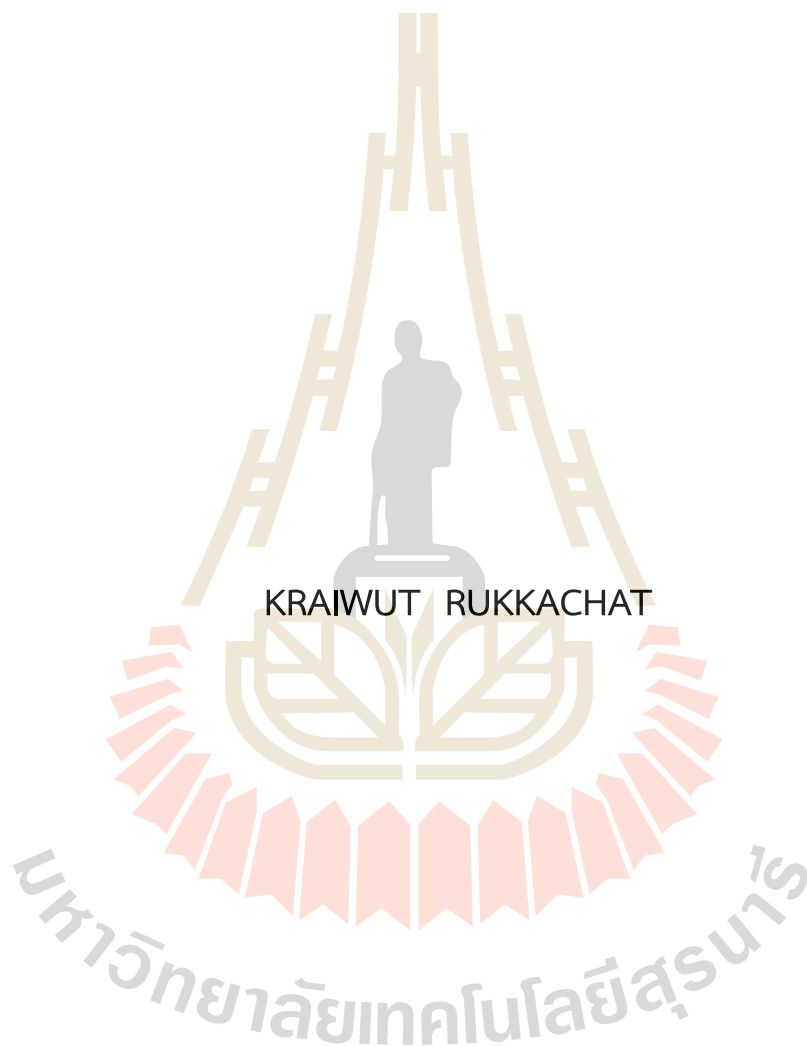


การศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มความสามารถการผลิตกระแสไฟฟ้า
ของแผ่นซิลิกอนที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

FEASIBILITY STUDY TO INCREASE ELECTRICAL PRODUCTIVITY
OF SILICON WAFER COATED BY TITANIUM DIOXIDE
AND TUNGSTEN TRIOXIDE

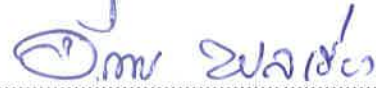


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Materials Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มความสามารถการผลิตกระแสไฟฟ้า
ของแผ่นซิลิกอนที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.นัตถชัย พลเชื้อว)

ประธานกรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนูรัตน์ ภูวนาคำ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ โชคคำ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม



(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรัชญา อายะวรรณ)

กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงป คำค้อ)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ไกรวุฒิ รุกขชาติ : การศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มความสามารถการผลิตกระแสไฟฟ้า
ของแผ่นซิลิกอนที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์
(FEASIBILITY STUDY TO INCREASE ELECTRICAL PRODUCTIVITY OF SILICON WAFER
COATED BY TITANIUM DIOXIDE AND TUNGSTEN TRIOXIDE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนูรัตน์ ภูวนาคำ, 92 หน้า.

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์, โฟโตแคตตาไลซิส, ไทเทเนียมไดออกไซด์, ทังสเตนไตรออกไซด์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอนแบบหลายผลึก โดยการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์ที่เตรียมจากกระบวนการโซลเจล ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าหลังการจุ่มเคลือบและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบเฟสผสมระหว่างรูไทล์และอนาเทสบนชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และพบเฟสของทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิกบนชั้นเคลือบทังสเตนไตรออกไซด์ เซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยรูปแบบ $\text{Si/TiO}_2(150 \text{ nm})/\text{WO}_3(150 \text{ nm})$ มีประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปราศจากการเคลือบถึง 1.8 เท่า เนื่องจากชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทังสเตนไตรออกไซด์ส่งผลให้ค่าการสะท้อนแสงลดลงในขณะที่มีผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบหลายผลึกมีค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและค่าฟิลล์แฟกเตอร์ที่สูง อย่างไรก็ตาม เมื่อความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์กลับมีค่าลดลง เนื่องจากชั้นเคลือบที่หนาขึ้น ส่งผลให้การสะท้อนของแสงที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น

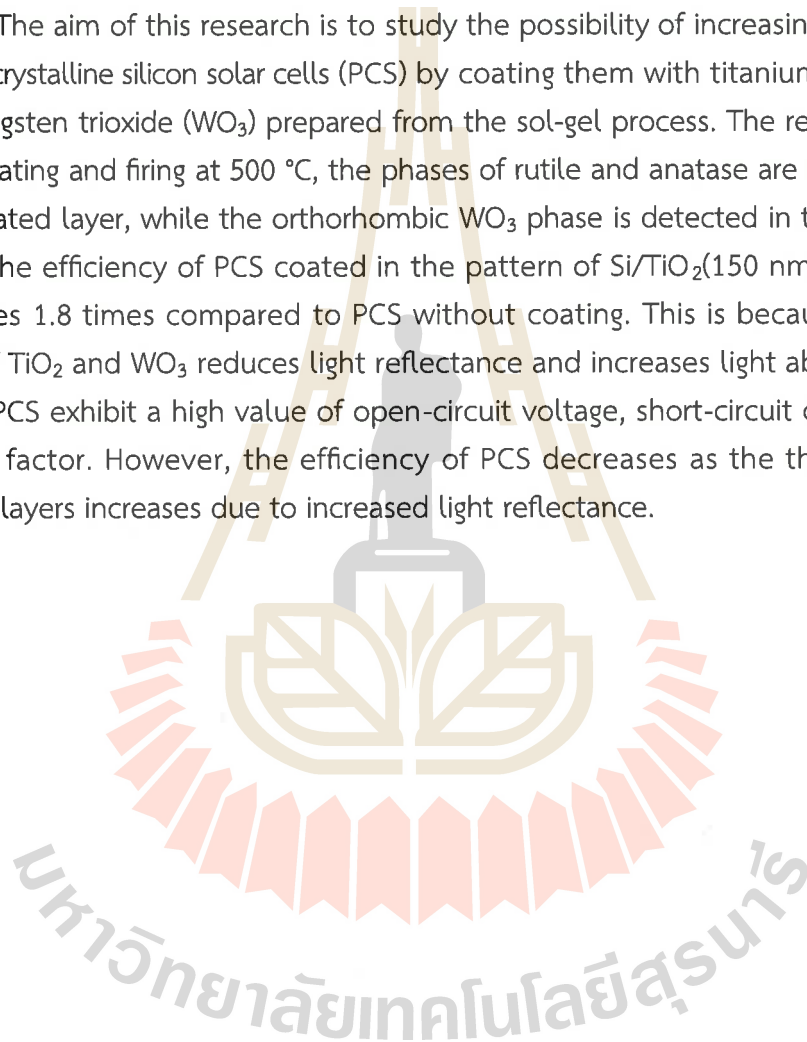
สาขาวิชา วิศวกรรมเซรามิก
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

KRAIWUT RUKKACHAT : FEASIBILITY STUDY TO INCREASE ELECTRICAL PRODUCTIVITY
OF SILICON WAFER COATED BY TITANIUM DIOXIDE AND TUNGSTEN TRIOXIDE
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. DR. ANURAT POOWANCUM, 92 PP.

Keywords: solar cells, photocatalysis, titanium dioxide, tungsten trioxide

The aim of this research is to study the possibility of increasing the efficiency of polycrystalline silicon solar cells (PCS) by coating them with titanium dioxide (TiO_2) and tungsten trioxide (WO_3) prepared from the sol-gel process. The results show that after coating and firing at 500 °C, the phases of rutile and anatase are detected in the TiO_2 coated layer, while the orthorhombic WO_3 phase is detected in the WO_3 coated layer. The efficiency of PCS coated in the pattern of $\text{Si}/\text{TiO}_2(150 \text{ nm})/\text{WO}_3(150 \text{ nm})$ increases 1.8 times compared to PCS without coating. This is because the coated layer of TiO_2 and WO_3 reduces light reflectance and increases light absorbance. As a result, PCS exhibit a high value of open-circuit voltage, short-circuit current density, and fill factor. However, the efficiency of PCS decreases as the thickness of the coating layers increases due to increased light reflectance.



School of Ceramic Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature Kraiut Rukkachat
Advisor's Signature
Co-advisor's Signature Sirinwan Chokcha

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากการช่วยเหลือจากหลายฝ่ายอย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและทางด้านการดำเนินงานวิจัย ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้มีพระคุณทุกท่าน ดังต่อไปนี้

คุณพยุง รุกขชาติ และนางณอม รุกขชาติ ผู้เป็นบิดา มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูอย่างดี ให้กำลังใจ ให้การสนับสนุน และเปิดโอกาสทางการศึกษามาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรัตน์ ภูวนาค อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ในระดับบัณฑิตศึกษา ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำและช่วยแก้ไขปัญหามา รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์ ในการช่วยตรวจทานผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในงานประชุมวิชาการและวิทยานิพนธ์เล่มนี้ พร้อมทั้งให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดช่วงการศึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ โชคคำ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้โอกาสทางการศึกษาในระดับ บัณฑิตศึกษา ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำและช่วยแก้ไขปัญหามา รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์ในการช่วย ตรวจทานผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในงานประชุมวิชาการและวิทยานิพนธ์เล่มนี้ พร้อมทั้งให้กำลังใจแก่ ผู้วิจัยมาโดยตลอดช่วงการศึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย พลเชื้อ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรัชญา อายะวรรณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบ คำค้อ ที่มาเป็นคณะกรรมการการพิจารณาการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และสอบวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย พร้อมทั้งให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำ และให้การสนับสนุนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ ชุดอุปกรณ์ สกรีนซิลิโคนไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ และเครื่องขึ้นซิลิโคนเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง ในครั้งนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ มีวาสนา อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี ที่ให้คำแนะนำ และสนับสนุน เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ และชุดอุปกรณ์ในการทดสอบ วัดประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้ในการดำเนินการทดลองในครั้งนี้

คุณพันทิพา นำสว่างรุ่งเรือง ที่ได้ประสานงานและคอยให้ความช่วยเหลืองานด้านเอกสารต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา รวมถึงคุณหนึ่งฤทัย ประเสริฐ และคุณสงคราม ยาวะประภาส เจ้าหน้าที่ ประจำห้องปฏิบัติการศูนย์เครื่องมือ F6/1 สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและช่วยอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดี ทั้งด้านวัสดุอุปกรณ์ ห้องที่ใช้ ทำงานวิจัย และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

คุณณัฐวัชร จูประเสริฐ คุณศุภณัฐ เลาหวิโรจน์ คุณอภิสิทธิ์ ตอนสันเทียะ คุณดวงกมล ประเสริฐดี คุณธนาศักดิ์ สิงห์แหลม คุณอัศรพล ทองคำ และเพื่อนร่วมเรียนบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด

คุณวิภาดา รุกขชาติ คุณวีรยุทธ ทองคำ คุณณิชชากานต์ บริกุล ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษา อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ จิตแพทย์ นักจิตวิทยา รวมทั้งเจ้าหน้าที่โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เปิดโอกาสทางการศึกษาและให้การช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์

และวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จัดเป็นผลงานอันมีค่าที่สุดชิ้นหนึ่งของข้าพเจ้า ทุกสิ่งทุกอย่างที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นอกจากผู้เกี่ยวข้องข้างต้นแล้ว บุคคลที่ควรค่าแก่การขอบคุณมากที่สุดก็คือตัวข้าพเจ้าเอง ที่สามารถพยายามและตั้งใจเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง หากวันหนึ่งในอนาคต ข้าพเจ้าได้มีเวลากลับมาอ่านวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อีกครั้ง ข้าพเจ้าขอกล่าวกับตัวข้าพเจ้าในอนาคตว่า “เธอเหนื่อยไหม ได้พักบ้างหรือยัง วันนี้เธอสดใสหรือเปล่า เธอกินข้าวเต็มแรงหรือยัง งานของเธอเสร็จหรือยังราบรื่นดีไหม ตอนนี้เธอคงยังอยู่ เมื่อได้มองผลงานของเธอที่เธอได้สร้างมันขึ้นมา เธอภูมิใจได้แล้วนะว่าตัวเธอมีค่าและมีศักยภาพมากแค่ไหน ฉันขอบคุณเธอนะที่ได้เลือกที่จะศึกษาต่อได้มาเจออาจารย์ที่ปรึกษาที่ดีมากทั้งสองท่าน และเจอเพื่อน ๆ บัณฑิตมากมายที่คอยช่วยให้กำลังใจเธอตลอด ฉันอยากจะบอกกับเธอว่าขอบคุณเธอมาก ๆ ที่ได้เติมเต็มสิ่งที่มีค่าให้กับชีวิตฉันให้ฉันเป็นคนที่มีสมบรูณ์มากขึ้นแม้จะไม่ได้สมบรูณ์ที่สุด”

สำหรับคุณงามความดีและคุณประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ย่อมเป็นผลมาจากทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น รวมทั้งผู้ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจที่ไม่ได้เอ่ยนามจนผู้วิจัยสามารถดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ ผู้วิจัยรู้สึกปิติยินดีเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบคุณอย่างสูงมาไว้ ณ โอกาสนี้

ไกรวุฒิ รุกขชาติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 บริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พลังงานแสงอาทิตย์.....	3
2.2 วิวัฒนาการในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด.....	3
2.3 โครงสร้างเซลล์ของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบรอยต่อพี – เอ็นของวัสดุสารกึ่งตัวนำ.....	4
2.4 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสง (Photocatalytic process).....	9
2.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสง ประเภทวัสดุสารกึ่งตัวนำ.....	10
2.5 กระบวนการสังเคราะห์สารด้วยเทคนิคโซลเจล (Sol-Gel).....	11
2.6 เทคนิคขึ้นรูปด้วยการเคลือบฟิล์ม.....	11
2.7 การทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.2 วิธีการทดลอง.....	32
3.2.1 การสังเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ และทังสเตนไดรอกไซด์.....	33
3.2.2 การเตรียมชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์ บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO).....	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3	การเตรียมชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์บนแผ่นซิลิกอน (Si).....	36
3.2.4	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์.....	37
3.2.5	การตรวจสอบแรงตึงผิว (Surface Tension) ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และสารประกอบทังสเตนไดรอกไซด์ ด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัส (Contact Angle).....	37
3.2.6	การวิเคราะห์ความหนาของเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และทังสเตนไดรอกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า.....	38
3.2.7	การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์.....	38
3.2.8	การสร้างขั้วโลหะเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย.....	39
3.2.9	การวัดประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอนที่จุ่มเคลือบด้วยชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์.....	40
4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	43
4.1	การสังเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ และทังสเตนไดรอกไซด์ด้วยกระบวนการโซลเจล.....	43
4.2	ผลการวิเคราะห์เฟสของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ และทังสเตนไดรอกไซด์ที่เตรียมได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซลเจล ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD).....	44
4.2.1	การวิเคราะห์เฟสของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซลเจล.....	44
4.2.2	การวิเคราะห์เฟสของสารประกอบทังสเตนไดรอกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซลเจล.....	45
4.3	การสร้างชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทังสเตนไดรอกไซด์.....	46
4.3.1	การตรวจสอบแรงตึงผิว (Surface Tension) ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และสารประกอบทังสเตนไดรอกไซด์ด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Meter).....	46
4.3.2	การสร้างชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทังสเตนไดรอกไซด์บนแผ่นซิลิกอน ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ.....	46

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.3	ผลการวัดความหนาของชั้นเคลือบบนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวัดความหนาและความหยาบของพื้นผิวชิ้นงาน (Wyko Surface Profiler).....	49
4.4	ผลการวัดคุณสมบัติทางแสงของชั้นเคลือบหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	50
4.4.1	ผลการวัดค่าการส่องผ่านของแสง (Transmittance) ของชั้นเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า.....	51
4.4.2	ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าการสะท้อนแสง (Reflectance) ของชั้นเคลือบบนแผ่นซิลิกอน.....	52
4.5	ผลการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์.....	54
4.5.1	ผลการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm^2) และแรงดันไฟฟ้า (V) ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	54
4.5.2	ผลการคำนวณประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์.....	57
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	60
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	60
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	61
	เอกสารอ้างอิง.....	62
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก การคำนวณค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	62
	ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	69
	ประวัติผู้เขียน.....	92

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์ม ทั้งสแตนด์ตรอกไซด์.....22
2.2	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์ม ไทเทเนียมไดออกไซด์.....22
2.3	ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นเคลือบทั้งสแตนด์ตรอกไซด์ และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์.....25
2.4	สภาวะในการเตรียมชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบและการหมุนเหวี่ยง.....26
2.5	ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (DSSCs) ที่มีการเคลือบผิวด้วยชั้น เคลือบ TiO_226
2.6	ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์บนชั้นเคลือบทั้งสแตนด์ตรอกไซด์ และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์.....29
3.1	อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้สำหรับการทดลอง.....30
3.2	เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลอง.....30
4.1	ผลการวัดค่าความหนาของชั้นเคลือบบนแผ่นซิลิกอน.....49
4.2	ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....57

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กลไกการเดินทางของพาหะของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์.....5
2.2	กลไกการเดินทางของพาหะของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์.....7
2.3	วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....7
2.4	กลไกของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงบนวัสดุสารกึ่งตัวนำ.....9
2.5	ราคาต้นทุนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละยุคสมัย.....13
2.6	สเปกตรัมของการแปลงพลังงานและการสูญเสียพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดซิลิกอนยุคที่ 1.....14
2.7	ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิค XRD ของ (ก) ทั้งสแตนไดรออกไซด์ (ข) ไทเทเนียมไดออกไซด์.....17
2.8	ผลการตรวจสอบสมบัติทางแสง ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence Spectroscopy, PL).....18
2.9	ผลการตรวจสอบความหนาและโครงสร้างจุลภาคของชั้นฟิล์มบางทั้งสแตนไดรออกไซด์ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM).....19
2.10	ผลการตรวจสอบความหนาและโครงสร้างจุลภาคของชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM).....20
2.11	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ชั้นฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์.....21
2.12	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์.....21
2.13	โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรออกไซด์ และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์.....23
2.14	โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรออกไซด์.....24
2.15	ประสิทธิภาพควอนตัมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นเคลือบ ทั้งสแตนไดรออกไซด์และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์.....24
2.16	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ที่มีชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรออกไซด์และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์.....25
2.17	โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนโมโนลิติกเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นรอยต่อ p-Si/TiO ₂27
2.18	ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์บนชั้นเคลือบ TiO ₂ /WO ₃28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....32
3.2	การสังเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล.....33
3.3	การสังเคราะห์สารประกอบทังสเตนไดรอกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล.....34
3.4	รูปแบบชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า.....35
3.5	รูปแบบชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์บนแผ่นซิลิกอน.....36
3.6	ตำแหน่งการวัดความหนาของชั้นเคลือบ (M) และตำแหน่งของแผ่นซิลิกอนอ้างอิง (R).....38
3.7	อุปกรณ์สำหรับสร้างพัลส์ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วย (ก) แท่นสำหรับวาง ชิ้นงานกับไหมสกรีนที่มีลวดลายของพัลส์.....40
3.8	อุปกรณ์สำหรับการวัดค่าประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วยเครื่องจำลองสภาวะแสงอาทิตย์และเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า.....41
3.9	การฉายแสงด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์.....42
4.1	ลักษณะเจลของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโซลเจล.....43
4.2	ลักษณะเจลของสารประกอบทังสเตนไดรอกไซด์ จากการสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโซลเจล.....43
4.3	XRD pattern ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการโซลเจล หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....44
4.4	XRD pattern ของสารประกอบทังสเตนไดรอกไซด์ด้วยกระบวนการโซลเจล ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิการเผาที่ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....45
4.5	มุมสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิกอนกับ (ก) ทังสเตนไดรอกไซด์เจล และ (ข) ไทเทเนียมไดออกไซด์เจล.....46
4.6	แผ่นซิลิกอนก่อนการจุ่มเคลือบ (ก) ด้านเอ็นและ (ข) ด้านพี.....47
4.7	รูปแบบชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์บนแผ่นซิลิกอน.....47
4.8	ลักษณะของชั้นเคลือบบนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....48
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านของแสงกับความยาวคลื่น (Wavelength, nm).....51
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนของแสงกับความยาวคลื่น (Wavelength, nm).....52
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่น (Wavelength, nm).....53
4.12	ชิ้นงานเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการสร้างพัลส์เพื่อใช้วัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และค่าแรงดันไฟฟ้า.....55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์.....55
4.14	ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ และทังสเตนไตรออกไซด์.....56
4.15	ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์.....58



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

พลังงานไฟฟ้าเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญในการดำเนินชีวิต การผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่ในปัจจุบันอาศัยการเผาไหม้ของถ่านหิน แก๊ส และน้ำมัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะปลดปล่อยของเสียและก๊าซเรือนกระจกออกสู่สิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ และเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของการเกิดสภาวะโลกร้อน ด้วยเหตุผลนี้จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานสะอาดอย่างต่อเนื่อง เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานชีวภาพ และพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ได้นำมาประยุกต์ใช้มากในปัจจุบันคือ การผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์มีหลายชนิด เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนหลายผลึก และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแกลเลียมอาร์เซไนด์ เป็นต้น แต่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในปัจจุบันคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบหลายผลึก (Polycrystalline Silicon Solar cells) เนื่องจากต้นทุนในการผลิตไม่สูงมาก และมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ในระดับที่สามารถนำมาใช้งานได้จริง อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวกับประสิทธิภาพทางทฤษฎีแล้ว พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนหลายผลึกยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำอยู่ หนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวมีประสิทธิภาพที่ต่ำคือการเกิดปรากฏการณ์รวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Recombination of electron and hole) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวยับยั้งการส่งผ่านอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ มีงานวิจัยหลายฉบับรายงานถึงการใช้สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์ในการลดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ซึ่งแนวทางดังกล่าวมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์หลายผลึก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอนชนิดหลายผลึก ด้วยการใช้กระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติกของชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์ เนื่องจากสารทั้งสองมีคุณสมบัติในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาของแสงและสามารถลดการเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล นอกจากนี้ยังใช้เทคนิคการเคลือบสารด้วยการจุ่มเคลือบได้ถูกศึกษาและพัฒนา เนื่องจากกระบวนการเคลือบดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย มีราคาถูก และสามารถขยายผลได้จริงในเชิงอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอนโดยการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และทังสเตนไดรอกไซด์ (WO_3) ด้วยกระบวนการโซลเจล (Sol-Gel)

1.3.2 ศึกษาความสามารถในการส่องผ่านของแสงของชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO/TiO_2) ชั้นเคลือบทังสเตนไดรอกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO/WO_3) ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า ($\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{WO}_3$) และชั้นเคลือบทังสเตนไดรอกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า ($\text{FTO}/\text{WO}_3/\text{TiO}_2$)

1.3.3 ศึกษาความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอน (Si) แผ่นซิลิกอนที่เคลือบด้วยชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และชั้นเคลือบทังสเตนไดรอกไซด์

1.3.4 วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์ เช่น โครงสร้างผลึก (Crystal Structure) ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) ความหนาของชั้นเคลือบด้วยเครื่องวัดความหนาและความหยาบของพื้นผิวชิ้นงาน (Wyko Surface Profiler) และสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer, UV-vis) เป็นต้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้สามารถทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์สารประกอบ TiO_2 และ WO_3 ที่ใช้ในการนำมาเป็นวัสดุกึ่งตัวนำในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

1.4.2 สามารถพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการศึกษาด้านประสิทธิภาพ และการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทดสอบในช่วง Ultra-violet และ Visible-light

1.4.3 ได้ศึกษาวิจัยเทคนิคใหม่ ๆ และตีพิมพ์ผลงานวิจัย

1.4.4 ได้แนวทางในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นพลังงานสะอาด ปราศจากมลพิษ และเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูงในการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์ 2 รูปแบบ คือ การใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และการใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า “เซลล์แสงอาทิตย์” ซึ่งเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์ทำมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง และวัสดุสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันคือ วัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอน เนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่สูง ต้นทุนในการผลิตต่ำ และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

2.2 วิวัฒนาการในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้า จากโครงสร้างรอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำสำหรับเปลี่ยนพลังงานจากแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง (Photovoltaic effect) โดยวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์นิยมนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ โดยส่วนมากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ปัจจุบันนิยมใช้ซิลิกอนเป็นหลักเนื่องจากมีราคาถูกและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

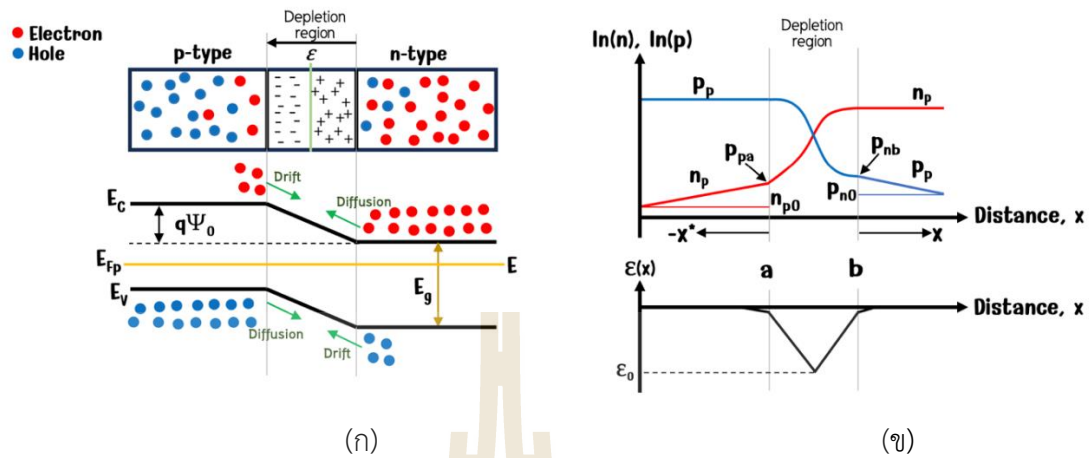
เซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เมื่อแบ่งตามโครงสร้างของวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนสามารถแบ่งเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็น 3 รุ่น ซึ่งจากรายงานของ Kibria M. และคณะผู้วิจัย (2014) อธิบายความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละรุ่นดังนี้ รุ่นที่ 1 (First generation) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผลึกเดี่ยวและหลายผลึก (Single crystal and Multi-crystal solar cells) มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 24.7% ในระดับห้องปฏิบัติการ รุ่นที่ 2 (Second generation) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง โดยส่วนมากจะประกอบไปด้วยอะมอร์ฟัสซิลิกอน มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานประมาณ 10.1% ในระดับห้องปฏิบัติการ ถึงแม้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจะน้อยกว่ารุ่นที่ 1 แต่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานอื่น ๆ ได้ อาทิเช่น ใช้กับวัสดุที่มีส่วนโค้งงอ สร้างฟิล์มบางบนกระจก สร้างฟิล์มบางบนแผ่นฐานที่มีความยืดหยุ่น สามารถสร้างฟิล์มบางที่มีพื้นที่กว้างได้ เป็นต้น และรุ่นที่ 3 (Third generation) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากการประยุกต์ใช้วัสดุชนิดต่าง ๆ ประกอบเข้ากับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลึกระดับนาโน เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโพลีเมอร์เป็นองค์ประกอบ และเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลึกของสีย้อม

แสง (Dye sensitized solar cell) ซึ่งให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงกว่า 30% ในระดับห้องปฏิบัติการ

จากการศึกษาวิวัฒนาการของการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมในการใช้งานในการผลิตกระแสไฟฟ้า และนิยมนำไปใช้ในอุปกรณ์ขนาดเล็ก หรือการใช้งานในเชิงพาณิชย์อื่น ๆ คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนที่มีโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็นเป็นวัสดุที่มีความนิยมในการนำมาใช้งานมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่เป็นที่ดี และขั้นตอนในการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ประกอบกับต้นทุนในการผลิตไม่สูง

2.3 โครงสร้างเซลล์ของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบรอยต่อพี – เอ็นของวัสดุสารกึ่งตัวนำ

