabricated perovskite solar cell. **Materials Science in Semiconductor Processing**, 155(107241).
- BQ SolarTech Co., L. 2023. **BQ-144M 410W HALF-CELL High Efficiency Multi-busbar Cells**. [Online]. Available <http://www.bqsolartech.com/pd.jsp?id=22&fromCollid=2> (25 February).
- Cai, F., Yang, L., Yan, Y., Zhang, J., Qin, F., Liu, D., Cheng, Y.-B., Zhou, Y. & Wang, T. 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.
- Chen, K. T., Hsu, C. H., Jiang, S. C., Liang, L. S., Gao, P., Qiu, Y., Wu, W. Y., Zhang, S., Zhu, W. Z. & Lien, S. Y. 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.
- Chen, X. & Mao, S. S. 2007. Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications. **Chemical Reviews**, 107(7), 2891-2959.
- Chen, Y., Zhang, L., Zhang, Y., Gao, H. & Yan, H. 2018. Large-area perovskite solar cells – a review of recent progress and issues. **RSC Advances**, 8(19), 10489-10508.
- Elumalai, N. K., Mahmud, M. A., Wang, D. & Uddin, A. 2016. Perovskite Solar Cells: Progress and Advancements. **Energies**, 9(11). Available
- He, J., Du, Y.-e., Bai, Y., An, J., Cai, X., Chen, Y., Wang, P., Yang, X. & Feng, Q. 2019. Facile Formation of Anatase/Rutile TiO₂ Nanocomposites with Enhanced Photocatalytic Activity. **Molecules**, 24(16). Available
- Huang, H., Zhang, X., Gui, R., Zhao, C., Guo, J., Maung, Y. M., Yin, H., Ma, W. & Yuan, J. 2023. High-Efficiency Perovskite Quantum Dot Photovoltaic with Homogeneous

- Structure and Energy Landscape. **Advanced Functional Materials**, n/a(n/a), 2210728.
- Ibn-Mohammed, T., Koh, S. C. L., Reaney, I. M., Acquaye, A., Schileo, G., Mustapha, K. B. & Greenough, R. 2017. Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 80(1321-1344).
- Ke, W., Fang, G., Wang, J., Qin, P., Tao, H., Lei, H., Liu, Q., Dai, X. & Zhao, X. 2014. Perovskite Solar Cell with an Efficient TiO₂ Compact Film. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 6(18), 15959-15965.
- Khan, M. I., Mukhtar, A., Alwadai, N., Irfan, M., Haq, I.-u., Albalawi, H., Almuqrin, A. H., Almoneef, M. M. & Iqbal, M. 2022. Improving the Structural, Optical and Photovoltaic Properties of Sb- and Bi- Co-Doped MAPbBr₃ Perovskite Solar Cell. **Coatings**, 12(3). Available
- Kim, D. H., Han, G. S., Seong, W. M., Lee, J.-W., Kim, B. J., Park, N.-G., Hong, K. S., Lee, S. & Jung, H. S. 2015. Niobium Doping Effects on TiO₂ Mesoscopic Electron Transport Layer-Based Perovskite Solar Cells. **ChemSusChem**, 8(14), 2392-2398.
- 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.
- 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.
- Li, R., Huo, X., Han, X., Wang, Z., Zhang, M. & Guo, M. 2021. Facile synthesis of ordered Nb₂O₅ coated TiO₂ nanorod arrays for efficient perovskite solar cells. **Applied Surface Science**, 542(148728).
- Liang, C., Li, P., Zhang, Y., Gu, H., Cai, Q., Liu, X., Wang, J., Wen, H. & Shao, G. 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).
- Linsebigler, A. L., Lu, G. & Yates, J. T., Jr. 1995. Photocatalysis on TiO₂ Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. **Chemical Reviews**, 95(3), 735-758.