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นคือการนำสารเจือชนิดพี (p-type) และชนิดเอ็น (n-type) มาสร้างให้เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งแสดงรูปแบบ Band diagram ของรอยต่อพี-เอ็น ในรูปที่ 2.1 (ก) เมื่อพิจารณาเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะที่ไม่มีแสง จะพบว่า โฮล (Hole, h^+) ในวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ในขณะที่อิเล็กตรอน (Electron, e^-) ในวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวเรียกว่าการแพร่ (Diffusion) ภายหลังจากการแพร่ของพาหะประจุวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะสร้างประจุบวกในขณะที่วัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะสร้างประจุลบ ประจุทั้งสองจะทำการสร้างสนามไฟฟ้าภายใน ($\mathcal{E}$) ขึ้นมา สนามไฟฟ้านี้จะทำการต้านกระบวนการแพร่พาหะประจุ ทำให้การแพร่ของพาหะประจุลดลง ซึ่งบริเวณที่มีสนามไฟฟ้านี้เรียกว่าบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region or Space charge region) อย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะมีผลกับพาหะที่บริเวณขอบของบริเวณปลอดพาหะ ทำให้พาหะโฮลด้านเอ็นและพาหะอิเล็กตรอนด้านพีเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อเนื่อง จากสนามไฟฟ้า ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวเรียกว่าการพัดพา (Drift) ในลักษณะดังกล่าวนี้กระแสแพร่ (Diffusion current) และกระแสพัดพา (Drift current) จะมีค่าเท่ากัน แต่มีทิศตรงกันข้ามจะหักล้างเท่ากับศูนย์ คล้ายกับการเปิดวงจร (Open circuit) ซึ่งปริมาณความหนาแน่นของพาหะประจุในระยะความลึกของเซลล์แสดงในรูปที่ 2.1 (ข)



รูปที่ 2.1 กลไกการเดินทางของพาหะของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) การเดินทางของพาหะในสภาวะที่ไม่มีแสง (ข) ปริมาณความหนาแน่นของพาหะประจุในระยความลึกของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะที่ไม่มีแสง (Green M.A., 1992)

รูปที่ 2.1 (ข) พบว่ามีความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่แตกต่างกันในแต่ละระยความลึก ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้ ในส่วนที่หนึ่งเนื้อวัสดุสารกึ่งตัวนำ แบ่งได้เป็นชนิดพีและชนิดเอ็น ในวัสดุชนิดพีจะมีความหนาแน่นของพาหะข้างมากชนิดโฮล (p_p) และมีความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยคือ อิเล็กตรอน (n_p) และในวัสดุชนิดเอ็นจะมีความหนาแน่นของพาหะข้างมากชนิดอิเล็กตรอน (n_n) และมีความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยชนิดโฮล (p_n) ส่วนที่สองพิจารณาการข้ามรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ พาหะข้างน้อย n_p และ p_n จะลดลงจากบริเวณรอยต่อจนถึงจุดสมดุลที่ระดับ n_{p0} และ p_{n0} ซึ่งบริเวณนี้จะมีสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุไฟฟ้า ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$n_{pa} = n_{p0} \exp\left(\frac{q\psi_0}{kT}\right) = \frac{n_i^2}{N_A} \exp\left(\frac{q\psi_0}{kT}\right) \quad (2.1)$$

$$p_{ab} = p_{n0} \exp\left(\frac{q\psi_0}{kT}\right) = \frac{n_i^2}{N_D} \exp\left(\frac{q\psi_0}{kT}\right) \quad (2.2)$$

- โดยที่ N_A คือ ความหนาแน่นของสารเจือชนิดผู้รับ (Density of acceptor) [$\text{atom}/\text{m}^{-3}$]
 N_D คือ ความหนาแน่นของสารเจือชนิดผู้ให้ (Density of donor) [$\text{atom}/\text{m}^{-3}$]
 n_i คือ ความหนาแน่นของพาหะในวัสดุก่อนเจือสาร [$\text{atom}/\text{m}^{-3}$]
 q คือ ประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} [Coulomb, c]
 k คือ Boltzmann's constant มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} [eV/K]
 T คือ อุณหภูมิ [K]
 ψ_0 คือ Built-in voltage [V]

กรณีเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะที่ไม่มีแสง แต่มีการบ่อนแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกจะเกิดกระแสไฟฟ้าจาก $I_{out} > I_{diffusion}$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Schockley's diode แสดงดังสมการที่ 2.3

$$I = I_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (2.3)$$

โดยที่ I_0 คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current) ซึ่ง I_0 มีความสัมพันธ์แสดงใน สมการที่ 2.4

$$I_0 = A \left(\frac{qD_c n_i^2}{L_c N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right) \quad (2.4)$$

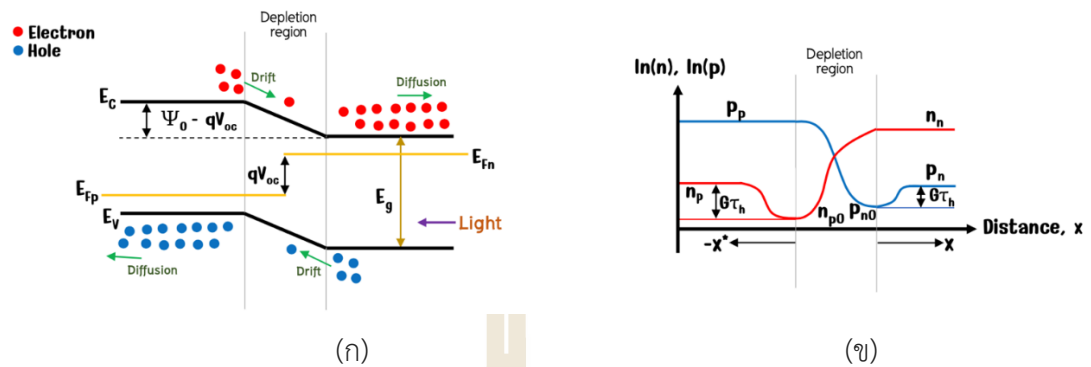
โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัด

D_c, D_h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล

L_c คือ ระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอน ($L_c = \sqrt{D_c \tau_c}$) เมื่อ τ_c คือค่าช่วงชีวิตของอิเล็กตรอน

L_h คือ ระยะทางการแพร่ของโฮล ($L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$) เมื่อ τ_h คือค่าช่วงชีวิตของโฮล

กรณีเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสถานะที่มีแสง ที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น ได้รับพลังงานโฟตอนสูงกว่าหรือเท่ากับแถบพลังงานช่องว่างของวัสดุ จะทำให้พาหะอิเล็กตรอนเกิดการกระตุ้นและข้ามรอยต่อพี-เอ็น โดยกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าลดลงมากกว่าสถานะที่ไม่มีแสง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าในรอยต่อ ทำให้รอยต่อเกิดความไม่สมดุล อิเล็กตรอนในวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดพีเกิดการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปยังวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและไปรวมกับอิเล็กตรอนที่มีอยู่ จากนั้นสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากสถานะที่ไม่สมดุลนี้จะทำการพัดพาทั้งพาหะอิเล็กตรอนและโฮลข้ามรอยต่อ ทำให้พาหะอิเล็กตรอนของวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพาหะโฮลของวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดพีเกิดพาหะประจุส่วนเกินขึ้น และแพร่ออกไปในเนื้อวัสดุ จึงเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของพาหะประจุ และในสถานะนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) มีค่าต่างถิ่นที่อยู่ qV_{oc} แสดงในรูปที่ 2.2 (ก) เมื่อพิจารณาที่รูป 2.5 (ข) จะพบว่าความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยของทั้งวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพีจะมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับอัตราการผลิตพาหะประจุ (Generation rate, G) คูณกับค่าช่วงชีวิตของพาหะ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแสง (I_{ph}) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.5 (Green M.A., 1992)



รูปที่ 2.2 กลไกการเดินทางของพาหะของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) การเดินทางของพาหะในสภาวะที่มีแสง (ข) ปริมาณความหนาแน่นของพาหะประจุในระยยะความลึกของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะที่มีแสง (Green M.A., 1992)

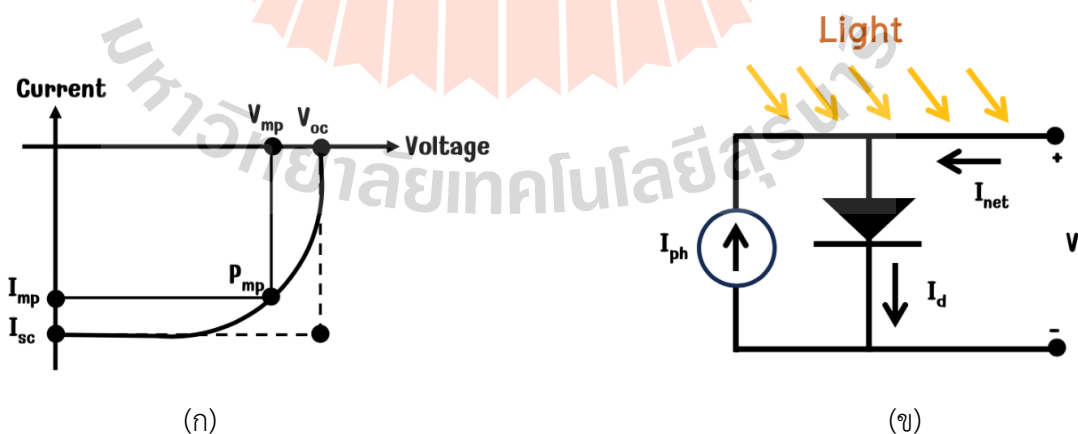
$$I_{ph} = qA_{area}G(L_c + W + L_h) \quad (2.5)$$

โดยที่ W คือ ความกว้างของ Depletion region

A_{area} คือ พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

ดังนั้นจะได้กระแสไฟฟ้าสุทธิ (I_{net}) แสดงดังสมการที่ 2.6 และเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.3

$$I_{net} = I_0(e^{qV_{oc}/kT} - 1) - I_{ph} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะที่มีแสง และ (ข) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะที่มีแสง

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะที่มีแสง ดังรูปที่ 2.3 (ก) พบว่าประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open circuit voltage, V_{oc}) เป็นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ 2.7

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.7)$$

โดยที่ n คือ Ideality factor มีค่าเท่ากับ 1

จากสมการที่ 2.7 ค่า I_0 มีผลกับ V_{oc} ถ้า I_0 เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้ V_{oc} ลดลง จึงต้องมีการปรับปรุงเรื่องของค่าช่วงชีวิตของพาหะให้มีค่าสูงขึ้น ด้วยการลดสถานะพลังงานดักจับ (Trap state) ที่เกิดขึ้นในรอยต่อ และการเพิ่มสนามไฟฟ้าให้กับรอยต่อ

กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current, I_{sc}) เป็นกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ ค่า I_{sc} จะมีค่าเท่ากับ I_{ph}

ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill factor, FF) บ่งบอกถึงคุณภาพของรอยต่อพี-เอ็น และคุณภาพของขั้วไฟฟ้า แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.8

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (2.8)$$

$$P_{mp} = V_{mp}I_{mp} \quad (2.9)$$

$$P_{mp} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (2.10)$$

โดยที่ V_{mp} คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

I_{mp} คือ กระแสไฟฟ้าจุดที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด

P_{mp} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Energy conversion efficiency, η) ซึ่งหาได้จากสัดส่วนของกำลังไฟฟ้า Output ต่อกำลังไฟฟ้า Input ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.11

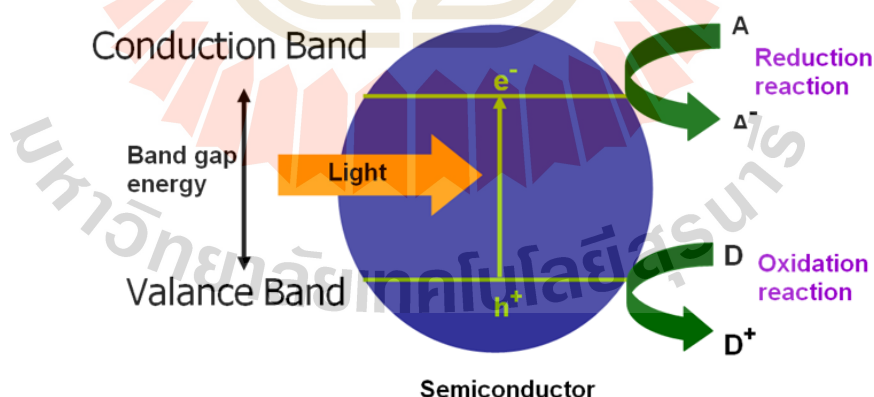
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}} \quad (2.11)$$

โดยที่ P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากแสงที่ตกกระทบบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์

2.4 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสง (Photocatalytic process)

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสง เป็นการใช้แสงในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาแสงหรือตัวโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalysts) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแสงรับพลังงานแสงต้องได้ที่มีปริมาณมากพอที่จะสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้

กลไกของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสง เมื่ออนุภาคของวัสดุสารกึ่งตัวนำถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ของสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band) ถูกกระตุ้นและเคลื่อนที่ไปยังแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุสารกึ่งตัวนำ ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงในสภาวะออกซิเดชัน ดังรูปที่ 2.4 โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแสงในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด ได้แก่ โลหะตัวนำ (Transition Metals) เช่น ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) เป็นต้น และวัสดุชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ทังสเตนไดรอกไซด์ (WO₃) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาแสงส่วนมากที่นิยมนำมาใช้งานในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงเป็นวัสดุชนิดสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่กว้าง สามารถตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแสงได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแสงชนิดโลหะตัวนำ



รูปที่ 2.4 กลไกของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงบนวัสดุสารกึ่งตัวนำ (อภิชน วัชรนทร์วงศ์ และคณะ, 2012)

2.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงประเภทวัสดุสารกึ่งตัวนำ

2.4.1.1 โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (Molybdenum Trioxide, MoO_3)

โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือสีฟ้าอ่อน มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) ซึ่งมีค่าของช่องว่างแถบพลังงาน เท่ากับ 2.90-3.15 eV เป็นโครงสร้างผลึกที่มีความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิก ตอบสนองต่อสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ดี (Landmann M. และคณะ, 2012)

2.4.1.2 ไนโอเบียมเพนทอกไซด์ (Niobium Pentoxide, Nb_2O_5)

ไนโอเบียมเพนทอกไซด์ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ของโลหะทรานซิชัน หมู่ V_B ลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาว ไม่ละลายในน้ำ มีสมบัติเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค่าของช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.4-4.0 eV เกิดการสร้างพันธะกับออกซิเจน (Nb-O-Nb-O) ซึ่งมีหน่วยเซลล์พื้นฐานเป็น NbO_6 ลักษณะโครงสร้างผลึกส่วนใหญ่ของไนโอเบียมเพนทอกไซด์ ได้แก่ โครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ออร์โธโรมบิก และซูโด-เฮกซะโกนอล (Pseudohexagonal, $\text{TT-Nb}_2\text{O}_5$) เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างแบบโมโนคลินิกจะแสดงสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ดี (Landmann M. และคณะ, 2012)

2.4.1.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงสีขาว เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบ่งออกได้ 3 โครงสร้าง ได้แก่ โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) โดยแต่ละเฟสมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกัน ได้แก่ 3.23 3.02 และ 2.96 eV ตามลำดับ จากสมบัติทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงได้ดีกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และยังได้รับความนิยมใช้เป็นชั้นโฟโตแอโนด เนื่องจากสามารถยับยั้งการเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนได้ (Landmann M. และคณะ, 2012)

2.4.1.4 ทังสเตนไตรออกไซด์ (Tungstane oxide; WO_3)

ทังสเตนไตรออกไซด์ เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่สำคัญ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงที่ดี คล้ายกับไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่มีความสามารถในการตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแสงได้กว้างกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ และครอบคลุมพลังงานทั้งในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต และช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็น ซึ่งที่ผ่านมา มีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยกันหลายวิธี เช่น โซลเจล (Sol-Gel) การระเหยด้วยความร้อน (Thermal evaporation) การแอโนไดเซชัน (Anodization) ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) และเฟลมสเปรย์ไพโรไลซิส (Flame spray pyrolysis) เป็นต้น (ณัฐกานต์ กาญจนะ, 2021)

จากการศึกษาพบว่าวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด ไทเทเนียมไดออกไซด์ และทังสเตนไตรออกไซด์ นั้นมีศักยภาพในการตอบสนองต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ และในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นได้ดี เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้าง อีกทั้งยังสามารถลดการเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงได้ วัสดุสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ที่นิยมสำหรับวัสดุสารกึ่งตัวนำดังกล่าว

นิยมใช้การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซลเจล (Sol-Gel) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย ต้นทุนต่ำ จึงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ในการสังเคราะห์วัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสง (Lakshmi K. และคณะ, 2017)

2.5 กระบวนการสังเคราะห์สารด้วยเทคนิคโซลเจล (Sol-Gel)

โซลเจล (Sol-Gel) เป็นเทคนิคการสังเคราะห์สารด้วยกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนวัสดุสถานะของแข็งที่อนุภาคขนาดใหญ่ไปเป็นวัสดุที่มีขนาดอนุภาคเล็กกลง โดยมีลำดับขั้นตอนเริ่มต้นด้วยการเปลี่ยนสถานะของแข็งให้อยู่ในสถานะของเหลวหรือสารละลายที่เรียกว่า โซล (Sol) ด้วยการเตรียมสารละลายเคมีแบบเปียก (Wet Process) ในระหว่างกระบวนการโซลเจล จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Reaction) ของสารตั้งต้น ทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กหรือสารแขวนลอย ซึ่งกระบวนการจะดำเนินไปด้วยปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation Reaction) ทำให้อนุภาคสร้างพันธะในลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายมากขึ้นที่เรียกว่า เจล (Gel)

โซล เป็นสารละลายที่มีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งขนาดเล็กหรืออนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particles) ที่อยู่ในของเหลว ซึ่งอนุภาคของแข็งจะมีขนาดเล็กประมาณ 1-100 นาโนเมตร โซลบางชนิดสามารถเปลี่ยนสภาพไปเป็นเจลได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ และชนิดของตัวทำละลาย

เจล เป็นสารกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่เกิดจากอนุภาคคอลลอยด์เกิดการควบแน่น ซึ่งมีความหนืดสูงที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากโครงร่างตาข่าย (Network) ของเฟสใหม่ที่เกิดขึ้น (Dispersed Phase) แล้วเมื่อนำเจลไปเข้าสู่กระบวนการเผาจะทำให้สารประกอบลิแกนด์ระเหยออก ทำให้ได้วัสดุใหม่ที่มีความบริสุทธิ์สูง (อร เศรษฐจินดาเลิศ, 2012)

กระบวนการสังเคราะห์สารด้วยเทคนิคโซลเจลนิยมใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบเพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ที่สูง อีกทั้งสารประกอบเจลที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น นิยมใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน หรือปรับพื้นผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการเคลือบ เช่น การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง การเคลือบแบบสกรีน และการเคลือบแบบจุ่ม เป็นต้น เนื่องจากมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ที่ง่าย ต้นทุนต่ำ และสามารถขยายผลในเชิงพาณิชย์ได้ดี

2.6 เทคนิคขึ้นรูปด้วยการเคลือบฟิล์ม

เทคนิคการเคลือบฟิล์มโดยทั่วไปสามารถทำได้หลายวิธีตามความเหมาะสมของชนิดวัสดุ ปริมาณ คุณภาพของชั้นฟิล์ม และเทคโนโลยีการเตรียม โดยเทคโนโลยีการเตรียมถูกจำแนกได้ 2 วิธี ดังนี้

1. วิธีทางกายภาพ (Physical process) เป็นการเคลือบสารลงบนวัสดุรองรับโดยการกระตุ้นด้วยพลังงานทำให้อะตอมหลุดออกจากผิววัสดุและฟุ้งกระจายหรือฟุ้งไปยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ ซึ่งสามารถเตรียมฟิล์มได้โดยใช้วิธีการสปัตเตอริงแบบกระแสตรง (DC magnetron sputtering) และแบบกระแสสลับ (RF sputtering) การระเหยสารด้วยความร้อน (Thermal evaporation) การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporation) การตกสะสมของเลเซอร์พัลส์

(Pulsed laser deposition) การยิงด้วยเลเซอร์ (Laser Ablation) ข้อจำกัดของการเคลือบฟิล์มลักษณะนี้คือต้องทำในระบบสุญญากาศเท่านั้น

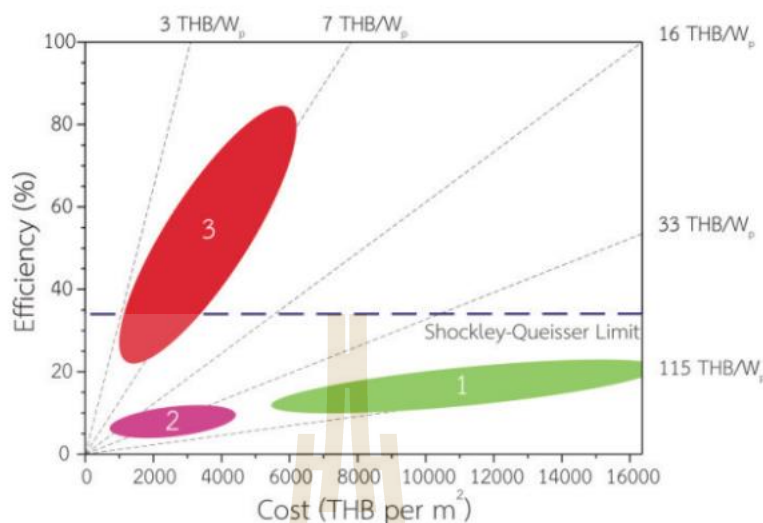
2. วิธีทางเคมี (Chemical process) เป็นการเคลือบ โดยการใช้ปฏิกิริยาเคมี ทำให้เกิดเป็นสารใหม่ในรูปแบบสารประกอบลักษณะเป็นของเหลว เคลือบบนวัสดุรองรับ และการใช้การแตกตัวของสารเคมีในสถานะก๊าซ ซึ่งสามารถเตรียมฟิล์มได้โดยไม่ต้องทำในระบบสุญญากาศ เช่น การพ่นสารเหลวหรือสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis) ใช้สารแขวนลอยที่เตรียมโดยกระบวนการโซลเจล (Sol-Gel process) นำมาเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) หรือแบบจุ่มเคลือบ (Dip coating) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีวิธีเคลือบในอ่างสารเคมี (Chemical Bath Deposition), ซัคเซสซิฟไอออนิกเลเยอร์แอดซอร์ปชันและรีแอคชัน (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction :SILAR) ที่สามารถเตรียมได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้ได้สารใหม่หรือสารประกอบที่เป็นสารละลายเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการเคลือบฟิล์ม และยังมีการจำแนกการเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการทางสารละลาย (Solution Based Chemistry, SBC) เช่น การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง การเคลือบแบบจุ่ม การเคลือบแบบพ่นสเปรย์ และการเคลือบแบบสกรีน (Screen coating) เป็นต้น (Ukoba K., 2017)

เทคนิคการขึ้นรูปด้วยการเคลือบนั้นถูกนำมาใช้งานในการขึ้นรูปชิ้นงานบนวัสดุรองรับ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของชิ้นงาน หรือชั้นฟิล์มให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ ซึ่งเทคนิคการขึ้นรูปด้วยการเคลือบแบบการจุ่มเคลือบ ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในกลุ่มการเคลือบของอุตสาหกรรมเซรามิก เนื่องจากขั้นตอนในการเตรียมที่ไม่ยุ่งยาก และต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ

2.7 การทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบัน นักวิจัยได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์หลายรูปแบบ เพื่อเพิ่มความสามารถในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

Saichon S. และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างนาโน จากการศึกษาพบว่าปัญหาหลักของเซลล์แสงอาทิตย์ คือประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้ายังคงมีค่าต่ำเมื่อถูกนำมาใช้งานจริง ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขายในท้องตลาดมีประสิทธิภาพเพียง 15-18% ดังนั้นนักวิจัยจึงหาแนวทางในการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าเพิ่มขึ้น หนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจในปัจจุบันคือการนำโครงสร้างนาโน (โครงสร้างที่มีขนาด 1-100 นาโนเมตร) มาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างนาโนจะมีประสิทธิภาพมากกว่า 80% (Nozawa T. และคณะ, 2011)



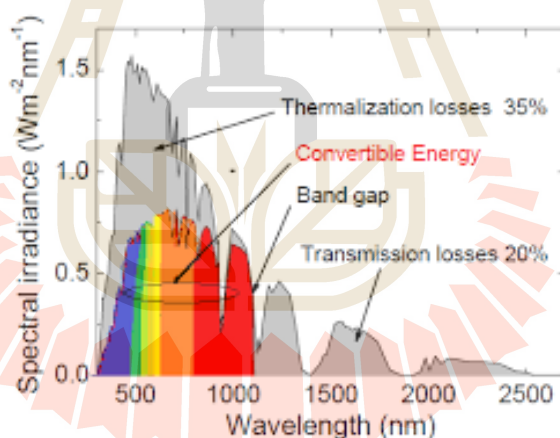
รูปที่ 2.5 ราคาต้นทุนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละยุคสมัย (Green M.A., 2004)

การศึกษาราคาต้นทุนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละยุคดังรูปที่ 2.5 พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 1 ที่มีการใช้วัสดุซิลิกอน และแกเลียมอาร์เซไนด์ เป็นหลัก ในยุคนี้เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้มีประสิทธิภาพเฉลี่ยประมาณ 17% (Abdin Z. และคณะ, 2013) ข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 1 คือ น้ำหนักที่มากและต้นทุนในการผลิตที่สูง นักวิจัยจึงได้มีการศึกษาและมีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง ถูกพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่ 1 โดยเน้นออกแบบให้มีขนาดบาง น้ำหนักเบา และใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 2 ยังคงมีประสิทธิภาพที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนในยุคที่ 1 โดยเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่ 2 มีประสิทธิภาพเพียง 6% (Abdin Z. และคณะ, 2013) ต่อมานักวิจัยได้ทำการศึกษาหาแนวทางในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่ 3 ขึ้นมา ซึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีการพัฒนาและนำเทคนิคการสังเคราะห์วัสดุนาโนมาใช้ โดยรู้จักกันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโครงสร้างนาโน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคายน์เซนซิไทซ์ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกราฟีน เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่า แม้ว่าตามทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่ 3 จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ได้สูงถึง 80% แต่ยังคงเป็นเรื่องที่ยากในการผลิตและนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากต้นทุนในการผลิตที่สูงมาก ดังนั้นในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูง ราคาต้นทุนต่ำ และเป็นที่นิยมในการใช้งานในปัจจุบันก็ ยังคงเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนในยุคที่ 1 ที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย

Apirak M. และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน โดยการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (SE cell) ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ เป็นโครงสร้างรูปแบบหนึ่งที่ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำจากการใช้แหล่งสารเจือสารละลายโซลเจล

ฟอสฟอรัสเข้มข้นต่ำ (PSG) เคลือบบนบริเวณรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนในชั้นเอ็น (n-Si) ด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยง ซึ่งมีความหนาของชั้นฟิล์ม PSG อยู่ในช่วง 100-110 นาโนเมตร จากการทดสอบสมบัติทางแสงพบว่า ชั้นฟิล์ม PSG สามารถลดค่าการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ลดลง ซึ่งมีค่า 10.93% เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนที่ไม่มีชั้นฟิล์ม PSG และเมื่อทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่พอมิตเตอร์ที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์ม PSG สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นได้ถึง 1.47% เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

Ghania A. และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนด้วยกระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิกไม่บริสุทธิ์ (The impurity photovoltaic effect, IPV) จากแนวความคิดพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่ 3 ด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นหนึ่งในแนวคิดที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษา คือ ปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิกไม่บริสุทธิ์ เป็นแนวคิดในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการเพิ่มศักยภาพในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงอินฟราเรดให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนนั้นมีข้อจำกัดในการแปลงพลังงานในช่วงความยาวคลื่นแสงอินฟราเรดที่ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของการแปลงพลังงานและการสูญเสียพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ยุคที่ 1

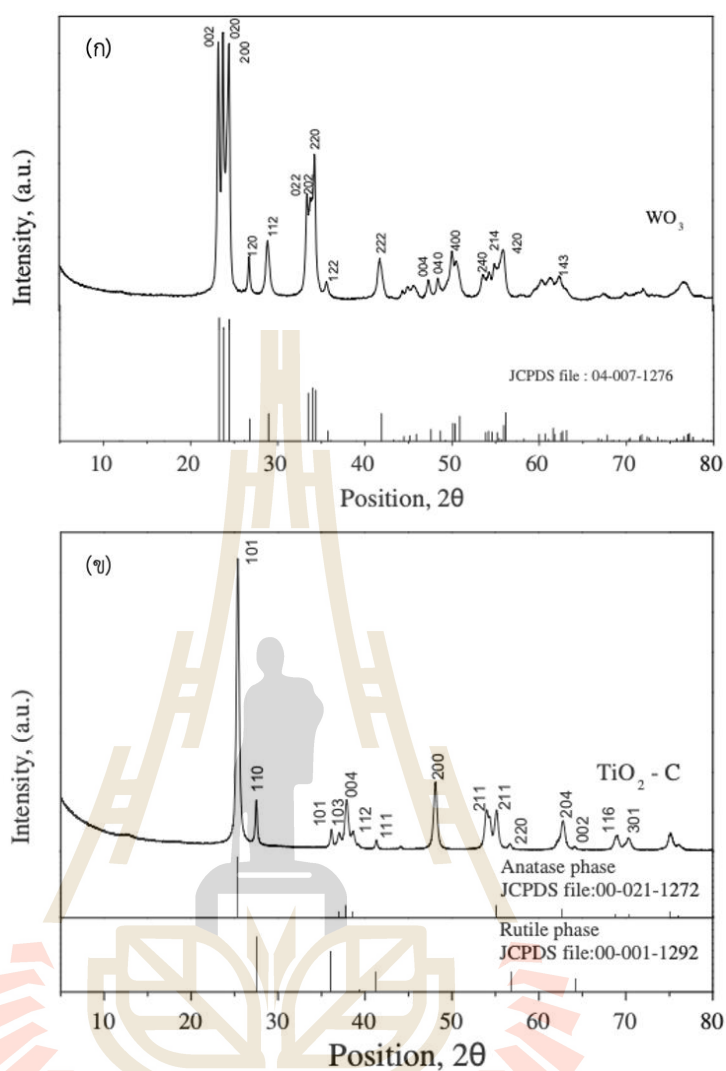
จากงานวิจัยเรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนด้วยกระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิกไม่บริสุทธิ์ได้นำแนวคิด IPV มาใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่ 1 โดยการเติมสารเจือ IPV คือ ซิลิเนียม (Se) ลงไปในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนที่มีการเติมสารเจือซิลิเนียม มีการตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นแสงอินฟราเรดสูงขึ้น ซึ่งเป็นความยาวคลื่นในช่วงความถี่ 800 - 1360 นาโนเมตร อีกทั้งเมื่อทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า พบว่ามีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการเติมสารเจือซิลิเนียม

Lakshmi K. และคณะ (ปี ค.ศ. 2017) ได้ทำการศึกษาการนำกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสง (Photocatalysis) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) จากการศึกษาวิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 ยุค พบว่าสิ่งที่เป็นเงื่อนไขหลักของการแปลงพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ แสง กล่าวคือเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับศักยภาพในการตอบสนองต่อแสง ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีข้อจำกัดในเรื่องค่าการดูดกลืนแสงของวัสดุที่ใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป ดังนั้นกระบวนการที่มีความเกี่ยวข้องกับแสง คือ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสง จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสง ของ Lui X. และคณะ ในปี ค.ศ. 2015 ได้ทำการศึกษากระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงหรือตัวกระตุ้น โดยเฉพาะวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสงที่ดี เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สตรอนเทียมไททาเนต (SrTiO₃) บิสเมททังสเตน (Bi₂WO₆) ทังสเตนไดรอกไซด์ (WO₃) เป็นต้น วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงแต่ละชนิดมีความสามารถในการตอบสนองต่อแสงที่แตกต่างกัน โดยการศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงนั้น จะมีการตรวจสอบสมบัติทางแสงใน 3 ช่วงได้แก่ 1). ช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต ในกรณีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในของวัสดุเพื่อให้มีการตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตนั้นทำได้ยาก แต่สามารถปรับปรุงวัสดุด้วยการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงได้ วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงจำพวกวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาศึกษาในการปรับปรุงพื้นผิว เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ เซอร์โคเนียมออกไซด์ สตรอนเทียมไททาเนต และโพแทสเซียมแทนทาลัมออกไซด์ จากการศึกษาพบว่าวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด TiO₂ นั้นมีศักยภาพในการตอบสนองต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้าง อีกทั้งยังสามารถลดการเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงได้ (Wang P. และคณะ, 2011) 2). ช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็น ในการพัฒนาศักยภาพในการตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงนั้น มีแนวคิดที่ได้รับความสนใจในการศึกษา 3 วิธี ได้แก่ การปรับปรุงโครงสร้างของช่องว่างแถบพลังงานด้วยวัสดุสารกึ่งตัวนำ การปรับปรุงโครงสร้างช่องว่างแถบพลังงานด้วยการเติมสารเจือ และการปรับปรุงโครงสร้างในระดับนาโนด้วยการสร้างโครงสร้างนาโนชนิดควอนตัมดอทด้วยวัสดุธาตุโลหะหนัก เป็นต้น ทั้งนี้วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงที่ถูกนำมาพัฒนากระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็น เช่น CdS CdSe InP WO₃ Ag₂O Cu₂O BiVO₄ Bi₂MoO₆ Bi₂WO₆ RbPb₂Nb₃O₁₀ เป็นต้น จากงานวิจัยพบว่าวัสดุนาโนทังสเตนไดรอกไซด์ชนิดเอ็น (n-type WO₃) ที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.4 ถึง 2.8 eV เป็นวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นได้ดี (Sang Y. และคณะ., 2015) อย่างไรก็ตามวัสดุสารกึ่งตัวนำ WO₃ มีอัตราการเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนที่สูงทำให้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงนั้นลดลงได้ จึงทำให้มีการศึกษาแนวคิดในการสร้างรูปแบบของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงแบบผสม คือการใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำมากกว่าหนึ่งชนิด เช่น ZnO-NaSrBO₃:Tb³⁺ (ZNT) จากงานวิจัยของ Lui X. และคณะ ในปี ค.ศ. 2015 พบว่าการใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำแบบผสมสามารถเพิ่มศักยภาพของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นได้ และลดปัญหาการเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนได้ และ 3). ช่วง

ความยาวคลื่นแสงอินฟราเรด กระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงอินฟราเรดนั้น ยังคงมีค่าที่ต่ำ ซึ่งจากการศึกษามีแนวคิดในการสร้างโครงสร้างนาโนควอนตัมต่อของวัสดุสารกึ่งตัวนำ เพื่อเพิ่มการตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแสงอินฟราเรด โดยมุ่งเน้นในการศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงในการพัฒนาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่ากระบวนการเร่งปฏิกิริยาของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงจำพวกวัสดุสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างนาโนควอนตัมต่อสามารถเพิ่มการตอบสนองต่อคุณสมบัติทางแสงได้ ดังนั้นกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงจึงมีแนวโน้มในการเพิ่มการตอบสนองทางแสง และเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์

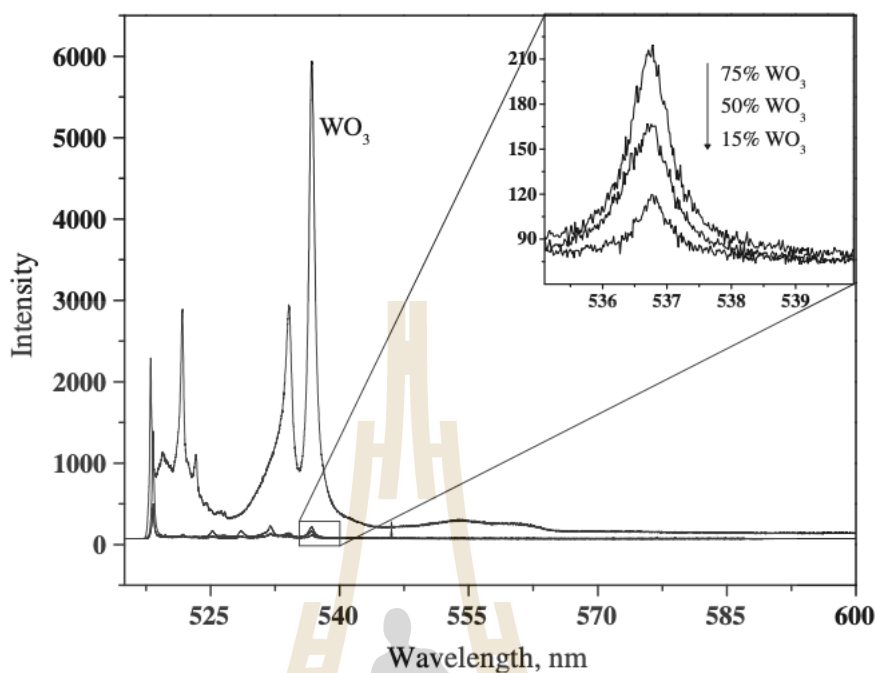
Satyapaul A. Singh และ Giridhar Madras (2012) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า (Comercial titanium dioxide, TiO_2 -c) ในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต และช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นด้วยวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงผสมทั้งสแตโนไดรอกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (WO_3 - TiO_2) โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเริ่มจากการนำวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงมาศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 2.7 พบว่า





รูปที่ 2.7 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิค XRD ของ (ก) ทังสเทนไตรออกไซด์ (ข) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Satyapaul A. S. และ Giridhar M., 2012)

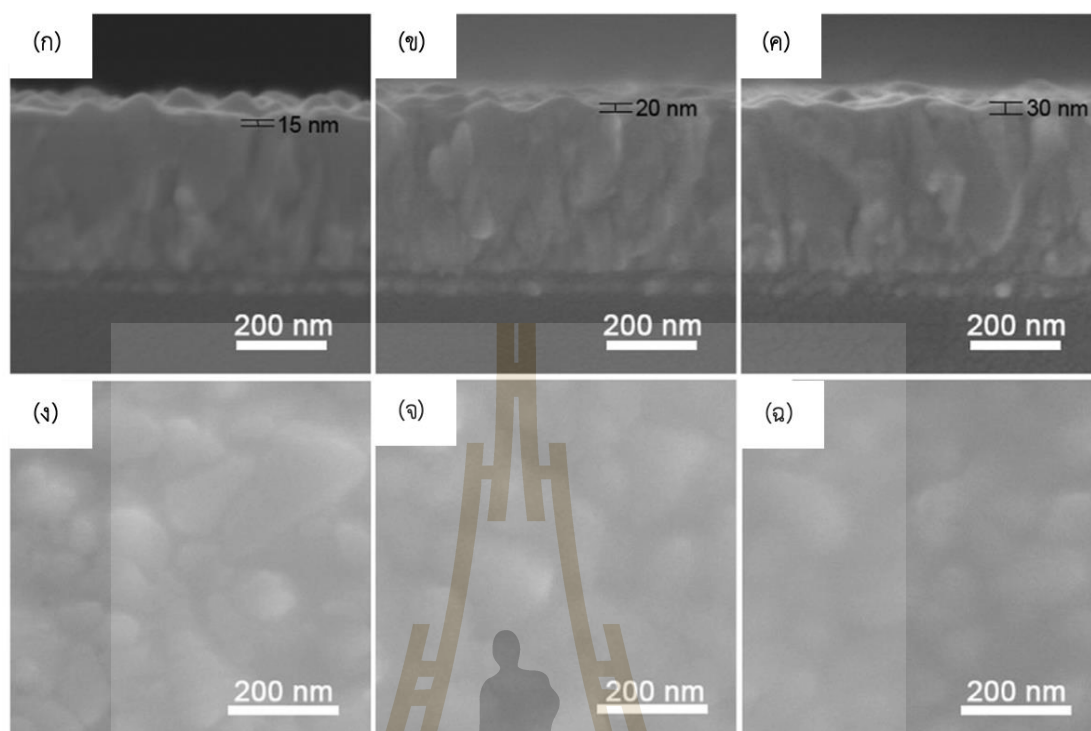
จากรูปที่ 2.7 แสดงเฟสของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงชนิดทังสเทนไตรออกไซด์ที่เป็นเฟสเดี่ยวอย่างสมบูรณ์ (รูปที่ 2.7 (ก)) และเฟสผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูปที่ 2.7 (ข)) หลังจากนั้นได้ทำการศึกษาการเพิ่มวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงชนิด WO_3 ในปริมาณ 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 50%, 75% และ 100% ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพทางแสง ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



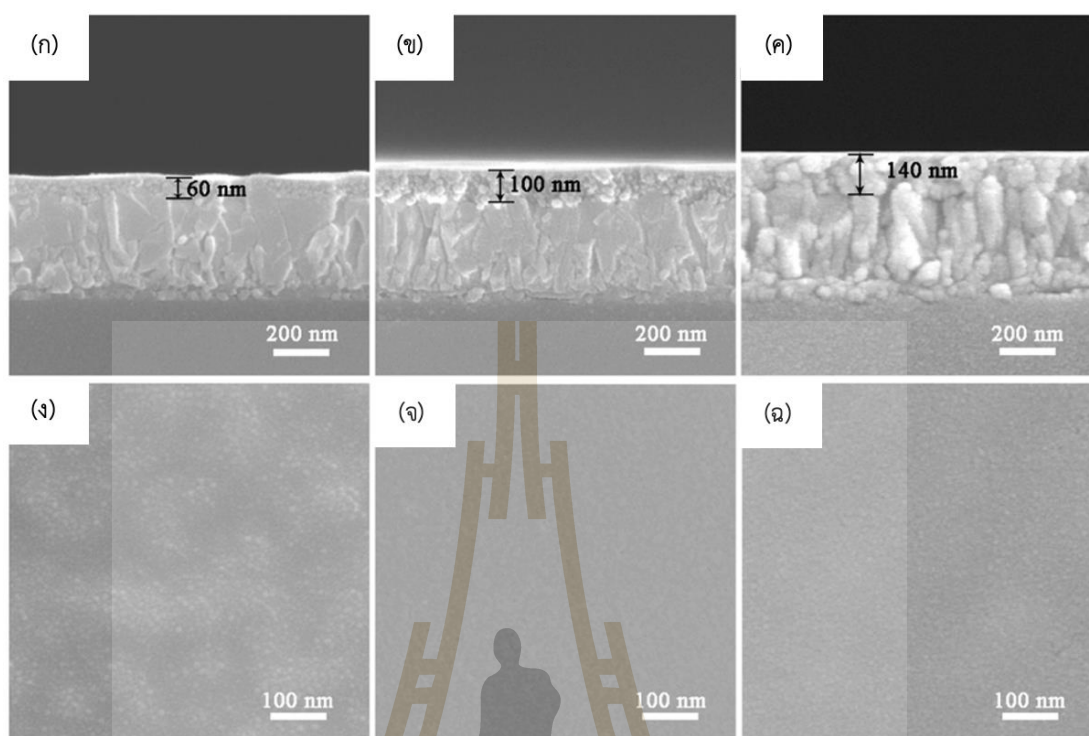
รูปที่ 2.8 ผลการตรวจสอบสมบัติทางแสง ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence Spectroscopy, PL) (Satyapaul A. S. และ Giridhar M., 2012)

ผลการวัดค่าทางแสง โดยใช้หลักการการเปล่งแสงด้วยเทคนิค PL ดังรูปที่ 2.8 จะแสดงถึงปรากฏการณ์การรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอน กล่าวคือเมื่อวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงมีการตอบสนองทางแสงที่ดี จะทำให้อิเล็กตรอนและโฮลเกิดการกระตุ้น ส่งผลให้ค่าการเปล่งแสงของวัสดุมีค่าต่ำ ในขณะที่เมื่อวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาแสงเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนจะส่งผลให้ค่าการเปล่งแสงเพิ่มขึ้น แต่การตอบสนองต่อแสงของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงต่ำลง ซึ่งจากการทดลองพบว่าวัสดุไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการผสมทั้งสแตนไดรออกไซด์ 15% มีค่าการเปล่งแสงต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่า ทั้งสแตนไดรออกไซด์สามารถลดการเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอน และเพิ่มสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้

Jincheng Zhang และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ด้วยชั้นฟิล์มบางทั้งสแตนไดรออกไซด์และชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยศึกษาความหนาของชั้นฟิล์มบางทั้งสแตนไดรออกไซด์และชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทดลองเตรียมชั้นฟิล์มบางทั้งสแตนไดรออกไซด์ และชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากเทคนิคการหมุนเหวี่ยง โดยการปรับเปลี่ยนจำนวนของชั้นฟิล์มคือ 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและความหนาของชั้นฟิล์มบาง แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10

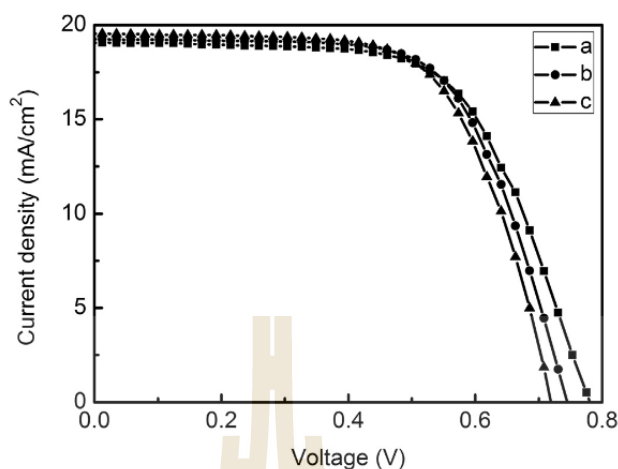


รูปที่ 2.9 ผลการตรวจสอบความหนาและโครงสร้างจุลภาคของชั้นฟิล์มบางทังสเตนไตรออกไซด์ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM) (ก, ง) ชั้นฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ 1 ชั้น (ข, จ) ชั้นฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ 2 ชั้น (ค, ฉ) ชั้นฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ 3 ชั้น (Jincheng Z. และคณะ., 2016)



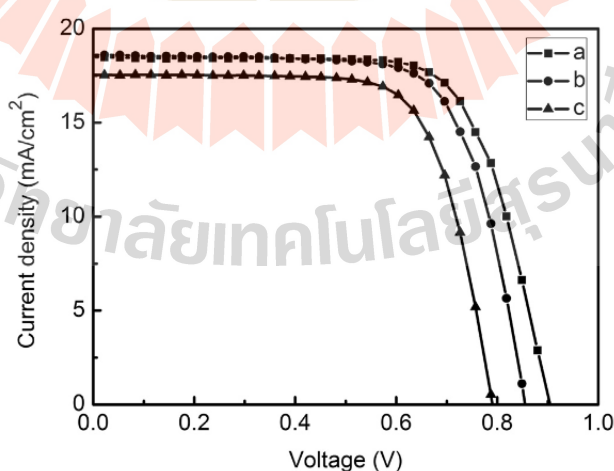
รูปที่ 2.10 ผลการตรวจสอบความหนาและโครงสร้างจุลภาคของชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM) (ก, ง) ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 ชั้น (ข, จ) ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ชั้น (ค, ฉ) ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 ชั้น (Jincheng Z. และคณะ, 2016)

จากรูปที่ 2.9 ความหนาของชั้นฟิล์มบางทั้งสแตนไดรออกไซด์ ที่มีจำนวนชั้นฟิล์ม 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น เมื่อวัดค่าความหนาด้วยเทคนิค FESEM มีค่าความหนาเท่ากับ 15 นาโนเมตร 20 นาโนเมตร และ 30 นาโนเมตร ตามลำดับ จากรูปที่ 2.10 ความหนาของชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีจำนวนชั้นฟิล์ม 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น เมื่อวัดค่าความหนาด้วยเทคนิค FESEM มีค่าความหนาเท่ากับ 60 นาโนเมตร 100 นาโนเมตร และ 140 นาโนเมตร ตามลำดับ จากนั้นทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์และชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์ (a) ชั้นฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์ 1 ชั้น (b) ชั้นฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์ 2 ชั้น (c) ชั้นฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์ 3 ชั้น (Jincheng Z. และคณะ., 2016)

จากรูปที่ 2.11 พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์ เมื่อมีจำนวนชั้นฟิล์มและความหนาของชั้นฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์มีค่าต่ำลง ในขณะที่เมื่อจำนวนชั้นฟิล์มและความหนาของชั้นฟิล์มทังสเตนไดรอกไซด์ต่ำ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.12 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 ชั้น (b) ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ชั้น (c) ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 ชั้น (Jincheng Z. และคณะ., 2016)

จากรูปที่ 2.12 พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อมีจำนวนชั้นฟิล์มและความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์มีค่าต่ำลง ในขณะที่เมื่อจำนวนชั้นฟิล์มและความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ำ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์มีค่าสูงขึ้น จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าจะถูกนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์ (Jincheng Z. และคณะ., 2016)

Compact layer	Thickness (nm)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA cm^{-2})	FF	η (%)
WO ₃ (1)	15	0.78 ± 0.01	18.88 ± 0.58	0.66 ± 0.06	9.69 ± 0.45
WO ₃ (2)	20	0.73 ± 0.02	19.36 ± 0.39	0.65 ± 0.02	9.18 ± 0.62
WO ₃ (3)	30	0.72 ± 0.03	19.44 ± 0.31	0.64 ± 0.04	9.04 ± 0.32

จากตารางที่ 2.1 ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อจำนวนชั้นฟิล์มและความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าที่ต่ำ ในขณะที่ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์จะมีค่าต่ำลงเมื่อจำนวนชั้นฟิล์มและความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าสูงขึ้น

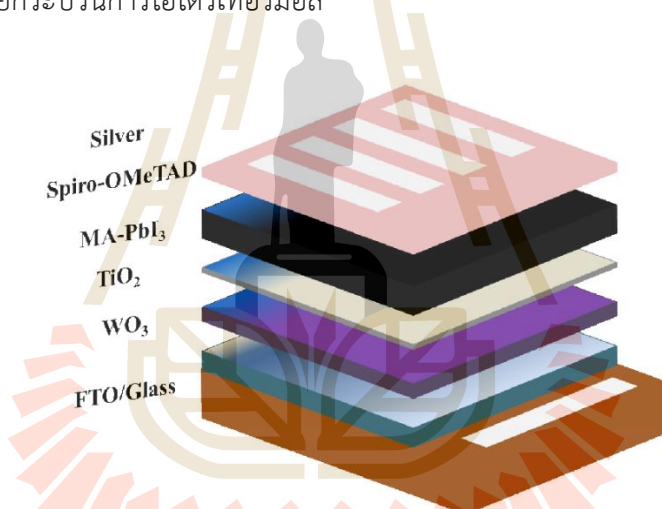
ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (Jincheng Z. และคณะ., 2016)

Compact layer	Thickness (nm)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA cm^{-2})	FF	η (%)
TiO ₂ (1)	60	0.93 ± 0.03	17.96 ± 0.33	0.71 ± 0.02	11.79 ± 0.31
TiO ₂ (2)	100	0.89 ± 0.02	16.60 ± 0.78	0.73 ± 0.01	10.69 ± 0.69
TiO ₂ (3)	140	0.82 ± 0.02	16.78 ± 0.27	0.73 ± 0.01	9.94 ± 0.23

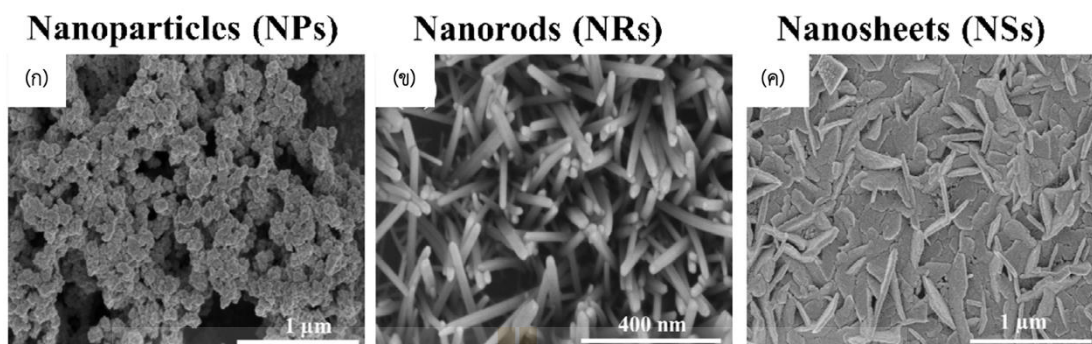
จากตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อจำนวนชั้นฟิล์มและความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าที่ต่ำ ในขณะที่ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มทั้งสแตนไดรออกไซด์จะมีค่าต่ำลงเมื่อจำนวนชั้นฟิล์มและความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าสูงขึ้น

ผลการวิจัยพบว่าความหนาที่เหมาะสมที่สุดของชั้นฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ และชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ 15 และ 60 นาโนเมตร ตามลำดับ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มทังสเตนไตรออกไซด์ 15 นาโนเมตร ให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าสูงสุด 9.69% ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 60 นาโนเมตร มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าสูงสุด 11.79%

Khalid Mahmood และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ด้วยชั้นเคลือบทังสเตนไตรออกไซด์ และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทำการออกแบบโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นเคลือบทังสเตนไตรออกไซด์และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ด้วยเทคนิคการเกิดละอองด้วยไฟฟ้า (Electrospray) ซึ่งจะทำการศึกษาเฉพาะชั้นเคลือบทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ได้แก่ โครงสร้างอนุภาคนาโน (Nanoparticles, NPs) โครงสร้างแท่งนาโน (Nanorods, NRs) และโครงสร้างแผ่นนาโน (Nanosheets, NSs) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งวัสดุทังสเตนไตรออกไซด์เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

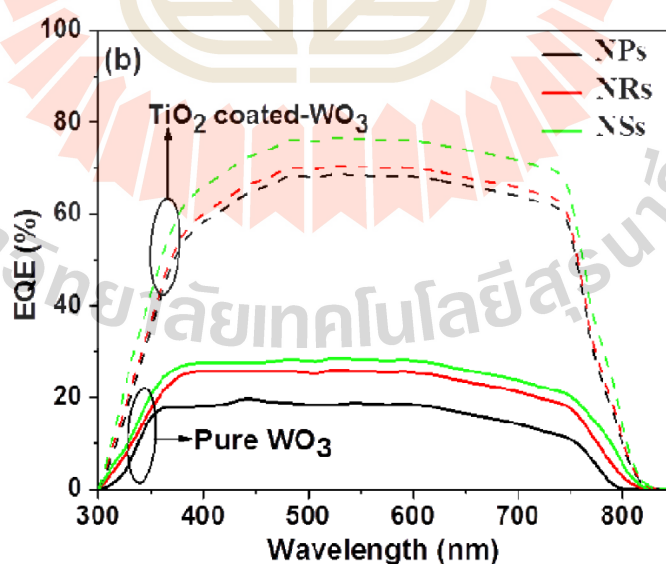


รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นเคลือบทังสเตนไตรออกไซด์ และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (Khalid M. และคณะ., 2014)

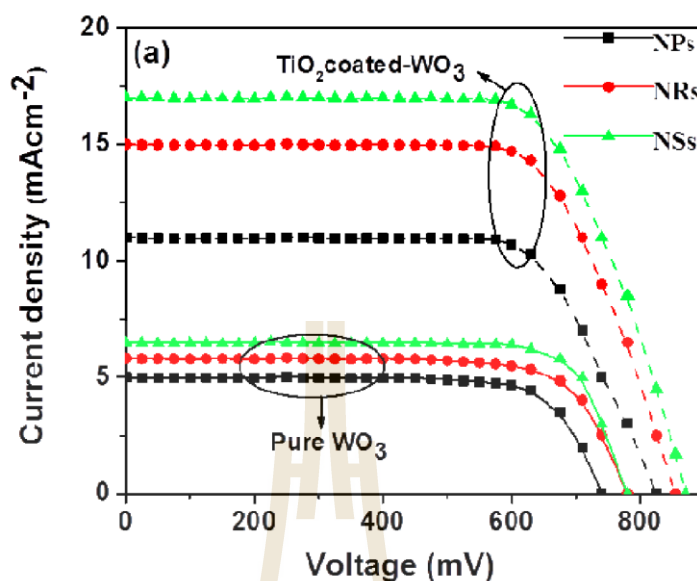


รูปที่ 2.14 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรออกไซด์ (ก) อนุภาคนาโน (ข) แท่งนาโน และ (ค) แผ่นนาโน (Khalid M. และคณะ., 2014)

เมื่อทำการตรวจสอบประสิทธิภาพควอนตัม (EQE) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และตรวจสอบค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.16 จากนั้นทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (PCE) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรออกไซด์แบบโครงสร้างแผ่นนาโน (TiO_2 coated- WO_3 NSs) ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพควอนตัม ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูง นอกจากนี้ยังมีผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงถึง 11.24% ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ปราศจากชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 2.15 ประสิทธิภาพควอนตัมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรออกไซด์และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (Khalid M. และคณะ., 2014)



รูปที่ 2.16 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นเคลือบทั้งสแตนท์ไดรอกไซด์และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (Khalid M. และคณะ., 2014)

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นเคลือบทั้งสแตนท์ไดรอกไซด์และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (Khalid M. และคณะ., 2014)

Sample	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	PCE (%)	average PCE ± standard deviation ^a (%)	J_{sc} from EQE (mA/cm ²)
Pure WO ₃ NPs	5.0	0.740	0.58	2.14	2.14 ± 0.2	4.81
Pure WO ₃ NRs	5.82	0.780	0.72	3.27	3.27 ± 0.3	5.65
Pure WO ₃ NSs	6.48	0.780	0.75	3.80	3.80 ± 0.2	6.41
TiO ₂ coated-WO ₃ NPs	11.0	0.825	0.67	6.08	6.08 ± 0.3	10.8
TiO ₂ coated-WO ₃ NRs	15.0	0.855	0.70	9.10	9.10 ± 0.3	14.7
TiO ₂ coated-WO ₃ NSs	17.0	0.870	0.76	11.24	11.24 ± 0.1	16.9

Chanu P. และ Sukanya K. ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (DSSCs) ด้วยการสังเคราะห์ TiO₂ ด้วยกระบวนการโซลเจล สำหรับใช้เตรียมเป็นชั้น TiO₂ blocking layer โดยวิธีจุ่มเคลือบ และหมุนเหวี่ยง ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สภาวะในการเตรียมชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบและการหมุนเหวี่ยง

สภาวะการเตรียมฟิล์ม TiO ₂ BL บนกระจก FTO ด้วยวิธี		ความเร็วในการ Dip coating (ซ.ม./นาท)	ความเร็วในการ Spin coating (รอบ/นาท)	ความหนาของ ฟิล์ม TiO ₂ BL (nm)
Dip coating	Spin coating			
Dip_V1	-	2.93	-	280
Dip_V5	-	9.23	-	174
Dip_V10	-	12	-	149
-	Spin_1000	-	1000	180
-	Spin_2000	-	2000	85
-	Spin_3000	-	3000	74
-	Spin_4000	-	4000	68

จากสภาวะการเตรียมชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบและการหมุนเหวี่ยง พบว่า ชั้นฟิล์มที่ทำการเตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบจะให้ความหนาของชั้นฟิล์มที่สูงกว่าชั้นฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยง จากสภาวะการเตรียมชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ และการหมุนเหวี่ยงจะนำไปทำการวัดค่าทางไฟฟ้าและคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

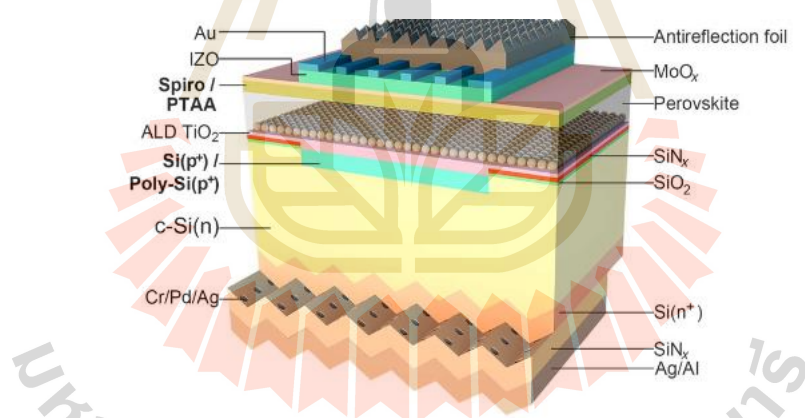
ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ที่มีการเคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบ TiO₂

Cell No.	ความหนาของ ฟิล์ม TiO ₂ BL (nm)	VOC (Volt)	JSC (mA/cm ²)	FF	η %
Standard	-	0.73	8.62	51.86	3.28
Dip_V.1	280	0.75	11.52	43.27	3.75
Dip_V.5	174	0.75	10.33	46.92	3.61
Dip_V.10	149	0.74	10.01	37.15	2.75
Spin_1000	180	0.78	9.49	50.35	3.73
Spin_2000	85	0.78	7.98	54.77	3.41
Spin_3000	74	0.77	8.42	50.12	3.26
Spin_4000	68	0.77	7.39	53.55	3.07

จากตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ที่มีการเคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบ TiO_2 พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีชั้นฟิล์ม TiO_2 ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ จะทำให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มสูงขึ้น และประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีชั้นฟิล์ม TiO_2 ด้วยเทคนิคการเคลือบโดยวิธีการหมุนเหวี่ยง

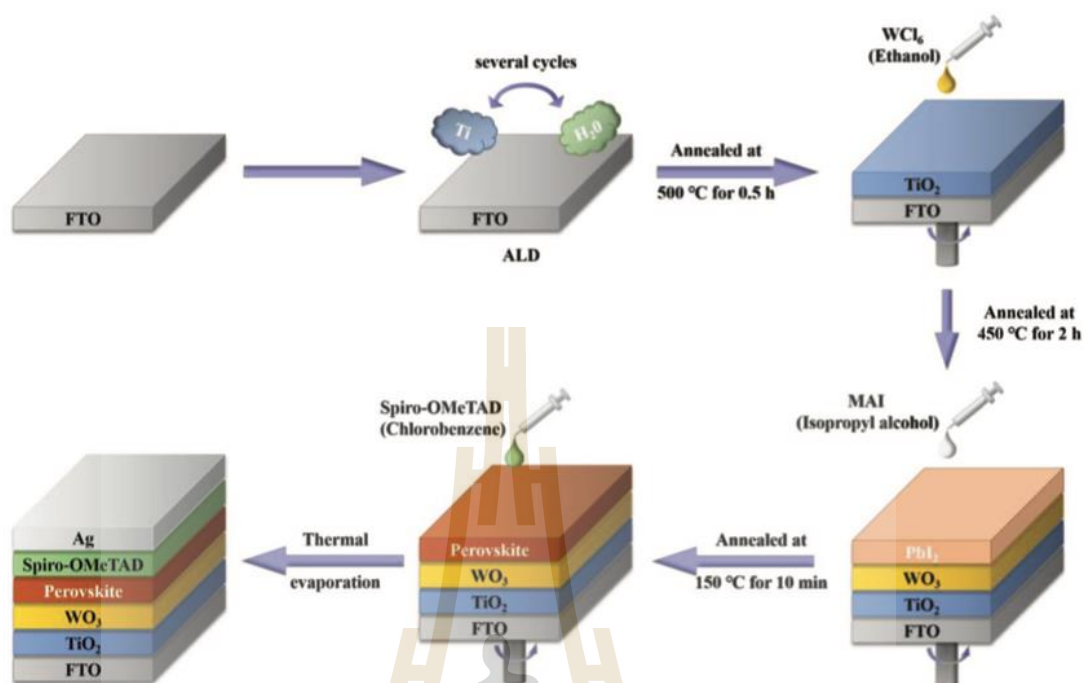
จากการทดลองพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีการเคลือบผิวด้วยชั้นเคลือบ TiO_2 blocking layer โดยวิธี Dip coating ที่ความหนาของชั้นเคลือบ 280 นาโนเมตร จะให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงสูงสุดที่ 3.75% โดยเพิ่มขึ้นประมาณ 14.33% เมื่อเทียบกับเซลล์มาตรฐานที่ให้ประสิทธิภาพเพียง 3.28%

Heping Shen และคณะ (2018) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนโมโนลิติกเพอรอฟสไกต์ (Monolithic perovskite/Si) โดยทำการลดการเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่บริเวณรอยต่อของ p-Si/ TiO_2 โดยชั้นฟิล์มบาง TiO_2 -ALD บน p-Si จะถูกสร้างด้วยเทคนิคการเคลือบชั้นอะตอมด้วยพลังงานพลาสมา (Plasma enhanced atomic layer disposition, PE-ALD) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนโมโนลิติกเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นรอยต่อ p-Si/ TiO_2 โดยที่ชั้นรอยต่อ p-Si/ TiO_2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนโมโนลิติกเพอรอฟสไกต์ได้สูงสุดถึง 22.9%



รูปที่ 2.17 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนโมโนลิติกเพอรอฟสไกต์ที่มีชั้นรอยต่อ p-Si/ TiO_2 (Heping S. และคณะ., 2018)

Yibo You และคณะ (2019) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์บนชั้นเคลือบ TiO_2/WO_3 ที่ได้จากการสร้างชั้นเคลือบด้วยเทคนิคการเคลือบชั้นอะตอม (Atomic layer deposition, ALD) และวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์บนชั้นเคลือบ TiO_2/WO_3 (Yibo Y. และคณะ., 2019)

จากการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์บนชั้นเคลือบ TiO_2/WO_3 พบว่า ชั้นเคลือบ TiO_2 ถูกสร้างขึ้นบนกระจกนำไฟฟ้าซึ่งจะทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์กับกระจกนำไฟฟ้า โดยที่จะสามารถยับยั้งการเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์กับกระจกนำไฟฟ้า นอกจากนี้ชั้นเคลือบ WO_3 ยังเป็นตัวเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ชั้นเคลือบ TiO_2 ในการยับยั้งการเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อทำให้ชั้นเคลือบมีขนาดความหนาของ TiO_2 เท่ากับ 7 นาโนเมตร ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 20.14 % ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีชั้นเคลือบ WO_3 หรือชั้นเคลือบ TiO_2 เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์บนชั้นเคลือบทังสเตนไดรอกไซด์ และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (Yibo Y. และคณะ., 2019)

Devices		$V_{oc}[V]$	$J_{sc}[mA\ cm^{-2}]$	FF[%]	PCE[%]
Pure WO_3	Average	1.03 ± 0.03	22.81 ± 0.83	67.6 ± 2.36	15.92 ± 0.83
	Champion	1.06	22.26	72.07	17.04
TiO_2 (1 nm)/ WO_3	Average	1.04 ± 0.01	23.24 ± 0.39	70.14 ± 2.71	16.94 ± 0.74
	Champion	1.06	22.72	72.13	17.32
TiO_2 (4 nm)/ WO_3	Average	1.04 ± 0.02	23.22 ± 0.38	72.36 ± 2.10	17.49 ± 0.60
	Champion	1.07	23.65	76.50	19.40
TiO_2 (7 nm)/ WO_3	Average	1.06 ± 0.02	23.46 ± 0.45	73.35 ± 2.30	18.19 ± 0.83
	Champion	1.09	23.54	78.55	20.14
TiO_2 (10 nm)/ WO_3	Average	1.06 ± 0.01	23.45 ± 0.33	72.64 ± 2.01	18.03 ± 0.63
	Champion	1.09	23.65	75.62	19.50
TiO_2 (15 nm)/ WO_3	Average	1.06 ± 0.01	23.28 ± 0.63	70.56 ± 1.76	17.46 ± 0.71
	Champion	1.06	23.42	72.41	17.96
Pure TiO_2 (7 nm)	Average	1.09 ± 0.01	21.57 ± 0.85	67.35 ± 2.54	16.12 ± 0.87
	Champion	1.10	21.67	71.42	16.99

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่ามีแนวคิดในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าอยู่เป็นจำนวนมาก ตั้งแต่ยุคที่ 1 ถึง 3 ซึ่งแม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโครงสร้างนาโนและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูง แต่ข้อเสียคือการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบดังกล่าวค่อนข้างยาก และต้นทุนการผลิตสูง ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนจะให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่า แต่ก็ยังเหมาะสมในการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากการผลิตที่ไม่ซับซ้อน และต้นทุนต่ำ จึงยังคงเป็นที่นิยมและมีการใช้งานในปัจจุบัน งานวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาและศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนด้วยวิธีต่าง ๆ ซึ่งพบว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาแสงของวัสดุสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ จากการวิจัยที่ผ่านมา พบว่าสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสงของวัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ทังสเตนไดรอกไซด์ ที่มีการนำมาใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์นั้นยังคงมีการใช้เทคนิคที่มีความซับซ้อนและยุ่งยาก อีกทั้งยังผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ยาก งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสง โดยการนำวัสดุสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์มาใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสง ยับยั้งการเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอน และศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอนที่ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบของเทคนิคในการขึ้นรูปชั้นเคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย มีราคาประหยัด อีกทั้งยังได้ทำการศึกษาลำดับในการสร้างชั้นเคลือบระหว่างชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทังสเตนไดรอกไซด์ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ เพื่อศึกษาความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้สำหรับการทดลอง

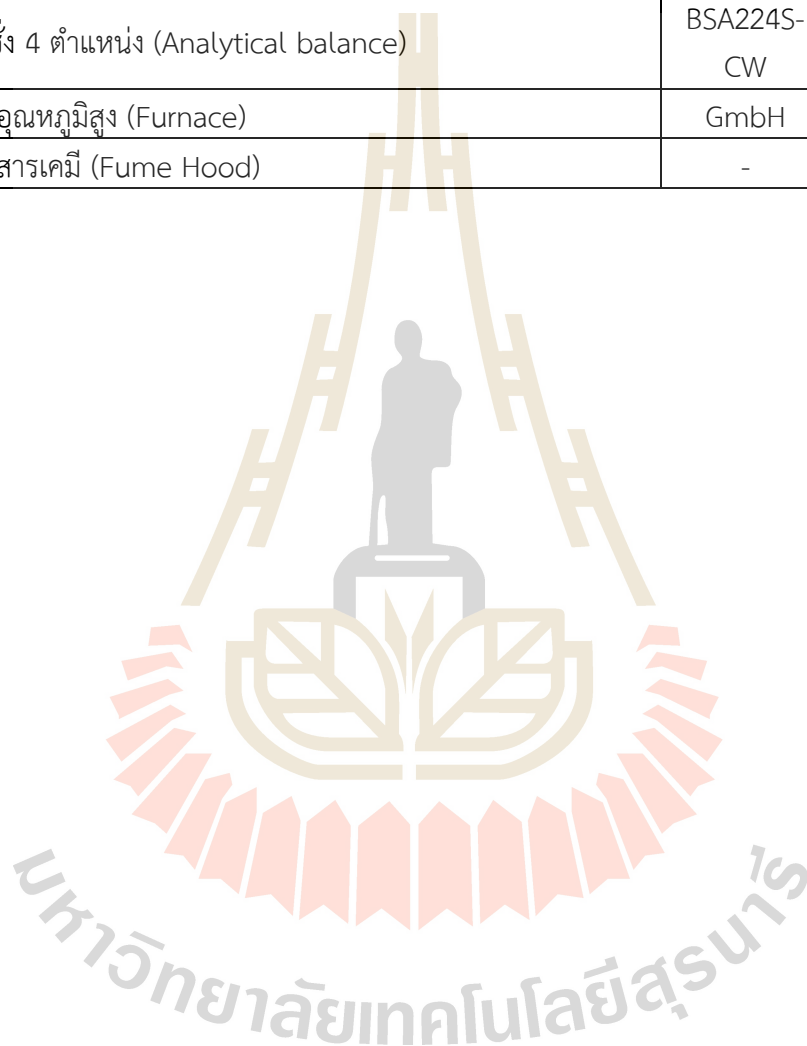
อุปกรณ์และสารเคมี
กระจกนำไฟฟ้า (Fluorine-doped Tin Oxide, FTO)
แผ่นซิลิกอนชนิดหลายผลึก (Si-wafer Polycrystalline)
ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium (IV) isopropoxide (TTIP), ACROS ORGANICE 98%)
โซเดียมทังสเตตไดไฮเดรต (Sodium tungstate dihydrate (Na_2WO_4), LOBA 99%)
เอทานอล (Ethanol absolute ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), Merck 99.7%)
กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid (HCl), Merck 37%)
กรดไนตริก (Nitric acid (HNO_3), Merk 65%)
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide (H_2O_2), QRec Extra pure 35%)
น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลอง

เครื่องมือ	รุ่น	ผู้ผลิต
เครื่องจำลองสภาวะแสงอาทิตย์ (Solar simulator light)	TOP-X450	TOPTION
เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)	D2 phase	Bruker
เครื่องวัดความหนาและความหยาบของพื้นผิวชิ้นงาน (Wyko Surface Profiler)	NT110	VEECO
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	JCM-5000	JEOL
เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer)	LAMDA 950	PerkinElmer
เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Meter)	-	-
เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า (Keithley digital source meter)	Model 2400	KEITHLEY
เครื่องออสซิลโลสโคป (Digital phosphor oscilloscope)	D51054	RIGOL

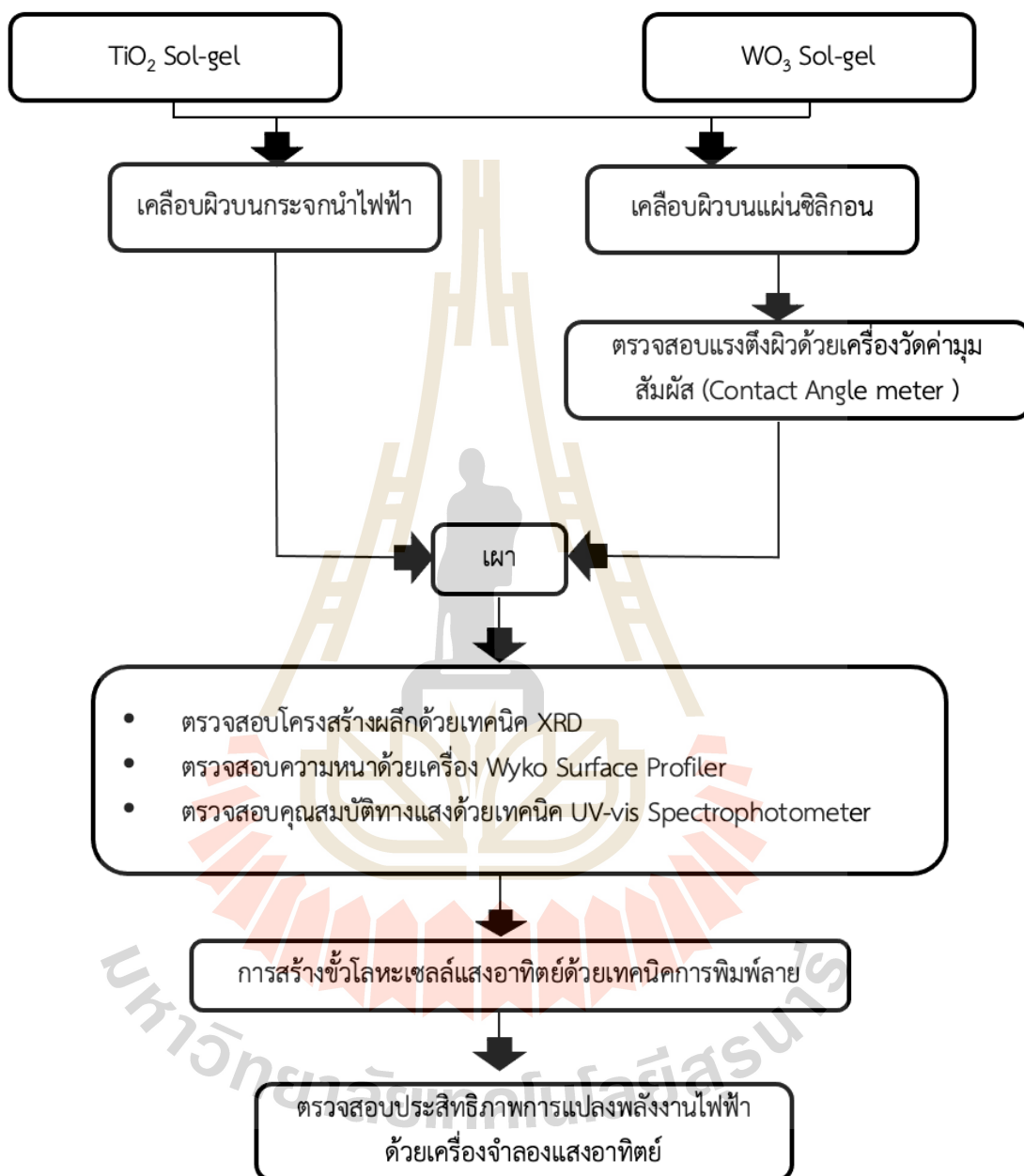
ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลอง (ต่อ)

เครื่องมือ	รุ่น	ผู้ผลิต
เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter, DMM)	GDM360	GwINSTEX
เครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner)	-	-
เครื่องอบความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast Firing)	-	-
เครื่องกวนความเร็วสูง (Stirrer)	C-MAG	IKA
เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical balance)	BSA224S-CW	satorius
เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace)	GmbH	Nabertherm
ตู้ดูดไอสารเคมี (Fume Hood)	-	GENCON



3.2 วิธีการทดลอง

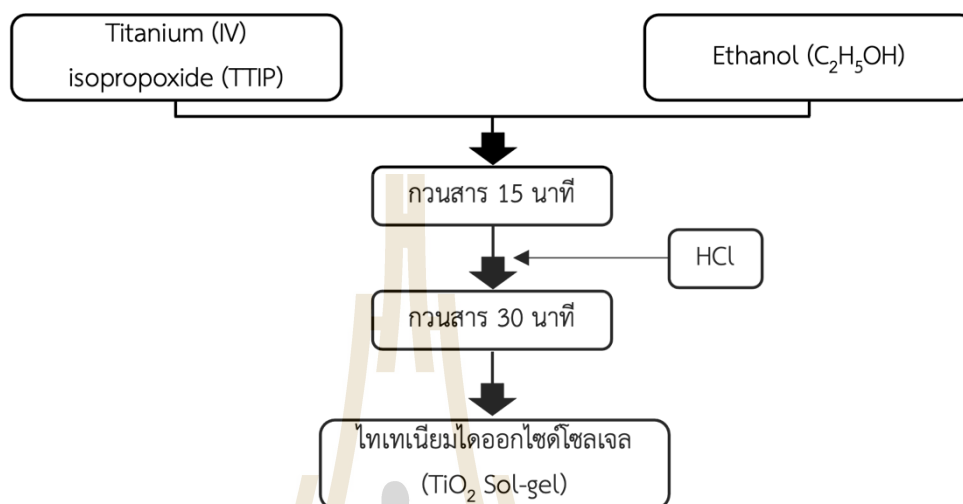
ขั้นตอน และวิธีการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

3.2.1 การสังเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ และทังสเตนไดรอกไซด์

3.2.1.1 การสังเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีโซลเจล

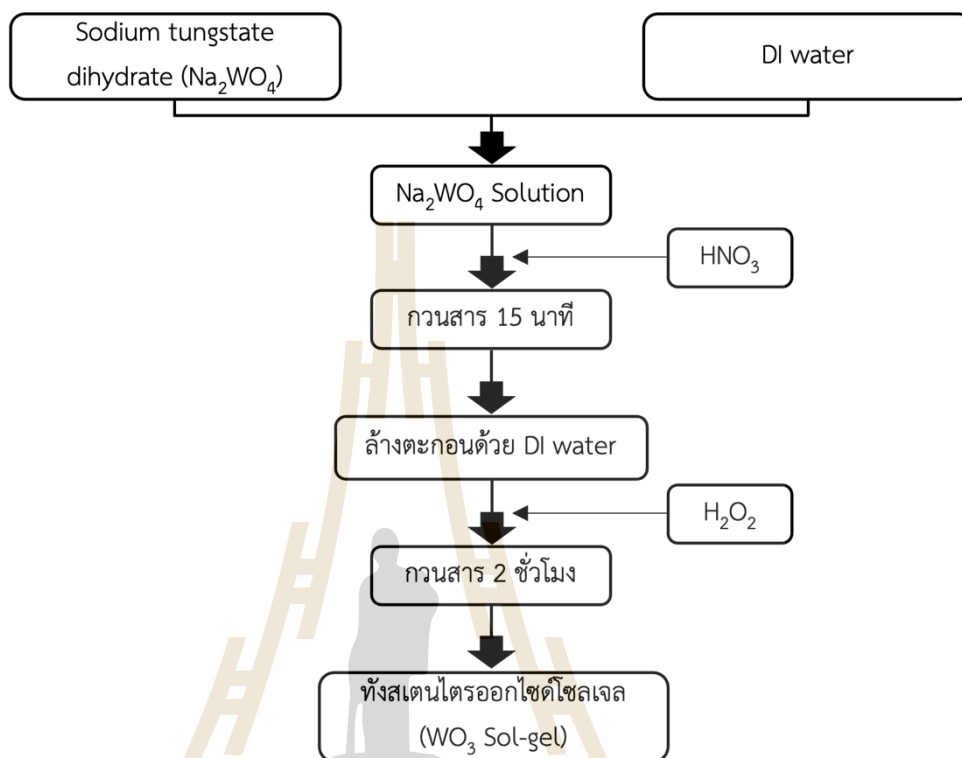


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์เจลด้วยวิธีโซลเจล

การสังเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจลแสดงในรูปที่ 3.2 และมีรายละเอียดดังนี้

1. ตวงสารละลายไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium(IV) isopropoxide, TTIP) ปริมาณ 8.9 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ผสมในเอทานอล ปริมาณ 143 มิลลิลิตร จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนสารเป็นเวลา 15 นาที
3. เติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 2 โมลาร์ (M) จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนสารเป็นเวลา 30 นาที จะได้ไทเทเนียมไดออกไซด์เจล

3.2.1.2 การสังเคราะห์สารประกอบทังสเตนไตรออกไซด์เจล ด้วยวิธีโซลเจล



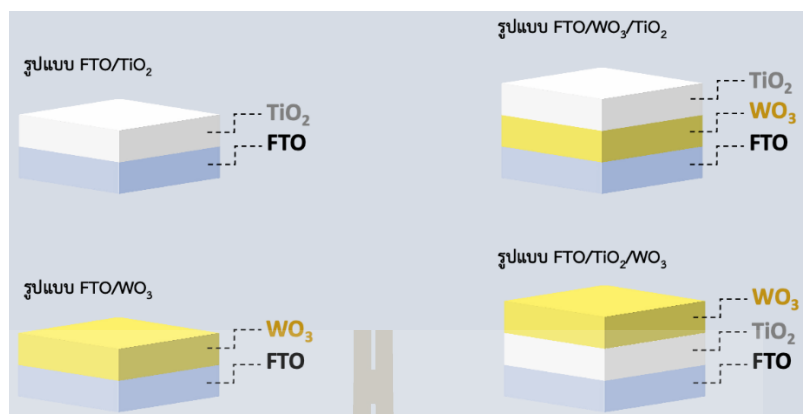
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารประกอบทังสเตนไตรออกไซด์เจลด้วยวิธีโซลเจล

การสังเคราะห์สารประกอบทังสเตนไตรออกไซด์เจลด้วยวิธีโซลเจลแสดงในรูปที่ 3.3 และมีรายละเอียดดังนี้

1. ชั่งสารโซเดียมทังสเตต (Sodium Tungstate, Na_2WO_4) 1.0 กรัม
2. นำสารโซเดียมทังสเตต ละลายในน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร
3. เทสารละลายโซเดียมทังสเตตที่เตรียมไว้ลงในปิกเกอร์ หยดกรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 65 ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ที่ละลายในสารละลาย จากนั้นกวนสารเป็นเวลา 15 นาที
4. นำสารละลายที่ได้มาล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออน 10 ครั้ง เมื่อได้เนื้อสารจากการล้างตะกอนแล้วนำมาเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) ปริมาณ 2 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกวนผสมด้วยเครื่องกวนสารเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ทังสเตนไตรออกไซด์เจล

3.2.2 การเตรียมชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า (FTO)

กระจกนำไฟฟ้าจะถูกเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์โดยมีรูปแบบการเคลือบแสดงในรูปที่ 3.4 และมีขั้นตอนการจุ่มเคลือบดังนี้



รูปที่ 3.4 รูปแบบชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า

3.2.2.1 การเตรียมชิ้นงานกระจกนำไฟฟ้า

การเตรียมชิ้นงานกระจกนำไฟฟ้า มีรายละเอียดดังนี้

1. ตัดกระจกนำไฟฟ้าให้ได้ขนาด 2 เซนติเมตร x 3 เซนติเมตร จากนั้นนำไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน ก่อนทำการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนในเครื่องอัลตราโซนิก โดยใช้อุณหภูมิในการล้างเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
2. นำกระจกที่ได้จากข้อที่ 1 ไปล้างด้วยเอทานอลโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
3. นำกระจกที่ได้จากข้อที่ 2 ผึ่งในอากาศจนแห้งจากนั้นนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น

3.2.2.2 การเตรียมชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า

การเตรียมชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยการนำกระจกนำไฟฟ้าที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.2.1 จุ่มในไทเทเนียมไดออกไซด์เจลที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.1.1 โดยทำการจุ่มเคลือบเป็นเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาระหว่าง 150-300 นาโนเมตร จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ชั้นเคลือบรูปแบบ FTO/TiO₂

3.2.2.3 การเตรียมชั้นเคลือบทังสเตนไตรออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า

การเตรียมชั้นเคลือบทังสเตนไตรออกไซด์ ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยการนำกระจกนำไฟฟ้าที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.2.1 จุ่มในทังสเตนไตรออกไซด์เจลที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.1.2 โดยทำการจุ่มเคลือบเป็นเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาระหว่าง 150-300 นาโนเมตร จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ชั้นเคลือบรูปแบบ FTO/WO₃

3.2.2.4 การเตรียมชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า

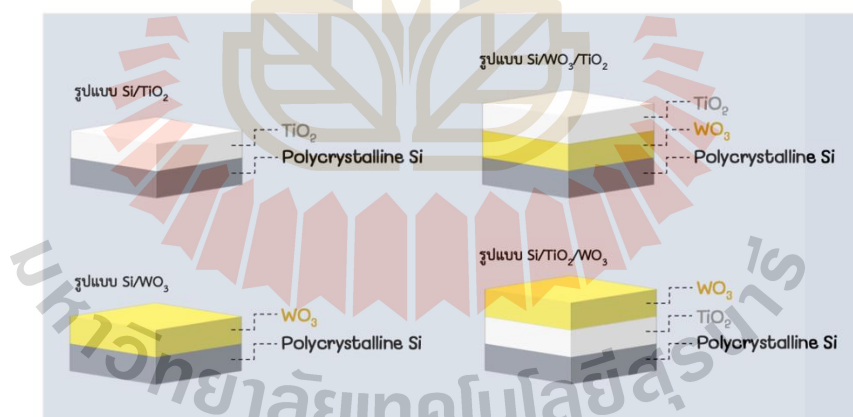
นำกระจกนำไฟฟ้าที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.2.1 จุ่มในไทเทเนียมไดออกไซด์ เจลที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.1.1 โดยทำการจุ่มเคลือบเป็นเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาระหว่าง 150-300 นาโนเมตร นำไปอบให้แห้งจากนั้นนำไปจุ่มในทังสเตนไดรอกไซด์เจลที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.1.2 โดยทำการจุ่มเคลือบเป็นเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาระหว่าง 150 - 300 นาโนเมตร และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ชั้นเคลือบรูปแบบ FTO/TiO₂/WO₃

3.2.2.5 การเตรียมชั้นเคลือบทังสเตนไดรอกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า

นำกระจกนำไฟฟ้าที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.2.1 จุ่มในทังสเตนไดรอกไซด์ เจลที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.1.2 โดยทำการจุ่มเคลือบเป็นเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาระหว่าง 150 - 300 นาโนเมตร นำไปอบให้แห้งจากนั้นนำไปจุ่มในไทเทเนียมไดออกไซด์เจลที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.1.1 โดยทำการจุ่มเคลือบเป็นเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาระหว่าง 150-300 นาโนเมตร และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ชั้นเคลือบรูปแบบ FTO/ WO₃/TiO₂

3.2.3 การเตรียมชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์บนแผ่นซิลิกอน (Si)

แผ่นซิลิกอนจะถูกเคลือบด้วยรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยมีรายละเอียดการเคลือบดังนี้