- Ma, Z., Zhou, W., Huang, D., Liu, Q., Xiao, Z., Jiang, H., Yang, Z., Zhang, W. & Huang, Y. 2020. Nicotinamide as Additive for Microcrystalline and Defect Passivated Perovskite Solar Cells with 21.7% Efficiency. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 12(47), 52500-52508.
- Pathak, S. K., Abate, A., Ruckdeschel, P., Roose, B., Gödel, K. C., Vaynzof, Y., Santhala, A., Watanabe, S.-I., Hollman, D. J., Noel, N., Sepe, A., Wiesner, U., Friend, R., Snaith, H. J. & Steiner, U. 2014. Performance and Stability Enhancement of Dye-Sensitized and Perovskite Solar Cells by Al Doping of TiO₂. **Advanced Functional Materials**, 24(38), 6046-6055.
- Prathan, A., Sanglao, J., Wang, T., Bhoomanee, C., Ruankham, P., Gardchareon, A. & Wongratanaphisan, D. 2020. Controlled Structure and Growth Mechanism behind Hydrothermal Growth of TiO Nanorods. **Scientific Reports**, 10(1), 8065.
- Qin, X., Liu, J., Teng, G., Liu, B., Xie, Y., Ma, L. & Hu, D. 2023. Design of blueberry anthocyanin/TiO₂ composite layer-based photoanode and N-doped porous blueberry-derived carbon-loaded Ni nanoparticle-based counter electrode for dye-sensitized solar cells. **RSC Advances**, 13(11), 7267-7279.
- 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.
- Ren, X., Yang, D., Yang, Z., Feng, J., Zhu, X., Niu, J., Liu, Y., Zhao, W. & Liu, S. F. 2017. Solution-Processed Nb:SnO₂ Electron Transport Layer for Efficient Planar Perovskite Solar Cells. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 9(3), 2421-2429.
- Shi, B., Liu, B., Luo, J., Li, Y., Zheng, C., Yao, X., Fan, L., Liang, J., Ding, Y., Wei, C., Zhang, D., Zhao, Y. & Zhang, X. 2017. Enhanced light absorption of thin perovskite solar cells using textured substrates. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 168(214-220).
- Song, J., Li, S. P., Zhao, Y. L., Yuan, J., Zhu, Y., Fang, Y., Zhu, L., Gu, X. Q. & Qiang, Y. H. 2017. Performance enhancement of perovskite solar cells by doping TiO₂ blocking layer with group VB elements. **Journal of Alloys and Compounds**, 694(1232-1238).

- Sun, R., Wang, T., Fan, Q., Wu, M., Yang, X., Wu, X., Yu, Y., Xia, X., Cui, F., Wan, J., Lu, X., Hao, X., Jen, A. K. Y., Spiecker, E. & Min, J. 2023. 18.2%-efficient ternary all-polymer organic solar cells with improved stability enabled by a chlorinated guest polymer acceptor. **Joule**, 7(1), 221-237.
- Tavakoli, M. M., Yadav, P., Tavakoli, R. & Kong, J. 2018. Surface Engineering of TiO₂ ETL for Highly Efficient and Hysteresis-Less Planar Perovskite Solar Cell (21.4%) with Enhanced Open-Circuit Voltage and Stability. **Advanced Energy Materials**, 8(23), 1800794.
- Wang, H., Zhao, C., Yin, L., Li, X., Tu, X., Lim, E. G., Liu, Y. & Zhao, C. Z. 2021. W-doped TiO₂ as electron transport layer for high performance solution-processed perovskite solar cells. **Applied Surface Science**, 563(150298).
- Xu, F., Zhang, T., Li, G. & Zhao, Y. 2017. Synergetic Effect of Chloride Doping and CH₃NH₃PbCl₃ on CH₃NH₃PbI₃-xCl_x Perovskite-Based Solar Cells. **ChemSusChem**, 10(11), 2365-2369.
- 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).
- Zhang, H., Shi, J., Xu, X., Zhu, L., Luo, Y., Li, D. & Meng, Q. 2016. Mg-doped TiO₂ boosts the efficiency of planar perovskite solar cells to exceed 19%. **Journal of Materials Chemistry A**, 4(40), 15383-15389.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2564. ผลการตรวจวัดข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2562.[Online]. Available <http://www.irradiatedata.dede.go.th:8080/report> (27 มกราคม).
- ละครไทย, อ. 2018. फिल्मบางซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมิเนียมที่เตรียมด้วยเทคนิครีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงโดยโหมดโลหะ โหมดทรานซิชั่น และโหมดออกไซด์. **KKU Science Journal**, 47(2), 327-338.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2562). แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ.2561-2580 (PDP2018). Retrieved. from.



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายศุภกิตต์ นิลขาว
เกิดเมื่อ	20 มิถุนายน 2539
ประวัติการศึกษา	ประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลวชิร มัธยมศึกษา โรงเรียนพิจิตรพิทยาคม อุดมศึกษา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ประวัติการทำงาน	-