รูปที่ 3.5 รูปแบบชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์บนแผ่นซิลิกอน

3.2.3.1 การเตรียมแผ่นซิลิกอน

1. ทำการล้างแผ่นซิลิกอนขนาด 3 เซนติเมตร x 3 เซนติเมตร ด้วยเอทานอลในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

2. นำกระจกที่ได้จากข้อที่ 1 ไปฝั่งในอากาศจนแห้งจากนั้นนำไปเก็บไว้ในตู้

ดูดความชื้น

3.2.3.2 การเตรียมชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน

การเตรียมชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยการนำแผ่นซิลิกอนที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.3.1 จุ่มในไทเทเนียมไดออกไซด์เจลที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.1.1 โดยทำการจุ่มเคลือบเป็นเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาระหว่าง 150-300 นาโนเมตร จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ชั้นเคลือบรูปแบบ Si/TiO_2

3.2.3.3 การเตรียมชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรอกไซด์บนแผ่นซิลิกอน

การเตรียมชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรอกไซด์ ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ โดยการนำแผ่นซิลิกอนที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.3.1 จุ่มในทั้งสแตนไดรอกไซด์เจลที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.1.2 โดยทำการจุ่มเคลือบเป็นเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาระหว่าง 150-300 นาโนเมตร จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ชั้นเคลือบรูปแบบ Si/WO_3

3.2.3.4 การเตรียมชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และทั้งสแตนไดรอกไซด์บนแผ่นซิลิกอน

นำแผ่นซิลิกอนที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.3.1 จุ่มในไทเทเนียมไดออกไซด์เจลที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.1.1 โดยทำการจุ่มเคลือบเป็นเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาระหว่าง 150-300 นาโนเมตร นำไปอบให้แห้งจากนั้นนำไปจุ่มในทั้งสแตนไดรอกไซด์เจลที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.1.2 โดยทำการจุ่มเคลือบเป็นเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาระหว่าง 150-300 นาโนเมตร และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ชั้นเคลือบรูปแบบ $\text{Si/TiO}_2/\text{WO}_3$

3.2.3.5 การเตรียมชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรอกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน

นำแผ่นซิลิกอนที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.3.1 จุ่มในทั้งสแตนไดรอกไซด์เจลที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.1.2 โดยทำการจุ่มเคลือบเป็นเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาระหว่าง 150 - 300 นาโนเมตร นำไปอบให้แห้งจากนั้นนำไปจุ่มในไทเทเนียมไดออกไซด์เจลที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.1.1 โดยทำการจุ่มเคลือบเป็นเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความหนาระหว่าง 150-300 นาโนเมตร และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ชั้นเคลือบรูปแบบ $\text{Si/WO}_3/\text{TiO}_2$

3.2.4 การวิเคราะห์เฟสของชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และทั้งสแตนไดรอกไซด์

การวิเคราะห์เฟสของชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ผ่านการเผา มีรายละเอียดดังนี้

1. นำกระจกนำไฟฟ้าที่มีชั้นเคลือบรูปแบบ FTO/TiO_2 และ FTO/WO_3 ไปวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) โดยทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องด้วยรังสี $\text{Cu-K}\alpha$

2. ทำการทดสอบจากมุม 2θ ที่ 10° ถึง 70° ด้วยอัตราการแซ่รังสีในแต่ละลำดับเท่ากับ 0.5 วินาที/step และทำการเก็บข้อมูลทุก $0.02^\circ/\text{step}$

3.2.5 การตรวจสอบแรงตึงผิว (Surface Tension) ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารประกอบทั้งสแตนไดรอกไซด์ ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Meter)

มีรายละเอียดดังนี้

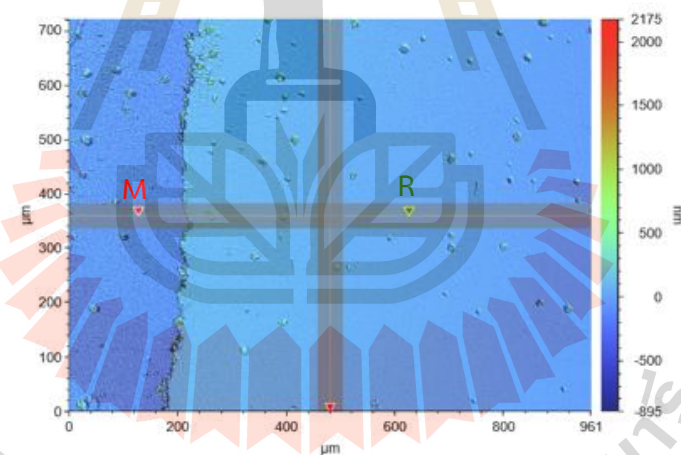
การวัดค่ามุมสัมพัทธ์ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารประกอบทั้งสแตนไดรอกไซด์ มีรายละเอียดดังนี้

1. นำสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์เจลหยดลงบนแผ่นซิลิกอน จากนั้นทำการตรวจสอบแรงดึงผิว ด้วยเครื่องวัดมุมสัมพัทธ์ โดยจะทำการวัดค่า 3 ครั้งแล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์

2. นำสารประกอบทั้งสแตนไดรอกไซด์เจลหยดลงบนแผ่นซิลิกอน จากนั้นทำการตรวจสอบแรงดึงผิว ด้วยเครื่องวัดมุมสัมพัทธ์ โดยจะทำการวัดค่า 3 ครั้งแล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์

3.2.6 การวิเคราะห์ความหนาของชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และทั้งสแตนไดรอกไซด์

นำตัวอย่าง FTO/TiO_2 (ข้อที่ 3.2.2.2) $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{WO}_3$ (ข้อที่ 3.2.2.4) Si/TiO_2 (ข้อที่ 3.2.3.2) และ $\text{Si}/\text{TiO}_2/\text{WO}_3$ (ข้อที่ 3.2.3.4) ไปวัดความหนาของชั้นเคลือบด้วยเครื่องวัดความหนาและความหยาบของพื้นผิวชิ้นงาน โดยใช้หลักการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.6 การวัดจะทำโดยการเปรียบเทียบตำแหน่งของชั้นเคลือบ (ตำแหน่ง M) กับตำแหน่งของแผ่นซิลิกอนอ้างอิง (ตำแหน่ง R) ความหนาของชั้นเคลือบได้จากค่าเฉลี่ยของการวัด 5 ครั้ง



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการวัดความหนาของชั้นเคลือบ (M) และตำแหน่งของแผ่นซิลิกอนอ้างอิง (R)

3.2.7 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และทั้งสแตนไดรอกไซด์

นำตัวอย่าง FTO/TiO_2 (ข้อที่ 3.2.2.2) $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{WO}_3$ (ข้อที่ 3.2.2.4) Si/TiO_2 (ข้อที่ 3.2.3.2) และ $\text{Si}/\text{TiO}_2/\text{WO}_3$ (ข้อที่ 3.2.3.4) ไปวัดค่าการส่องผ่านแสง (Transmittance) ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าการสะท้อนแสง (Reflectance) ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer มีรายละเอียดดังนี้

1. นำตัวอย่าง FTO/TiO₂ (ข้อที่ 3.2.2.2) FTO/TiO₂/WO₃ (ข้อที่ 3.2.2.4) Si/TiO₂ (ข้อที่ 3.2.3.2) และ Si/TiO₂/WO₃ (ข้อที่ 3.2.3.4) วางที่ตำแหน่งช่องรับแสงของเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

2. ตั้งค่าการวัดในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร จากนั้นทำการวัดค่าการส่องผ่านแสง และค่าการสะท้อนแสงของตัวอย่าง โดยแต่ละค่าจะทำการวัด 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยจากการประมวลผลของโปรแกรม UV-Visible-NIR

3. ทำการแปลงค่าการดูดกลืนแสงจากค่าการส่องผ่านแสงและค่าการสะท้อนแสงด้วยโปรแกรม UV-Visible-NIR

3.2.8 การสร้างขั้วโลหะเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย (Screen printing technique)

การสร้างขั้วโลหะเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย โดยอุปกรณ์ในการสร้างขั้วโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ประกอบด้วย (ก) แท่นสำหรับวางชิ้นงานกับไหมสกรีนที่มีลวดลายของขั้วโลหะ (ข) กาวโลหะเงินและกาวอะลูมิเนียม (ค) แผ่นยางปาดสำหรับพิมพ์ลาย (ง) เต้าอบ และ (จ) เครื่องอบความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast firing) ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์มีรายละเอียดดังนี้

1. นำแผ่นซิลิกอน มาพิมพ์ลายที่ด้านหลังด้วยไหมสกรีน ที่มีลวดลายสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยกาวอะลูมิเนียมแล้วอบด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เพื่อให้กาวอะลูมิเนียมแห้ง

2. นำชิ้นงานที่เตรียมได้จากข้อที่ 1. นำมาทำการพิมพ์ลายด้านหน้าด้วยไหมสกรีนที่มีลวดลาย Busbar และ finger ด้วยกาวเงิน จากนั้นอบด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที เพื่อให้กาวเงินแห้ง

3. นำแผ่นซิลิกอนเข้าสู่กระบวนการอบด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วด้วยเครื่อง Fast firing เพื่อให้อะตอมโลหะแพร่เข้าสู่ชั้น n-Si ต้น ๆ ในเครื่อง Fast firing มีส่วนประกอบห้องอบ 4 โซน ซึ่งปรับตั้งค่าดังนี้

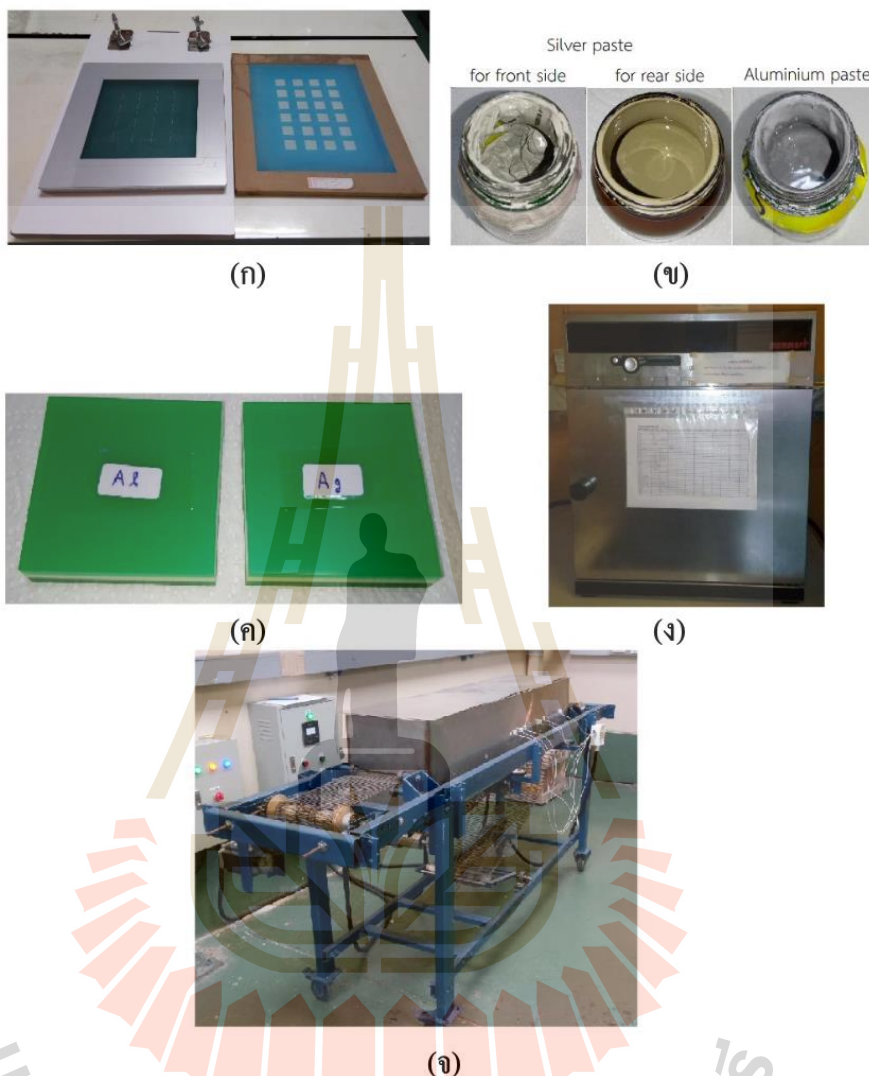
3.1 โซนที่ 1 กำหนดอุณหภูมิที่ 300 องศาเซลเซียส นาน 10 วินาที เพื่อให้กาวโลหะแห้ง และเผาไล่สารประกอบอินทรีย์และตัวทำละลายต่าง ๆ ให้ระเหยออกจากแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์

3.2 โซนที่ 2 กำหนดอุณหภูมิที่ 600 องศาเซลเซียส นาน 10 วินาที เพื่อให้ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าเกิดการหลอมละลายของ Glass frit แทรกเข้าสู่ชั้นเคลือบของเซลล์แสงอาทิตย์ไปจนถึงชั้นของ n-Si และขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะเกิดการหลอมละลายของชั้นอะลูมิเนียมทำให้เกิดการรวมเฟสกับซิลิกอนที่รอยสัมผัสเกิดเป็น Al-Si-phase ขึ้น

3.3 โซนที่ 3 กำหนดอุณหภูมิที่ 915 องศาเซลเซียส นาน 7 วินาที เพื่อให้ขั้วโลหะด้านหน้าเกิดการหลอมละลายของเงิน และแพร่เข้าสู่พื้นผิวของชั้น n-Si ต้น ๆ เกิดการรวมเฟสของที่รอยสัมผัสเป็น Ag-Si-phase และขั้วไฟฟ้าด้านหลังที่เกิด Al-Si จะแพร่ลึกเข้าไปในชั้นแผ่นซิลิกอน p-Si เรียกว่า Back Surface Field (BSF)

3.4 โซนที่ 4 เป็นบริเวณอุณหภูมิห้องปกติ ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากโซนที่ 3 จึงมีอุณหภูมิสูงประมาณ 250 องศาเซลเซียส เป็นโซนสุดท้าย

4. นำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการอบด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว พักให้อุณหภูมิลดลงจนเย็น จากนั้นนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์สำหรับสร้างขั้วโลหะให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) แท่นสำหรับวางชิ้นงานกับไหมสกปรนที่มีลวดลายของขั้วโลหะ (ข) กาวโลหะเงินและกาวอะลูมิเนียม (ค) แผ่นยางปาดสำหรับพิมพ์ลาย (ง) เตาอบ และ (จ) เครื่องอบความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว

3.2.9 การวัดประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอนที่จุ่มเคลือบด้วยชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์

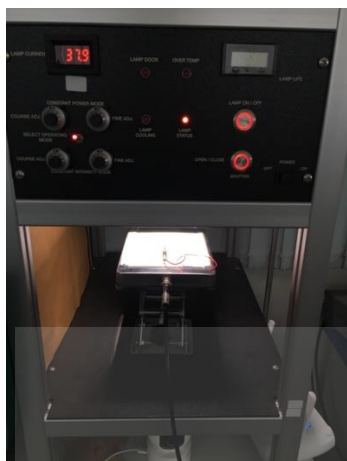
การวัดประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอนที่มีการจุ่มเคลือบด้วยชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์ โดยนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการสร้างขั้วโลหะ จากข้อที่ 3.2.8 นำไปวัดประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอนด้วยเครื่องเครื่องวัด

สัญญาณไฟฟ้า (Keithley digital source meter) ภายใต้เครื่องจำลองสภาวะแสงอาทิตย์ (Solar Simulator Light) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

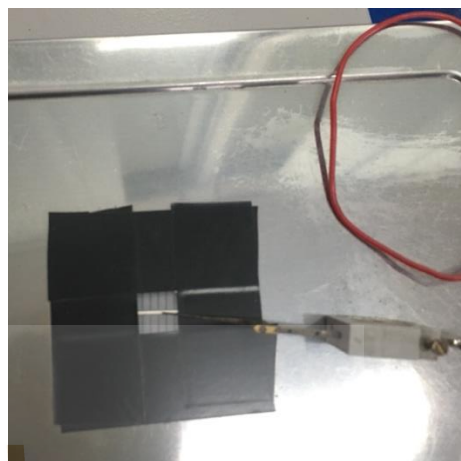
1. ทำการติดตั้งระบบของเครื่องจำลองสภาวะแสงอาทิตย์ โดยจะทำการปรับค่าความสว่างของแสงให้มีค่าเท่ากับ 126000 lux
2. นำชิ้นงานเซลล์แสงอาทิตย์วางในตำแหน่งแสงของเครื่องจำลองสภาวะแสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก) โดยเปิดพื้นที่ในการรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ข) และทำการต่อสายไฟของเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งด้านขั้วบวกและขั้วลบ
3. จากนั้นจะใช้โปรแกรม LabVIEW program ในการประมวลผลข้อมูลจากเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
4. นำผลการวัดค่าที่ได้จากข้อที่ 3. นำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จากสมการที่ 2.11



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์สำหรับการวัดค่าประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วย เครื่องจำลองสภาวะแสงอาทิตย์ และเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.9 การฉายแสงด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) ตำแหน่งการวางชิ้นงานเซลล์แสงอาทิตย์ที่ช่องแสงเครื่องจำลองสภาวะแสงอาทิตย์ (ข) พื้นที่ในการเปิดรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตร



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 การสังเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ และทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยกระบวนการโซลเจล

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงลักษณะเจลของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และสารประกอบทังสเตนไตรออกไซด์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซลเจล ตามลำดับ จากภาพพบว่าเจลไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะสีขาวขุ่นในขณะที่เจลทังสเตนไตรออกไซด์มีสีเหลือง เจลทั้งสองจะถูกนำไปทำการจุ่มเคลือบเพื่อสร้างชั้นเคลือบของไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทังสเตนไตรออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน เพื่อศึกษาความเป็นได้ในการเพิ่มความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป



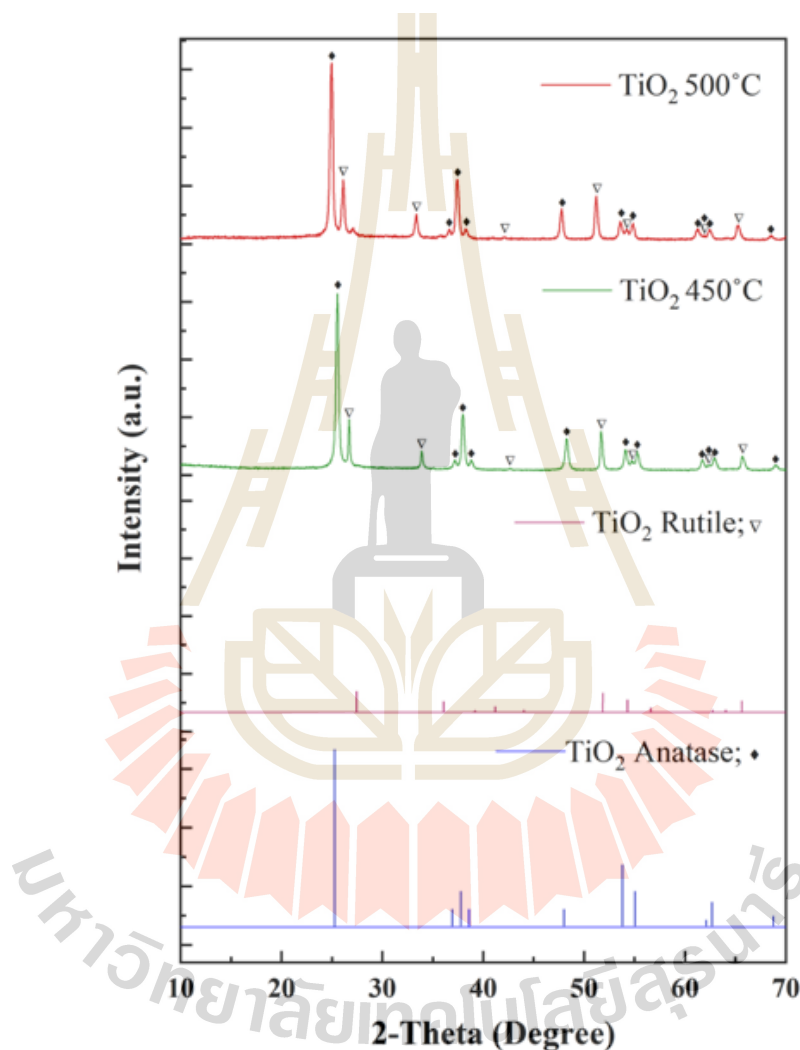
รูปที่ 4.1 ลักษณะเจลของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซลเจล



รูปที่ 4.2 ลักษณะเจลของสารประกอบทังสเตนไตรออกไซด์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซลเจล

4.2 ผลการวิเคราะห์เฟสของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ และทังสเตนไดรอกไซด์ที่เตรียมได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซลเจล ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

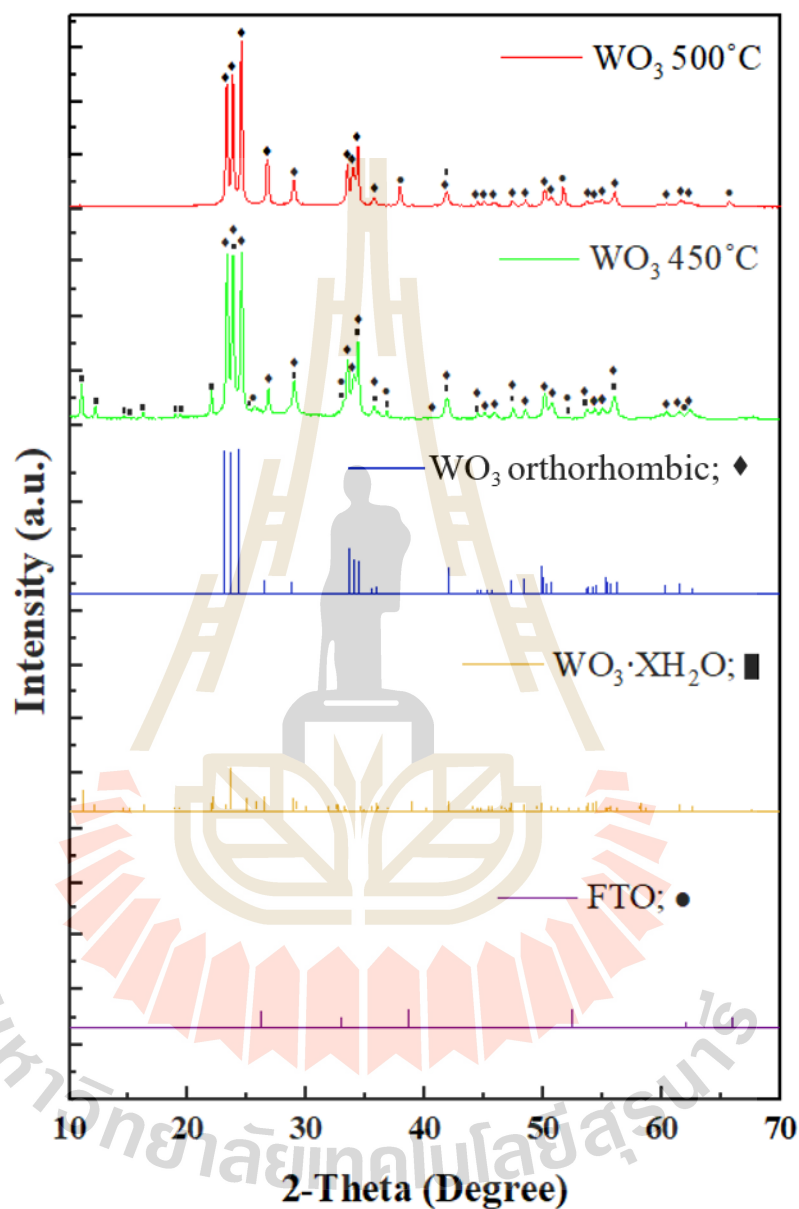
4.2.1 การวิเคราะห์เฟสของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซลเจล



รูปที่ 4.3 XRD pattern ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซลเจล หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบเฟสผสมระหว่างอนาเทส (anatase, JCPDS no. 21-1272) และรูไทล์ (rutile phase, JCPDS no. 21-1276) บนชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.3

4.2.2 การวิเคราะห์เฟสของสารประกอบทั้งสแตโนไดรออกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซลเจล



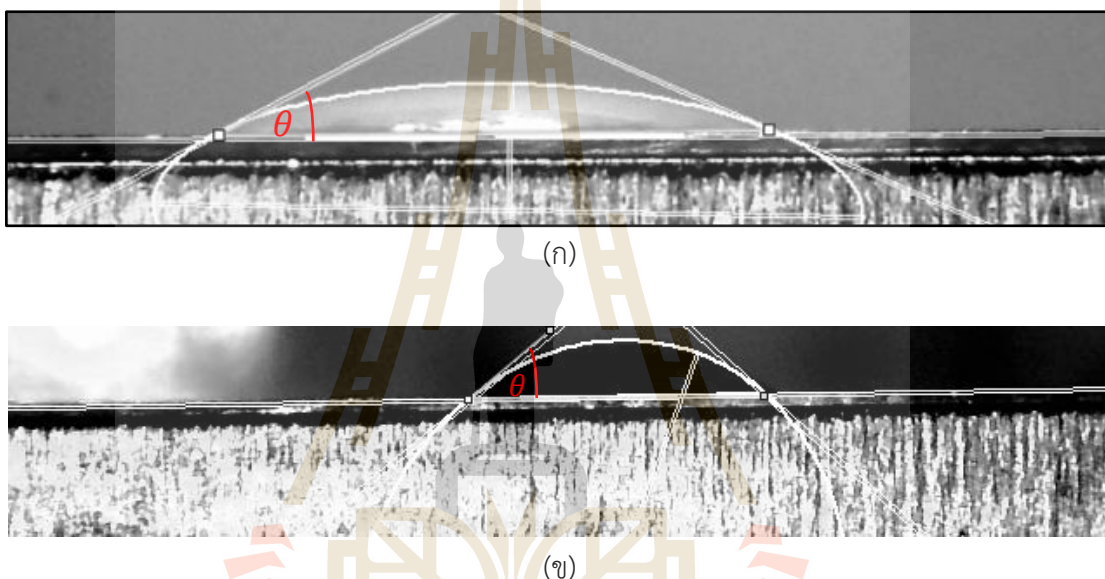
รูปที่ 4.4 XRD pattern ของสารประกอบทั้งสแตโนไดรออกไซด์ด้วยกระบวนการโซลเจล ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิการเผาที่ 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบเฟสของสารประกอบทั้งสแตโนไดรออกไซด์ไฮเดรต ($\text{WO}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$, JCPDS no. 35-1001) และเฟสของทั้งสแตโนไดรออกไซด์ (WO_3 , JCPDS no. 83-0948) เมื่อเผาชั้นเคลือบที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.4

ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตรวจพบเฉพาะเฟสของทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิกเพียงเฟสเดียว

4.3 การสร้างชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรออกไซด์

4.3.1 การตรวจสอบแรงตึงผิว (Surface Tension) ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารประกอบทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Meter)



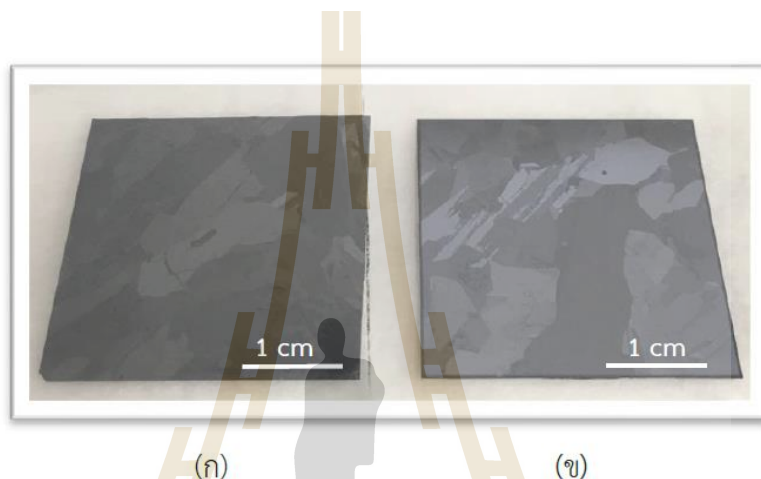
รูปที่ 4.5 มุมสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิกอนกับ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์เจล และ (ข) ทั้งสแตนไดรออกไซด์เจล

รูปที่ 4.5 (ก) และ 4.5 (ข) แสดงมุมระหว่างแผ่นซิลิกอนกับไทเทเนียมไดออกไซด์เจล และทั้งสแตนไดรออกไซด์เจล ตามลำดับ มุมที่มีค่ามากแสดงถึงของเหลวที่มีแรงตึงผิวสูง และยึดเกาะกับวัสดุได้ยาก ในทางตรงกันข้ามมุมที่มีค่าน้อยแสดงถึงของเหลวที่มีแรงตึงผิวต่ำ และมีความสามารถยึดติดกับวัสดุได้ดี (Boonsong S. และ Wichai P., 2000)

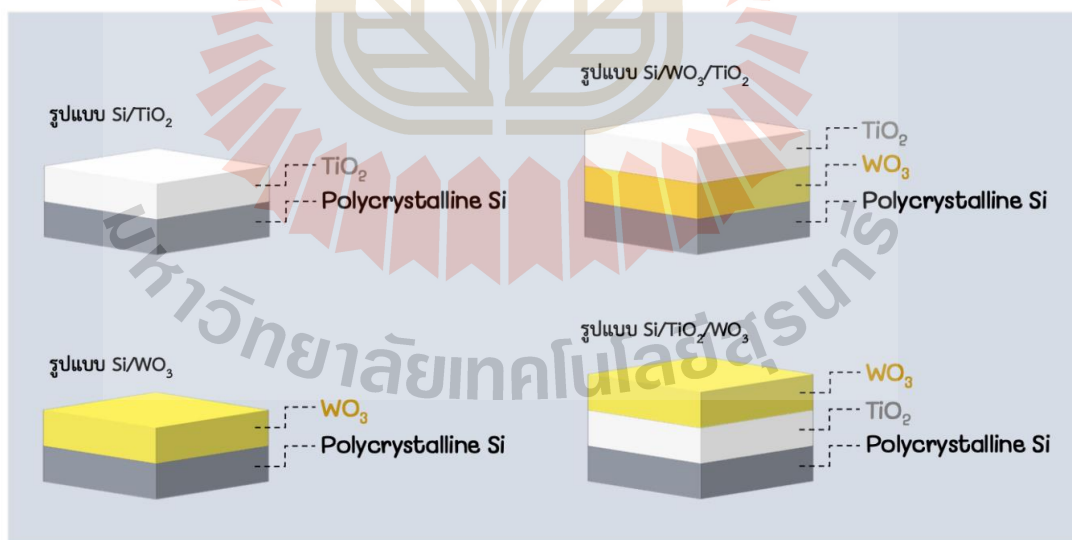
จากผลการทดลองพบว่ามุมระหว่างทั้งสแตนไดรออกไซด์เจลกับแผ่นซิลิกอนมีค่าเท่ากับ 39.72 ± 2.04 องศา ซึ่งมีค่ามากกว่ามุมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์เจลกับแผ่นซิลิกอนที่มีค่าเท่ากับ 26.64 ± 1.48 องศา ผลดังกล่าวเป็นหลักฐานที่แสดงให้เห็นว่าทั้งสแตนไดรออกไซด์เจลมีความสามารถในการยึดเกาะบนแผ่นซิลิกอนได้น้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เจล

4.3.2 การสร้างชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทังสเตนไตรออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ

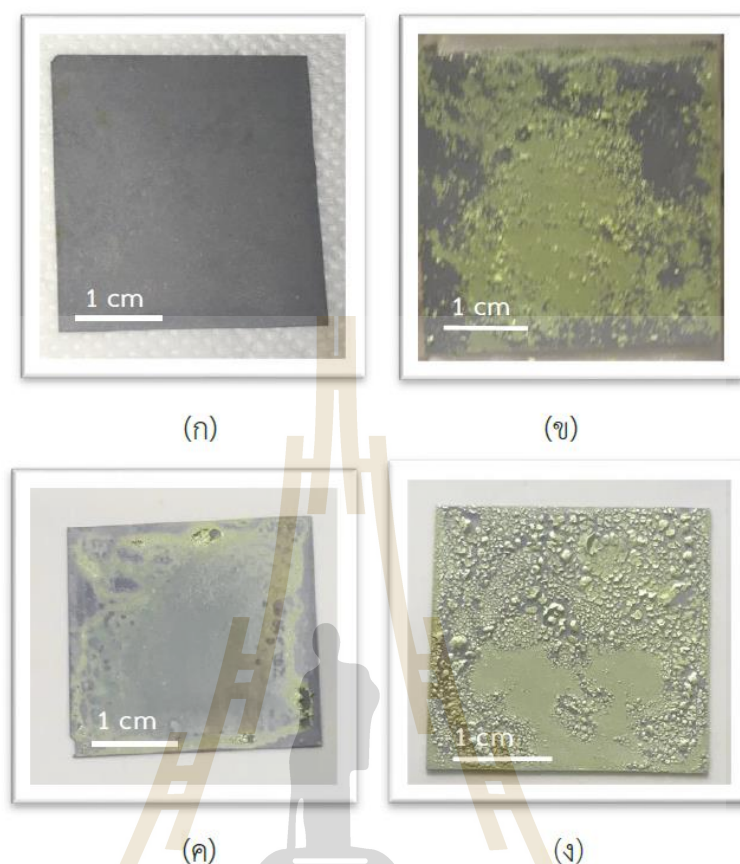
รูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) แสดงแผ่นซิลิกอนชนิดหลายผลึกด้านเอ็น (n-Si) และด้านพี (p-Si) ตามลำดับ ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทังสเตนไตรออกไซด์จะถูกสร้างโดยการจุ่มแผ่นซิลิกอนด้านเอ็นลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์เจลและทังสเตนไตรออกไซด์เจลตามเวลาที่กำหนด ดังแสดงรูปแบบการสร้างชั้นเคลือบในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 แผ่นซิลิกอนก่อนการจุ่มเคลือบ (ก) ด้านเอ็นและ (ข) ด้านพี



รูปที่ 4.7 รูปแบบชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน



รูปที่ 4.8 ลักษณะของชั้นเคลือบบนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) ชั้นเคลือบรูปแบบ Si/TiO_2 (ข) ชั้นเคลือบรูปแบบ Si/WO_3 (ค) ชั้นเคลือบรูปแบบ $\text{Si/TiO}_2/\text{WO}_3$ และ (ง) ชั้นเคลือบรูปแบบ $\text{Si/WO}_3/\text{TiO}_2$

รูปที่ 4.8 แสดงผลการสร้างชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์บนแผ่นซิลิกอน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า การเคลือบรูปแบบ Si/TiO_2 มีความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบมากกว่าการเคลือบรูปแบบ Si/WO_3 เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เจลมีแรงดึงดูดต่ำกว่าทังสเตนไดรอกไซด์เจล (ดังอธิบายในหัวข้อ 4.3.1) ส่งผลให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เจลยึดเกาะกับแผ่นซิลิกอนได้ดีและมีความสม่ำเสมอมากกว่าทังสเตนไดรอกไซด์เจล รูปที่ 4.8 (ค) แสดงให้เห็นว่าด้วยการเคลือบผิวรูปแบบ $\text{Si/TiO}_2/\text{WO}_3$ ชั้นของทังสเตนไดรอกไซด์เจลสามารถยึดเกาะกับแผ่นซิลิกอนได้ดีและมีความสม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบรูปแบบชั้นเคลือบ Si/TiO_2 และ $\text{Si/TiO}_2/\text{WO}_3$ จึงถูกเลือกใช้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอน

4.3.3 ผลการวัดความหนาของชั้นเคลือบบนแผ่นซิลิกอนหลังการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ความหนาของชั้นเคลือบเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นเคลือบแปรผันตามจำนวนครั้งและเวลาในการจุ่มเคลือบดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าความหนาของชั้นเคลือบบนแผ่นซิลิกอน

รูปแบบชั้นเคลือบ	จำนวนครั้งในการจุ่มเคลือบ		เวลาในการจุ่มเคลือบ/ครั้ง (วินาที)		ความหนาชั้นเคลือบ (nm)	
	TiO ₂ เจล	WO ₃ เจล	TiO ₂ เจล	WO ₃ เจล	TiO ₂	WO ₃
Si/TiO ₂	1	-	10	-	150±1.61	-
	2	-	10	-	300±5.96	-
	3	-	10	-	450±8.12	-
Si/TiO ₂ /WO ₃	1	1	10	15	150	150±7.21
	2	1	10	15	300	150±4.99
	2	2	10	15	300	300±4.97
	3	1	10	15	450	150±5.39
	3	3	10	15	450	450±13.73

จากการวัดค่าความหนาของชั้นเคลือบทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับเวลาและจำนวนครั้งในการจุ่ม ดังต่อไปนี้

1. ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนาเท่ากับ 150 นาโนเมตร (Si/TiO₂(150 nm)) เมื่อทำการจุ่ม 1 ครั้งเป็นเวลา 10 วินาที
2. ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนาเท่ากับ 300 นาโนเมตร (Si/TiO₂(300 nm)) เมื่อทำการจุ่ม 2 ครั้งครั้งละ 10 วินาที
3. ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนาเท่ากับ 450 นาโนเมตร (Si/TiO₂(450 nm)) เมื่อทำการจุ่ม 3 ครั้งครั้งละ 10 วินาที
4. ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนา 150 นาโนเมตรและทังสแตนไตรออกไซด์มีความหนา 150 นาโนเมตร (Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm)) เมื่อทำการจุ่มไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 ครั้งเป็นเวลา 10 วินาที และทำการจุ่มทังสแตนไตรออกไซด์ 1 ครั้งเป็นเวลา 15 วินาที
5. ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนา 300 นาโนเมตรและทังสแตนไตรออกไซด์มีความหนา 150 นาโนเมตร (Si/TiO₂(300 nm)/WO₃(150 nm)) เมื่อทำการจุ่มไทเทเนียม

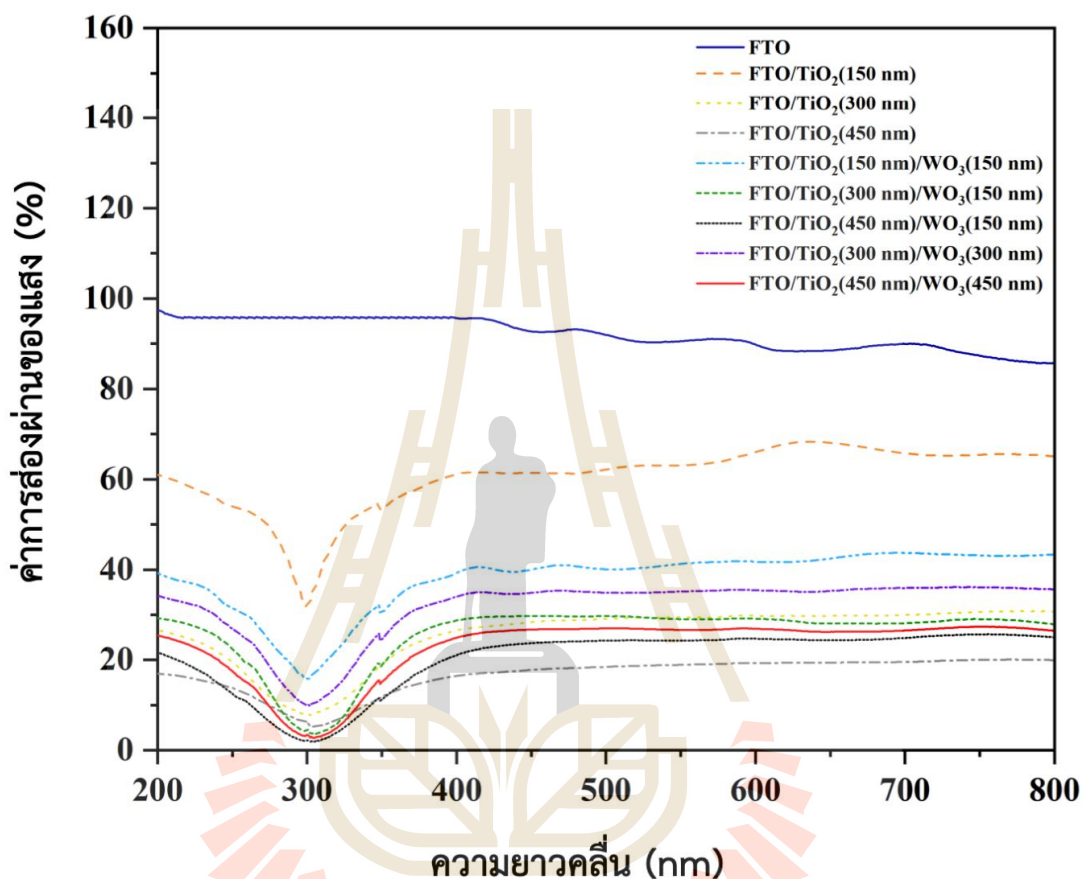
ไดออกไซด์ 2 ครั้งครั้งละ 10 วินาที และทำการจุ่มทั้งสแตนไดรออกไซด์ 1 ครั้งเป็นเวลา 15 วินาที

6. ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนา 450 นาโนเมตรและทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีความหนา 150 นาโนเมตร ($\text{Si/TiO}_2(450 \text{ nm})/\text{WO}_3(150 \text{ nm})$) เมื่อทำการจุ่มไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 ครั้งครั้งละ 10 วินาที และทำการจุ่มทั้งสแตนไดรออกไซด์ 1 ครั้งเป็นเวลา 15 วินาที
7. ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนา 300 นาโนเมตรและทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีความหนา 300 นาโนเมตร ($\text{Si/TiO}_2(300 \text{ nm})/\text{WO}_3(300 \text{ nm})$) เมื่อทำการจุ่มไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ครั้งครั้งละ 10 วินาที และทำการจุ่มทั้งสแตนไดรออกไซด์ 2 ครั้งครั้งละ 15 วินาที
8. ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนา 450 นาโนเมตรและทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีความหนา 450 นาโนเมตร ($\text{Si/TiO}_2(450 \text{ nm})/\text{WO}_3(450 \text{ nm})$) เมื่อทำการจุ่มไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 ครั้งครั้งละ 10 วินาที และทำการจุ่มทั้งสแตนไดรออกไซด์ 3 ครั้งครั้งละ 15 วินาที

4.4 ผลการวัดคุณสมบัติทางแสงของชั้นเคลือบหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

แสงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกประกอบด้วยคลื่นแสงหลายช่วงคลื่นตั้งแต่ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 400 นาโนเมตร เรียกว่าแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light) ความยาวคลื่นในช่วง 400 ถึง 800 นาโนเมตร เรียกว่าแสงที่มองเห็น (Visible light) และความยาวคลื่นที่ยาวกว่า 800 นาโนเมตร เรียกว่าแสงอินฟราเรด (Infrared light) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนสามารถแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าได้ดีในช่วงแสงที่มองเห็น แต่แปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นแสงอินฟราเรดได้ต่ำ (Stuart R.W., 2007) ดังนั้นหากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าในช่วงคลื่นแสงอินฟราเรดได้โดยไม่ทำให้ความสามารถในการแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าในช่วงแสงที่มองเห็นลดลง ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์แสงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวความยาวคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและแสงที่มองเห็นจึงถูกเลือกมาเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

4.4.1 ผลการวัดค่าการส่องผ่านของแสง (Transmittance) ของชั้นเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า

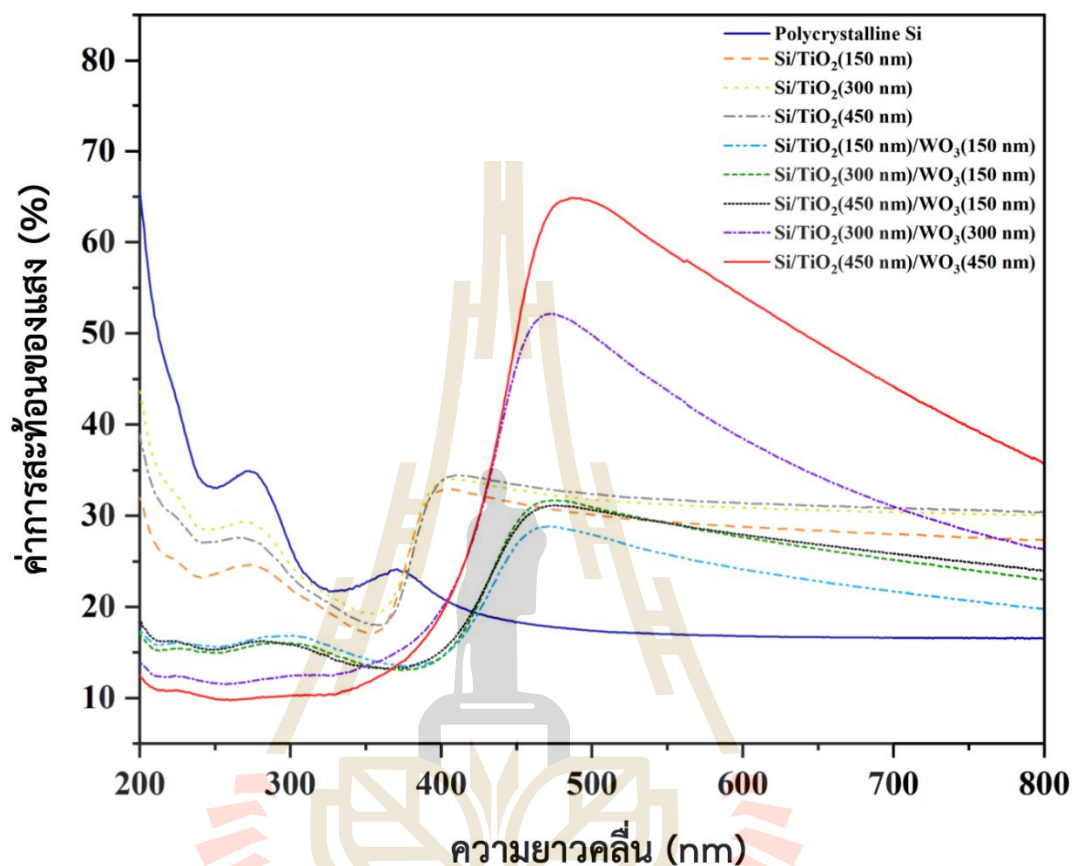


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านของแสงกับความยาวคลื่น (Wavelength, nm)

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าค่าการส่องผ่านแสงของชั้นเคลือบมีค่าลดลงเมื่อชั้นเคลือบมีความหนาและมีจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น การส่องผ่านแสงของชั้นเคลือบส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อแสงสามารถส่องผ่านชั้นเคลือบไปยังรอยต่อชั้นเอ็นและพีของแผ่นซิลิกอนได้สูง (Jong-Hwa S., 2008)

เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียพลังงานโฟตอนอันเนื่องจากการถูกดูดกลืนแสงของชั้นเคลือบและเพื่อให้ได้ค่าการส่องผ่านแสงที่สูงชั้นเคลือบจึงต้องมีความหนาน้อย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบรูปแบบ FTO/TiO₂(150 nm) และ FTO/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm) มีค่าการส่องผ่านของแสงสูงที่สุดจึงถูกเลือกใช้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอน

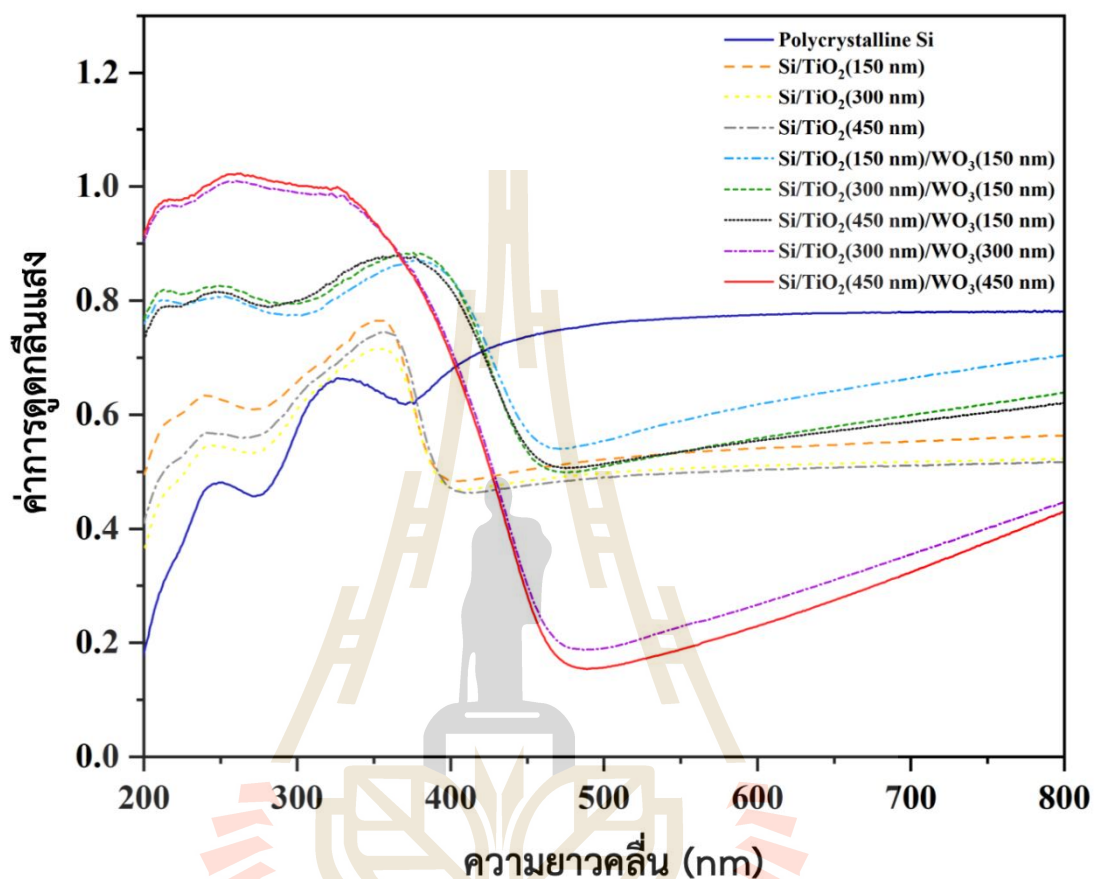
4.4.2 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าการสะท้อนแสง (Reflectance) ของชั้นเคลือบบนแผ่นซิลิกอน



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนของแสงกับความยาวคลื่น (Wavelength, nm)

รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า แผ่นซิลิกอนแบบหลายผลึกมีค่าการสะท้อนแสงสูงในช่วงคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตแต่มีค่าการสะท้อนแสงต่ำในช่วงคลื่นแสงที่มองเห็น แต่เมื่อมีการเคลือบแผ่นซิลิกอนด้วยสารเคลือบพบว่าพฤติกรรมการสะท้อนแสงกลับตรงกันข้ามกับแผ่นซิลิกอนที่ปราศจากการเคลือบ โดยเมื่อชั้นเคลือบมีความหนาเพิ่มขึ้นการสะท้อนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตมีแนวโน้มลดลง ค่าการสะท้อนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตเมื่อเรียงลำดับจากต่ำสุดไปสูงสุดสามารถเรียงลำดับได้ดังต่อไปนี้ $\text{Si/TiO}_2(450 \text{ nm})/\text{WO}_3(450 \text{ nm}) < \text{Si/TiO}_2(300 \text{ nm})/\text{WO}_3(300 \text{ nm}) < \text{Si/TiO}_2(300 \text{ nm})/\text{WO}_3(150 \text{ nm}) < \text{Si/TiO}_2(450 \text{ nm})/\text{WO}_3(150 \text{ nm}) < \text{Si/TiO}_2(150 \text{ nm})/\text{WO}_3(150 \text{ nm}) < \text{Si/TiO}_2(150 \text{ nm}) < \text{Si/TiO}_2(450 \text{ nm}) < \text{Si/TiO}_2(300 \text{ nm}) < \text{Si}$ ในขณะที่การสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นเคลือบมีความหนาเพิ่มขึ้น ค่าการสะท้อนแสงในช่วงคลื่นแสงที่มองเห็นเรียงลำดับจากต่ำสุดไปสูงสุดเมื่อเคลือบแผ่นซิลิกอนในรูปแบบดังต่อไปนี้ $\text{Si} < \text{Si/TiO}_2(150 \text{ nm})/\text{WO}_3(150 \text{ nm}) < \text{Si/TiO}_2(300 \text{ nm})/\text{WO}_3(150 \text{ nm}) <$

Si/TiO₂(450 nm)/WO₃(150 nm) < Si/TiO₂(150 nm) < Si/TiO₂(300 nm) < Si/TiO₂(450 nm)
 < Si/TiO₂(300 nm)/WO₃(300 nm) < Si/TiO₂(450 nm)/WO₃(450 nm)



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่น (Wavelength, nm)

จากรูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่น แสดงให้เห็นถึงค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผกผันกับค่าการสะท้อนของแสง ดังแสดงในสมการที่ 4.1 (Green M.A., 1992)

$$\text{Absorbance} = \log(1/\text{Reflectance}) \quad (4.1)$$

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แผ่นซิลิกอนที่ถูกเคลือบผิวมีค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยที่ค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาของชั้นเคลือบที่มากขึ้น ซึ่งการเคลือบที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุดคือการเคลือบในรูปแบบ Si/TiO₂(450 nm)/WO₃(450 nm) ในทางกลับกันค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นซิลิกอนที่มีการเคลือบด้วยชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์กลับมีค่าการดูดกลืนแสงลดลงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นตามความหนาของชั้นเคลือบที่มากขึ้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์

และทังสเดนไทรออกไซด์เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างอยู่ในช่วง 2.96-3.25 eV และมีความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเลต (Lakshmi K. และคณะ., 2017) เมื่อทำการเคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนจึงทำให้มีการตอบสนองต่อแสงที่ ดีส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นทำให้การสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นดังกล่าวลดลง

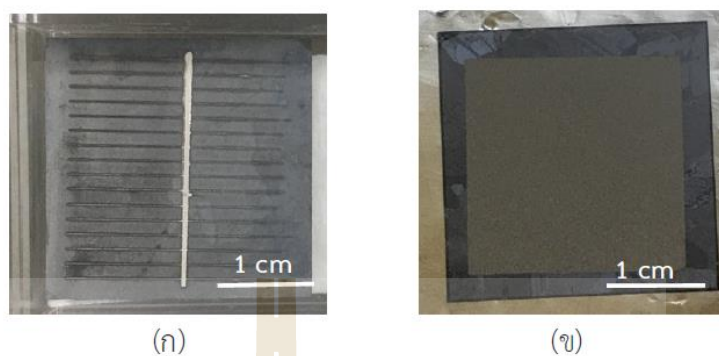
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแผ่นซิลิกอนมีค่าการสะท้อนแสงที่สูง(ดูดกลืนแสงต่ำ) ในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเลต แต่เมื่อถูกเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเดนไทรออกไซด์ค่าการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตกลับมีค่าลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อเคลือบแผ่นซิลิกอนด้วยรูปแบบ $\text{Si/TiO}_2(150 \text{ nm})/\text{WO}_3(150 \text{ nm})$

4.5 ผลการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเดนไทรออกไซด์

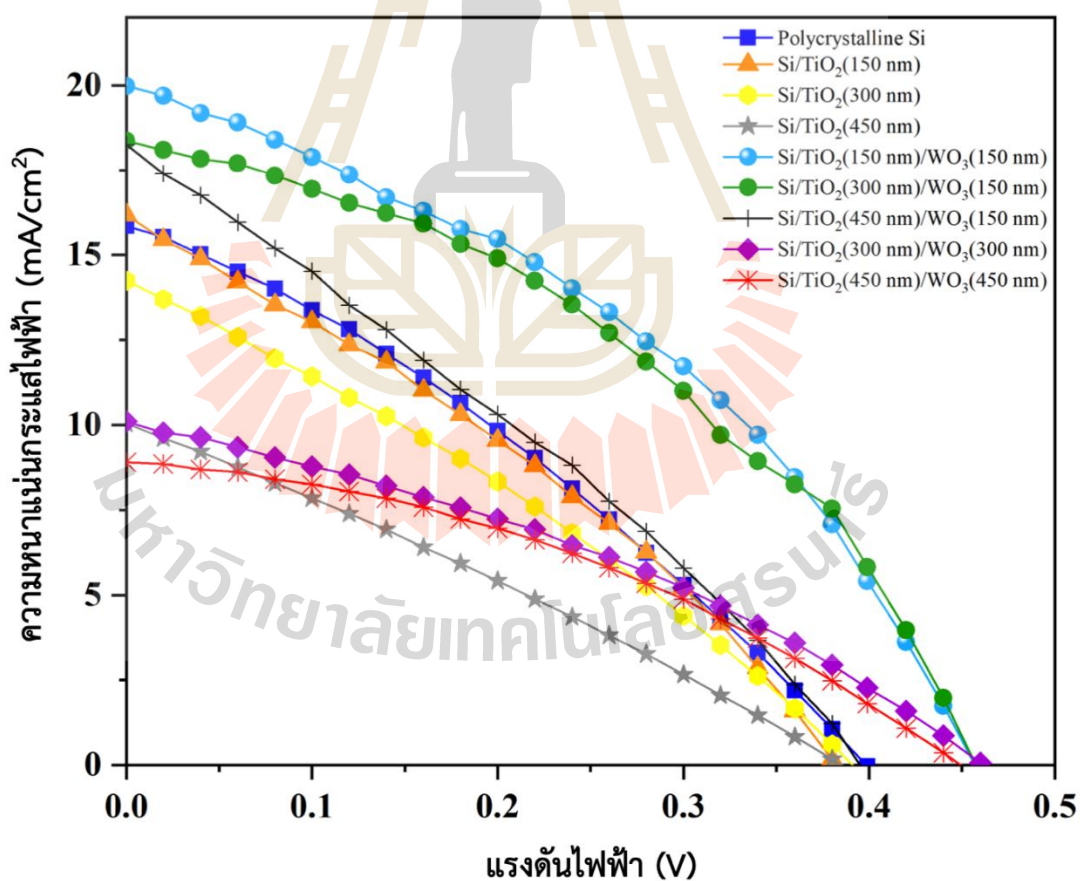
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 ดังอธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 โดย $\text{Efficiency} = (V_{oc} \times J_{sc} \times FF) / P_{in}$ เมื่อ V_{oc} , J_{sc} , FF และ P_{in} คือค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ และค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้า ตามลำดับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร คือค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงที่สุดขณะที่ไม่มีการต่อโหลดหรือไม่มีการต่อกับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า แสดงถึงขีดจำกัดในการเป็นแหล่งจ่ายพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ไม่มีการต่อโหลด ค่าฟิลล์แฟคเตอร์คือสัดส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรคูณกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (ดังแสดงในสมการที่ 2.8 โดย $FF = P_{mp} / (V_{oc} \times J_{sc})$) ค่าฟิลล์แฟคเตอร์เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงคุณภาพรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าคือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ามาตรฐาน โดยเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 100% เมื่อสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงที่มีค่าความสว่างเท่ากับ 126,000 lux เป็นกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1,000 W/m² (Peter M. และคณะ., 2020)

4.5.1 ผลการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm²) และแรงดันไฟฟ้า (V) ของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะของขั้วลบและขั้วบวกของแผ่นซิลิกอนตามลำดับ ขั้วดังกล่าวถูกทำขึ้นเพื่อใช้วัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้เครื่องจำลองสภาวะแสงอาทิตย์ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.13

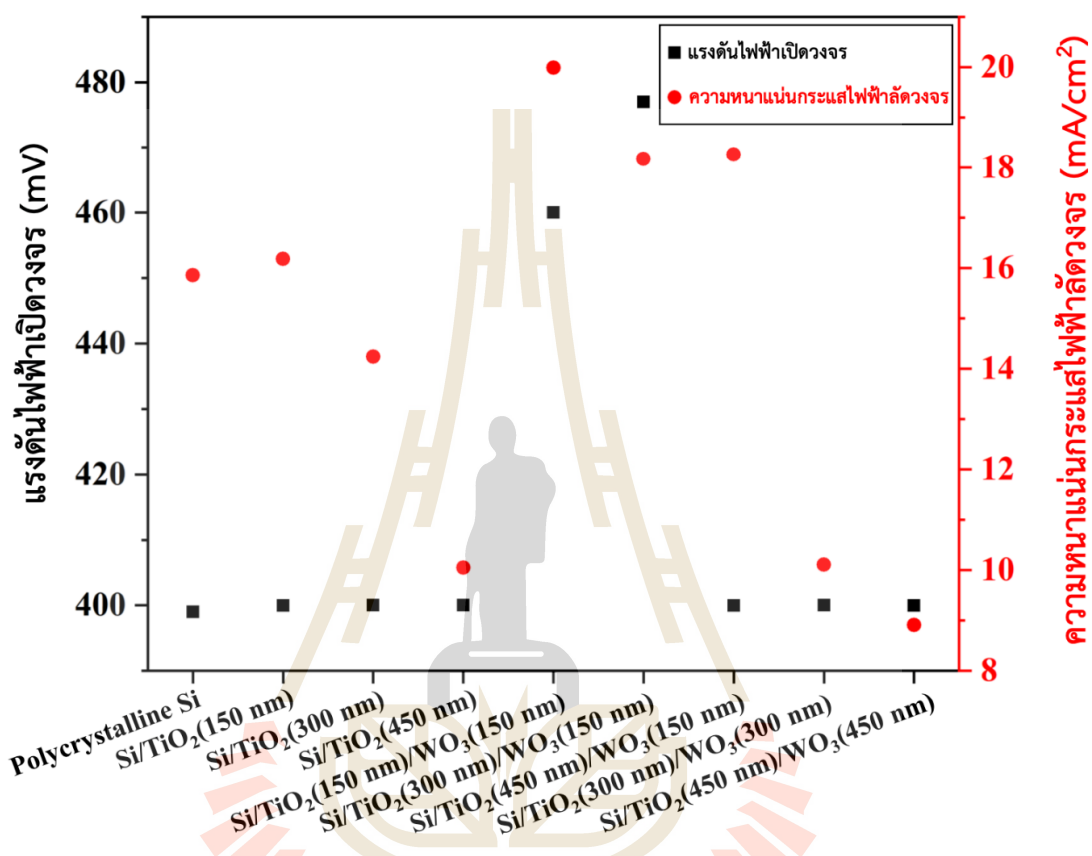


รูปที่ 4.12 ชิ้นงานเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการสร้างขั้วโลหะเพื่อใช้วัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้า (ก) ลักษณะของขั้วลบของแผ่นซิลิกอน (ข) ลักษณะของขั้วบวกของแผ่นซิลิกอน



รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์

รูปที่ 4.13 แสดงผลการวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าดังกล่าวจะถูกใช้สำหรับคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ และทังสเตนไตรออกไซด์

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์ พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยชั้นเคลือบรูปแบบ Si/TiO₂ และชั้นเคลือบรูปแบบ Si/TiO₂/WO₃ มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความหนาของชั้นเคลือบมากขึ้น ซึ่งรูปแบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นเคลือบรูปแบบ Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm) จะทำให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงขึ้นและมีค่ามากกว่าแผ่นซิลิกอนที่ปราศจากการเคลือบผิว เนื่องจากชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทังสเตนไตรออกไซด์สามารถทำให้ค่าการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตของแผ่นซิลิกอนลดลงและเพิ่มค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว

4.5.2 ผลการคำนวณประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

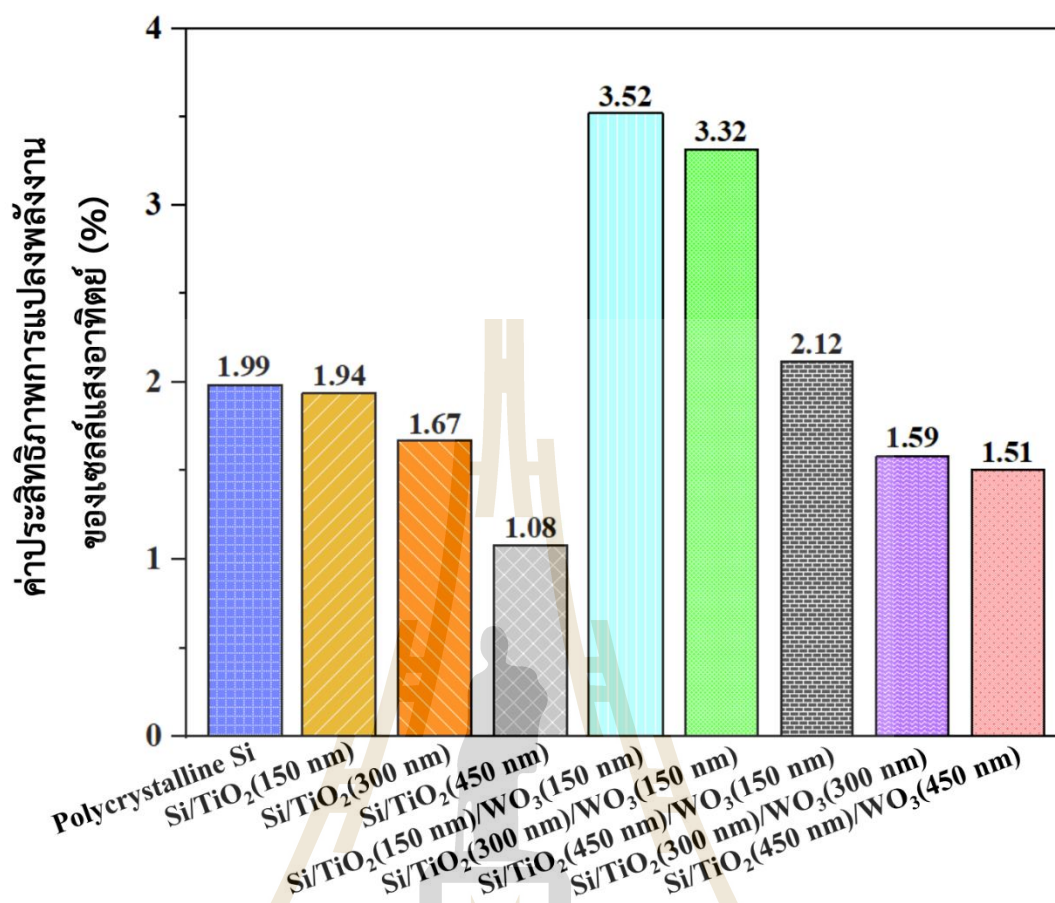
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ และ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่า แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปแบบเซลล์แสงอาทิตย์	V_{oc}	J_{sc}	FF	$Efficiency$
	(mV)	(mA/cm ²)		(%)
Polycrystalline Si	398.99	15.85	0.314	1.99
Si/TiO ₂ (150 nm)	399.98	16.18	0.299	1.94
Si/TiO ₂ (300 nm)	400.01	14.24	0.293	1.67
Si/TiO ₂ (450 nm)	400.01	10.05	0.270	1.08
Si/TiO ₂ (150 nm)/WO ₃ (150 nm)	460.00	19.99	0.383	3.52
Si/TiO ₂ (300 nm)/WO ₃ (150 nm)	477.00	18.17	0.383	3.32
Si/TiO ₂ (450 nm)/WO ₃ (150 nm)	399.96	18.26	0.290	2.12
Si/TiO ₂ (300 nm)/WO ₃ (300 nm)	400.02	10.11	0.394	1.59
Si/TiO ₂ (450 nm)/WO ₃ (450 nm)	399.99	8.91	0.424	1.51

หมายเหตุ : ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในภาคผนวก ก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

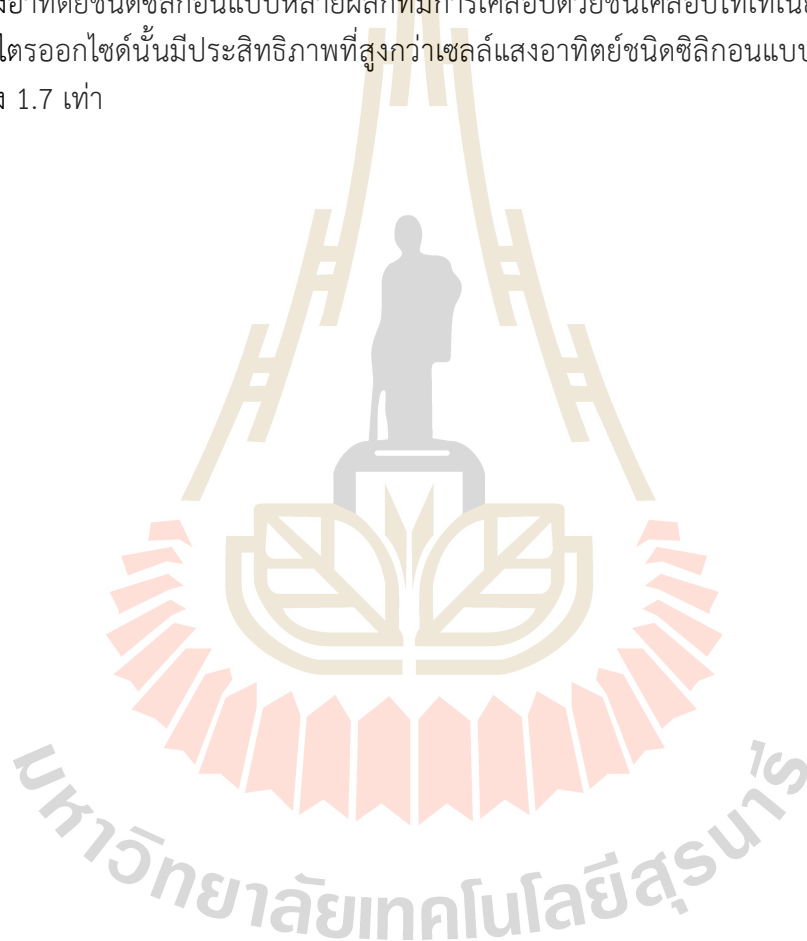


รูปที่ 4.15 ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์

รูปที่ 4.15 แสดงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทดลองพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยรูปแบบ Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm) มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงถึง 1.8 เท่า โดยมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.99 (ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง) เป็นร้อยละ 3.52 เนื่องจากเมื่อเคลือบแผ่นซิลิกอนด้วยรูปแบบ Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm) ส่งผลให้ค่าการสะท้อนแสงลดลงในขณะที่มีผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวมีค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ที่สูง ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเคลือบด้วยชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไตรออกไซด์ในรูปแบบ Si/TiO₂(300 nm)/WO₃(300) และรูปแบบ Si/TiO₂(450 nm)/WO₃(450) ที่มีความหนาของชั้นเคลือบสูงกว่ารูปแบบ Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm) ส่งผลให้ค่าการสะท้อนของแสงเพิ่มขึ้น แต่ค่าการดูดกลืนแสงลดลง ทำให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำกว่าเซลล์อ้างอิง จากการทดลองจึงแสดง

ให้เห็นว่า เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบหลายผลึกที่มีการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์ สามารถเพิ่มความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้

จากประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบหลายผลึกที่มีการเคลือบด้วยชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์รูปแบบ $\text{Si/TiO}_2(150 \text{ nm})/\text{WO}_3(150 \text{ nm})$ จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบหลายผลึกที่ปราศจากการเคลือบ โดยประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นจาก 1.99% เป็น 3.52% ที่พื้นที่เปิดรับแสงเท่ากับ 1×1 ตารางเซนติเมตร แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบหลายผลึกในทางการค้าซึ่งมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 2.09% ต่อพื้นที่เปิดรับแสงที่เท่ากัน (Stuart R.W., 2007) แสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบหลายผลึกที่มีการเคลือบด้วยชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์นั้นมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบหลายผลึกในทางการค้าถึง 1.7 เท่า



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอนโดยการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 สามารถสังเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารประกอบทังสเตนไดรอกไซด์ด้วยกระบวนการโซลเจล โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเผาขึ้นงานอยู่ที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะทำให้ได้เฟสผสมของอนาเทสเฟสและรูไทล์เฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ และเฟสเดียวของทังสเตนไดรอกไซด์

5.1.2 การสร้างชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทังสเตนไดรอกไซด์ ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ โดยชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีความหนาของชั้นเคลือบเฉลี่ยอยู่ที่ 150 nm ที่การจุ่ม 1 ครั้ง ความหนา 300 nm ที่การจุ่ม 2 ครั้ง และความหนา 450 nm ที่การจุ่ม 3 ครั้ง โดยชั้นเคลือบของทังสเตนไดรอกไซด์จะมีความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบต่ำกว่าชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากมีแรงตึงผิวที่สูงกว่า และด้วยแรงตึงผิวที่สูงส่งผลให้ทังสเตนไดรอกไซด์เกาะติดบนชิ้นงานได้น้อย ชั้นเคลือบจะมีความสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อทำการเคลือบทังสเตนไดรอกไซด์บนชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

5.1.3 สมบัติทางแสงของชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทังสเตนไดรอกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้า ความหนาของชั้นเคลือบที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการส่องผ่านของแสงลดลง ซึ่งจะส่งผลให้แสงส่องผ่านชั้นเคลือบไปถึงรอยต่อพี-เอ็นของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์น้อยลง มีผลทำให้ค่าการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ซึ่งรูปแบบชั้นเคลือบที่ให้ค่าการส่องผ่านของแสงที่เหมาะสมคือกระจกนำไฟฟ้าเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์ที่มีความหนาของชั้นเคลือบแต่ละชั้นเท่ากับ 150 นาโนเมตร ($\text{FTO}/\text{TiO}_2(150 \text{ nm})/\text{WO}_3(150 \text{ nm})$)

5.1.4 สมบัติทางแสงของชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และชั้นเคลือบทังสเตนไดรอกไซด์บนแผ่นซิลิกอน รูปแบบชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์ที่มีความหนาของชั้นเคลือบแต่ละชั้นเท่ากับ 150 นาโนเมตร ($\text{Si}/\text{TiO}_2(150 \text{ nm})/\text{WO}_3(150 \text{ nm})$) สามารถเพิ่มค่าการดูดกลืนแสงและลดค่าการสะท้อนของแสงให้กับแผ่นซิลิกอนได้ โดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต

5.1.5 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนหลายผลึกได้ 3.52% ด้วยการเคลือบแผ่นซิลิกอนด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์ ในรูปแบบของชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และทังสเตนไดรอกไซด์ที่มี

ความหนาของชั้นเคลือบแต่ละชั้นเท่ากับ 150 นาโนเมตร (Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm)) นอกจากนี้ด้วยการเคลือบดังกล่าวยังช่วยปรับปรุงค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) ให้สูงขึ้นและยังส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open circuit voltage, V_{oc}) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current density, J_{sc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนหลายผลึกมีค่าสูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในช่วงของการเตรียมสารประกอบทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยกระบวนการโซลเจล หลังจากการสังเคราะห์ WO₃ Sol-Gel แล้วเสร็จเมื่อเวลาผ่านไป พบว่าบางครั้งเกิดตะกอนขึ้นรวดเร็วกว่าปกติ มีความเป็นไปได้ที่เกิดจากเวลา อุณหภูมิในการกวนสาร ความสะอาดของภาชนะ และวิธีการเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงต้องควบคุมปัจจัยเหล่านี้ให้คงที่

5.2.2 ในช่วงของการสร้างชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรออกไซด์ ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ ต้องทำการเตรียมผิวหน้าของแผ่นชิ้นงานอ้างอิงด้วยสารละลายที่เหมาะสมเพื่อลดแรงดึงดูดของ WO₃ Sol-Gel ลง ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการเกาะติดและความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบดีขึ้น

5.2.3 การเก็บชิ้นงานเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการสร้างชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรออกไซด์ ต้องเก็บในภาชนะที่เหมาะสม และดูกันความชื้นที่มีการควบคุมความชื้นอย่างคงที่ เนื่องจากความชื้นจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงได้

5.2.4 ศึกษาเทคนิคการเคลือบชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และชั้นเคลือบทั้งสแตนไดรออกไซด์ ที่สามารถทำให้ชั้นเคลือบมีความหนาที่น้อยลงได้และมีความสม่ำเสมอที่ดี คาดว่าจะส่งผลให้ค่าการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง และทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าของเซลล์อาทิตย์มีโอกาสที่สูงขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

- ชานู โพธิพิทักษ์ และสุกัลยา ขุนจารย์. (2016). An Improvement of the Efficiency of Dye Sensitized Solar Cells by TiO_2 Blocking Layer. วารสารวิจัย มสศ. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 9-2.
- ณัฐกานต์ กาญจนะ. (2021). การสังเคราะห์และการศึกษาลักษณะเฉพาะของ TiO_2 แบบทรงกลมกลวงเจือด้วย Fe สำหรับการประยุกต์กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก: <http://202.28.34.124/dspace/handle/123456789/1159>.
- สายชล ศรีแป้น และคณะ. (2006). การวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างนาโน. วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. 10,63-78.
- อภิชน วัชรินทร์วงศ์. (2012). โทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสำหรับการบำบัดก๊าซมลพิษโดยกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก: <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/3925>.
- อภิรักษ์ มังกรแก้ว. (2016). การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน โดยการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (SE cell) ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก: <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/7206/1/Abstract.pdf>.
- อร เศรษฐจินดาเลิศ และ ธวัชชัย แพชะมัด. (2012). เจลก่อตัวด้วยการแลกเปลี่ยนสารทำละลาย Solvent Exchanged In Situ Forming Gel. Thai Pharmaceutical and Health Science Journal-วารสาร ไทยเภสัชศาสตร์ และ วิทยาการสุขภาพ. 7(3):137-142.
- Abdin Z., Alim M. A., Saidur R., Islam M. R., Rashmi W., Mekhilef S., and Wadi A. (2013). Solar energy harvesting with the application of nanotechnology. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 26 : 837-852.
- Ghania A. and Wahiba T. (2013). Improving silicon solar cell efficiency by using the Impurity photovoltaic effect. Energy Procedia. 41 : 40 – 49.
- Green, M.A. (1992). SOLAR CELLS operating Principles, Technology and System Applications. Kensington, NSW. The University of New South Wales.
- Green, M.A., and Keevers M.J. (1995). Optical Properties of Intrinsic Silicon at 300 K. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 3(3): 189-192
- Green, M.A. (2004). Third generation photovoltaics: advanced solar energy conversion. Physics Today. 57 : 71-72.
- Green, M.A. (2007) "Thin-film solar cells: review of materials, technologies and commercial status," Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 18 : S15-S19.

- Heping S., Stefan T. O., Daniel A. J., Sisir Y., Yimao W., Di Y., Pheng P., The D., Yiliang W., Yanting Y., Christian S., Jun P., Nandi W., Thomas P. W., Gunther G. A., Nathan S. L. and Kylie R. C. (2018). In situ recombination junction between p-Si and TiO₂ enables high-efficiency monolithic perovskite/Si tandem cells. Shen et al. Sci. Adv. 4:eaau9711.
- Jincheng Z., Chengwu S., Junjun C., Yanqing W. and Mingqian L. (2016). Preparation of ultra-thin and high-quality WO₃ compact layers and comparison of WO₃ and TiO₂ compact layer thickness in planar perovskite solar cells. Journal of Solid-State Chemistry. 238 : 223–228
- Kibria, M., Ahammed, A., Saad, M., Sony, F., and Hossain, S.-U.-I. (2015). A Review: Comparative studies on different generation solar cells technology. Proceedings of 5th International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh [ICEAB 2015].
- Khalid M., Bhabani S. S., Ahmad R. K. and Aram A. (2014). Highly Efficient Perovskite Solar Cells Based on a Nanostructured WO₃-TiO₂ Core-Shell Electron Transporting Material. Journal of Materials Chemistry.
- Landmann M., Rauls E. and Schmidt W. G.(2012). The electronic structure and optical response of rutile, anatase and brookite TiO₂. Journal of Physics. 24(19):195503
- Lakshmi M., Manisha M. and Vineet K. R. (2017). Photovoltaics and Photocatalysis: Promising Applications of Lanthanide doped Luminescent Materials. International Journal of Technology Management.
- Liu X., Wang X., Li H., Li J., Pan L., Zhang J., Min G., Sun Z. and Sun C. (2015). Enhanced visible light photocatalytic activity of ZnO doped with down-conversion NaSrBO₃: Tb³⁺ phosphors. Dalton Trans. 44-97.
- Nozawa T., and Arakawa Y. (2011). Detailed balance limit of the efficiency of multilevel intermediate band solar cells. Applied Physics Letters. 98 : 171108.
- Sang Y., Liu H. and Umar A. (2015). Photocatalysis from UV/vis to near-infrared light: Towards full solar-light spectrum activity. Chem. Cat. Chem. 7-559.
- Satyapaul A. Singh, Giridhar Madras. (2013) “Photocatalytic degradation with combustion synthesized WO₃ and WO₃ -TiO₂ mixed oxides under UV and visible light”. Separation and Purification Technology 105 : 79–89.
- Ukoba, K. O., Eloka-Eboka, A. C., & Inambao, F. L. (2017). Review of nanostructured NiO thin film deposition using the spray pyrolysis technique. Renewable and Sustainable Energy Reviews.)

- Wang P., Zhai Y.M., Wang D.J. and Dong S.J. (2011). Synthesis of reduced graphene oxide-anatase TiO_2 nanocomposite and its improved photo-induced charge transfer properties. *Nanoscale*. 3-1640.
- Yibo Y., Wei T., Liangliang M., Fengren C., Kaimo D. and Liang Li. (2019). TiO_2/WO_3 Bilayer as Electron Transport Layer for Efficient Planar Perovskite Solar Cell with Efficiency Exceeding 20%. *Adv. Mater. Interfaces*. 1901406.



ภาคผนวก ก
การคำนวณค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า
ของเซลล์แสงอาทิตย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 การคำนวณค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Energy conversion efficiency; *Efficiency*) ซึ่งหาได้จากสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าขาออก ต่อกำลังไฟฟ้าขาออก ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ ก.1

$$Efficiency = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}} \quad (ก.1)$$

โดยที่	P_{out}	คือ กำลังไฟฟ้าขาออก (mW/cm ²)
	P_{in}	คือ ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้า ซึ่งเป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากแสงที่ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์กับค่ามาตรฐาน โดยเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 100% เมื่อสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงที่มีค่าความสว่างเท่ากับ 126,000 lux เป็นกำลังไฟฟ้าขาเข้าได้เท่ากับ 1,000 W/m ² หรือ 100 mW/cm ²
	V_{oc}	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V)
	J_{sc}	คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (mA)
	FF	คือ ค่าฟิลล์แฟคเตอร์

ซึ่งค่าฟิลล์แฟคเตอร์ จะสามารถหาได้จากการคำนวณจากสมการ ที่ ก.2

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc} J_{sc}} \quad (ก.2)$$

โดยที่ P_{mp} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด

ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะสามารถหาได้จากการคำนวณจากสมการ ที่ ก.3

$$P_{mp} = V_{mp} J_{mp} \quad (ก.3)$$

โดยที่ V_{mp} คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

J_{mp} คือ กระแสไฟฟ้าจุดที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด

ก.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบ Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm)

จากการวัดค่าไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องจำลองสภาวะแสงอาทิตย์ จะทำให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพื่อหาค่า V_{oc} J_{sc} V_{mp} และ I_{mp} ดังแสดงในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงค่า V_{oc} J_{sc} V_{mp} และ J_{mp} ของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบ Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm)

รูปแบบเซลล์แสงอาทิตย์	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{mp} (mV)	J_{mp} (mA/cm ²)
Si/TiO ₂ (150 nm)/ WO ₃ (150 nm)	460.00	19.99	300.00	11.72

ตัวอย่างการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบ Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm) แสดงได้ดังสมการที่ ก.3

จากสมการ
$$P_{mp} = V_{mp}J_{mp}$$

จะได้
$$P_{mp} = 0.3 \times 11.72 = 3.52 \text{ mW/cm}^2$$

ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบ Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm) มีค่าเท่ากับ 3.53 (mW/cm²)

แทนค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดลงในสมการที่ ก.2 เพื่อหาค่าฟิลล์แฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบ Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm)

จากสมการ
$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc}J_{sc}}$$

จะได้
$$FF = \frac{3.52}{0.46 \times 19.99} = 0.383$$

ดังนั้น ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบ Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm) มีค่าเท่ากับ 0.383

จากค่าฟิลล์แฟคเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ และค่าจากตารางที่ ก.1 จะสามารถนำมา
คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบ Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm)
ได้จากสมการที่ ก.1

จากสมการ $Efficiency = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}}$

จากสมการ $Efficiency = \frac{0.46 \times 19.99 \times 0.383}{100} = 0.352$

$$Efficiency = 0.352 \times 100 = 3.52\%$$

ดังนั้น ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบ Si/TiO₂(150 nm)/WO₃(150 nm) มีค่า
เท่ากับ 3.52%





ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

วารสารวิชาการที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์

Anurat Poowancum., Kraiwut Rukkachat., Phakkhananan Pakawanit., Chatchai Ponchio., Sakhob Khumkoa and Siriwan Chokkha. (2022). Study on Consistency and Density of Titanium Dioxide and Tungsten Trioxide Coatings on Conductive Glass from Dipping Process Affecting Light Absorption and Transmission.

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

Anurat Poowancum., Kraiwut Rukkachat., Phakkhananan Pakawanit., Chatchai Ponchio., Sakhob Khumkoa and Siriwan Chokkha.(2022). The 11th International Conference on Materials Science and Technology (MSAT-11), 29th-31st August 2022. (Online).[Oral Presentation]





Naratip Vittayakorn <naratip.vi@kmitl.ac.th>
 รศ.ดร.จักรพงษ์ รัตติกORN, ธีร, สิริวัน

25 พ.ย. 2022 10:17

☆ ↻

Our decision on your manuscript (MSAT-11-Integrated Ferroelectrics)

Dear Authors,

Manuscript Number: CER-0-013

Title: Study on Consistency and Density of Titanium Dioxide and Tungsten Trioxide Coatings on Conductive Glass from Dipping Process Affecting Light Absorption and Transmission

On behalf of the guest editors, We would like to thank you for participating in the MSAT-11 conference and submitting your manuscript to be considered for Integrated Ferroelectrics. We are pleased to inform you that your revised manuscript has been accepted for publication. We will transfer your accepted manuscript to Taylor and Francis for further processing. The publisher will create a proof which you will be asked to check, and you will also be asked to complete several online forms required for publication. The publisher will contact you directly if additional information is needed during production.

Kind regards,

Naratip Vittayakorn
 Jakrapong Kaewkhao
 Ratikorn Yimritun
 Guest Editors of Integrated Ferroelectrics

=====

Editor and Reviewers' comments:

I am satisfied with the revised manuscript. Therefore, the revised manuscript can be published.

Professor Dr. Naratip Vittayakorn
 Advanced Materials Research Unit (AMR),
 Department of Chemistry, Faculty of Science,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
 Bangkok, THAILAND 10520
 E-mail: naratip.vi@kmitl.ac.th



AMR
 Advanced Materials Research
 KMITL-SWU-KMITNB



KMITL
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang



KMITL FIGHT

Study on Consistency and Density of Titanium Dioxide and Tungsten Trioxide Coatings on Conductive Glass from Dipping Process Affecting Light Absorption and Transmission

Anurat Poowancum¹, Kraiwut Rukkachat¹, Phakkhananan Pakawanit², Chatchai

Ponchio³, Sakthob Khumkoa⁴, Siriwan Chokkha^{1*}

¹School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering

Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

²Synchrotron Light Research Institute (Public Organization),

Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

³Department of chemistry, Faculty of science and technology

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumtani, 12110, Thailand

⁴School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering

Suranaree University of Technology, 30000, Thailand

*E-mail address corresponding author: Siriwan@sut.ac.th

Keywords: Solar cell, Photocatalysis, Photovoltaic application, Synchrotron X-ray tomographic microscopy

Abstract

Light property is a crucial factor in photovoltaic power generation. Therefore, the study of light absorption and transmission of materials is important for developing of solar cell coating material. Titanium dioxide (TiO₂) and tungsten trioxide (WO₃) are the important candidates for use as the solar cell coating material. Because TiO₂ and WO₃ have a narrow energy band gap and have photocatalytic properties which are the essential

properties for the solar cell application. The aim of this work is to investigate the light absorbance ability of the TiO_2 and WO_3 coating layer. The gel of TiO_2 and WO_3 was synthesized by the sol-gel method. The synthesized gel of TiO_2 and WO_3 was coated on the conductive glass (FTO) by using the dip-coating technique. The light absorbance of the coated surface was examined by the UV-Visible Spectrophotometer technique (UV-Vis). The surface of coating homogeneity and the coating density were evaluated by 3D imaging which was investigated by 3D reconstruction of the samples by Synchrotron X-ray tomographic microscopy (SR-XTM) technique. The results show the light absorption ability of the conductive glass coated by WO_3 is higher than that of TiO_2 . However, the coating homogeneity and the coating density of the WO_3 coated layer are lower than that of the TiO_2 coated layer. The unevenness of the WO_3 coated layer is the cause of non-uniform light absorption. The homogeneity of the coating layer is decreased with increasing the coating layer number because the coating is unevenly distributed resulting in some areas are denser than others. From all the experimental results, it is concluded that even the TiO_2 coated layer has a tendency to increase the absorbance less than WO_3 coated layer, but it is acceptable considering of uniformity coated layer. Consequently, TiO_2 is suitable for applying to solar cells because of its increasing of absorbance capacity and reducing of light reflection.

1. Introduction

Alternative energy is increasingly being used to generate electricity these days. The most well-liked is the production of electricity using solar power. The idea behind solar energy production is the conversion of light energy into electrical energy using photovoltaic cells. The solar cells' construction material has an impact on how efficiently photovoltaic energy is produced. The material is suited for use in photovoltaic panels due

to its strong light absorption capabilities and low energy band gap. As a result, while developing new solar cell materials, absorbance properties and energy band gap are taken into consideration. Polycrystalline silicon is the substance with the aforementioned qualities that is now most frequently used to produce solar cells. Even though polycrystalline silicon has a narrow energy band gap and strong optical absorption, there are still constraints on how much power can be produced, regardless of lifetime, the absorbance range's limitation and other factors that influence the effectiveness of electricity generation. Therefore, scientists focus on developing materials that enhance solar cells' capacity to generate power. The most commonly used materials are photocatalysis materials with good light absorption capability. The solar cells' ability to absorb energy is increased as a result. More energy can be generated by the solar cell as the absorbance rises. Materials such as CaS , CaTe , TiO_2 , WO_3 and etc. are most commonly utilized. 90% of the sunlight is absorbed by CaS and CaTe , demonstrating their excellent light-absorbing abilities [1-2]. However, Substances containing cadmium were later discovered to be harmful to the environment. Currently, it is not well-liked. For producing solar cells, TiO_2 and WO_3 are widely employed. These materials are coated using a variety of processes, including silk screening, spin coating, dip coating and etc [3].

The multifaceted approach to the practical applications of photocatalysis while taking into account different technical and material aspects [4]. Which consists of hybridization of photocatalysis with other technologies, photocatalytic reactor development [5], photocatalyst immobilization methods, low-cost photocatalytic materials, photocatalytic activities as a function of the wavelength and durability of photocatalysts against deactivation and fouling [6-8]. However, surface morphology, agglomerated size, thickness, density, homogeneity or consistency of the coated layer, among other factors, play a significant role in determining the parameters of the photocatalytic process [9-10].

Currently, there are many technologies and techniques to detect such a factor. One of the techniques that has gained attention and which builds credibility in material inspection and analysis is synchrotron light technology.

XTM beamline located at BL 1.2W is the experimental facility for X-ray tomographic microscopy. With the synchrotron radiation generated from the 2.2-Tesla multipole wiggler of Siam Photon Source (SPS), the XTM beamline offers the high-intensity x-ray beam for microtomography to provide the reconstructed cross-sectional detail and 3D visualization of various kinds of samples at the resolution up to 1 micron (0.72-micron pixel size). The application of X-ray tomographic imaging is appropriate for research projects that seek to describe things in three dimensions, such as the internal morphology of samples, engineering defects, porosity, surface roughness, and pore distribution [11-13].

This research aims to investigate the uniformity and density of titanium dioxide and tungsten trioxide coated layers using Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy (SRXTM) technique coating on conductive glass by a dipping procedure that influences the ability of absorbance and transmittance. The titanium dioxide and tungsten trioxide materials were first synthesized by using the sol-gel method. Prior to analyzing the fundamental characteristics, such as structural phase, absorbance, and transmittance properties using XRD and UV-Vis, respectively. The results were then confirmed and further supported by science using the SRXTM method on how the coating layer's density and homogeneity affect optical properties.

2. Materials and methods

2.1 Synthesis of Titanium dioxide (TiO_2) and Tungsten trioxide (WO_3)

2.1.1 Synthesis of Titanium dioxide by Sol-gel method

Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) (ACROS ORGANICE, 98%) was used as a precursor for preparation of Titanium dioxide (TiO_2). Titanium (IV) isopropoxide

was first dissolved in ethanol and then stirred with 600 - 800 rpm for 15 mins. After stirring for 15 min, the reactants begin to react and form to be a clear white solution. Hydrochloric acid (HCl) with concentration of 2 molar (M) was applied in a clear white solution to adjust the pH to a value of 3. Continue stirring the clear white solution with the same speed but increase the spinning time to 30 mins. The white solution is gradually reacted with HCl and turns into a milky white gel of TiO_2 .

2.1.2 Synthesis of Tungsten trioxide by Sol-gel method

Sodium tungstate (Na_2WO_4) (LOBA, 99 %) was used as a starting material and then first dissolved in deionized water (DI) to form a clear white solution. During stirring with speed of 600 - 800 rpm for 15 mins, the clear white solution was acidified with 20 ml of nitric acid (HNO_3). For this stage, slowly drop of HCl into the solution, it can be seen that the solution gradually reacted and color change to yellow. Then continues stirring for 15 mins with the same speed, to make the chemical completely reacted until a yellow-green solution is obtained. Once the impurities were filtered and washed with deionized water more than 10 times, to achieve a purity phase of yellow wet powder. Final step, yellow wet powder and 2 ml of hydrogen peroxide (H_2O_2) were mixed and stirred with 600-800 rpm for 2 hrs to get a yellow clear gel of WO_3 .

2.2 Characterization of Titanium dioxide and Tungsten trioxide coated layers

2.2.1 Preparation of Fluorine doped Tin Oxide (FTO) glass specimens

Fluorine doped Tin Oxide (FTO) was used as a glass substrate surface. Before using, FTO glass substrates were cut into 2 cm × 3 cm rectangle before being washed to reduce the contamination on the surface before use. First sequence for washing is used ultrasonic cleaner with deionized water at 60°C for 15 mins. Then, first cleaned FTO was washed with ethanol again by using an ultrasonic cleaner at room temperature

for another 15 mins. The washed FTO Workpieces until finished all the steps will be dried and stored in a desiccator cabinet to be ready for use.

2.2.2 Preparation of TiO_2 and WO_3 coated on FTO conductive glass

TiO_2 and WO_3 gel were successfully coated on FTO conductive glass substrates by using typical dip coating technique. The number of TiO_2 and WO_3 coated layers is the main factor involved in the study on the effect of light absorption and transmission. Before testing, all coated sample were heat treatment at a temperature range of 450 and 500°C for 2 hrs to achieve a single phase of TiO_2 and WO_3 coated on FTO conductive glass substrates. FTO/ TiO_2 and FTO/ WO_3 samples are now led to the next step of characterization and properties test.

2.2.3 Structural phase analysis of TiO_2 and WO_3 coated material

The structural phase of FTO/ TiO_2 and FTO/ WO_3 samples was identified by X-ray diffraction (XRD, Bruker D2 PHASER) with the analytical 2-theta range of 10°-70°, using a step time of 0.5 sec/step and step size of 0.02°/step.

2.2.4 Surface analysis of TiO_2 and WO_3 coated layer on FTO glass

The surface of FTO, FTO/ TiO_2 and FTO/ WO_3 samples was identified by Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM, model MIRA3) with the analytical magnification 100 x and 5,00 kx.

2.3 Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy

X-rays were carried out as the spectral range of synchrotron radiation for computing 3D tomographic reconstruction at 1.2 W beamline [Synchrotron Light Research Institute (SLRI), Thailand]. X-ray radiation changed the amplitude of a wave after going through the sample. When maximum height of the amplitude was low after passing through the sample, X-ray radiations were absorbed in heavy or high attenuation materials, which

caused a dark shadow in the radiographic image. On the other hand, if the height of the amplitude was still high after passing through the sample, most of the X-ray radiations were transmitted, which caused a bright shadow in the radiographic image. As a result, one radiographic image can have many shades of shadow depending on the attenuation of the materials in the sample. The radiographic images of the sample were collected at 180° with 0.1 angular increments for a complete dataset. In order to minimize the artifacts, a polychromatic X-ray was attenuated with 200 micron-thick aluminum foil, with a mean energy of about 11.5 keV. The radiographic images were collected on a sCMOS camera with a pixel size of 1.44 μm . The data was pre-processed and reconstructed in three dimensions based on a filtered-back projection algorithm using Octopus Reconstruction software. After that, reconstructed images were visualized by using Drishti software. An example for analytical procedure with the SRXTM technique.

2.4 Optical Properties of FTO/TiO₂ and FTO/WO₃ samples

Cary 300 UV-Vis spectrophotometer was used to analytical the light absorption and transmission of FTO glass, FTO/TiO₂ and FTO/WO₃ coated material. Absorption and transmission are measured in the wavelength range of 200-800 nm as this is because of a comprehensive range for using materials on solar cells.

The overall flow chart of material preparation, method and characterizations of titanium dioxide and tungsten trioxide coated layers was shown in the Fig. 1.

(Fig. 1. here)

3. Results and Discussion

3.1 Structural phase analysis of TiO_2 and WO_3 coated material

The structural phase of TiO_2 and WO_3 coated materials synthesized via sol-gel method was characterized by X-ray diffraction. As the XRD result from Fig. 2(a), TiO_2 coated material after heat treatment at 450°C and 500°C exhibited sharp diffraction peaks attributed to mixed-phase of TiO_2 anatase phase and TiO_2 rutile phase. The single phase of TiO_2 anatase phase and TiO_2 rutile phase can be confirmed by JCPDS no. 21-1272 and JCPDS no. 21-1276, respectively. In the case of WO_3 coated material after heat treatment at 450°C , the imperfect phase or second phase of $\text{WO}_3 \cdot \text{xH}_2\text{O}$ (JCPDS no. 35-1001) is still found and mixed with the complete phase or single phase of WO_3 (JCPDS no. 83-0948). However, when heat treatment at 500°C , $\text{WO}_3 \cdot \text{xH}_2\text{O}$ was completely reacted with temperature and evaporated the chemical water, then finally form to be completely single phase of WO_3 . From the XRD results, it is revealed that the heat treatment temperature of TiO_2 and WO_3 coated material is not the same firing condition. The temperature used to form the single phase of TiO_2 is wider than the temperature used to form a single phase of WO_3 .

(Fig. 2. here)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Fig. 3 shows the surface morphology of (a.) FTO glass, (b.) FTO/TiO₂ and (c.) FTO/WO₃ by FE-SEM technique. It was observed that TiO₂ exhibits a more uniform coated dispersion over the FTO-substrate than WO₃. Additionally, it was found that the particles of TiO₂ were smaller than the particles of WO₃ coated on the workpiece surface, suggesting that TiO₂ produced using the sol-gel method is more reactive of chemical reaction than WO₃. In addition, fissures can be seen all over the FTO-surface when looking at WO₃ coated layer. The surface tension of the fairly liquid WO₃ sol-gel is really what makes the WO₃ coatings clump and produce unequal distribution on FTO-substrate. The FE-SEM technology was used to examine the coating layer's surface that the unevenness of the coated layer not only influences the density of the coated layer but it also effected to the optical properties of the material.

(Fig. 3. here)

From Fig. 4, the 3D reconstruction with gradient color from blue to red was applied to identify the density of materials. It was found that the pure FTO glass (Fig. 4 (a)) showed the blue color due to a low density. Whereas the FTO glass with TiO₂ (Fig. 4 (b-d)) showed the green color. From this result, it implies that TiO₂ has a higher density than the pure FTO glass. It also found that TiO₂ particles were homogeneously coated on the FTO glass. After dipping more layers of TiO₂ particles on the FTO glass, the density was higher by changing from light green to dark green color as shown in Fig.4 (b-d).

Nevertheless, after applying the dipping process for WO₃ particles, the 3D reconstruction showed the blue color as shown in Fig.4 (d-f). That means WO₃ particles were barely coated on the FTO glass except the edge of the sample (red arrow).

(Fig. 4. here)

The uniformity and density of TiO_2 and WO_3 coated layer demonstrated by the SRXTM radiographic analysis technique as changes with the number of coating layers increases. This is a main factor that affects the ability of light absorbance and transmittance.

The visible light wavelength range between 380–750 nm was used to studied as the wavelength range in which both materials had high absorption and could be used in solar cell operating conditions. From Fig. 5, It is found that the FTO conductive glass has low absorbance properties. After coating with TiO_2 and WO_3 , the percentage of absorbance was higher with a tendency to increase directly proportional to the number of TiO_2 and WO_3 coated layer. From this result, FTO/ WO_3 coated material has a higher absorbance than FTO/ TiO_2 coated material. However, the distribution of the coated layer is uneven, resulting in low absorbance abnormalities for more layered coatings. While the light absorbance of FTO/ TiO_2 coated material tends to significant rise as the number of layers increased and the absorbance of FTO/ TiO_2 was steady throughout with the condition of visible light analysis.

(Fig. 5. here)

Fig. 6 shows the light transmittance properties of FTO glass, FTO/ TiO_2 and FTO/ WO_3 coated material. The light transmittance property is opposite with light absorption property. Of course, the light transmittance of uncoated FTO conductive glass must be higher than that of FTO/ TiO_2 and FTO/ WO_3 coated material. Then, especially of FTO/ TiO_2 and FTO/ WO_3 coated material was considered on light transmittance property. From this result, FTO/ TiO_2 coated material has a higher transmittance than FTO/ WO_3 coated material. While the light absorbance of FTO/ TiO_2 coated material tends to decrease significantly when the number of coated layers is increased. For FTO/ WO_3 coated material, the light transmittance of FTO/ WO_3 coated material is lower than FTO/ TiO_2 coated

material. It was also found that the abnormal transmittance property with insignificant increase in value when increase of coating number, due to the unevenness of coated layer.

(Fig. 6 here)

4. Conclusions

This work demonstrates that the SR-XTM technique can be used to analytical a uniformity and density of TiO_2 and WO_3 coated layers influencing absorbance and transmittance properties. The optical property test confirmed that the absorbance tends to increase with increasing of the coated layer density. The increasing of TiO_2 coated layer is more significantly increased the coated density. In addition, with the same experiment of WO_3 coated layer revealed that the uniformity and density of WO_3 coated layer were lower than those of TiO_2 coated layer. The unevenness of WO_3 coated layer caused the uneven absorbance, besides the uniformity of coated layer decrease as the number of coated layer increase. As the coated material is unevenly distributed, some areas are denser than others. From this result, The TiO_2 coated layer is most acceptable considered of uniformity coating layer that can be verified with the SR-XTM technique, even though the TiO_2 coated layer has a tendency to increase the absorbance less than WO_3 coated layer. Consequently, TiO_2 is more suitable for using as a coated material that need to increase their light absorption ability.

5. Acknowledgement

This research was financially supported by the Suranaree University of Technology Research and Development Fund. We also thank Suranaree University of Technology (SUT) for facilitating the development of part of the research in our work. And the work is

supported by Dr. Pattanaphong Janphuang, BL6 at Synchrotron Light Research Institute (Public Organization) and Mr. Kriettisak Srisom are also thank for FE-SEM analysis.

6. References

1. Q. Guo, C. Zhou, Z. Ma, and X. Yang, Fundamentals of TiO_2 Photocatalysis: Concepts, Mechanisms, and Challenges, *Advanced Materials* 31(50), 2015, pp. 4-26.
2. B. Shankar, G. Andreas, G. Wolfgang, Photoelectrochromic devices based on sputtered WO_3 and TiO_2 films, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 163, 2017, pp. 170-177.
3. Y. You, W. Tian, L. Min, C. Fengren, D. Kaimo, and L. Li., TiO_2/WO_3 Bilayer as Electron Transport Layer for Efficient Planar Perovskite Solar Cell with Efficiency Exceeding 20%, *Adv, Mater, Interfaces*, 2019, 1901406, pp. 4-6.
4. S. Emin, M. de Respinis, M. Fanetti, W. Smith, M. Valant, and B. Dam, A simple route for preparation of textured WO_3 thin films from colloidal W nanoparticles and their photoelectrochemical water splitting properties, *Applied Catalysis B: Environmental* vol. 166-167, 2015, pp. 406-412.
5. H. Shen, T. Stefan Omelchenko, A. Daniel Jacobs, Y. Sisir, Y. Wan, D. Yan, P. Phang, T. Duong, Y. Wu, Y. Yin, S. Christian, J. Peng, N. Wu, P. Thomas White, D. Gunther Andersson, S. Nathan Lewis, R. Kylie Catchpole, In situ recombination junction between p-Si and TiO_2 enables high-efficiency monolithic perovskite/Si tandem cells, *Sci. Adv.*, 2018, pp. 2-5.
6. A. Satyapaul Singh, M. Giridhar, Photocatalytic degradation with combustion synthesized WO_3 and WO_3 - TiO_2 mixed oxides under UV and visible light, *Separation and Purification Technology* 105, 2013. pp. 79-89.

7. S. Weon, Active facet exposed TiO_2 nanotubes photocatalyst filter for volatile organic compounds removal: from material development to commercial indoor air cleaner application, *Environ. Sci. Technol*, 933-9340, 2018, pp. 52.
8. F. He, W. Jeon & W. Choi, Photocatalytic air purification mimicking the self-cleaning process of the atmosphere. *Nat Commun*, 2528, 2021, pp. 12.
9. A. Kumar, G. Pandey, A review on the factors affecting the photocatalytic degradation of hazardous materials, *Material Sci & Eng Int J* 1(3), 2017, pp. 106-114.
10. E. Pelizzetti, N. Serpone, *Photocatalysis: Fundamentals and Applications*, 1989.
11. P. Utchawadee, S. Yoltawan, P. Satana, C. Thitirat, P. Phakchananan, S. Saichon, V. Naratip, V. Wanwilai, Influence of pore morphologies on the mechanical and tribo-electrical performance of polydimethylsiloxane sponge fabricated via commercial seasoning templates, *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 189, 2021, pp. 3-5
12. P. Phakchananan, P. Utchawadee, C. Thitirat, S. Saichon, P. Satana, V. Naratip, Simple Fabrication of Porous 3D Substrate Polydimethylsiloxane (PDMS) Compositied with Polyvinylidene Fluoride-co-Hexafluoropropylene (PVDF-HFP) for Triboelectric Nanogenerator, *Integrated Ferroelectrics* 222(1), 2021, pp. 1-13.
13. N. Kantrong, K. Khongkaphet, N. Sitomsud, P. Lo-apirukkul, W. Phanprom, C. Rojviriya, P. Amonpattaratkit, W. Ariyakriangkai, Synchrotron radiation analysis of root dentin: the roles of fluoride and calcium ions in hydroxyapatite remineralization, *J. Synchrotron Rad* 29, 2022, pp. 496-504.

List of Figures

Fig. 1 The overall flow chart of TiO_2 and WO_3 preparation and characterizations.

Fig. 2 XRD pattern of TiO_2 and WO_3 after heat treatment at 450°C and 500°C .

Fig. 3 FE-SEM images of (a.) FTO glass, (b.) FTO/ TiO_2 and (c.) FTO/ WO_3

Fig. 4 The 3D Reconstruction of 7 glasses with the gradient color for identify the density and the dipping particles (a) the FTO glass without dipping process, (b-d) the FTO with dipping TiO_2 particles for (b) 2 layers (c) 4 layers (d) 6 layers and (e-g) the FTO after dipping with WO_3 for (e) 2 layers (f) 4 layers (g) 6 layers, respectively.

Fig. 5 The light absorbance versus wavelength graph of FTO, (a.) FTO/ TiO_2 and (b.) FTO/ WO_3 at different number of coated layers.

Fig. 6 The light transmittance versus wavelength graph of FTO, (a.) FTO/ TiO_2 and (b.) FTO/ WO_3 at different number of coated layers.

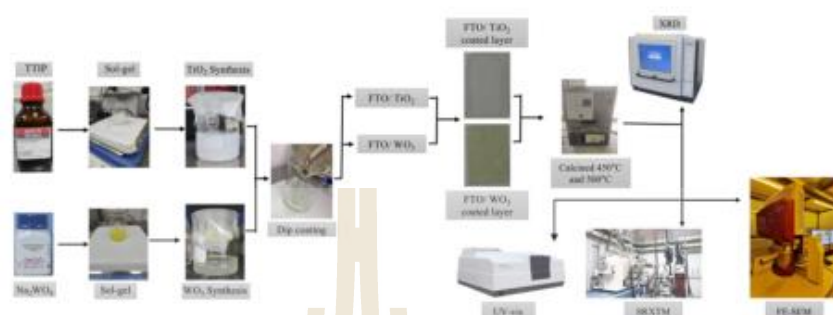


Fig. 1. The overall flow chart of TiO₂ and WO₃ preparation and characterizations

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

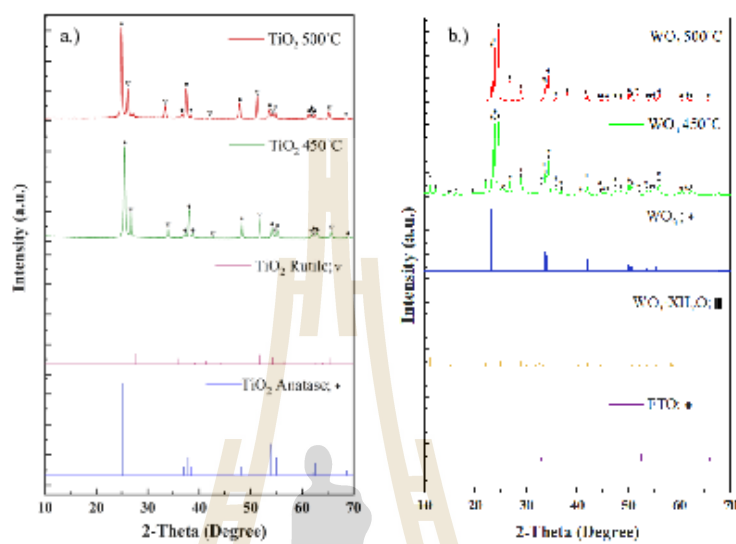


Fig. 2. XRD pattern of TiO_2 and WO_3 after heat treatment at 450°C and 500°C.

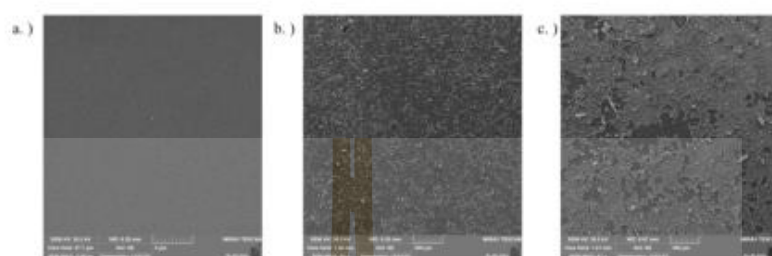


Fig. 3. FE-SEM images of (a.) FTO glass, (b.) FTO/TiO₂ and (c.) FTO/WO₃



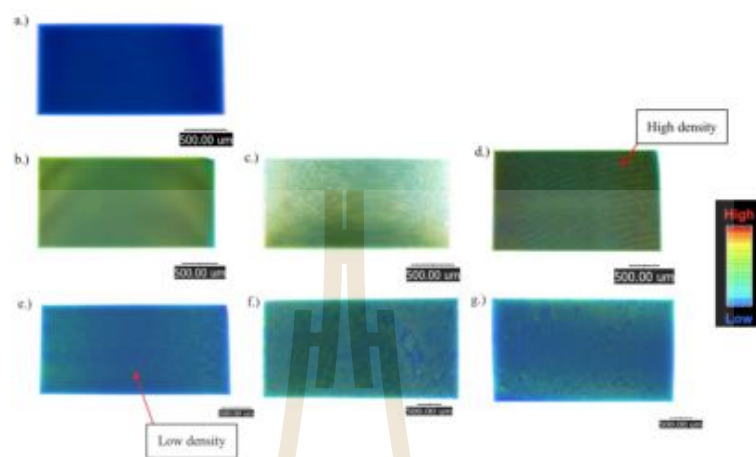


Fig. 4 The 3D Reconstruction of 7 glasses with the gradient color for identify the density and the dipping particles (a) the FTO glass without dipping process, (b-d) the FTO with dipping TiO_2 particles for (b) 2 layers (c) 4 layers (d) 6 layers and (e-g) the FTO after dipping with WO_3 for (e) 2 layers (f) 4 layers (g) 6 layers, respectively.

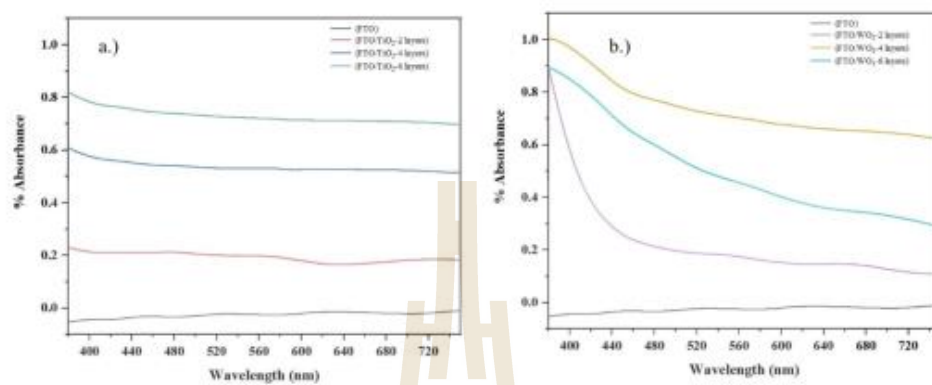


Fig. 5 The light absorbance versus wavelength graph of FTO, (a.) FTO/TiO₂ and (b.) FTO/WO₃ at different number of coated layers.

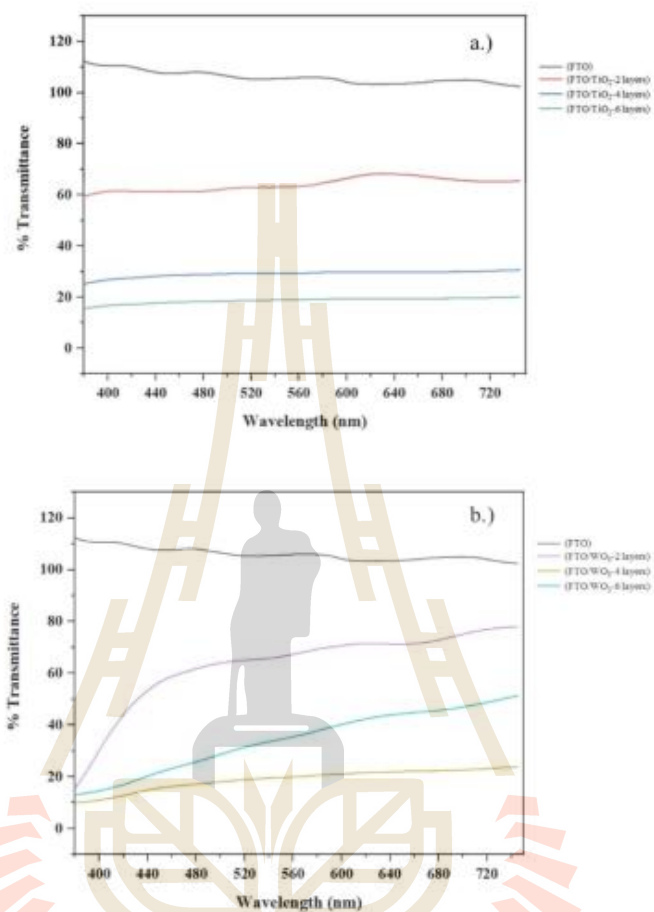


Fig. 6 The light transmittance versus wavelength graph of FTO, (a.) FTO/TiO₂ and (b.) FTO/WO₃ at different number of coated layers.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายไกรวุฒิ รุกขชาติ เกิดเมื่อวันที่ 9 สิงหาคม พ.ศ. 2540 ภูมิลำเนาอยู่ที่ บ้านโคกยางพัฒนา ตำบลอีสานเขต อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านโคกยาง จังหวัดบุรีรัมย์ ในปี พ.ศ. 2551 และได้เข้ารับการศึกษต่อในระดับมัธยมศึกษาตอนต้น และมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ จนสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา ในปี พ.ศ. 2558 หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาได้เข้ารับการศึกษต่อในระดับอุดมศึกษาจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2563

หลังสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีแล้ว ได้มีโอกาสเข้ารับการศึกษต่อในระดับบัณฑิตศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2563 โดยได้รับทุนการศึกษาจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุน OROG) และในระหว่างการศึกษาได้มีโอกาการทำงานด้านการวิจัยในฐานะนักศึกษาทุนผู้ช่วยนักวิจัยที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ประจำสถานีวิจัยที่ 1.2 ส่วนเทคนิคภาพโทโมกราฟี ทำให้เกิดการเรียนรู้และพัฒนาหลักการทำงานวิจัย ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัยได้รวมถึงได้มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการพิจารณาการตีพิมพ์และนำเสนอในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The 11th International Conference on Materials Science and Technology (MSAT-11), 29th-31st August 2022. (Online). [Oral Presentation] โดยรายละเอียดปรากฏในภาคผนวก ก.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี